



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



SUÉLLEN LOPES GUALBERTO

**TRATAMENTO DE FIBRAS DE SISAL COM
LIGNOSULFONATO PARA APRIMORAMENTO DAS
PROPRIEDADES DOS COMPÓSITOS DE
FIBROCIMENTO**

Uberlândia, 2020.

SUÉLLEN LOPES GUALBERTO

**TRATAMENTO DE FIBRAS DE SISAL COM
LIGNOSULFONATO PARA APRIMORAMENTO DAS
PROPRIEDADES DOS COMPÓSITOS DE FIBROCIMENTO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Construção civil

Orientador: Prof. Dr. Daniel Pasquini

Uberlândia, agosto de 2020.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

G899t
2020 Gualberto, Suéllen Lopes, 1991-
Tratamento de fibras de sisal com lignosulfonato para
aprimoramento das propriedades dos compósitos de fibrocimento
[recurso eletrônico] / Suéllen Lopes Gualberto. - 2020.

Orientador: Daniel Pasquini.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.3040>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Engenharia civil. I. Pasquini, Daniel, 1974-, (Orient.). II.
Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil. III. Título.

CDU: 624



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Civil				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 258, PPGE				
Data:	27 de agosto de 2020	Hora de início:	13:30 h	Hora de encerramento:	15:30 h
Matrícula do Discente:	11812ECV013				
Nome do Discente:	Suéllen Lopes Gualberto				
Título do Trabalho:	Tratamento de fibras de sisal com lignosulfonato para aprimoramento das propriedades dos compósitos de fibrocimento				
Área de concentração:	Estruturas e Construção civil				
Linha de pesquisa:	Construção Civil				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Novos materiais poliméricos e biocombustíveis derivados de fontes renováveis				

Reuniu-se, em sessão pública pela plataforma Conferência Web (MConf) provida pela Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, assim composta pelos Professores Doutores: Cristiane Medina Finzi Quintão – DEQUI/UFSJ, Harumi Otaguro – IQ/UFU e Daniel Pasquini – IQ/UFU orientador da candidata.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Daniel Pasquini, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público, e concedeu à Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Daniel Pasquini, Professor(a) do Magistério Superior**, em 27/08/2020, às 15:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Harumi Otaguro, Professor(a) do Magistério Superior**, em 27/08/2020, às 15:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Cristiane Medina Finzi Quintao, Usuário Externo**, em 27/08/2020, às 17:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2195506** e o código CRC **614A8BCD**.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a minha mãe, Maria do Carmo, pelo amor incondicional e apoio proporcionado ao longo desses anos, sempre me incentivando e apoiando minhas decisões. Também não poderia esquecer-me de agradecer a minha irmã, Jaqueline, e ao meu pai, João, pela torcida nesta jornada. Sou eternamente grata por todos os sacrifícios e por tudo em minha vida.

Ao meu orientador, Daniel, agradeço pelo incentivo, apoio, conselhos e ensinamentos. Ele foi uma pessoa extremamente importante para o meu crescimento acadêmico e pessoal. Agradeço também a Professora Leila, por toda a ajuda nos processos de execução experimental e todos os ensinamentos. Sem vocês não seria possível concluir esta jornada. Agradeço também a técnica do laboratório de materiais, Cristiane, por me auxiliar nos experimentos.

Agradeço as minhas amigas, Jéssica e Thais, que me deram apoio para não desistir desta jornada.

A FECIV e ao IQUFU, por disponibilizar os aparelhos e matérias para realização deste trabalho. E a empresa HLTS Engenharia que me permitiu cursar o mestrado e me deu tanto o apoio financeiro quando a liberação para que eu pudesse frequentar as aulas e ir ao laboratório.

RESUMO

Visando diminuir o impacto ambiental causado pela produção de fibrocimento a utilização de reforços com fibra de sisal vem se destacando, haja vista que além das propriedades mecânicas satisfatórias é um recurso renovável, porém fibras vegetais se degradam em meio alcalino. Como o lignosulfonato possui propriedades aglutinantes e é constituído por grupos polares e não-polares, acredita-se que ele pode melhorar a adesão fibra-matriz além de impermeabilizar a superfície da fibra impedindo que o teor básico do concreto degrade a célula vegetal. Dentro deste contexto, este trabalho visa estudar o comportamento do fibrocimento reforçado com fibra de sisal pura e as impregnadas com soluções aquosas de lignosulfonato com teores de 1%, 2% e 4% em massa de lignosulfonato em função da massa das fibras tratadas. Foram comparadas as propriedades mecânicas e morfológicas dos compósitos reforçados com as fibras. Para isto foram realizados ensaios nas fibras e nos compósitos por MEV, EDS e ensaio de absorção, além dos mecânicos de flexão dos compósitos aos 28 dias (cura úmida) e aos 90 e 180 dias (envelhecimento natural). As análises por MEV indicam que as fibras foram impregnadas com lignosulfonato. Os ensaios de EDS indicam uma diminuição do teor de cálcio nos compósitos à medida que aumenta a concentração de lignosulfonato. Os resultados mecânicos evidenciam que os compósitos com fibras impregnadas com 1% de lignosulfonato tem maior resistência à flexão (8 MPa) e uma menor absorção nas idades iniciais (2%), mesmo assim, todos tiveram uma diminuição de resistência aos 90 e 180 dias. Neste período os compósitos com fibra impregnada com 4% de lignosulfonato passam a ter a maior resistência à flexão (5%) em comparação aos demais compósitos e uma absorção maior (15%), mostrando as melhoras do efeito do lignosulfonato com o tempo. Observou-se também um ganho de 75% na tenacidade no compósito com fibra impregnada com 1% de lignosulfonato e de 60% no compósito com impregnação de 4% de lignosulfonato em comparação aos compósitos com fibra sem tratamento na idade envelhecida. Assim, o tratamento se mostra eficiente quanto a preservação da fibra para os compósitos impregnados com 4% de lignosulfonato.

Palavras-chave: Fibrocimento – Lignosulfonato – Fibras vegetais

ABSTRACT

Aiming to reduce the environmental impact caused by the production of fiber cement, the use of loading with sisal fiber comes and is highlighted, in view of what in addition to satisfactory mechanical properties is a renewable resource, but plant substances degrade in the alkaline environment. As lignosulfonate has binding properties and is made up of polar and non-polar groups, it is believed that it can improve fiber-matrix adhesion in addition to waterproofing the fiber surface, preventing the basic alkali content of concrete degrading the plant cell. Within this context, this work aims to study the behavior of fiber reinforced cementitious composites with pure sisal fiber and impregnated with lignosulfonate aqueous solutions containing 1%, 2% and 4% of lignosulfonate in mass with respect to the treated fiber mass. The mechanical properties of the composites (CPs) were evaluated and the morphological characteristics of CPs and fibers were investigated. For this, tests were performed on the fibers and CPs by SEM and EDS, and by water absorption and bending tests of the CPs at 28 days (wet curing) and at 90 and 180 days (natural aging). The SEM images indicated that the fibers were impregnated with lignosulfonate, the EDS results indicate a decrease in the calcium content in the composites as the concentration of the lignosulfonate increases. The mechanical results showed that composites with fibers impregnated with 1% lignosulfonate solution have greater modulus of rupture (8Mpa) and less water absorption (2%) in the initial ages (28 days), even so, all had a decrease in Tensile Strength at 90 and 180 days. In this period, the CP prepared with fiber impregnated with 4% lignosulfonate solution has the greatest modulus of rupture (5%) in comparison to the other CPs and a greater water absorption (15%), showing the improvements of the lignosulfonate effect over time. There was also a 75% gain in toughness in CP with fiber impregnated with 1% lignosulfonate and 60% in CP with impregnation of 4% lignosulfonate compared to pure fiber in aged age. Thus, the treatment is efficient in terms of fiber preservation for CPs impregnated with 4% lignosulfonate.

Keywords: Fiber cement – Lignosulfonate – Vegetal fibers

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Classificação dos compósitos conforme o reforço.....	8
Figura 2: Gráfico de carga-deslocamento de ensaio à flexão em fibrocimento: a) sem fibras; b) com fibras.....	10
Figura 3: Compósito submetido a flexão (a): Compósito sem fibra, (b) Compósito com fibra, (c) Caminho da trinca através do compósito.....	12
Figura 4: Transferência de carga matriz-fibra	13
Figura 5: Orientação das fibras do compósito; (a) Fibras longas alinhadas; (b) fibras curtas aleatórias; (c) Fibras curtas alinhadas; (d) Fibras longas em duas direções.....	14
Figura 6: Produção da fibra de sisal: A) Plantio, B) Corte das folhas, C) Desfibramento; D) Lavagem, E) Secagem	20
Figura 7: Composição da fibra lignocelulósica	22
Figura 8: Representação esquemática da molécula de celulose. Entre colchetes temos a unidade de celobiose.....	23
Figura 9: Monômeros das hemiceluloses	23
Figura 10: Representação estrutural dos monômeros: A) monômeros precursores da lignina B) esquema estrutural da lignina de folhosas.	24
Figura 11: Absorção de água por tratamento térmico	29
Figura 12: Organograma do planejamento experimental.	30
Figura 13: Esquema de mistura e fabricação dos compósitos	33
Figura 14: Disposição dos corpos de provas para envelhecimento.	34
Figura 15: MEV DAS FIBRAS: A) FNAT, B) F1, C) F2, D) F4. Imagens da esquerda: ampliação de 2.000X; Imagens da direita: ampliação de 250X.	38
Figura 16: Ensaio de absorção de umidade das fibras.....	41
Figura 17: MEV de fibrocimento aos 28 dias: A) CP-FNAT, B) CP-F1, C) CP-F2, D) CP-F4. Ampliação de 400x.....	42
Figura 18: MEV de fibrocimento aos 90 dias: A) CP-FNAT, B) CP-F1, C) CP-F2, D) CP-F4. Ampliação de 400x.....	43
Figura 19: MEV dos compósitos aos 180 dias: A) CP-FNAT, B) CP-F1, C) CP-F2, D) CP-F4. Ampliação de 400x.....	44
Figura 20: EDS 28 dias e as distribuição dos elementos cálcio, alumínio e silício: A) CP-FNAT, B) CP-F1, C) CP-F2, D) CP-F4. Ampliação de 1.000x.....	45

Figura 21: EDS 90 dias e as distribuição dos elementos cálcio, alumínio e sílica: A) CP-FNAT, B) CP-F1, C) CP-F2, D) CP-F4. Ampliação de 1.000x.....	48
Figura 22: EDS 180 dias: A) CP-FNAT, B) CP-F1, C) CP-F2, D) CP-F4. Ampliação de 1.000x.	50
Figura 23: Módulo de Elasticidade (GPa) dos compósitos	54
Figura 24: Módulo de ruptura (MPa) dos compósitos.....	55
Figura 25: Tenacidade (Kj/mm ²) dos compósitos.	56
Figura 26: Absorção dos compósitos	57
Figura 27: Porosidade dos compósitos	58
Figura 28: Massa específica dos compósitos.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades físicas e mecânicas de algumas fibras	17
Tabela 2: Composição química de algumas fibras vegetais	21
Tabela 3: Propriedades mecânicas e composição química das fibras em diferentes tratamentos térmicos.....	28
Tabela 4: Composição das amostras obtidas pelo EDS.....	53

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO.....	ii
ABSTRACT	iii
LISTA DE FIGURAS.....	iv
LISTA DE TABELAS.....	vi
SUMÁRIO	vii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVO GERAL	5
1.1.1 Objetivos específicos	5
1.2 JUSTIFICATIVA	5
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	6
REVISÃO BIBLIOGRAFICA	7
2. Material compósito.....	7
2.1 MATRIZES CIMENTÍCIAS.....	8
2.1.1 Composição da matriz cimentícia.....	10
2.2 REFORÇO	11
2.2.1 REFORÇO COM FIBRA NATURAL.....	16
2.2.2 FIBRAS DE SISAL	20
2.2.3 Composição da fibra vegetal	21
2.3 MÉTODOS DE MODIFICAÇÃO DAS FIBRAS E DA MATRIZ.....	26
3. METODOLOGIA	30
3.1 Fibras de sisal	30
3.1.1 Impregnação das fibras com lignosulfonato	31
3.1.2 Análise microestrutural das fibras por MEV	31
3.1.3 Ensaio físico de absorção de umidade	32
3.2 Matriz cimentícia reforçada com fibras de sisal	32
3.2.1 Moldagem dos corpos-de-prova	32
3.2.2 Análise microestrutural dos compósitos por MEV	35
3.2.3 Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS).....	35
3.2.4 Ensaios mecânicos de flexão	36

3.2.5	Ensaios físicos absorção de água e porosidade.....	36
3.3	Análise estatística	37
4.	Resultados	38
4.1	Fibras de sisal	38
4.1.1	Análise microestrutural das fibras de sisal por MEV	38
4.1.2	Ensaios de absorção de umidade	40
4.2	Análise da matriz cimentícia reforçada com fibras	41
4.2.1	Análise microestrutural dos compósitos por MEV	41
4.2.2	Análises de raios X por dispersão de energia (EDS)	45
4.2.3	Ensaios mecânicos de Flexão	53
4.2.4	Ensaios físicos de absorção e porosidade	57
	CONCLUSÃO	59
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
	ANEXO	72

1. INTRODUÇÃO

Desde o início do processo de industrialização, o homem produz resíduos sob diferentes formas. Em geral, a produção de bens de consumo duráveis (edifícios, pontes e estradas) ou não-duráveis (embalagens descartáveis, alimentos) se dá através da utilização de matérias-primas não-renováveis de origem natural. Este modelo não apresentava problemas significativos devido à combinação entre dois fatores: abundância de recursos naturais e uma pequena quantidade de pessoas incorporadas à sociedade de consumo (JOHN, 1999; JOHN, 2000; CURWELL; COOPER, 1998; GÜNTHER, 2000).

Porém, o ritmo acelerado de urbanização pós Segunda Guerra, implicou numa inadequada e intensa utilização dos recursos naturais, trazendo consigo uma importante degradação ambiental. Segundo Formigoni (2007), o crescimento urbano seguido do crescimento demográfico desencadeou uma ampla mudança no estilo de vida da sociedade moderna, que passou a consumir os produtos industrializados de forma irracional.

Dessa forma, a geração de resíduos, a escassez de recursos, o consumo de energia e a emissão de gases tornaram-se uma questão importante, surgindo daí a necessidade de se estudar novas formas de produção que fossem sustentáveis (JOHN, 1999; JOHN, 2000; BRITO, 1999; GÜNTHER, 2000; PINTO, 1999). Nesse cenário, a ideia de desenvolvimento sustentável passou a ser largamente discutida e cada vez mais pertinente em todos os setores da sociedade, sobretudo na Indústria da Construção Civil.

Considerada como o principal exemplo de degradação ambiental de responsabilidade integralmente humana (SÁNCHEZ, 2013), a Indústria da Construção Civil é responsável por cerca de 60% dos resíduos sólidos lançados nos centros urbanos brasileiros, além dos desperdícios resultantes de seus processos construtivos, que giram em torno de 25% (ABRELPE, 2018).

As atividades ligadas a construção civil, com frequência, alteram as condições ambientais. Os impactos negativos causados por esse setor podem estar no processo de extração de matérias-primas, na fabricação dos materiais, na execução das obras civis e até na disposição dos seus resíduos finais. Por isso, a descoberta de novas alternativas mais

sustentáveis para o desenvolvimento desse setor é fundamental para o sucesso da sustentabilidade no planeta. Somado a essa questão, o elevado custo de transporte e energia para produção de materiais da construção civil também incentiva a procura de novas opções de insumos.

Nesse contexto, a fim de minimizar a geração de resíduos e o impacto da extração de recursos naturais para a fabricação dos materiais cimentícios, seus componentes passaram a ser substituídos por materiais renováveis. Sendo o fibrocimento a primeira matriz cimentícia a ser fabricada com intuito de produção em larga escala e muito utilizado até hoje, estudar formas de minimizar os impactos ambientais causados por ele se mostra viável.

O fibrocimento é um material cimentício muito utilizado na produção de telhas e caixas d'água e, em sua forma original, é composto por cimento, amianto e água.

O amianto é uma fibra mineral encontrada no solo geralmente em formações rochosas, e que está presente com uma concentração de cerca de 10% em massa neste compósito cimentício com a finalidade de reforçar a matriz frágil. Porém, esta fibra mineral está relacionada com o aparecimento de doenças como a asbestose pulmonar, câncer de pulmão e mesotelioma maligno, quando se tem um período de exposição de 20 a 50 anos (AZUMA et al., 2009; BARTRIP, 2004; IKAI et al., 2010; KUMAGAI; KURUMATANI, 2010; LINTON et al., 2012).

Desta maneira, para promover o reforço da matriz cimentícia, vem crescendo a substituição das fibras de amianto por sintéticas e de fibras sintéticas por fibras naturais, onde as propriedades físicas e mecânicas dos compósitos são preservadas ou melhoradas. (IZQUIERDO, 2011; GOMES, VISCONTE, PACHECO, 2013). Assim, a substituição da fibra de amianto pelas fibras vegetais como reforço das matrizes frágeis a base de materiais cimentícios, tornou-se uma opção viável, pois além de serem biodegradáveis, são renováveis, não fazem mal a saúde, apresentam grande disponibilidade, possuem baixo custo de produção e menor energia de produção. (SAVASTANO, 2000; SILVA et al., 2009; ONUAGULUCHI; BANTHIA, 2016).

As fibras mais utilizadas como reforço no Brasil são: sisal, coco, curauá, bambu, pinus, eucalipto e bananeira. (ESMERALDO, 2006). O sisal é produzido no país na região nordeste, sendo cultivada no Brasil a espécie *Agave Sisalana*, principalmente nos estados da Bahia, Paraíba e Rio Grande do Norte, responsáveis, respectivamente, por 93%, 4% e 3% da produção nacional, dos quais 85% é exportado (BRASIL, 2019). A atividade sisaleira é responsável pela subsistência das famílias nestas regiões e pela renda de 700.000 pessoas, em cerca de 20 municípios baianos, além disso, corresponde a 70% da produção mundial de fibras de sisal (CARNEIRO, 2017).

Dentro deste contexto, este trabalho visa estudar o comportamento do fibrocimento reforçado com fibra de sisal impregnado com lignosulfonato, visando diminuir a absorção das fibras para preservar suas propriedades e assim melhorar as propriedades mecânicas do compósito. A utilização do sisal como reforço de matrizes cimentícias vem ganhando espaço, uma vez que suas propriedades mecânicas se mostram satisfatórias, além das vantagens econômicas e ambientais. (CARNEIRO, 2017).

Embora o uso de fibras vegetais seja considerado uma opção viável na produção de fibrocimentos, a alcalinidade da matriz, que é gerada pelos produtos de hidratação do cimento, como o hidróxido de cálcio, silicatos e aluminatos de cálcio, degrada as fibras fazendo com que o compósito perca as propriedades físicas e químicas desejadas e diminua a durabilidade (ARDANUY, CLARAMUNT, TOLEDO FILHO, 2015). Além disso, o caráter higroscópico das fibras pode retirar água da mistura prejudicando a hidratação do cimento e causando retardo no tempo de pega. (SAWSEM et al., 2015; CHAFEI et al., 2014; PEREIRA et al. 2013).

Outro problema encontrado na utilização das fibras vegetais é a higroscopicidade, que gera uma instabilidade dimensional e retira água da pasta de cimento fazendo com que o compósito tenha menor durabilidade (SAWSEN et al., 2015; CHAFEI et al., 2014). A fim de minimizar a deterioração dos componentes macromoleculares das fibras e diminuir sua permeabilidade são utilizados tratamentos superficiais químicos, físicos, mecânicos e suas combinações que melhoram também a adesão entre fibra-matriz. (SILVA, 2015)

Um dos tratamentos utilizados é o químico, que atua tanto na superfície da fibra como nas camadas internas por meio da modificação das mesmas. São exemplos deste tratamento o processo alcalino de mercerização, as reações com isocianetos, as reações de esterificação, as reações de acetilação, dentre outros (PAULA, 2011; SILVA, 2015). Outro tratamento é o físico, este atua na superfície da fibra, cujos meios mais utilizados são por descargas elétricas por corona ou plasma, ou por meio de tratamentos térmicos e adição de polímeros. Onde a utilização de polímeros como tratamento de fibras naturais por meio do revestimento das fibras por adsorção é uma opção viável devido simplicidade do processo (SILVA et al., 2019).

A celulose é o polímero de maior quantidade das plantas, sendo extraído por meio do processo deslignificação ou polpação que consiste na separação das fibras do tecido vegetal, tendo como subproduto a lignina (SHREVE, BRINK, 1980; D' ALMEIDA et al., 2013, SILVA, 2017). As fibras de celulose também possuem características interessantes para reforço de compósitos, como o elevado módulo de elasticidade, baixa densidade, alta resistência mecânica e rigidez. (CORREA, 2015).

O processo de polpação mais utilizado industrialmente é o Kraft, que produz lignina com características que dificultam sua utilização para outras finalidades. Por outro lado, temos o processo industrial sulfito que tem como subproduto o lignosulfonato que possui propriedades aglutinantes e é utilizado industrialmente como retardador de pega, além de fornecer plasticidade e fluidez a mistura (DOHERTY; MOUSAVIOUN; FELLOWS, 2011; SILVA, 2016).

O lignosulfonato é o único subproduto da lignina utilizado em larga escala na indústria, especialmente na construção civil, visto que suas características plastificantes reduzem a quantidade de água de amassamento. Além disso, possuiu grupos polares e não-polares o que pode melhorar a adesão da matriz à fibra, além de impermeabilizar a superfície da mesma impedindo que o teor básico do concreto degrade a célula vegetal (ACHA; MARCOVICH; REBOREDO, 2009).

Por fim, além de uma redução significativa do custo energético em seu processamento, os materiais naturais são oriundos de fontes renováveis e biodegradáveis. Dessa forma, este

trabalho visa analisar as propriedades físicas e mecânicas das fibras impregnadas com lignosulfonato para reforço de fibrocimento.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste estudo foi avaliar o tratamento por impregnação de fibras de sisal com lignosulfonato e sua aplicação em compósitos de matriz cimentícia, analisando as mudanças nas características físicas e mecânicas do fibrocimento.

1.1.1 *Objetivos específicos*

Dentre os objetivos específicos, propõe-se:

- Modificar fisicamente as fibras vegetais de sisal por impregnação de lignosulfonato e analisar se o tratamento influencia as propriedades físicas e mecânicas das fibras;
- Comparar as propriedades físicas e mecânicas do fibrocimento moldadas com fibras de sisal sem e com tratamento aos 28 dias com as propriedades destes compósitos envelhecidos naturalmente com 90 e 180 dias;
- Avaliar a microestrutura das fibras e dos compósitos nas primeiras idades (28 dias) e após o envelhecimento (90 e 180 dias);

1.2 JUSTIFICATIVA

Essa pesquisa justifica-se pela relação entre a necessidade crescente de preservação do meio ambiente e à grandiosidade dos impactos causados pela construção civil. A fibra natural de sisal, além de proporcionar o aumento de renda de quem a produz, é biodegradável e natural, produzindo pouco impacto ambiental. Por isso, o uso de fibras de sisal como matéria-prima se mostra uma alternativa viável para substituir fibras de reforço em matrizes cimentícias.

No entanto, faz-se necessário novos estudos que verifiquem a durabilidade da fibra em meio alcalino, reduza sua absorção de água e aprimore a ancoragem fibra-matriz, garantindo um melhor aproveitamento das propriedades do compósito. Nesse contexto, o lignosulfonato surge como uma alternativa, uma vez que é um polímero solúvel em água, utilizado largamente na indústria devido suas propriedades aglutinantes, emulsificantes, dispersantes e resinas de trocas iônicas (TEJADO et al., 2007).

Isto posto, o lignosulfonato na interface matriz-fibra pode melhorar as propriedades de adesão permitindo uma melhor ancoragem, além de dar um caráter hidrofóbico às fibras evitando que haja migração de compostos alcalinos para o interior da fibra e, assim, protegendo as fibras de ataques dos álcalis. Deste modo, os compósitos cimentícios não-estruturais, como coberturas, elementos pré-moldados, paredes divisórias, caixas d'água, dentre outros, terão uma maior vida útil com menor impacto ambiental.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é composto por cinco capítulos. No capítulo 1, apresenta-se uma introdução, com os objetivos do estudo e a justificativa da sua relevância. Adiante, no capítulo 2, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre materiais compósitos, fibras vegetais, tratamentos em reforço para matriz e lignosulfonato. No capítulo 3, será exposto o organograma com a descrição dos ensaios realizados bem como materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento deste estudo. Em seguida, no capítulo 4 do trabalho, são apresentados os resultados obtidos e, por último, no capítulo 5, tem-se as considerações finais do trabalho.

REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2. MATERIAL COMPÓSITO

Material compósito é a mistura de dois ou mais materiais diferentes em forma ou composição química que são insolúveis entre si e possuem propriedades distintas e formam uma mistura heterogênea. Esta ligação tem por finalidade combinar as propriedades dos elementos que não conseguem respostas satisfatórias aos objetivos desejados de maneira isolada (CALLISTER JR, 2003; SMITH, 1998).

O compósito possui no mínimo duas fases: a matriz e a fase dispersa (também chamada de reforço). A primeira fase é a parte contínua do compósito que confere a estrutura ao material e envolve o reforço mantendo-o na posição desejada, e pode ser formada por metal, cerâmica ou polímero. A segunda, fase dispersa, tem origem natural ou sintética e, geralmente, promove força e rigidez, sendo dividida quanto a sua geometria, orientação e dispersão do material na matriz. E a interface apresenta características distintas das duas fases e deve garantir a aderência entre elas para que não ocorra deslizamento das fibras, e impeça que o compósito atinja as propriedades desejadas na mistura (VENTURA, 2009).

Portanto, as propriedades dos compósitos dependem das propriedades individuais da matriz e do reforço, da natureza da interface e da geometria da fase dispersa. Assim sendo, a escolha dos materiais é fundamental para garantir as propriedades desejadas, bem como assegurar uma boa aderência entre as duas. Deste modo, para formar um material compósito é necessário definir quais características serão destacadas e quais serão minimizadas (LEVI NETO; PARDINI, 2006; CALLISTER JR, 2003).

Como as fases do compósito são quimicamente distintas entre si e formam uma interface diferente com cada material, a força de ligação depende, também, da interação química entre elas, assim a composição química não só da matriz como da fibra precisam ser analisadas (HAMAD, 1995; CALLISTER JR, 2003; SILVA; GARCEZ, 2010). Além disso, a interface possui propriedades distintas das fases do compósito e por isso entre cada material pode ser considerada uma terceira fase.

Os compósitos são classificados de acordo com o material da matriz ou pelo tipo de reforço. Assim, de acordo com Callister Jr (2003), os compósitos podem ser classificados conforme o reforço que a mistura apresenta em três tipos: os compósitos particulados como, por exemplo, o concreto, os compósitos reforçados com fibras e os compósitos estruturais como os fibrocimentos reforçados com fibras ou lâminas/ camadas respectivamente. A classificação utilizada está representada na Figura 1.

Figura 1: Classificação dos compósitos conforme o reforço.



Fonte: Callister Jr (2003, adaptado).

Quanto às matrizes tem-se a matriz polimérica que pode ser termorrígidas ou termoplásticas cujas vantagens são a alta rigidez e fácil processamento; as matrizes cerâmicas que possuem baixa densidade, alta rigidez, isolamento elétrico, baixa tenacidade e é pouco resistente a danos; as metálicas que por sua vez têm elevada rigidez, resistência e condutividade térmica, são dúcteis e tolerantes aos danos. Além desta, alguns autores classificam ainda as matrizes de carbono cujas características são a baixa densidade, alta rigidez, baixa expansão térmica, porém tem o processamento difícil (PARDINI; GONÇALVES, 2009).

2.1 MATRIZES CIMENTÍCIAS

As matrizes podem ser divididas em metálicas, cerâmicas, poliméricas ou carbonosas. A matriz cerâmica mais utilizada na construção civil é a matriz cimentícia, cuja principal característica é a baixa resistência à tração, caracterizando um comportamento frágil, e o

módulo de elasticidade moderado (SILVA; GARCEZ, 2010). As matrizes mais utilizadas são as cimentícias, as de cal e as de gesso, sendo a primeira, a base de cimento Portland, a mais utilizada e se apresenta na forma de pasta, argamassa ou concreto (SILVA; MARQUES E FORNARI JR., 2012).

Esta utilização em larga escala deve-se ao fato de os materiais feitos a base de cimento Portland serem duráveis, moldáveis nas mais diversas formas, resistentes a água e a elevadas temperaturas possuem baixo custo e pela vasta disponibilidade do material (MEHTA E MONTEIRO, 2014). Além disso, o cimento tem propriedades variadas dependendo do tipo de adição utilizada em seu preparo podendo, assim, ser utilizado nas mais diversas aplicações e nos mais variados ambientes.

Todavia, os materiais cimentícios são considerados heterogêneos e frágeis o que leva a suportarem pequenas deformações e pequena tensão de tração, podendo levar o material a uma ruptura abrupta quando não reforçados (DESNERC; LEES; MORLEY, 2015).

Segundo Mehta e Monteiro (2014), esta baixa resistência à tração dos materiais cimentícios é causada pela união das microfissuras existentes na interface. Pois, quando se inicia um novo ciclo de carregamento a seção das fissuras é reduzida, causando um aumento das tensões em suas extremidades e levando à união delas. Tendo em vista que a propagação de fissuras se dá na direção transversal a direção principal de tensão, existe uma dificuldade de impedir sua propagação, assim, o compósito rompe-se por tração.

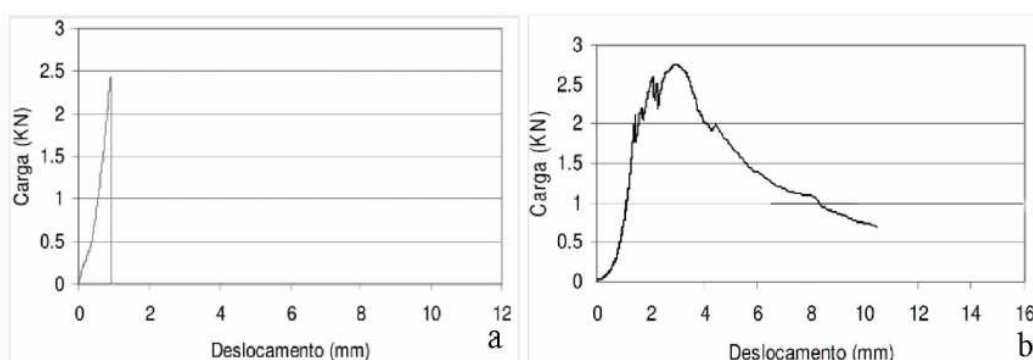
Ainda segundo Silva (2002) este comportamento frágil da matriz dificulta não só a resistência às solicitações de tração como também a resistência às cargas dinâmicas. E para suprir esta deficiência da pasta de cimento, que será solicitado de diversas formas, surge a necessidade de reforçar o material, levando-se em consideração as dimensões e massas do reforço utilizado em relação a sua aplicação.

Assim, quando as matrizes cimentícias são associadas ao reforço têm suas propriedades como a tenacidade e ductilidade melhoradas além de aumentar a resistência à tração e a fadiga. Essa melhora nas propriedades se deve ao fato de que a inserção de materiais

fibrosos diminui a quantidade de fissuras e a velocidade de propagação das mesmas (CARATIN, 2014).

Também é observada uma melhora nas propriedades mecânicas mesmo após o início da fissuração, levando o material a uma deformação plástica considerável, como mostrado no gráfico de carga-deslocamento do ensaio de flexão (Figura 2) que representa este ganho de plasticidade da matriz (AGOPYAN, 1991; FARRAPO, 2015). Outros estudos mostram que ocorre também uma menor retração plástica nas primeiras idades (TOLEDO FILHO et al., 2005).

Figura 2: Gráfico de carga-deslocamento de ensaio à flexão em fibrocimento: a) sem fibras; b) com fibras.



Fonte: Pimentel et. al., 2016

A retração é um processo físico-químico que acarreta na variação volumétrica do compósito devido a perda de água no estado fresco ou no estado endurecido, prejudicando, assim, sua durabilidade os materiais cimentícios. Este fenômeno pode ser dividido em plásticas, autógenas, por carbonatação e por secagem, tendo como principal causa a hidratação do cimento anidro e sendo responsável pela formação de fissuras nas matrizes cimentícias (MAZZOLI; MONOSI; PLESCIA, 2015; MEHTA; MONTEIRO, 2014; WITTMANN, BELTZUNG E ZHAO, 2009).

2.1.1 Composição da matriz cimentícia

As características das matrizes cimentícias são decorrentes dos seus componentes, quantidades de cimento, água de amassamento, impurezas e agregados. Como nos

fibrocimentos o principal constituinte da matriz cimentícia é o cimento Portland suas propriedades dependem intrinsecamente da composição deste material.

Segundo Senff, Folgueras e Hotza (2005), os principais elementos alumínio (Al), sílica (Si), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) que compõe o cimento Portland definem características importantes da matriz. Além disso, por ser um aglomerante hidráulico ao se misturar a água permite a aglutinação das partículas existentes promovendo o endurecimento da pasta de cimento e uma resistência à ação da mesma.

O cimento Portland é oriundo da moagem do clínquer, este é obtido da queima do calcário misturado a argila e adições como escoria, *filler*, pozolana e gesso. Após este processo o material fica reativo na presença de água, gerando uma mistura pastosa que é moldável, em seguida ocorre o endurecimento com uma elevada resistência e durabilidade (GUIA BASICO DE UTILIZAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND, 2002).

Os principais produtos da hidratação são o silicato de cálcio (CaSiO_3), hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) e sulfoaluminato de cálcio. O Ca(OH)_2 é oriundo da cal livre e das reações de hidratação dos silicatos, sendo o responsável pelo teor alcalino do concreto, além do que, não contribui para diminuição da resistência, pois aumenta a permeabilidade da pasta (SENFF; FOLGUERAS; HOTZA, 2005).

Em compósitos cimentícios, a hidratação do cimento pode gerar o acúmulo de grandes cristais de Ca(OH)_2 (Portlandita), que se acumulam nas proximidades das fibras, dificultando, assim, a ancoragem entre a matriz e o reforço, isto aumenta o número de poros e cria um plano preferencial de ruptura. Além disso, o meio básico criado pela presença de Ca(OH)_2 aumenta a deterioração das fibras e a passivação da armadura. (SILVA, 2002; SILVA, 2005).

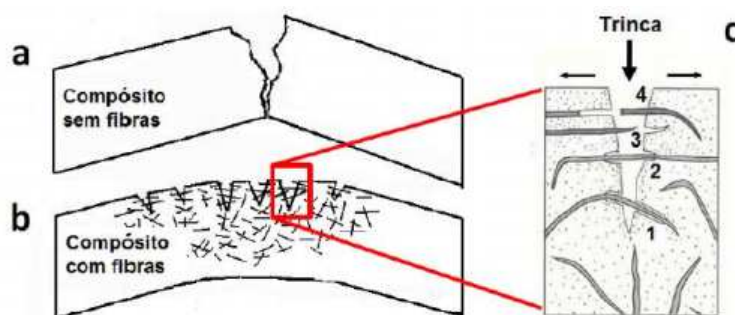
2.2 REFORÇO

Os compósitos a base de cimento como o concreto, argamassa e fibrocimento podem ser reforçados com adição de fibras, principalmente na produção de pré-moldados. Eles são

produzidos, em grande parte, utilizando aço e amianto (também chamado de asbesto) mesmo com uma infinidade de fibras de origem natural que servem para reforçar (ARRUDA FILHO et. al, 2012). Porém, hoje em dia, vem crescendo a busca pela melhoria dos sistemas construtivos e utilização de matérias-primas renováveis e com menor consumo de energia.

As fibras são utilizadas a fim de minimizar as fissuras existentes na matriz de cimento, pois elas criam uma pressão de fechamento impedindo a propagação das trincas e reduzindo o tamanho das fissuras durante a flexão (Figura 3), os resultados podem ser obtidos a níveis macro ou microscópicos onde variam de acordo com o tipo de reforço. Sendo assim, para obter o resultado desejado, as características do material de reforço como o comprimento, a espessura e a forma que estão dispersas na pasta devem ser levadas em consideração (AKKAYA; PELED; SHAH, 2000; FIGUEIREDO, 2000).

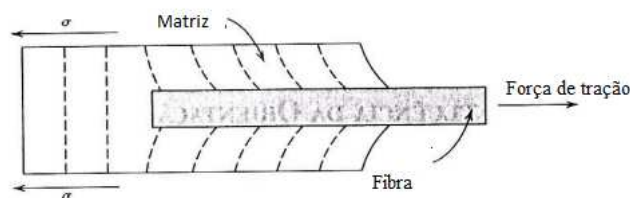
Figura 3: Compósito submetido a flexão (a): Compósito sem fibra, (b) Compósito com fibra, (c) Caminho da trinca através do compósito



Fonte: Silva (2015, adaptado)

As propriedades dos compósitos dependem também da interface matriz-fibra, assim, para que ocorra aderência de forma satisfatória a interação depende de fatores como o atrito, a ancoragem, e adesão físico-química entre os materiais (MEDEIROS, 2012). Silva (2002) acrescenta que para garantir a ancoragem o tamanho das fibras utilizadas é crucial, pois estas funcionam como pontes que interligam os vazios da pasta de cimento promovendo a transferência de carga na matriz quando a peça é solicitada conforme Figura 4.

Figura 4: Transferência de carga matriz-fibra



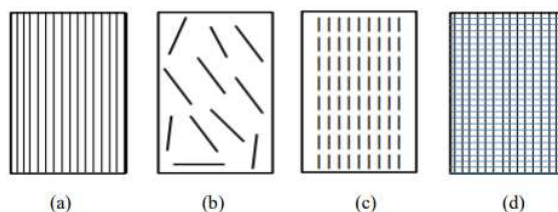
Fonte: Sales (2015, adaptado)

Para isso, a fibra precisa ter tamanho crítico (l_c), ou seja, o comprimento mínimo necessário para que suporte a tensão solicitante do material sem romper. Se o comprimento adotado for menor que o crítico a fibra não será solicitada, mas sim arrancada preservando a tenacidade do compósito e se o l_c for maior a fibra sofre ruptura e não reforça o concreto. Assim, quanto mais próximo do tamanho crítico menor será a formação de fissuras e maior a resistência da matriz de cimento (AKKAYA; PELED; SHAH, 2000).

A resistência do fibrocimento também aumenta quanto maior a razão entre comprimento e diâmetro (razão de aspecto), pois as fibras normalmente rompem devido a imperfeições em suas superfícies. Deste modo quando menor a área superficial menor a probabilidade de fratura quando submetida a uma carga. Então para que a razão de aspecto seja menor pode-se considerar uma fibra com diâmetro pequeno ou aumentar o tamanho da fibra desde que não ultrapasse o comprimento crítico (ASKELAND, 1994; FIGUEIREDO, CHAMANEIRO, FARIA, 2008).

Segundo Leão (2012) a disposição das fibras na matriz também influencia nas propriedades do compósito, elas podem ser classificadas em longas, curtas, orientadas aleatoriamente ou alinhadas (Figura 5). De acordo com Callister Jr (2003), as fibras contínuas (longas) têm tamanhos 15 vezes o valor do l_c o que permite melhoria significativa na resistência do compósito. A Figura 5 mostra alguns casos de reforço de acordo com o arranjo das fibras.

Figura 5: Orientação das fibras do compósito; (a) Fibras longas alinhadas; (b) fibras curtas aleatórias; (c) Fibras curtas alinhadas; (d) Fibras longas em duas direções.



Fonte: Leão(2012)

Segundo Figueiredo (2000), quando o tamanho utilizado é menor que o crítico, pode ocorrer o arrancamento, onde ao solicitar a peça na direção perpendicular à posição das fibras, elas serão arrancadas do lado onde tiver o menor tamanho embutido. Isto promove um aumento da deformação e a propagação de fissuras e não gera o reforço satisfatório da matriz.

O acréscimo de fibras na mistura da pasta de cimento tem se mostrado um meio eficaz para melhoria das propriedades mecânicas, devido à transferência de tensões, promovendo aumento da resistência mecânica, tenacidade, resistência à fadiga, resistência ao impacto e à ductilidade (SALVADOR; FIGUEIREDO, 2013). Porém, é necessário que a quantidade de fibra utilizada na pasta seja menor que 80% em volume, visto que as fibras precisam ser completamente envolvidas (ASKELAND, 1998).

Segundo Araújo et al. (2014) a utilização de fibras de aço na mistura mostra-se mais eficaz que o reforço convencional pois consegue-se um pequeno espaçamento entre as três direções da estrutura, o que reforça a estrutura como um todo, diminuindo os efeitos do cisalhamento e da tração. Os ensaios de cisalhamento resultaram, para 1% de fibra de aço em um acréscimo de 87% da resistência ao cisalhamento e de 99% para 2% de fibras de aço.

Porém, um material frágil reforçado com aço possui uma aderência deficitária, visto que o aço não se liga quimicamente a matriz devido aos tratamentos superficiais realizados. Sendo assim, a união destes materiais aumenta a permeabilidade da matriz, deixando-o vulnerável às intempéries, com a ação da umidade e do oxigênio, promovendo a oxidação

do aço, o que deteriora a estrutura e diminui seu tempo de vida útil (PACHECO-TORGAL; JALALI, 2011).

Visto isto, teve início o estudo de novos materiais para reforço de fibrocimento. Segundo Salvador e Figueiredo (2013), a macrofibra polimérica representa o mesmo nível de resistência à compressão de um concreto reforçado com fibras de aço, desde que o traço utilizado seja equivalente. Mesmo utilizando uma quantidade maior de fibra polimérica que a de aço, a viabilidade é assegurada devido ao baixo custo e a diminuição da ação de corrosão e da carbonatação.

Além disso, os fibrocimentos são produzidos com a mistura de cimento, água e amianto como material de reforço que representa cerca de 10% da mistura, sendo utilizados na produção de telhas, caixas d'água, pré-moldados (NETO, et al., 2010; ARTIGAS, 2013). Porém, a Organização Mundial de Saúde considera o material cancerígeno devido aos malefícios causados quando o amianto é respirado, pois o indivíduo que tiver contato com o material pode desenvolver asbestose que evolui para câncer (IVANOV et al., 2006).

Mesmo assim, segundo o Instituto Brasileiro do Crisotila (2019), de todo fibrocimento produzido no país, cerca de 50% das telhas e 80% das caixas d'água são produzidas com amianto Crisotila gerando cerca de 170 mil empregos, cuja produção se destina principalmente às famílias de baixa renda. O Brasil é considerado um grande exportador de fibras de amianto, num mercado que movimenta cerca de 2,6 bilhões de dólares por ano. (MENDES, 2007; IBC, 2019).

Segundo Rossi et al. (2014), além do setor financeiro, o amianto tem propriedades mecânicas muito vantajosas, dentre elas a boa aderência a pasta de cimento que conduz ao aumento da durabilidade do compósito, tem alta resistência a tração, não oxida, tem alta flexibilidade, promove o isolamento termo-acústico e é encontrado com grande facilidade na natureza. Além do mais, as fibras do asbesto são constituídas por silicatos minerais fibrosos cristalinos, possui, portanto, características únicas (AZEVEDO, 2018).

Com a necessidade de substituir o amianto devido aos danos que provoca à saúde, surgiram as fibras artificiais feitas a base de polímeros derivados de petróleo que também possuem propriedades mecânicas desejáveis na produção de compósitos cimentícios, com destaque na construção civil das fibras de nylon, poliéster e polipropileno. (IZQUIERDO, 2011). Araújo, Falcão, Barbos (2005) salientam que a adição de fibras de polipropileno, nos blocos de concreto e argamassa de junta, melhora a distribuição de esforços o que contribui para o aumento da resistência a tração e compressão, e da capacidade de deformação.

Mesmo o uso de fibras sintéticas não sendo prejudicial à saúde, ele esbarra em dois fatores que se contrapõe às vertentes atuais da engenharia civil que são: o baixo custo e a sustentabilidade. Assim sendo, torna-se necessário viabilizar novas fibras de reforço que atendam as características mecânicas, químicas, termo-acústicas e econômicas obtidas com o amianto e com fibras sintéticas, isto faz das fibras vegetais uma opção atrativa para o setor de fibrocimento (SAVASTANO, 2000; IZQUIERDO, 2011).

2.2.1 REFORÇO COM FIBRA NATURAL

As fibras vegetais são oriundas de fonte renovável, tem baixo custo de produção e são produzidas em abundância no Brasil, por isso tem ampla empregabilidade nas mais diversas áreas econômicas, como na indústria da construção civil, naval, têxtil e na área da saúde. No que diz respeito à construção civil, especificamente aos fibrocimentos, existem diversos estudos na busca de substituição completa ou parcial das fibras sintéticas ou de amianto pelas fibras de bananeira, coco, juta, sisal, curauá, cana-de-açúcar, etc. (GONÇALVES et al. 2018; ESMERALDO, 2006; CARNEIRO, 2017).

Silva et al. (2009), afirmam que a grande disponibilidade das fibras em meio vegetal justifica sua utilização no preparo de compósitos, visto que tem boas propriedades mecânicas. Ademais, a demanda de fontes renováveis na produção dos compósitos, além de tornar o uso da fibra vegetal economicamente viável, promove o avanço tecnológico, agrega valor aos produtos da agroindústria e auxilia na redução da emissão de dióxido de carbono (CO₂).

Além disso, as fibras vegetais podem ser obtidas por meio de resíduos da agroindústria, sendo assim, além de reduzir o descarte também substitui uma fibra sintética que demandaria recursos para ser produzida. Contudo, as fibras vegetais vêm se destacando não apenas por ser uma tecnologia mais limpa que proporciona a redução de resíduos tóxicos na sua produção agroindustrial, mas também por ser técnica e economicamente viável (ARRUDA; ARRUDA; ARAÚJO, 2019; CARNEIRO, 2017).

Além do fato de ser abundante, outra justificativa para ser utilizado como reforço de matrizes cimentícias é o fato de possuírem baixa massa específica, o que permitem a execução de estruturas em concreto mais leves (ESMERALDO, 2006). Como pode ser observado na Tabela 1, a massa específica das fibras naturais possui a metade da massa específica da fibra de amianto. A Tabela 1 compara também outras propriedades de algumas das fibras naturais, amianto crisólita e polipropileno (GONÇALVES et al. 2018).

Tendo em vista que as propriedades mecânicas são o principal parâmetro tratando-se em reforço de matrizes cimentícias, as fibras vegetais tem resistência à tração maior quando comparados a algumas fibras utilizadas para esta finalidade, isto pode ser observado na Tabela 1. O mesmo ocorre com o valor do Módulo de elasticidade, por isso as fibras vegetais suportam uma maior tensão com menor variação dimensional (GONÇALVES et al. 2018).

Tabela 1: Propriedades físicas e mecânicas de algumas fibras

	Massa específica (kg/m³)	Absorção máxima (%)	Alongament o na ruptura (%)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Coco	1177	93,8	23,9-51,4	95-118	2,8
Sisal	1370	110	4,9-5,4	347-378	15,2
Malva	1409	182,2	5,2	160	17,4
Celulose	1200-1500	400	-	300-500	10-40
Juta	-	214	3,7-6,5	230	-
Piaçava	1054	34,4-108	6	143	5,6
Amianto crisólita	2200-2600	-	2	560-750	164
Polipropileno	913	-	22,3-26	250	2

Fonte: GONÇALVES et al. (2018, adaptado)

Silva et al. (2009) e Miranda et al. (2015) afirmam que além de proporcionarem a execução de peças mais esbeltas e possuírem propriedades físico-mecânicas elevadas, promovem um modo mais seguro de execução, pois não formam superfícies cortantes durante a ruptura de peças quando comparado ao uso de fibras de aço e vidro. Acrescentam, também, que estas fibras são menos abrasivas gerando um desgaste menor nos equipamentos envolvidos no processo.

Coelho (2017) mostrou, por meio de ensaios que aceleravam o envelhecimento, que fibrocimentos sem amianto com adição de fibras naturais, possuem uma menor absorvância (taxa de radiação solar absorvida), menor temperatura superficial e uma aparência mais clara. Esta variação de cor evidencia que o compósito cimentício sofreu um processo de menor carbonatação e eflorescência, visto que ao ser exposto ao sol eles promovem o escurecimento das telhas.

Picanço e Ghavami (2008) produziram argamassas reforçadas com Curauá para comparar seu desempenho mecânico de resistência à compressão com as fibras de amianto, sisal e juta. Mostraram que os compósitos com as fibras de Curauá apresentaram maior ductilidade, absorvendo maior energia e promovendo uma maior deformação, porém, apresentaram menor resistência. Além disso, os compósitos com fibras de 2,5cm e 3% de volume de pasta obtiveram os melhores resultados.

Fonseca (2016) comparou o desempenho do fibrocimento reforçado com fibras de juta, reforçadas com substituição proporcional das fibras por nanofibrilas de juta e reforçados totalmente com nanofibrilas. Assim, constatou que os corpos de prova reforçados com nanofibrilas apresentam uma maior absorção e uma maior quantidade de vazios que explica os baixos desempenhos de durabilidade e de desempenho mecânico.

Rossi et al. (2014) verificou que na produção de compósitos com fibras de cana-de-açúcar a resistência à flexão e à absorção são parâmetros básicos para produção de telhas de fibrocimento e atendem os padrões desejáveis. Observaram que a absorção de água teve uma média de 11%, sendo o limite aceitável de 37%, ou seja, tem um ótimo desempenho.

Farrapo (2015) ao comparar a durabilidade de telhas de fibrocimento reforçadas com poupa de sisal com as reforçadas com fibra de polipropileno, nas idades de 28 dias e 10 anos, observou que as telhas reforçadas com fibras sintéticas apresentam propriedades mecânicas melhores aos 10 anos, isto se deve ao fato delas não serem degradadas pela pasta de cimento. Vale ressaltar que as fibras naturais não foram totalmente degradadas ao longo do tempo no ensaio de carbonatação, mostrando que este processo pode ser uma alternativa para melhorar a durabilidade da fibra na matriz cimentícia.

Silva (1998) analisou a durabilidade do fibrocimento com adição de fibras de celulose por meio de ensaios que simulam a aceleração de envelhecimento, também determinou o comportamento físico e mecânico dos compósitos. Foi constatada a eficiência do emprego de celulose para melhorias das propriedades, porém, nas primeiras idades, o fibrocimento teve baixa resistência à tração devido a deficiência de hidratação da pasta.

Apesar dos benefícios citados, as fibras vegetais podem apresentar limitações relacionadas a sua inserção nas matrizes como, por exemplo, a baixa adesão, alta variabilidade de propriedades, baixa resistência térmica e um comportamento hidrofílico que propicia a entrada de material para o interior da fibra. Esta absorção da água da matriz gera a mineralização da fibra diminuindo seus benefícios além da degradação das interfaces o que promove a perda de durabilidade dos compósitos (CÉLINO et al., 2013; TONOLI et al., 2007).

Este caráter hidrofílico não somente leva água para o interior das fibras como também faz com que se aglomerem em sua superfície, ocasionando um enfraquecimento da zona de transição. Isto se deve a dois fatores, ou a água ficará aprisionada e depois será liberada com a secagem, causando retração, ou durante o processo de hidratação do cimento a água será absorvida pela pasta também formando micro fissuração na interface (TONOLI et al., 2007). Tendo isto em vista é necessário buscar formas de proteger as fibras dos danos causados pela absorção de água da matriz.

2.2.2 FIBRAS DE SISAL

A variedade nas propriedades das fibras naturais depende da natureza da planta, do seu local de origem, da idade e do tempo de colheita. O *Agave Sisalana* (sisal) tem seu primeiro corte aos 36 meses após o plantio, tendo um ciclo produtivo de 8 a 10 anos. O processo de fabricação as fibras (Figura 6) inicia no plantio e corte das folhas. Após o corte as folhas são transportadas e passam por um processo de desfibramento que deve ser feito em até 24 horas para evitar que as folhas murchem, logo após são imersas em água para limpeza da sua superfície e depois são secas ao sol, então passam por um escovamento para retirada das fibras curtas e do pó excedente (IOZZI, 2013).

Figura 6: Produção da fibra de sisal: A) Plantio, B) Corte das folhas, C) Desfibramento; D) Lavagem, E) Secagem



Fonte: Embrapa (2019)

A fibra de sisal é oriunda de regiões tropicais, sendo produzido em larga escala no Brasil e está entre as fibras mais utilizadas mundialmente, sendo quase 298,5 mil toneladas produzidas por ano apenas no Brasil (CSFN, 2018). A indústria sisaleira tem grande relevância socioeconômica na região semiárida brasileira, pois tem clima e solo favoráveis a produção do sisal e é fonte de subsistência para as famílias da região (IOZZI, 2013).

Tendo em vista que já é produzida e movimentada a economia regional do nordeste brasileiro, procurar novas aplicações para esta fibra mostra-se atrativo para a economia.

2.2.3 *Composição da fibra vegetal*

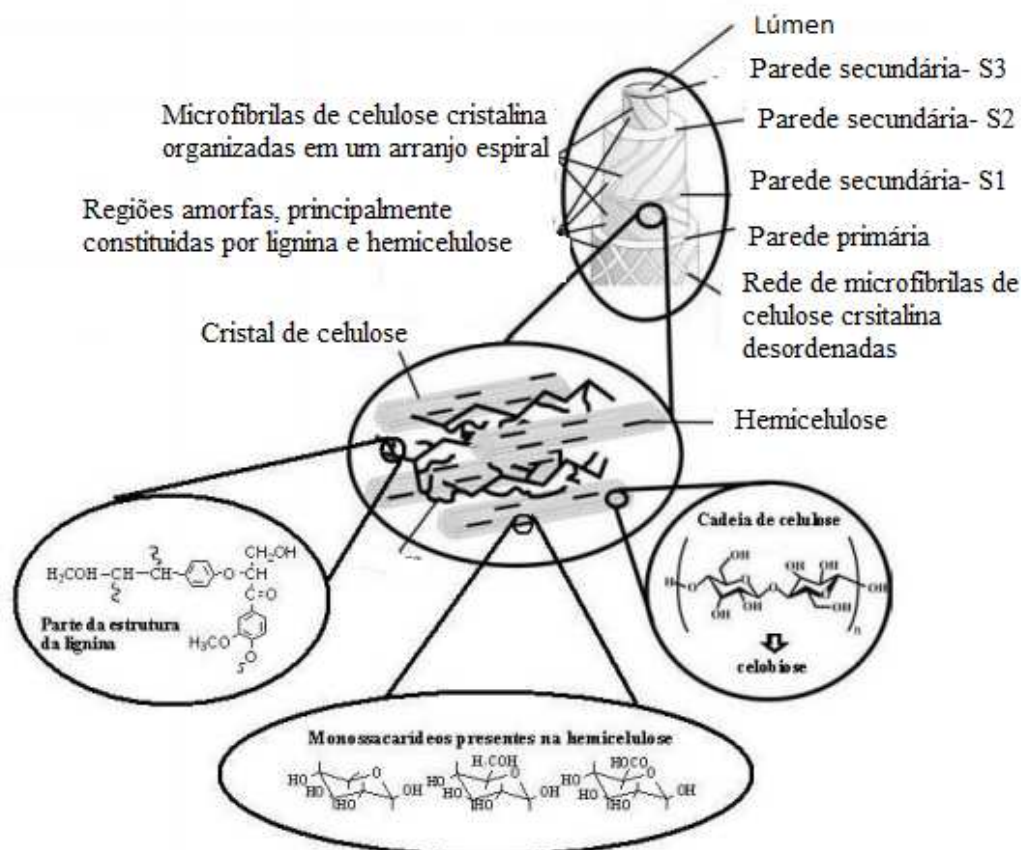
As fibras vegetais são formadas por microfibrilas dispostas de forma aleatória e compostas por espessuras diferentes. A fibra é composta por quatro camadas (Figura 7) de microfibrilas, sendo a primeira (parede primária), mais externa, constituída por celulose, pectina, hemiceluloses e proteínas envoltas por uma camada de lignina. As demais camadas (paredes secundárias) são denominadas de S1, S2 e S3, onde a S2 tem o maior teor de celulose é mais espessa e confere as fibras as características estruturais (SAVASTANO, 2000). As fibras vegetais são denominadas também como fibras lignocelulósicas e a Tabela 2 apresenta a composição química de algumas fibras vegetais.

Tabela 2: Composição química de algumas fibras vegetais

FIBRAS	% CELULOSE	% HEMICELULOSES	% LIGNINA
SISAL	73,10	14,20	11
COCO	36-43	15-25	41-45
BANANEIRA	60-65	6-8	5-10
PALHA DE CANA	40-44	30-32	22-25
PALHA DE MILHO	45	35	15

Fonte: Mussatto, Teixeira (2010, adaptado); Santos et al. (2012)

Figura 7: Composição da fibra lignocelulósica

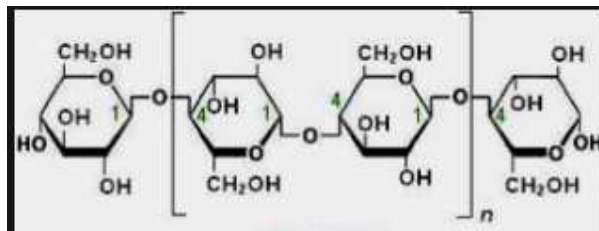


Fonte: Silva et al. (2009)

A celulose é o polímero natural mais abundante na natureza, com cerca de 50 bilhões de toneladas biosintetizadas por ano. A celulose é o principal constituinte de quase todas as fibras vegetais, sendo um polímero de cadeias lineares e com alta massa molar formada por várias unidades de β -D-glicose ligadas entre si por ligações glicosídicas β -1,4 (SILVA et al., 2009; FENGEL, WEGNER, 1984).

Na molécula deste polímero apresentam para cada unidade de glicose três grupos de hidroxila livres. Por isso, é possível que as moléculas de celulose se liguem formando pontes de hidrogênio entre si ou entre as moléculas adjacentes. Esta ligação é responsável por dar rigidez a estrutura da fibra, pois as microfibras formadas se unem e formam várias camadas celulares (IPT, 1988). Apesar da celulose ser formada por unidades de glicose, seu monômero é a celobiose, que é formada por um dímero de glicose. Esta molécula está representada na Figura 8.

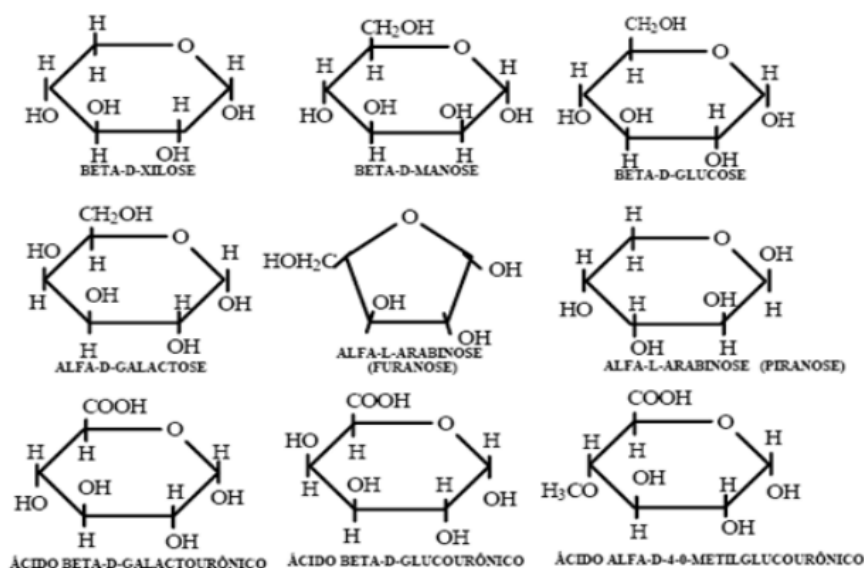
Figura 8: Representação esquemática da molécula de celulose. Entre colchetes temos a unidade de celobiose.



Fonte: IPT (1988)

As hemiceluloses, por sua vez, possuem a forma estrutural semelhante a da molécula de celulose, porém apresentam diferenças na formação molecular, pois são formadas por diferentes unidades de açúcares como pode ser observado na Figura 9, possuem baixo grau de polimerização, não tem arranjo fibroso, forma estruturas amorfas, e é solúvel em álcalis. Devido a sua estrutura, as hemiceluloses absorvem água, o que contribui para o aumento da flexibilidade da fibra, porém, após a secagem endurecem e tornam as fibras menos susceptível à absorção (IPT, 1988).

Figura 9: Monômeros das hemiceluloses

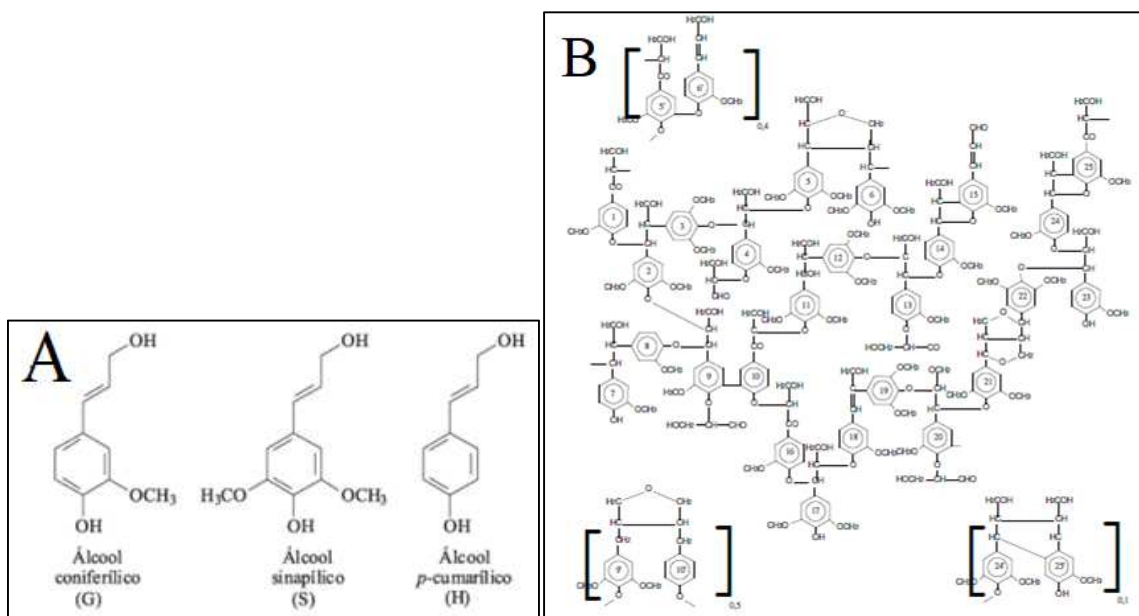


Fonte: DE MORAIS, de Nascimento, de Melo (2005).

Segundo Yang e Wyman (2008), em virtude de sua natureza ramificada e amorfa as hemiceluloses se ligam quimicamente com facilidade às hidroxilas e demais grupos reativos presentes na pasta de cimento hidratado, tornando-a mais susceptível a degradação por álcalis e pelo calor.

A lignina é um composto aromático que possui ligações preferencialmente tipo éter entre seus monômeros precursores, Figura 10A, que formam um polímero de elevada massa molecular. A Figura 10B apresenta a representação esquemática de um modelo de molécula de lignina de folhosas (HEBER et al., 2009; FENGEL, WEGENER, 1984).

Figura 10: Representação estrutural dos monômeros: A) monômeros precursores da lignina B) esquema estrutural da lignina de folhosas.



Fonte: BARBOSA et al. (2008); FENGEL, WEGENER (1984)

A lignina tem natureza hidrofóbica, amorfa e é formada por unidades aromáticas conforme apresentado nas Figura 10A e 10B. Também é responsável por manter a ligação entre as fibras celulósicas, promovendo, assim, a rigidez na parede das mesmas. Isso favorece as melhorias das propriedades mecânicas como o aumento da resistência ao impacto e da resistência à compressão, e diminui o dobramento (IPT, 1988; Silva et.al, 2009; JIANG, HU, 2016).

A lignina é um material de baixa densidade e abrasividade, com características interessantes para o uso como carga em substituição às cargas inorgânicas. Com certos polímeros, em formulações adequadas, a lignina pode formar compósitos parciais ou até completamente biodegradáveis. Além disso, em virtude de sua natureza fenólica, espera-se que a lignina aumente a resistência de materiais poliméricos em relação à oxidação, irradiação e exposição à temperaturas elevadas (SILVA et al., 2009).

A extração da celulose para utilização na indústria é feita por meio do processo de polpação ou deslignificação que consiste na separação dos constituintes das fibras vegetais, tendo como subproduto a lignina (SHREVE, BRINK, 1980; D' ALMEIDA et al., 2013).

Um dos processos de polpação industrial mais utilizado é o processo sulfito. Neste processo, a decomposição da lignina ocorre por meio de um cozimento em solução de ácidos sulfônicos (HSO_3) íon sulfito (SO_3^{2-}) e hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Após o cozimento, o licor negro rico em lignina é submetido a uma etapa de evaporação da água e precipitação do dióxido de enxofre. Na sequência o produto é diluído em água e filtrado para retirar os polímeros e frações de baixo peso molecular para extrair o lignosulfonato que é um subproduto deste processo de polpação (ARESKOG, 2011).

Ainda de acordo com Silva (2017), a polpação com sulfito que origina o lignosulfonato, corresponde apenas a 10 % da polpação total do mundo. O processo mais utilizado industrialmente é o processo Kraft, apesar disso, o método de polpação sulfito se mostra mais atrativo por ter como subproduto o lignosulfonato extraído do licor negro, o que não ocorre no processo Kraft.

Lignosulfonatos possuem uma variedade de grupos funcionais: hidroxilas (-OH) (alifáticas e fenólicas), carboxilas (-COOH) e sulfonato ($-\text{SO}_3^-$). A variedade de grupos funcionais e outras propriedades estruturais fornecem uma propriedade coloidal única. Estas propriedades permitem aplicações como em estabilizadores em suspensões coloidais, nas colas, nos detergentes, nos alimentos, entre outros. As características estruturais e propriedades químicas dos lignosulfonatos são: solubilidade em água, peso molecular relativamente alto, distribuição do peso molecular equilibrada e alta quantidade de cinzas (KOMURA, 2016).

Segundo Tejado et al. (2007), os lignosulfonatos são solúveis em água devido a introdução de grupos sulfonatos, sendo que são estes grupos que conferem as propriedades desejadas na construção civil como o caráter plastificante, que melhora a trabalhabilidade da pasta de cimento (Oliveira, 2010).

2.3 MÉTODOS DE MODIFICAÇÃO DAS FIBRAS E DA MATRIZ

O uso fibras vegetais na fabricação de fibrocimentos é prejudicada pela natureza polar e hidrofílica das fibras, pois estas sofrem degradação em meio alcalino o que faz com que a durabilidade seja reduzida. A fim de mitigar este problema é possível fazer o tratamento físico, químico ou mecânico das fibras ou modificar a matriz, pois, assim, aumenta a interação fibra-matriz, melhorando o desempenho mecânico do compósito (OLIVEIRA, 2010). Os tratamentos químicos visam modificar os componentes das fibras vegetais e os tratamentos físicos e mecânicos atuam na superfície da fibra (CUNHA, 2017).

A modificação da matriz ocorre por dois processos: a substituição de parte do cimento utilizado na preparação do compósito ou acréscimo na mistura de um composto que diminua a alcalinidade da pasta. Santos (2018) utilizou para modificação da pasta tanto metacaulin para substituição parcial do cimento e, portanto, diminuição da alcalinidade da pasta, quanto a adição do látex, que serve de barreira para evitar a degradação da fibra, que no caso foi utilizada polpa de celulose Kraft. Observou na análise dos resultados dos ensaios mecânicos que quanto maior o acréscimo de látex maior o módulo de ruptura.

Os polímeros já são utilizados para melhorias das propriedades da pasta, pois diminuem a absorção de água. Segundo Chodounsky e Bina (1997) a utilização de polímeros na pasta de concreto reduz a absorção de água na pasta, pois promovem o fechamento dos poros da pasta diminuindo a permeabilidade. Além disso, os polímeros possuem propriedades adesivas que ao serem inseridas na pasta aumentam em até duas vezes a resistência ao arrancamento promovendo ganho de tenacidade do compósito.

Gomes (2005) também acrescenta que os polímeros melhoram a plasticidade da pasta em estado fresco o que propicia a diminuição da relação água/cimento, fazendo que as microfissuras na zona de transição diminuam, esta adição aliada a cura úmida diminuem a retração. Sendo assim, melhoram não apenas resistência à tração como também a resistência à compressão do compósito.

Um dos tratamentos químicos utilizados para diminuir os danos causados pela alcalinidade da pasta de cimento é a acetilação das fibras, pois a introdução de grupos apolares pode diminuir higroscopicidade das mesmas. Lopes et al. (2011) estudou os efeitos da acetilação em fibras de curauá confirmando que realmente ocorre a diminuição da absorção de água e menor perda de massa, porém os resultados dos testes mecânicos decresceram com o aumento do tempo e da temperatura utilizados no processo de acetilação.

Tessaro et al. (2015) compararam o comportamento de compósitos cimentícios reforçados com fibras de eucalipto tratadas com tetraetilortossilicato (TEOS 98%), com compósitos com adição de fibra não tratada, variando os teores de fibras em 2%, 5% e 10%. Verificou que as fibras tratadas reduziram em 32% a absorção de água, garantindo água suficiente para hidratação do cimento. O tratamento não interferiu no resultado de módulo de elasticidade, porém a porcentagem de 2% de fibra apresentou os melhores valores de módulo de elasticidade.

A modificação das fibras por meio de tratamentos químicos, apesar de ser eficiente para diminuir a absorção de água, encarece o processo produtivo, além de utilizar produtos poluentes e que geram resíduos industriais. Isto se contrapõe a um dos pilares que sustentam a utilização da fibra vegetal como reforço que é a sustentabilidade. Ademais, os processos químicos levam a degradação parcial das fibras vegetais, resultando em perdas das propriedades mecânicas. Assim, os métodos de modificações físicas são mais atraentes devido ao menor custo, serem mais simples de executar e por degradar menos o meio ambiente (SILVA, 2015; CARVALHO, 2002).

Miranda (2014) constatou por meio de ensaios que a lavagem das fibras de piaçava com hidróxido de sódio (NaOH) é muito eficaz quando comparada a outros tratamentos. Para

isso, comparou o comportamento das fibras de cana-de-açúcar submetidas a diferentes tipos de tratamentos, sendo eles tratamento alcalino, ácido, térmico, acetilação e a lavagem das fibras. Com os resultados apresentados na Tabela 3, concluiu que os processos de acetilação e tratamento ácido aumentam o peso específico, que o tratamento alcalino diminui a lignina o que deixa as fibras mais maleáveis e, portanto, a lavagem e secagem das fibras é o meio mais barato, menos agressivo ao meio e mais benéfico às propriedades mecânicas.

Tabela 3: Propriedades mecânicas e composição química das fibras em diferentes tratamentos térmicos

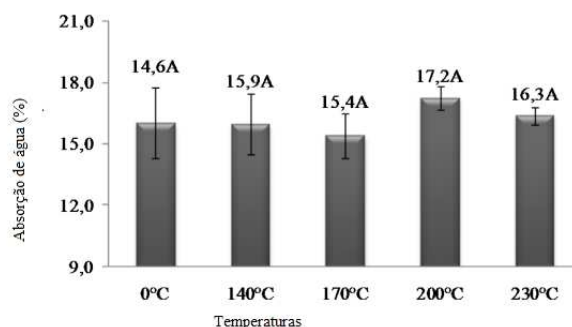
Amostra	σ (MPa)	E (MPa)	ρ (g/cm³)	Lignina (%)	Hemiceluloses (%)	Celulose (%)
Lavada	134,50	6.095,40	1,03	43,10	3,40	52,20
10% NaOH	117,00	4.845,80	1,00	37,40	9,30	41,00
10% H₂SO₄	101,40	3.902,40	1,17	43,00	4,40	51,00
Térmica	78,40	4.090,60	1,02	43,00	3,20	52,00
Acetilação	112,80	4.951,30	1,40	33,20	11,50	39,20

σ resistência; E módulo de elasticidade, ρ peso específico

Fonte: Miranda (2014)

Silva (2015), ao utilizar o tratamento térmico de fibras de eucalipto no fibrocimento, variando de 0° C a 230°C, verificou que as amostras apresentaram diminuição da absorção de água (Figura 11), tenacidade e aumento de módulo de elasticidade, a medida que aumentou a temperatura, resultando da modificação da estrutura química da fibra verificada pelo ensaio do MEV. Quando variou o teor de fibras, variando de 0 a 5% na mistura, obtiveram menores valores de resistência à compressão, módulo de elasticidade resistência a flexão para valores entre 4 e 5% de fibras, isto se deve a retardos do tempo de pega, que se deu após o 17º dia, e aos ensaios serem feitos apenas aos 28 dias, não tendo estudos em idades avançadas para análise de durabilidade.

Figura 11: Absorção de água por tratamento térmico



Fonte: Silva (2015)

Motta, Jonh, Agopyan (2010), também obtiveram resultados de aumentos do módulo de elasticidade com o aumento da temperatura de tratamento térmico das fibras de sisal. Para isto ensaiaram compósitos com fibras prensadas e submetidas a três temperaturas, 120, 160 e 200 °C, comparando-as a fibras não prensadas. Porém, o mesmo aumento ocasionou redução dos valores de resistência à tração das fibras.

Mundim (2019) utilizou a impregnação de fibras de sisal para melhorar as propriedades físicas e mecânicas com o objetivo de reforçar o fibrocimento. Para isso realizou ensaios tanto nas fibras quanto nos compósitos, comparando quatro processos de impregnação (impregnação com lignina organosolve, lignina organosolve com glutaraldeído, lignina Kraft e lignina Kraft com glutaraldeído) aos resultados com fibras sem tratamento. Chegou ao resultado de uma redução na absorção de água das fibras em cerca de 50% e elas não estavam degradadas dentro da matriz, porém apresentam acréscimo no módulo de elasticidade e tenacidade comparando-se 28 dias de moldagem a 180 dias de envelhecimento.

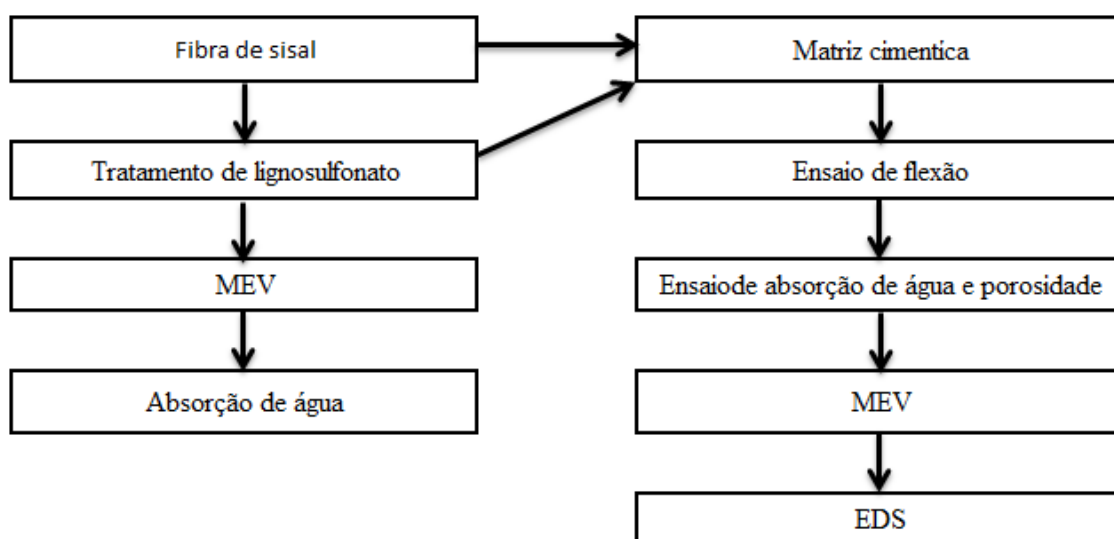
Tendo em vista a necessidade de melhorar o reforço fibra-matriz e diminuir absorção de água da fibra acredita-se que a impregnação de lignosulfonato na modificação de fibras se justifica devido a facilidade do tratamento que ocorre em meio aquoso a temperatura ambiente, além de que a presença deste composto pode alterar o caráter hidrofílico das fibras. Assim, esperasse que o lignosulfonato ao se ligar fisicamente as fibras e possa melhorar a adesão fibra-matriz e diminuir a higroscopicidade das mesmas.

3. METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia aplicada aos experimentos, descrevendo os materiais utilizados, métodos de tratamento de fibras de sisal e ensaios realizados nas fibras e nos compósitos.

A Figura 12 apresenta um resumo do planejamento experimental aplicado neste trabalho.

Figura 12: Organograma do planejamento experimental.



Fonte: Autor (2020).

3.1 FIBRAS DE SISAL

Na preparação dos fibrocimentos foram utilizadas fibras de sisal (fornecidas pela empresa Sisalsul Fibras Naturais Ltda. - São Paulo, Brasil) como reforço das matrizes cimentícias. As fibras foram tratadas por impregnação com lignosulfonato em três soluções com concentrações diferentes e comparadas às fibras não tratadas. As fibras utilizadas neste estudo foram cortadas com comprimento de 30 mm, assim, pode-se classificar os compósitos preparados como descontínuo (curto) e orientado aleatoriamente.

3.1.1 *Impregnação das fibras com lignosulfonato*

Para a impregnação das fibras com lignosulfonato foram utilizadas soluções aquosas de com 1%, 2% e 4% de lignosulfonato em massa calculado em função da massa de fibra de sisal. Assim, obteve-se 4 tipos diferentes de fibras que foram denominados FNAT (fibra sem tratamento), F1 (fibra com impregnação de 1% de lignosulfonato), F2 (fibra com impregnação de 2% de lignosulfonato), F4 (fibra com impregnação de 4% de lignosulfonato).

Este processo de impregnação foi realizado em um béquer, preparando-se a solução de lignosulfonato em um volume de 288 mL de água e a massa respectiva do lignosulfonato em pó, os quais foram misturados em um agitador mecânico por 5 minutos. Em seguida 28,8 g fibras foram adicionadas nesta solução, de modo que elas ficaram imersas por 10 minutos em temperatura ambiente. Logo após as fibras foram removidas da solução por filtração e secas em estufa a 180° por um período de 3 horas, como todas foram submetidas a este processo não se estudou o efeito da temperatura no processo.

Para as fibras não tratadas com lignosulfonato, estas foram submetidas ao mesmo processo, porém foi utilizado apenas água no lugar da solução.

3.1.2 *Análise microestrutural das fibras por MEV*

Amostras de fibras com as diferentes concentrações de solução de lignosulfonato bem como as fibras não tratadas foram avaliadas visando verificar se houve impregnação de lignosulfonato. As análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foram realizadas utilizando o microscópio modelo Vega3, da marca TESCAN, no Laboratório de Multiusuários do Instituto de Química da UFU (IQUFU).

Antes das análises as fibras foram cortadas nas dimensões de 1 cm e secas em estufa, à temperatura de 50°C, por 24 h para retirar a umidade que dificulta a aplicação do vácuo necessário à análise. As fibras foram então depositadas nos suportes contendo fita adesiva de carbono e foram recobertas com ouro.

3.1.3 Ensaio físico de absorção de umidade

Os ensaios de absorção das fibras de sisal foram realizados conforme Norma ASTM E104-02 (2012), com o intuito de comparar a absorção das fibras tratadas e não tratadas.

O ensaio foi realizado em um ambiente controlado com a temperatura de 21°C, para isto utilizou-se três amostras de 1g (um grama) das fibras tratadas e não tratadas, que foram colocadas em um dessecador contendo uma solução saturada de Sulfato de Zinco ($ZnSO_4$) para gerar uma atmosfera com umidade de 75%. As medidas de massa das fibras foram realizadas em balança analítica com resolução de 0,00001 g, nos intervalos de 1, 2, 24, 48, 72 e 120 horas, também foram medidas a temperatura e umidade com o termo-higrômetro. Por meio da Equação 1 determinou-se o valor da absorção.

$$Af = \left(\frac{m_{f,t} - m_{f,0}}{m_{f,0}} \right) \times 100 \quad (1)$$

Sendo: A_f = absorção das fibras, em %; $m_{f,t}$ = massa das fibras medida no instante t, em gramas; $m_{f,0}$ = massa inicial das fibras, em gramas.

3.2 MATRIZ CIMENTÍCIA REFORÇADA COM FIBRAS DE SISAL

3.2.1 Moldagem dos corpos-de-prova

A preparação dos compósitos foi feita simulando o processo Hatschek, conforme Savastano Junior (2000). O método constitui na sucção da água de amassamento juntamente com o adensamento das camadas da calda de cimento e da fibra de sisal.

Foram moldados 16 compósitos com dimensões de 20 cm x 20 cm x 0,4 cm, sendo 4 moldados com fibras sem impregnação de lignosulfonato (CP-FNAT), 4 moldados com fibras impregnadas com 1% de lignosulfonato (CP-F1), 4 moldados com fibras

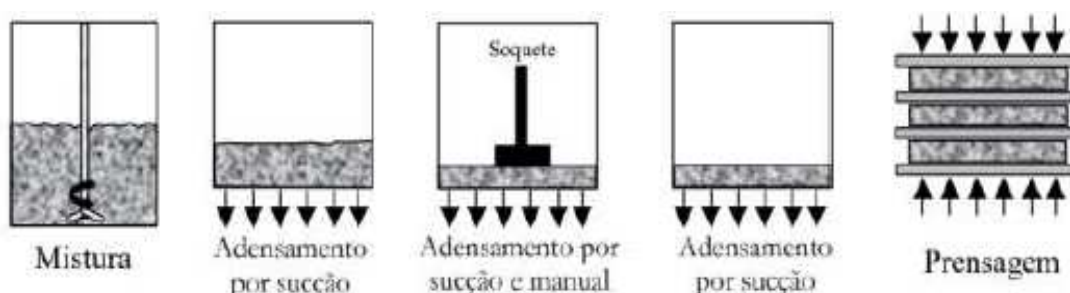
impregnadas com 2% de lignosulfonato (CP-F2) e 4 de moldados com fibras impregnadas com 4% de lignosulfonato (CP-F4).

Para execução de cada amostra, foram adicionados 2% de polpa celulósica Kraft branqueada de eucalipto em relação ao volume da mistura, valor mínimo para reter o material cimentício durante a sucção da água, além de 3% de fibras vegetais de sisal em volume. Para a produção de cada compósito cimentício foram utilizados 320g de cimento CP-IV.

A moldagem foi realizada em um dispositivo com base perfurada de 20 cm x 20 cm, cuja mangueira da bomba à vácuo é acoplada em sua base para realizar a sucção de água. Para evitar a passagem dos sólidos durante esse processo foi utilizado papel filtro na base do dispositivo.

Inicialmente as fibras de celulose Kraft foram dispersadas juntamente com água em um liquidificador da marca Skymssen com copo Monobloco sem solda em aço inox por 5 minutos e depois foi peneirada para retirada do excesso de água. Em seguida, o processo de moldagem, ilustrado pela Figura 13, foi realizado pelas seguintes etapas:

Figura 13: Esquema de mistura e fabricação dos compósitos



Fonte: Motta (2005)

- Em um misturador mecânico, marca Pavitest, modelo C3010 e rpm de 4/s, foram adicionados as fibras de celulose Kraft, cimento e água, e misturou-se por 5 minutos;
- No dispositivo de moldagem fez-se a sucção em duas etapas, primeiro dispersou metade das fibras de sisal dos compósitos e acrescentou-se metade da mistura e a

sucção foi acionada para que o excesso de água fosse retirado enquanto isso a mistura foi compactada com soquete de ferro. Então, desligou-se a sucção e colocou a outra metade das fibras de sisal espalhando-as e o restante da mistura foi adicionada e a sucção e amassamento foram iniciados novamente;

- Após desligar a bomba à vácuo, os compósitos foram retirados do dispositivo com o auxílio de placas metálicas de 20 cm x 20 cm e levados para a prensa. Foram feitos conforme a Figura 13, uma pilha de 8 compósitos por prensagem em um prensa manual com tensão de 3,2 MPa, conforme apresentado por Motta (2005). A prensagem foi aplicada para reduzir os vazios da pasta e os corpos de provas ficaram na prensa por 24 horas.

Os compósitos de 20x 20 foram cortados em dimensão de 4x16cm para serem ensaios. A cura dos corpos de provas se deu em câmara úmida com umidade relativa de 75% e temperatura de 21°C durante 28 dias. Após esse período, os corpos de prova foram cortados em corpos de prova menores, com dimensões 4 cm x 20 cm x 0,4 cm. As amostras foram ensaiadas aos 28 dias e outras foram submetidas ao envelhecimento natural até 90 e 180 dias na estação de meteorologia da Universidade Federal de Uberlândia, localizada entre as coordenadas 18°55'01" de latitude S e 48°15'18" de longitude W, a uma altitude de 869 metros. E foram dispostos em um suporte com declividade de 30%, conforme ilustrado na Figura 14.

Figura 14: Disposição dos corpos de provas para envelhecimento.



Fonte: Autor (2020).

Tal disposição segue orientações de Savastano Junior (2000), para que os corpos de prova fiquem à exposição das intempéries durante o envelhecimento natural.

3.2.2 *Análise microestrutural dos compósitos por MEV*

Assim como as fibras, os compósitos também foram analisados por MEV visando avaliar a microestrutura, interface matriz-fibra e a ocorrência de mineralização das fibras.

As análises por MEV foram realizadas nos compósitos após os ensaios de flexão, ou seja, aos 28, 90 e aos 180 dias, utilizando o microscópio modelo Vega3, da marca TESCAN, no Laboratório de Multiusuários do Instituto de Química da UFU (IQUFU). As amostras foram cortadas nas dimensões de 1 cm e secas em estufa, à temperatura de 50°C, por 24 h, para retirar a umidade que dificulta a aplicação do vácuo necessário à análise. As amostras foram então coladas nos suportes contendo fita adesiva de carbono e foram recobertas com ouro.

3.2.3 *Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS)*

As amostras foram analisadas também por meio do EDS que é um recurso do MEV para conhecer qualitativamente a composição da amostra em pontos escolhidos da imagem bem como saber o percentual dos compostos químicos desejados. As informações sobre as composições da amostra são adquiridas pela captação dos raios-X característicos decorrentes da interação do feixe primário com a amostra. A EDS utiliza um material semiconductor, para encontrar os raios-X, e um analisador multicanal para transformar a energia de raios-X em uma contagem eletrônica. Baseado no valor acumulado destas contagens é gerado um espectro que retrata a análise química da amostra.

As análises de raios X por dispersão de energia (EDS) foram realizadas por meio de um instrumento Oxford modelo 51-ADD0048, nas mesmas amostras dos compósitos aos 28, 90 e aos 180 dias, preparadas para a análise de MEV descrita no item 3.2.2.

3.2.4 Ensaios mecânicos de flexão

Seguindo o procedimento de Motta (2005), os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de flexão em 4 pontos. Utilizou-se a máquina Instron modelo 5892 e célula de carga 5 kN. A distância entre os apoios inferiores foi de 150 mm, a velocidade de aplicação da carga foi de 2,0 mm/min e a flecha adotada foi o deslocamento do cutelo de carga da máquina durante o ensaio. O parâmetro para finalização do ensaio foi o limite de flecha de 5 mm.

Do ensaio de flexão foram determinados os Módulos de Ruptura (MOR) conforme Equação 2 e o Elasticidade (E) conforme Equação 3.

$$MOR = \frac{P_{max} \times L}{b \times e^2} \quad (2)$$

$$E = \frac{23 \times L \times P}{1296 \times I \times \delta} \quad (3)$$

Sendo: $P_{máx}$ = força máxima durante o ensaio, em Newtons (N); L = distância entre os apoios, em milímetros (mm); b = largura do corpo-de-prova, em milímetros (mm); e = espessura do corpo-de-prova, em milímetros (mm); I = momento de inércia da seção transversal (mm⁴); P/δ = coeficiente angular da reta obtida pela curva P x δ no trecho elástico (N/mm); MOR = Módulo de Ruptura, em Mega Pascal (MPa); E = módulo de elasticidade (MPa).

A tenacidade de cada corpo-de-prova foi obtida pela energia de fratura em kJ/m², que foi determinada pela integração da área sob a curva Força x Deformação até o ponto limite do ensaio (flecha de 5 mm), dividida pela área da seção transversal das amostras. Os resultados foram obtidos pelo programa computacional da máquina Instron 5982, sendo necessários como dados de entrada a largura e espessura média das amostras, estas, obtidas pelo paquímetro digital Mitutoyo com precisão de 0,01 mm.

3.2.5 Ensaios físicos absorção de água e porosidade

A absorção e a porosidade dos compósitos foram determinadas conforme a norma ASTM C948-81 (2009), e calculados pelas Equações 4 e 5, respectivamente, todas as pesagens foram feitas na mesma balança. Para determinação das massas das amostras, os corpos de prova foram imersos em água por 24 horas em temperatura ambiente. Em seguida, em uma balança hidrostática, foi realizada a determinação da massa imersa (m_i), então retirou-se os CPs da água, removeu-se a umidade superficial e determinou-se a massa saturada superfície seca (m_{sss}), em seguida os corpos de prova foram secos em estufa com temperatura entre 100°C e 110°C durante período mínimo de 48 horas até estabilidade de massa, que após remoção da estufa, foram resfriados em um dessecador até temperatura ambiente e então determinou-se a massa seca (m_s). Com os dados de massa imersa, massa saturada superfície seca e massa seca, obteve-se também a massa específica aparente das amostras pela Equação 6.

$$Ab_{cp} = \frac{m_{sss} - m_s}{m_s} \times 100\% \quad (4)$$

$$\eta = \frac{m_{sss} - m_s}{m_s - m_i} \times 100\% \quad (5)$$

$$\rho = \frac{m_s}{m_{sss} - m_i} \quad (6)$$

Sendo: Ab_{cp} = absorção dos compósitos (%); η = porosidade dos compósitos (%); ρ = massa específica aparente dos compósitos (kg/dm³).

3.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e teste Tukey, com nível de confiança de 95% ($p < 0,05$), a fim de verificar as diferenças significativas entre os valores médios encontrados das propriedades mecânicas dos compósitos. Foram utilizados os softwares Excel e Past.

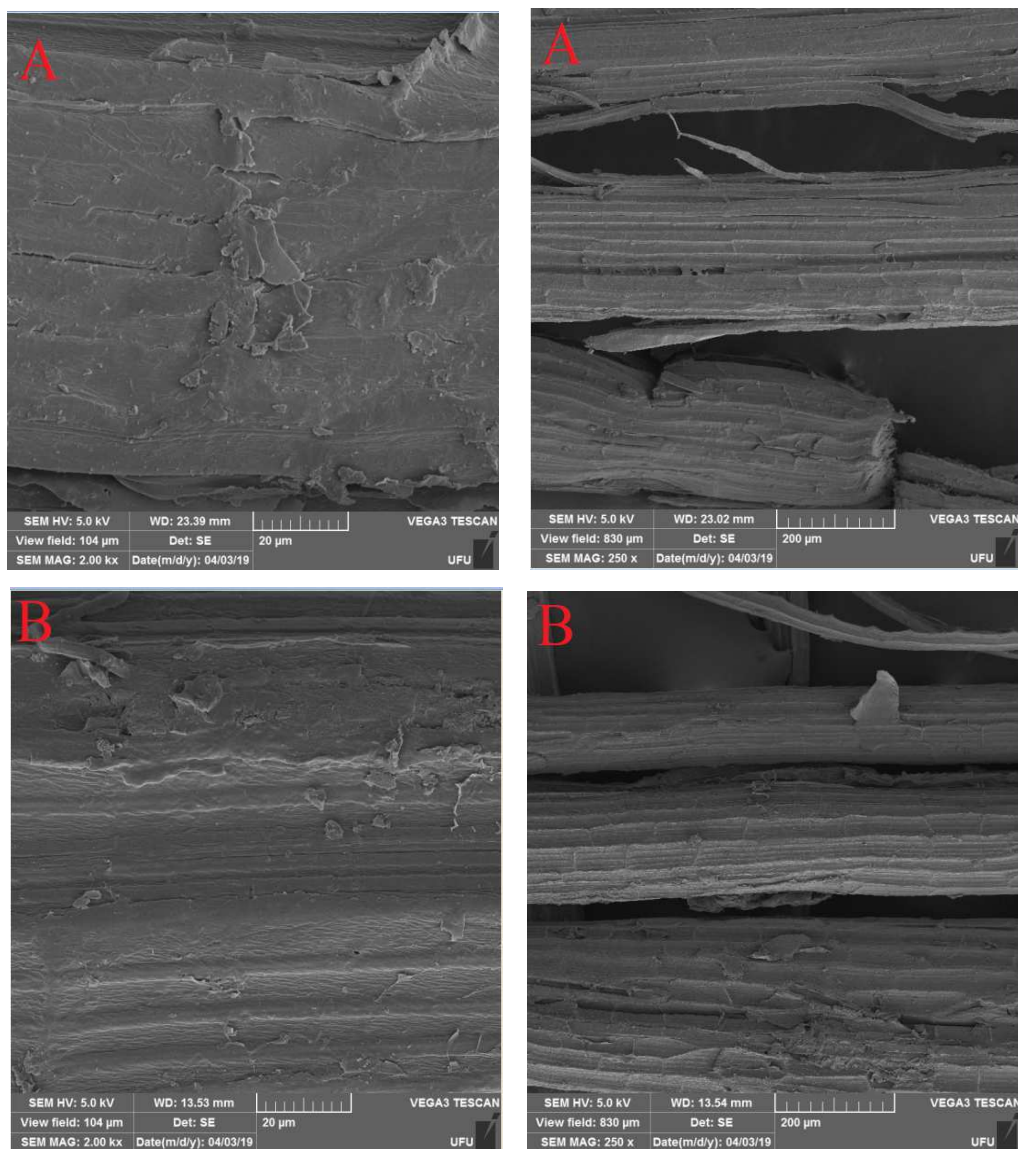
4. RESULTADOS

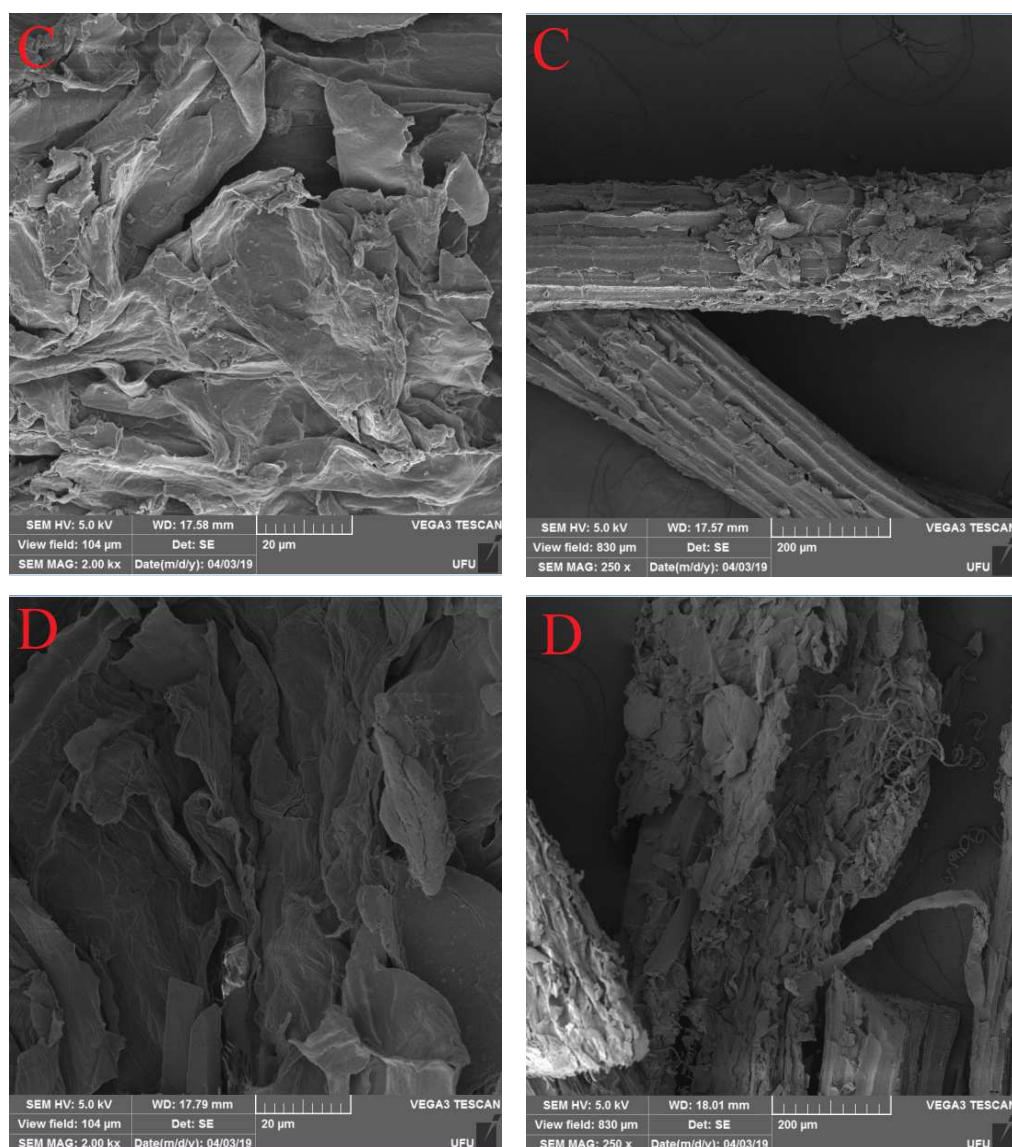
4.1 FIBRAS DE SISAL

4.1.1 Análise microestrutural das fibras de sisal por MEV

A primeira análise feita nas fibras foi por MEV, conforme ilustrado na Figura 15, com imagens das superfícies das fibras naturais e tratadas.

Figura 15: MEV DAS FIBRAS: A) FNAT, B) F1, C) F2, D) F4. Imagens da esquerda: ampliação de 2.000X; Imagens da direita: ampliação de 250X.





Fonte: Autor (2020)

Pode-se observar de acordo com a Figura 15A que a FNAT apresenta uma superfície mais homogênea, já as Figuras 15B, 15C e 15D apresentam uma superfície mais irregular o que sugere que ocorre uma deposição de material em suas superfícies. Como a deposição de material na fibra cresce à medida que aumenta a concentração de lignosulfonato adicionado, pode ser, portanto, o próprio lignosulfonato adicionado.

Assim sendo, quanto maior a concentração da solução maior é a aderência do lignosulfonato na superfície das fibras. Este aumento na quantidade de material depositado pode melhorar a aderência mecânica da fibra no compósito, ou seja, além de proteger a fibra a adição de lignosulfonato pode melhorar a ancoragem fibra-matriz.

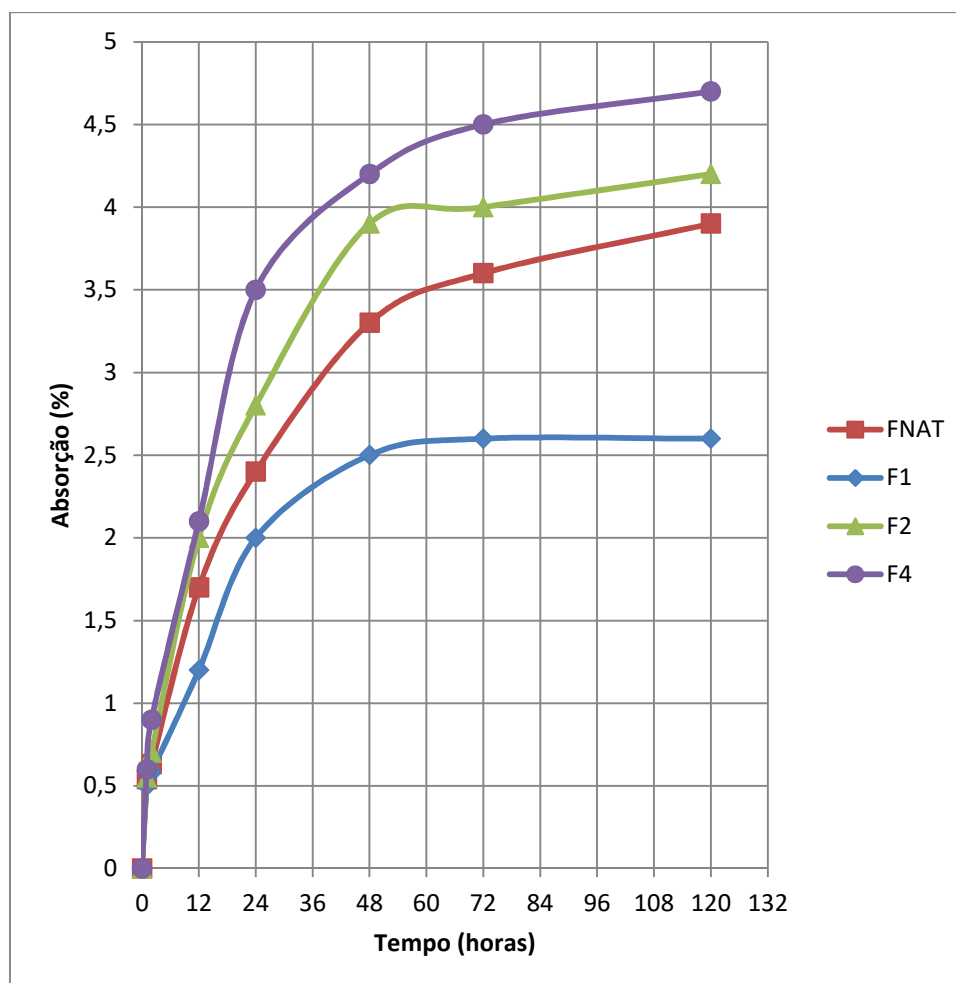
4.1.2 *Ensaio de absorção de umidade*

A Figura 16 apresenta os dados obtidos no ensaio de absorção de umidade das fibras. As fibras tratadas F2 e F4 que possuem maior teor de lignosulfonato, apresentaram aumento na absorção final, se comparadas com a fibra sem tratamento, indicando que o caráter hidrofílico das fibras foi potencializado. Esperava-se um comportamento contrário, que o tratamento deixasse as fibras mais apolares pelas características da molécula de lignosulfonato ser composta por estruturas aromáticas e alifáticas apolares. Porém, devido ao lignosulfonato estar na forma de um sal, ocorreu dissociação do sal em solução aquosa, e este pode ser o motivo do aumento da absorção, pois sais tendem a ser mais higroscópicos.

Porém, a Fibra F1 apresentou uma diminuição considerável na absorção de água (33%) comparado a FNAT, o que indica que o tratamento, para esta concentração de lignosulfonato, surtiu o efeito desejado de impedir que a fibra absorva água do compósito. Isto posto, há uma tendência de melhorar tanto a hidratação da matriz quanto preservar a fibra dos ataques de álcalis.

Mesmo assim, a Fibra F1 apresenta uma redução na absorção inferior quando comparadas a resultados de outros trabalhos, como, por exemplo, Mundim (2019) que estudou fibrocimentos reforçados com fibras de sisal impregnadas com lignina e obteve reduções superiores a 43% comparadas as fibras de sisal sem tratamento.

Figura 16: Ensaio de absorção de umidade das fibras



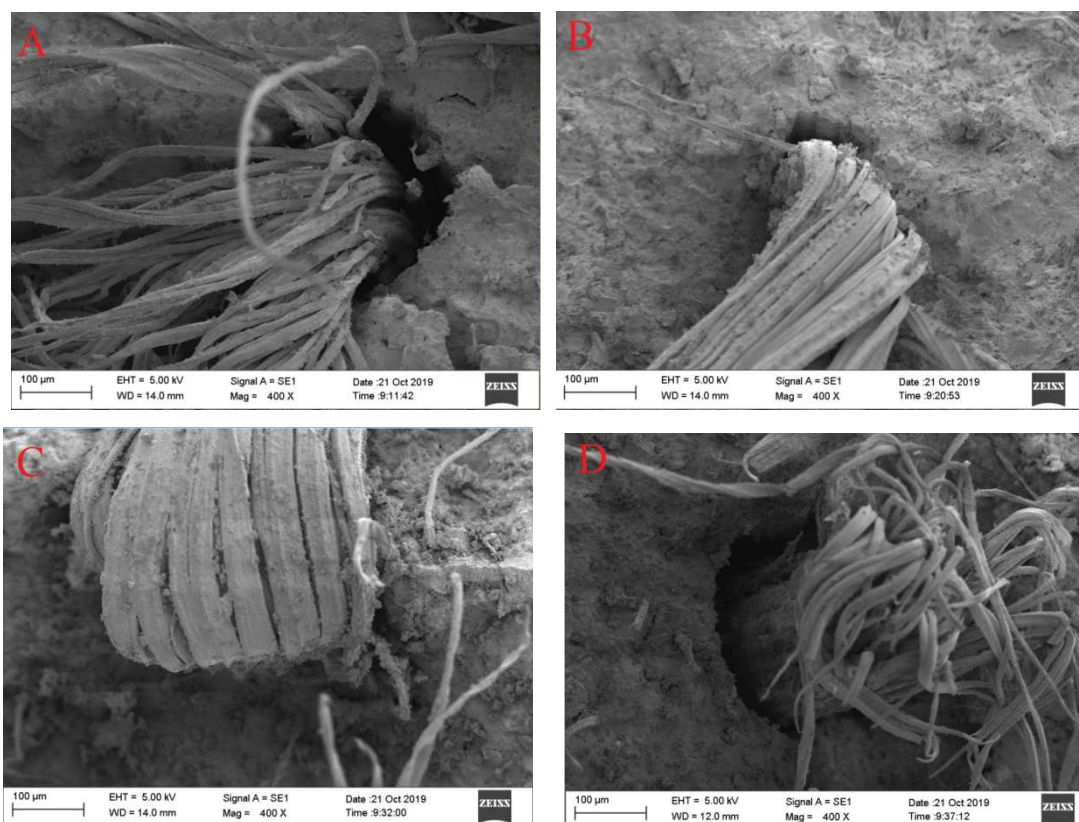
Fonte: Autor (2020)

4.2 ANÁLISE DA MATRIZ CIMENTÍCIA REFORÇADA COM FIBRAS

4.2.1 Análise microestrutural dos compósitos por MEV

A Figura 17 mostra os resultados de MEV dos compósitos reforçados com fibras de sisal sem e com tratamento de lignosulfonato, aos 28 dias.

Figura 17: MEV de fibrocimento aos 28 dias: A) CP-FNAT, B) CP-F1, C) CP-F2, D) CP-F4. Ampliação de 400x.



Fonte: Autor (2020)

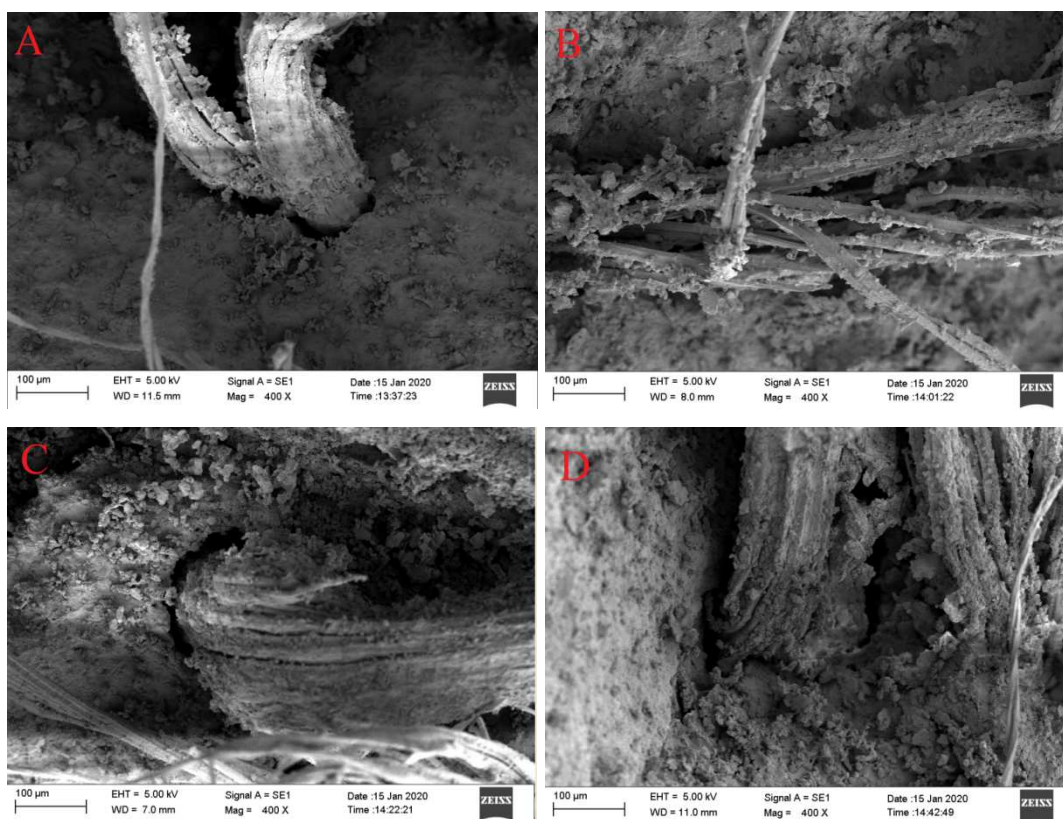
A partir da Figura 17, pode-se observar que as fibras não sofreram ruptura ao serem solicitadas, isto pode ser observado na existência de fibras longas na face da ruptura dos compósitos, assim sendo, promovem um reforço o que contribui para a absorção de deformação. Porém, observa-se que as fibras foram descoladas da matriz, ou seja, a aderência não está satisfatória.

E, segundo Bentur, Mindeness (2007), a função da fibra é principalmente conferir tenacidade ao compósito, isso ocorre quando a fibra absorve energia no momento em que é arrancada da matriz. E como pode ser observado na Figura 17 as fibras foram arrancadas da matriz ao invés de romper, comprovando que o reforço com fibras de sisal é eficaz, pois resistem ao esforço ao qual foram submetidas.

A Figura 17 A apresenta mais fibras finas (desfibrilação) que as fibras tratadas, o que pode indicar que a presença de lignosulfonato ajuda na preservação da integridade da fibra, mostrando ocorre uma menor degradação na fibra sem tratamento. Também pode-se notar que o CP-F1 (Figura 17B) é o que apresenta menor desfibrilação, isto explica o elevado ganho de tenacidade deste compósito aos 28 dias, conforme apresentado no item 4.2.3.

A Figura 18, apresenta os resultados de MEV para os compósitos aos 90 dias de envelhecimento natural.

Figura 18: MEV de fibrocimento aos 90 dias: A) CP-FNAT, B) CP-F1, C) CP-F2, D) CP-F4. Ampliação de 400x.



Fonte: Autor (2020)

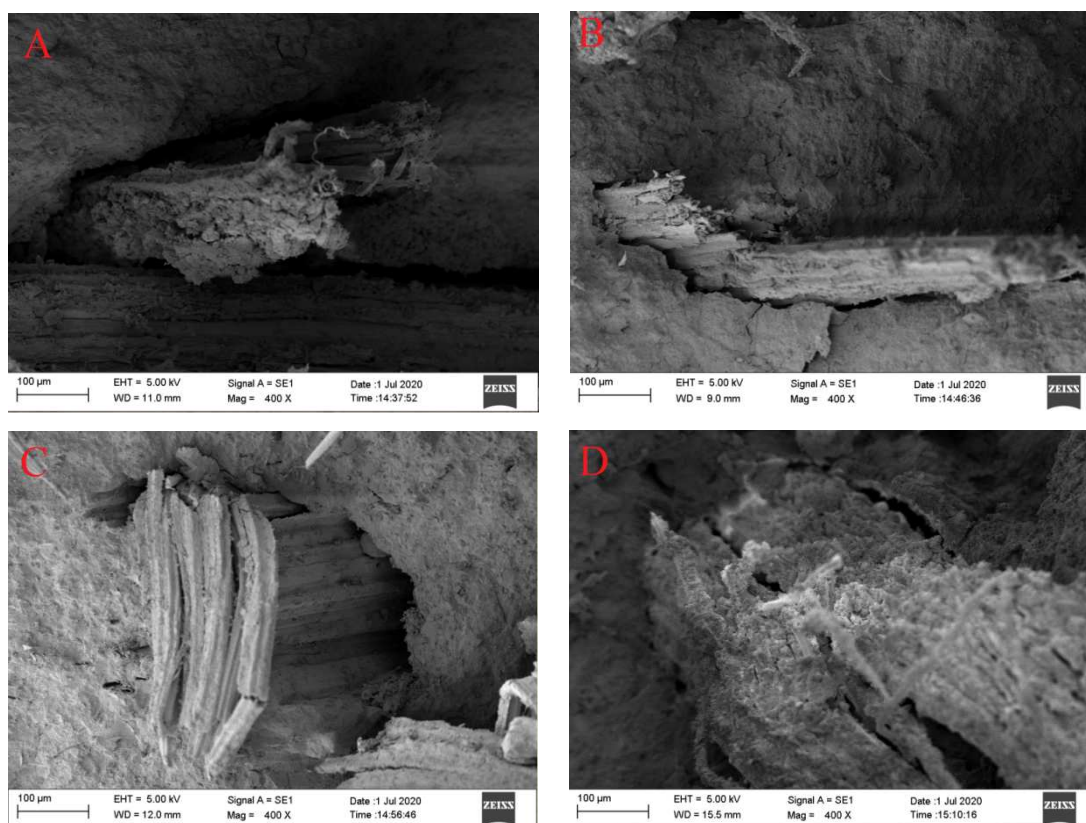
Na Figura 18, observa-se que a deposição de material na superfície da fibra é bem maior que aos 28 dias, ou seja, isto não é mais o lignosulfonato e pode ser produtos de hidratação do cimento. Esta deposição melhora a ancoragem fibra-matriz, pois torna a interface mais uniforme, densa e coesa. Pode-se observar também, que este acúmulo de material é maior nos compósitos com fibras tratadas, o que pode indicar absorção de água nas fibras que é

liberada quando o compósito é exposto ao ambiente que tem menor umidade que durante o período de cura úmida, fazendo com que a água percole e hidrate o cimento anidro presente na superfície da fibra.

Observa-se também que a fibra do CP-F1 (Figura 18B) apresenta maior desfibrilação e uma deposição de material maior em toda sua superfície o que significa que esta foi mais degradada ao longo do tempo em todos os compósitos analisados.

A Figura 19, apresenta os resultados de MEV para os compósitos aos 180 dias de envelhecimento natural.

Figura 19: MEV dos compósitos aos 180 dias: A) CP-FNAT, B) CP-F1, C) CP-F2, D) CP-F4. Ampliação de 400x.



Fonte: Autor (2020)

Pode-se observar na Figura 19, que para os compósitos aos 180 dias as fibras sofreram ruptura, e não apresentam grandes comprimentos arrancados como nas demais idades, isto

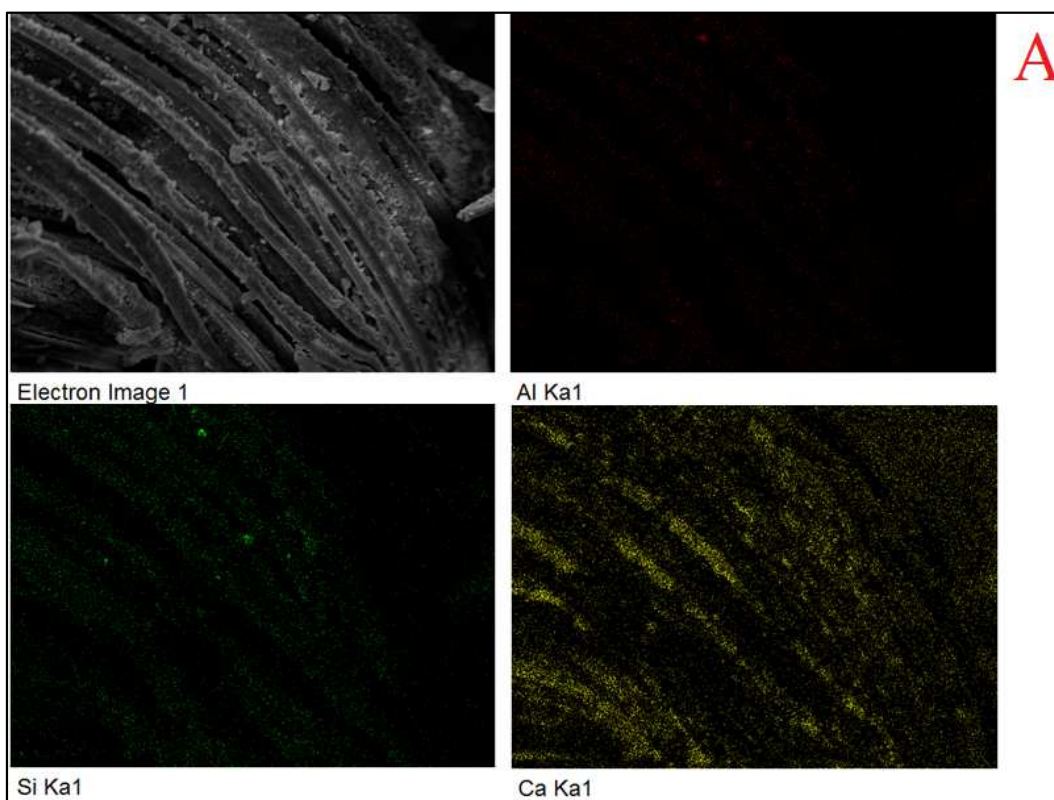
pode ser resultado de maior aderência das fibras ao compósito ou deterioração da fibra, em ambos os casos há ruptura da fibra em detrimento do seu arrancamento da matriz. Exceto o CP-F4 que não sofreu ruptura e também está mais aderida a matriz que os demais compósitos, neste caso houve então a melhora da aderência e também a preservação da fibra.

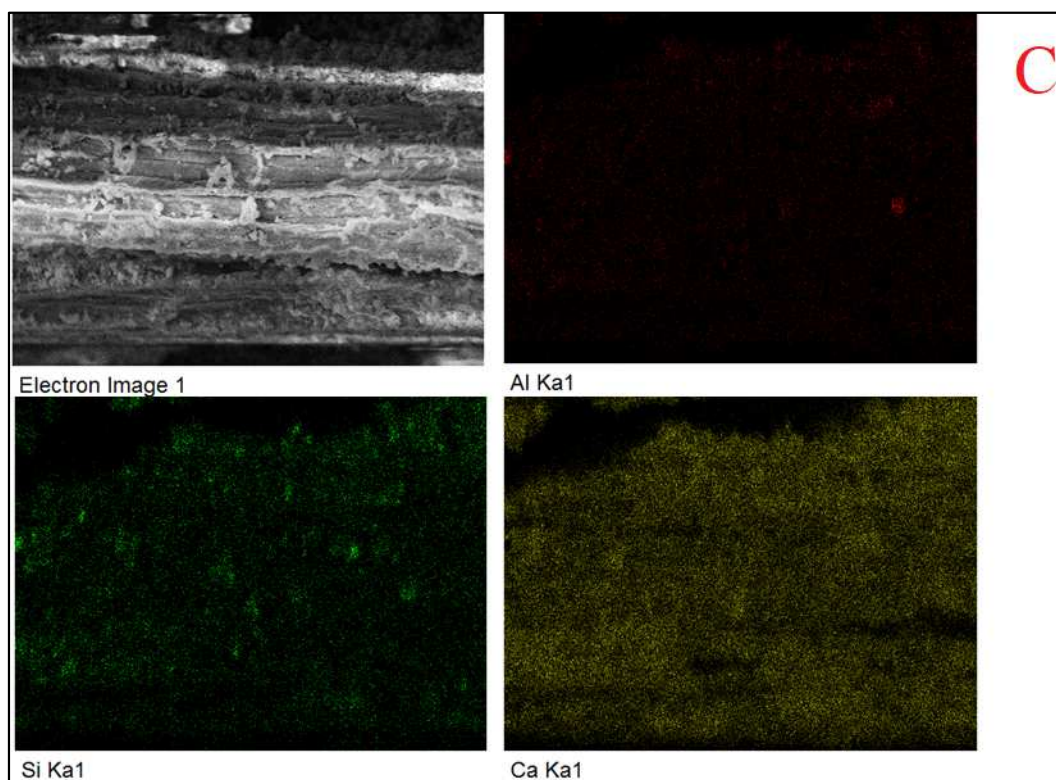
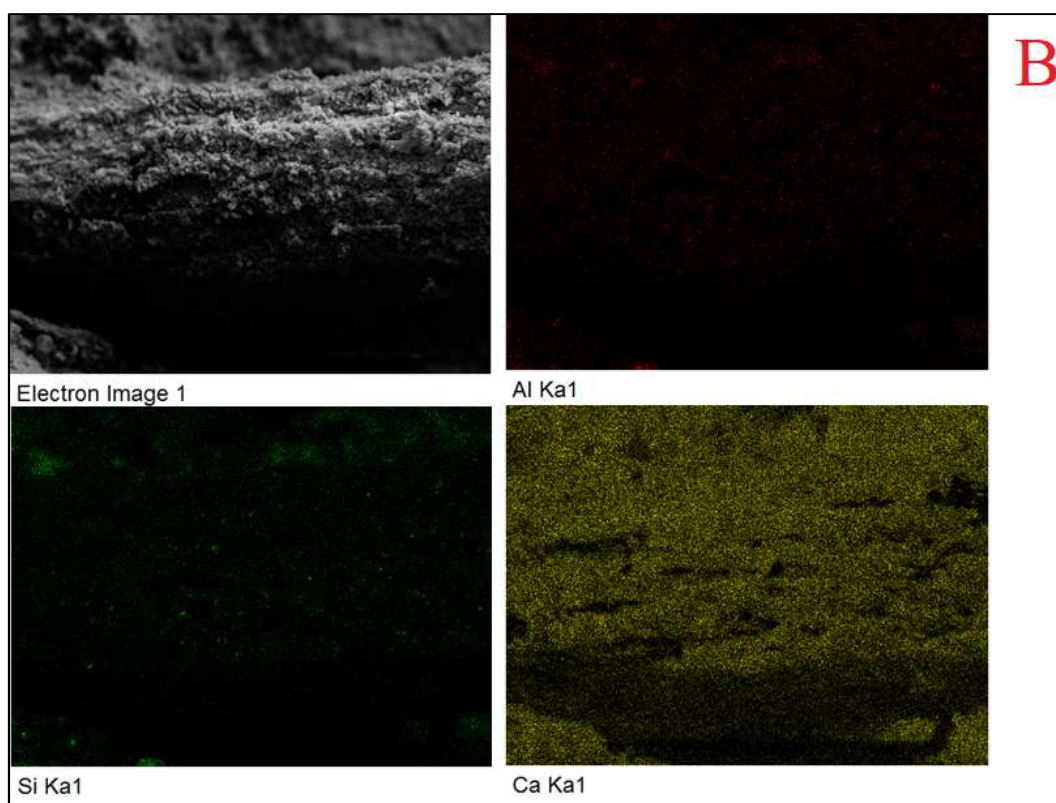
Além disso, a fibra sem tratamento ainda apresenta alta deposição e material em torno da fibra, o que pode ser resultado de hidratação tardia, haja vista a presença de cálcio em maior quantidade nesta idade. Assim, pode-se inferir que formou-se cristais de Ca(OH)_2 prejudicando a ancoragem da fibra na matriz, por isso o descolamento da fibra é maior que nas demais fibras.

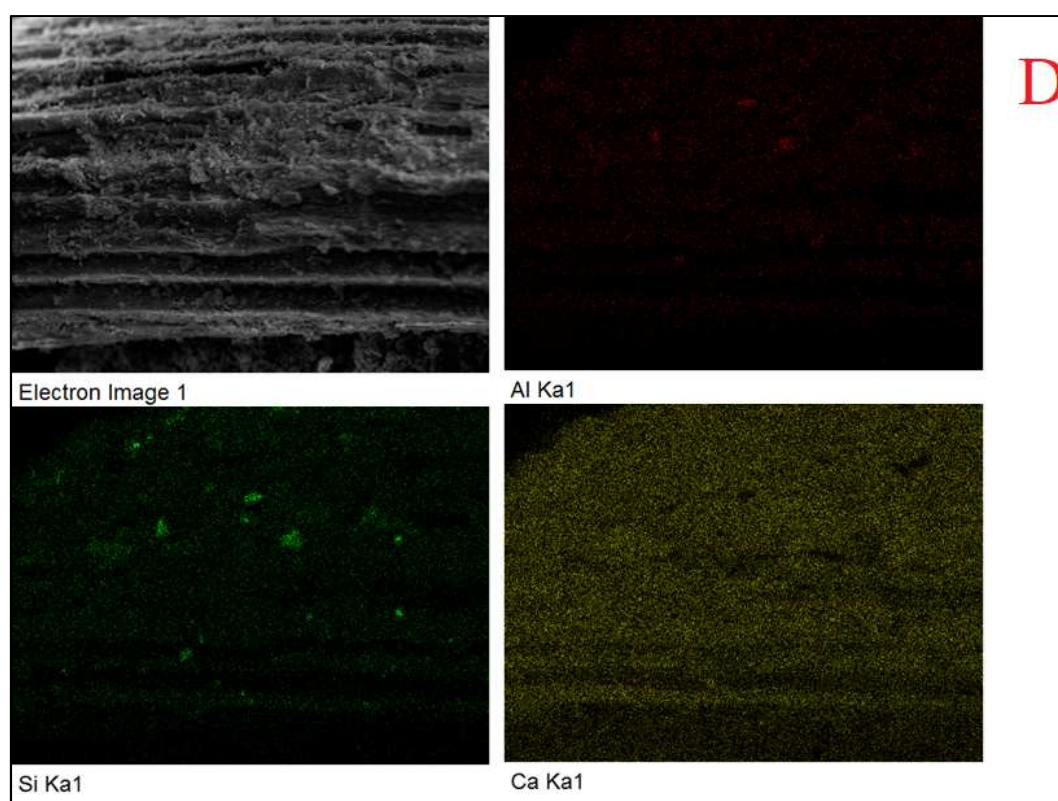
4.2.2 Análises de raios X por dispersão de energia (EDS)

A Figura 20 mostra os resultados do EDS das superfícies das fibras de sisal, presentes nos compósitos, sem e com tratamento de lignosulfonato aos 28 dias.

Figura 20: EDS 28 dias e as distribuição dos elementos cálcio, alumínio e silício: A) CP-FNAT, B) CP-F1, C) CP-F2, D) CP-F4. Ampliação de 1.000x.





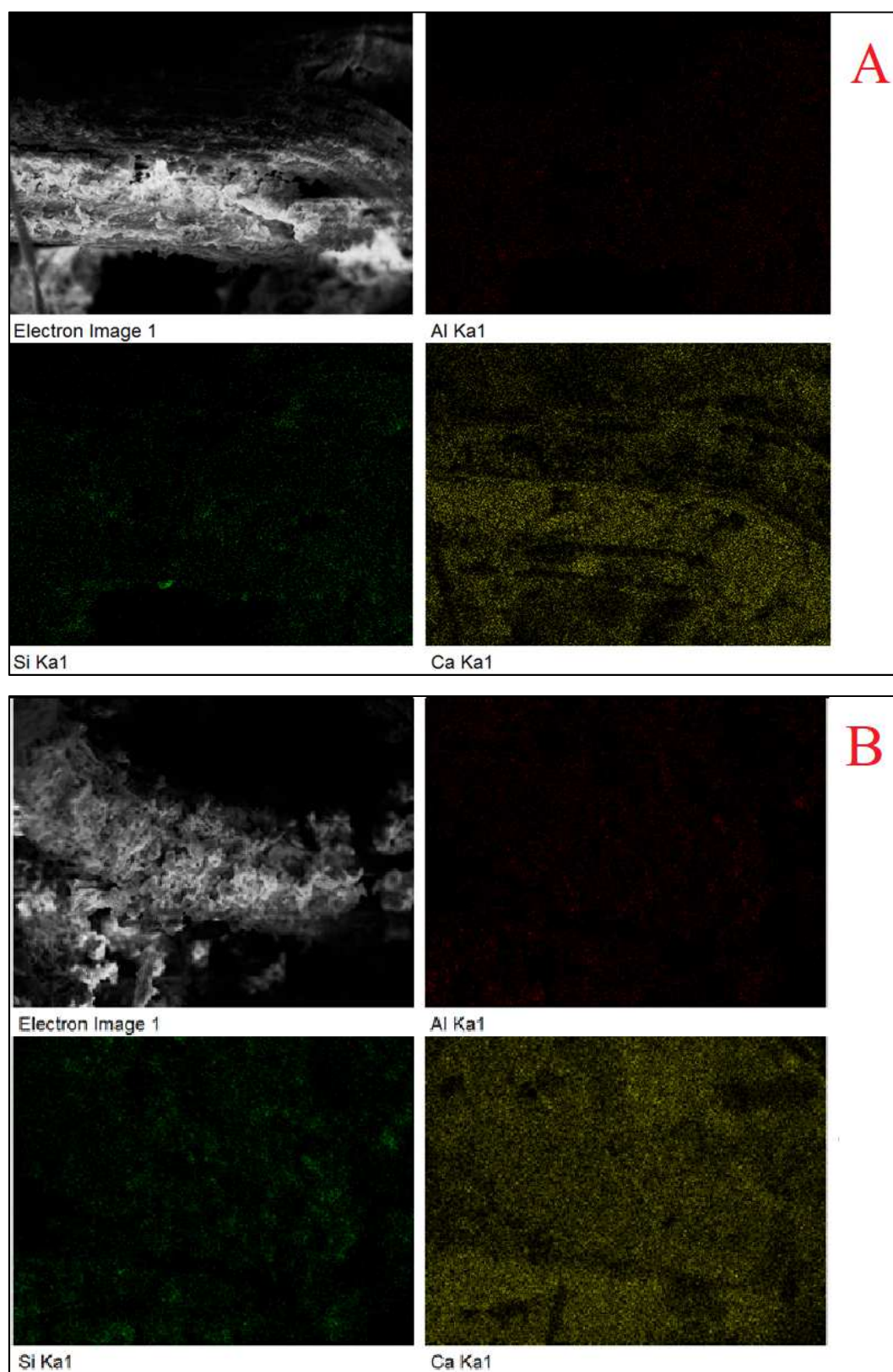


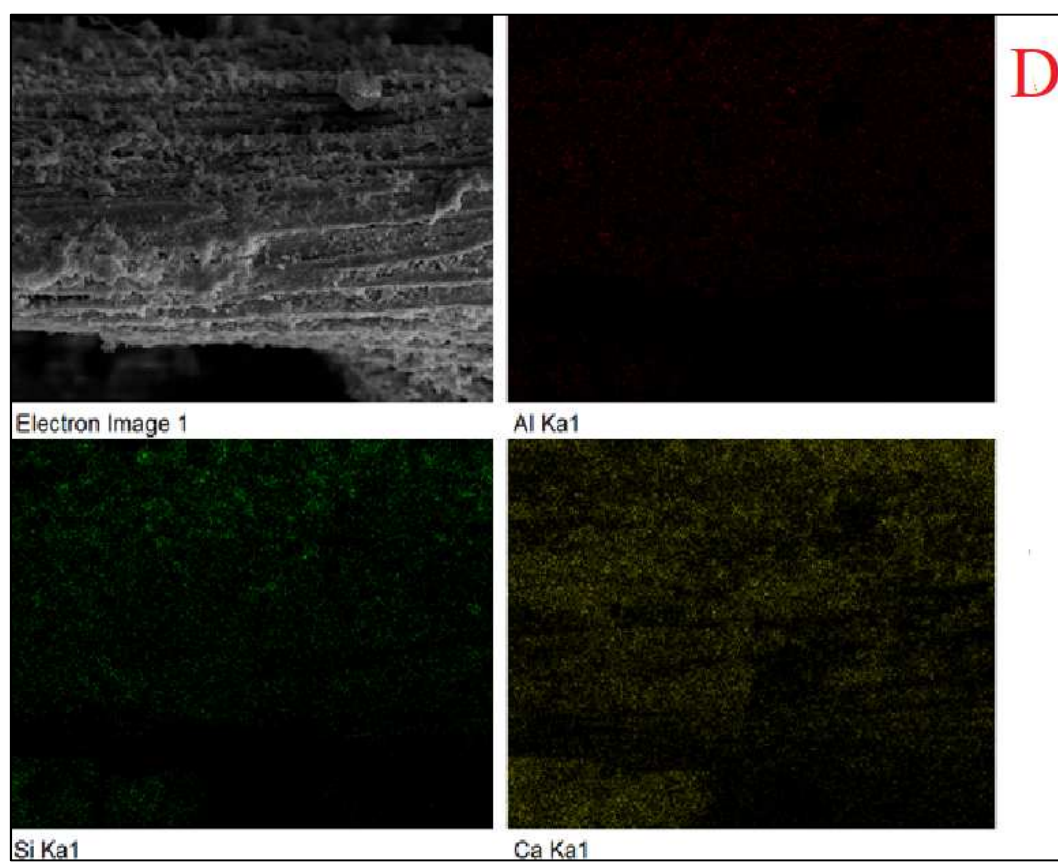
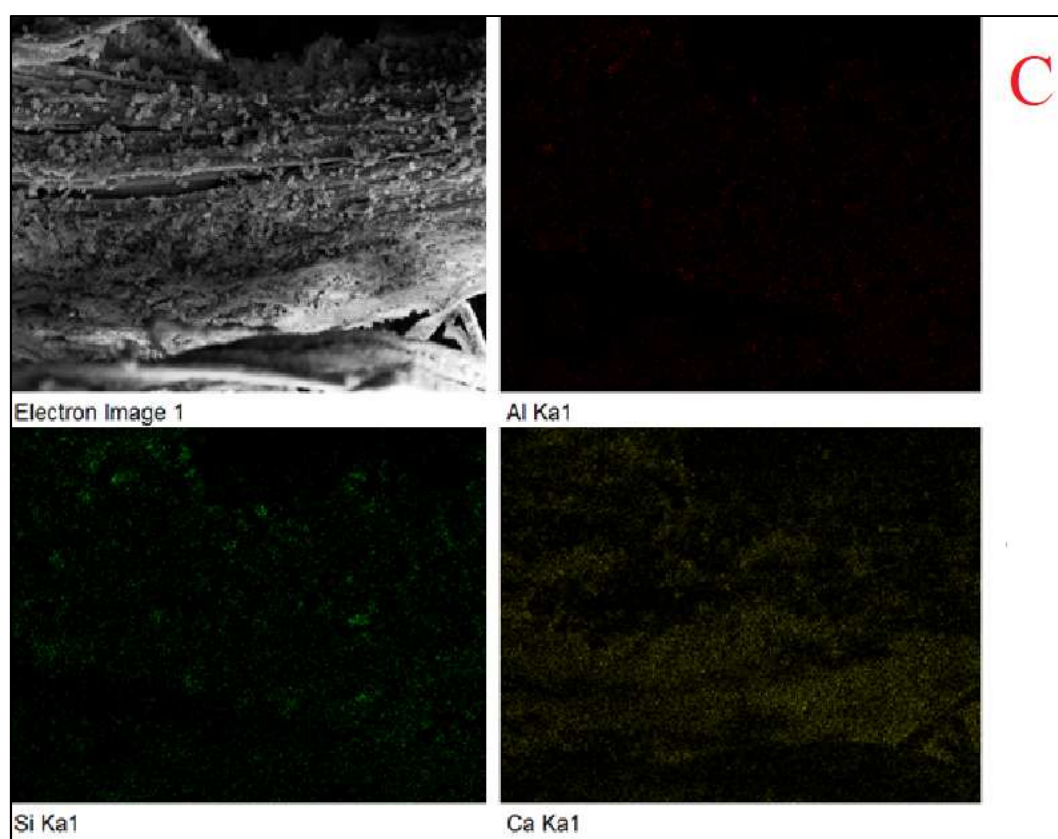
Fonte: Autor (2020)

Como pode ser observado na Figura 20 e também nos dados da Tabela 4: Composição das amostras obtidas pelo EDS, a concentração de cálcio no CP-F1 é maior que nas demais amostras, sendo a fibra sem tratamento a que contém a menor quantidade de cálcio (Figura 20: EDS 28 dias e as distribuições dos elementos cálcio, alumínio e silício: A) CP-FNAT, B) CP-F1, C) CP-F2, D) CP-F4. Ampliação de 1.000x). Assim, o cálcio está mais retido na superfície das fibras tratadas. Isso pode ser observado também na irregularidade da superfície das fibras que é maior no CP-F1, esta também, possui a maior concentração de sílica e alumínio.

A Figura 21: EDS 90 dias e as distribuições dos elementos cálcio, alumínio e sílica: A) CP-FNAT, B) CP-F1, C) CP-F2, D) CP-F4. Ampliação de 1.000x. mostra os resultados do EDS das fibras de sisal, presentes nos compósitos, sem e com tratamento de lignosulfonato aos 90 dias.

Figura 21: EDS 90 dias e as distribuição dos elementos cálcio, alumínio e sílica: A) CP-FNAT, B) CP-F1, C) CP-F2, D) CP-F4. Ampliação de 1.000x.



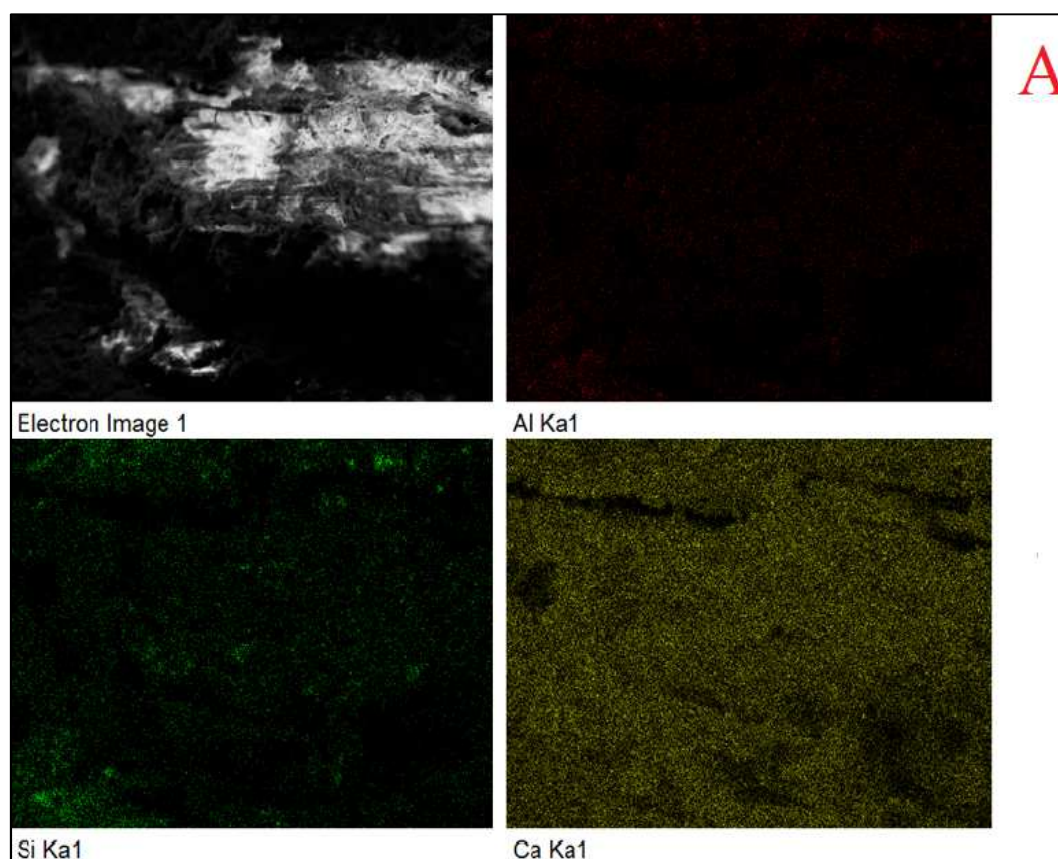


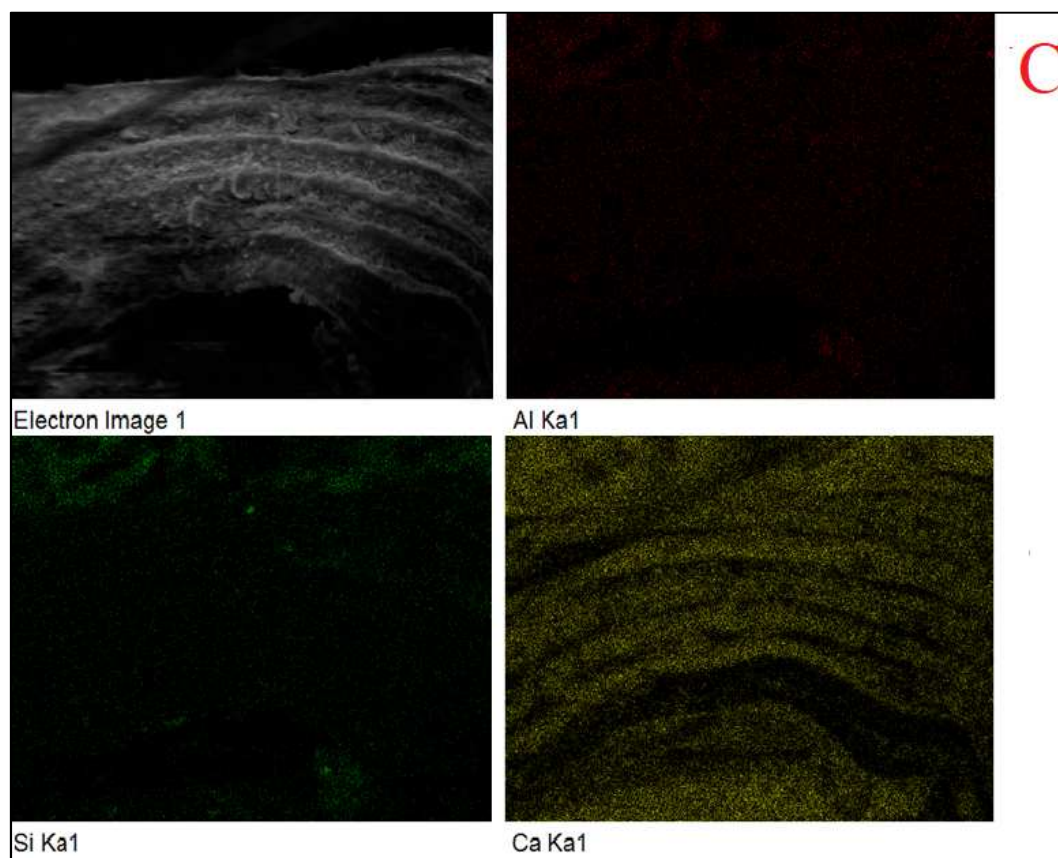
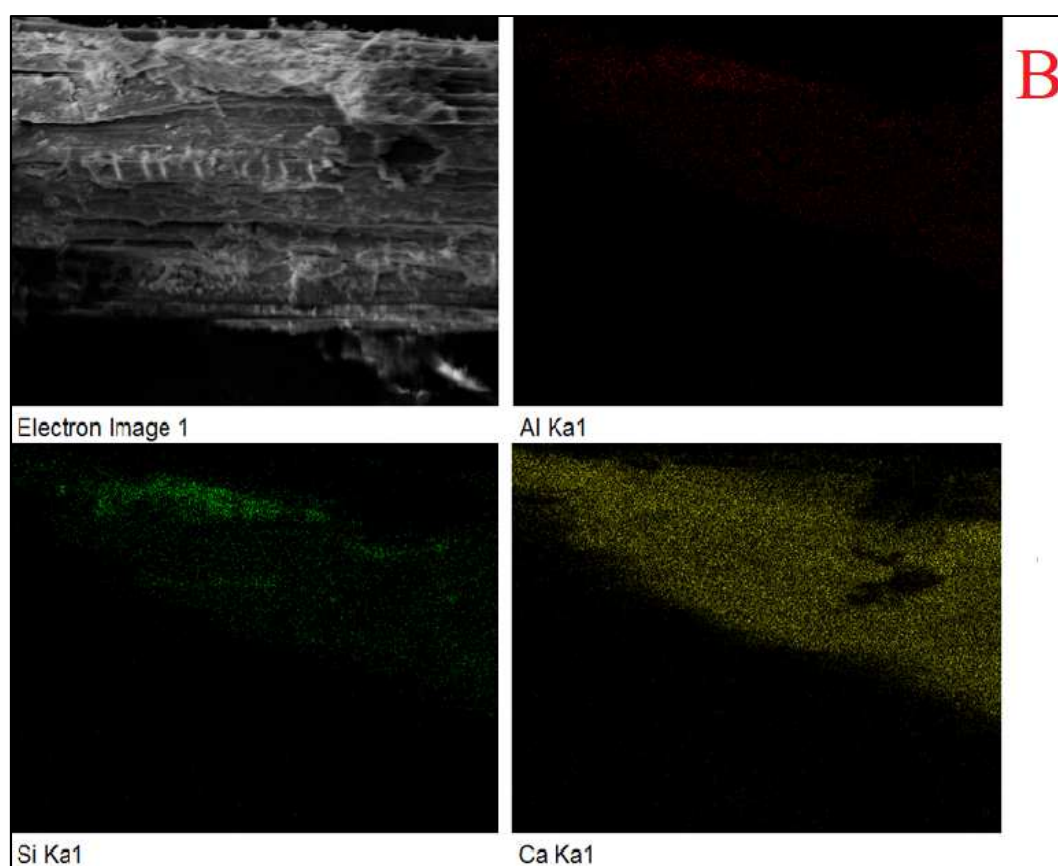
Fonte: Autor (2020)

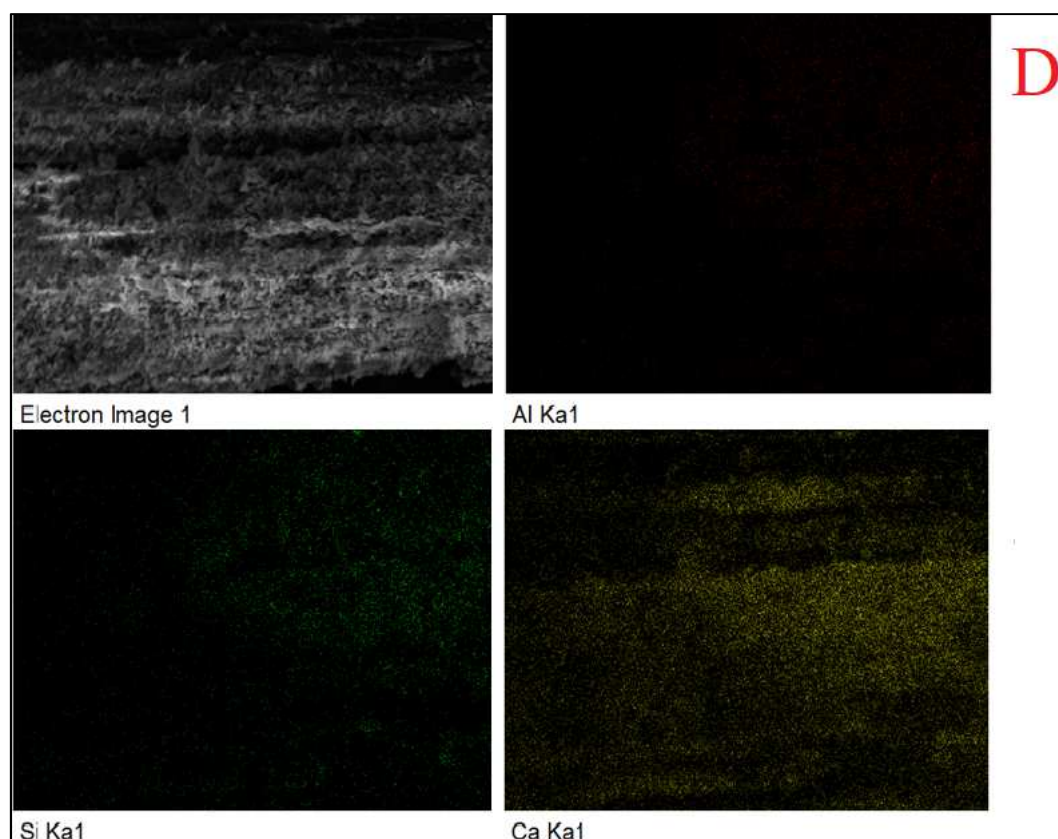
Na Figura 21 pode-se observar que a fibra está mais preservada no CP-F4, assim sendo pode-se inferir que o lignosulfonato esteja preservando a fibra. Observando na Figura 21 e também nos dados da Tabela 4, pode-se verificar que no CP-F4 tem a menor quantidade de cálcio na superfície e uma maior quantidade de silício na superfície da fibra.

A Figura 22 mostra os resultados do EDS das fibras de sisal, presentes nos compósitos, sem e com tratamento de lignosulfonato aos 180 dias.

Figura 22: EDS 180 dias: A) CP-FNAT, B) CP-F1, C) CP-F2, D) CP-F4. Ampliação de 1.000x.







Fonte: Autor (2020)

Na Figura 22 pode-se observar que a fibra está mais preservada no CP-F4 e no CP-F2, assim sendo pode-se inferir que o lignosulfonato esteja preservando a fibra. Observando na Figura 22 e também nos dados da Tabela 4, pode-se verificar que o CP-F4 tem a menor quantidade de cálcio na superfície e a maior quantidade de silício. Em contrapartida os valores da fibra F1 são os que mais apresentam cálcio e a menor quantidade de silício.

Como pode ser observado nas Figura 20, Figura 21 e Figura 22, os compósitos com fibras sem tratamento apresentam uma homogeneidade menor em sua superfície que vai aumentando à medida que aumenta a concentração de lignosulfonato adicionada. Portanto, indica que o lignosulfonato está retendo material na superfície da fibra, ou seja, diminuindo a absorção pela fibra da água e consequentemente dos produtos da hidratação.

Como apontado em outros estudos (SAVASTANO Jr., 2000; DIAS, 2005), a superfície e até mesmo os poros das fibras vegetais sem tratamento ficam impregnados principalmente de hidróxido de cálcio, por este composto ser solúvel e, portanto, é carregado e absorvido

juntamente com a água do poro pelas fibras vegetais. Pela Tabela 4, observa-se que o tratamento reduziu a impregnação de cálcio na superfície das fibras nos compósitos envelhecidos. Nas fibras sem tratamento isso não acontece.

Tabela 4: Composição das amostras obtidas pelo EDS

	28 dias			90 dias			180 dias		
	Al (%)	Si (%)	Ca (%)	Al (%)	Si (%)	Ca (%)	Al (%)	Si (%)	Ca (%)
CP-FNAT	3,00	4,62	92,38	2,45	4,41	93,15	1,73	4,55	93,72
CP-F1	1,41	3,47	95,12	3,36	9,87	86,77	1,59	3,65	94,75
CP-F2	2,11	4,23	93,66	3,28	6,71	90,01	2,52	6,72	90,76
CP-F4	1,83	5,03	93,14	4,52	11,75	83,74	2,69	7,41	89,90

Fonte: Autor (2020)

Com o envelhecimento, observa-se também a tendência de aumento da presença do elemento Si na superfície das fibras tratadas, o que não ocorre nas fibras sem tratamento. Pode-se inferir que o tratamento reduziu a impregnação de hidróxido de cálcio nas fibras e ainda aumentou a presença dos silicatos na interface com as fibras. Portanto, o tratamento pode contribuir para a durabilidade dos compósitos reduzindo a mineralização das fibras e, portanto, preservando-as.

4.2.3 Ensaios mecânicos de Flexão

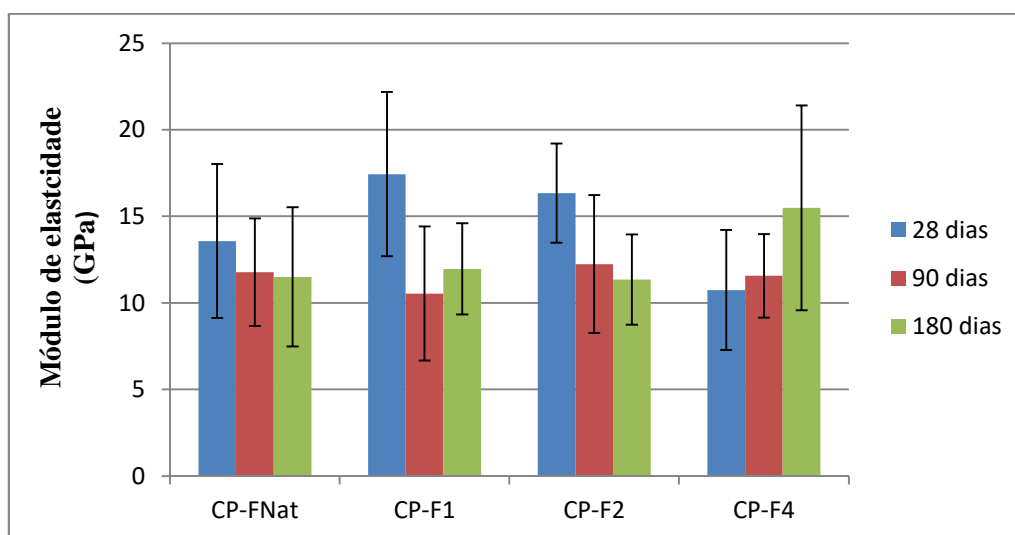
No ensaio de flexão obtiveram-se os resultados de Módulo de elasticidade, módulo de ruptura e tenacidade dos compósitos para cada idade analisada.

A Figura 23 apresenta a média do módulo de elasticidade nas três idades para cada grupo analisado. Observa-se que há uma tendência de queda do módulo de elasticidade com o passar do tempo, exceto no CP-F4 que apresentou um acréscimo de 44% aos 180 dias comparados aos resultados iniciais, isto indica que houve uma diminuição dos poros ao longo do tempo. Motta, John e Agopyan (2010) obtiveram um acréscimo de 38% com tratamento termomecânico do sisal, e Mundim (2019) não obteve acréscimos significativos, assim, este incremento no módulo de elasticidade obtido pelo tratamento

com lignosulfonato pode estar sendo benéfico não só pra preservação da fibra quanto pra melhora do compósito.

Neville (2015) diz que o módulo não apresenta incremento expressivo após os 28 dias, já a queda do módulo de elasticidade pode indicar que a fibra está menos aderida a matriz. O único compósito que apresentou acréscimo nesta propriedade foi o CP-F4, isto corrobora com o fato da fibra estar mais aderida à matriz além das fibras estarem mais preservadas, como visto nas imagens de MEV e EDS. Assim, o lignosulfonato acaba por preservar a fibra nesta concentração, com isso é provável que o lignosulfonato diminua a absorção da água pela fibra para a concentração de 4% após o envelhecimento e deixa a matriz mais densa melhorando a ancoragem fibra-matriz.

Figura 23: Módulo de Elasticidade (GPa) dos compósitos



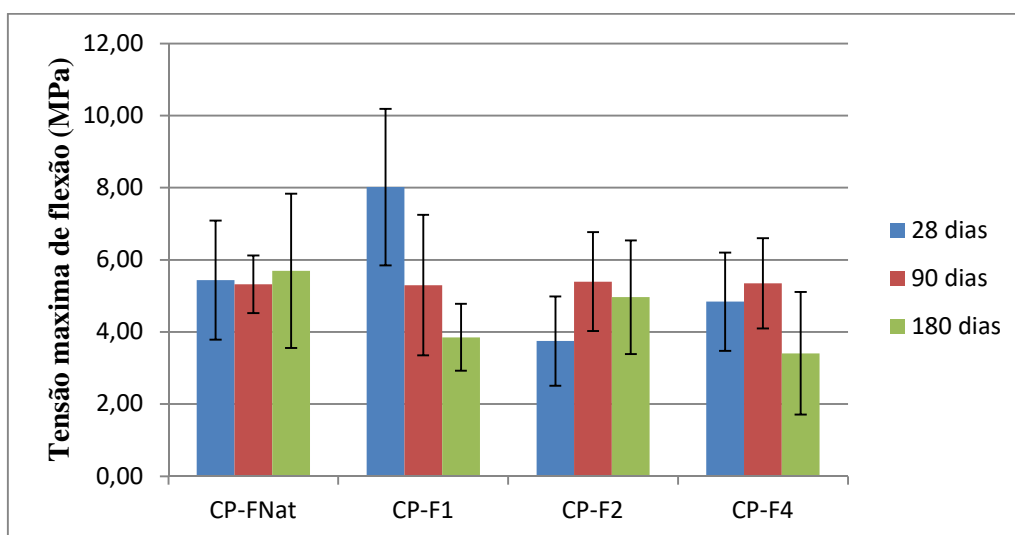
Fonte: Autor (2020)

Observa-se também que aos 28 dias houve um ganho nos valores de módulo de elasticidade de 28% no CP-F1 e de 20% no CP-F2 quando comparados ao CP-NAT, isto devido ao fato de as fibras não terem sofrido ruptura e sim serem arrancadas da matriz. Nas demais idades estes compósitos têm um comportamento próximo quanto ao módulo de elasticidade quando considerado a variação dos ensaios. Já o CP-F4 apresentou um acréscimo no módulo, devido a matriz mais coesa com melhor ancoragem entre a fibra-matriz, isto pode indicar também uma matriz mais densa com menos poros.

Na Figura 24 podem-se observar os resultados do módulo de ruptura nas três idades. Observa-se que aos 28 dias o CP-F1 tem uma maior resistência que os demais, isto pode estar atrelado ao fato das fibras estarem menos desfibriladas, já aos 90 dias esses resultados se equiparam, mesmo considerando o desvio padrão, e aos 180 dias o compósito reforçado com fibra natural se mostrou mais resistente à flexão, com um resultado próximo ao CP-F2. Ou seja, os compósitos com fibras tratadas obtiveram uma menor resistência à flexão.

Assim como nos resultados obtidos por Motta, John e Agopyan (2010) o incremento no módulo de elasticidade representaram queda na tensão de ruptura de forma similar ao observado no CP-F4, porém, para o tratamento com lignosulfonato esta queda foi de 60% enquanto no tratamento foi de 52%.

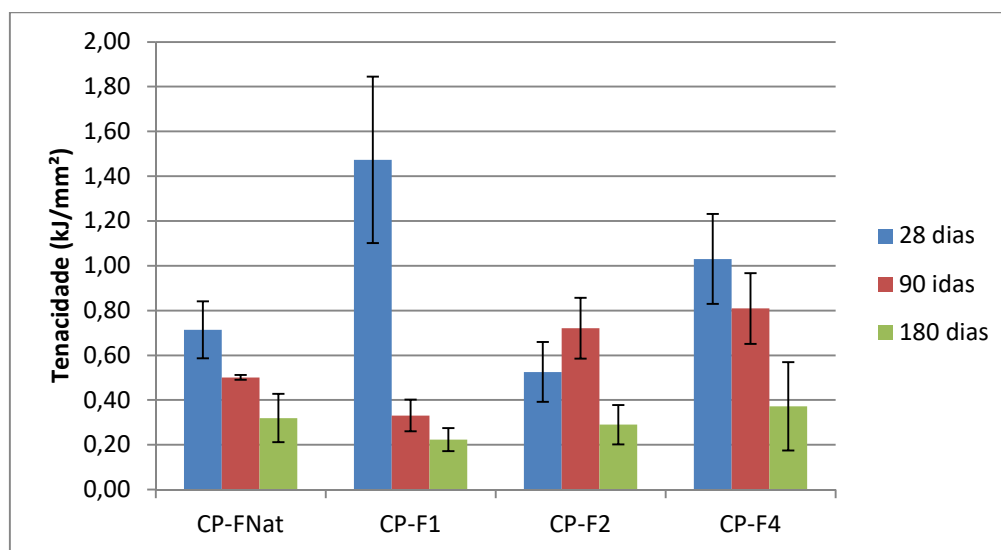
Figura 24: Módulo de ruptura (MPa) dos compósitos.



Fonte: Autor (2020)

No que diz respeito à tenacidade, os resultados obtidos estão apresentados na Figura 25.

Figura 25: Tenacidade (Kj/mm²) dos compósitos.



Fonte: Autor (2020)

Observa-se que aos 28 dias o CP-F1 teve uma tenacidade muito elevada quando comparados aos demais, apresentando um valor médio duas vezes maior que a média do CP-FNAT, isto devido ao fato que as fibras estão absorvendo energia quando são arrancadas da matriz. Porém, este ganho teve uma queda abrupta (85%) nas idades posteriores, apresentando os menores resultados de todos os grupos, devido ao deslocamento da fibra.

Já o CP-F4 teve um aumento em todas as idades quando comparado ao CP-FNAT, mesmo com a queda natural devido ao envelhecimento, pois a fibra sofre degradações. Nota-se que o CP-F2 aos 90 dias apresentou um ganho de 37% quando comparados aos resultados de 28 dias desta mesma amostra, como o ganho de tenacidade com o tempo não se manteve o qual pode ser justificado pela variação no preparo das fibras ou corpos de prova. Este resultado melhor que o do CP-F1 se deve ao fato de estar menos desfibrilado e ter um menor acúmulo de material hidratado na superfície da fibra.

A amostra CP-F4 teve a tenacidade aos 180 dias elevada, o que corrobora com os dados de que ao longo do tempo a solução de 4% de lignosulfonato auxilie na preservação da fibra, propiciando uma interação fibra-matriz melhor aderida, matriz mais rígida e fibras mais preservadas com menor desfibrilação.

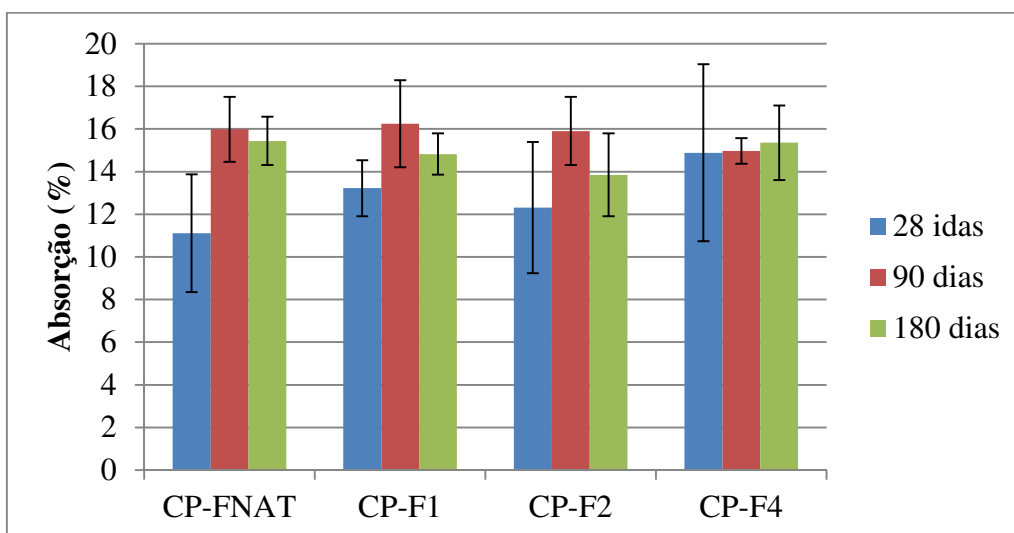
Fez-se testes de análise de variância para verificar se os resultados dos ensaios mecânicos de flexão dos corpos de prova são estatisticamente diferentes entre si. Foram feitos os testes para o módulo de ruptura, Módulo de elasticidade e tenacidade das amostras, estes testes estão detalhados no Anexo.

Como pode-se observar os testes para os módulos de ruptura e de módulo de elasticidade aceitou-se a igualdade das comparações, implicando que para a variação de 5% os resultados são estatisticamente iguais. Já para a tenacidade os valores de igualdade de médias não foram aceitos.

4.2.4 Ensaios físicos de absorção e porosidade

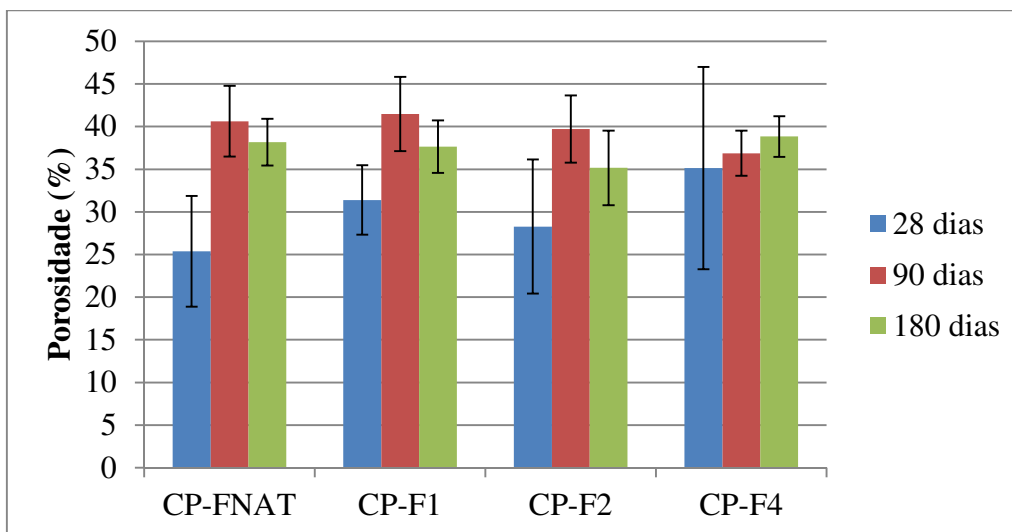
Os compósitos utilizados nos ensaios mecânicos foram ensaiados para obter os resultados de absorção Figura 26, porosidade (Figura 27) e massa específica (Figura 28).

Figura 26: Absorção dos compósitos



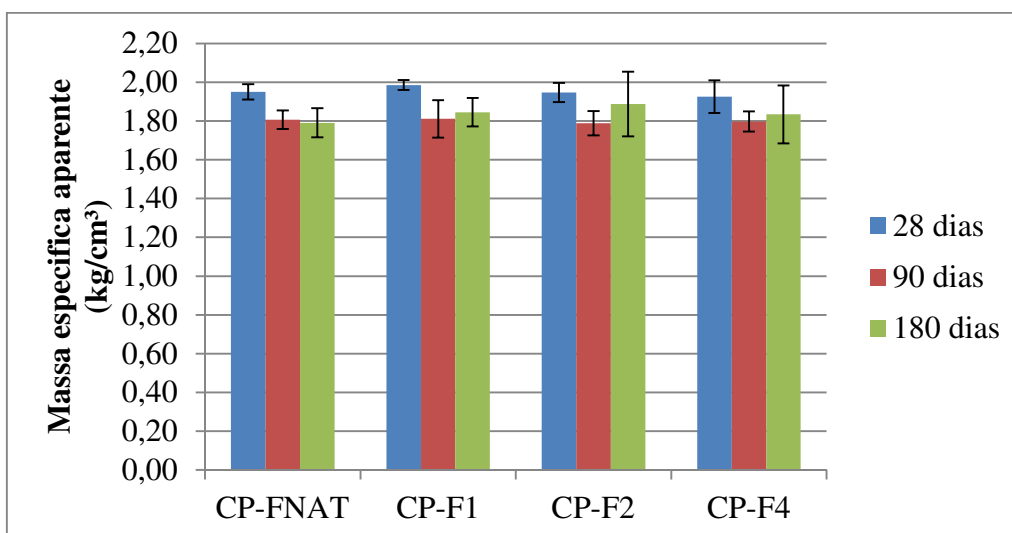
Fonte: Autor (2020)

Figura 27: Porosidade dos compósitos



Fonte: Autor (2020)

Figura 28: Massa específica dos compósitos



Fonte: Autor (2020)

A absorção dos compósitos aos 28 dias aumentou à medida que a concentração de lignosulfonato aumentou como mostra a Figura 26, já aos 90 e 180 dias as amostras se mantêm praticamente constantes, não havendo diferença entre as amostras com o tratamento e sem tratamento. Observa-se também que o teor de todos está inferior a 37% que é o recomendado pela ABNT (1993) para fibrocimentos sem adição de amianto.

O mesmo ocorre com a porosidade, conforme a Figura 27, e assim como Mundim (2019) os valores estão próximos de 40% para porosidade. O CP-F4 tem uma porcentagem maior

que os demais, porém, ele é o que tem menor incremento ao longo do tempo, mantendo se praticamente constante.

Já as massas específicas (Figura 28), ficaram bem próximas em todas as idades, sendo maior nas primeiras idades cerca de 7%, o que justifica uma menor porosidade e uma menor absorção, mesmo com acréscimo pequeno. Mesmo com a absorção do compósito maior no CP-F4 o lignosulfonato foi capaz de diminuir a absorção da fibra e mantém as propriedades mecânicas após o envelhecimento melhores que nos compósitos tratados.

CONCLUSÃO

O tratamento das fibras com lignosulfonato diminui a absorção de água das fibras, preservando-as à medida que aumenta o teor de lignosulfonato, isto é reforçado pelo fato de as fibras não tratadas terem uma maior desfibrilação, além do fato de que as fibras tratadas terem um aumento de sais de Ca(OH)_2 e maior acúmulo de silicatos na superfície das fibras. Além disso, as fibras sem tratamento com o passar do tempo sofrem ruptura, a matriz diminui a capacidade de absorver energia.

A amostra CP-F4 apresenta uma redução de 4% de sais de cálcio na superfície, além de um acréscimo de 47% na presença de silicatos nas fibras em relação aos 28 dias. Além de possuir uma menor desfibrilação, um módulo de elasticidade com acréscimo de 44% comparado ao CP-FNAT. O CP-F4 também possui uma matriz mais coesa e densa, pois melhora a deposição de material após os 28 dias promovendo a densificação da matriz, melhorando a ancoragem, reduzindo o descolamento da fibra, reduzindo a tenacidade e aumentando a absorção de energia.

Assim sendo, mesmo possuindo uma absorção do compósito maior que a dos demais, o tratamento com teor de 4% de lignosulfonato se mostra eficaz.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7581, Telha ondulada de fibrocimento, Rio de Janeiro, 1993.

ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. São Paulo, 2018.

ACHA, B. A.; MARCOVICH, N. E.; REBOREDO, M. M.. Lignin in jute fabric-polypropylene composites. **Journal of Applied Polymer Science**, [s.l.], v. 113, n. 3, p. 1480-1487, 5 ago. 2009. <https://doi.org/10.1002/app.29999>

AGOPYAN, V. **Materiais reforçados com fibras para a construção civil nos países em desenvolvimento: o uso de fibras vegetais**. 1991. Tese – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

AKKAYA, Y.; PELED, A.; SHAH, S. P. Parameters related to fiber length and processing in cementitious composites. **Materials and structures**, [s.l.], v. 33, n. 8, p. 515-524, out, 2000. <https://doi.org/10.1007/BF02480529>

ARAÚJO, C. T. F. de; FALCÃO, S. C. M.; BARBOZA, A. da S. R. Influencia da Adição de Fibras de Polipropileno no Comportamento das Juntas de Argamassa. In: 1º ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA-PROJETO-PRODUÇÃO EM CONCRETO PRÉ-MOLDADO, 1., 2005, São Carlos. **Anais eletrônicos**. São Carlos: USP, 2005. p. 1 - 12. Disponível em: http://www.set.eesc.usp.br/1enpppcpm/cd/conteudo/trab_pdf/114.pdf

ARAÚJO, D. L.; NUNES, F. G. T.; TOLEDO FILHO, R. D.; ANDRADE, M. A. S. Shear strength of steel fiber-reinforced concrete beams. **Acta Scientiarum – Technology**, [s.l.], v. 36, n. 6, p. 389-397, fev. 2014. <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v36i3.19005>

ARDANUY, M.; CLARAMUNT, J.; TOLEDO FILHO, R. D. Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research. **Construction and Building Materials**, Espanha, v. 79, n. 1, p. 115-128, mar. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.035>

ARESKOGH, D. **Structure modification of commercial lignosulfonates**. 2011. 64 p. Tese (Doutorado) – Chemistry, Royal Institute of technology Stockholm, Estocolmo, 2011.

ARRUDA FILHO, N. T. de; Dantas, C. P; LEAL, A. F. BARBOSA, N. P; SILVA, C.G; ALEXANDRE, M. V. Resistência mecânica de compósitos cimentícios leves utilizando resíduos

industriais e fibras de sisal. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s.l.], v. 16, n. 8, p.894-902, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000800012>

ARRUDA, A. J. V. de; ARRUDA, E. C. P.; ARAÚJO, R. B. de. Investigação de estratégias de leveza e resistência das fibras de agave para material de impressão 3D bioinspirado. **Mix Sustentável**, [s.l.], v. 5, n. 1, p.53-65, mar. 2019. <https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2019.v5.n1.53-65>

ARTIGAS, L. V. **Fibrocimento**. Seminário de Materiais de construção III, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

ASKELAND, D.R. **The Science and Engineering of materials: solutions manual**. 2. ed. Boston: PWS publishing Company, 1994.

AZEVEDO, A. R. G. **Desenvolvimento de placas cimentícias reforçadas com incorporação do lodo primário da indústria de papel de celulose**. 2018. 186 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Rio de Janeiro, 2018.

AZUMA, K. et al. Mesothelioma risk and environmentl exposure to asbestos: past end future trends in japan. **International Journal of Occupational and Enviromental Health**, [s.l.], v. 15, n. 2, p. 166-172, abr./jun., 2009. <https://doi.org/10.1179/oeh.2009.15.2.166>

BARBOSA, L. C. A.; MALTHA, C. R. A.; SILVA, V. L.; COLODETTE, J. L. Determinação da relação siringila/guaiacila da lignina em madeiras de eucalipto por pirólise acoplada à cromatografia gasosa e espectrometria de massas (PI CG/EM). **Química Nova**, v. 31, n. 8, p. 2035-2041, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422008000800023>

BARTRIP, P. W. G. **History of asbestos related disease**. Postgraduate Medical Journal, London, v. 80, n. 940, p. 72-76, Feb. 2004. <https://doi.org/10.1136/pmj.2003.012526>

BENTUR, A.; MINDESS, S. Fiber reinforced cimentitious composites. United Kingdon.: **Elsevier**, 2007. <https://doi.org/10.1201/9781482267747>

BRASIL. K. A. Analista Fiscal Pleno. **GT 2 gargalos das culturas do sisal, malva, piaçava, coco, seda e bambu: breve panorama para orientar uma proposta de governança**. Belo Horizonte: Slide, 2019. 33 slides, color. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/camaras->

setoriais-tematicas/documentos/camaras-setoriais/fibras-naturais/2019/21a-ro/diagnostico-setor-fibras_20-marco-2019_final-convertido.pdf>. Acesso em: 15 set. 2019.

BRITO, J.A. Cidade versus entulho. In: SEMINÁRIO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2., São Paulo, 1999. **Anais**. São Paulo, Comitê Técnico CT206 Meio Ambiente (IBRACON), 1999. p.56-67.

CALLISTER JR, W. D. JR. **Materials Science and Engineering - Introduction**. 2. ed. New York: Jonh Wiley and Sons, INC., 2003.

CARATIN, R. L. **Desenvolvimento de compósitos de matrizes de carbono e de vidro cimentícias com reforços contínuos de fibras**. 2014. 125 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

CARNEIRO, J. L. dos S. **Caracterização acessos de sisal usando descritores da planta e da fibra**. 2017. 118 f. Tese (Doutorado)- Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2017.

CARVALHO, A.T. et al. Tratamento de grãos por técnica de plasma a frio: alteração do comportamento hidrofílico para preservação e controle de germinação. **Biotecnologia: Ciência & Desenvolvimento**, [s.l.], n.28, p.22-25, 2002.

CÉLINO, A. Et.al. The hygroscopy behavior of plant fibers: a review. **Frontiers in chemistry**, v.1, January, p. 43, 2013. <https://doi.org/10.3389/fchem.2013.00043>

CHAFEI, S. TRAN, T. H; KHADRAOUI, F. BOUTOUIL.M.. Optimizing the formulation of flax fiber-reinforced cement composites. **Construct and Build Materials**, Guildford, v. 54, p. 59-64, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.038>

CHODOUNSKY, M. A; BINA, P. Concretos Poliméricos. In: 39º Reunião Ibacon, São Paulo, 1997. **Anais**. São Paulo, Ibracon, 1997. Vol. 1, p. 2897-310.

COELHO, Thamys da Conceição Costa. **Efeitos do envelhecimento natural no desempenho térmico de telhas onduladas de fibrocimento sem amianto**. 2017. 189 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017

CORREA, Viviane da Costa; CORREIA, Viviane da Cosa. **Produção de celulose nanofibrilada a partir de pola organossolve de bambu para nanoreforço de compósitos cimentícios**. 2015. 166 f. Tese (Doutorado) - Curso de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2015.

CSFN – Câmara Setorial de Fibras Naturais. **Panorama das fibras naturais no Brasil e cenários futuros**. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/camaras-setoriais-tematicas/documentos/camaras-setoriais/fibras-naturais/2018/copy_of_19a-ro/csfm-20-a-ro-in-sisal.pdf. Acesso em 20 jan. 2019.

CUNHA, J. S. C. **Estudo de Compósitos Poliuretânicos Reforçados com Fibras de Malva**. 2017. Cap. I; 51 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciências dos Materiais, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2017.

CURWELL, S.; COOPER, I. The implications of urban sustainability. **Building Research and Information**. v.26, nº1, p. 17-28, jan. 1998. <https://doi.org/10.1080/096132198370074>

D’Almeida, M. L. O.; Koga, M. E. T.; Ferreira, D. C.; Pigozzo, R. J. B.; Toucini, R.; Reis, H. M. dos; Viana, E. F. Composição química da madeira e matérias-primas fibrosas. *In*: SENAI (SP). **Celulose**. São Paulo: SENAI, 2013. Cap.1, p.11-58.

DE MORAIS, S.A.L., NASCIMENTO, E.A., DE MELO, D.C. Análise da madeira de Pinus Oocarpa parte I: estudo dos constituintes macromoleculares extrativos voláteis. **Revista Árvore**, São Paulo, ed. 29, v. 3, p. 461-470, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622005000300014>

DESNERCK, P.; LEES, J. M.; MORLEY, C. T. Bond Behaviour of Reinforcing Bars in Cracked Concrete. **Construction and Building Materials**, United Kington, v. 94, p. 126-136, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.043>

DIAS, C. M. R. **Efeitos do envelhecimento na microestrutura e no comportamento mecânico dos fibrocimentos**. 2005. 125 f. Dissertação (Mestrado em engenhara civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

DOHERTY, William O S; MOUSAVIOUN, Payam; FELLOWS, Christopher M.. Value-adding to cellulosic ethanol: Lignin polymers. **Industrial Crops And Products**, [s.l.], p. 259-276. mar. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.10.022>

EMBRAPA. Brasília: Embrapa, 2019. Disponível em: <<https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/sisal/arvore/CONT000gv5km0x602wx7ha0g934vgxu2mbm1.html>>. Acesso em: 25 dez. 2019.

ESMERALDO, A. M. **Preparação de novos compósitos suportados em matriz de fibra vegetal/natural.** 2006. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química, Química Orgânica e Inorgânica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

FARRAPO, C. L. **DURABILIDADE DE FIBROCIMENTO REFORÇADO COM POLPA DE SISAL APÓS 10 ANOS DE ENVELHECIMENTO NATURAL.** 2015. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Biomateriais, Compósitos Nanocompósitos Lignocelulósicos, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.

FENGEL, D. WEGENER, G. **Wood: chemistry, ultrastructure, reactions.** New York: Walter de Gruyter, 1984.613p. <https://doi.org/10.1515/9783110839654>

FIGUEIREDO, A. D.; CHAMA NETO, P.J.; FARIA, H.M. **A nova brasileira sobre fibras de aço.** Concreto & Construções, São Paulo, 67-76, abr./maio/jun.2008.

FIGUEREDO, A. D. Concreto com fibras de aço. **Boletim técnico da escola politécnica da USP.** BT/PCC/260- ISSN 0103-9830. São Paulo: USP, departamento de engenharia e construção civil. 68p. 2000.

FONSECA, C. S. **Desempenho de fibrocimentos extrudados produzidos com fibras e nanofibrilas de juta.** 2016. 126 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Biomateriais, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

FORMIGONI, A. Reciclagem de PET. **1st International Workshop Advances in Cleaner Production**, São Paulo, Universidade Paulista, 2007.

GOMES, C. E. M. **Propriedades da pasta de cimento Portland com adições do Copolímero Va/VeoVa e fibras de poliamida- estudo da interface fibra-matriz.** 2005. 221 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência e Engenharia dos Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0104-14282013005000010>

GOMES. T.S; VISCONTE, L.L.Y; PACHECO, E.B.A.V. Substituição da fibra de vidro por fibra de bananeira em compósitos de polietileno de alta densidade. **SCIELO**, [s.l.], v. 23, n. 2, p. 206-211, feb. 2013.

GONÇALVES, F. A. C. AMARAL, E.L.S; LOPES JUNIOR, J. L; LOPES, B.L.S; RIBEIRO JUNIOR, L.S; BRABO, D.R; AMARANTE, C.B. Fibras Vegetais: Aspectos Gerais, Aproveitamento, Inovação Tecnológica e uso em Compósitos. **Espacios**, [s.l.], v. 36, n. 6, p.12-28, 2018. Anual.

GUIA BASICO DE UTILIZAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND: **Boletim técnico-106**. 7ª edição, São Paulo, SP: Associação brasileira de cimento Portland, 2002.

GUNTHER, W.M.R. Minimização de resíduos e educação ambiental. In: **SEMINÁRIO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS E LIMPEZA PÚBLICA**, 7. Curitiba, 2000. Anais. Curitiba, 2000.

HAMAD, B.S. “Comparative Bond Strength of Coated and Uncoated Bars with Diffrent Rib Geometries”, **ACI Materials Journal**, 92, 6, 579-590, 1995. <https://doi.org/10.14359/9776>

HEBER, A. S.; LATORRACA, J. V. F.; PEREIRA, R. P. W.; MONTEIRO, M. B. O.; ABREU, F. A.; AMPARO, K. F. AGRARIAN SCIENCES. A supramolecular proposal of lignin structure and its relation with the wood properties. **Academia Brasileira de Ciências**, [s.l.], v. 81, n. 1, p. 137-142, mar, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0001-37652009000100014>

IKAI, S. et al. Asbestos-free technology with new high toughness polypropylene (PP) fibers in air-cured Hatschek process. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 24, n. 2, p. 171-180, Feb. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.06.019>

INSTITUTO BRASILEIRO DE CRISOTILA- IBC. Disponível em: <http://www.ibcbrasil.org.br/>. Acesso em: 12 de outubro de 2019.

IOZZI, M. A. **Desenvolvimento de compósitos de borracha reforçadas com fibras de sisal**. 2013. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciências dos Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

IPT. **Celulose e papel: tecnologia de fabricação da pasta celulósica**. 2. ed. São Paulo: Departamento de Divulgação do Ipt, 1988. 559 p.

IVANOV, I. D; STRAIF, K. Prevention of occupational cancer. **The global Occupation health network**, v. 11, p. 1-15, 2006.

IZQUIERDO, I. S. **Uso de fibra natural de sisal em blocos de concreto para alvenaria estrutural**. 2011. 146 p. Dissertação (Mestrado)- Escola de engenharia de São Carlos, São Carlos, 2011.

JIANG, Z.; HU, C. Selective extraction and conversion of lignin in actual biomass to monophenols: **A review**. **Journal of energy chemistry**, [s.l.], v. 25, n. 6, p. 947-956, out, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2016.10.008>

JOHN, V. M. J. Panorama sobre a reciclagem de resíduos na construção civil. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2., São Paulo, 1999. **Anais**. São Paulo, IBRACON, 1999. p.44-55.

JOHN, V.M. **Reciclagem de resíduos na construção civil – contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. São Paulo, 2000. 102p. Tese (livre docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 2000.

KOMURA, R. K. Investigação dos métodos de separação, uso e aplicação da Lignina proveniente da biomassa lignocelulósica. **O papel**, [s.l.], v. 1, n. 1, p. 37-37, set, 2016.

KUMAGAI, S.; KURUMATANI, N. Asbestos fiber concentration in the area surrounding a former asbestos cement plant and excess mesothelioma deaths in residents. **American Journal of Industrial Medicine**, [s.l.], v. 52, n. 10, p. 790-798, Oct. 2010. <https://doi.org/10.1002/ajim.20743>

LEÃO, R. M. **Tratamento superficial de fibra de coco e aplicação em materiais compósitos como reforço do polipropileno**. 2012. 74 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Brasília, Brasília, 2012.

LEVY NETO, F.; PARDINI, L.C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. São Paulo: Edgard Blücher, 2006, 366p.

LINTON, A. et al. The ticking time-bomb of asbestos: its insidious role in the development of malignant mesothelioma. **Critical Review in Oncology Hematology**, [s.l.], v. 2, n. 2, p. 200-212, Nov. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.critrevonc.2012.03.001>

LOPES, F. M. et al. Modificação das propriedades das fibras de curauá por acetilação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s.l.], v. 15, n. 3, p.316-321, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000300014>

MAZZOLI, A.; MONOSI, S.; PLESCIA, E. S. Evaluation of the Early-Age-Shrinkage of Fiber Reinforced Concrete (FRC) Using Image Analysis Methods. *Construction and Building Materials*, v. 101, p. 596-601, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.090>

MEDEIROS, A. **Estudo do comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras**. 2012. 201 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

Mehta K., Monteiro P. J. M. **Concreto. Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 4ª Ed, IBRACON: 674 p.; São Paulo, Brasil; 2014.

MENDES, R. Amianto e Política de Saúde Pública no Brasil. **Cadastro de Saúde pública**. Vol. 23 n. 7. Rio de Janeiro, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0102-311X2007000700001>

MIRANDA, C. S. et al. Modificação da Rugosidade de Fibras de Carbono por Método Químico para Aplicação em Compósitos Poliméricos. **Química Nova**, [s.l.], v. 38, n. 2, p.161-165, 2015.

MIRANDA, C. S. et al. Efeito dos tratamentos superficiais nas propriedades do bagaço da fibra de piaçava *Attalea funifera* Martius. **Química Nova**, [s.l.], v. 38, n. 2, p.161-165, 2014.

MOTTA, L. A. C.; JOHN, V., M.; AGOPYAN, V. Thermo-mechanical treatment to improve properties of sisal fibres composites. **Materials Science Forum**, [s.l.], v. 636-637, p. 253-259, 2010. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.636-637.253>

MUNDIM, P. B. **Estudo da modificação superficial de fibras de sisal com ligninas, e sua utilização em matrizes cimentícias**. 2019. 133 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Materiais e Construção Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

MUSSATTO, S. I.; TEIXEIRA, J. A. **Lignocellulose as raw material in fermentation processes**. Portugal: Formatex. Institute for Biotechnology and Bioengineering. Center of Biological Engineering, 2010.

NETO, A. H. A.; GOMES, A. B. V.; SOUZA, A. M. M.; SOUZA, D. C. L.; SÁ, I. R.; LIMA, L. R. M.; LIMA, P. T. M. **Coberturas: Cobertura Fibrocimento**. Centro Universitário do Maranhão, São Luís, 2010.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5 ed. São Paulo: Pini, 2015. NEVILLE, Adam M. **Propriedades do concreto**. 5 ed. São Paulo: Pini, 2015.

OLIVEIRA, F. **Lignosulfonato de sódio como agente de modificação de fibra lignocelulósica e da formulação de termorrígido fenólico**. 2010. 137 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010.

ONUAGULUCHI, O.; BANTHIA, N. Plant-based natural fibre reinforced cement composites: A review. **Cement and Concrete Composites**, [s.l.], v. 68, n. 1, p. 96-108, fev. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.02.014>

PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S. Cementitious building materials reinforced with vegetal fibers: a review. **Construction and building Materials**, [s.l.], v. 25, n. 2, p. 575-581, fev, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.024>

PARDINI, L. C.; GONÇALVES, A. Processamento de compósitos termoestruturais de carbono reforçado com fibras de carbono. **Journal Of Aerospace Technology And Management**, [s.l.], v. 1, n. 2, p.231-241, 2009. <https://doi.org/10.5028/jatm.2009.0102231241>

PAULA, P. G. de. **Formulação e caracterização de compósitos com fibras vegetais e matriz termoplástica**. 2011. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2011.

PEREIRA, C. L.; SAVASTANO JUNIOR. H.; PAYÁ, J.; SANTOS, S. F.; BORRACHERO, M. V.; MONZÓ, J.; SORIANO, L. **Use of highly reactive rice husk ash in the production of cement matrix reinforced with green coconut fiber**. **Industrial Crops and Products**, [s.l.], v. 49, p. 88-96, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.04.038>

PICANÇO, M. S.; GHAVAMI, K. **Comportamento à compressão de argamassas reforçadas com fibras vegetais da Amazônia**. Rem: Revista Escola de Minas. 2008, v.61, n.1, pp.13-18. ISSN 0370-4467. <https://doi.org/10.1590/S0370-44672008000100003>

PIMENTEL, M.G.; BORGES, J.P.C.; PICANÇO, M.S.; GHAVAM, K. Resposta à flexão e análise de tenacidade de argamassas reforçadas com fibras de Curauá. **Revista Matéria**, [s.l.], v.21, n.1, p.1826, 2016. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620160001.0003>

PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 1999. 218 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

ROSSI, F. G.; MARTINS, J.; DENARI, M.; HASSAINE, H.; GREGÓRIO, T.; REIS, C. E. N. Incorporação da fibra do bagaço de cana-de-açúcar no cimento. **Congresso Brasileiro de**

Engenharia Quimica, [s.l.], n. , p.1-8, 2014. <https://doi.org/10.5151/chemeng-cobeq2014-1629-18338-160913>

SALES, C. G. **Fibra de Curauá como Reforço em Matriz Cimentícia para Fabricação de Telhas e Corpo de provas de Fibrocimento**. 2015. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2015.

SALVADOR, R. P.; FIGUEIREDO, A. D. Análise comparativa de comportamento mecânico de concreto reforçado com macrofibra polimérica e com fibra de aço. **Revista Material**, [s.l.], v. 18, n. 2, p. 1273-1285, fev, 2013. <https://doi.org/10.1590/S1517-70762013000200003>

SÁNCHEZ, L. E. **Avaliação de Impactos ambientais**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 553 p.

SANTOS, D. S. **Produção De Etanol de Segunda Geração: por Zymomonas Mobilis naturalmente ocorrente e Recombinante, empregando Biomassa Lignocelulósica**. 2012. 218 f. Tese (Doutorado)- Escola de química, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, 2012.

SANTOS, L. C. P. **Estudo de compósitos de cimento portland com polpa kraft de celulose modificados com látex natural e metacaulim**. 2018. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

SAVASTANO, H. J. **Materiais à base de cimento reforçado com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para construção civil de baixo custo**. 200,7p, 22p. Tese (livre docência em engenharia civil)- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.

SAWSEN, C. et al. Effect of flax fibers treatments on the rheological and the mechanical behavior of a cement composite. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 79, p. 229-235, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.091>

SENFF, L.; FOLGUERAS, M.V.; HOTZA, D. CP V ARI- RS Cement Hydratation: influence of water o hidratation reactions. **Revista Materia**, v. 3, n. 2, p. 31-45, jan, 2005.

SHREVE, R. N.; BRINK JUNIOR, J. A.. **Indústrias de Processos Químicos**. 4. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1980. 732 p.

SILVA, A.C. **Estudo da durabilidade de compósitos reforçados com fibras de celulose**. 2002. 128 p. Dissertação (Mestrado) - Escola politécnica da Universidade de São Paulo, 2002.

SILVA, Aluizio Caldas e. **Estudo da durabilidade de compósitos reforçados com fibras de celulose**. 1998. 145 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

SILVA, D.W. **Propriedades físico-mecânicas de fibrocimento reforçado com fibras de eucalipto tratadas termicamente**. 2015. 66 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Biomateriais, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.

SILVA, E.; MARQUES, M. ; FORNARI JR, C.F. Aplicação de fibra de coco em matrizes cimentícias application of coconut fiber in cementitious matrix, **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental** (e-ISSN: 2236-1170), [s.l.], v. 8, p. 1555-1561, set-dez, 2012. <https://doi.org/10.5902/223611706096>

SILVA, G. J. B. **Estudo do Comportamento do Concreto de Cimento Portland produzido com a Adição do Resíduo de Polimento do Porcelanato**. 2005. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

SILVA, Gilmar Correia et al. Propriedades de adesivo aplicado em painéis a partir da substituição por lignosulfonato do processo sulfito. **SciELO**, Santa Maria, v. 29, n. 1, p.0-0, maio 2019. Trimestral. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926669010002670?via%3Dihub>>. Acesso em: 15 set. 19. <https://doi.org/10.5902/1980509818414>

SILVA, L. C. T.; GARCEZ, M. R. Compósitos de Engenharia de Matriz Polimérica. In: Isaia, G. C. (edição). **Materiais de Construção Civil: e princípios de ciências e engenharia de materiais**. 2.ed. São Paulo: Ibracon, 2010. v.2, p.1481-1522.

SILVA, M. A. **Utilização de lignosulfonato de cálcio e magnésio em misturas com fenol-formaldeído na produção de painéis aglomerados**. 2016. 32 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Instituto de Florestas, Ciências Ambientais e Florestais, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro Instituto de Florestas, Rio de Janeiro, 2016.

SILVA, M. A.; PABLO, V. S; GILLMAR, C. S; LELIS, R.C. NASCIMENTO. A. M. N; BRITO, E. O. Utilização de lignosulfonato e adesivo Fenol-Formaldeído na produção de painéis aglomerados. **Scientia Florestalis**, [s.l.], v. 45, n. 115, p.423-433, 2017. <https://doi.org/10.18671/scifor.v45n115.01>

SILVA, R.; HARAGUCHI, S. K.; MUNIZ, E. C.; RUBIRA, A. F. Aplicações de fibras lignocelulósicas na química de polímeros e em compósitos. **Química Nova**, [s.l.], v. 32, n. 3, p. 661-671, abr. 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000300010>

SJÖSTRÖM, E. **Wood polysaccharides**: Wood chemistry, Fundamentals and applications. New York: New York Academic, 1891.

SMITH, W. F. **Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**, McGraw-Hill. Afraid-Portugal. P.767-768,998

TEJADO, M.; MORENO, J.L.; HERNANDEZ, M.T.; GARCIA, C. Application of two beet vinasse forms in soil restoration: effects on soil properties in an arid environment in southern Spain. **Agriculture Ecosystems Environment** 119: 289-298p. 2007. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.07.019>

TESSARO, A. B; Gonçalves, M.R.F.; GATTO, D.A.; POOLNOW, E.N; CARREÑO, N.I.V; Delucis, R de.A. Compositos cimentícios reforçados com fibras de eucalipto puras e tratadas com tetraetilortossilicato (TEOS 98%). **Ambiente Construído**, [s.l.], v. 15, n. 3, p. 47-55, jun/set. 2015. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212015000300025>

TOLEDO FILHO, R. D.; GHAVAMI, K.; ENGLAND, G. L.; SCRIVENER, K. Development of vegetable fibre-mortar composites of improved durability. **Cement & Concrete Composites**, v.25, p. 185-96, 2005. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00018-5)

TONOLI, G.H.D et al. Performance and durability of cemente based composites reinforced with refined sisal poup. **Materials and manaturing Process**, [s.l.], v. 22, n. 2, p. 149-156, 2007. <https://doi.org/10.1080/10426910601062065>

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 jul. 2009.

WITTMANN, F. H.; BELTZUNG, F.; ZHAO, T. J. Shrinkage Mechanisms, Crack Formation and Service Life of Reinforced Concrete Structures. **International Journal Structures Engineering**, [s.l.], v. 1, n. 1, p. 13-28, 2009. <https://doi.org/10.1504/IJSTRUCTE.2009.030023>

Yang, B.; WYMAN, C.E. Chracterization degree of polymerization of xyloologomers produces by flowthrough hydrolysis of purê xylan and corn stover with water. **Bioresource Technology**. [s.l.], v. 99, p.5756-5762, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.10.054>

ANEXO

Teste ANOVA

Ruptura dos CPS

Estatísticas

Variável	N	N*	Média	DesvPad	Variância	Mínimo	Máximo
28 dias	4	0	5,513	1,812	3,284	3,750	8,020
90 dias	4	0	5,3425	0,0435	0,0019	5,3000	5,4000
180 dias	4	0	4,478	1,039	1,079	3,410	5,690

ANOVA

Informações dos Fatores

Fator	Níveis	Valores
Fator	3	28 dias; 90 dias; 180 dias

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Fator	2	2,464	1,232	0,85	0,460
Erro	9	13,093	1,455		
Total	11	15,558			

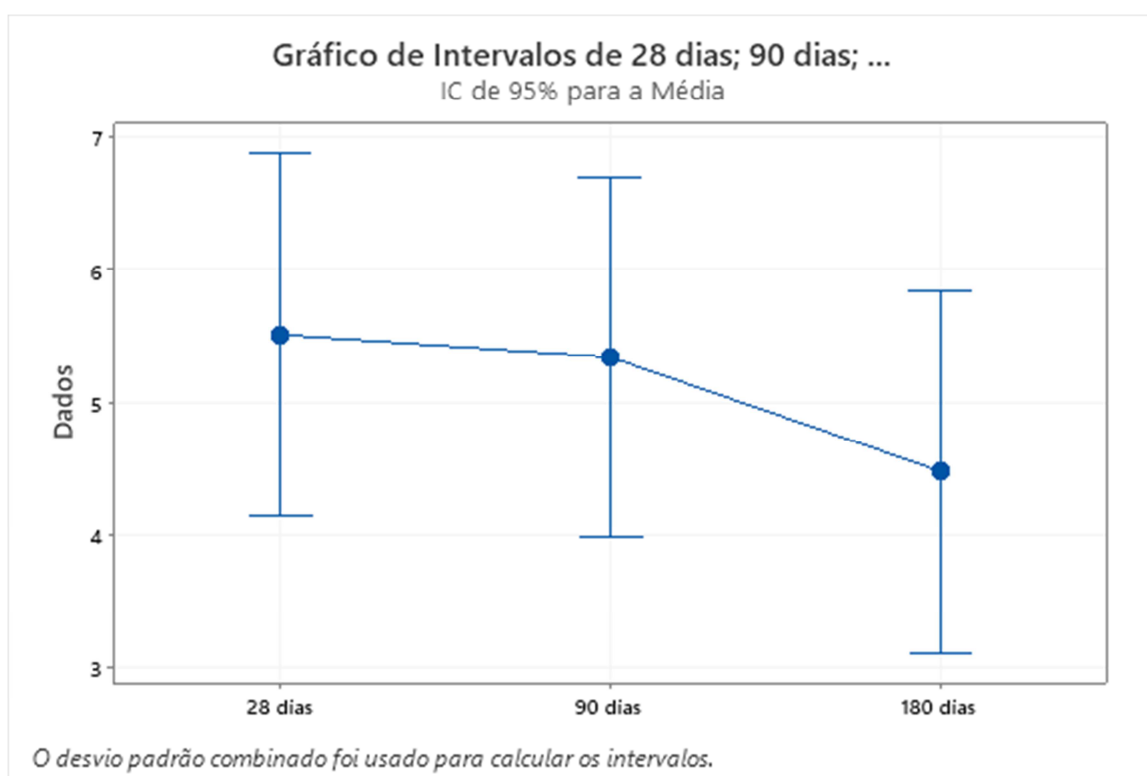
Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
1,20616	15,84%	0,00%	0,00%

Médias

Fator	N	Média	DesvPad	IC de 95%
28 dias	4	5,513	1,812	(4,148; 6,877)
90 dias	4	5,3425	0,0435	(3,9782; 6,7068)
180 dias	4	4,478	1,039	(3,113; 5,842)

DesvPad Combinado = 1,20616



Módulo de elasticidade dos CPS

Estatísticas

Variável	N	N*	Média	DesvPad	Variância	Mínimo	Máximo
28 dias	4	0	14521	2997	8984071	10743	17434
90 dias	4	0	11527	716	512186	10539	12234
180 dias	4	0	12574	1958	3834359	11346	15485

ANOVA

Informações dos Fatores

Fator	Níveis	Valores
Fator	3	28 dias; 90 dias; 180 dias

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Fator	2	18469745	9234873	2,08	0,181
Erro	9	39991848	4443539		
Total	11	58461594			

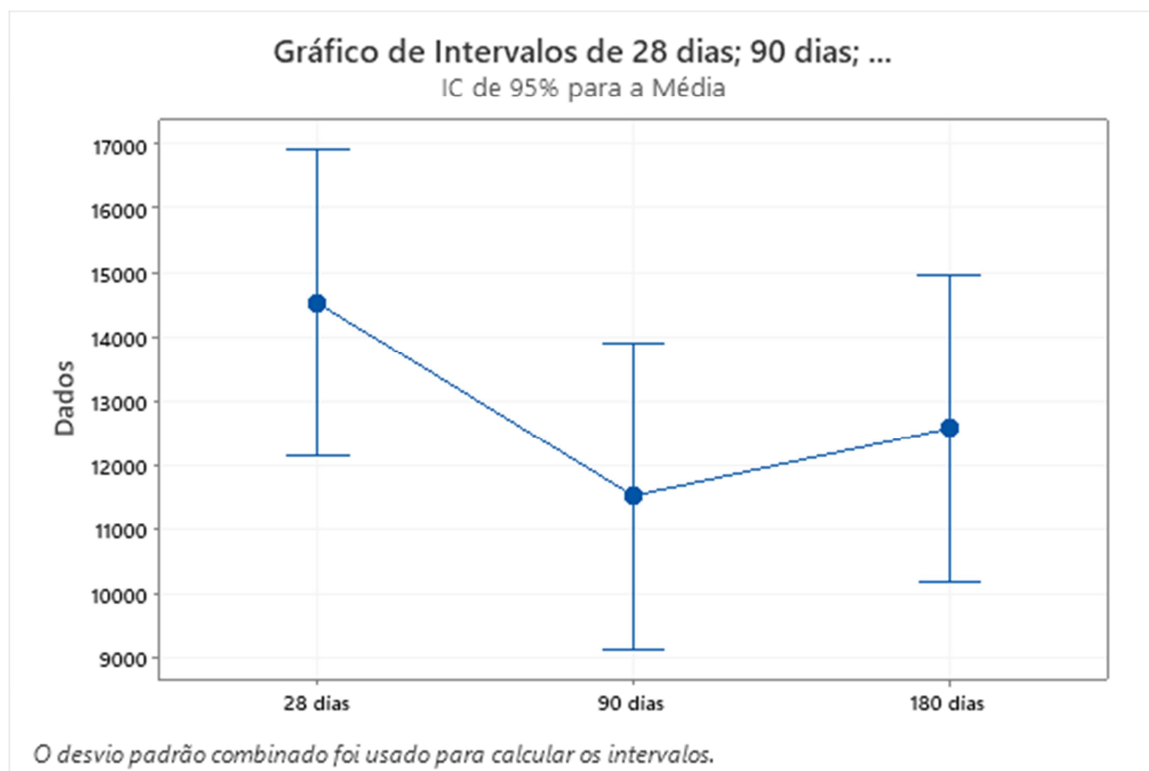
Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
2107,97	31,59%	16,39%	0,00%

Médias

Fator	N	Média	DesvPad	IC de 95%
28 dias	4	14521	2997	(12137; 16906)
90 dias	4	11527	716	(9143; 13911)
180 dias	4	12574	1958	(10190; 14959)

DesvPad Combinado = 2107,97



Ruptura dos CPS

Estatísticas

Variável	N	N*	Média	DesvPad	Variância	Mínimo	Máximo
28 dias	4	0	0,935	0,412	0,170	0,530	1,470
90 dias	4	0	0,590	0,217	0,047	0,330	0,810
180 dias	4	0	0,3000	0,0627	0,0039	0,2200	0,3700

ANOVA

Informações dos Fatores

Fator	Níveis	Valores
Fator	3	28 dias; 90 dias; 180 dias

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Fator	2	0,8085	0,40423	5,49	0,028
Erro	9	0,6627	0,07363		
Total	11	1,4712			

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,271355	54,95%	44,94%	19,92%

Médias

Fator	N	Média	DesvPad	IC de 95%
28 dias	4	0,935	0,412	(0,628; 1,242)
90 dias	4	0,590	0,217	(0,283; 0,897)
180 dias	4	0,3000	0,0627	(-0,0069; 0,6069)

DesvPad Combinado = 0,271355

