



ELIZETH NEVES CARDOSO SOARES

**INFLUÊNCIA DE DIFERENTES TIPOS DE FIBRAS NAS
PROPRIEDADES DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS**

**LAVRAS – MG
2023**

ELIZETH NEVES CARDOSO SOARES

**INFLUÊNCIA DE DIFERENTES TIPOS DE FIBRAS NAS PROPRIEDADES DE
COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais, área de concentração em Compósitos e Nanocompósitos Lignocelulósicos, para obtenção do título de Doutora.

Prof. Dr. José Benedito Guimarães Junior
(Orientador, UFLA)
Dra. Maria Alice Martins
(Coorientadora, UFLA)
Dr. Danillo Wisky Silva
(Coorientador, UFLA)
Dra. Dayana Cristina Silva Garcia
(Coorientadora, UFMG)

**LAVRAS – MG
2023**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pela própria autora.**

Soares, Elizeth Neves Cardoso.

Influência de diferentes tipos de fibras nas propriedades de
compósitos cimentícios / Elizeth Neves Cardoso Soares. - 2023.
101 p. : il.

Orientador(a): José Benedito Guimarães Junior.

Coorientador(a): Maria Alice Martins, Dayana Cristina Silva
Garcia, Danillo Wisky Silva.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2023.
Bibliografia.

1. Fibras lignocelulósica. 2. Tratamento superficial. 3.
Compósito cimentício. I. Guimarães Junior, José Benedito. II.
Martins, Maria Alice. III. Garcia, Dayana Cristina Silva. IV. Silva,
Danillo Wisky. V. Título.

ELIZETH NEVES CARDOSO SOARES

**INFLUÊNCIA DE DIFERENTES TIPOS DE FIBRAS NAS PROPRIEDADES DE
COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS**

**INFLUENCE OF DIFFERENT TYPES OF FIBERS ON THE PROPERTIES OF
CEMENTICIOUS COMPOSITES**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais, área de concentração em Compósitos e Nanocompósitos Lignocelulósicos, para obtenção do título de Doutora.

APROVADA em 28 de junho de 2023.

Prof. Dr. José Benedito Guimarães Junior	UFLA
Dra. Maria Alice Martins	UFLA
Dr. Danillo Wisky Silva	UFLA
Dra. Dayana Cristina Silva Garcia	UFMG
Dr. White José dos Santos	UFMG
Dra. Lina Bufalino	UFRA
Dr. Thiago Bomjardim Porto	CEFET
Dra. Josy Anteveli Osajima	UFPI

Prof. Dr. José Benedito Guimarães Junior
(Orientador, UFLA)
Dra. Maria Alice Martins
(Coorientadora, UFLA)
Dr. Danillo Wisky Silva
(Coorientador, UFLA)
Dra. Dayana Cristina Silva Garcia
(Coorientadora, UFMG)

**LAVRAS – MG
2023**

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo dom da vida e pelas oportunidades a mim concedidas.

Ao meu querido esposo Vanderley que me fortalece todos os dias e pelo amor, incentivo e por proporcionar meios para conseguir meus objetivos.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais (PPGBIOMAT), pela oportunidade de realizar o doutorado.

Aos professores Dr. José Benedito Guimarães, Dra Maria Alice e Dr. Danillo pela orientação e coorientação e por todo conhecimento repassado durante 4 anos.

A professora Dra. Dayana Cristina, pela amizade, parceria, compreensão, paciência na coorientação e pelo incentivo que tornaram possível a conclusão desta tese.

À faculdade Pitágoras por contribuir com os laboratórios e equipamentos para realização dos ensaios.

À Embrapa por contribuir com a realização dos ensaios.

À Técnica Mara – Faculdade Pitágoras – pela amizade e troca de conhecimentos.

Aos amigos e funcionários da UEPAM, pelo companheirismo e pelos momentos de descontração vivenciados.

Aos meus familiares e amigos, pelas alegrias que passamos juntos.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que me apoiaram direta e indiretamente ao longo desta caminhada.

RESUMO

O desenvolvimento de compósitos cimentício reforçados com fibras vegetais tem recebido destaque como uma tecnologia alternativa para a produção de novos materiais que proporcione um menor impacto ambiental. Existem duas maneiras de melhorar as propriedades do compósito cimentício reforçado com fibras, sendo o tratamento superficial da fibra vegetal e inserção de aditivos surfactantes melhorando as propriedades da matriz cimentícia. A condição ideal para realizar o tratamento superficial foi estudada com base em pesquisas na literatura, em que o meio alcalino utilizado foi o hidróxido de sódio (NaOH) 5% (m/v), aquecido e agitado por 2 h. Avaliou-se as fibras na densidade, umidade e morfologia e os compósitos nas propriedades físicas, mecânicas e microestrutural. Os resultados mostraram que o tratamento alcalino modificou quimicamente a morfologia superficial das fibras, além extrair impurezas, resultando no aumento da rugosidade superficial, o que confere melhor adesão entre fibra e matriz cimentícia, reação de hidratação e cura interna. Através das análises realizadas de MEV, DRX, TG e ensaios de propriedades física e mecânica nos compósitos, pode-se verificar melhor capacidade de interação das fibras tratadas com a matriz. Houve uma redução de absorção de água dos compósitos de fibra tratada, com esses resultados confirma que o tratamento foi eficiente para melhorar aderência da fibra/matriz. A segunda proposta da pesquisa foi avaliar o efeito de aditivos surfactantes (plastificante lignosulfonato e incorporador de ar) em fibrocimento extrudado com fibra de sisal *in natura*. Para isso, foram realizadas análises mecânicas, físicas e microestruturais dos compósitos de fibrocimento. Cabe notar que o plastificante lignosulfonato (FSADR0.6) proposto mostrou-se mais eficiente do que o incorporador de ar (FSA0.8) e referência (FSA) em relação ao volume de ar incorporado e à estabilidade do sistema de poros formado. Além disso, a densidade aparente não teve uma redução significativa conforme esperado, entretanto a combinação de aditivos proporcionou o aumento das propriedades mecânicas. Sendo assim, o presente estudo com bases em ensaios pode comprovar que as fibras vegetais tratadas melhoram o desempenho de argamassa cimentícia e que não tratadas podem ser adicionados aditivos surfactantes para melhorar as propriedades mecânica e física do compósito cimentício reforçado com fibra de sisal *in natura*.

Palavras-chave: Matriz cimentícia. Tratamento superficial. Fibras lignocelulósicas. Surfactantes.

ABSTRACT

The development of cementitious composites reinforced with plant fibers has been highlighted as an alternative technology for the production of new materials that provide a lower environmental impact. There are two ways to improve the properties of the fiber-reinforced cementitious composite, namely the surface treatment of the vegetable fiber and the insertion of surfactant additives, improving the properties of the cementitious matrix. The ideal condition to carry out the surface treatment was studied based on research in the literature, in which the alkaline medium used was sodium hydroxide (NaOH) 5% (w/v), heated and stirred for 2 h. The fibers were evaluated in terms of density, humidity and morphology and the composites in terms of physical, mechanical and microstructural properties. The results showed that the alkaline treatment chemically modified the surface morphology of the fibers, in addition to extracting impurities, resulting in an increase in surface roughness, which confers better adhesion between fiber and cementitious matrix, hydration reaction and internal curing. Through the analyzes carried out by SEM, XRD, TG and tests of physical and mechanical properties in the composites, a better interaction capacity of the treated fibers with the matrix can be verified. There was a reduction in water absorption of the treated fiber composites, with these results confirming that the treatment was efficient in improving fiber/matrix adhesion. The second purpose of the research was to evaluate the effect of surfactant additives (lignosulphonate plasticizer and air entrainer) in fiber cement extruded with in natura sisal fiber. For this, mechanical, physical and microstructural analyzes of fiber cement composites were performed. It should be noted that the proposed lignosulphonate plasticizer (FSADR0.6) proved to be more efficient than the air entrainer (FSA0.8) and reference (FSA) in relation to the volume of incorporated air and the stability of the formed pore system. In addition, the apparent density did not have a significant reduction as expected, however the combination of additives provided an increase in mechanical properties. Thus, the present study based on tests can prove that treated vegetable fibers improve the performance of cementitious mortar and that untreated surfactant additives can be added to improve the mechanical and physical properties of the cementitious composite reinforced with in natura sisal fiber.

Keywords: Cement matrix. Superficial treatment. lignocellulosic fibers. Surfactants.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura de uma fibra vegetal.	16
Figura 2 – Estrutura da fibra vegetal: a) fibra não tratada e b) fibra tratada.	18
Figura 3 – Morfologia da superfície da fibra sem e com tratamento.	20
Figura 4 – Influência de diferentes tipos de fibra na trabalhabilidade do concreto.....	22
Figura 5 – MEV identificando a zona de transição interfacial entre compósito de cimento reforçado com a) fibras de eucalipto e b) fibras de pinus.....	25
Figura 6 – Detalhes do pseudocaule, rizoma e raízes adventícias da bananeira.	27
Figura 7 – Absorção de água das amostras.....	28
Figura 8 – Resistência à compressão aos 28 dias de cura com fibra de bananeira.....	29
Figura 9 – Visão em perspectiva de detalhe do tronco e galhos do eucalipto.....	30
Figura 10 – Resultados resistência à compressão de amostras de argamassa: (a) Cimento fornecedor 1; (b) Cimento fornecedor 2.	31
Figura 11 – Planta de <i>Agave sisalana</i> com quase 2 m de altura.....	32
Figura 12 – Área de interface da fibra de sisal e da argamassa de cimento.	33
Figura 13 – Extrusora de fibrocimento.....	36

ARTIGO 1: INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO QUÍMICO DE FIBRAS DE BANANEIRA, EUCALIPTO E SISAL NA INTERFACE DAS PROPRIEDADES COM A MATRIZ CIMENTÍCIA

Figura 1 – Esquema da preparação das fibras tratadas com solução de hidróxido de sódio. ...	51
Figura 2 – Fibras de bananeira, eucalipto e sisal <i>in natura</i> e tratadas com água quente e NaOH.....	52
Figura 3 – Fluxograma de argamassas com fibras não tratadas e tratadas.....	53
Figura 4 – Composição química das fibras vegetais.....	
Figura 5 – Micrografia de superfície das fibras de bananeira natural (a); tratada (b); fibras de eucalipto natural (c); tratada (d); fibras de sisal natural (e) e tratada (f).	59
Figura 6 – Valores médios encontrados para a densidade aparente das amostras.....	
Figura 7 – Valores médios encontrados para absorção de água e porosidade das argamassas reforçadas com fibras e sem fibras.....	
Figura 8 – Propriedades mecânicas de compósito cimentício com 28 dias de cura: a) módulo de ruptura, b) limite de proporcionalidade, c) módulo de elasticidade e d) tenacidade.....	63
Figura 9 – Difrátogramas de raio – X das amostras.	64
Figura 10 – Curvas TG e DTG para os compósitos cimentícios.....	65
Figura 11 – Massa de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio.....	66
Figura 12 – Micrografias de superfície de compósito de cimento de fibras de bananeira <i>in natura</i> (a); tratado (b); eucalipto <i>in natura</i> (c); tratado (d); sisal <i>in natura</i> (e) e tratado (f).....	

ARTIGO 2: EFEITO DA COMBINAÇÃO DE ADITIVOS SURFACTANTES EM FIBROCIMENTO EXTRUDADO REFORÇADO COM FIBRA DE SISAL

Figura 1. Fluxograma das etapas de produção das fibras de sisal natural.	82
Figura 2. Fluxograma das etapas de produção e cura das amostras de fibrocimento extrudado.	84
Figura 3. Análise termogravimétrica (TGA) e termogravimetria derivada (DTG) das amostras de fibrocimento reforçado com fibras de sisal e relação água/cimento = 0,30 aos 28 dias.....	87
Figura 4. Difrátograma das amostras FSA, FSAD0.8 e FSADR0.8.....	88
Figura 5. MEV das placas de fibrocimento reforçados com fibra de sisal natural: a) Amostra	

de referência (FSA), b) FSAD0.8 e c) FSADR0.6	89
Figura 6. Imagens de micrografias (MEV-BSE) de superfície polidas de placas de fibrocimento reforçados com fibra de sisal natural: a) Amostra de referência (FSA), b) FSAD0.8 e c) FSADR0.6	89
Figura 7. Densidade Aparente das placas de fibrocimento FSA, FSAD0.8 e FSADR0.6.	90
Figura 8. Porosidade aparente e absorção de água das placas de fibrocimento FSA, FSAD0.8 e FSADR0.6.	91
Figure 9. Curvas tensão – deformação das placas de fibrocimento FSA, FSAD0.8 e FSADR0.6	93
Figura 10. Efeito da combinação de aditivos na propriedade mecânica dos compósitos reforçado com fibras de sisal in natura	94
Figura 11. Análise visual de ruptura dos corpos de prova de fibrocimento extrudado	95

LISTA DE ABREVIATURAS

AA	Absorção de água
Ap.	Aparente
ADVA	Poliéster carboxílico
BIOMAT	Biomateriais
CCBF	Compósito cimentício com fibras de bananeira
CCBF	Compósito cimentício com fibras de eucalipto
CCBF	Compósito cimentício com fibras de sisal
DA	Densidade aparente
Dm	Massa seca
HPMC	Pseudoplástico Hidroxipropilmetilcelulose
Im	Massa após imersão em água
LOP	Limite de proporcionalidade
Mi	Massa imersa
Ms	Massa seca
Mu	Massa úmida
MDF	Painéis de fibras de média densidade
MOE	Modelo de elasticidade
MOR	Módulo de ruptura
PA	Porosidade
pH	Potencial hidrogeniônico
SAT.	Saturada
TBF	Fibra de bananeira tratada
TEF	Fibra de eucalipto tratado
TSF	Fibra de sisal tratado
UNBF	Fibra de bananeira não tratada
UNEF	Fibra de eucalipto não tratada
UNSF	Fibra de sisal não tratada
Wm	Massa úmida

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CPV-ARI	Cimento Portland de alta resistência inicial
EUA	Estados Unidos da América
IBÁ	Indústria Brasileira de Árvores
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
NBR	Norma Brasileira
TG	Termogravimetria
DRX	Difração de raio -X

LISTA DE SIMBOLOS

CO_2	Dióxido de carbono
C_2S	Composto silicatos dicálcico
C_3S	Composto silicatos tricálcico
Ca	Cálcio
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Hidróxido de cálcio
CaCO_3	Carbonato de cálcio
CaO	Óxido de cálcio
CH	Portlandita
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
NaOH	Hidróxido de sódio
$M_{\text{H}_2\text{O}}$	Massa molar da água
M_{CaCO_3}	Massa molar do carbonato de cálcio
M_{CaCO_2}	Massa molar do anidrido de cálcio
MPa	Mega Pascal
kN	Quilo Newton
Si	Silício
X_i	Perda de massa de água na temperatura final
X_f	Perda de massa de água na temperatura final

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE	12
1 INTRODUÇÃO	12
2 REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1 Fibras vegetais	16
2.2 Tratamento de alcalinização	18
2.3 Propriedades do compósito cimentício reforçado com fibras vegetais	20
2.4 Interação fibra matriz cimentícia	23
2.5 Fibras vegetais em compósitos cimentícios	26
2.6 Fibra de bananeira	27
2.7 Fibra de eucalipto.....	29
2.8 Fibra de sisal.....	32
2.9 O efeito dos aditivos na reologia do compósito cimentício	33
2.10 O processo de extrusão na produção de fibrocimentos	36
3 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	38
REFERÊNCIAS	39
SEGUNDA PARTE – ARTIGOS	47
ARTIGO 1: INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO QUÍMICO DE FIBRAS DE BANANEIRA, EUCALIPTO E SISAL NA INTERFACE DAS PROPRIEDADES COM A MATRIZ CIMENTÍCIA	47
1 INTRODUÇÃO	47
2 MATERIAIS E MÉTODOS	50
2.1 Materiais	50
2.2 Preparação das fibras	51
2.3 Produção dos compósitos.....	52
2.4 Caracterização dos compósitos cimentícios	54
3 RESULTADOS	56
3.1 Composição química e propriedade física da fibra.....	56
3.2 Análise microestrutural das fibras	58
3.3 Propriedades físicas do compósito	60
3.4 Resistência à flexão dos compósitos.....	62
3.5 Microestrutura dos compósitos cimentícios	64
4 DISCUSSÃO	69
5 CONCLUSÃO	71
REFERÊNCIAS	71
ARTIGO 2: EFEITO DA COMBINAÇÃO DE ADITIVOS SURFACTANTES EM FIBROCIMENTO EXTRUDADO REFORÇADO COM FIBRA DE SISAL	77
1 INTRODUÇÃO	78
2 MATERIAL E MÉTODOS	81
2.1 Materiais	81
2.2 Métodos	83
2.3 Propriedades físicas do fibrocimento	84
2.4 Propriedades mecânicas do fibrocimento	85
2.5 Caracterização microestrutural.....	85
2.6 Análise dos resultados.....	86
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	86
3.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	88
3.2 Propriedades físicas do fibrocimento	90
3.3 Propriedades mecânicas	92

4 CONCLUSÕES	95
REFERÊNCIAS	96

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

Durante os últimos anos, o interesse por materiais sustentáveis tem aumentado, principalmente ligada à necessidade do setor da construção civil em reduzir o impacto ambiental, o consumo de cimento e energia. Neste contexto, as fibras naturais são materiais sustentáveis e de fontes renováveis, baixo custo, além de serem leves e biodegradáveis (MAZZANTI; MOLLICA, 2020). Consequentemente, a utilização delas para produção de compósitos é uma oportunidade para a substituição de fibras sintéticas (AZAM *et al.*, 2018). Vários estudos foram realizados para apresentar os benefícios do uso de fibras vegetais, incluindo baixo impacto ambiental e propriedades mecânicas (FIDELIS *et al.*, 2019; POONGODI; MURTHI, 2020; VEIGAS; NAJIMI; SHAFEL, 2021; CASTOLDI *et al.*, 2022; RAABE *et al.*, 2022).

As fibras vegetais têm propriedades como resistência à tração, módulo de elasticidade, tenacidade e densidade que as tornam uma alternativa promissora para a produção de compósitos cimentícios (FERREIRA *et al.*, 2018; SEPE *et al.*, 2018; BALAJI *et al.*, 2019). Contudo, a matriz cimentícia apresenta um bom comportamento quando solicitada por esforço de compressão, porém, quando se trata de esforços de tração ou flexão apresenta um baixo desempenho.

Deste modo, uma forma de aumentar a resistência dos esforços apresentados é utilizar as fibras vegetais como reforço. Ela tem como objetivo aumentar a capacidade de absorção de energia da matriz, atuando de forma positiva nas propriedades mecânicas dos compósitos (AZAM *et al.*, 2018; MOHAMMAD, SYED, 2018; PRAMOD *et al.*, 2020).

Por causa da sua disponibilidade, sustentabilidade e vantagens são muito pesquisadas. Como exemplo, fibras e polpas de sisal, juta (IZQUIERDO *et al.*, 2017, FONSECA *et al.*, 2021) e fibras de bananeira e eucalipto (KARTHICK *et al.*, 2018; BALAJI., 2019; MELLO *et al.*, 2019; MURALIKRISHNA *et al.*, 2020; SILVA *et al.*, 2021).

Há na literatura um expressivo número de pesquisa realizados por Cuebas *et al.*, (2021); Ballesteros *et al.*, (2021); Castoldi *et al.*, (2022) que buscam avaliar a influência das fibras vegetais com tratamentos físico e químico, porém ainda poucas informações do tratamento com solução de hidróxido de sódio nas fibras de bananeira, eucalipto e sisal com pretensão de melhorar o desempenho das fibras como reforço em argamassa cimentícia ecológica sem função estrutural. Ainda neste trabalho foi possível observar que existem

pesquisas para identificar os efeitos dos aditivos, investigando os teores usados no estado fresco do compósito cimentício, além do tempo de mistura e o tipo de equipamento. Entretanto, poucas pesquisas foram encontradas com a combinação de aditivos surfactantes para produção de fibrocimento reforçada com fibra de sisal *in natura*.

Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo estudar a influência das fibras de bananeira, eucalipto e sisal *in natura* e tratadas com hidróxido de sódio como reforço em argamassa ecológica sem função estrutural. Ainda estudar fibrocimento reforçado com fibra de sisal *in natura* e a combinação de aditivos surfactantes. Os objetivos específicos foram entender como a composição química das fibras vegetais antes e após tratamento influenciou na interação fibra/matriz cimentícia, verificou-se que o tratamento de NaOH nas fibras vegetais alterou sua estrutura (comprimento e diâmetro), propriedades físicas (umidade e densidade básica) e avaliou a influência das fibras vegetais nas propriedades física e mecânica da argamassa ecológica sem função estrutural, principalmente em termos tenacidade.

Ainda foi analisado as propriedades mecânica e física do fibrocimento extrudado e reforçado com fibra de sisal *in natura*. Para isso, buscou-se estabelecer os teores ótimos e os tipos de aditivos surfactantes através de pesquisa na literatura. Ademais, verificou-se os efeitos da combinação dos aditivos no fibrocimento extrudado reforçado com fibra de sisal nas propriedades mecânicas e principalmente a redução da densidade aparente. O aspecto de interesse ambiental nesta pesquisa é a utilização dos resíduos lignocelulósicos e os aditivos surfactantes no desenvolvimento de materiais construtivos, aliando a valorização dessas matérias-primas. E como inovação científica, a análise do efeito das fibras vegetais *in natura* e tratadas, como também os aditivos surfactantes para produção de argamassa ecológica sem fim estrutural e fibrocimento extrudado.

Para alcançar os objetivos da pesquisa proposta foi realizado o estudo da arte das fibras vegetais e aditivos surfactantes. Sendo assim, de um modo especial, as fibras de sisal têm propriedades diferenciadas, em virtude do seu alto teor de celulose, maior rigidez e a resistência à tração (FERREIRA *et al.*, 2018). Outras fibras também têm sido aplicadas como reforço, eucalipto e bananeira devido alta resistência à tração que ajuda a reduzir a propagação de fissuras no interior do compósito cimentício (BALAJI *et al.*, 2019; PARRE *et al.*, 2020; LAVERDE *et al.*, 2022; BALLESTEROS *et al.*, 2021).

Isso possibilita a aplicação de fibras vegetais em produtos como telhas, painéis, placas e outros elementos planos (LEE., 2017; SEPE *et al.*, 2018; MURALIKRISHNA *et al.*, 2020). Contudo, as fibras vegetais têm alguns desafios a serem trabalhados, pois são consideradas hidrofílicas, apresentam elevada absorção de água e baixa resistência em meio alcalino.

Conseqüentemente, há incompatibilidade física e química entre a fibra e a matriz cimentícia, e são responsáveis pela má dispersão, fraca adesão interfacial, e possivelmente a baixa qualidade dos compósitos (ONUAGULUCHI, 2016; YONGHUI ZHOU, MIZIN FAN, LIHUI CHEN, 2016).

Diante do caráter hidrofílico, é essencial realizar o tratamento superficial para reduzir a absorção de água e a degradação em meio alcalino, e conseguinte melhorar a interação interfacial entre a matriz cimentícia (ALI *et al.*, 2018; KOOHESTANI *et al.*, 2018; SANTOS *et al.*, 2018). Portanto, para melhorar adesão da fibra/matriz podem ser usados tratamentos como acetilação, branqueamento, silanização, hornificação, alcalinização, porém o último método é mais utilizado, por ter o baixo custo, mais ecológico e de fácil realização comparado aos demais existentes (FONSECA *et al.*, 2021; JAGADESEESH *et al.*, 2021; SHAH *et al.*, 2022).

O tratamento alcalino é um processo que envolve a imersão de fibras vegetais em solução aquosa de hidróxido de sódio (NaOH) diminuindo sua natureza hidrofílica (AZAM *et al.*, 2018; LAVERDE *et al.*, 2022). Simultaneamente, este tratamento degrada seletivamente certas quantidades de lignina, pectina, hemicelulose e materiais cerosos, aumentando a região interfibrilar e gerando uma textura áspera na superfície da fibra. Essa rugosidade facilita ancoragem mecânica entre a fibra-matriz e, conseqüentemente, melhora a resposta mecânica do compósito (BORSOI, *et al.*, 2019; LAVERDE *et al.*, 2022).

Cuebas *et al.* (2020) e Castoldi *et al.*, (2022) realizaram o tratamento de NaOH das fibras de bananeira e sisal e observaram a redução de absorção de água e os componentes químicos, e como benefício melhorou adesão fibra/matriz, e conseqüentemente as propriedades mecânicas dos compósitos polimérico e cimentício. Apesar de terem potencial para serem utilizadas em matriz cimentícia, a maioria dos estudos com fibras de bananeira e sisal tratadas com NaOH está relacionada a compósito polimérico, blocos e concreto sem função estrutural (IZQUIERDO *et al.*, 2017; CUEBAS *et al.*, 2020; CASTOLDI *et al.*, 2022).

Ballesteros *et al.* (2021) avaliaram a influência do tratamento de hornificação nas fibras de eucalipto e a modificação da matriz cimentícia com resíduos minerais. No entanto poucos estudos foram encontrados sobre avaliação da influência do tratamento de NaOH nas fibras de eucalipto como reforço em argamassa.

Entretanto, para produção de fibrocimento extrudado reforçado com fibras de sisal *in natura* é necessário melhorar a produção dos compósitos visando trabalhabilidade, fluidez e viscosidade da pasta no processo de extrusão. Assim, a fim de garantir o desempenho das placas cimentícias reforçada com fibras de sisal, pode-se utilizar aditivos surfactantes em

pequenas quantidades que auxiliam na interação fibra/matriz. Eles são responsáveis por facilitar a transferência da água presente nas fibras para as partículas de cimento, devido ao seu efeito dispersor, que por sua vez melhora a trabalhabilidade e a molhabilidade da mistura (ATAHAN *et al.*, 2008; MANGANE *et al.*, 2018).

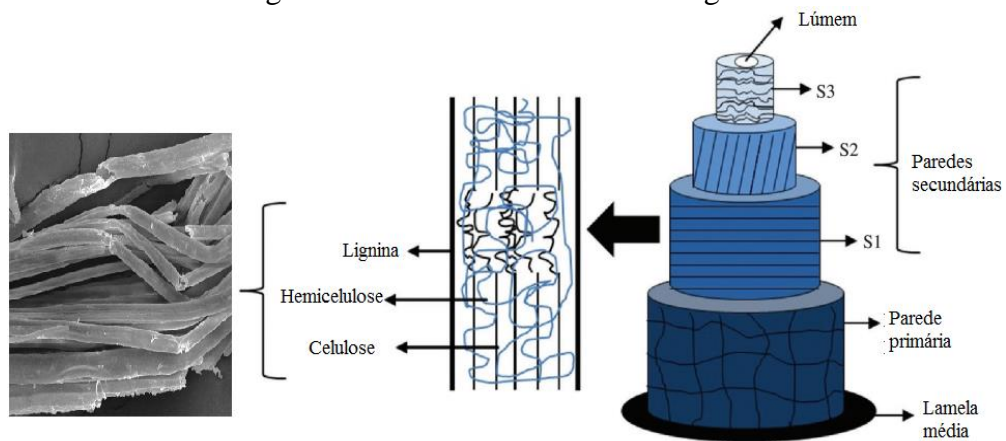
Diante disso, Fonseca *et al.* (2019), Silva *et al.* (2021) e Raabe *et al.* (2022) estudaram a combinação de surfactantes incorporadores de ar e redutor de água na produção de fibrocimento reforçado com fibras vegetais. Os resultados indicaram que os aditivos auxiliam na trabalhabilidade da pasta cimentícia, moldagem na extrusora e tornando a pasta pseudoplástica que facilita a passagem da massa na boquilha do equipamento.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Fibras vegetais

As fibras vegetais são constituídas basicamente por celulose, lignina e hemiceluloses, e em menores quantidades são encontrados a pectina, pigmentos e extrativos. Por esse motivo, elas são chamadas também de fibras lignocelulósicas (LAU *et al.*, 2018). Na Figura 1 é possível observar uma representação esquemática de como a celulose, hemicelulose e lignina estão organizadas nas paredes celulares de uma fibra.

Figura 1 – Estrutura de uma fibra vegetal.



Fonte: Pereira, 2015 (Adaptado).

Nota-se que a parede primária é a primeira camada depositada durante o desenvolvimento da célula. Ela é delgada e formada pelas fibrilas de celulose, hemiceluloses, pectina e proteínas embebidas numa matriz de lignina (LAU *et al.*, 2018). É importante destacar que a composição química da fibra varia muito e depende da idade e parte da planta, crescimento, método de extração, condições ambientais e do solo (ONUAGULUCHI, 2016). Na Tabela 1 são apresentados a composição química das fibras.

Tabela 1 – Composição química típica de fibras vegetais *in natura*

Fibras vegetais	Lignina (%)	Hemicelulose (%)	Celulose (%)	Extrativos (%)	Cinzas (%)
Banana	17,83 ^a	11,10 ^a	69,53 ^a		
Eucalipto	25–31 ^b	25–29 ^b	40–44 ^b	8,20 ^b	0,22 ^b
Sisal	8-11 ^b	10-15 ^b	67-78 ^b	11 ^c	2 ^c

Fonte: ^a Vardhini et al. (2019); ^b Koohestani et al. (2019); Jagadeesh (2021); ^c Yan, et al. (2016).

Fonte: Do autor (2023).

A celulose é um componente básico dos tecidos vegetais e responsável pela rigidez e firmeza às plantas. A molécula do polímero (celulose) apresenta para cada unidade de glicose três grupos de hidroxila livres. Dessa forma, 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. As propriedades da celulose são influenciadas por fatores como o tipo de planta, modificação da fibra, idade da planta, métodos de extração, composição química, localização da planta, maturidade da planta e defeitos microscópicos e moleculares (KALIA *et al.*, 2011; DUFRESNE, 2013; ZWAMI, 2021).

A hemicelulose é diferente da celulose devido às diferentes unidades de açúcar. Esse tipo de açúcar é uma estrutura amorfa, diferente de uma estrutura celulósica linear. Ainda atua como um compatibilizador para suportar microfibrilas, celulose e lignina. É de natureza hidrofílica, solúvel em solução alcalina e fácil de hidrolisar em ácidos. A hemicelulose pode diferir de planta para planta com diferentes constituintes (ZWAWI, 2021).

A lignina é um material aromático e estrutura não linear e atua como um aglutinante para celulose e adiciona força e rigidez a parede celular. Por outro lado, a holocelulose é composta principalmente por celulose e hemicelulose, sendo considerado como o polissacarídeo total de fibras vegetais (CESARINO, 2012; SALIT, 2014; ZWAWI, 2021).

Assim, percebe-se que as características das fibras influenciam em suas propriedades, de forma que podem alterar seu comportamento de reforço no compósito (SAHU; GRUPTA, 2020). A resistência mecânica e a capacidade de absorção de água dessas fibras dependem basicamente de seus componentes como celulose, hemiceluloses, lignina, pectina e cera. Como visto anteriormente, a celulose fornece resistência às fibras, enquanto a hemicelulose aumenta a capacidade de absorção de água. Assim, é preferível uma maior quantidade de celulose a de hemicelulose (BORSOI, *et al.*, 2019; ZWAWI, 2021; LAVERDE *et al.*, 2022).

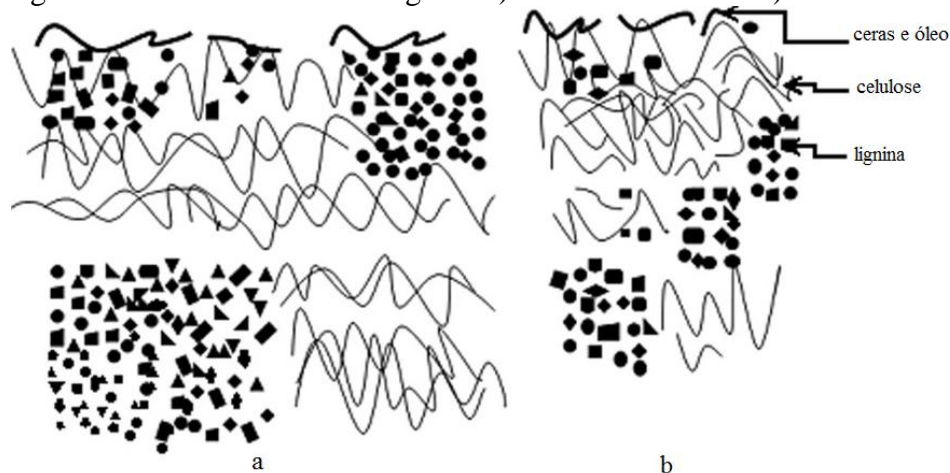
O comportamento hidrofílico das fibras interfere na obtenção de uma adesão de boa qualidade entre matriz e a fibra, e isso contribui para o baixo desempenho do compósito, além de favorecer a sua deterioração (LAU *et al.*, 2018). Sendo assim, as fibras vegetais como reforço em compósitos exigem um nível mínimo de compatibilidade para que se obtenha um bom desempenho do material. Isto representa um dos principais problemas que precisam ser atenuados tendo em vista o processo de degradação que as fibras sofrem no interior da matriz cimentícia (FIDELIS *et al.*, 2019).

Para contornar essa situação, são empregados tratamentos físicos ou químicos nas fibras vegetais (JAWAID *et al.*, 2016; SALMABANU, *et al.*, 2020). Estes tratamentos têm como finalidade aumentar a rugosidade da superfície da fibra, aumentar sua área superficial e reduzir sua capacidade de absorção de água. Além disso, alguns estudos destacaram que o tratamento superficial na fibra melhora significativamente a resistência à tração e flexão dos compósitos com reforço de fibras vegetais. Além disso, o impacto e o desempenho de energia térmica da fibra vegetal são maiores quando comparado a fibra artificial (SALMABANU *et al.*, 2020).

2.2 Tratamento de alcalinização

O tratamento das fibras por meio da alcalinização (também conhecido como mercerização) ajuda a melhorar a interação interfacial e reduz a absorção de água pelas fibras. Isso acontece, pois, o tratamento alcalino diminui os grupos hidroxila relacionados à umidade e, assim, enfraquecem a natureza hidrofílica das fibras. Este tratamento também retira uma pequena fração de hemicelulose, lignina, pectina, cera e revestimentos de óleo da superfície da fibra, e altera a estrutura da celulose conforme mostrado na Figura 2 (IBRAHIM *et al.*, 2016; SAHU; GUPTA, 2020; JAGADEESH *et al.*, 2021).

Figura 2 – Estrutura da fibra vegetal: a) fibra não tratada e b) fibra tratada.



Fonte: SAHU; GUPTA (2020).

O tratamento alcalino com hidróxido de sódio (NaOH) promove a redução da hemicelulose, da lignina e de outras impurezas da fibra, aumentando o teor de celulose. Isso resulta em aumento considerável das propriedades mecânicas (VARDHHINI *et al.*, 2019; MADHU *et al.*, 2020).

No trabalho de Sankar *et al.* (2020) o tratamento com solução alcalina de NaOH com concentração de 6% (v/m) foi utilizada para tratar fibras de bananeira. Após o tratamento foi observada a melhoria na propriedade de resistência à tração da fibra. Bahja *et al.* (2021) realizaram o tratamento de NaOH (concentração de 1%) em fibras de sisal e os resultados indicaram extração parcial dos constituintes hemicelulose, lignina e ceras, isso ocorreu devido a fácil solubilização dos componentes na solução alcalina.

A remoção completa de lignina e hemicelulose foi observada no trabalho de Saravanakumar *et al.* (2018). Nesse caso, fibras de Carica papaya foram tratadas com NaOH com concentração de 5% e o tempo de imersão entre 15 e 90 min à temperatura ambiente, após isso lavados com água destilada e seco em estufa por 56h. De acordo com Klerk *et al.* (2020), as melhorias das propriedades mecânica das fibras depende tanto da concentração química quanto dos períodos de exposição do tratamento.

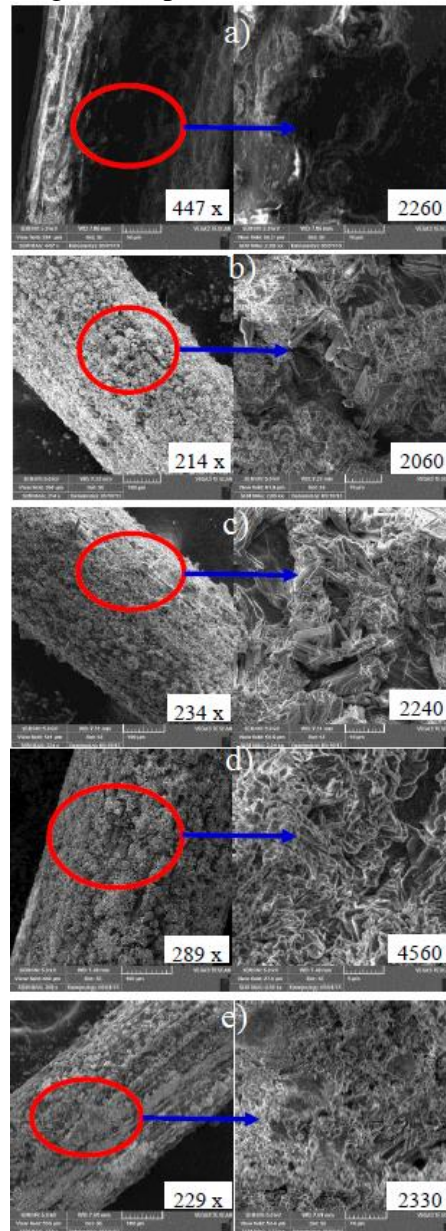
Klerk *et al.* (2020) citam que a baixa resistência ao arrancamento das fibras de sisal tratadas com hidróxido de sódio se deve a concentração da solução. Isto é ainda confirmado quando o aumento da resistência ao arracamento se dá pela baixa concentração de teor de NaOH, sendo o ideal entre 5% no tratamento das fibras sisal, e indica uma melhor remoção das impurezas superficiais presentes nas fibras sem danificá-las. Além disso, muitos estudos relataram melhorias na resistência ao cisalhamento interfacial e à tração, módulo de Young com valores em torno de 13,27GPa (FERREIRA *et al.*, 2018).

A tensão de falha, resistência ao impacto, tenacidade à fratura e propriedades de flexão de compósitos, bem como estabilidade térmica e resistência à umidade a longo prazo, o último dos quais poderia ser devido à baixa absorção de água das fibras vegetais tratadas com hidróxido de sódio (KABIR *et al.*, 2012; PICKERING *et al.*, 2016).

Arsyad *et al.* (2015), realizaram o estudo com fibras de coco não tratada e tratadas com solução de hidróxido de sódio com percentual de 5, 10, 15 e 20%. A Figura 3a mostra a fibra de coco não tratada com sua superfície lisa, isso indica presença de impurezas como ceras e gorduras. As Figuras 3b, 3c, 3d e 3e mostram a superfície rugosa da fibra devido à cristalização da solução de NaOH.

Também foi observado grandes cristalizações de grãos, enquanto na Figura 3.e mostra pequenos grãos se fundindo uns com os outros, parecendo mais ásperas. O tratamento alcalino torna a rugosidade da superfície da fibra muito diferente da superfície da fibra não tratada. Aumento da rugosidade da superfície da fibra de coco ocorreu devido ao efeito do aumento da quantidade de celulose que foi exposta.

Figura 3 – Morfologia da superfície da fibra sem e com tratamento.



Fonte: Arsyad, *et al.* (2015) – Adaptado pelo autor (2022)

2.3 Propriedades do compósito cimentício reforçado com fibras vegetais

Após a proibição do amianto devido aos seus efeitos perigosos para o ser humano, algumas fibras sintéticas e vegetais foram estudadas para substituir o amianto na fabricação de produtos à base de cimento Portland, como fibrocimento. Diante disso, as fibras sintéticas foram testadas e apresentaram desempenho similar às fibras de amianto, como boa resistência, e compatibilidade com a matriz, além de outras propriedades que garantem o compósito maior durabilidade (ALKBIR *et al.*, 2016; LEE, 2017; NYNÄS *et al.*, 2017; CORREIA; SANTOS; SAVASTANO, 2018).

Contudo, os problemas causados pelo consumo de energia para a obtenção de fibras sintéticas e os danos provocados ao meio ambiente pela fabricação (por exemplo, a fibra de vidro). No entanto, a vulnerabilidade de alguns tipos de fibras como de aço à corrosão e o alto custo e energia na fabricação das fibras sintéticas colocaram as fibras vegetais como uma alternativa atraente como reforço. Além disso, fibras sintéticas não são biodegradáveis e, quando descartadas em aterros, podem causar poluição pela liberação de metais pesados e outros poluentes nas águas subterrâneas, bem como no solo (TORGAL; FUCIC; JALALI, 2012; PACHECO-TORGAL; ISLAM; AHMED, 2018).

No entanto, é necessário também estudar o efeito do constituinte químico da fibra vegetal na matriz cimentícia. Algumas pesquisas revelam que a lignina presente nas fibras é facilmente degradada pelos álcalis presentes na água do cimento, enfraquecendo a ligação entre fibra/matriz, corroborando com a diminuição da vida útil dos compósitos (SANTOS, 2011).

Já os extrativos presentes nos materiais lignocelulósicos podem interferir no tempo de pega e hidratação do cimento, prejudicando a resistência mecânica dos compósitos, ou mesmo, inviabilizando o uso da fibra *in natura* (SELLAMI; MERZOUD; AMZIANE, 2013; CHAFEI *et al.*, 2014). As hemiceluloses são responsáveis por boa parte da higroscopicidade da fibra, agindo como um facilitador do processo de mineralização da fibra, além de ser facilmente degradada pelos álcalis presentes na água do cimento, prejudicando a interface fibra/matriz (CHAFEI *et al.*, 2014).

Dáí vem a necessidade de investigar as fibras vegetais e seu comportamento no interior da matriz cimentícia, pois apesar dos problemas mencionados, o uso da fibra está relacionada ao menor custo, de fontes renováveis, atóxicas, isolantes, biodegradáveis e estão disponíveis em quase todo território brasileiro. A maior parte das fibras vegetais utilizadas como reforço são importantes pois, aumenta a resistência à tração do compósito (ALKBIR *et al.*, 2016; LEE, 2017; CORREIA; SANTOS; SAVASTANO, 2018).

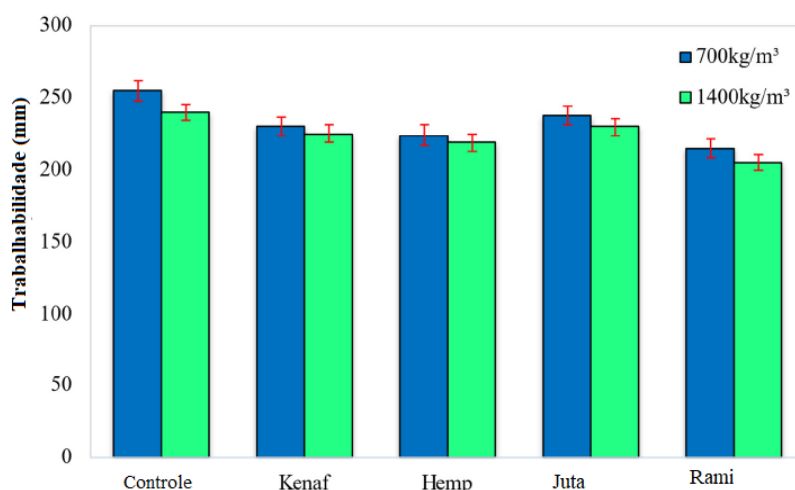
Porém, o uso de fibras como reforço no compósito cimentício tem um efeito significativo em outras propriedades como trabalhabilidade, que é a facilidade com que a mistura pode ser lançada e compactada sem segregação. Assim, para produzir um compósito (fibrocimento, concreto e argamassa) de qualidade, sua trabalhabilidade é fator muito importante, e podem contribuir para o baixo desempenho das propriedades finais dos compósitos (MANSILLA *et al.*, 2020).

As fibras influenciam desde o início da fabricação, principalmente na escolha do método e pelas características dos componentes (cimento, cal, agregados, aditivos e adições),

processo de mistura e grau de aderência matriz/fibra. Entretanto, tem os fatores como tipo, arranjo e distribuição, forma e geometrias, fração volumétrica e superfície das fibras que podem interferir nas propriedades do compósito. No entanto, quando é utilizado alto teor de fibras, mais água será necessária para molhar a superfície dos grãos, resultando em menor quantidade de água de amassamento e, conseqüentemente, baixa trabalhabilidade (JAIN; BHUPESH; SANCHETI, 2021; MYDIN *et al.*, 2022).

O estudo realizado por Mydin *et al.* (2022) mostrou a redução na trabalhabilidade da mistura do concreto com fibras kenaf, hemp, juta e rami. A diminuição da trabalhabilidade do concreto foi provavelmente estimulada pela intensificação do atrito entre os componentes da mistura e pela redução do teor de água livre, pois essas fibras vegetais tendem a absorver água devido à sua natureza hidrofílica. Entre as quatro fibras consideradas neste estudo, o concreto com adição de fibras de juta teve a trabalhabilidade ótima (slump) de 238 mm e 230 mm para densidades de 700 kg/m^3 e 1400 kg/m^3 , respectivamente, seguidas da amostra com fibras de kenaf (230 mm e 225 mm), cânhamo (224 mm e 219 mm) e rami (215 mm e 205 mm), esses resultados estão apresentados na Figura 4.

Figura 4 – Influência de diferentes tipos de fibra na trabalhabilidade do concreto.



Fonte: Mydin *et al.* (2022).

Outra propriedade importante é o módulo de elasticidade que mede a capacidade do material de se deformar sob tensão. Um baixo módulo de elasticidade indica que o compósito apresenta certa deformabilidade, o que pode impedir a fissuração em um compósito. No estudo realizado por Pederneiras, Veiga e Brito (2021), observou-se que independentemente do cimento utilizado, que a incorporação de fibra reduziu o módulo de elasticidade, o que significa que a argamassa modificada pode se comportar de forma mais deformável que a argamassa de controle (sem fibra).

Sathiparan *et al.* (2017) também notaram uma redução no módulo de elasticidade quando as fibras de coco foram incorporadas na argamassa cimentícia. Portanto, os autores relataram que as argamassas reforçadas com fibras de coco apresentaram um comportamento mais dúctil quando comparado a referência (sem fibra). Ainda os autores estudaram a tenacidade à flexão das amostras e observaram que o índice de tenacidade à flexão é uma referência eficaz para comparar a absorção de energia de um corpo de prova durante o período pós-fissura com aquela antes do período pré-fissura. De acordo com o resultado, a ductilidade flexural aumentou para todas as amostras com reforço de fibra de coco.

Conforme pesquisa realizada por Sathiparan *et al.* (2017), a absorção de água e a porosidade foram aumentadas com a adição da fibra de coco no concreto. As propriedades como módulo de elasticidade, tenacidade, absorção de água, porosidade, resistência à compressão, flexão e outras estão diretamente relacionadas aos materiais utilizados. Além de fator água e cimento, teor e comprimento da fibra para a produção de compósito.

As fibras utilizadas na confecção dos compósitos podem interferir na mistura, como aglomerar e provocar o surgimento de vazios no interior da matriz cimentícia (SATHIPARAN *et al.*, 2017; PEDERNEIRAS, VEIGA E BRITO, 2021; MYDIN *et al.*, 2022).

2.4 Interação fibra matriz cimentícia

Na produção de compósitos à base cimento pode ocorrer microfissuras que se formam facilmente na superfície entre a matriz cimentícia e os outros componentes. A microfissura pode acontecer principalmente devido a retração, quando o cimento responsável por unir os componentes (agregados, areia, fibras ou outros) não se combina adequadamente (MANSILLA *et al.*, 2020). A utilização de fibra é realizada justamente para melhorar a tenacidade do compósito. Contudo, as fibras podem aglomerar, e conseqüentemente a resistência do produto final é afetada. Por causa disso, muitos pesquisadores estudaram o uso de fibras vegetais com comprimento curto para aumentar a resistência a tração, levando em consideração a concentração de fibras, o tratamento superficial, além do fator água/cimento e adição de aditivos para minimizar as microfissuras que podem existir no compósito (LAU *et al.*, 2018).

Sabe-se que a adição de fibras vegetais na matriz cimentícia contribui para o aumento da tenacidade do compósito. Com efeito, uma matriz de cimento sem reforço de fibra apresenta um comportamento frágil caracterizado por uma fratura que ocorre após o

aparecimento da primeira fissura. A inserção de fibras no compósito cimentício contribui para melhorar a capacidade de absorção de energia e a resistência a rachaduras do concreto simples (MERTA; TSCHEGG, 2013).

O compósito sem as fibras, se torna mais frágil, e o material pode romper de forma brusca após a fissuração. Entre a fibra e a matriz podem ocorrer situações de deslocamento de fibra, interceptação, arrancamento e rompimento. Ela contribui absorvendo e dissipando a energia para estabilizar a propagação da trinca no compósito cimentício. A fibra que interliga as possíveis fissuras reduz a intensidade do estresse entre a matriz cimentícia e a fissura. Mediante isso, a ponte de fibra pode reduzir a possibilidade de a fissura aumentar, o que impede a entrada de água e contaminantes no interior da matriz, evitando assim, a degradação (ZOLLO, 1997; YIN, 2015).

O fibrocimento é um material dúctil caracterizado por um aumento linear da resistência com a deformação, e após o aparecimento da primeira fissura, a resistência diminui lentamente. Ainda, a utilização de fibras na matriz cimentícia permite obter melhorias significativas em termos de propriedades mecânicas e térmicas dos compósitos (FILHO *et al.*, 2013; TIAN, ZHANG, 2016; BALLESTEROS *et al.*, 2021).

Lertwattanakul *et al.* (2015), desenvolveu um compósito cimentício reforçado com fibra de coco/óleo de palma para aplicação em edifícios residenciais. A incorporação de óleo de palma e fibra de coco misturadas na produção de fibrocimento teve como resultado a redução da densidade do produto. Ainda provocou uma diminuição na condutividade térmica, o que significa que o produto tem boas propriedades de isolamento térmico.

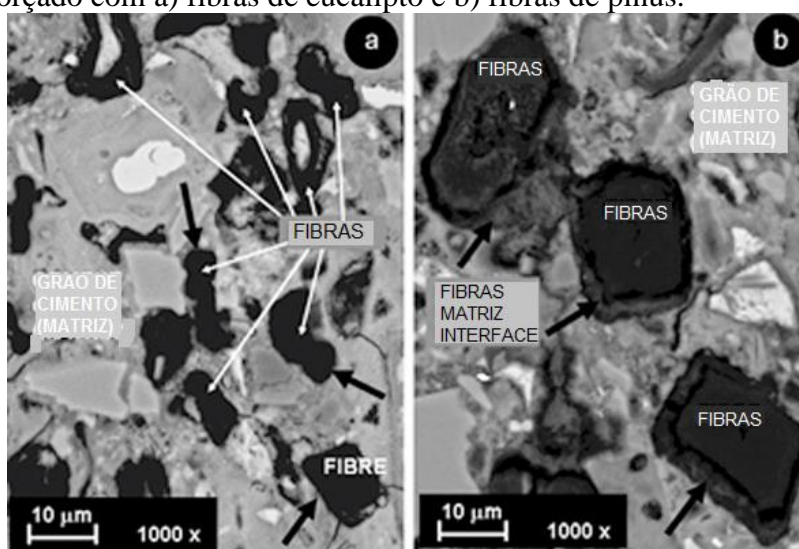
Além disso, as placas de cimento fabricadas com essas fibras têm natureza condutora de calor relativamente menor em comparação com outras placas de fibrocimento sem adição de fibras. Embora, os autores observaram que as placas de cimento composto de fibra natural podem ser submetidas a ambientes climatizados e naturais em edifícios residenciais onde é necessária maior eficiência energética (LERTWATTANARUK *et al.* 2015).

Entretanto, a interferência das fibras nas propriedades físico-mecânicas dos compósitos em médio e longo prazo depende de vários fatores que precisam ser avaliados. Como exemplo, tem-se desde as características dos materiais empregados como tipo de cimento, aditivos até as condições de cura, tipo do meio exposto e a relação água/cimento (CORREIA *et al.*, 2018).

Na Figura 5 é observada a interface entre as fibras (5.a) de eucalipto e (5.b) de pinus com a matriz cimentícia. A fibra vegetal absorve parcialmente a água livre durante o processo de mistura dos compósitos reforçados, em sequência é observado seu inchamento. Após isso,

acontece a retração da fibra (através da liberação de água) e normalmente se observa uma fenda, ou falha na zona de transição e com isso, a força de ligação entre a fibra e matriz é reduzida. Diante disso, a inserção de novos tratamentos aplicados às fibras, diferentes concentrações de aditivos na mistura, tipos de cura e moldagem podem melhorar o desempenho da interface de zona de transição entre fibra/matriz (TIAN *et al.*, 2016; FONSECA; ROCHA; CHERIAF, 2021).

Figura 5 – MEV identificando a zona de transição interfacial entre compósito de cimento reforçado com a) fibras de eucalipto e b) fibras de pinus.



Fonte: Tian et al. (2016), adaptado pela autora (2022).

Wei, Ma e Thomas (2016) observaram que a hidrólise alcalina é uma estratégia com potencial para a degradação das fibras utilizando agentes alcalinos, como o NaOH (hidrólise química) os quais solubilizam parcialmente a hemicelulose, expandem a celulose, causam a ruptura das pontes de hidrogênio, facilitando o ataque dos microrganismos à parede celular. Esse processo de hidrólise alcalina das fibras com a utilização de agente alcalino pode ser benéfico, pois extrai constituintes das fibras que podem prejudicar a interação da fibra/matriz. Porém, a mineralização das paredes celulares das fibras ocorre devido à migração de produtos de hidratação para o interior da fibra, especialmente o hidróxido de cálcio.

Sabe-se que o processo de formação de compostos hidratados do cimento pode ser modificado pela incorporação de materiais cimentícios suplementares e aditivos. A modificação do cimento é uma maneira eficaz de melhorar a durabilidade dos compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais. Entretanto, a dosagem dos materiais cimentícios deve ser determinada com cuidado a fim de alcançar desempenho semelhante ou superior em

comparação com compósitos preparados apenas com cimento sem fibras (WEI; MEYER, 2017).

Diante disso, à medida que a degradação das fases de ligação (lignina e hemicelulose) prossegue, os produtos de hidratação, como C-S-H solúvel e portlandita (CH), infiltram-se gradualmente nas paredes celulares e nos lúmens, o que aumenta a mineralização da parede celular e fragilização da fibra. A relação entre a degradação da fibra e a hidratação de cimento indica que a redução da alcalinidade da solução de poros e consumo de CH na matriz de cimento são causas primárias de mitigação da degradação das fibras (WEI; MEYER, 2017).

2.5 Fibras vegetais em compósitos cimentícios

Para a escolha de fibras vegetais em compósitos cimentícios deve ser levada em consideração a resistência mecânica, a flexibilidade, a durabilidade, a capacidade de alongamento, a resistência para o ambiente ácido, a boa rigidez e a disponibilidade da fibra (FERREIRA *et al.*, 2017; FERREIRA *et al.*, 2018; BAHJA *et al.*, 2021).

Muitos pesquisadores têm estudado fibras vegetais avaliando seu potencial em compósitos cimentício, e algumas das fibras como sisal, bananeira e eucalipto têm se destacado com sua disponibilidade nas regiões brasileiras, por baixa densidade, resistência à tração e outras características (BALAJI., 2019; FERREIRA *et al.*, 2019; TERRA, 2023).

Neste contexto, as fibras de bananeira têm uma boa perspectiva como reforço porque podem ser facilmente extraídas de pseudocaules de bananeira, que muitas vezes são deixados para apodrecer nas plantações na forma de resíduos agrícolas. Estudos realizados com fibras de bananeira indicaram que elas possuem boas propriedades, são ecologicamente corretas, são mais baratas e estão prontamente disponíveis e, portanto, podem ser utilizadas para melhorar as propriedades mecânicas do concreto (PRASANNAN *et al.*, 2018; CHANDRAMOULI *et al.*, 2019; DHAWAN *et al.*, 2020; ELBHIER *et al.*, 2020).

De um modo especial, a fibra de sisal tem sido muito pesquisada como reforço para materiais de setores da construção civil, automobilístico e demais áreas com o propósito de melhorar o desempenho dos seus produtos. Visto que, as propriedades das fibras de sisal se comparam com algumas fibras sintéticas (SAMOUH *et al.*, 2021).

Fibra de bananeira

O Brasil se destaca como um dos cinco produtores mundiais de banana juntamente com a Índia e China. A produção nacional de banana em 2021 foi de 7 milhões de toneladas em uma área de 465,9 mil hectares (EMBRAPA, 2021; FAO, 2021). A bananeira não possui caule, apenas uma haste aérea, o pseudocaule, tem formato cilíndrico composto por bases de caules de folhas das bainhas do pecíolo, conforme apresentado na Figura 6.

A bananeira após dar o fruto deve ser cortada e descartada, e muitas vezes é deixada no local de plantação, levando um tempo considerável para degradar. A fibra de bananeira (FB) é extraída do pseudocaule da planta da bananeira e pode ser aproveitada para produção de materiais cimentícios.

O emprego de fibras de bananeira em compósitos cimentícios tem se mostrado um grande atrativo devido ao crescimento da produção mundial de plantações, e, após a colheita da banana, os resíduos do caule e das folhas não são aproveitados pelos produtores (ELBEHIRY *et al.*, 2020). Sendo assim, as fibras das bananeiras ficam disponíveis como matéria-prima renovável para serem utilizadas em outras áreas da economia, como a construção civil.

Figura 6 – Detalhes do pseudocaule, rizoma e raízes adventícias da bananeira.

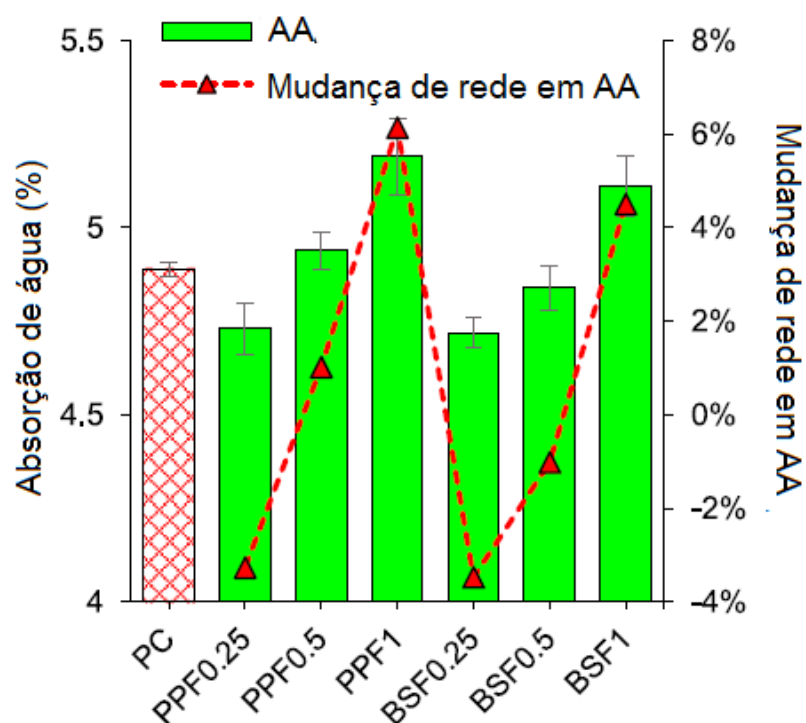


Fonte: PUENTE *et al.* (2020).

Ali *et al.*, (2022) realizaram estudos com incorporação das fibras do caule de bananeira (BSF) no concreto, e verificaram que a absorção de água dos corpos de prova de

0% (controle) foi maior do que os valores das amostras com reforço de fibra de bananeira de 0,25 e 0,5%, e inferior ao teor de 1%, conforme mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Absorção de água das amostras PPF e BSF



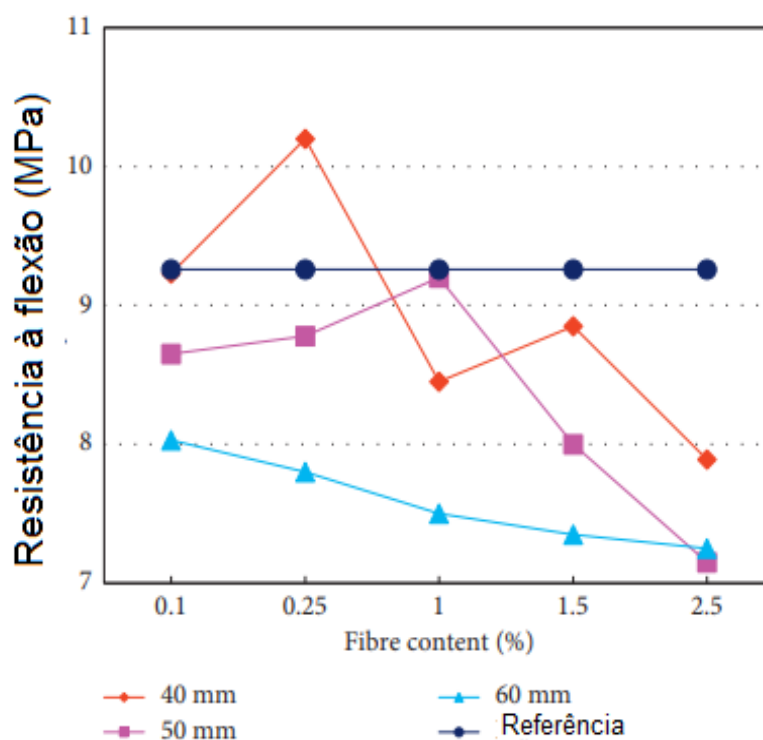
Fonte: Ali *et al.* (2022), adaptado pela autora (2023).

A utilização de teores de 0,25 e 0,5% de fibra do caule de bananeira registraram os resultados de absorção de água ligeiramente melhores em comparação com as amostras de referência e de concreto reforçado com fibras de polipropileno (PPF).

Os autores atribuem que a capacidade de absorção de água das amostras representada o volume de poros do concreto acessível à água. É bem entendido que quanto maior o volume de poros, maiores as chances de que o concreto se deteriore sob a ação de produtos químicos nocivos estranhos, como íons de cloreto e sulfato. Portanto, absorção de água é uma estimativa indireta da durabilidade do concreto.

O estudo experimental realizado por Mugume *et al.* (2021) investigaram o impacto da adição de fibras de bananeira tratadas com 5% de NaOH na resistência à flexão do concreto. As misturas de concreto compostas por fibras de banana de diferentes comprimentos (40, 50 e 60 mm) e teores de fibras (0,1, 0,2, 1,0, 1,5 e 2,5%). Os resultados da resistência à flexão dos corpos de prova de concreto reforçado com fibras após o período de cura de 28 dias são mostrados na Figura 8.

Figura 8 – Resistência à flexão aos 28 dias de cura dos corpos de prova de concreto com fibra de bananeira.



Fonte: Mugume *et al.*, 2021.

Observa-se claramente que os valores de resistência à flexão diminuíram com o aumento do teor de fibra em todos os comprimentos de fibra. Embora, o comprimento não teve impacto significativo na resistência com teores de fibra inferior a 0,25%, porém, as fibras curtas apresentaram desempenho melhor do que as longas em dosagens mais altas, acima de 0,25% (MUGUME *et al.*, 2021).

Portanto, acima de 0,25% de fibras, menores são os valores de resistência do concreto reforçado com fibras de bananeira comparados com a referência, isso pode ser atribuído aos teores de fibras utilizadas e que causou um efeito adverso sobre a resistência.

2.6 Fibra de eucalipto

As plantações de eucalipto no Brasil ocupam 6,97 milhões de hectares, enquanto as áreas de pinus totalizam 1,64 milhão de hectares; outras espécies, incluindo seringueira, acácia, teca e paricá, somam aproximadamente 390.000 hectares. As plantações de eucalipto estão localizadas principalmente nos estados de Minas Gerais (28%), São Paulo (17%), e Mato Grosso do Sul (16%) (IBÁ, 2022). As espécies de eucalipto têm propriedades física e

química variadas que fazem com que elas sejam usadas para as mais diversas finalidades como, estacas, dormentes, carvão vegetal, chapas de fibras e de partículas, entre outros.

Entre as espécies florestais plantadas com fins produtivos, o cultivo do eucalipto é um dos que tem maior disponibilidade de indicações e orientações técnicas. O Eucalipto tem grande importância comercial na economia brasileira e a produtividade, no entanto, depende de diversos fatores, como o local de plantio, os tratos culturais e os insumos disponibilizados. O eucalipto tem se destacado entre outras espécies, por causa do seu rápido crescimento, capacidade de adaptação às diversas regiões ecológicas e pelo potencial econômico, levando em consideração a utilização diversificada de sua madeira (EMBRAPA, 2022).

A plantação de eucalipto, como qualquer outra atividade econômica no país, participa para a produção de bens necessários para a sociedade brasileira, porém depende do uso de recursos naturais, gera resíduos em seus processos de produção e perdas na qualidade ambiental (DOMINGUES *et al.*, 2017). Neste contexto, os resíduos de madeira de eucalipto destacam-se entre os melhores materiais com potencial para a fabricação de produtos em diversos setores como indústria moveleira, biomassa, papel, celulose e na construção civil. Isto devido à sua homogeneidade, teor de lignina e disponibilidade no Brasil, o que favorece a viabilidade econômica de sua fabricação (NOVOTNY *et al.*, 2015; DOMINGUES *et al.*, 2017).

Figura 9 – Visão em perspectiva de detalhe do tronco e galhos do eucalipto.

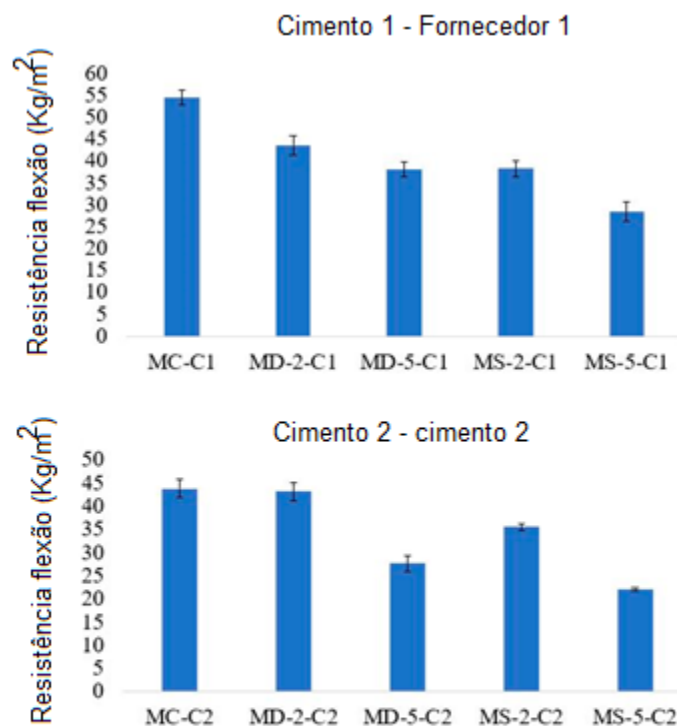


Fonte: EMBRAPA, 2021.

Dentre as fibras vegetais com potencial de aplicação na construção civil destaca-se também a de eucalipto, que, por suas propriedades mecânicas, tem recebido atenção especial dos pesquisadores (SILVA *et al.*, 2016; BALLESTEROS *et al.*, 2021; RAABE *et al.*, 2022). O eucalipto (Figura 9) é uma madeira de rápido crescimento e com fibras de boa qualidade (TONOLI *et al.*, 2012).

Mansilla *et al.* (2020) relataram que a incorporação de 2% e 5% de fibras de casca de eucalipto tratadas com emulsão de parafina como reforço em argamassa cimentícia conforme apresentado na Figura 10. Os resultados mostram que conforme aumenta o teor de fibra, a trabalhabilidade das misturas diminui. Mesmo que, independentemente dos tipos de cimento ou do estado da fibra (seco ou saturado), as amostras com 5% de fibra apresentaram os valores de abatimento mais baixos em comparação com 2% de fibra, e ambas tiveram valores menores que as amostras de referência. Por conseguinte, resultou na perda de resistência à flexão das amostras reforçada com fibras quando comparada com a referência.

Figura 10 – Resultados resistência à flexão de amostras de argamassa: (a) Cimento fornecedor 1; (b) Cimento fornecedor 2.



Legenda:

- MC - Argamassa controle -
- MD - Argamassa de fibra seca
- MS - Argamassa de fibra saturada
- C1 - Cimento 1 e C2 - cimento 2

Fonte: Mansilla *et al.*, (2020), adaptado pela autora (2022).

2.7 Fibra de sisal

O sisal (*Agave sisalana*) é uma planta de origem mexicana que apresenta um amplo campo de utilização no artesanato, decoração, agrícola e a construção civil. Atualmente os maiores produtores mundiais do sisal são países como Tanzânia, Quênia, Uganda, Moçambique, Angola, México, e no Brasil a planta é cultivada em regiões do Semiárido (NAVES, 2016; QUEIROGA, 2021). A colheita do sisal pode ocorrer com pouco tempo de plantio, as fibras são extraídas das folhas da planta, ela geralmente compõe-se 4% de fibra, 0,75% de cutícula, 8% de matéria seca e 87,25% de água (SENTHILKUMAR et al., 2018).

A fibra é extraída a partir da planta *Agave sisalana* (Figura 11) é usada na construção civil como reforço no compósito cimentício. A sua abundância e excelente propriedades mecânicas classificam-no entre as fibras naturais disponíveis para uso na construção civil (QUEIROGA, 2021). A fibra de sisal é de baixo custo, tem alta resistência à tração, à abrasão e tenacidade, nenhum risco relacionado à saúde, bem como boas condições térmicas e propriedades acústicas.

Figura 11 – Planta de *Agave sisalana* com quase 2 m de altura.

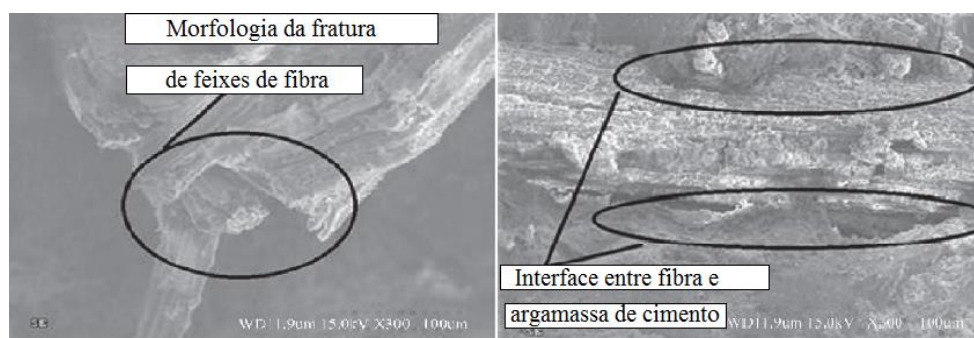


Fonte: Queiroga (2021).

Xiaofan *et al.* (2021) estudaram as fibras de sisal na argamassa de cimento e a sua microestrutura foi observada por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para entender como as propriedades da argamassa foram afetadas. Os resultados mostraram que a adição de fibra de sisal na argamassa de cimento melhorou significativamente a propriedade mecânica, o desempenho antifissura e a impermeabilidade da argamassa. A Figura 12 mostra

a área de interface entre a fibra de sisal e a argamassa de cimento. As fibras de sisal são distribuídas na argamassa de cimento sendo bem acondicionadas, preenchendo os vãos internos, que efetivamente compensam os defeitos da argamassa de cimento, e pode reduzir bastante o tamanho dos defeitos internos e formar uma estrutura compacta para melhorar o desempenho.

Figura 12 – Área de interface da fibra de sisal e da argamassa de cimento.



Fonte: Xiaofan *et al.* (2021).

2.8 O efeito dos aditivos na reologia do compósito cimentício

O compósito cimentício utilizado na construção civil passa por dois processos distintos na sua produção que são o estado fresco e o endurecido. No estado fresco, obtido após a mistura dos materiais com água, as principais propriedades do compósito cimentícios são a trabalhabilidade, as propriedades reológicas, a tixotropia, a perda de abatimento, o tempo de pega, a segregação e exsudação na mistura (SILVA; ANDRADE; GONÇALVES, 2017).

Assim, muitas questões práticas da aplicação dessa mistura no compósito cimentício, como bombeamento, espalhamento, moldagem ou compactação estão ligadas diretamente ao seu comportamento reológico. Ao atingir seu estado endurecido, o compósito cimentício pode atingir sua resistência mecânica adequada, sendo resultado de sua produção e componentes utilizados. (TEIXEIRA *et al.*, 2012; SILVA *et al.*, 2016).

A utilização da fibra como reforço no compósito cimentício pode alterar a reologia da mistura, e inibir a pega do cimento devido à presença de substâncias inibitórias. Esses problemas podem ser contornados pela utilização de adições minerais ou aditivos químicos. Nesse caso, esses materiais podem ser usados para atenuar a reação da fibra/matriz e ainda melhorar as propriedades dos compósitos (SOTO, 2010).

Os aditivos são materiais adicionado antes ou durante a mistura da pasta/argamassa, concreto ou fibrocimento. O aditivo é utilizado em quantidade não superior a 5% sobre a

massa do cimento, e apresenta com finalidade para modificação das propriedades no estado fresco ou endurecido da matriz cimentícia (NBR 11768-1:2019).

A maioria dos aditivos químicos são utilizados em baixa concentração e a razão para isso é que eles atuam na interface da partícula do cimento, seja líquido-sólido (superplastificantes) ou líquido-vapor (redução de retração ou incorporador de ar) (AÏTCIN; FLATT, 2016).

De acordo com a NBR 11768-1 (2019), aditivos para concreto de cimento Portland são classificados de acordo com sua função, porém esses aditivos podem também ser utilizados para produção de argamassa, pasta e fibrocimento reforçados com fibras.

Alguns aditivos químicos usados na produção de compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais para melhoria das propriedades no estado fresco tem sido relatado por muitos pesquisadores e mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Aditivos químicos usados em compósitos cimentício reforçado com fibras vegetais.

Aditivos	Função	Fibra	(Autor/ano)
Plastificante à base de lignosulfonato	Redução da densidade dos compósitos	Eucalipto	Silva (2021)
Incorporador de ar	Trabalhabilidade da argamassa Introdução de bolha de ar na argamassa	Hemp	Candamano <i>et al</i> (2021)
Superplastificante de policarboxilato	Trabalhabilidade e dispersão das fibras na mistura	Coco	Shah <i>et al</i> , (2020)
hidroxipropilmetilcelulose (HPMC)	melhorar a fluidez e a viscosidade da pasta de cimento no processo de extrusão.	Eucalipto	Raabe <i>et al</i> , (2021)

Fonte: Do autor (2023).

A adição das fibras no compósito diminui a trabalhabilidade e conseqüentemente a demanda de água aumenta para manter a consistência. Contudo, o excesso de água compromete a resistência mecânica e a durabilidade. Para contornar essa situação, ao invés de aumentar a quantidade de água, são utilizados aditivos superplastificantes. Nota-se que, diferentes fibras e teores exigirão maior quantidade de aditivos superplastificantes, de modo a distribuir melhor as fibras e com a finalidade de uniformizar a mistura, e melhorar a trabalhabilidade. O uso de aditivos superplastificantes atua melhorando as propriedades físico – mecânicas e aumenta a resistência inicial do compósito, pois proporciona uma redução substancial (até 30-40%) na utilização de água que é necessária para a produção de compósito com alta resistência (HWANG *et al.*, 2016; IBRAGIMOV; FEDIUK, 2019).

Para produção do fibrocimento no processo de extrusão, os aditivos atuam de forma a tornar a mistura mais homogênea, e tem o poder de reter a água dentro da mistura. Alguns

tipos de aditivos são mais eficientes no processo de extrusão, eles são capazes de reduzir as tensões entre a parede da boquilha e a mistura cimentícia, pois as tensões elevadas podem gerar defeitos na superfície do produto fabricado pelo equipamento, e são tipos mais comuns utilizados como retentores de água como hidroxipropilmetilcelulose, carboximetilcelulose e policriamida entre outros (SOTO, 2010).

A hidroxipropilmetilcelulose (HPMC) é um superplastificante que dispersa as partículas de cimento, reduzindo a tensão de escoamento e a viscosidade da pasta de cimento. O poliéster carboxílico é comercialmente denominado ADVA 175, é um aditivo que reduz a tensão superficial da água e assim provoca um aumento da área superficial do líquido que melhora a absorção de água, formando uma camada de lubrificação entre a parede da extrusora e a superfície da placa de fibrocimento (KHUDHAIR; EL HILAL; ELHARFI, 2018; SILVA *et al.*, 2021). Os aditivos HPMC e ADVA foram utilizados no estudo realizado por Teixeira *et al* (2018), como modificadores reológicos no fibrocimento, com dosagem de 1% em peso da massa total dos materiais inorgânicos particulados (cimento Portland e calcário) para promover o comportamento pseudoplástico do compósito, o que, por sua vez, possibilitou o processo de extrusão.

Os plastificantes redutores de água são compostos de polímeros orgânicos à base de lignosulfonatos, hidroxilados polímeros e ácidos hidroxicarboxílicos que, sem modificar a consistência, permitem reduzir a teor de água de um determinado concreto, ou que, sem modificar o teor de água, aumenta consideravelmente a fluidez/espalhamento, ou que produz ambos ao mesmo tempo (KHUDHAIR; EL HILAL; ELHARFI, 2018; KONAKOVA *et al.*, 2022).

Os incorporadores de ar são materiais orgânicos, geralmente na forma de uma solução que, quando adicionados à água de amassamento do compósito à base de cimento resulta em uma quantidade controlada de ar na forma de ar uniformemente disperso em bolhas microscópicas (KHUDHAIR; EL HILAL; ELHARFI, 2018).

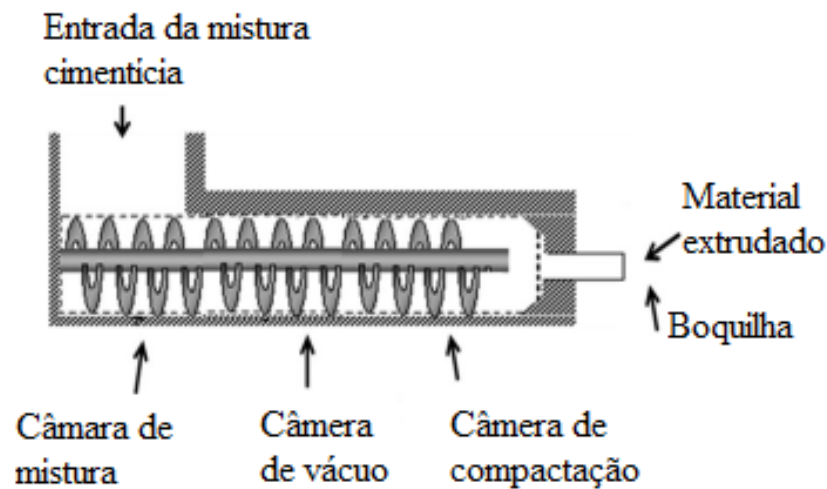
Romano, Pileggi e Cincotto (2018) investigaram o efeito do aditivo incorporador de ar em materiais cimentícios para produção de argamassa de revestimento. Mediante isso, estudaram a interação com outros tipos de aditivos, o efeito do tempo de mistura e do tipo de equipamento nas propriedades de argamassa, e os fenômenos envolvidos na geração e na estabilidade das bolhas de ar nas composições.

2.9 O processo de extrusão na produção de fibrocimentos

O processo mecânico de extrusão é uma tecnologia utilizada para fabricação do fibrocimento, e trabalha com a compressão de um material com conformação plástica, com tensão de escoamento. Para produção de fibrocimento utilizando o processo de extrusão tem como característica principal a necessidade de utilizar relações água/cimento (a/c) baixas, entre 0,2 a 0,3, assim como também utilizar misturas que apresentam comportamento reológico pseudoplástico (TEIXEIRA *et al.*, 2017).

O material que passa na boquilha da extrusora precisa ter um aspecto plástico para atingir formas geométricas, e conferir determinadas características no formato que se deseja. A máquina chamada extrusora apresentada na Figura 13 contém uma rosca sem fim dividida em três câmaras: mistura, câmara de mistura (pressão negativa) e câmara de compactação (compressão). Na extremidade da rosca, encontra-se a boquilha, que promove a compactação final da mistura e forma a geometria do produto (SOTO, 2010; TEIXEIRA *et al.*, 2017).

Figura 13 – Extrusora de fibrocimento.



Fonte: Adaptado de Teixeira et al. (2017).

As propriedades finais do compósito de fibrocimento com reforço de fibras vegetais dependem, além da fibra e dos componentes da matriz, do processo de fabricação. Para produzir compósito com propriedade mecânica, precisa ter dispersão homogênea das fibras na matriz, uma baixa porosidade e percentagem otimizada de fibras que seja suficiente para reforçar o material e permitir a continuidade da matriz (ARDANUY *et al.*, 2015). Uma das vantagens do método de extrusão comparado aos outros processos de produção é a possibilidade de se obter elementos de uma forma pretendida em seção transversal

(perpendicular à superfície horizontal), que pode ser preenchido com material isolante para melhorar as características térmicas (MUCIACCIA; BIOLZI, 2012).

Segundo Santos *et al.* (2015), a extrusão é um processo eficiente considerando fatores como: baixo consumo de energia, a geometria variada de produtos e de baixo custo de investimento para montagem de uma nova fábrica. Além disso, o uso de máquinas mais simples para a produção contínua, a possibilidade de alinhamento parcial das fibras (o que o torna vantajoso para certos produtos). Ainda a possibilidade de utilização de baixa relação água/cimento, o qual promove uma maior compactação do compósito gerado, e, como resultado, uma maior resistência contra a situação de fadiga gerada no envelhecimento natural.

Correa *et al.* (2018) usaram o método de extrusão para preparar compósitos híbridos e reforçados apenas com celulose, e para promover o comportamento pseudoplástico do compósito foram utilizados modificadores reológicos. Para os autores cada fase e suas características contribuíram de maneira diferente na construção da estrutura dos compósitos. A fração volumétrica e as distribuições de orientação das nanofibras e fibras celulósicas, largura, comprimento e curvatura são importantes para obter resultados satisfatórios. Além disso, sabe-se que a densidade de empacotamento de partículas dos compósitos à base de cimento e aditivos químicos proporcionam uma importante influência para diminuir a demanda de água no processo de extrusão (SILVA *et al.*, 2021; RAABE *et al.*, 2022).

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão bibliográfica apresentou informações necessárias para elaboração da pesquisa com a utilização da fibra vegetal e o tratamento superficial para melhorar a atuação como reforço na argamassa cimentícia e na produção de fibrocimento. Nesta revisão foi relatado a influência das fibras vegetais nas propriedades físicas e mecânicas do compósito à base de cimento, considerando parâmetros como comprimento, diâmetro, umidade, densidade, composição química e morfologia das fibras. Além disso, a produção dos compósitos cimentícios com inserção de diferentes tipos de fibras vegetais, levando-se em conta os componentes como aditivos químicos para melhoria das propriedades físicas e mecânicas.

A partir das lacunas encontradas na revisão bibliográfica, foi sugerido a produção de argamassa ecológica reforçada com fibras vegetais (bananeira, eucalipto e sisal) e a produção de fibrocimento por extrusão com inserção de fibras de sisal *in natura* e a combinação de aditivos surfactantes, como estratégia para melhoria da aderência da fibra com a matriz cimentícia, bem como, propriedades mecânicas e a redução da densidade aparente.

A pesquisa dos tópicos apresentados nestas seções serviu de base para definições dos experimentos desenvolvidos na presente pesquisa. No referencial também foi visto sobre o tratamento alcalino das fibras vegetais e a combinação de aditivos surfactantes para preparação de materiais de construção civil, possibilitando a diminuição de um ambiente menos agressivo às fibras como reforço para melhoria das propriedades dos compósitos.

No entanto, ainda são escassas pesquisas para a produção de argamassa ecológica sem função estrutural e fibrocimento reforçado com fibras de sisal *in natura*, principalmente em relação aos parâmetros que a envolve, pois, o estudo da fibra é influenciado por vários fatores, como teor, umidade e sua interação com a matriz cimentícia. Ademais, os componentes dos compósitos, como cimento, aditivos, fator água e cimento e as adições. Portanto, é necessário o conhecimento e desenvolvimento de mais pesquisas que esclareça a atuação da fibra no interior do compósito para que de fato esta técnica se torne viável no setor da construção civil.

REFERÊNCIAS

AIĆCIN, P. C.; FLATT, R. J. **Science and Technology of Concrete Admixtures**. Cambridge: Elsevier Ltd, 2016.

ALKBIR, M. *et al.* Fibre properties and crashworthiness parameters of natural fibre-reinforced composite structure: A literature review. **Composites structure**, v 148, p. 59-73, 2016.

ALI, B. *et al.* Investigation of physical, strength, and ductility characteristics of concrete reinforced with banana (Musaceae) stem fiber. **Journal of Building Engineering**, v. 61, 2022.

ARDANUY, M.; CLARAMUNT, J.; TOLEDO FILHO, R. Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research. **Construction and building materials**, v. 79, p. 115-128, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768 - 1**: Aditivos para concreto. Rio de Janeiro, 2019.

ARSYAD M. Sodium hydroxide and potassium permanganate treatment on mechanical properties of coconut fibres. **Materials Science and Engineering**, v. 619, p.1-8, 2019.

ATAHAN, H. N. *et al.* The morphology of entrained air voids in hardened cement paste generated with different anionic surfactants. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, n. 7, p. 566-575, 2008.

AZAM A. *et al.* Hydrophobic treatment of natural fibers and their composites - review. **Journal of Industrial Textiles**, v. 47, ed. 8, p.2153–2183, 2018.

BAHJA, B.; ELOUAFI, A.; TIZLIOUINE, A.; OMARI, L.H. Morphological and structural analysis of treated sisal fibers and their impact on mechanical properties in cementitious composites. **Journal of building engineering**, v. 34, p. 1-9, 2021.

BALAJI, A. *et al.* Study on mechanical and morphological properties of sisal/banana/coir fiber-reinforced hybrid polymer composites. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 41, p. 1-10, 2019.

BALLESTEROS, J. E. M. *et al.* Influence of the fiber treatment and matrix modification on the durability of eucalyptus fiber reinforced composites, **Cement and concrete composites**, v. 124, p. 1-10, 2021.

BORSOI, C. *et al.* Grape stalk fibers as reinforcing filler for polymer composites with a polystyrene matrix. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 136, p. 1–10, 2019.

CANDAMANO, S.; CREA, F.; COPPOLA, L.; DE LUCA, P.; COFFETTI, D. Influence of acrylic latex and pre-treated hemp fibers on cement based mortar properties. **Construction and Building Materials**, v. 273, p.1-12, 2021.

CASTOLDI, R. *et al.* Effect of alkali treatment on physical–chemical properties of sisal fibers and adhesion towards cement-based matrices. **Construction and Building Materials**, v. 345, 2022.

CHANDRASEKAR, M. *et al.* A review on the characterisation of natural fibres and their composites after alkali treatment and water absorption. **Plast. Rubber Compos.** v. 46, p. 119–136, 2017.

CHAFEI, S. *et al.* Optimizing the formulation of flax fiber-reinforced cement composites. **Constr Build Mater, Guildford**, v.54, p. 59-64, 2014.

CHANDRAMOULI, K. *et al.* “Experimental investigation on banana fibre reinforced concrete with conventional concrete,” **International Journal of recent Technology and Engineering**, v.7, n. 6S, p.1-3, 2019.

CORREIA, V.C.; SANTOS, S.F.; SAVASTANO, H. J. Vegetable fiber as reinforcing elements for cement based composites in housing applications – a Brazilian experience. **MATEC Web of conferences**, v. 149, p. 1-7, 2018.

CUEBAS, L. *et al.* The incorporation of untreated and alkali-treated banana fiber in SEBS composites. **Polímeros**, v. 30, n. 4, p.1-9, 2021.

DHAWAN, A.; GUPTA, N.; R. GOYAL.; SAXENA, K. K. “Evaluation of mechanical properties of concrete manufactured with fly ash, bagasse ash and banana fibre,” **Materials Today**, v. 44, 2020.

DOMINGUES, R. R. *et al.* Properties of biochar derived from wood and high-nutrient biomasses with the aim of agronomic and environmental benefits. **Plos One**, v. 12, n. 5, 2017.

DUFRESNE, A. Nanocellulose: A New Ageless Bionanomaterial. **Materials Today**, v. 16, p. 220-227. 2013.

ELBHIERY, A. *et al.* “Performance of concrete beams reinforced using banana fiber bars,” **Case Studies in Construction Materials**, v. 13, p. 1–13, 2020.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Transferência de tecnologia florestal: cultivo de eucalipto em propriedades rurais: diversificação da produção e renda**. Brasília: Embrapa, 2014. 138 p.

FIDELIS, M. E. *et al.* Interface characteristics of jute fiber systems in a cementitious matrix. **Cement and Concrete Research**, v. 116, p. 252-265, 2019.

FERREIRA, S.R. *et al.* Influence of natural fibers characteristics on the mechanics with cement matrices. **Composites Part B**, v. 140, p. 183 – 196, 2018.

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

FONSECA, C. S., SILVA, M. F., MENDES, R. F., HEIN, P. R. G., ZANGIACOMO, A. L., SAVASTANO JR, H., & TONOLI, G. H. D. Jute fibers and micro/nanofibrils as reinforcement in extruded fiber-cement composites. **Construction and Building Materials**, v. 211, p. 517-527, 2019.

FONSECA, R. P., ROCHA, J. C., CHERIAF, M. Mechanical properties of mortars reinforced with Amazon rainforest natural fibers. **Materials**, v.14, n.1, 2021.

GRUPTA, A. *et al.* Processing, mechanical characterization, and micrography of 3D-printed short carbon fiber reinforced polycarbonate polymer matrix composite material. **The international journal of advanced manufacturing technology**, v.107, p. 3185-3205, 2020.

HWANG, S. *et al.* Effects of process parameters and surface treatments of graphene nanoplatelets on the crystallinity and thermomechanical properties of polyamide 6 composite fibers. **Composites Part B**, v. 100, p. 220-227, 2016.

IBRAHIM, I.D. *et al.* Impact of Surface Modification and Nanoparticle on Sisal Fiber Reinforced Polypropylene Nanocomposites. **Journal of Nanotechnology**, v. 2016, p.1-10, 2016.

IBRAGIMOV, R.; FEDIUK, R. Improving the early strength of concrete: Effect of mechanochemical activation of the cementitious suspension and using of various superplasticizers. **Construction and Building Materials**, v. 226, p. 839–848, 2019.

IBÁ ANUUAL REPORT, **IBÁ Relatório Anual 2022**. Indústria Brasileira de Árvores. São Paulo, 96p, 2022. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba-2020.pdf>. Acesso em: 06 jun. 2023.

ISLAM, M.S.; AHMED, S.J. Influence of jute fiber on concrete properties. **Construction and Building Materials**, v.189, p.768–776, 2018.

IZQUIERDO, S. *et al.* Sisal fiber reinforced hollow concrete blocks for structural applications: Testing and modeling. **Construction and building materials**, v. 151, p. 98-112, 2017.

JAGADEESH, P.; PUTTEGOWDA, M.; RANGAPPA, S.M.; SIENGCHIM, S. A review on extraction, chemical treatment, characterization of natural fibers and its composites for potential applications. **Polymer Composites**, v. 42, p. 6239-6264, 2021.

JAIN, V.; JAIN, B.; SANCHETIA, G. Influence of Rice Husk Ash (RHA) on the Workability of Concrete. **Community Based Research and Innovations in Civil Engineering**, v.796, p.1-5, 2021.

JAWAID, M.; ABDAN, M.; ISHAK, K. Effect of alkali and silane treatments on mechanical and fibre-matrix bond strength of kenaf and pineapple leaf fibres. **Journal of Bionic Engineering**, v.13, 426-435, 2016.

KABIR, M.M.; WANG, H.; LAU, K.T.; Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview, **Composites Part B: Engineering**, v. 43, ed. 7, p.2883-2892, 2012.

KALIA, S. *et al.* Cellulose-Based Bio and nanocomposites: A review. **International Journal of polymer science**, v. 11, 2011.

KONAKOVA, D.; Impact of plasticizers' types on the performance of calcium aluminate cement. **Journal of materials research and technology**, v. 20, p.1512 -1523, 2022.

KARTHICKA, R.; ADITHYA, K.; HARIHARAPRASATH, C.; ABHISHEK, V. Evaluation of mechanical behavior of banana fibre reinforced hybrid epoxy composites. **Materials Today: Proceedings**, v.5, p. 12814–12820, 2018.

KHUDHAIR, M.; EL HILAL, B.; ELHARFI, A. Review on chemical (organic) admixtures in the cementitious materials. **J. Mater. Environ. Sci**, v. 9, p. 1722-1734, 2018.

KLERK, M.D.*et al.* Durability of chemically modified sisal fibre in cement-based composites. **Construction and Building Materials**, v. 241, p. 1-13, 2020.

KOOHESTAN, B. *et al.* Comparison of different natural fiber treatments: a literature review. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 16, p. 629 – 642, 2018.

LAU, K.; HUNG, P.Y.; ZHU, M.H.; HUI, D. Properties of natural fibre composites for structural engineering applications. **Composites Part B: Engineering**. v. 136, p. 222-233, 2018.

LAVERDE, V. *et al.* Use of vegetable fibers as reinforcements in cement-matrix composites materials: A review. **Construction and Building Materials**, v. 340, 2022.

LERTWATTANARUK, P.; SUNTIJITTO, A. Properties of natural fiber cement materials containing coconut coir and oil palm fibers for residential building applications. **Construction and Building Materials**, v. 94, p. 664-669, 2015.

LEE, J.H. Influence of concrete strength combined with fiber content in the residual flexural strengths of fiber reinforced concrete. **Composite structures**, v.168, p.216-225, 2017.

LEE, H. X. D.; WONG, H. S.; BUENFELD, N. R. Self-sealing of cracks in concrete using superabsorbent polymers. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 79, p. 194-208, 2016.

LIU, H. *et al.* The application of coated superabsorbent polymer in well cement for plugging the microcrack. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 104, p. 72-84, 2016.

MANGANE, M. B. C. *et al.* Influence of superplasticizers on mechanical properties and workability of cemented paste backfill. **Minerals Engineering**, v. 116, p. 3-14, 2018.

MANSILLA, C. *et al.* Evaluation of Mechanical Properties of Concrete Reinforced with Eucalyptus globulus Bark Fibres. **Sustainability**, v. 12, p. 1-19, 2020.

MAZZANTI, V.; MOLLICA, F. A Review of Wood Polymer Composites Rheology and Its Implications for Processing. **Polymers**, v.12, p. 1-23, 2020.

MADHU, P. *et al.* A new study on effect of various chemical treatments on Agave americana fiber for composite reinforcement: Physico-chemical, thermal, mechanical and morphological properties. **Polymer testing**, v. 85, p. 1-7, 2020.

MOHAMMAD, I.; SYED, J. A. Influence of jute fiber on concrete properties. **Construction and Building Materials**, v.189, p. 768-776, 2018.

MURALIKRISHNA, M.V.V. *et al.* Development of mechanical properties in banana fiber composite. **Materials Today: Proceedings**, v. 22, p. 541–545, 2020.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. Third ed.**, McGraw-Hill, New York, 2014.

MERTA, I., & TSCHEGG, E. K. Fracture energy of natural fibre reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 40, p. 991-997. 2013.

MUCIACCIA, G.; BIOLZI, L. Thermal degradação of fiber reinforced extruded materials, **Fire safety journal**, v.49, p. 89-99, 2012.

MUGUME, R.B.; KARUBANGA, A.; KYAKULA, M. Impact of Addition of Banana Fibres at Varying Fibre Length and Content on Mechanical and Microstructural Properties of Concrete. **Advances in Civil Engineering**, p.1-15, 2021.

MYDIN, M. *et al.* Durability Properties of Lightweight Foamed Concrete Reinforced with Lignocellulosic Fibers. **Materials**, v.15, p.1-16, 2022.

NOVOTNY, E. H. *et al.* Biochar: pyrogenic carbon for agricultural use: a critical review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 2, p. 321-344, 2015.

ONUAGULUCHI, O.; BANTHIA, N. Plant-based Natural Fiber Reinforced Cement Composites: a Review. **Journal of Cement and Concrete Composites**, v. 68, p. 96-108, 2016.

PACHECO-TORGAL, F.; LABRINCHA, J.A. The future of construction materials research and the seventh UN Millennium Development Goal: A few insights. **Construction and Building Materials**, v. 40, p.729–737, 2013.

PARRE, A. *et al.* Investigation of chemical, thermal and morphological properties of untreated and NaOH treated banana fiber. **Materials Today: Proceedings**, 2019.

PEDERNEIRAS, M.; VEIGA, R.; BRITO, J. Physical and Mechanical Performance of Coir Fiber-Reinforced Rendering Mortars, **Materials**, v. 14, p. 823, 2021.

PICKERING, K.L.; ARUAN EFENDY, M.G.; Le, T.M.; A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance, **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 83, p.98-112, 2016.

POONGODI, K.; MURTHI, P. Impact strength enhancement of banana fibre reinforced lightweight self-compacting concrete. **Materials Today: Proceedings**, v. 27, p. 1203–1209, 2020.

PRAMOD, V. *et al.* Compression and water absorption behaviour of banana and sisal hybrid fiber polymer composites. **Materials Today: Proceedings**, 2020.

PRASANNAN, D. *et al.* “Comparative study of banana and sisal fibre reinforced concrete with conventional concrete,” **International Journal of Pure and Applied Mathematics**, v. 118, n. 20, p. 1757–1765, 2018.

PUENTE, R. J. A. *et al.* **Manejo do bananal com ênfase na produção de mudas a partir do fracionamento do rizoma**, Manaus: Editora INPA, 2020.

QUEIROGA, V. P. Sisal (Agave sisalana, Perrine): Tecnologias de plantio e utilização. Campinas Grande: **AREPB**, 2021.

RAABE, J.; SILVA, D. W.; DEL MENEZZI, C. H. S.; TONOLI, G. H. D. Impact of nanosilica deposited on cellulose pulp fibers surface on hydration and fiber-cement compressive strength. **Construction and building materials**, v. 326, 2022.

ROMANO, R.C.O.; CINCOTTO.; PILEGGI, R.G. Incorporação de ar em materiais cimentícios: uma nova abordagem para o desenvolvimento de argamassas de revestimento. **Ambiente construído**, v.18, n.2, p. 289 – 308, 2018.

SAHU, P.; GUPTA, MK. A review on the properties of natural fibres and its bio-composites: effect of alkali treatment. **Proc IMechE Part L: J Materials: Design and Applications.**, v.234, pp. 198 – 217, 2020.

SHAH, S. F. A. *et al.* Comparative study on the effect of fiber type and content on the performance of one-part alkali-activated mortar. **Construction and Building Materials**, v. 243, p.1-9, 2020.

SALMABANU, L *et al.* Sustainable and renewable bio-based natural fibres and its application for 3D Printed Concrete: **A Review. Sustainability**, V. 12, p. 1-25, 2020.

SAMOUH, Z. *et al.* Identification of the Physical and Mechanical Properties of Moroccan Sisal Yarns Used as Reinforcements for Composite. **Materials Fibers**, v. 9, n.13, 2021.

SANKAR, A V.V. *et al.* Experimental research into the mechanical behaviour of banana fibre reinforced PP composite material. **Materials Today: Proceedings**, v. 33, p. 3097-3101, 2020.

SANTOS, S. F. *et al.* Supercritical carbonation treatment on extruded fibre-cement reinforced with vegetable fibres. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 56, p. 84-94, Feb. 2015.

SANTOS, M. F. R. F. **Elaboração do technologyroadmap para biorrefinaria de produtos da lignina no Brasil**. 2011. 308 p. Tese (Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

SANTOS, M. F. *et al.* Estudo do efeito da carbonatação no concreto produzido com fibra vegetal (buriti). **ITEGAM-JETIA: Journal of Engineering and Technology for Industrial Applications**, Manaus, v. 4, n. 13, p. 184-189, 2018.

SATHIPARAN, N.; RUPASINGHE, M.N.; PAVITHRA, B.H. Performance of coconut coir reinforced hydraulic cement mortar for surface plastering application. **Construction and Building Materials**, v. 142, p. 23–30, 2017.

SENTHILKUMAR, K. et al. Mechanical properties evaluation of sisal fibre reinforced polymer composites: A review. **Construction and building materials**, India, v. 174, p. 713-729, 2018.

SILVA, D. W. *et al.* Cementitious composites reinforced with kraft pulping waste. **Key Engineering Materials**, v. 668, p. 390-398, 2016.

SILVA, D. W. *et al.* Superabsorbent ability polymer to reduce the bulk density of extruded cement boards. **Journal of Building Engineering**, v. 43, p. 103130, 2021.

SILVA, F.G.S.; ANDRADE, H.M.C.; GONÇALVES, J.P. Estudo do comportamento reológico de pastas de cimento contendo resíduo catalítico de petróleo por squeeze-flow e reometria rotacional. **Ambiente construído**, v.18, n.2, p. 343 – 363, 2018.

SEPE, R. A.; BOLLINO, F.; BOCCARUSSO, B, L.; CAPUTO, A. F. Influence of chemical treatments on mechanical properties of hemp fiber reinforced composites. **Composites Part B**, v. 133, 2018.

SHAH, I.; LI, J.; YANG, S.; ZHANG, Y.; ANWAR, A. Experimental investigation on the mechanical properties of natural fiber reinforced concrete. **Journal of renewable Materials**, 2022.

SOTO, Y. J. M. Adequação de formulações para a produção de placas de fibrocimento por extrusão. 2010. 201 p. **Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana)** - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

TEIXEIRA, R.S. et al. Nanoindentation study of the interfacial zone between cellulose fiber and cement matrix in extruded composites. **Cement & concrete composites**, v. 85, p. 1-8, 2017.

TEIXEIRA, R. S., TONOLI, G. H. D., SANTOS, S. F., FIORELLI, J., SAVASTANO, H., & LAHR, F. A. Extruded cement based composites reinforced with sugar cane bagasse fibres. **In Key Engineering Materials**, v. 517, p. 450-457, 2012.

TORGAL, F.P.; FUCIC, A.; JALALI, S. Toxicity of Building Materials; **Woodhead Publishing**: Cambridge, UK, 2012.

TONOLI, G. H. D. *et al.* Impact of bleaching pine fibre on the fibre/cement interface. **Journal of Materials Science**, Norwell, v. 47, p. 4167-4177, 2012a.

TIAN, H.; ZHANG Y.X.; YANG, C.; DING, Y. Recent advances in experimental studies of the mechanical behaviour of natural fibre-reinforced cementitious composites. **Structural Concrete**, v. 17, n. 4, p. 564-575, 2016.

VARDHINI, K.J.; MURUGAN, R.; RATHINAMOORTHY, R. Effect of alkali treatment on physical properties of banana fibre. **Indian Journal of Fibre & Textile Research**, India, v. 44, p. 459-465, 2019.

VEIGAS, M.G.; M. NAJIMI, B.; SHAFEI. Cementitious composites made with natural fibers: Investigation of uncoated and coated sisal fibers, **Case Stud. Constr. Mater**, v.16, 2022.

XIAOFAN, L. *et al.* Study on the properties of an ecotype mortar with rice husks and sisal fibers,” **Advances in Civil Engineering**, v. 2021, p. 1–11, 2021.

WEI, J.; MEYER, C. Degradation of natural fiber in ternary blended cement composites containing metakaolin and montmorillonite. **Corrosion Science**, v. 120, p. 42-60,2017.

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

YIN, S., TULADHAR, R., SHI, F., COMBE, M., COLLISTER, T., & SIVAKUGAN, N. Use of macro plastic fibres in concrete: a review. **Construction and Building Materials**, Guildford , v. 93, p. 180-188, 2015.

ZOLLO, F. Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development. **Cement and Concrete Composites**, Barking v. 19, n. 2, p. 107-122, 1997.

ZWAWI, MOHAMMED. A Review on Natural Fiber Bio-Composites, Surface Modifications and Applications, **Molecules**, v. 26, n. 404, p.1-28, 2021.

SEGUNDA PARTE – ARTIGOS

ARTIGO 1: INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO QUÍMICO DE FIBRAS DE BANANEIRA, EUCALIPTO E SISAL NA INTERFACE DAS PROPRIEDADES COM A MATRIZ CIMENTÍCIA

RESUMO

A adição de fibras vegetais como bananeira (FB), eucalipto (FE) e sisal (FS) à argamassa é uma alternativa atraente na intenção de reaproveitar os resíduos agrícolas, além de encontrar soluções de materiais mais sustentáveis e economicamente viáveis. Este artigo pesquisa a influência do tratamento químico de fibras vegetais nas propriedades de interface com a matriz cimentícia. A mistura de argamassa foi produzida com cimento, calcário agrícola, aditivo ADVA, água e adicionados 3% de fibras na mistura em relação a massa de cimento. A condição ideal para realizar o tratamento superficial foi estudada com base em pesquisas na literatura, em que o meio alcalino utilizado foi o hidróxido de sódio (NaOH) 5%, aquecido e agitado por 2 h. Além disso, foi realizada microscopia eletrônica de varredura (MEV) para estudar a morfologia da superfície das fibras vegetais e os compósitos cimentício. A difração de raio-X (DRX) foi realizada para identificar os compósitos cristalinos e análise térmica (TG) para verificar a perda de massa em relação a temperatura nos compósitos com a inclusão de fibras tratadas e não tratadas. Os resultados mostraram que o tratamento alcalino pode limpar e modificar quimicamente a morfologia superficial das fibras, resultando no aumento da rugosidade superficial, o que confere melhor adesão entre fibra e matriz cimentícia, reação de hidratação e cura interna. Da mesma forma, análises MEV, DRX e TG indicaram melhor capacidade de interação das fibras tratadas com a matriz. Os resultados mostraram que o tratamento alcalino com NaOH aumentaram o MOR, LOP, MOE e TE das amostras de argamassa com fibras em comparação com argamassas sem reforço. No geral, a incorporação das fibras de bananeira (CCBF), eucalipto (CCEF) e sisal (CCSF) como reforço na argamassa ecológica sem função estrutural contribuem para aumentar as propriedades mecânicas. De acordo com os resultados do estudo, a utilização de fibras pode levar à melhoria do desempenho mecânico e possivelmente através de mais estudos ser aplicada na construção civil contribuindo para sustentabilidade.

Palavras-chave: Argamassa cimentícia. Fibra lignocelulósica. Tratamento superficial. Sustentabilidade.

1 INTRODUÇÃO

As fibras naturais são materiais biodegradáveis, renováveis e disponíveis mundialmente, além de serem resistentes mecanicamente (POLETANOVIC *et al.*, 2019). As propriedades mecânicas das fibras lignocelulósicas são influenciadas pela composição química e está relacionada principalmente ao teor de celulose e lignina, pela orientação dos cristais e pelo grau de cristalinidade. Sabe-se que esses fatores são dependentes do tipo de planta, condições de crescimento e métodos de extração utilizados (OTTO *et al.*, 2017). Uma boa alternativa de aplicação de fibras vegetais é como reforço em compósitos cimentícios.

Sabe-se que as fibras naturais são abundantes em países tropicais e subtropicais, e as atuais pesquisas estão visando na utilização destas fibras como reforço em compósitos cimentícios. Isso, pois, a adição de fibras na matriz cimentícia tende a melhorar as propriedades mecânicas e físicas do compósito, tornando-o sustentável e com custo baixo em relação as fibras tradicionais. As propriedades mecânicas e físicas dos compósitos dependem principalmente da natureza das fibras, a morfologia, a interação entre a interface fibra-matriz e a produção (POLETANOVIC *et al.*, 2021; SHAH *et al.*, 2021). Alguns desafios da utilização de fibras vegetais é a grande variação nas suas propriedades, o que pode interferir na reação de hidratação do cimento, isso deve-se ao ambiente altamente alcalino, que dissolve as fases de lignina e hemicelulose. Dessa forma, pode prejudicar o desempenho dos compósitos reforçados com fibras vegetais, por isso têm algumas desvantagens em comparação com as fibras sintéticas (ABIOLA, 2017).

Para melhorar a adesão fibra/matriz cimentícia, vários tratamentos químicos (como silano, tratamento alcalino com hidróxido de sódio, carbonato de sódio, etc.) estão sendo aplicados na superfície de fibras vegetais (ILDIKO; POLETANOVIC; KOPECSKO, 2017). O pré-tratamento deve ser ambientalmente sustentável, e deve evitar deterioração da integridade mecânica e rigidez de cada fibra. Em termos de simplicidade e eficácia, o tratamento com hidróxido de sódio pode ser um tratamento viável (POLETANOVIC *et al.*, 2021; GHAFFAR, 2017). As pesquisas sobre as fibras tratadas com álcalis mostram que o tratamento com solução de hidróxido de sódio a 5% nas fibras de sisal, bananeira e eucalipto resultaram no aumento da densidade (cerca de 2%), rugosidade superficial e interação fibra/matriz, uma vez que o tratamento limpa as impurezas da superfície das fibras (NERY; JOSÉ, 2020; CUEBAS *et al.*, 2020; KLERK *et al.*, 2020; MBECHÉ; OMAR, 2020).

A adição de fibras vegetais como bananeira, eucalipto e sisal à argamassa é um dos principais métodos para reaproveitar os resíduos agrícolas, desenvolver soluções de materiais

mais sustentáveis e economicamente viável. A necessidade de desenvolvimento e inovação fez com que surgisse a pesquisa com inclusão de fibras vegetais nos compósitos cimentícios. A partir disso, foram utilizados vários tipos de fibras vegetais, como bananeira, eucalipto, sisal, cânhamo, coco, hemp, kenaf e juta para melhorar o desempenho do compósito (TEIXEIRA *et al.*, 2017; ALDAMA *et al.*, 2019; BEHERA; PETRÚ, 2020; POLETANOVIC *et al.*, 2021; SHAH *et al.*, 2021).

O sisal é uma fibra natural (nome científico é *Agave sisalana*) da família Agavaceae (*Agave*) que produz fibras rígidas tradicionalmente utilizadas na confecção de cordéis e cordas. Ela é totalmente biodegradável, altamente renovável, excepcionalmente durável, como outras fibras naturais, também é composta por celulose, lignina e hemicelulose (POLETANOVIC *et al.*, 2021; GHAFFAR, 2017). Além disso, ao adicionar a fibra de sisal no compósito cimentício com adição de 3% foi observado que teve aumento da resistência à compressão em até 6%. A fibra de sisal também tem um efeito significativo na melhoria do desempenho da argamassa (LIU *et al.*, 2021; PRAKASH, 2021).

A bananeira é encontrada em climas tropicais e suas fibras são obtidas após a colheita da fruta. Ela é usada principalmente para fazer itens como cordas, esteiras e alguns outros materiais compósitos. O uso de fibra de bananeira tem bom impacto econômico devido ao baixo custo, são consideradas recurso renovável, por isso podem ser obtidas para fins industriais. Em pesquisas realizadas com fibras de bananeira foram obtidos bons resultados quando elas recebem tratamento com soluções alcalinas (NaOH) com concentração de 6%. As fibras tratadas de bananeira tiveram aumento nas propriedades de resistência à tração, quando comparada aos compósitos com fibras não tratadas (ELBEHIRY; MOSTAFA, 2020; SANKAR *et al.* (2020).

Savastano *et al.* (2009), compararam o desempenho mecânico de compósitos cimentícios reforçado com fibras de sisal, banana e eucalipto. As fibras de sisal e bananeira com comprimentos maiores (1,65 mm e 1,95 mm) que as de eucalipto (0,66 mm) demonstraram um comportamento de fratura mais estável. Isso se confirma que o comprimento é um dos principais fatores que influenciam no processo pelo qual a carga é transferida da matriz para as fibras.

Porém, as informações existentes sobre o uso das fibras de bananeira, eucalipto e sisal como reforço em argamassa cimentícia ecológica sem função estrutural são insuficientes. Pouco se sabe sobre os efeitos dessas fibras tratadas nas propriedades mecânica e física da argamassa. Um dos aspectos mais importantes do desenvolvimento da pesquisa é a seleção

das fibras de bananeira, eucalipto e sisal considerando suas características e disponibilidade em todas as regiões brasileiras, além da literatura que carece de estudo nesta área.

O objetivo desta pesquisa foi verificar a influência do tratamento químico das fibras vegetais de eucalipto, sisal e bananeira nas propriedades de interface com a matriz cimentícia com finalidade de ser utilizada como elemento de reforço em argamassa ecológica sem função estrutural. As fibras vegetais atuando como reforço em materiais cimentícia são uma alternativa barata e ecológica, e assim como o tratamento com hidróxido de sódio para melhorar o seu desempenho em argamassas cimentícias.

As fibras tratadas contribuíram para aumentar tenacidade da argamassa que é uma propriedade importante para absorção de energia que dá ao revestimento argamassado cimentício capacidade de suportar cargas estáticas e dinâmicas sem falhar. Além disso, elas proporcionam leveza ao compósito cimentício, e assim contribuem para produto mais eficiente reduzindo as cargas de uma edificação. Portanto, este estudo foi elaborado para investigar as propriedades físicas e mecânicas da argamassa cimentícia reforçada com fibras vegetais.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Os materiais utilizados foram cimento Portland tipo CPV, calcário como agregado miúdo, fibras vegetais e aditivo superplastificante à base de policarboxilato (ADVA 175). As fibras do pseudocaule de bananeira, eucalipto e sisal. As fibras do pseudocaule de bananeira (*Musa sp.*) foram coletadas no Universidade Federal de Lavras.

Por outro lado, as fibras de *Eucalyptus spp.* (árvores com idade em média de 7 anos) foram coletadas na unidade industrial de produção de Painéis de Fibras de Média Densidade (MDF) da empresa ECTX.SA (Eucatex), Salto de Itu, São Paulo, Brasil. Por fim, as fibras de sisal (*A. sisalana*) foram fornecidas pela empresa especializada nesse tipo fibra. Esses três tipos de fibras foram escolhidos devido ao baixo custo de produção, baixa densidade, alta rigidez, baixa toxicidade e abundantes no Brasil.

2.2 Preparação das fibras

As fibras foram utilizadas de duas maneiras diferentes para a confecção dos corpos de prova de argamassa. A primeira condição corresponde às fibras *in natura*, ou seja, sem nenhum tipo de tratamento superficial. Por outro lado, a segunda condição corresponde às fibras com tratamento superficial com solução de hidróxido de sódio, conforme metodologia descrita por Santos *et al.* (2015); Chandrasekar *et al.* (2017); Sepe *et al.* (2018), Mahzabin *et al.* (2018) e Juradin *et al.* (2019). Para isso, primeiramente, as fibras foram colocadas em água quente a 75 °C em agitação por 2 h.

Posteriormente, elas foram secas em estufa por 12 h a 105 °C. Após a secagem, as fibras foram tratadas quimicamente em solução de NaOH com concentração de 5% (m/v) na temperatura de 80 °C e em agitação por 2 h. Após essas etapas, as fibras foram lavadas com água destilada até um pH de 7 e foram secas em estufa por 12 h. As condições de tratamento estão esquematizadas na Figura 1.

Figura 1 – Esquema da preparação das fibras tratadas com solução de hidróxido de sódio.



Fonte: Do autor (2023).

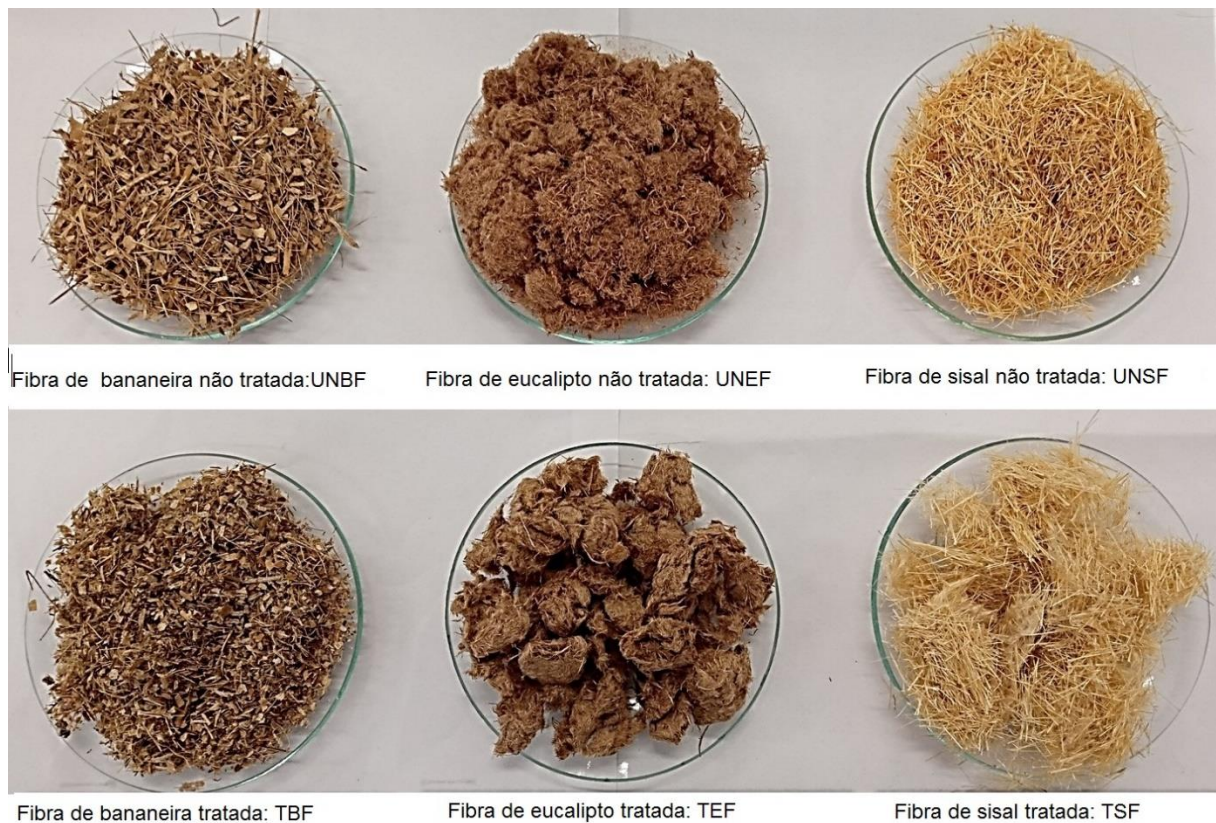
Na Figura 2 estão apresentadas as fibras utilizadas com as suas respectivas siglas. As fibras foram caracterizadas quimicamente de acordo com as normas brasileiras NBR 7989 (2010); NBR 13999 (2010) e NBR 14853 (2010).

A morfologia das fibras foi caracterizada com microscopia eletrônica de varredura com detector de elétrons secundários (20 KeV) e as amostras foram recobertas com ouro.

As principais propriedades físicas das fibras foram determinadas por microscopia óptica: comprimento médio e diâmetro. Já para determinar a densidade básica da fibra foi definida segundo critérios da norma NBR 11.941 (ABNT, 2003), para medir o volume saturado das fibras foi necessário realizar adaptação, sendo calculado o volume deslocado de água após adição das fibras já saturadas, com auxílio de uma proveta graduada. Posteriormente, as amostras foram levadas para estufa à temperatura de 105°C ± 2°C, até que

atingissem massa constante, obtendo assim a massa seca. O teor de umidade das fibras vegetais foi realizado com base na NBR 7190 (ABNT, 1997).

Figura 2 – Fibras de bananeira, eucalipto e sisal *in natura* e tratadas com água quente e NaOH.



Fonte: Do autor (2023).

2.3 Produção dos compósitos cimentícios

Os compósitos foram moldados com matriz cimentícia e as fibras *in natura* ou tratadas. A matriz cimentícia é formada por 56% de cimento Portland e 44% de calcário e as fibras foram utilizadas com um teor de 3.0%, conforme Tabela 1. A quantidade de aditivo superplastificante foi fixado em 1% em relação a massa de cimento. Além disso, relação água/cimento foi de 0,3 para a amostra de referência e para as amostras contendo fibras essa relação foi ajustada de acordo com o tipo de fibra.

Esse ajuste foi realizado preliminarmente para garantir uma boa homogeneização e trabalhabilidade da mistura devido à alta absorção de água pelas fibras. Todas essas condições

(traço e ajuste de água) foram estabelecidas de acordo com os trabalhos da literatura Ceferino *et al.* (2017); Fonseca *et al.* (2019); Silva *et al.* (2020); Ballesteros (2021) e Raabe *et al.* (2022).

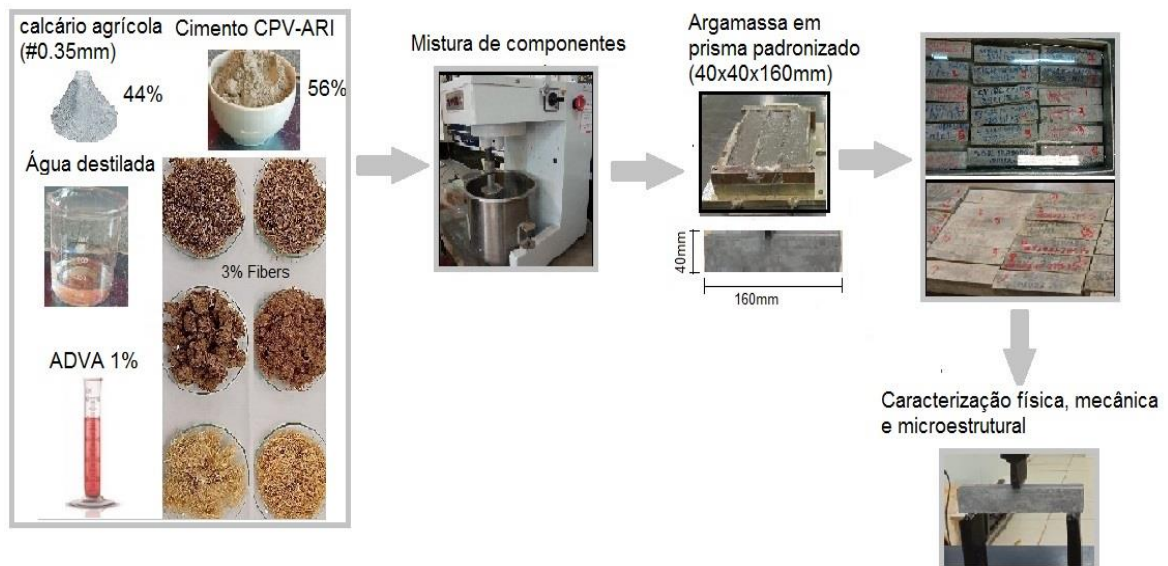
Tabela 1 – Diferentes formulações dos corpos de prova.

Amostras	Matriz cimentícia* (%)	Fibras <i>in natura</i> (%)	Fibras tratadas (%)	Água (%)
Controle (CC)	100	0	-	30
Fibras de bananeira <i>in natura</i> (CCNBF)	97	3	-	33
Fibras de eucalipto <i>in natura</i> (CCNEF)	97	3	-	38
Fibras de sisal <i>in natura</i> (CCNSF)	97	3	-	35
Fibras de bananeira tratada (CCTBF)	97	-	3	33
Fibras de eucalipto tratada (CCTEF)	97	-	3	36
Fibras de sisal tratada (CCTSF)	97	-	3	34

* Cimento Portland CP V-ARI RS (56%); Calcário Agrícola (44%); HPMC (1%) e ADVA (1%).
Fonte: Do autor (2023).

As amostras foram moldadas seguindo os procedimentos descritos na norma BS CEN 1015-11 (2019). Foram moldados seis corpos de prova prismático 40 x 40 x 160 mm para cada tratamento conforme apresentado na Figura 3. As amostras foram mantidas nos moldes por 72 hs, desmoldadas e mantidas imersas em água até 28 dias CEN 1015-11 (BS, 2019).

Figura 3 – Fluxograma de argamassas com fibras não tratadas e tratadas



Fonte: Do autor (2023).

2.4 Caracterização dos compósitos cimentícios

Os testes de flexão estática foram realizados usando uma máquina de teste universal modelo WDW-20E equipada com uma célula de carga de 20 kN nas amostras com idade de cura de 28 dias, sendo utilizado o valor médio de seis amostras para cada tratamento. Utilizou-se uma configuração com três cutelos (vão inferior igual a 150 mm) na determinação dos valores médios de módulo de ruptura (MOR), limite de proporcionalidade (LOP) e módulo de elasticidade (MOE) quando submetidos ao ensaio de flexão estática (RILEM, 1984; SANTOS et al., 2019).

As propriedades físicas como absorção de água (AA), densidade aparente (DA) e porosidade aparente (PA) foram calculadas conforme Equações 1, 2 e 3, respectivamente. O procedimento utilizado é o mesmo estabelecido pela norma ASTM C 948-81 (2001).

$$AA = \frac{W_m - D_m}{I_m} \times 100 \quad \text{Equação (1)}$$

$$DA = \frac{D_m}{I_m - W_m} \times \rho \quad \text{Equação (2)}$$

$$PA = \frac{W_m - D_m}{I_m - W_m} \times 100 \quad \text{Equação (3)}$$

Onde: D_m é a massa seca (g); W_m é massa úmida (g) do compósito com remoção do excesso água da superfície; I_m é a massa (g) após imersão em água (24 h) e ρ é a densidade ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) do líquido onde as amostras foram imersas (água destilada; $\rho = 1\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$).

A identificação das fases cristalinas dos compósitos cimentícios foi realizada por meio da técnica de difração de raios-X em um difratômetro XRD-6000 (Shimadzu) com radiação de $\text{Cu K}\alpha$ ($\lambda = 0,15428 \text{ nm}$), voltagem de 30 kV, corrente de 30 mA e modo varredura contínua a 1° min^{-1} , no intervalo de ângulo de Bragg (2θ) de 5 a 90° . Para realizar a análise, os corpos de prova foram triturados e peneirados apresentando tamanho inferior a $75 \mu\text{m}$.

A termogravimetria foi realizada em analisador termogravimétrico (TGA) modelo TA Instruments, modelo Q500. As condições dos ensaios foram: taxa de aquecimento de $10^\circ \text{C min}^{-1}$, da temperatura ambiente a 1.000°C , atmosfera inerte com nitrogênio. Para determinar a massa de hidróxido de cálcio e de carbonato de cálcio foram utilizados cálculos estequiométricos relativos à desidratação e desprendimento de CO_2 , respectivamente,

conforme procedimentos realizados por Soares *et al.* (2018), Ballesteros *et al.* (2021). A Equação 5 foi utilizada para calcular o Ca(OH)_2 , enquanto que a Equação 6 foi utilizada para o CaCO_3 :

$$\text{Ca(OH)}_2 = \frac{M_{\text{Ca(OH)}_2}}{M_{\text{H}_2\text{O}}} \cdot (X_f - X_i) = \% \quad \text{Equação (4)}$$

Em que: Ca(OH)_2 – Teor de hidróxido de cálcio(%); $M_{\text{Ca(OH)}_2}$ – Massa molar do hidróxido de cálcio; $M_{\text{H}_2\text{O}}$ – Massa molar da água; X_i - Perda de massa de água referente à decomposição térmica do Ca(OH)_2 (%) na temperatura de início do processo. X_f - Perda de massa de água referente à decomposição térmica do Ca(OH)_2 (%) na temperatura final do processo.

$$\text{CaCO}_3 = \frac{M_{\text{CaCO}_3}}{M_{\text{CO}_2}} \cdot (X_f - X_i) = \% \quad \text{Equação (5)}$$

Em que: CaCO_3 – Teor de carbonato de cálcio (%); M_{CaCO_3} – Massa molar do carbonato de cálcio; M_{CO_2} – Massa molar do anidrido carbônico; X_i - Perda de massa de água referente à decomposição do CaCO_3 (%) na temperatura de início do processo. X_f - Perda de massa de água referente à decomposição do CaCO_3 (%) na temperatura final do processo.

Para determinar a dureza da região correspondente ao silicato de cálcio hidratado (C-S-H), seções polidas da superfície das amostras foram preparadas. As amostras foram embutidas a frio com resina acrílica e lixadas com lixas de carbetto de silício de #400, #600 e #1200 e polidas em panos com partículas de diamante com tamanho de 9 μm , 3 μm e 1 μm . Entre cada uma das etapas do polimento, as amostras foram levadas ao banho ultrassônico com álcool etílico absoluto. O ensaio de ultra-microdureza foi realizado no ultra-microdurômetro DUH 211 da Shimadzu. Foi utilizado penetrador Berkovich, com regime de carregamento-descarregamento, carga de carregamento de 5 mN.s-1 e com carga máxima de 50 mN. Os valores de dureza e módulo de indentação foram fornecidos pelo próprio software do equipamento. Foram realizadas 50 marcas de indentação, espaçadas a 50 μm . Todos os dados provenientes das curvas de indentação irregulares não foram utilizados para o cálculo dos valores médios. Do total das 50 marcas, pelo menos 25 estiveram localizadas no C-S-H.

A caracterização por microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada em um equipamento JEOL modelo JSM – 6510, com tensão aplicada de 10 kV e distância de trabalho de 10 mm. As amostras foram recobertas com ouro pelo método de sputtering em um

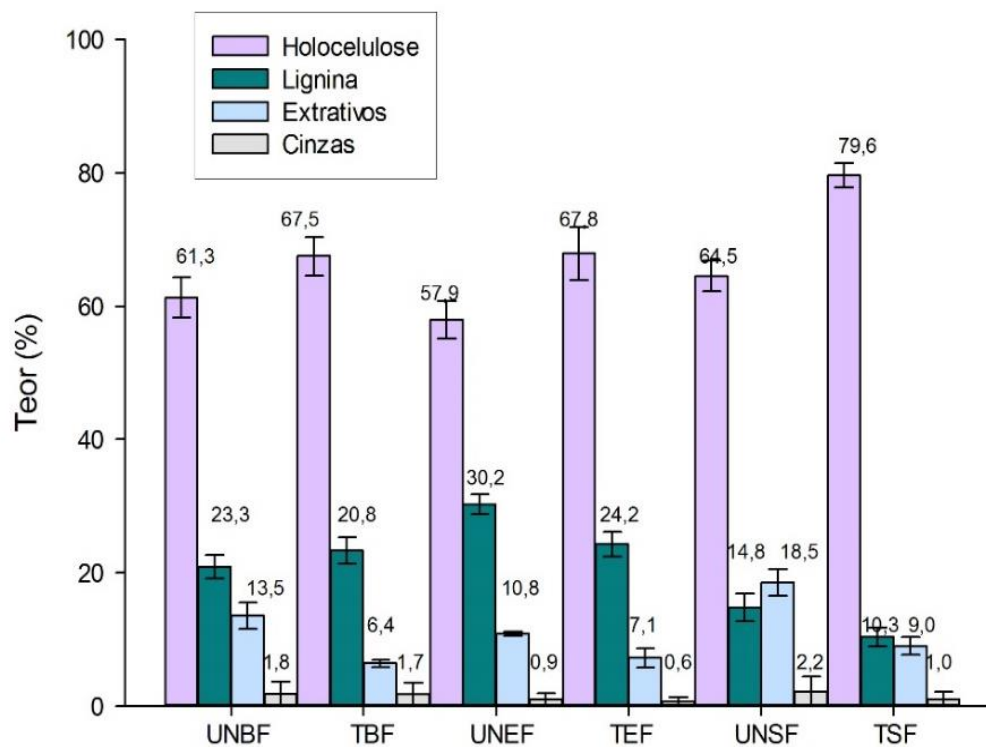
equipamento da marca Leica, para os ensaios. As análises foram realizadas na superfície de ruptura das placas que foram ensaiadas por flexão estática. Essa observação teve por objetivo avaliar o efeito das fibras na argamassa cimentícia nas propriedades físico-mecânicas e a influência na interface fibra/matriz

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Composição química e propriedade física da fibra

Na Figura 4 está apresentada a composição química das fibras *in natura* e tratadas. O tratamento promoveu extração parcial de lignina, extrativos totais e cinzas, e ainda um aumento de holocelulose. Nesse caso, houve a redução de 10, 19 e 30% de lignina nas fibras tratadas de bananeira, eucalipto e sisal, respectivamente. Com relação os extrativos totais, esses teores foram de 30, 33 e 51%, respectivamente. Além disso, tem-se um aumento na quantidade de holocelulose, sendo a fibra tratada com sisal a que apresentou o maior teor deste composto.

Figura 4 – Composição química fibras não tratadas e tratadas



Fonte: Do autor (2023).

A fibra de sisal *in natura* apresentou o maior valor médio para extrativos, após o tratamento alcalino houve uma redução superior a 50%. A fibra de eucalipto apresentou o maior valor médio para lignina e o menor valor médio para cinzas. Os extrativos presentes nas fibras vegetais podem interferir no tempo de pega e hidratação do cimento, e como consequência prejudicar a resistência mecânica dos compósitos (CHAFEI, 2014; SELLAMI, 2013), além disso, uma menor concentração de extrativos pode beneficiar a interação fibra/matriz.

Foram encontrados resultados distintos na pesquisa de Teixeira *et al.*, (2018) de componentes extrativos, lignina e holocelulose presentes nas fibras de bananeira, sendo eles 18,60, 15,70, 51,90%, respectivamente. Ainda foram encontrados valores para as fibras de eucalipto sendo 9,36, 22,74 e 67,68%. Vale a pena ressaltar que os valores podem estar relacionados às condições de cultivo das fibras vegetais como solo, região e idade da planta.

A celulose é o principal componente das fibras vegetais tratadas e não tratadas. Além disso, as fibras tratadas apresentaram um aumento de cerca de 18% no teor de holocelulose, após removida a lignina em relação às fibras tratadas. Este resultado pode ser explicado pela remoção de componentes remanescentes durante a mercerização. Sabendo que a celulose é o composto responsável pelas propriedades mecânicas das fibras, o aumento dela pode ser um indicativo de maiores propriedades mecânicas dos compósitos reforçados por fibras vegetais tratadas em comparação aos compósitos reforçados por fibras sem tratamento (WEI, MEYER.,2015; BALLESTEROS *et al.*, 2021).

Na condição tratada, as fibras de bananeira e sisal apresentaram uma densidade básica cerca de 4,5 e 5,6%, respectivamente maior que das fibras não tratadas (Tabela 2). As fibras de eucalipto apresentaram um comportamento inverso para os valores de densidade, sendo reduzida cerca de 4,2% com o tratamento alcalino.

Tabela 2 – Propriedades físicas das fibras.

Material de reforço	Diâmetro	Comprimento	Densidade	Umidade
Fibra lignocelulósica	(mm)	(mm)	(g/cm³)	(%)
Bananeira <i>in natura</i>	0,10 – 0,56	4,0 – 30	1,26	15,49
Bananeira tratada	0,10 – 0,25	6,0 – 30	1,32	12,02
Eucalipto <i>in natura</i>	0,14	8,5	1,42	9,65
Eucalipto tratada	0,15	9,2	1,36	7,16
Sisal <i>in natura</i>	0,30	10,69	1,35	10,46
Sisal tratado	0,25	11,61	1,43	6,47

Fonte: Do autor (2023).

Foram encontrados valores semelhantes na literatura para densidade das fibras de bananeira e sisal *in natura* e tratadas com hidróxido de sódio que variou de 1,22 a 1,44g/cm³ e 1,33 a 1,55g/cm³, respectivamente (GONÇALVES *et al* 2015; VARDHINI *et al*, 2016; BALAJI *et al*. 2019). Os parâmetros de comprimento e diâmetro médio são compatíveis com os valores encontrados por outros autores que estudaram o uso de fibras naturais em matrizes cimentícias (VARDHINI *et al.*, 2016; FERREIRA *et al.*, 2018; MANSILLA *et al*, 2020; PICKERING *et al* 2016; PRAMOD *et al.*, 2020; AZEVEDO *et al*, 2021).

No que se refere aos parâmetros relacionados as características das fibras vegetais, o teor de umidade das fibras, assim como a densidade contribui de forma a influenciar nas propriedades físicas e mecânicas do compósito cimentício. Sendo assim, foi observado os resultados da Tabela 2 que as fibras de bananeira, eucalipto e sisal *in natura* reduziu o teor de umidade de 22%, 26% e 38%, respectivamente quando submetido ao tratamento alcalino. Estes valores estão em concordância com os valores reportados na literatura (VARDHINI *et al.*, 2016; SENTHILKUMAR *et al.*, 2018; BALAJI *et al.*, 2019). As fibras de sisal tratadas apresentaram uma redução de absorção de água em comparação a fibra não tratada, o teor de umidade na fibra foi reduzido em 18% para fibra tratada com NaOH (CASTOLDI *et al.*, 2022).

Analisando os dados da tabela 2, é possível identificar a eficiência do tratamento com NaOH realizado na fibra. Verifica-se que as densidades das fibras de bananeira e sisal aumentaram, com exceção da fibra de eucalipto. Isso pode indicar o aumento na superfície específica do material. Vale ressaltar que as fibras tratadas não têm seu tamanho reduzido, visto que o aumento da superfície específica é atribuído ao efeito que o tratamento tem, aumentando a porosidade e a rugosidade, e assim criando pontes de adesão, necessárias para aumentar efetivamente a resistência do compósito cimentício (AZEVEDO *et al.*, 2021).

Ressalta-se que, sem o tratamento proposto, as fibras estariam dispersas na matriz cimentícia, atuando apenas como carga. No entanto, após o tratamento, devido principalmente a melhoria das propriedades físicas das fibras, elas funcionaram como pontes de transferência de tensão, contribuindo significativamente para o aumento da resistência mecânica dos compósitos (AZEVEDO *et al.*, 2021).

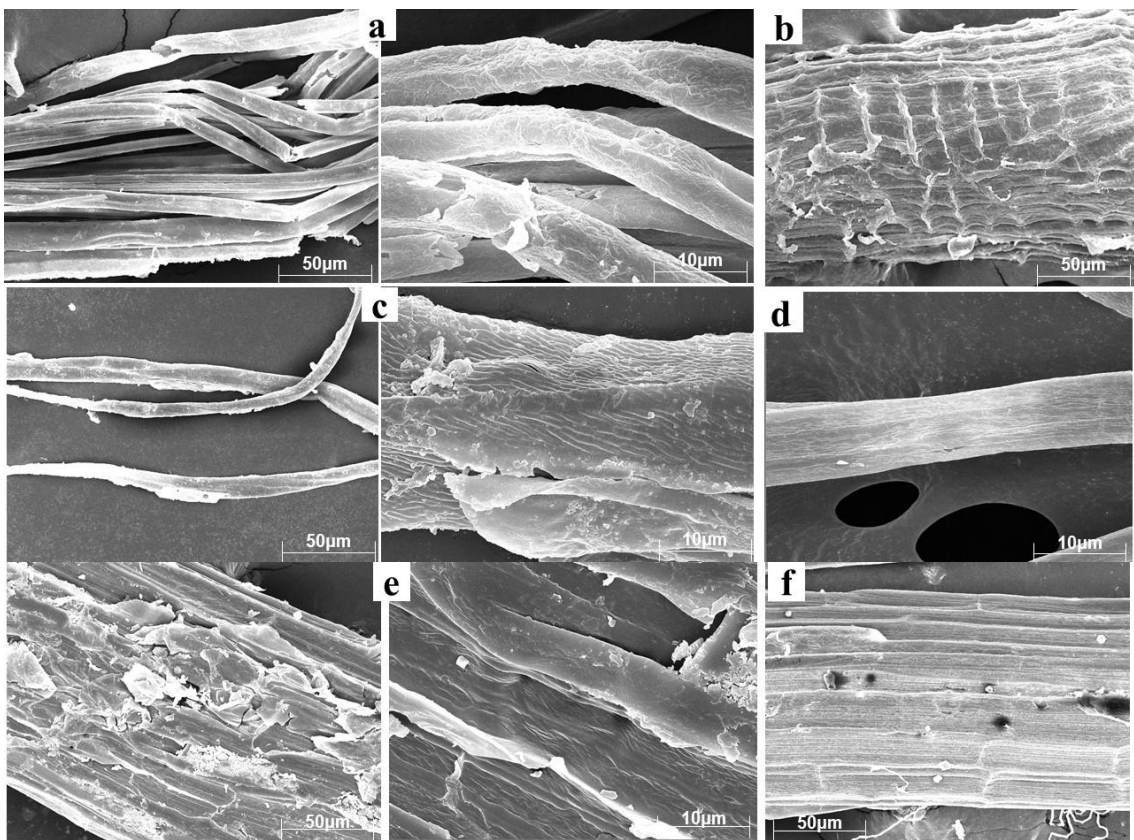
3.2 Análise microestrutural das fibras

As superfícies das fibras de bananeira *in natura* se apresentaram com aspecto liso (Figura 5a), após tratamento alcalino se mostrou com aspecto rugoso (Figura 5b). Conforme

Gonçalves *et al.* (2020), as fibras de bananeira geralmente apresentam uma superfície rugosa, comportamento comum das fibras vegetais que possuem alto teor de celulose.

As fibras de eucalipto e sisal *in natura* apresentadas nas (Figuras 5c e 5e) tinham suas superfícies recobertas por impurezas. Mediante o tratamento alcalino realizado, as fibras se apresentaram com as superfícies limpas e continham discreta presença de poros (Figuras 5d e 5f).

Figura 5 – Micrografias de superfície de fibra natural de bananeira (a); tratado (b); fibra natural de eucalipto (c); tratado (d); fibra de sisal natural (e) e tratada (f).



Fonte: Do autor (2023).

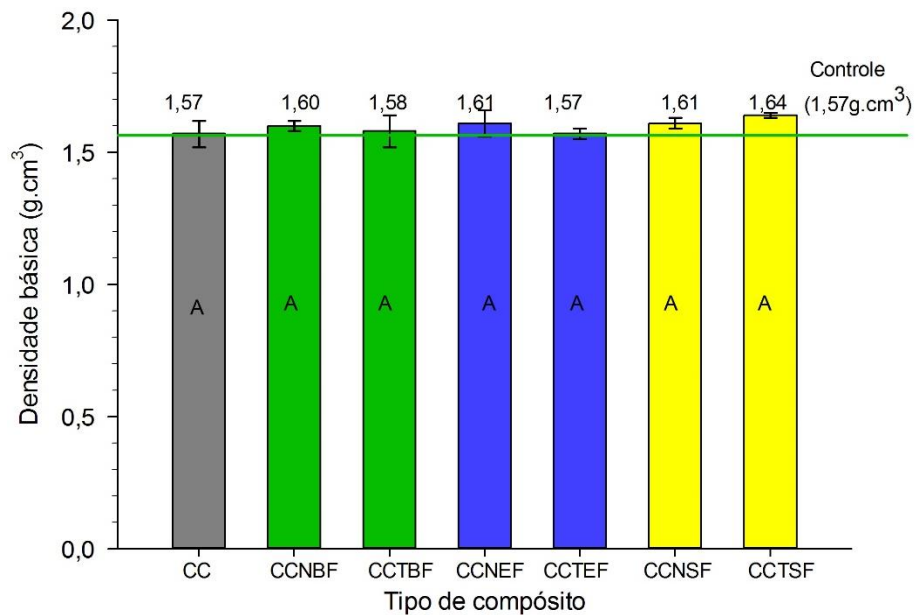
De acordo com Tian *et al.* (2016) e Sepe (2018), o principal constituinte das fibras naturais é a celulose cristalina, além de conter hemicelulose, lignina e substâncias cerosas. No entanto, a lignina e a hemicelulose podem se degradar com o tempo, e talvez por isso, alguns tipos de fibras podem apresentar superfície rugosa. Ainda os autores observaram que o tratamento alcalino pode remover a parte amorfa presente nas fibras, ou seja, ceras, hemiceluloses e pectinas. Porém, alguns tipos de fibras podem apresentar superfícies limpas e poros.

Sydenstricker *et al.* (2003), observaram que as fibras de sisal tratadas com concentração de 1 e 2% em peso de NaOH tornou o sisal mais liso, e os tratamentos com 5 e 10% em peso de alcalino tornaram o sisal mais áspero, enquanto o tratamento com 0,25 e 0,5% em peso de NaOH não teve nenhum efeito aparente sobre a fibra.

3.3 Propriedades físicas do compósito

Os compósitos produzidos com fibras de eucalipto, bananeira e sisal após 28 dias de cura não apresentaram alteração significativa da densidade quando comparada ao compósito de referência (Figura 6). É possível observar que a densidade básica ficou em torno de 1,64 g/cm³, não havendo uma variação tão considerável de seus valores.

Figura 6 – Valores médios encontrados para a densidade aparente das amostras



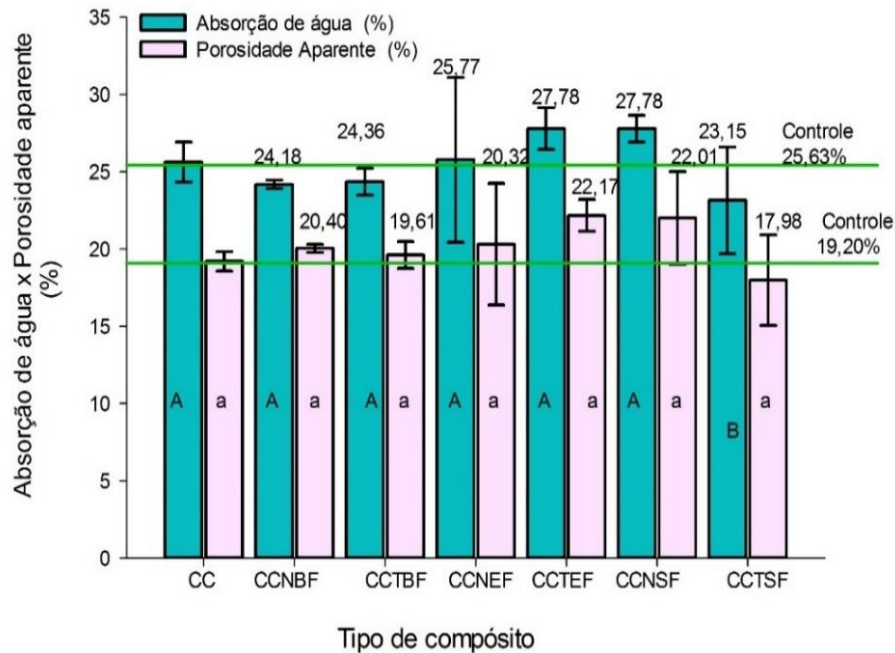
Legenda: *Propriedades seguidas por letras diferentes foram diferentes de acordo com o teste de Scott-Knott (5% de significância).

Fonte: Do autor (2023).

De acordo com a Figura 7, os compósitos cimentícios reforçados com fibras tratadas de bananeira mostraram um discreto aumento (0,74%) de absorção de água, já para fibras de eucalipto um aumento de 7,2%. Para os compósitos com fibras de sisal tratadas tiveram uma redução de 16,6% de absorção de água. A porosidade dos compósitos reforçados com fibras tratadas de bananeira e sisal apresentaram uma redução de 3,8 e 18,3%, respectivamente. Além disso, foi possível observar que as propriedades de absorção de água e porosidade estão

diretamente relacionadas com a densidade dos compósitos. Teixeira *et al.* (2018) e Bahja *et al.* (2021) investigaram o efeito das fibras de bananeira, eucalipto e sisal *in natura* como reforço nos compósitos cimentícios e observaram que as propriedades densidade aumentaram e a absorção de água e porosidade reduziram.

Figura 7 - Valores médios encontrados para absorção de água e porosidade das argamassas reforçada com fibras não tratadas e tratadas.



Legenda: *Propriedades seguidas por letras diferentes foram diferentes de acordo com o teste de Scott-Knott (5% de significância).

Fonte: Do autor (2023).

O comportamento inverso é observado para os compósitos de fibras de eucalipto tratadas que tiveram aumento para absorção de água e porosidade em comparação com as amostras reforçadas com fibras *in natura*. Resultados semelhantes são encontrados na pesquisa de Ballesteros *et al.* (2021) com o compósito cimentício contendo fibra tratada de eucalipto que teve redução dos valores de densidade e aumento de absorção de água e porosidade. Esse resultado pode estar relacionado ao alto teor de extrativo que a fibra possui e provoca aumento da demanda de água e conseqüentemente o aumento da porosidade. A capacidade de absorção de água pelos compósitos está associada à sua porosidade e a presença de fibras vegetais (RAABE *et al.*, 2022).

Ao avaliar os valores de AA, PA e DB obtidos pelos compósitos não tratados e tratados não foram encontradas variações estatisticamente significativas.

3.4 Resistência à flexão dos compósitos

As amostras de argamassa com fibras tratadas de sisal, banana e eucalipto apresentaram valores de módulo de ruptura (MOR) de 2,24, 2,90 e 3,39MPa, respectivamente, conforme apresentado na Figura 8. Os compósitos com fibras não tratadas e tratadas ficaram acima da faixa da amostra de controle de 1,32 MPa para MOR e o limite de proporcionalidade (LOP).

Assim, as utilizações dessas fibras são capazes de melhorar tanto a resistência à flexão como a tenacidade dos compósitos cimentícios. Porém, ao avaliar a influência do compósito reforçado com eucalipto, percebeu-se que MOR teve valor maior para os compósitos com reforço de fibras não tratadas. Apesar de todas as vantagens oferecidas pelo tratamento alcalino, ele pode causar efeito colateral que é a aglomeração devido ao processo de desfibrilação da fibra, pode ser que tenha ocorrido com as fibras de eucalipto (JAAFAR *et al.*, 2019).

Os compósitos com fibras de sisal *in natura* e tratadas (1,65 e 2,24 MPa) apresentaram valores mais baixos de MOR. A orientação aleatória das fibras de sisal tem impacto na redução das propriedades. Isso possivelmente pode ter ocorrido devido ao tamanho da fibra, pois dificulta o alinhamento e acomodação, e aumenta a tendência à desorientação no interior do compósito causando a aglomeração, além de outros fatores.

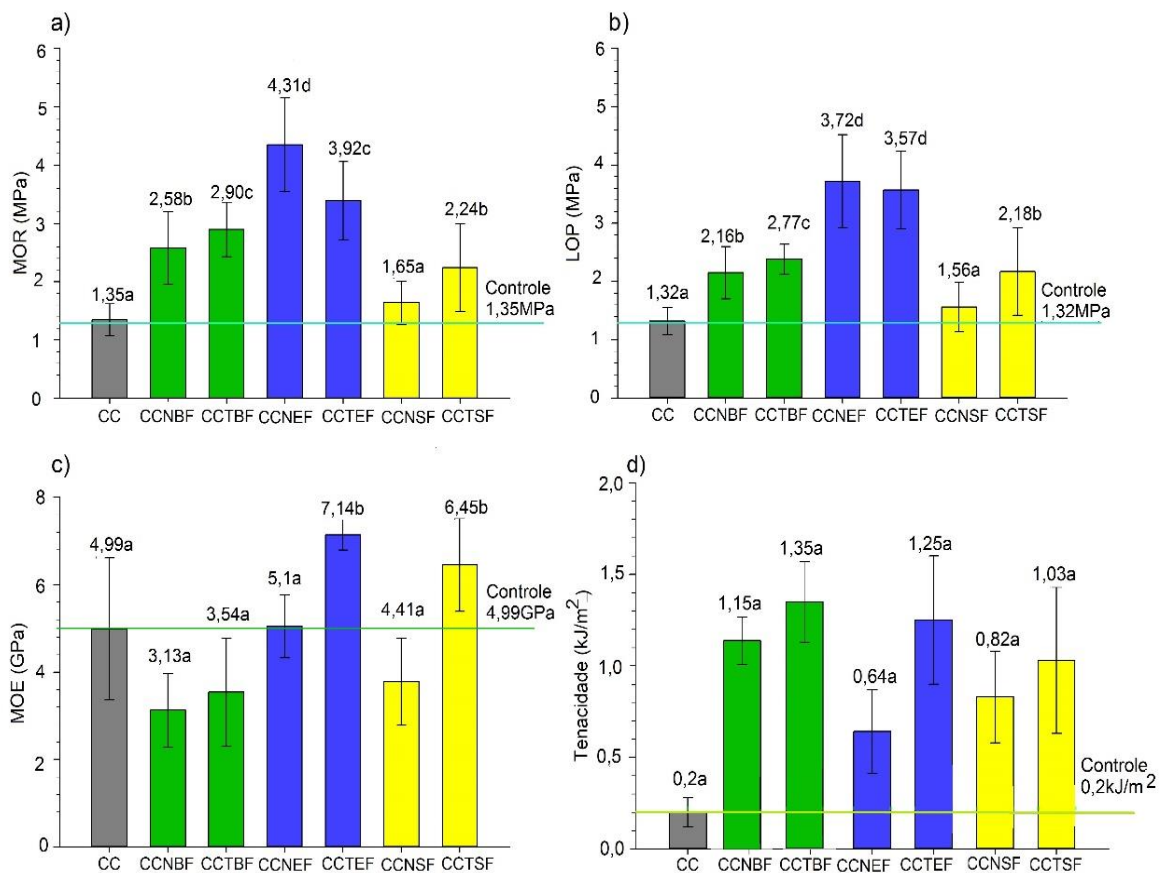
Ainda Jaafar *et al.* (2019) deduzem em seu artigo que as técnicas utilizadas têm influência significativa nas propriedades mecânicas dos compósitos, principalmente de processamento de fibra que envolvem três etapas como remoção da umidade da matéria-prima, o processo de mistura entre a fibra/matriz e a moldagem da amostra. Outro fator essencial na fabricação de compósitos são os parâmetros utilizados na técnica de processamento, sendo a dosagem dos materiais, duração da mistura e a moldagem utilizada são os fatores dominantes que influenciam o desempenho final dos compósitos.

Todos os compósitos contendo fibras apresentaram maiores valores para MOR e LOP quando comparado com amostra de referência. Valores mais altos de MOR foram atribuídos à capacidade dos compósitos com fibras de se ligarem à matriz, isso indica a distribuição de tensões e a interação entre a fibra/matriz, além da resistência à tração (FONSECA *et al.*, 2021).

Pode-se notar que há um aumento no valor do módulo de Young da argamassa com adição de fibras tratadas de bananeira, eucalipto e sisal de 16, 29 e 69%, respectivamente. Ao contrário, esse valor aumentou consideravelmente para argamassa de referência de 29%

quando comparado as fibras de sisal e bananeira não tratadas. Outros fatores que influenciam o módulo de Young das argamassas são endurecimento, idade, tipo de agregado e relação água-cimento. O aumento do módulo de elasticidade aumenta a capacidade do compósito de absorver choques (BAHJA *et al.*, 2021).

Figura 8 – Propriedades mecânicas de compósito cimentício com 28 dias de cura: a) módulo de ruptura, b) limite de proporcionalidade, c) módulo de elasticidade e d) tenacidade



Legenda: *Propriedades seguidas por letras diferentes foram diferentes de acordo com o teste de Scott-Knott (5% de significância).

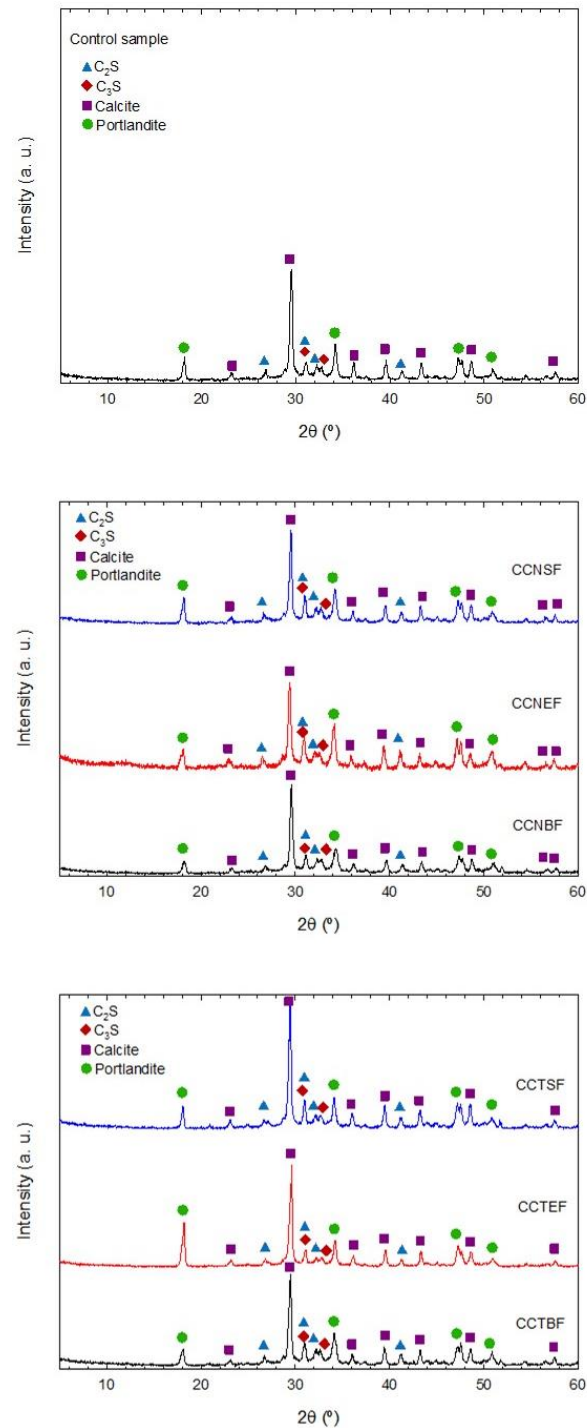
Fonte: Do autor (2023).

Por fim, as compósitos reforçadas com fibras apresentam um valor de tenacidade 7 vezes maior em relação a amostra sem fibras. De acordo com esses resultados, pode-se concluir que o uso de fibras *in natura* e principalmente as tratadas podem ser usadas para melhorar as propriedades mecânicas dos compósitos cimentícios. Observa-se que os compósitos com fibras apresentam maiores valores de MOR, LOP e MOE, com variação estatística para todos os casos.

3.5 Microestrutura dos compósitos cimentícios

Os difratogramas dos compósitos cimentícios estão apresentados na Figura 9. Em todas as amostras foi possível observar picos referentes ao hidróxido de cálcio ($18,1^\circ$ e $34,6^\circ$), calcita ($29,5^\circ$) e cimento anidro.

Figura 9 – Difratogramas de raio –X das amostras.

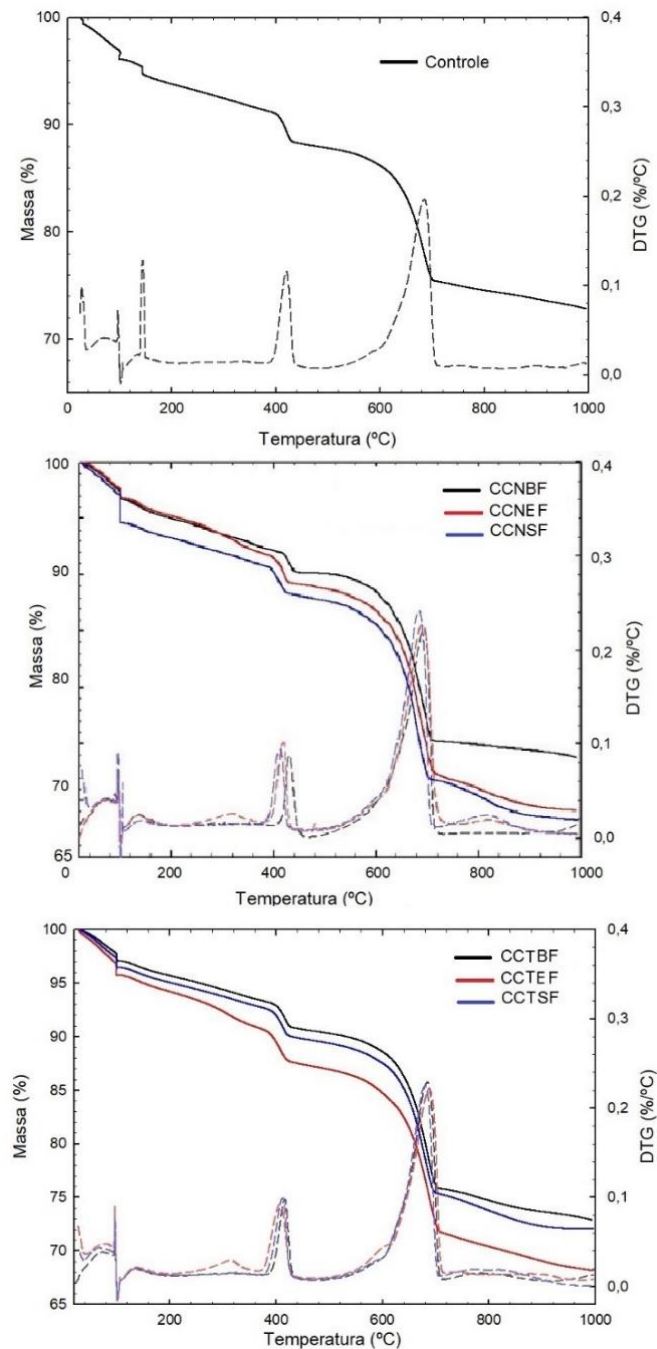


Fonte: Do autor (2023).

Comparando os difratogramas da amostra controle, com as amostras com fibras vegetais in natura ou tratadas foi verificado que os compostos cristalinos presentes em todas as amostras são iguais.

Além disso, o tratamento alcalino das fibras não alterou consideravelmente os padrões de difração. A única alteração está relacionada com um leve aumento dos picos de hidróxido de cálcio nas amostras com fibras tratadas. Isso também foi observado nos trabalhos de Wei e Meyer (2017) e Raabe *et al.* (2022).

Figura 10 – Curvas TG e DTG para os compósitos cimentícios



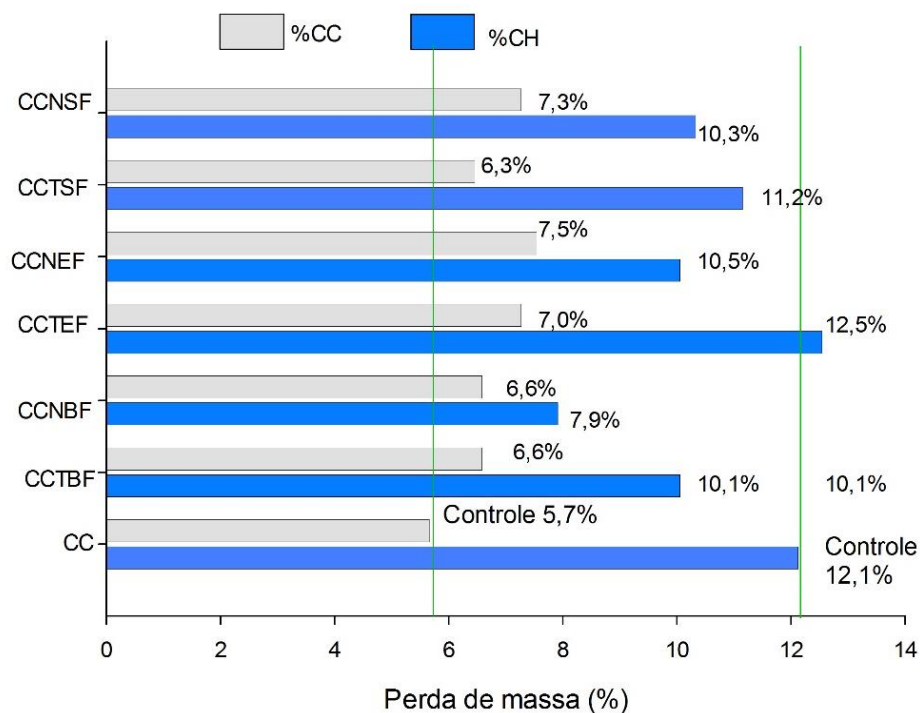
Fonte: Do autor (2023).

Além disso, esses picos são visualmente maiores nas amostras com fibras de eucalipto. A primeira região de perda de massa (25 a 100 °C) está relacionada com a perda de água relacionada a água livre presente nas fibras vegetais e na matriz cimentícia mostrado na Figura 10.

A perda de massa entre 390 e 455 °C corresponde a decomposição do hidróxido de cálcio (CH) ao passo que a perda de massa entre 445 e 710 °C é atribuída a decomposição do carbonato de cálcio (FILHO; SILVA; TOLEDO, 2013). Observa-se perda de massa mais significativa de água livre nos compósitos com fibra *in natura* de sisal e com fibra tratada de eucalipto.

A quantidade de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio determinados por cálculos estequiométricos estão apresentados na Figura 11. Observa-se que a quantidade de hidróxido de cálcio formado nos compósitos com fibras de sisal CCNSF e CCTSF e no compósito com fibra *in natura* de eucalipto CCNEF são bem próximos. Além disso, a quantidade de hidróxido de cálcio formado na amostra controle foi maior do que as amostras com fibra, mesmo com quantidade maior de água. Além disso, observa-se aumento da quantidade de hidróxido de cálcio nas amostras com tratamento alcalino. A única amostra que apresentou quantidade maior de hidróxido de cálcio do que a amostra controle foi argamassa com fibra tratada de eucalipto.

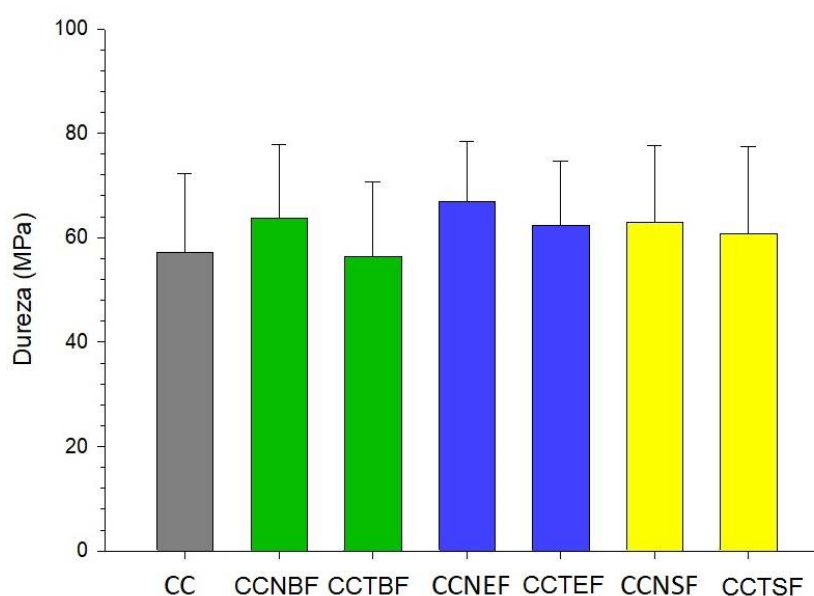
Figura 11 – Massa de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio



Fonte: Do autor (2023).

Na Figura 12 estão apresentados os valores de dureza da região correspondente ao C-S-H. O desvio alto é por causa dos diferentes tipos de C-S-H que pode haver em um mesmo compósito cimentício. A carga de utilização não foi suficiente para fazer a distinção entre C-S-H de baixa ou alta densidade. Pela complexidade do C-S-H, pode-se dizer que praticamente não houve muita alteração no C-S-H por causa da inserção das fibras na argamassa cimentícia. Isso acontece, pois, apenas as adições das fibras não é suficiente para provocar a alteração da relação Ca/Si como acontece nas reações pozolânicas ou tratamento térmicos de compósitos cimentícios.

Figura 12 – Valores médios da dureza das amostras de argamassas cimentícias reforçadas com fibras *in natura* e tratadas.



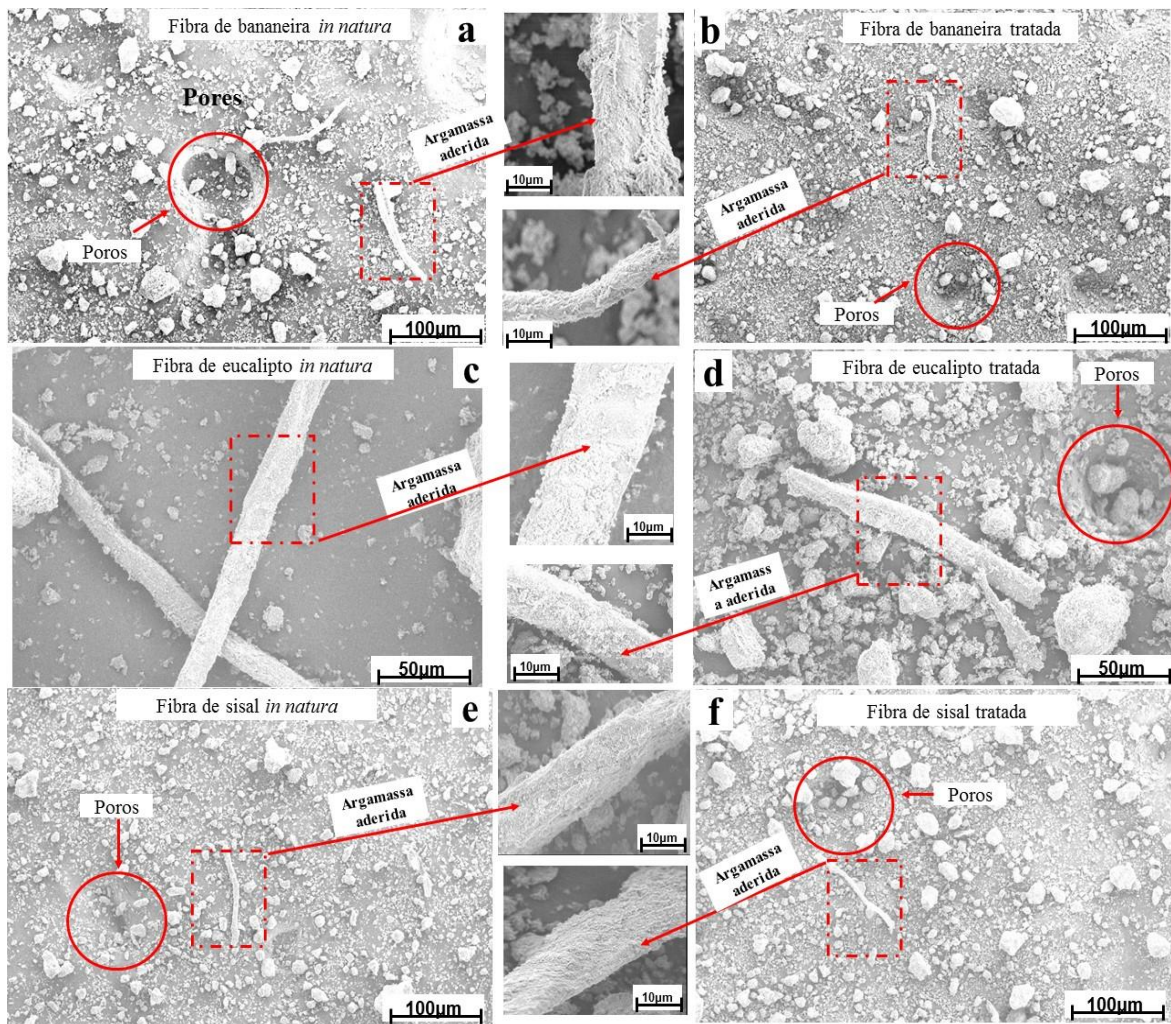
Fonte: Do autor (2023).

De acordo com as imagens de microscopia eletrônica de varredura. Apresentada na Figura 13 foi possível verificar que partes das fibras estão livres de argamassa, apresentando uma superfície lisa e sem capacidade para interagir com a matriz cimentícia. Nesta análise, pode-se observar que o tratamento superficial nas fibras foi eficiente para melhorar a interação com a matriz cimentícia.

Isso pode ser confirmado através de estudos realizados por Raabe *et al.* (2022), pois as superfícies rugosas permitem maior adesão interfacial entre o reforço e a matriz, o que pode levar a maior resistência mecânica. E elas tendem a apresentar melhor dispersão na matriz

cimentícia e, conseqüentemente, podem permitir maior aderência entre a matriz e melhor desempenho do reforço quando forças externas foram transferidas para o compósito.

Figura 13 – Micrografias de superfície de compósito de cimento de fibras de bananeira *in natura* (a); tratado (b); eucalipto *in natura* (c); tratado (d); sisal *in natura* (e) e tratado (f).



Fonte: Do autor (2023).

Ainda ao comparar as micrografias dos compósitos contendo fibras de bananeira e sisal tratadas e com as amostras de fibras *in natura*, pode-se observar que o uso de fibras tratadas como reforço permitiu maior adensamento da matriz, indicado pela presença de poros menos abertos (Figuras 12b e 12f). De fato, a imagem MEV de compósitos contendo fibras não tratadas (Figuras 12a e 12e) apresentaram maiores poros em comparação aos compósitos com reforço tratado (Figuras 12b e 12f). Para os compósitos com fibras de eucalipto *in natura* não foi observado a presença de poros (Figura 12c) em comparação aos compósitos com reforço tratado que apresentaram poros (Figura 12d). Esse resultado é compatível com o

aumento de AA e PA observada na Figura 7, bem como a melhora do desempenho mecânico quando comparado as amostras com fibras tratadas.

4 DISCUSSÃO

O tratamento químico de solução de hidróxido de sódio diminuiu tanto a quantidade de lignina como a quantidade de extrativos totais nos três tipos de fibras utilizados neste trabalho. Consequentemente, a quantidade de holocelulose aumentou. As amostras de fibras de eucalipto tratadas tiveram aumento de absorção de água comparando as outras amostras. Segundo Filho *et al.* (2013); Ballesteros *et al.* (2021) e Wei, Meyer (2017), a capacidade de absorção de água provoca alterações dimensionais na fibra, o que consequentemente leva a um enfraquecimento da interação fibra-matriz. O mecanismo de degradação consiste na mineralização das paredes celulares das fibras, hidrólise alcalina da lignina e da hemicelulose, bem como a decomposição da celulose. Isso explica a redução na absorção de água dos compósitos reforçados com fibras tratadas, retirando parcialmente as impurezas, lignina e hemicelulose, uma vez que boa adesão fibra/matriz também pode diminuir a razão e quantidade de água absorvida pelo compósito cimentício.

Percebe-se que a absorção de água nem sempre está diretamente relacionada a porosidade (ZWAWI, 2021). Nesse caso, um compósito com fibras vegetais (com grande número de vazios devido ao ar incorporado) pode apresentar uma alta porosidade e uma baixa absorção de água. Portanto, a redução da absorção de água entre as fibras *in natura* para as tratadas confirma que o tratamento foi eficiente para melhorar aderência das fibras/matriz. Uma interface fibra/matriz ruim resulta em propriedades mecânicas e físicas reduzidas. A natureza hidrofílica da fibra é uma razão para interfaces fraca, o que leva a uma má dispersão da fibra em uma matriz. O material da matriz hidrofóbica e as fibras hidrofílicas são incompatíveis, o que reduz a capacidade do compósito de transferência de tensão entre a matriz e a fibra conforme relatado por Manikandan *et al.* (2017) e Zwawi (2021).

O aumento da resistência à flexão dos compósitos produzidos com fibras tratadas pode ser explicado pela alteração das fibras. De acordo com Lam; Yatim (2015). O tratamento alcalino modifica a superfície das fibras vegetais, resultando em uma superfície mais rugosas, melhorando a adesão entre a matriz cimentícia com a fibra vegetal. A aderência também é melhorada pela diminuição da quantidade de extrativos e cinzas (CEFERINO *et al.*, 2017; ONUAGULUCHI; BANTHIA, 2016). Além disso, a diminuição da quantidade de lignina e

hemicelulose deixam o compósito mais durável e com melhor resistência à tração. Isso, pois, de acordo com Toledo Filho *et al.* (2000), a dissolução da lignina e hemicelulose em solução alcalina nos poros e a hidrólise alcalina das moléculas de celulose são os principais responsáveis pela redução da resistência à tração e envelhecimento das fibras naturais na matriz cimentícia. Por fim, Wei e Meye (2017) cita que a celulose é a responsável por dar estabilidade e resistência à fibra.

Com relação a fibra de eucalipto, não era esperado a redução de MOR das fibras tratadas, isso pode ter ocorrido devido uma maior absorção de água das fibras, e assim promoveu o inchamento delas causando a perda de aderência com a matriz cimentícia. Além disso, o compósito com fibra de eucalipto tratada apresentou maior quantidade de hidróxido de cálcio formado, até mesmo em relação a amostra controle. A cristalização de produtos hidratados no lúmen, paredes e vazios da fibra promovem a perda de flexibilidade da fibra e comprometendo o comportamento mecânico do compósito (FILHO *et al.*, 2013).

Comparando as propriedades mecânicas das amostras com fibras tratadas com não tratadas, a queda da resistência pode ter acontecido por causa da baixa trabalhabilidade das amostras com reforço sem tratamento causando maiores números de defeitos. Possivelmente, as fibras ficaram aglomeradas no interior da matriz, e assim aumentaram a presença de poros. Esse mesmo comportamento também foi descrito por Bahja *et al.* (2021), ao estudar a resistência a compressão das argamassas com adição da fibra de sisal, percebeu a má distribuição das fibras no interior da argamassa que ocasionou um grande número de poros ou vazios. Isso aconteceu por causa da redução das propriedades adesivas entre a superfície da fibra e a matriz cimentícia e; o que provocou o aparecimento de fissuras reduzindo assim a resistência à compressão.

Os compósitos de fibras de sisal apresentaram baixo MOR e LOP comparado as demais fibras, isso pode ter ocorrido devido a sua má distribuição no compósito no estado fresco, fibras longas tem a tendência de desorientar e aglomerar, e assim contribuindo para baixa resistência do compósito.

A diferença entre o comportamento dos compósitos ocorreu pela inclusão das diferentes espécies de fibras vegetais. Levando em consideração que os parâmetros das fibras como componentes químicos, geometria, dosagem, orientação e distribuição dentro da matriz, propriedades mecânicas e interação com a matriz podem contribuir para melhorias das propriedades do compósito no estado endurecido.

5 CONCLUSÃO

O tratamento superficial realizado nas fibras de bananeira, sisal e eucalipto foi eficaz na extração de constituintes para produção de argamassa cimentícia. Este tratamento melhorou a densidade aparente, a porosidade, redução de absorção de água e o desempenho mecânico do compósito de cimento reforçado com fibras tratadas quando comparado com compósito com fibras *in natura*. A partir deste estudo experimental, o podem ser feitos os seguintes comentários:

- Conforme os resultados da composição química nas fibras de bananeira, eucalipto e sisal, o tratamento químico com a solução de 5% hidróxido de sódio (NaOH) foi eficiente para reduzir o teor de lignina e extrair impurezas.
- Além disso, o tratamento químico foi eficiente no aumento de rugosidade superficial das fibras. O tratamento superficial nas fibras reduziu a capacidade de absorção de água e a porosidade das fibras de bananeira e sisal, porém, estas aumentaram na fibra com eucalipto. A redução de MOR dos compósitos de fibras eucalipto tratadas pode ter ocorrido devido uma maior absorção de água das fibras, e assim promoveu o inchamento delas causando a perda de aderência com a matriz cimentícia.
- Os compósitos contendo fibras apresentaram melhores resistência à flexão e tenacidade que o compósito sem fibras. Além disso, o tratamento químico das fibras de banana e sisal sem mostrou eficiente para melhorar o comportamento mecânico do compósito.
- Os resultados mostram que o tratamento alcalino das fibras não afeta o processo de hidratação do cimento, não havendo alteração significativa na composição mineralógica, e na quantidade de fases formadas e nem no comportamento mecânico do silicato de cálcio hidratado.

REFERÊNCIA

ABIOLA, O.S. Natural fibre cement composites. **Advanced High Strength Natural Fibre Composites in Construction**, p. 205-214, 2017.

ALDAMA, G. E. *et al.* Rheological behaviour of cement paste added with natural fibres. **Construct. Build. Mater.** v. 198 p.148–157, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS—**ASTM C 948-81**: Test method for dry and wet bulk density, water absorption, and apparent porosity of thin sections of glass-fiber reinforced concrete. West Conshohocken. 2 p (2001).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7989**: Pasta celulósica e madeira: determinação de lignina insolúvel em ácido. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 107 p. 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: cimento Portland de alta resistência inicial, especificação. Rio de Janeiro, Brasil, 5p., 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941-02** - Determinação da densidade básica em madeira. Rio de Janeiro, 6p., 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13999**: Papel, cartão, pastas celulósicas e madeira: determinação do resíduo (cinza) após a incineração a 525°C. Rio de Janeiro, 2003b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14853**: Madeira: determinação do material solúvel em etanol-tolueno e em diclorometano e em acetona. Rio de Janeiro, 2010.

AZEVEDO, A. R. G. Technological Perspective for Use the Natural Pineapple Fiber in Mortar to Repair Structures. **Waste and Biomass Valorization**, 2021.

BAHJA, B.; ELOUAFI, A.; TIZLIOUINE, A.; OMARI, L.H. Morphological and structural analysis of treated sisal fibers and their impact on mechanical properties in cementitious composites. **Journal of building engineering**, v. 34, p. 1-9, 2021.

BALAJI, A. *et al.* Study on mechanical and morphological properties of sisal/banana/coir fiber-reinforced hybrid polymer composites. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 41, p. 1-10, 2019.

BALLESTEROS, J.E. M. *et al.* Influence of the fiber treatment and matrix modification on the durability of eucalyptus fiber reinforced composites. **Construction and building materials**, v. 4, p.1-10, 2021.

BEHERA, P.; NOMAN, M. T.; PETRÚ, M. Enhanced Mechanical Properties of Eucalyptus-Basalt-Based Hybrid-Reinforced Cement Composites. **Polymers**, v.12, p. 1-15, 2020.

CASTOLDI, R. *et al.* Effect of alkali treatment on physical–chemical properties of sisal fibers and adhesion towards cement-based matrices. **Construction and Building Materials**, v. 345, 2022.

CEFERINO, G. ES. URREA. Definition of optimal parameters for supercritical carbonation treatment of vegetable fiber-cement composites at a very early age. **Construction and Building Materials**, v.152, p. 424–433, 2017.

CHAFEI, S., *et al.* Optimizing the formulation of fax fiberreinforced cement composites. **Constr. Build. Mater.** v.54, p.59–64, 2014.

CHANDRASEKAR, M. et al. A review on the characterisation of natural fibres and their composites after alkali treatment and water absorption. **Plastics, rubber and composites**, v. 46, n. 3, 119–136, 2017.

CUEBAS, L. *et al.* The incorporation of untreated and alkali-treated banana fiber in SEBS composites, **Polímeros**, v.30, p.1-9, 2020.

DAYO, A. Q. *et al.* The influence of different chemical treatments on the hemp fiber/polybenzoxazine based green composites: Mechanical, thermal and water absorption properties. **Mater. Chem. Phys**, v. 217, p. 270–277, 2018.

ELBEHIRY, A.; MOSTAFA, M. Finite Element Analysis of Beams Reinforced with Banana Fiber Bars (BFB). **Fibers**, v. 8, n.54, 2020.

EUROPEAN STANDARDS. **EN 1015-11:2019**. Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. CEN, Brussels (BE), 2019.

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

FONSECA, C.S et al. Jute fibers and micro/nanofibrils as reinforcement in extruded fiber-cement composites. **Construction and Building Materials**, v. 211, p.517-527, 2019.

FONSECA, R. P., ROCHA, J. C., CHERIAF, M. Mechanical properties of mortars reinforced with Amazon rainforest natural fibers. **Materials**, v.14, n.1, 2021.

GHAFFAR, S.H. Straw fibre-based construction materials. **Advanced High Strength Natural Fibre Composites in Construction**, p. 205-214,2017.

GUO, AOFEI. *et al.* Impact of modified kenaf fibers on shrinkage and cracking of cement pastes. **Construction and Building Materials**, v. 264, 2020.

GONÇALVES, A. P. B. et al. Physicochemical, Mechanical and Morphologic Characterization of Purple Banana Fibers. **Materials Research**, v.18, p. 205-209, 2015.

ILDIKO, M. B.; K. POLETANOVIC.; KOPECSKO. Durability of natural fibres within cement based materials- review, **Concr. Struct. Fib. J**, v.18, 2017.

JAAFAR, J. *et al.* Important Considerations in Manufacturing of Natural Fiber Composites: A Review. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology**, v. 6, p.647–664, 2019.

JURADIN.S. *et al.* Influence of harvesting time and maceration method of Spanish Broom (*Spartium junceum* L.) fibers on mechanical properties of reinforced cement mortar, **Constr. and Build. Mater.** v. 225, p.243–255, 2019.

OTTO, G. P. *et al.* Mechanical properties of a polyurethane hybrid composite with natural lignocellulosic fibers. **Composites Part B: Engineering**, v.110, 2017.

KLERK, M.D. *et al.* Durability of chemically modified sisal fibre in cement-based composites. **Construction and Building Materials**, v. 241, p.1-13, 2020.

LAM, T.F.; YATIM.J.M. Mechanical properties of kenaf fiber reinforced concrete with different fiber content and fiber length. **J. Asian Concr. Fed.** v.1, p.11–21,2015.

LIU, X. *et al.* Study on the Properties of an Ecotype Mortar with Rice Husks and Sisal Fibers. **Advances in Civil Engineering**, v.11, 2021.

MAHZABIN, M. S. *et al.* The influence of addition of treated kenaf fibre in the production and properties of fibre reinforced foamed composite. **Construction and Building Materials**, v. 178, p. 518–528, 2018.

MANSILLA, C. *et al.* Evaluation of Mechanical Properties of Concrete Reinforced with Eucalyptus globulus Bark Fibres. **Sustainability**, v. 12, p. 1-19, 2020.

MANIKANDAN, N. *et al.* Improvement of Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Jute/Polyester Epoxy Composite through Meticulous Alkali Treatment. **Am. J. Curr. Org. Chem**, v. 3, p. 9–18, 2017.

MBECHE, S. M.; OMAR. T Effects of alkali treatment on the mechanical and thermal properties of sisal/cattail polyester commingled composites. **PeerJ Materials Science**, v.2, p.1-17. 2020.

NERY, T. B. R.; JOSÉ, N. M. Study of treated and in natural banana fibers as a possible material for reinforcement in polymeric composites. **Revista Virtual de Química**, v.10, p.313-322, 2020.

ONUAGULUCHI, O.; BANTHIA, N. Plant-based Natural Fiber Reinforced Cement Composites: a Review. **Journal of Cement and Concrete Composites**, v. 68, p. 96-108, 2016.

POLETANOVIC, B. *et al.* Comparison of physical and mechanical properties of cementitious mortars reinforced with natural and synthetic fibres prior and after wet/dry cycles, In: ICBBM 2019, **3th International Conference On Bio-Based Building Materials**, Belfast, UK; 2019.

POLETANOVIC, B. *et al.* Influence of the NaOH-treated hemp fibres on the properties of fly-ash based alkali-activated mortars prior and after wet/dry cycles. **Construction and Building Materials**, v. 309, n. 22, 2021.

PRAKASH, R. *et al.* Mechanical characterisation of sustainable fibre-reinforced lightweight concrete incorporating waste coconut shell as coarse aggregate and sisal fibre. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v.18, n.6, p.1579–1590, 2021.

PRAMOD, V. *et al.* Compression and water absorption behaviour of banana and sisal hybrid fiber polymer composites. **Materials Today: Proceedings**, 2020.

RAABE, J. *et al.* Impact of nanosilica deposited on cellulose pulp fibers surface on hydration and fiber-cement compressive strength. **Construction and building materials**, v.326, 2022.

SANKAR, A.V.V. *et al.* Experimental research into the mechanical behaviour of banana fibre reinforced PP composite material. **Mater. Today Proc**, p.1–5, 2020.

SANTOS, S.F. *et al.* Supercritical carbonation treatment on extruded fibre-cement reinforced with vegetable fibres. **Cement Concr. Compos**, v.56, p. 84–94, 2015.

SANTOS, B. *et al.* Sustainable geopolymer composite reinforced with sisal fiber: Durability to wetting and drying cycles. **J. Build. Eng.** v. 43, 2021.

SAVASTANO, H. *et al.* Fracture and fatigue of natural fiber-reinforced cementitious composites. **Cem Concr Compos**, v.31, p. 232-243, 2009.

SHAH, I. *et al.* Review on Chemical Modification by using Sodium Hydroxide (NaOH) to Investigate the Mechanical Properties of Sisal, Coir and Hemp Fiber Reinforced Concrete Composites. *Journal of Natural Fiber*, (2021), 1-20.

SELLAMI, A.; MERZOUD, M.; AMZIANE, S. Improvement of mechanical properties of green concrete by treatment of the vegetals fbers. **Constr. Build. Mater.** v.47, n.11, p.17–24, 2013.

SENTHILKUMAR, K.. *et al.* Mechanical properties evaluation of sisal fibre reinforced polymer composites: A review. **Construction and building materials**, India, v. 174, p. 713-729, 2018.

SEPE, R. A.; BOLLINO, F.; BOCCARUSSO, B, L.; CAPUTO, A. F. Influence of chemical treatments on mechanical properties of hemp fiber reinforced composites. **Composites Part B**, v. 133, 2018.

SILVA, D. W. *et al.* Influence of thermal treatment of eucalyptus fibers on the physical-mechanical properties of extruded fiber-cement composites. **Materials Today: Proceedings**, v. 31, p.348-S352, 2020.

SOARES, E. N. C. *et al.* Figueiredo, Avaliação da pozolanicidade das cinzas do Capim Elefante Cameroon por ensaios de termogravimetria. **Ciência & Engenharia**, v.26, p.41-48, 2018.

SYDENSTRICKER, T. H. D. *et al.* Pull-out and other evaluations in sisal-reinforced polyester biocomposites. **Polymer Testing**, v. 22, p.375–380, 2003.

TEIXEIRA, R.S. *et al.* Extruded cement based composites reinforced with sugar cane bagasse fibres. **Key Eng. Mater.** v.517, p.450–457, 2017.

TIAN, H.; ZHANG Y.X.; YANG, C.; DING, Y. Recent advances in experimental studies of the mechanical behaviour of natural fibre-reinforced cementitious composites. **Structural Concrete**, v. 17, n. 4, p. 564-575, 2016.

TOLÊDO FILHO, R.D. Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites K Scrivener, GL England, K Ghavami. **Cement and concrete composites**, v. 22, n.2, p. 127-143, 2000.

VARDHINI, K.J.; MURUGAN, R.; RATHINAMOORTHY, R. Effect of alkali treatment on physical properties of banana fibre. **Indian Journal of Fibre & Textile Research**, India, v. 44, p. 459-465, 2019.

WEI, J.; MEYER, C. Degradation of natural fiber in ternary blended cement composites containing metakaolin and montmorillonite. **Corrosion Science**, v. 120, p. 42-60, 2017.

YUEA, Y. *et al.* Characterization of cellulose I/II hybrid fibers isolated from energycane bagasse during the delignification process: Morphology, crystallinity and percentage estimation **Carbohydrate Polymers**, v. 133, p. 438–447, 2015.

ZWAWI. M. A Review on Natural Fiber Bio-Composites, Surface Modifications and Applications. **Moléculas**, v.26, n.2, 2021.

ARTIGO 2: EFEITO DA COMBINAÇÃO DE ADITIVOS SURFACTANTES EM FIBROCIMENTO EXTRUDADO REFORÇADO COM FIBRA DE SISAL

RESUMO

Para intensificar o uso de fibra de sisal *in natura* nos compósitos cimentícios, é essencial evitar que a fibra interfira negativamente e prejudique o desempenho do compósito. O artigo avaliou a ação de aditivos surfactantes incorporadores de ar e plastificante lignosulfonato na produção de placas de fibrocimento reforçada com fibra de sisal. Para isso, foram realizadas análises mecânicas, físicas e microestruturais dos compósitos de fibrocimento. Nota-se que, com o aumento da concentração de incorporador de ar, tem-se o aumento do teor de ar incorporado na matriz, o que afetou suas propriedades físicas e mecânicas. Cabe notar que o FSADR0.6 proposto mostrou-se mais eficiente do que o FSA0.8 em relação ao volume de ar incorporado e à estabilidade do sistema de poros formado. Foi possível também associar a microestrutura das matrizes resultante com suas propriedades mecânicas e físicas. Além disso, a densidade aparente não teve uma redução significativa conforme esperado, entretanto a combinação de aditivos proporcionou o aumento das propriedades mecânicas. Buscou-se, assim, contribuir com o desenvolvimento tecnológico das matrizes cimentícias produzidas com a combinação de aditivos surfactantes para produção de fibrocimento reforçados com fibras de sisal *in natura* melhorando as propriedades mecânicas.

Palavras-chave: Compósito cimentício. Fibra lignocelulósica. Incorporador de ar. Densidade aparente

1 INTRODUÇÃO

O uso de fibras vegetais na construção civil tem sido adotado por vários pesquisadores com intuito de contribuir com benefícios técnicos e ambientais. Isso, pois, essas fibras apresentam vantagens como reciclabilidade, facilidade de processamento, biodegradabilidade e baixo custo (BAHJA *et al.*, 2021). Nesse sentido, muitos estudos têm sido focados na exploração de fibras vegetais como reforço em compósito cimentício (KESIKIDOU; STEFANIDOU, 2019).

Atualmente são utilizadas fibras sintéticas, pois são baratas e possuem alta resistência mecânica. Contudo, o uso extensivo proporciona risco para a saúde do ser humano e degradação do meio ambiente, uma vez que não são recicláveis e biodegradáveis. A acumulação de resíduos de materiais sintéticos causa a degradação ambiental. Devido aos impactos negativos sobre o meio ambiente, existe uma tendência crescente de procurar materiais sustentáveis como as fibras vegetais para serem usadas na produção de compósitos (LIN FENG NG *et al.*, 2020; AKINYEMI; ADESINA, 2021).

Sabe-se que compósitos cimentícios apresentam baixa resistência à tração, ductilidade, resistência à fissuração e pouca absorção de energia (ALDAMA *et al.*, 2019; YEOL YOO, 2021). Em contrapartida, as fibras vegetais são caracterizadas por apresentarem baixa densidade, módulo de elasticidade, alta resistência à tração e flexão (BAHJA *et al.*, 2021). Sendo assim, a incorporação de fibras traz alguns benefícios que podem ser considerados como o método mais eficaz para melhorar a tenacidade e resistência à tração do compósito cimentício através da ponte de fissuras e transferência de carga (BENSALEM *et al.*, 2014; ALDAMA *et al.*, 2019; HEDJAZI; CASTILLO, 2020). A título de exemplo, a fibra de sisal está sendo utilizadas pela facilidade de cultivo e têm boas propriedades de isolamento térmico e acústico, alta tenacidade e resistência à abrasão (KLERK *et al.*, 2020; SENTHILKUMA *et al.* 2018). Assim, elas estão sendo empregadas como reforço para compósitos cimentícios, devido à sua resistência à tração, em torno de 435 MPa (SENTHIL, SIRSSHTI, 2014; FERREIRA *et al.*, 2018).

As fibras alteram o comportamento do compósito cimentício no estado fresco, interferindo na principal propriedade, a consistência, sendo ela responsável pela facilidade de manuseio por vários processos, como mistura, lançamento e compactação (SCHMIDT *et al.*, 2013; BALDINO, 2014; KIM *et al.*, 2018). Devido o papel principal da pasta de cimento no controle da trabalhabilidade do compósito é importante a utilização de materiais que atue melhorando. Assim, a fim de garantir o desempenho de materiais reforçados com as fibras

vegetais, pode-se utilizar aditivos surfactantes em pequenas quantidades que auxiliam na interação com a matriz cimentícia. Eles são responsáveis por facilitar a transferência da água presente nas fibras para as partículas de cimento, devido ao seu efeito dispersor, que por sua vez melhora a trabalhabilidade e a molhabilidade da mistura (ATAHAN *et al.*, 2008; MANGANE *et al.*, 2018).

Além disso, a contribuição dos aditivos é de melhoria das propriedades dos compósitos. Eles podem proporcionar aumento da plasticidade, redução da relação água/cimento, melhorar as propriedades mecânicas e durabilidade. Desta forma, também pode ser considerado um material que tem sua contribuição ligado a redução de energia e o consumo de água na produção de concretos, argamassas e fibrocimentos. Hoje é necessário visar à sustentabilidade garantindo com eficiência ao máximo o investimento e o gasto energético investido (ROMANO; CINCOTTO; PILEGGI, 2018).

Os aditivos surfactantes (tensoativos) também possibilitam a diminuição da densidade de compósitos extrudados, pela introdução de pequenas bolhas de ar dispersas por toda a matriz. Essas microbolhas distribuídas homoganeamente melhoram a coesão e a trabalhabilidade de compósitos cimentícios, evitam a penetração de água e reduzem a tendência de segregação no estado fresco (MEHTA; MONTEIRO, 2014; MENDES *et al.*, 2017). A redução da densidade dos compósitos cimentícios pela adição de incorporadores de ar, principalmente feito pelo processo de extrusão reduz os custos de montagem do produto final (SILVA *et al.*, 2021).

Arsène *et al.* (2017) estabeleceu que existem duas formas pelas quais a fibra vegetal usada como reforço em compósitos cimentícios pode ser modificada. A primeira maneira pode ser feita pela modificação da própria matriz. A segunda pelo tratamento da fibra *in natura* antes da inserção na matriz. Nesse sentido, a utilização de aditivos superplastificantes, plastificantes, incorporadores de ar e modificador reológico tem sido usado de forma eficaz para modificação da matriz cimentícia, e possivelmente na melhoria das propriedades no estado fresco, contribuindo para moldagem no processo de extrusão de fibrocimento (SILVA *et al.*, 2021).

Portanto, prevê-se que o aditivo superplastificante à base de éter de policarboxilato atue como dispersante, pois ele tem efeito eletro esférico o qual tem a capacidade de dispersão de alta eficiência, e desta forma gerando uma necessidade de menor teor de água na mistura. Entretanto, a pressão total de extrusão é diminuída com a utilização do aditivo dispersante, o que pode ocorrer menor compactação dos compósitos gerados (SOTO, 2010; FERRARI *et al.*, 2017). Sendo assim, utiliza-se o modificador reológico na mistura para que o efeito

favoreça a conformação do compósito por extrusão. Ele é o principal responsável pela viscosidade da pasta. Além disso, os éteres celulósicos têm a capacidade de incorporar ar nos compósitos (SOTO, 2010).

Para melhorar a trabalhabilidade e conseqüentemente as propriedades no estado fresco e endurecido do compósito reforçado com fibras vegetais, Zhang *et al.* (2021), Marchon *et al.* (2018) e Li *et al.* (2020) estudaram o efeito da fibra de sisal no comportamento reológico da pasta de cimento com aditivo superplastificante à base de policarbolixato, e verificaram que a superfície das partículas de cimento é extremamente sensível ao comportamento de adsorção e tem efeitos importantes na fluidez e reologia da pasta de cimento.

Diante disso, Fonseca *et al.* (2019); Silva *et al.* (2020) e Raabe *et al.* (2022) estudaram a combinação de surfactantes incorporadores de ar e plastificante na produção de fibrocimento reforçado com fibras vegetais. Os resultados indicaram que os aditivos auxiliam na trabalhabilidade da pasta cimentícia, moldagem na extrusora e tornando a pasta pseudoplástica que facilita a passagem da massa na bouquilha do equipamento.

Desta forma, os aditivos superplastificante à base de éter de policarboxilato (PCE) e modificador reológico (HPMC) são essenciais na produção de fibrocimentos extrudados, pois contribuem para fluidez, viscosidade e conformação da massa pseudoplástica necessária para moldagem na boquilha da extrusora (FONSECA *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2021). Contudo, os aditivos PCE e HPMC podem ser que promova redução do desempenho mecânico do compósito conforme estudo realizado por Soto (2010).

Entretanto, para conseguir atender a fluidez, viscosidade e o comportamento pseudoplástico sem perder propriedades como resistência e uma menor densidade das placas cimentícia pode ser utilizado outros tipos de aditivos. Uma opção em potencial para reduzir a quantidade de modificador reológico utilizado no processo de extrusão é o aditivo incorporador de ar que são responsáveis por promover a formação de microbolhas de ar na pasta de cimento, melhorando a trabalhabilidade, facilita o espalhamento e o manuseio, e assim aumenta a produtividade (KHUDHAIR; EL HILAL; EL HARFI, 2018; ROMANO *et al.*, 2018).

Outra opção que pode promover melhoria das propriedades do compósito é o aditivo plastificante à base lignosulfonato. Ele tem como função no compósito cimentício de dispersão das partículas coloidais, suas moléculas se ligam a essas partículas existentes em suspensão. Dessa forma, passa ser responsável por gerar cargas negativas que causa um efeito repulsivo entre as partículas. O efeito de camadas de moléculas de água dipolares circunda as partículas hidrofóbicas de cimento, e assim evitam a sua floculação e um sistema com boa

dispersão é obtido. Todo o processo influencia as propriedades do compósito tanto no estado fresco como no endurecido (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Ademais, aditivos redutores de água de lignosulfonato possuem uma moderada capacidade de incorporar ar (TOPÇU; ATESIN, 2016).

O tema proposto se torna relevante, uma vez que poucas informações foram encontradas na literatura sobre a combinação de aditivos surfactantes com objetivo de melhorar o desempenho do compósito à base de cimento quando reforçado com fibra de sisal *in natura* e obter boas propriedades do fibrocimento extrudado no estado endurecido.

Deve ser mencionado que os aditivos PCE e HPMC são comumente utilizados para produção de fibrocimento e necessários para favorecer a conformação do compósito por extrusão (SILVA et al., 2021; RAABE et al., 2022). Entretanto, eles podem afetar propriedades no estado endurecido como resistência mecânica. Com isso, a pesquisa propôs utilizar os aditivos PCE e HPMC combinados com os aditivos incorporadores de ar com objetivo de avaliar as propriedades das placas cimentícias e a redução da densidade aparente.

Assim, neste estudo foi usado 3% de fibras de sisal natural, e o uso combinado de diferentes tipos e teores de aditivos: 1% de modificador reológico, 1% de superplastificante, 0,8% de incorporador de ar e 0,6% de plastificante. Foram realizados ensaios por microscopia eletrônica de varredura (MEV), difração de raios-X (DRX) e termogravimetria(TG). Além disso, foi possível verificar o desempenho do fibrocimento através dos ensaios de propriedades física e mecânica dos compósitos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

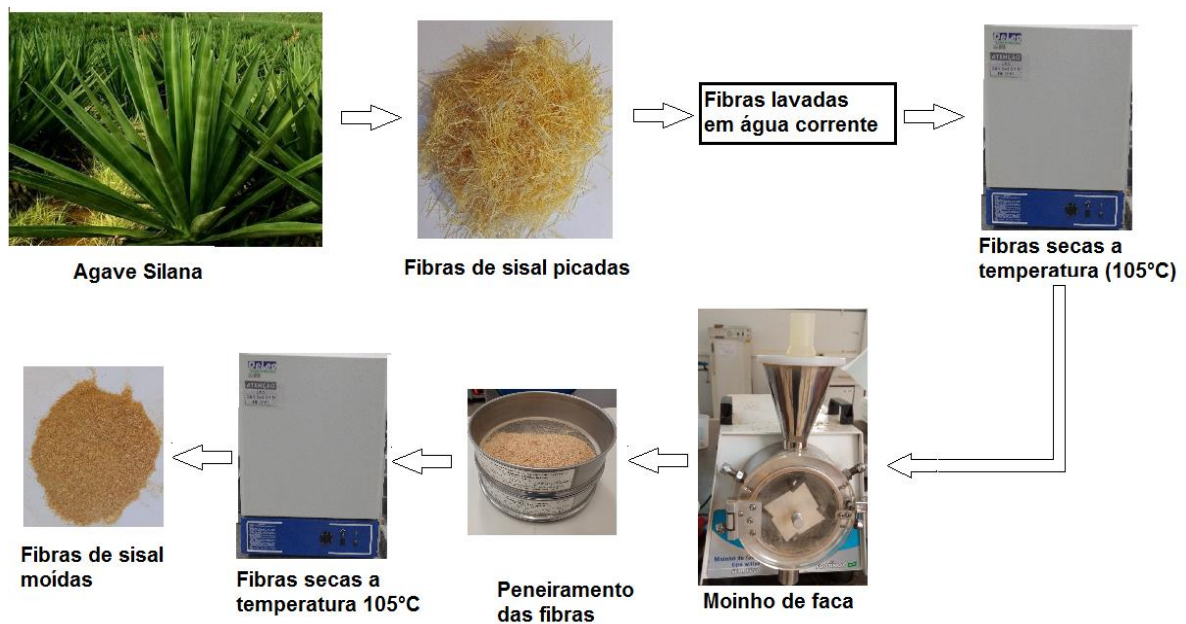
2.1 Materiais

A matriz cimentícia foi formada por: cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI), utilizado por ter um menor teor de adições comercializado no Brasil definido conforme as normas NBR-5733 (ABNT, 2010) e 5737 (ABNT, 2010); calcário agrícola moído (utilizado como carga de carbonato de cálcio pela indústria cimenteira) como substituto parcial do cimento Portland; e os aditivos: hidroxipropilmetilcelulose (HPMC), doado pela Aditex Ltda. e o ácido poliéter carboxílico (ADVA TM 175), Darafill e Drycast doado pela GCP Applied Technologies Ltda.

As fibras de sisal (*Agave sisalana*) utilizadas nesta pesquisa foram doadas pela UFLA-MG. Elas foram picadas manualmente e lavadas em água corrente, após essa etapa foram

secas em estufa a temperatura de 105 °C. As fibras de sisal secas foram moídas com uso de moinho de faca tipo Willye. O material foi passado nas peneiras sobrepostas de granulometria de 40 e 60 mesh, e foram utilizadas somente a fração retida na peneira de 60 mesh. Em seguida foram secas em estufa a 105 °C por um período por 24 h. Na Figura 1 estão indicadas as etapas de produção das fibras curtas.

Figura 1. Fluxograma das etapas de produção das fibras de sisal natural.



Fonte: Do Autor (2023).

Foram utilizados quatro tipos de aditivos comerciais: modificador reológico, superplastificante, incorporador de ar e plastificante. As especificações e funções são apresentadas na Tabela 1, de acordo com as fichas técnicas fornecidas por seus fabricantes.

Tabela 1. Especificações dos aditivos químicos.

Identificação	Função	Densidade (g/cm ³)	pH	Dosagem recomendada
HPMC	Modificador reológico	NA	3,0 – 11,0	NA
ADVA™ 175	Superplastificante/Dispersante	1.10	5,5	0,4 a 1,2%
Darafill	Incorporador de ar	1.00	11,5	0,1 a 0,6%
Drycast	Plastificante/ lignosulfonato	1.00	13,0	0,4 a 0,5%

Fonte: Ficha de informação dos fabricantes (2020)

2.2 Métodos

As amostras de cimento com variações de teores de aditivos foram realizadas de acordo com as pesquisas feitas por Silva et al. (2020) e Costa, Masuero e Gonçalves (2020). Na Tabela 2 estão apresentados os traços utilizados. Sete corpos de prova foram produzidos para cada tratamento. Os corpos de prova de fibrocimento foram identificados conforme os tratamentos realizados. As três formulações foram adicionadas 1% de aditivos de igual percentual tanto para HPMC e ADVA, sendo amostra de referência (FSA) somente HPMC e ADVA, a amostra com Drycast acrescentou o teor de 0,6% (FSADR0.6) e amostra com 0,8% de DARAFILL (FSAD0.8) e todos foram dosados em relação a massa do cimento.

O aditivo superplastificante à base de policarboxilatos (ADVA) foi utilizado para modificar a fluidez da matriz e o modificador de viscosidade (HPMC) para controlar a viscosidade da mistura e melhorar a dispersão das fibras (AHI GE *et al.* 2021). O uso do plastificante (Drycast) teve como finalidade reduzir água de amassamento e desgaste do equipamento (extrusora), além de possuir uma moderada capacidade de incorporar ar (TOPÇU; ATESIN, 2016). O aditivo incorporador de ar (Darafill) melhora a trabalhabilidade e consistência do compósito (MENDES *et al.*, 2017; ROMANO *et al.*, 2018).

Tabela 2. Composição das misturas utilizadas para produção de fibrocimento.

Formulação	Cimento (CPV)	Calcário	Fibra	a/c	HPMC	ADVA	Darafill EXP 300	Drycast
.....(%).....								
FSA	68	29	3	0,3	1	1	-	-
FSAD0.8	68	29	3	0,3	1	1	0.8	-
FSADR0.6	68	29	3	0,3	1	1	-	0.6

Fonte: Do autor (2023).

Com a finalidade de avaliar o efeito incorporador de ar no fibrocimento reforçado com fibras de sisal foram desenvolvidas três formulações conforme pesquisa de Raabe *et al.* (2022). Para isso, quatro etapas foram realizadas conforme mostrado na Figura 2.

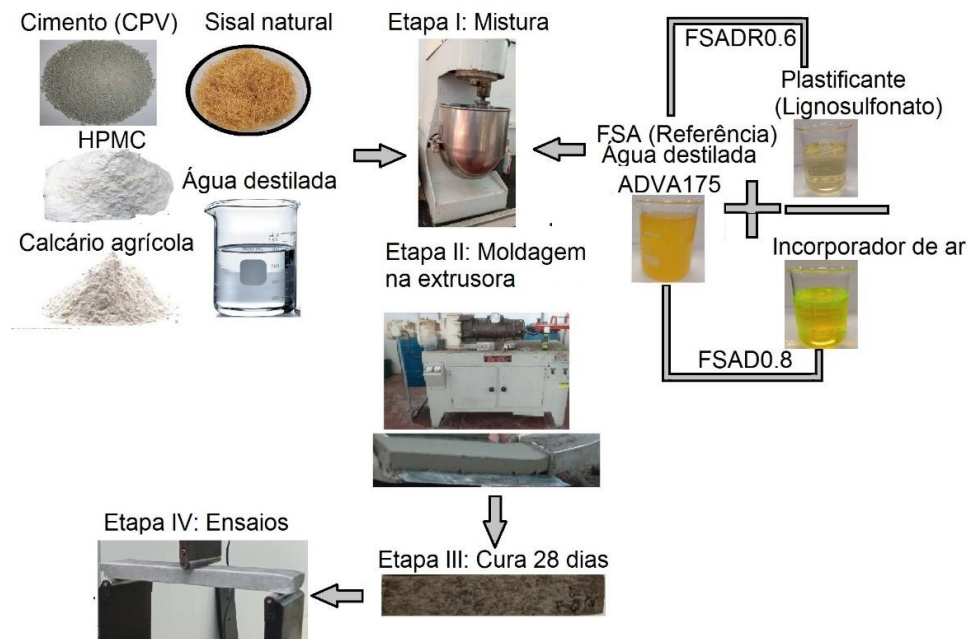
Todas as amostras de fibrocimento foram produzidas com os materiais secos (cimento, calcário e HPMC) e foram misturados com relação água: cimento 0,30 em um misturador planetário, e as fibras de sisal foram adicionadas gradativamente para obter uma boa distribuição na mistura.

Na etapa (I) as fibras foram misturadas com os demais componentes até a completa homogeneização, na seguinte ordem: fibras previamente dispersas; cimento, calcário

e HPMC, previamente misturados (~2 min), água destilada e ADVA 175 (~2 min). Já para produção dos corpos de provas de fibrocimento com aditivo incorporador de ar foram adicionados 0,8% de DARAFILL e misturados novamente com os materiais secos e aditivo ADVA (~2 min). Para produção com adição de 0,6% de DRYCAST o procedimento foi o mesmo (~2 min). O intervalo do tempo entre a adição dos componentes de ordem foi de aproximadamente 2 min. A homogeneização completa da mistura composta ocorreu em torno de 10 min.

Na etapa (II) moldagem, a mistura fresca foi moldada por extrusão com equipamento extrusora helicoidal modelo VERDES 051. A dimensão do corpo de prova de fibrocimento foi de 50 x 16 x 200 mm (largura, espessura e comprimento), respectivamente. A etapa (III) cura, ocorreu após a moldagem dos corpos de prova que foram armazenados em saco plástico selado em condições saturadas para cura em temperatura ambiente por 28 dias. Para etapa (IV) foram realizados os ensaios físico, mecânico e microestrutural.

Figura 2. Fluxograma das etapas de produção e cura das amostras de fibrocimento extrudado.



Fonte: Do autor (2023).

2.3 Propriedades físicas do fibrocimento

As propriedades físicas, como absorção de água, densidade e porosidade aparente foram analisadas de acordo com a norma ASTM C 948-81 (2001). Os compósitos foram

imersos em água à temperatura ambiente (± 21 °C) por 72 h para obtenção da massa úmida (saturada de água do compósito com remoção do excesso de água da superfície) e massa imersa. Posteriormente, as amostras foram secas em estufa a 80 °C por 24 h para determinar a massa seca. As fórmulas 1, 2 e 3 são apresentadas a seguir:

$$AA = \frac{m_{sat} - m_{seca}}{m_{imersa}} \times 10 \quad (1)$$

$$D_{ap} = \frac{m_{seca}}{m_{sat} - m_{im}} \times \rho \quad (2)$$

$$PA = \frac{m_{sat} - m_{seca}}{m_{sat} - m_{im}} \times 100 \quad (3)$$

Onde: m_{seca} é a massa seca (g); W_{sat} é massa saturada (g) do compósito com remoção do excesso água da superfície; I_{im} é a massa (g) após imersão em água (24 h) e ρ é a densidade (g/cm^3) do líquido onde as amostras foram imersas (água destilada; $\rho = 1 g/cm^3$).

2.4 Propriedades mecânicas do fibrocimento

Os testes de flexão estática foram realizados usando uma máquina de teste universal modelo WDW-20E equipada com uma célula de carga de 20 kN. Utilizou-se uma configuração com três cutelos (vão inferior igual a 150 mm) na determinação dos valores médios de módulo de ruptura (MOR), limite de proporcionalidade (LOP), módulo de elasticidade (MOE) e tenacidade dos compósitos quando submetidos ao ensaio de flexão estática. A configuração e determinações seguem os procedimentos sugeridos em (RILEM, 1984; SANTOS et al., 2019).

2.5 Caracterização microestrutural

A caracterização por microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada em um equipamento JEOL modelo JSM – 6510, com tensão aplicada de 10 kV e distância de trabalho de 10 mm. As amostras foram recobertas com ouro pelo método de sputtering em um equipamento da marca Leica, para os ensaios. As análises foram realizadas na superfície de ruptura das placas que foram ensaiadas por flexão estática. Essa observação teve por objetivo avaliar o efeito das fibras de sisal e a combinação dos aditivos nas propriedades físico-mecânicas do fibrocimento e a influência na interface fibra/matriz.

A identificação das fases policristalinas das amostras de fibrocimento foi realizada por difração de raios X (DRX) em um difratômetro XRD-6000 (Shimadzu Co., Kyoto, Japão) operando com radiação de Cu K α ($\lambda = 0,15428$ nm), voltagem de 30 kV, corrente de 30 mA e modo varredura contínua a 1° min^{-1} no intervalo de ângulo de Bragg (2θ) de 5 a 90° .

A análise termogravimétrica das amostras de fibrocimento aos 28 dias de idade foi realizada no equipamento SDT Q500 da TA Instruments. As amostras foram aquecidas até uma temperatura de aproximadamente 1000°C , com uma taxa de aquecimento de $10^\circ\text{C}/\text{min}$ e um fluxo de N_2 de $50 \text{ mL}/\text{min}$. inicialmente, os compósitos foram moídos manualmente em um almofariz de ágata, e o material utilizado na análise foi o passante na peneira de malha quadrada de $0,075 \text{ mm}$ de abertura. O teor de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e de carbonato de cálcio (CaCO_3) foram calculado de acordo com a Equação 1, considerando que a decomposição deste composto ocorreu na faixa de temperatura de $380\text{-}430^\circ\text{C}$ e $605\text{-}715^\circ\text{C}$ (SCRIVNER; SNELLINGS; LOTHENBACH, 2016).

$$W\% = M_i - M_f \times \frac{mX}{m \text{H}_2\text{O}} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde: W% – perda de massa do composto; mX - Massa molar do composto; m $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – massa molar do composto ($74 \text{ g}/\text{mol}$); m CaCO_3 – massa molar do composto ($100 \text{ g}/\text{mol}$); m H_2O – massa molar da água ($18 \text{ g}/\text{mol}$).

2.6 Análise dos resultados

Para análise dos dados, foi utilizado um delineamento inteiramente casualizado. Para avaliação das propriedades físico-mecânicas dos fibrocimentos produzidos com diferentes porcentagens de aditivos, realizou-se à análise de variância e teste de média de Scott-Knott a 5% de significância.

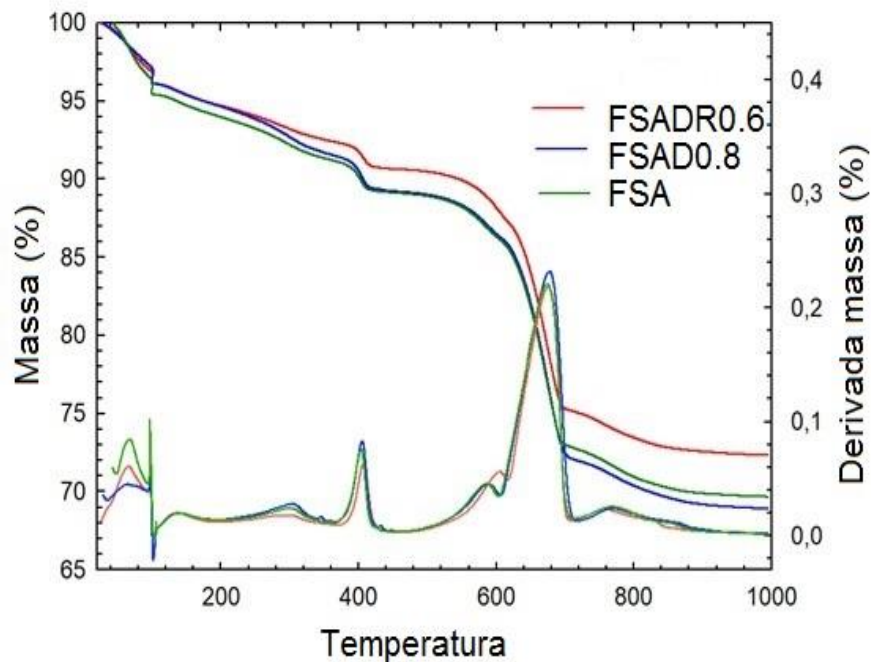
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 apresenta os resultados da análise termogravimétrica das amostras FSA, FSADR0.6 e FSAD0.8. De acordo com Scrivner, Snellings e Lothenbach (2016), no ensaio de termogravimetria a perda de massa entre $20\text{-}105^\circ\text{C}$ está associada à água livre presente nos poros do compósito cimentício. No intervalo de temperatura aproximadamente $380\text{-}430^\circ\text{C}$

ocorre perda de massa relacionada ao hidróxido de cálcio e, por fim, entre 617-707 °C ao carbonato de cálcio.

Assim, pode-se verificar o uso de aditivo redutor de água e incorporador de ar (FSADR0.6 e FSAD0.8) tende a melhorar a trabalhabilidade da pasta sem a necessidade de adicionar água, e possivelmente reduzido a presença de água no sistema. Assim, evitando o ataque às fibras, já que elas têm a tendência de absorver água de hidratação. Assim, as perdas de massa associadas a desidratação do hidróxido de cálcio e descarbonatação do carbonato de cálcio estão apresentados na Tabela 3. Desta forma, verificou-se um percentual de hidróxido de cálcio de 6,2% (FSA), 6,9% (FSADR0.6) e 7,8% (FSAD0.8), respectivamente.

Figura 3. Análise termogravimétrica (TGA) e termogravimetria derivada (DTG) das amostras de fibrocimento reforçado com fibras de sisal e relação água/cimento = 0,30 aos 28 dias.



Fonte: Do autor (2023).

Tabela 3. Quantidade de hidróxido de cálcio (% CH) e carbonato de cálcio (% CO) nas amostras de compósitos de fibrocimento.

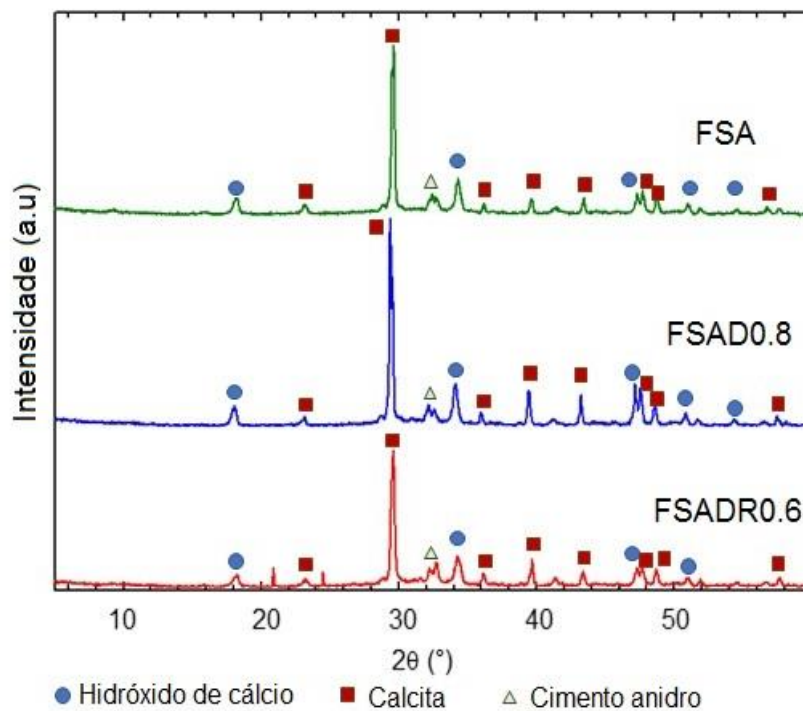
Intervalo de temperatura (°C)	FSA	FSADR0.6	FSAD0.8
Perda 1: 380 a 430	6,207% (1,359 mg)	6,948% (1,4305 mg)	7,852% (1,647 mg)
Perda 2: 617 a 707	27,455% (6,011 mg)	30,250% (6,228 mg)	32,477% (6,811 mg)

Fonte: Do autor (2023).

A redução na alcalinidade da matriz evita a degradação da fibra natural (CASTOLDI *et al.*, 2022). Em compósitos cimentícios, a hidratação do cimento pode gerar acúmulo de grandes cristais de portlandita, que se acumulam nas proximidades das fibras, dificultando assim ancoragem entre matriz e o reforço (GUALBERTO *et al.*, 2021). Levando isso em consideração, a leve redução na quantidade de hidróxido de cálcio na matriz pode possibilitar melhorias das propriedades mecânicas.

A Figura 4 apresenta os difratogramas das placas de fibrocimento aos 28 dias e conforme os resultados, não foram observadas alterações significativas entre os difratogramas das três amostras.

Figura 4. Difratograma das amostras FSA, FSAD0.8 e FSADR0.8



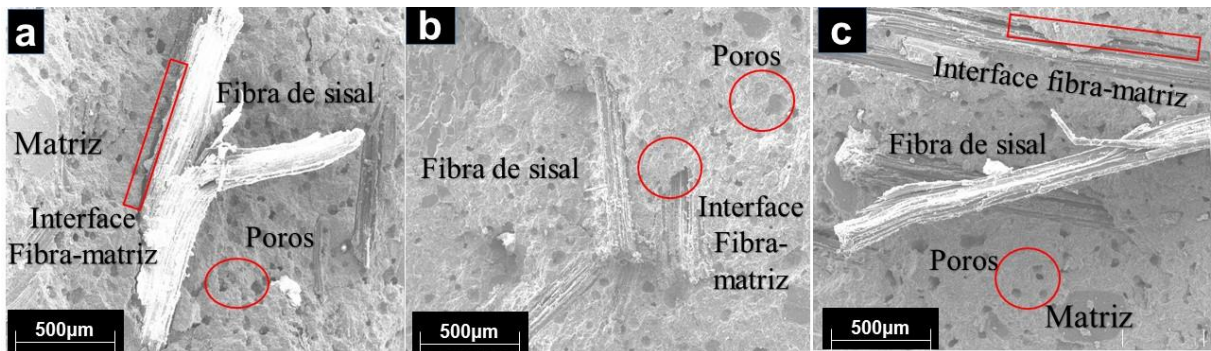
Fonte: Do autor (2023).

3.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As análises de MEV, Figuras realizadas com o objetivo de buscar imagens dos compostos hidratados, presença de poros e a interação matriz/fibra. Na Figura 5a é possível observar a superfície das amostras e alterações de porosidade do material, ou seja, a amostra de referência apresentou mais poros, seguido pelas amostras B e C nessa ordem. Contudo, essa diferença é bem sutil.

Conforme Mendes *et al.* (2017), essa observação reforça o entendimento de que não existe matriz isenta de poros, pois os vazios são resultados dos componentes e do processo de mistura do material. Entretanto, para obter o resultado esperado, as características das fibras como comprimento, espessura e forma que estão dispersas na matriz podem reduzir os vazios (GUALBERTO; MOTTA; PASQUINI, 2021). Na amostra de referência pode ser observado que além dos poros a presença de produtos de hidratação de cimento aderidos na fibra de sisal (Figura 5a). É perceptível uma maior presença de produtos hidratados de cimento aderidos nas fibras de sisal nas amostras FSAD0.8 e FSADR0.6 (Figuras 5b e 5c).

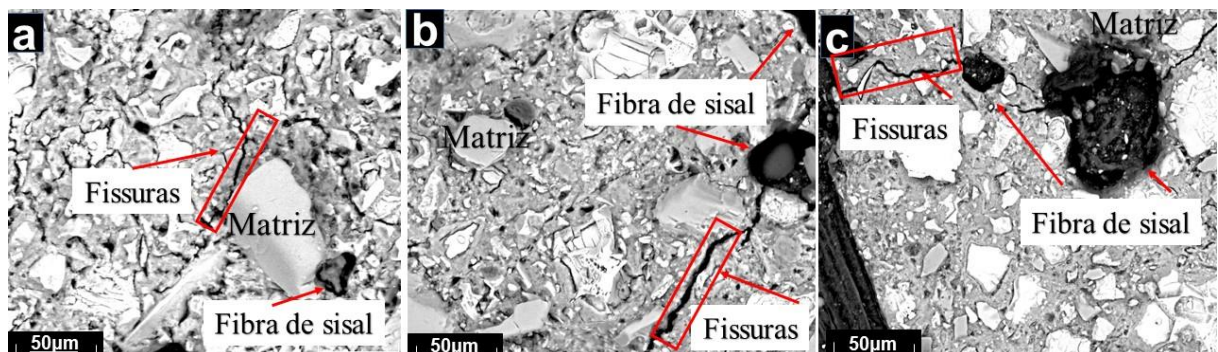
Figura 5. MEV das placas de fibrocimento reforçados com fibra de sisal natural: a) Amostra de referência (FSA), b) FSAD0.8 e c) FSADR0.6



Fonte: Do autor (2023).

Observa-se nas Figuras 6a, b e c a presença de fissuras na interface matriz-fibra, representadas pelas setas. As imagens de apresentada na Figura 6b indicam que as amostras (FSAD0.8) produzida com 0,8% de aditivos incorporador de ar mostram fissuras mais expressiva, isso pode ter ocorrido devido a existência de vazios entre a zona de transição interfacial fibra/matriz.

Figura 6. Imagens de micrografias (MEV-BSE) de superfície polidas de fibrocimento reforçados com fibra de sisal natural: a) Amostra de referência (FSA), b) FSAD0.8 e c) FSADR0.6



Fonte: Do autor (2023).

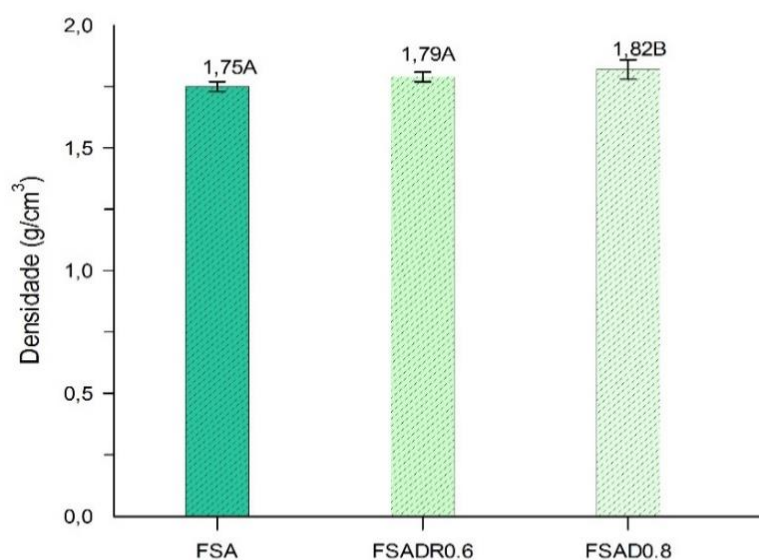
Além disso, também se acredita que a fibra de sisal não tratada e os vazios existente entre a fibra/matriz pode ter contribuído para as fissuras, e que foi observado também na amostra FSA e FSADR0.6 conforme visto na Figura 6a e 6c. A absorção de umidade é responsável pela variação dimensional da fibra, resultando em microfissuras ao redor da interface fibra-matriz e fraca ligação interfacial (YAN *et al.*, 2016; VEIGAS *et al.*, 2022).

A fibra natural absorve parcialmente a água livre durante o processo de mistura e, como resultado, a fibra incha. No entanto, quando a fibra encolhe, existirá uma lacuna na zona de transição interfacial fibra/matriz, e quando a folga se torna maior, a força de atrito reduz (TIAN *et al.*, 2016).

3.2 Propriedades físicas do fibrocimento

No que se refere aos resultados de densidade não houve diferença estatística em relação aos tratamentos estudados. Ao analisar a Figura 7, pode-se observar que a densidade aparente dos fibrocimentos produzidos exclusivamente com adição de 0,8% de incorporador de ar obteve valores maiores de densidade, dessa forma com a formulação FSAD0.8 que foi produzida também com 1% de aditivo HPMC, e contém na sua composição éteres celulósicos que tem a capacidade de incorporar ar no compósito.

Figura 7. Densidade Aparente das placas de fibrocimento FSA, FSAD0.8 e FSADR0.6.



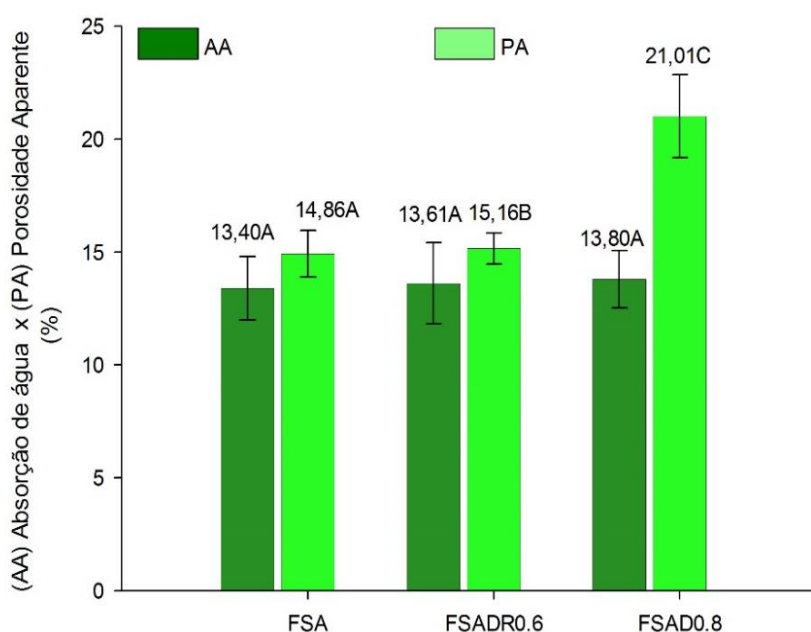
Legenda: *Propriedades seguidas por letras diferentes foram diferentes de acordo com o teste de Scott-Knott (5% de significância).

Fonte: Do autor (2023).

Sendo assim, responsáveis por aumentar o teor de aditivo incorporador de ar no sistema. Os resultados de densidade desta pesquisa são semelhantes aos encontrados por Terra (2023).

Pode-se observar na Figura 8 que houve diferença nos resultados de porosidade entre os compósitos de fibrocimento (FSA) e as amostras contendo aditivos incorporadores de ar (FSADR0.6 e FSAD0.8) sendo os valores de 14,86, 15,16 e 21,01%, respectivamente. Ainda pode observar que não houve diferença estatística entre os tratamentos de referência (FSA) e os com adição dos incorporadores de ar (FSADR0.6 e FSAD0.8) no que concerne a absorção de água nos fibrocimentos. A porosidade aparente dos compósitos FSAD0.8 foi aumentada (em virtude da adição das fibras de sisal não tratada e do alto percentual de incorporador de ar adicionado), uma vez que apresentaram diferença significativa em relação ao FSA. Resultados semelhantes de porosidade devido a utilização de teores entre 0,4 e 0,8 de incorporador de ar foram obtidos por Mendes *et al.* (2017).

Figura 8. Porosidade aparente e absorção de água das placas de fibrocimento FSA, FSAD0.8 e FSADR0.6.



Legenda: *Propriedades seguidas por letras diferentes foram diferentes de acordo com o teste de Scott-Knott (5% de significância).

Fonte: Do autor (2023).

Os valores de absorção de água são muito próximos entre as amostras. Os valores observados de absorção de água e porosidade dos compósitos cimentícios extrudados são consistentes com o estudo realizado por (SILVA *et al.*, 2021). Esse comportamento já era

esperado, pois as fibras apresentarem características e propriedades distintas (menor massa específica e maior capacidade de absorção de água) em relação aos demais componentes da matriz. O ar incorporado e a porosidade final são significativamente influenciados pelo teor de aditivo (ROMANO; TORRES; PILEGGI, 2018).

Mendes *et al.* (2017), ao pesquisar argamassa com adição de surfactante observou que com dosagem inferior 0,4%, a permeabilidade da argamassa não se altera com o aumento do teor de ar incorporado. Nesse caso, os poros desenvolvidos não contribuem para a penetração da água na matriz. São bem distribuídos, de forma que não haja ligação entre eles, e/ou interrompam os canais capilares próximos à superfície, impedindo a penetração de água. Já em relação as misturas com 0,8%, os tamanhos dos poros, sua quantidade e distribuição permitem que a água penetre mais profundamente na matriz.

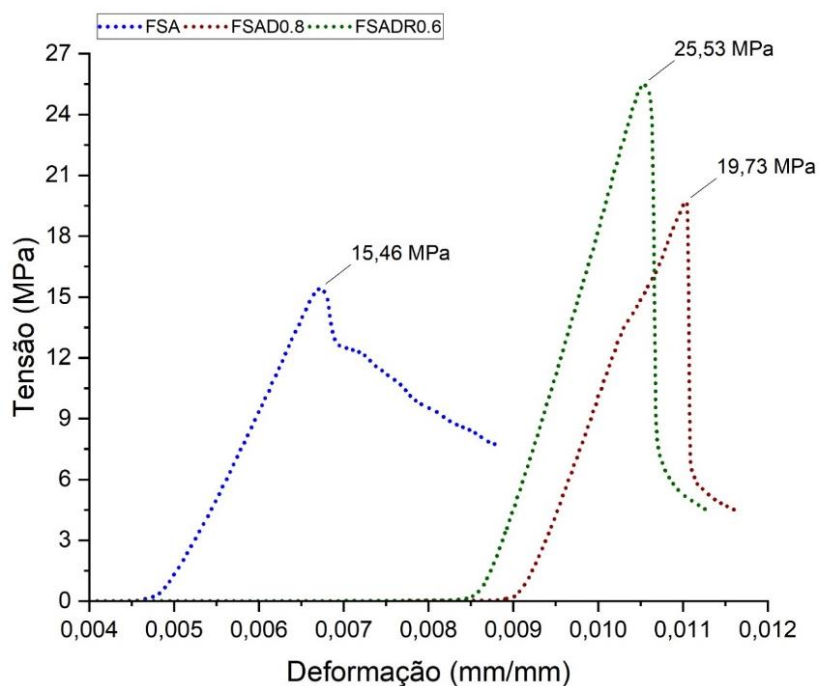
3.3 Propriedades mecânicas

Os resultados das amostras FSADR0.6 que foram produzidos com o aditivo plastificante apresentou maior resistência à flexão em relação às demais amostras de fibrocimento (FSA e FSAD0.8) conforme apresentado na Figura 9. Além disso, verifica-se que as curvas mostraram o aumento na tensão juntamente com o aumento da deformação dos materiais compósitos.

Apesar dos resultados encontrados de menor porosidade e absorção de água das amostras de FSA, no entanto, o valor 15,46 MPa de resistência à flexão encontrado foi inferior quando comparado com os valores 19,73 e 25,53 MPa das amostras FSAD0.8 e FSADR0.6. A redução da resistência à flexão da amostra FSAD0.8, é devido ao incremento do teor de incorporação de ar na matriz cimentícia, correlacionando-se com os resultados de maior porosidade e absorção de água.

Isso valida que quanto maior for o teor de ar incorporado para uma mistura, maior será a redução de suas propriedades mecânicas (BÜYÜKYAĞCI; TUZCU; ARAS, 2009). Essa perda de resistência se deve ao aumento da porosidade da matriz, como pode ser observado pelos resultados anteriores. Essa relação da diminuição da resistência mecânica com o aumento da porosidade também observado por Mendes *et al.* (2017). A combinação de aditivos surfactantes levou a um aumento significativo nos valores dos módulos de ruptura e de elasticidade próximos a 14,6 MPa e 7,8 GPa conforme pode observados na Figura 10 para a amostra FSADR0.6.

Figure 9. Curvas tensão – deformação das placas de fibrocimento FSA, FSAD0.8 e FSADR0.6



Fonte: Do autor (2023).

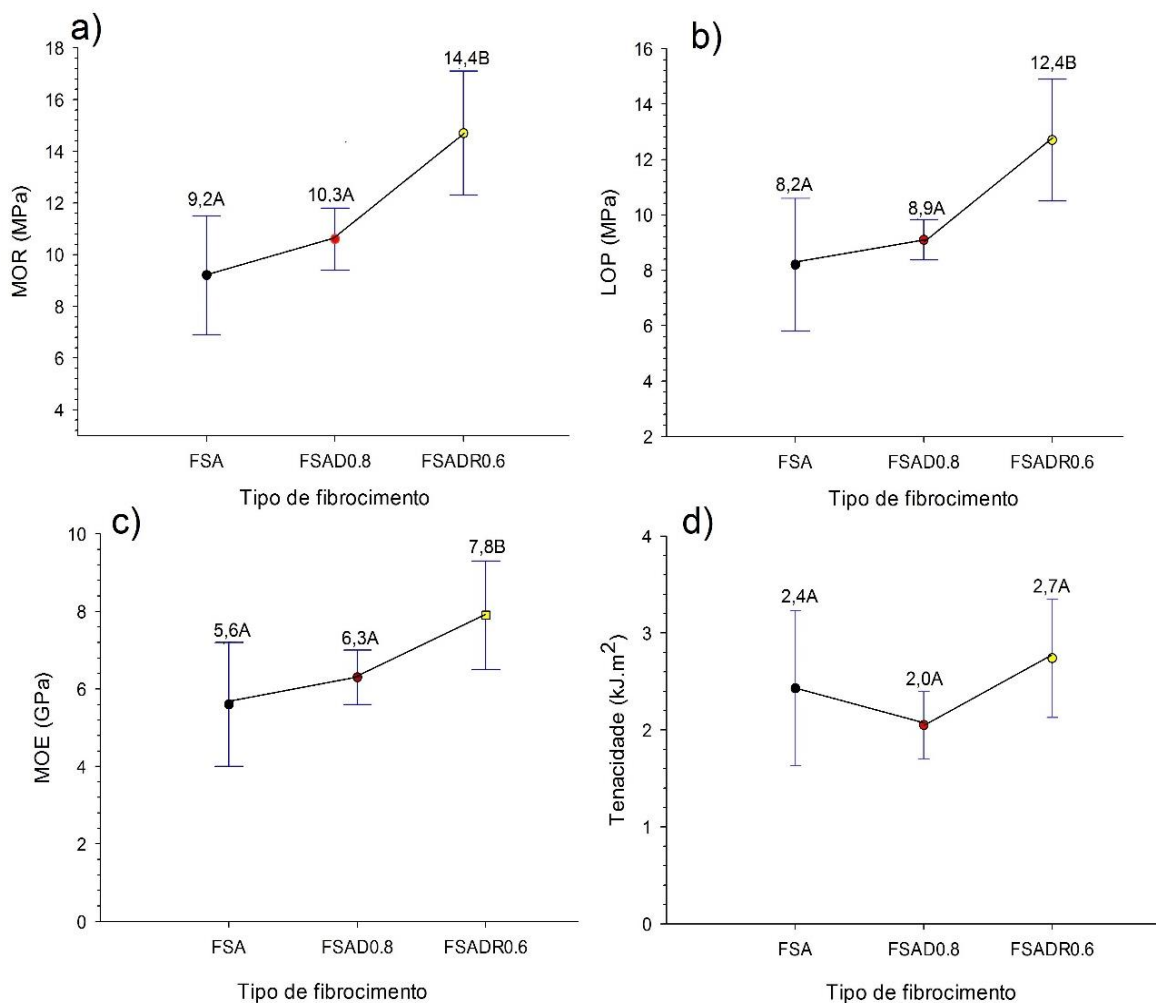
O aumento da porosidade e dos vazios milimétricos nas placas cimentícias produzidas com aditivo incorporador de ar levaram a reduções significativas nos valores de 10,6 MPa e 6,2 GPa para fibrocimento FSAD0.8 quando comparado com FSADR0.6. Com a micrografias de MEV (Figuras 5 e 6), pode-se correlacionar que amostra FSAD0.8 apresentou uma superfície de fratura com expressiva porosidade, e assim confirmado nos resultados de propriedades mecânicas.

A placa cimentícia contendo modificador de ar e dispersante (FSA) perdeu apenas 13,2% de MOR e 10,0% de MOE quando correlacionado a FSAD0.6 mostrado na Figura 10. Ainda pode observar que o MOR com valor de 14,6 MPa para amostra FSADR0.8 teve um aumento de 36,9% comparado a FSA. As amostras de fibrocimento foram classificadas como de categoria C (Chapas cimentícias para substrato não estrutural para pisos internos), classe 2 pela norma NBR 15498 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2021), que considera requisitos mínimos com valores de MOR de fibrocimentos de 7 MPa.

A tensão no limite de proporcionalidade foi menos sensível ao efeito da combinação de aditivos na interação matriz-fibra, tendo em vista que os valores médios de LOP dos compósitos foram 8,2, 8,9 e 12,4, respectivamente. O fibrocimento (FSADR0.6) apresentou uma melhora substancial das propriedades mecânicas e da tenacidade em comparação ao

material sem combinação (FSA). Entretanto, o compósito com incremento de aditivo incorporador de ar (FSAD0.8) teve uma leve diminuição de valor de tenacidade ($2,0\text{kJ/m}^2$), e oposto ocorreu com a amostra FSADR0.6 que teve o valor superior de tenacidade ($2,7\text{kJ/m}^2$) em comparação com o fibrocimento de referência ($2,40\text{kJ/m}^2$). Pode-se observar que não houve diferença estatística entre os valores obtidos para os fibrocimentos FSA (referência) e as amostras de FSAD0.8 e FSADR0.8 para os resultados de MOR, MOE, LOP e tenacidade.

Figura 10. Efeito da combinação de aditivos na propriedade mecânica dos compósitos reforçado com fibras de sisal *in natura*.



Legenda: *Propriedades seguidas por letras diferentes foram diferentes de acordo com o teste de Scott-Knott (5% de significância).

Fonte: Do autor (2023).

Pode-se observar porque os compósitos de FSADR0.6 e FSAD0.8 apresentaram maior resistência em testes de flexão. Conforme a Figura 11B e 11C, a fibra de sisal aparece nas

superfícies de ruptura aderida a matriz e atua como componente de reforço. A imagem FSA mostrada na Figura 11A é da amostra de referência, composta somente por modificador reológico e dispersante, as fibras se separam da matriz de cimento após a ruptura, e também mostra que as fibras não são transversais à superfície e não contribuem para a resistência (PACHLA *et al.*, 2021).

Figura 11. Análise visual de ruptura dos corpos de prova de fibrocimento extrudado



Fonte: Do autor (2023).

4 CONCLUSÕES

Os compósitos de fibrocimento reforçados com fibras sisal (FSADR0.6) combinados com aditivos redutores de água apresentaram melhores propriedades mecânicas (resistência e módulo de elasticidade à flexão) e menor densidade em relação aos compósitos de fibrocimento (FSAD0.8) combinados com aditivo surfactantes incorporadores de ar. O aumento do teor de ar incorporado na produção do compósito de fibrocimento proporcionou uma diminuição gradativa das propriedades mecânicas.

Concomitantemente, foi possível verificar que a adição de fibras de sisal aos compósitos não alterou a constituição mineralógica da matriz cimentícia conforme visto nos padrões dos difratogramas de raio-X., no entanto, os percentuais de hidróxido de cálcio (CH - portlandita) e de carbonato de cálcio (CO - calcita) foram alterados em função dos diferentes tipos de aditivos usados. Houve uma tendência de diminuição do percentual de CH e aumento do CO com a combinação de aditivos para os compósitos.

Além disso, em geral, os percentuais de CH e CO foram menores para os compósitos de fibrocimento reforçado com fibra de sisal e com a combinação de aditivos em comparação aos compósitos reforçados sem a combinação.

Quanto a microestrutura, a combinação de aditivos proporcionou melhor dispersão e interação fibra-matriz. Adicionalmente, os compósitos de fibrocimento sem a combinação tiveram sua dispersão comprometida em função de aglomeração das fibras em determinados pontos da matriz cimentícia. Além disso, a falta de trabalhabilidade pode ter aumentado a frequência de aglomerações, possibilitando baixo grau de homogeneidade dos compósitos produzidos sem combinação de aditivos surfactantes.

Logo, conclui-se que a combinação de aditivo plastificante lignosulfonato usados para produção de fibrocimento influenciaram na interação matriz-fibra, melhorando as propriedades mecânicas principalmente no que concerne amostra (FSADR0.6) que apresentou melhor desempenho quando comparados os demais compósitos.

REFERÊNCIAS

ARDANUY, M.; CLARAMUNT, J.; TOLEDO FILHO, R. D. Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research. **Construction and Building Materials**, v. 79, n. 2015, p. 115–128, 2015.

ALDAMA, G. E. *et al.* Rheological behaviour of cement paste added with natural fibres. **Construct. Build. Mater.** v. 198 p.148–157, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS–ASTM C 948-81: Test method for dry and wet bulk density, water absorption, and apparent porosity of thin sections of glass-fiber reinforced concrete. West Conshohocken. 2 p (2001).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: cimento Portland de alta resistência inicial, especificação. Rio de Janeiro, Brasil, 5p., 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15498**: placa plana cimentícia sem amianto – requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, Brasil, 32 p., 2021.

ATAHAN, H. N. *et al.* The morphology of entrained air voids in hardened cement paste generated with different anionic surfactants. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, n. 7, p. 566-575, 2008.

BAHJA, B.; ELOUAFI, A.; TIZLIOUINE, A.; OMARI, L.H. Morphological and structural analysis of treated sisal fibers and their impact on mechanical properties in cementitious composites. *Journal of building engineering*, v. 34, p. 1-9, 2021.

BALDINO, N., *et al.* Rheological behaviour of fresh cement pastes: Influence of synthetic zeolites, limestone and silica fume, **Cem. Concr. Res.**, v. 63, p.38 – 45,2014.

BALLESTEROS, M. J.E. *et al.* Effect of mineral additions on the microstructure and properties of blended cement matrices for fibre-cement applications, **Cement Concr. Compos.** V. 98, p.49–60, 2019.

CASTOLDI, R. *et al.* Effect of alkali treatment on physical–chemical properties of sisal fibers and adhesion towards cement-based matrices. **Construction and Building Materials**, v. 345, 2022.

COSTA, A.R.D.; MASUERO, A.B.; GONÇALVES, J.P. Avaliação reológica sob diferentes temperaturas de pastas cimentícias aditivadas com diferentes tipos de aditivos superplastificantes à base de policarboxilatos. **Matéria**, v.25, n.4, 2020.

FONSECA, C. S. *et al.* Valorization of Jute Biomass: Performance of Fiber–Cement Composites Extruded with Hybrid Reinforcement (Fibers and Nanofibrils). **Waste and biomass valorization**, v. 12, p.5743-5761, 2021.

FONSECA, C.S *et al.* Jute fibers and micro/nanofibrils as reinforcement in extruded fiber-cement composites. **Construction and Building Materials**, v. 211, p.517-527, 2019.

GUALBERTO, S.L. *et al.* Tratamento de Fibras de Sisal com Lignosulfonato para Aprimoramento das Propriedades dos Compósitos de Fibrocimento. **Rev. virtual química**, p.1-11, 2021.

HEDJAZI, S.; CASTILLO, D. Relações entre resistência à compressão e UPV de concreto armado com diferentes tipos de fibras. **Heliyon**, v. 6, 2020.

KESIKIDOU, F.; STEFANIDOU, M. Natural fiber-reinforced mortars. **Journal of Building Engineering**, v. 25, 2019.

KIM, Y.J. *et al.* Wilde, Investigation of rheological properties of blended cement pastes using rotational viscometer and dynamic shear rheometer, **Adv. Mater. Sci. Eng.** P.1–6, 2018.

KLERK, M.D.*et al.* Durability of chemically modified sisal fibre in cement-based composites. **Construction and Building Materials**, v. 241, p. 1-13, 2020.

LIN FENG NG. *et al.* A comparison study on the mechanical properties of composites based on kenaf and pineapple leaf fibres, **Polymer Bulletin**, p.77, p.1449 –1463, 2020.

LI, M. *et al.* Competitive adsorption and interaction between sodium alginate and polycarboxylate superplasticizer in fresh cement paste. **Colloid Surf. A - Physicochem. Eng. Asp.** v.586, 2020.

MANGANE, M. B. C. *et al.* Influence of superplasticizers on mechanical properties and workability of cemented paste backfill. **Minerals Engineering**, v. 116, p. 3-14, 2018.

MENDES, J. C. *et al.* Mechanical, rheological and morphological analysis of cement-based composites with a new LAS-based air entraining agent. **Construction and Building Materials**, v. 145, p. 648-661, 2017.

PACHLA, E. C. et al. Sustainable application of rice husk and rice straw in cellular concrete composites. **Construction and building materials**, v. 283, 2021.

PICKERING, K.L.; ARUAN EFENDY, M.G.; Le, T.M.; A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance, **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 83, p.98-112, 2016.

RAABE, J. et al. Impact of nanosilica deposited on cellulose pulp fibers surface on hydration and fiber-cement compressive strength. **Construction and building materials**, v.326, 2022.

ROMANO, R. C. O.; CINCOTTO, M. A.; PILEGGI, R. G. Incorporação de ar em materiais cimentícios: uma nova abordagem para o desenvolvimento de argamassas de revestimento. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 2, p. 289-308, 2018.

SCHMIDT, W. et al. Rheology Modifying Admixtures: The Key to Innovation in Concrete Technology—A General Overview and Implications for Africa, **change**, v. 4, n.5, 2013.

SILVA, D. W. et al. Superabsorbent ability polymer to reduce the bulk density of extruded cement boards. **Journal of Building Engineering**, v. 43, p. 103130, 2021.

SILVA, D. W. *et al.* Influence of thermal treatment of eucalyptus fibers on the physical-mechanical properties of extruded fiber-cement composites. **Materials Today: Proceedings**, v. 31, p.348-S352, 2020.

SOTO, Y. J. M. Adequação de formulações para a produção de placas de fibrocimento por extrusão. 2010. 201 p. Tese (**Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana**) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

SCRIVENER, K., SNELLINGS, R., LOTHENBACH, B. A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials, **Taylor & Francis Group**, 2016.

TERRA, I. C. C. **Carbonatação acelerada em fibrocimento compostos de resíduo de quartzito e UKP**. 2023. 79 p. Tese (Engenharia de Biomateriais) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2021.

TIAN, H.; ZHANG Y.X.; YANG, C.; DING, Y. Recent advances in experimental studies of the mechanical behaviour of natural fibre-reinforced cementitious composites. **Structural Concrete**, v. 17, n. 4, p. 564-575, 2016.

TOPÇU, IB.; ATESIN, O. Effect of high dosage lignosulphonate and naphthalene sulphonate based plasticizer usage on micro concrete properties. **Construct Build Mater**, v.120, 2016.

YAN, L.; KASAL, B.; HUANG, L. A review of recent research on the use of cellulosic fibres, their fibre fabric reinforced cementitious, geo-polymer and polymer composites in civil engineering, **Compos. Part B Eng**, v. 92, 2016.

VEIGAS, M.; NAJIMI, B.; SHAFEI, Cementitious composites made with natural fibers: Investigation of uncoated and coated sisal fibers. **Case Stud. Constr. Mater**, v.16, 2022.