



INSTITUTO FEDERAL DE SERGIPE
COORDENADORIA DO CURSO
IAN TIAGO SANTOS DA MOTA

APLICAÇÃO DE MODELO MICROMECAÂNICO FIBRA-MATRIZ COM EQUAÇÕES
CONSTITUTIVAS PARA PREVISÃO TEÓRICA DO COMPORTAMENTO MECÂNICO
DE ARGAMASSA REFORÇADA COM FIBRA TÊXTIL

ESTÂNCIA – SE
2023

IAN TIAGO SANTOS DA MOTA

APLICAÇÃO DE MODELO MICROMECAÂNICO FIBRA-MATRIZ COM EQUAÇÕES
CONSTITUTIVAS PARA PREVISÃO TEÓRICA DO COMPORTAMENTO MECÂNICO
DE ARGAMASSA REFORÇADA COM FIBRA TÊXTIL

Trabalho de conclusão de curso II apresentado ao
Instituto Federal de Sergipe como pré-requisito
para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia
Civil.

Orientador: Prof. Dr. Thiago Augustus Remacre
Munareto Lima

ESTÂNCIA – SE

2023

M917a Mota, Ian Tiago Santos da.
Aplicação de modelo micromecânico fibra-matriz com equações constitutivas para previsão teórica do comportamento mecânico de argamassa reforçada com fibra têxtil. / Ian Tiago Santos da Mota. - Estância, 2023.
86 f.; il.

Monografia (Graduação) – Bacharelado em Engenharia Civil. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe – IFS, 2024.

Orientador: Prof. Dr. Thiago Augustus Remacre Munareto Lima.

1. Resíduo de fibra têxtil. 2. Modelo numérico. 3. Materiais compósitos 4. Argamassa. 5. Fibra de poliéster. I. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe - IFS. II. Lima, Thiago Augustus Remacre Munareto. III. Título.

CDU: 624:628.4.043-033.2

À meus irmãos, Daniel e Thialle, que são minha fonte de
motivação e alegria para me tornar diariamente uma
pessoa melhor. E em memória do meu avô, que me
ensinou a olhar para o mundo sem enxergar o espectro
das dificuldades

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é fruto do esforço coletivo meu e de meus familiares. Assim, agradeço imensamente aos meus pais, que serviram de ponte para a minha formação acadêmica, são minha base para enfrentar as peculiaridades diárias e minha fonte de inspiração e força para a conclusão não só deste trabalho, mas também de todo o curso.

Agradeço ao professor Remacre, por disponibilizar seu tempo, conhecimento e zelo durante o desenvolvimento deste trabalho, bem como, por sempre tentar apresentar os melhores caminhos para mim, tanto a nível acadêmico, quanto pessoal.

Agradeço ao professor Adyson, que serviu como exemplo durante esses cinco anos de curso, me apresentou a área estrutural e me guiou nos seus meandros, sempre disposto a ensinar o que sabia.

Agradeço ao professor Luciano que foi o propulsor do meu desenvolvimento científico e tecnológico, me ensinou a caminhar pelo mundo acadêmico e contribuiu para que eu me tornasse um profissional melhor.

Agradeço a professora Aline, da Universidade Federal de Alagoas, por disponibilizar parte do seu tempo e ser acolhedora quanto à solicitação de uso dos equipamentos do seu laboratório.

Agradeço também a Julce e a Tarcis, laboratoristas do Instituto Federal de Sergipe e da Universidade Federal de Alagoas, respectivamente, por me ajudarem a desenvolver a parte experimental do trabalho, com paciência e zelo.

Agradeço a minha namorada, por servir de apoio no dia a dia e ser a luz que eu precisava para seguir em frente, diminuindo minha angústia.

Por fim, agradeço de corpo e alma a todos os ombros que me servem e me serviram de apoio. Sem a contribuição de todo mundo eu não estaria enxergando o horizonte sob as lentes que hoje possuo.

Como sou pouco e sei pouco, faço o pouco que
me cabe me dando por inteiro. (Mello, 1975)

RESUMO

As argamassas reforçadas com fibras já possuem um largo campo de aplicação na construção civil, sendo utilizadas para reforços de elementos estruturais, como vigas, produção e reforço de pavimentos e para fins não estruturais, como a produção de painéis de fachada e revestimento termo – acústico para paredes de alvenaria sanduiche. As aplicações são consequências das propriedades deste compósito, que possui melhor capacidade de absorção de energia no estado fissurado, menor aparecimento de fissuras para tensões equivalentes, redução da fissuração por retração, redução da fissuração por efeitos térmicos e aumento da resistência a abrasão. Apesar disso, ainda existe uma grande lacuna no campo numérico da aplicação e os estudos existentes são voltados principalmente para fibras de PVA e de aço. Aliado a isto, a construção civil é um dos setores que mais impactam de forma negativa o meio ambiente, o setor têxtil por sua vez também produz uma grande quantidade de resíduos que, apesar de possuírem alta capacidade de reaproveitamento são depositados majoritariamente em aterros e até lixões. Desta maneira, o objetivo deste trabalho é aplicar um modelo micro mecânico paramétrico da interação fibra-matriz para simulação numérica do comportamento mecânico de uma argamassa reforçada com resíduos de fibras têxteis da indústria Sergitex, situada no município de Estância-SE, submetida a carregamentos de tração e flexão, de modo que seja possível dimensionar e prever o comportamento do material em condições de aplicações específicas. Para isso foi preciso selecionar um modelo micro mecânico presente na literatura que representasse a condição do compósito estudado, com fibras dispersas de maneira aleatória e caracterizar todos os seus valores experimentalmente. A caracterização foi realizada no Laboratório de Materiais do Instituto Federal de Sergipe e no Laboratório de Estruturas e Materiais da Universidade Federal de Alagoas, de modo que ao final se obteve uma equação ajustada para a argamassa reforçada com fibras têxteis que indica o comportamento teórico do compósito sob carregamentos de tração.

Palavras-chave: Resíduo de fibra têxtil, Modelo numérico, Materiais compósitos, Argamassa, Fibra de poliéster.

ABSTRACT

Fiber-reinforced mortars already have a wide field of application in civil construction, being used to reinforce structural elements, such as beams, production and reinforcement of floors and for non-structural purposes, such as the production of facade panels and thermal-acoustic coatings. for sandwich masonry walls. The applications are consequences of the properties of this compound, which have better energy absorption capacity in the cracked state, less manifestation of cracks for equivalent tension, reduced cracking due to shrinkage, reduced cracking due to thermal effects and increased resistance to abrasion. Despite this, there is still a large gap in the numerical field of application and existing studies are specific mainly to PVA and steel fibers. In addition to this, civil construction is one of the sectors that most negatively impact the environment, the textile sector in turn also produces a large amount of waste which, despite having a high capacity for reuse, is mostly deposited in landfills and even dumps. Thus, the objective of this work is to apply a parametric micromechanical model of fiber-matrix interaction for numerical simulation of the mechanical behavior of a mortar reinforced with waste textile fibers from the Sergitex industry, located in the municipality of Estância-SE, subjected to loads of attraction and flexion, so that it is possible to size and predict the behavior of the material under specific application conditions. To do this, it was necessary to select a micromechanical model present in the literature that represented the condition of the trained compound, with fibers dispersed in a consulted manner and characterize all its values experimentally. The characterization was carried out in the Materials Laboratory of the Federal Institute of Sergipe and in the Structures and Materials Laboratory of the Federal University of Alagoas, so that in the end an adjusted solution was obtained for the mortar reinforced with textile fibers that indicates the theoretical behavior of the compound under tensile loads.

Keywords: Textile fiber waste, Numerical model, Composite materials, Mortar, Polyester fiber.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 - Áreas de pesquisa do compósito reforçado com fibra
- Figura 2 - Relação das propriedades das fases com o compósito
- Figura 3 - Classificação das fibras
- Figura 4 - Posicionamento de malhas para elementos bi-apoiados
- Figura 5 - Curva de tensão - deformação de compósito cimentício reforçado com fibra PVA
- Figura 6 - Ponte de transferência de tensão
- Figura 7 - Tensão das fibras x Abertura de fissuras
- Figura 8 - Curva típica de tensão - deformação de compósito sob tração
- Figura 9 - Estágios do deslocamento
- Figura 10 - Comparação do modelo de predição com resultados experimentais
- Figura 11 - Relação $P-\delta$ de arrancamento nas duas extremidades
- Figura 12 - Microfissuração
- Figura 13 - Parâmetro de Cook-Gordon
- Figura 14 - Resíduo de fibra têxtil
- Figura 15 - Curva granulométrica do agregado miúdo
- Figura 16 - Procedimento de mistura da argamassa fibrosa
- Figura 17 - Moldagem de amostras para compressão
- Figura 18 - Configuração de ensaio de compressão – AF00
- Figura 19 - Configuração de ensaio de compressão - AF10
- Figura 20 - Geometria do ensaio de dureza da matriz
- Figura 21 - Configuração de ensaio de dureza da matriz
- Figura 22 - Calibração do comprimento de onda
- Figura 23 - Configuração de ensaio da elasticidade dinâmica
- Figura 24 - Procedimento de moldagem para o ensaio de arrancamento
- Figura 25 - Moldes para o ensaio de arrancamento
- Figura 26 - Configuração do ensaio de arrancamento
- Figura 27 - Moldagem do corpo de prova para flexão
- Figura 28 - Configuração de teste de flexão
- Figura 29 - Curva de tensão versus deformação na compressão
- Figura 30 - Resultados para o corpo de prova de 5mm
- Figura 31 - Avaliação dos corpos de prova CP04 e CP05
- Figura 32 - Distribuição dos fios de poliéster e elastano
- Figura 33 - Nucleação da matriz cimentícia
- Figura 34 - Caracterização do coeficiente de atrito
- Figura 35 - Gráficos de tensão versus deformação na flexão
- Figura 36 - Configuração de teste do ensaio de tração direta
- Figura 37 - Dimensões do entalhe no corpo de prova
- Figura 39 - Procedimento de modelagem numérica
- Figura 40 - Curva teórica do compósito

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 - Propriedades mecânicas de diferentes tipos de fibra
- Tabela 2 - Comparação das propriedades da fibra de PVA na literatura
- Tabela 3 - Propriedades mecânicas da fibra de poliéster
- Tabela 4 - Caracterização dos parâmetros micro mecânicos
- Tabela 5 - Amostras produzidas
- Tabela 6 - Propriedades mecânicas e geométricas da fibra
- Tabela 7 - Análise granulométrica do agregado miúdo
- Tabela 8 - Corpos de prova utilizados para determinação da dureza da matriz
- Tabela 9 - Dados de entrada
- Tabela 10 - Corpos de provas ensaiados
- Tabela 11 - Resultados das amostras com fibras
- Tabela 12 - Resultados do carregamento dos corpos de prova
- Tabela 13 - Resultados da dureza da fratura
- Tabela 14 - Densidade de massa aparente
- Tabela 15 - Resultados do ensaio de elasticidade da matriz cimentícia
- Tabela 16 - Resultados do ensaio de arrancamento com CP de 5mm
- Tabela 17 - Constante de atrito
- Tabela 18 - Resultados da distribuição de carregamentos
- Tabela 19 - Resultados do módulo de ruptura
- Tabela 20 - Avaliação da absorção de energia
- Tabela 21 - Parâmetros usados no ajuste da equação

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CBIC	Câmara Brasileira da Indústria da Construção
EMF	Estado de Multifissuração
FRC	Fiber Reinforced Concrete
IFS	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe
LCCCF	Lei Constitutiva dos Compósitos Cimentícios Fibrosos
PTT	Ponte de Transferência de Tensão
PVA	Poliacetato de Vinilla
PRT	Pseudoestado de Rigidez de Tração
TCD	Tensão de Cisalhamento – Deslocamento
TRC	Textile Reinforced Concrete

LISTA DE SÍMBOLOS

Al_2O_3	Alumina
C_3A	Aluminato tri-cálcio
$\emptyset$	Ângulo
A_f	Área da fibra
C	Carbono
CaO	Cal
τ	Cisalhamento
τ_0	Constante de atrito
L_e	Comprimento de ancoragem da fibra
β	Coefficiente de variação linear da tensão de cisalhamento
δ	Deformação
u	Deslocamento da fibra
D_f	Diâmetro da fibra
K_m	Dureza da matriz
E_f	Elasticidade da fibra
E_m	Elasticidade da matriz
η	Efetividade da ponte de transferência de tensão
G_d	Energia de ligação química fibra – matriz
C_4AFe	Ferro aluminato tetra-cálcio
F_f	Força aplicada na fibra
F_m	Força aplicada na matriz
P_a	Força máxima aplicada sobre a fibra
P_b	Força aplicada logo após o estágio de deslizamento
CO_2	Gás carbônico
H	Hidrogênio
Fe_2O_3	Óxido de ferro
σ	Tensão
σ_f	Resistência no regime de tração da fibra
σ_m	Resistência no regime de compressão da matriz cimentícia
SiO_2	Sílica
C_2A	Silicato bi-cálcio
C_3S	Silicato tri-cálcio
V_f	Volume de fibra
V_m	Volume da matriz

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 JUSTIFICATIVA	17
1.2 OBJETIVO GERAL	19
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
2. REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1 FIBRAS	22
2.2 ARGAMASSA	26
2.2.1. ARGAMASSAS REFORÇADAS COM FIBRA	28
2.3 MODELO ANALÍTICO MICRO MECÂNICO DA FIBRA-MATRIZ	31
2.3.1. PREDIÇÃO DA PONTE DE TRANSFERÊNCIA DE TENSÃO	32
2.3.2. TENSÃO DE DESLIZAMENTO DA FIBRA	35
2.3.3. TENSÃO DE ARRANCAMENTO DA FIBRA	38
2.4 EFEITOS PONDERADORES DO MODELO MICRO MECÂNICO	41
2.4.1. MICROFISSURAÇÃO DA MATRIZ CIMENTÍCIA	41
2.4.2. EFEITO COOK-GORDON	43
3. MATERIAIS E MÉTODOS	44
3.1 PRODUÇÃO DO COMPÓSITO	45
3.1.1. CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DO RESÍDUO DE FIBRA TÊXTIL A BASE DE POLIÉSTER	46
3.1.2. GRANULOMETRIA DA AREIA	48
3.1.3. PROCEDIMENTO DE MISTURA	49
3.2 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DA ARGAMASSA	49
3.2.1. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	50
3.2.2. ENSAIO DE DUREZA DA MATRIZ CIMENTÍCIA	52
3.2.3. ENSAIO DE ELASTICIDADE	53
3.2.4. ENSAIO DE ARRANCAMENTO DA FIBRA	55
3.3 AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO COMPÓSITO	57
3.3.1. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO	57
3.1 AJUSTE DA EQUAÇÃO CONSTITUTIVA A PARTIR DOS RESULTADO DO MODELO MICRO MECÂNICO DA INTERFACE FIBRA-MATRIZ	58
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
4.1 COMPRESSÃO	60
4.2 DUREZA DA MATRIZ CIMENTÍCIA	62
4.3 ELASTICIDADE	65
4.4 ENSAIO DE ARRANCAMENTO	67
4.5 FLEXÃO	72

4.6	ENSAIO TRAÇÃO COM FISSURA ÚNICA	75
4.7	EQUAÇÃO PARAMETRIZADA	77
5.	CONCLUSÃO	80
	REFERÊNCIAS	82

1. INTRODUÇÃO

Os compósitos cimentícios reforçados com fibras são formados pela mistura de uma matriz à base de cimento e um conjunto de filamentos, de modo que o aglomerante envolva completamente todos os fios dispostos em seu interior. A junção destes dois materiais tem como principal objetivo melhorar algumas das propriedades mecânicas da matriz cimentícia quando submetida à tensões de tração e de flexão, neste sentido a tenacidade e a resistência são as preponderantes. A tenacidade é caracterizada como a energia total absorvida pelo material sob carregamento externo, a eficácia desta propriedade é verificada no compósito cimentício reforçado com fibras através do aumento de sua ductilidade (Sunaga, Koba e Kanakubo, 2021).

A obtenção do comportamento dútil no compósito está diretamente ligada a capacidade de transferência de tensão das fibras. Dependente direta das propriedades geométricas e mecânicas dos fios, tais como: comprimento de ancoragem (L_e), diâmetro (D_f), elasticidade (E_f) e resistência no regime de tração (σ_f), quando as fibras transferem as cargas no compósito elas funcionam como grampos, dificultando a desagregação molecular e aumentando a eficiência da matriz cimentícia no estado fissurado (Zhang *et al.*, 2020), este processo é usualmente chamado de Pseudoestado de Rigidez de Tração (PRT) e garante a melhoria da ductilidade do material.

Quando o compósito atinge o PRT as fibras funcionam como uma ponte de transferência de tensão (PTT) nas zonas fissuradas, distribuindo os esforços de zonas da matriz sem fissuras para outras zonas com mesmas condições. Este comportamento aumenta a eficácia do material no estado plástico, uma vez que melhora a contribuição da matriz cimentícia na distribuição de tensão. A formação das PTT's têm como consequência a constituição do Estado de Multifissuração (EMF), caracterizado pelo aparecimento de múltiplas fissuras, este processo evidencia que uma área maior da matriz está atingindo a sua resistência máxima (Venigalla *et al.*, 2022).

Apesar de ter um maior desempenho no estado de tração e de flexão, no regime de compressão axial também é possível verificar o aumento da resistência, justificada pela redução nas tensões de deformação lateral e no aumento da capacidade absorção de energia do compósito, consequência da homogeneização da distribuição das tensões (Chen, Ji e Huang, 2021).

Desta maneira, com o aumento do desempenho mecânico, proporcionado pela adição dos filamentos, os compósitos cimentícios adicionados com fibras são utilizados na construção

civil como elementos de reforço em peças estruturais. Nesta direção, a principal funcionalidade adquirida pelos elementos reforçados é a redução da fissuração por retração, uma vez que parte das tensões geradas na hidratação da matriz são absorvidas pelas fibras (Sodrolodabae *et al.*, 2021).

No campo numérico, para a predição da tensão versus abertura de fissura dos compósitos reforçados com fibras é preciso determinar inicialmente as propriedades da sua interface de contato. Segundo Marshall *et al.* (1987) o movimento que ocorre entre os dois materiais pode ser descrito pela lei de atrito de Coulomb e depende das propriedades geométricas da fibra, tais como: comprimento de ancoragem (L_e) e do seu diâmetro (D_f), e das propriedades mecânicas, como constante de atrito (τ_0), resistência (σ_f , σ_m) e elasticidade (E_f , E_m) dos fios e da matriz. É importante ressaltar que nesta predição os filamentos são considerados como elementos cilíndricos contínuos e alinhados dentro da matriz, de modo que o carregamento é distribuído ao longo do seu eixo.

Com a determinação das propriedades de interface, a predição numérica das tensões em um compósito reforçado com fibras é dado pelo cálculo da integral das forças distribuídas ao longo de um único fio, considerando a orientação e distribuição das fibras, a esta equação dá-se o nome de Lei Constitutiva dos Compósitos Cimentícios Fibrosos (LCCCF) (Lin e Li, 1997). Desta forma, é possível prever, com um certo grau de precisão, qual será o comportamento de um determinado elemento sem necessariamente ser preciso fazer ensaios experimentais.

Estudos mais recentes, como os de Yu, Chen e Leung (2018) e Zheng, Zhang e Wang (2020) avaliaram a influência da aproximação matemática das fibras como um elemento cilíndrico contínuo e da distribuição de carregamento apenas de maneira axial nos resultados, tendo como consequência a adição de alguns coeficientes ponderadores, objetivando prever numericamente alguns comportamentos vistos no campo experimental, como microfissuração da matriz cimentícia (s), movimentação da fibra no interior da matriz durante a fissuração (α), carregamento oblíquo das fibras ($f\phi$) e ancoragem da fibra nas duas extremidades.

Deste modo, é importante perceber que as características finais do compósito sofrem influência das propriedades mecânicas e geométricas da fibra e da matriz cimentícia. O diâmetro da fibra influencia diretamente na força de ligação com a matriz, bem como na porosidade final do compósito, ao passo que sua resistência está também ligada a resistência final da peça (Abbas *et al.*, 2016). Além disso, o comprimento do fio é outro fator importante, influenciando diretamente na dureza da fratura, que reflete a capacidade de propagação das fissuras e sua abertura máxima (Zhang *et al.*, 2020).

Assim, é preciso observar que para cada tipo, quantidade e comprimento de fibra usada como reforço da matriz cimentícia obtêm-se resultados diferentes, de modo que é necessário caracterizar as propriedades dos fios, da matriz e de suas interfaces sempre que os materiais forem alterados. Partindo deste aspecto, este trabalho busca modelar numericamente a interação entre uma argamassa à base de cimento e os resíduos de fibra provenientes do processo de trefilagem.

1.1 JUSTIFICATIVA

Os compósitos cimentícios reforçados com fibras já estão difundidos dentro dos meandros estruturais internacionais, normatizados pela *Model Code 2010 – First complete draft* (Fédération internationale du béton., Comité euro-international du béton. e Fédération internationale de la précontrainte., 2010) e pela recomendação técnica: *Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks* (Japan Society of Civil Engineers, 2008). No que se refere à argamassas fibrosas, para fins de recuperação estrutural, elas são regulamentadas pela ACI 549 – *Guide to design and construction of externally bonded fabric-reinforced cementitious matrix systems for repair and strengthening concrete and masonry structures* (American Concrete Institute, 2013).

Nesta direção, existe também um esforço atual das normativas brasileiras para disseminação dos compósitos cimentícios reforçados com fibras, ficando visível através da NBR 16935 – Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras — Procedimento (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2021) e NBR 14931 – Execução de estruturas de concreto armado, protendido e com fibras — Requisitos (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2023).

De modo que, o uso de argamassa reforçada com fibras dispostas de maneira aleatória está se tornando trivial para produção de pisos industriais e pavimentos rodoviários, uma vez que este tipo de aplicação exige alta resistência a abrasão e baixa capacidade de fissuração, propriedades que são melhoradas nos compósitos reforçados (Gupta, Sengupta e Rao, 2008).

Em paralelo, o valor de alguns insumos importantes para a produção civil foram bastante impactados pela pandemia do vírus SAR-COV. De acordo com a Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC) o preço dos materiais construtivos aumentaram o equivalente a 42.25% de julho de 2020 a novembro de 2021, tendo como principal responsável o aço, que teve incremento de aproximadamente 92.44% no seu preço no período em questão (Câmara Brasileira da Indústria da Construção, 2021).

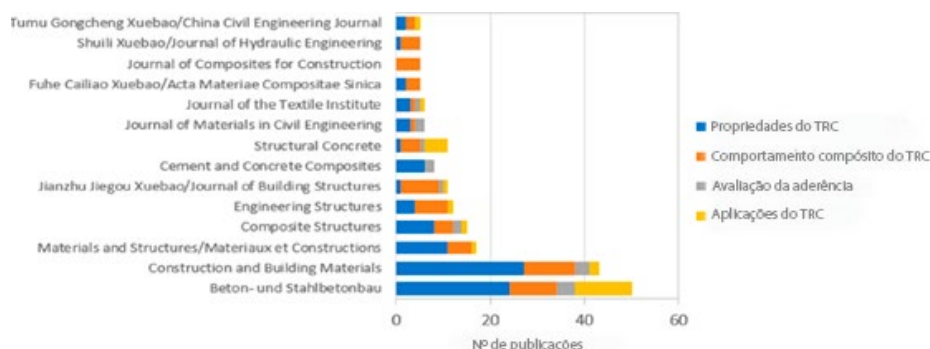
Ademais, a indústria da construção civil destaca-se como um dos principais consumidores de matéria-prima, figurando entre os líderes na geração de resíduos. Aproximadamente 40% de toda a produção é direcionada para esse setor, o qual desempenha um papel crucial na emissão de gases de efeito estufa, respondendo por cerca de 40% dessas emissões e contribuindo com 35% do total de resíduos gerados globalmente (Sodrolodabae et al., 2021). Segundo o *Global Status Report for Buildings and Construction*, a indústria da construção foi responsável por 37% de todas as emissões globais de dióxido de carbono (CO₂) (United Nations Environment Programme, 2022).

Na mesma direção, a produção mundial de fibra têxtil alcança 110 milhões de toneladas por ano, incluindo este setor industrial no ranking dos que mais afetam o meio ambiente. Na Europa mais de 10 milhões de toneladas de produtos têxteis são descartados e depositados em aterros sanitários e a estimativa é que a China produza o dobro desses valores. É importante ressaltar que de todo resíduo gerado apenas 20% é reciclado, entretanto 95% possui capacidade de ser reutilizado (Sodrolodabae et al., 2021).

Em Sergipe, por sua vez, de acordo com o Portal da Indústria a indústria têxtil representa 1,8% do polo industrial, que reflete em uma parcela de 160 milhões do PIB do estado. Estando em Estância duas indústrias do setor: Sergitex Indústria Têxtil Ltda e a Ipatinga Industria e Comércio de tecidos (Portal da Indústria, 2020).

Quanto ao desenvolvimento intelectual, os compósitos cimentícios reforçados com fibra de diversos tipos são fortemente estudados nos campos experimentais, dentre os quais se destacam as apresentações das propriedades e comportamento mecânico. Observando as produções científicas de 2010 até 2022 foram publicados 135 artigos que discutem as propriedades do material, incluindo a avaliação de durabilidade e comportamento a temperaturas elevadas, ao passo que 108 estudos foram desenvolvidos sobre o comportamento mecânico do compósito sob os estados de flexão simples e tração axial (Venigalla et al., 2022). As principais áreas de pesquisa e as respectivas revistas de publicação são apresentadas na Figura 1, é possível observar que apesar da evolução científica sobre o tema ainda existe uma lacuna muito grande no desenvolvimento de modelos numéricos. A principal explicação para isso é a complexidade de parametrização teórica, além da necessidade de caracterização da interface entre fibra e matriz cimentícia sempre que se altera o material.

Figura 1 - Áreas de pesquisa do compósito reforçado com fibra



Fonte: Adaptada de Venigalla et al., (2022)

Uma vez que a quantidade de indústrias têxteis em Estância, em comparação com o estado de Sergipe, faz da cidade uma região central para implantação de técnicas de reuso dos resíduos provenientes da produção, o presente trabalho contribui para o desenvolvimento sustentável a partir da incorporação das escórias de fibra geradas pelo polo produtivo. Além disso, a pesquisa atual está seguindo as necessidades normativas e de mercado, uma vez que busca aprofundar o conhecimento sobre os compósitos reforçados com fibra e o aumento da eficiência que, consequentemente, pode auxiliar na redução de custo dos componentes construtivos.

Por fim, o trabalho também ajuda a reduzir a lacuna de pesquisas existentes no campo numérico sobre os compósitos cimentícios fibrosos, evidente na Figura 1, uma vez que faz a caracterização dos parâmetros micro mecânicos para a argamassa reforçada com fibras têxtil e desenvolve um ajuste na equação constitutiva baseada na ponte de transferência de tensão que prevê o comportamento mecânico teórico do compósito. Com essa caracterização e ajuste é possível utilizar o modelo numérico para fazer a dosagem de novas argamassas reforçadas com a fibra têxtil usada neste trabalho, de modo que primeiro seja definido o comportamento que se espera para o compósito e só então ocorra sua moldagem.

1.2 OBJETIVO GERAL

Aplicar um modelo micro mecânico paramétrico da interação fibra-matriz para simulação numérica do comportamento mecânico de uma argamassa reforçada com resíduos de fibras têxteis da indústria Sergitex, situada no município de Estância-SE, submetida a carregamentos de tração e flexão.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisar a literatura para identificar e comparar os modelos micro mecânicos de interação fibra-matriz representados em equações constitutivas para previsão teórica do comportamento mecânico de compósitos cimentícios reforçados com fibras submetidos a carregamentos de tração e flexão;
- Determinar os parâmetros do modelo micro mecânico de interação fibra-matriz através de análise inversa, utilizando resultados experimentais de resistência à compressão, à tração, ao arrancamento e módulo de elasticidade da argamassa reforçada com fibras têxteis;
- Avaliar o modelo micro mecânico de interação fibra-matriz por meio de análise numérica para estimar a distribuição de tensões e prever a tenacidade à fratura da argamassa reforçada com fibras sob carregamentos uniaxiais e de flexão;
- Implementar um modelo micro mecânico paramétrico para simular numericamente o comportamento à ruptura e propagação de trincas da argamassa reforçada submetida a esforços de tração e flexão.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Os compósitos são elementos de múltiplas fases formados pela unificação de dois, ou mais, materiais de maneira heterogênea, de modo que as suas propriedades finais são determinadas pela união das características dos seus produtos ordinários, o objetivo final é que a combinação apresente melhorias para a aplicação em um determinado fim (Júnior, 2000). Um bom exemplo disto é o concreto armado, que une às características do concreto: resistência a compressão, adaptabilidade, resistência química, etc. as das barras de aço: elevada resistência a tração e elevado módulo de elasticidade.

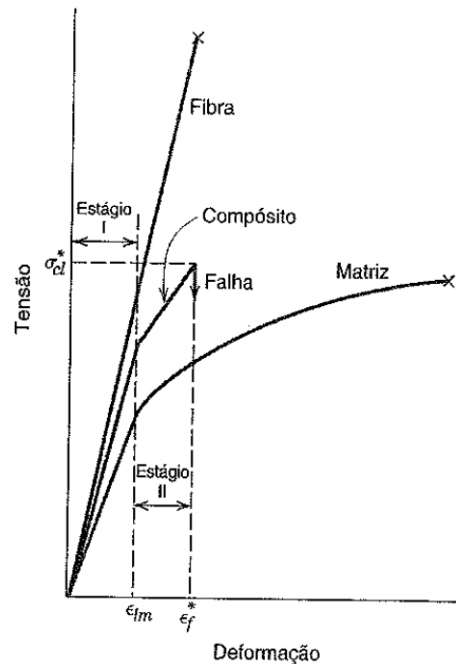
Quando os materiais compósitos são formados de apenas duas fases uma delas é chamada de matriz e a outra de dispersa. A matriz é justamente a fase de maior proporção e que, usualmente, envolve a fase dispersa. Para o caso de compósitos reforçados com fibras é preciso que as duas fases estejam ligadas de tal modo que a deformação da matriz seja igual a deformação da fase dispersa: isodeformação (Júnior, 2000). Neste sentido, quando o composto é submetido a esforços externos longitudinais é possível determinar a relação existente entre parcela de carga absorvida por cada fase através da Equação 1, onde F_f e F_m são as forças

absorvidas pela fibra e pela matriz, respectivamente, E_f e E_m são as elasticidades da fibra e da matriz e V_f e V_m os respectivos volumes de cada material utilizado.

$$\frac{F_f}{F_m} = \frac{E_f V_f}{E_m V_m} \quad (1)$$

Com as informações evidenciadas, a determinação das propriedades mecânicas de um compósito está diretamente ligada com as propriedades da matriz, da fase dispersa e da forma como ocorre a interação entre elas, além de também estar relacionada com as propriedades geométricas de cada material. Na Figura 2 é possível ver, de modo genérico, a influência entre as propriedades de cada material no resultado mecânico do composto final.

Figura 2 - Relação das propriedades das fases com o compósito



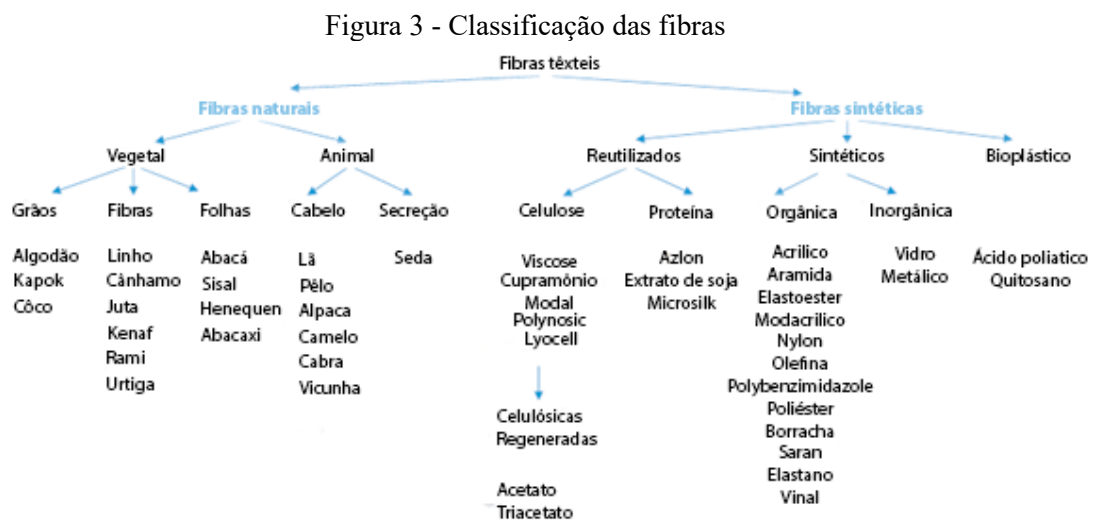
(Júnior, 2000)

Considerando que a ductilidade é caracterizada pela capacidade de um determinado material se deformar antes da ruptura e pode ser avaliada pela tenacidade do material (Sunaga, Koba e Kanakubo, 2021), é possível observar, a partir da Figura 2, que a fibra utilizada no exemplo possui característica frágil, uma vez que sua ruptura acontece logo após o estado elástico de deformação ao passo que a matriz apresentada tem caráter dúctil, uma vez que se deforma tanto em estado elástico, quanto plástico, entretanto, possui menor elasticidade em comparação com o filamento. Deste modo, a união destes dois materiais tem como resultante

um compósito que possui propriedades intermediárias, apresentando um comportamento plástico, representado pelo estágio 2 e, uma elasticidade mediana, indicada no estágio 1. Por fim, conforme indicado na Equação 1, as propriedades mecânicas de um composto é totalmente dependente das propriedades isoladas dos materiais utilizados, de modo que o compósito final possuirá um resultado usualmente médio destas características físicas.

2.1 FIBRAS

As fibras são consideradas como um corpo flexível e cilíndrico que possuem a proporção entre diâmetro e comprimento superior a cem. Elas geralmente são classificadas como naturais, sintéticas ou artificiais (Costa e Rosa, 2013). Mas outras classificações também podem ser observadas na literatura, conforme a Figura 3.



Fonte: Adaptada de Markova, (2019)

As fibras naturais são subdivididas em vegetal e animal, a vegetal possui suas propriedades determinadas a partir da proporção de celulose presente em sua composição. De maneira similar, as fibras animais são caracterizadas pela presença de proteína na sua formação e, é justamente a proporção deste elemento que define suas características mecânicas. As fibras artificiais por sua vez são definidas pela quebra da celulose seguido do processo de produção de novos materiais, sua principal funcionalidade é imitar as propriedades das fibras naturais contudo com maior controle de produção e menor custo, dentro deste grupo se destacam as fibras sintéticas, que são majoritariamente baseadas em subprodutos do petróleo, sendo que a principal forma de produção é a fiação por fusão que consiste na moldagem do fio a partir do derretimento da matéria base (Markova, 2019).

É importante ressaltar que a maior parte das fibras são baseadas principalmente em cadeias poliméricas orgânicas, sendo majoritariamente formadas, portanto, de carbono (C) e hidrogênio (H). Apesar disso, o tipo de cada fibra determina suas características geométricas e mecânicas, de modo que é possível afirmar que suas propriedades específicas são completamente diferentes, desta maneira a diferença nas características é justificada através da forma de polimerização, por adição ou por condensação, e das impurezas e aditivos usados, para o caso dos polímeros sintéticos (Júnior, 2000).

Na Tabela 1, é possível observar as variações das propriedades mecânicas para cada categoria de fibra, fazendo um comparativo direto entre o fio de boro, pertencente ao grupo sintético e a linha de algodão, que faz parte dos filamentos naturais, a diferença entre o módulo de elasticidade é de 97,2 pontos percentuais e no caso da resistência à tração é de 40%. Além disso, é possível avaliar a existência de grandes variações para filamentos pertencentes a um mesmo tipo, pode-se citar a resistência à tração do fio natural de bambu em comparação com o de linho, com uma variação média de 77,78%, enquanto o módulo de Young possui 25,88% de diferença. De maneira geral é possível verificar que, dentro de um mesmo grupo, a resistência pode mudar significativamente, ao passo que a elasticidade possui uma variação menor, entretanto o cenário se inverte quando são avaliados filamentos de categorias diferentes.

Tabela 1 - Propriedades mecânicas de diferentes tipos de fibra

Tipo da fibra	Material	Densidade ($\frac{g}{cm^3}$)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Capacidade de deformação (%)
Natural	Vegetal	1,23	187 – 773	13-31	2,5
	Linho	1,38	343 – 1035	27-6	1,2 – 3,3
	Bambu	0,6 – 1,1	140 – 230	11 – 17	3,8 – 5,8
	Algodão	1,6	220 – 840	4,5 – 12,6	2 – 10
	Sisal	1,5	80 – 855	9 – 38	9 – 38
	Coco	1,2	160 – 250	3 – 6	30
Sintética	Carbono	1,4	1100 – 4000	150 – 235	1,4 – 1,8
	Vidro	2,6	120 – 790	30 – 40	2,5
	Boro	2,48 – 2,82	500 – 2100	450	3,7
	Cerâmica	2,7 – 3,88	1967 – 2930	150 – 373	-
	Aramida	1,44	1412 – 2097	98 – 102,2	-

Fonte: Adaptada de Venigalla et al., (2022)

Além da grande variabilidade de características geométricas e mecânicas para tipos diferentes de fibras, no caso dos filamentos artificiais também foi possível observar a variação para um mesmo grupo e baseadas em um mesmo subproduto. A diferença nas características físicas em uma mesma família de fios pode ser justificada pelo formato da fibra, diâmetro, pela temperatura de conformação e pelas impurezas provenientes do ambiente produtivo, etc. É importante perceber que estes aspectos dizem respeito majoritariamente ao modo de produção, alguns avanços operacionais no campo industrial foram galgados ao longo das duas últimas décadas, entretanto, por serem de caráter privado as informações não estão disponíveis na literatura (Bentur e Mindess, 2007). Assim, fibras teoricamente iguais podem possuir propriedades distintas quando fabricadas em indústrias diferentes, na Tabela 2 é indicado a variação nas fibras de Poliacetato de Vinila (PVA) em diferentes autores.

Tabela 2 - Comparação das propriedades da fibra de PVA na literatura

Autor	Propriedades			
	Elasticidade (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)	Diâmetro (µm)	Comprimento (cm)
(Grzesiak et al., 2021)	29000	800	160	12
(Chen, Ji e Huang, 2021)	42000	1250	39	12
(Yu, Chen e Leung, 2018)	16900	1275	39	12
(Yang <i>et al.</i> , 2008)	22000	1060	39	12

Fonte: Autor, (2023)

O setor têxtil é caracterizado pelo uso dos fios para fins de vestimenta, nesta área dificilmente uma fibra é empregada de modo individual, de maneira que busca-se a união das propriedades de cada uma delas para um determinado fim, o produto final é conhecido como fibra têxtil. Neste setor, os compostos com fibras de poliéster caracterizam de 50 a 60% da produção mundial, esta predominância é consequência das propriedades deste material para aplicação em vestimenta: ele seca muito rápido (Markova, 2019).

No que diz respeito às suas propriedades químicas e mecânicas, as fibras de poliéster estão disponíveis na forma de monofilamentos e pertence ao grupo de polímeros termoplásticos,

possuem alta sensibilidade à temperatura, são hidrofóbicas na natureza e não são biodegradáveis, além disso, são caracterizadas com baixo módulo de elasticidade, e baixa tensão de ruptura, quando comparado com fibra de aço, de vidro, de carbono, ou de PVA, por exemplo (Gupta, Sengupta e Rao, 2008).

Na Tabela 3 são exibidos os valores das características mecânicas da fibra têxtil de poliéster, que pode ser comparado com a Tabela 2, em relação a fibra de PVA, com uma variação média de 75,84% para a tensão de ruptura e 90,23% para a elasticidade. Avaliando as características físicas da família de poliéster, algumas propriedades são muito diferentes, isto se deve à composição dos filamentos, como supracitado, usualmente eles não são empregados de maneira individual no setor têxtil, no trabalho de Soares (2022), por exemplo, as fibras eram compostas de 8% de elastano e 92% de poliéster.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas da fibra de poliéster

Autor	Propriedades			
	Elasticidade (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)	Diâmetro (µm)	Comprimento (cm)
(Júnior, 2000)	4100	48,3	-	-
(Gupta, Sengupta e Rao, 2008)	-	308	44,5	6
(Soares, 2022)	1530	6,97	95	9,88

Fonte: Autor, (2023)

É importante perceber que a característica química de não ser biodegradável aliado com a proporção da fibra utilizada na indústria têxtil a coloca em uma posição ruim quanto ao desenvolvimento sustentável. Segundo as informações disponibilizadas pelo relatório Setor têxtil – Produção, comércio internacional e perspectivas para Brasil, nordeste, Ceará e Pernambuco em 2021 o país representa 1,61% da exportação mundial de fibra têxtil, o que o deixa na décima posição no ranking (Junior, 2021).

Apesar de representar uma parcela relativamente baixa em proporção mundial, conforme reportagem da CNN Brasil - (Benaouda e Puente, 2022) ela representa, em termos numéricos, 4 milhões de toneladas de resíduo têxtil produzido por ano. Além disso, em outra reportagem fornecida pela Folha de São Paulo é revelado que de toda produção apenas 20% é reutilizada (Ceará e Buono, 2021).

Além disso, apesar da disseminação da fibra para a produção de têxteis sua exploração para outros fins, principalmente para o setor construtivo, ainda possui uma grande lacuna bibliográfica. A maior parte das pesquisas estão voltadas para fibras de PVA, material base nos estudos de Yang et al. (2008), Zhang et al. (2020), Yu, Chen e Leung (2018) e Mercuri, Vailati e Gregori (2023).

2.2 ARGAMASSA

As argamassas por sua vez são materiais compósitos consagrados na construção civil, sua composição é formada da mistura entre pasta e agregado miúdo, normalmente areia natural. A pasta é obtida pela mistura de um ou mais aglomerantes de origem mineral com água. Usualmente não são utilizadas como material isolado e sim como componente de um subsistema que precisa interagir com o substrato e com o ambiente, necessitando de atributos como: capacidade de retenção de água, durabilidade, estabilidade química, estabilidade física e baixa elasticidade (Recena, 2012). A exigência das propriedades está diretamente ligada ao tipo de uso: revestimento, reforço estrutural, etc.

Elas podem ser classificadas em função da forma de endurecimento, da resistência a umidade, da dureza do agregado, quanto ao volume da pasta, ao emprego e ao teor de aglomerante utilizado. Quando analisado a forma de endurecimento as argamassas podem ser hidráulicas ou aéreas, olhando para os aglomerantes utilizados elas podem ser de cimento, de cal, de gesso ou mistas, outras nomenclaturas podem ser encontradas na NBR 13529:2013 – Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Terminologia (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013).

É importante ressaltar que independente do aglomerante utilizado a presença de ar na mistura influencia de maneira incisiva a sua durabilidade e propriedades mecânicas. Proveniente do processo de mistura sua permanência no compósito é consequência da falta de adensamento, que não é requisito obrigatório para maioria das aplicações (Recena, 2012).

No que tange as argamassas produzidas com aglomerantes cimentícios elas são confeccionadas com o cimento Portland, caracterizado como um aglomerante hidráulico com comportamento frágil, uma vez que possui baixa absorção de energia no estado pós fissurado (Ribeiro, Jaramillo Nieves e Bernardin, 2023). O cimento possui como constituintes fundamentais a cal (CaO), a sílica (SiO_2), a alumina (Al_2O_3) e o óxido de ferro (Fe_2O_3), também são encontrados outros compostos e impurezas, entretanto, em menores proporções de modo que para ser produzido, os componentes supracitados devem passar pelo processo de queima,

o que garante a formação, por meio de combinação química, dos seguintes compostos: silicato tri-cálcio (C_3S), silicato bi-cálcio (C_2A), aluminato tri-cálcio (C_3A) e ferro aluminato tetra-cálcio (C_4AF) (Bauer, 2000). As propriedades da pasta cimentícia e, conseqüentemente, da argamassa, estão diretamente ligadas às proporções destes elementos químicos, o que garante a capacidade de determinar a composição potencial do cimento para finalidades específicas.

Desta maneira, é importante esclarecer a possibilidade de predeterminar suas propriedades baseando-se no emprego do compósito cimentício. Por exemplo, para fins de recuperação estrutural é preciso se ater muito mais à resistência mecânica do que no caso de argamassas de assentamento. Usualmente a composição química da pasta é sumarizada na relação proporcional entre cimento, água e agregado miúdo (Recena, 2012)

Ademais, as pastas cimentícias possuem, dentro das propriedades mecânicas características, uma elevada resistência a compressão axial quando comparado à outros estados de esforços, estando esta propriedade diretamente relacionada a quantidade de silicato tri-cálcio (C_3S) formado durante o processo de queima. Todavia, a quantidade deste mesmo elemento está diretamente relacionada com o calor de hidratação da argamassa, visto que é um subproduto do aluminato tri-cálcio (C_3A) (Bauer, 2000).

O calor de hidratação é um dos responsáveis pela manifestação de fissuras, principalmente em elementos de grandes volumes: como o endurecimento acontece no sentido externo – interno, o calor proveniente da hidratação do cimento ocasiona a expansão volumétrica da região central, que ainda está em estado fresco, tensionando a região mais externa, que começa a entrar no seu estado endurecido. Além do aumento de temperatura causado pela hidratação a transferência de calor proveniente do ambiente também é um fator determinante para o aparecimento de fissuras, como já dito, este comportamento é decorrência da baixa absorção de energia no estado pós fissurado (Ribeiro, Jaramillo Nieves e Bernardin, 2023).

No caso de elementos que possuem sua área de aplicação muito maior que sua espessura, como pavimentos, revestimentos e reforços estruturais, o principal patógeno é a secagem rápida ocasionada pela evaporação da água que não foi usada no processo de hidratação e, da mesma maneira, gera fissuras na argamassa (Recena, 2012).

Deste modo, é visível a necessidade de melhoria nas propriedades da argamassa para fins de recuperação de elementos estruturais que estão submetidos a esforços de flexão, cisalhamento ou ao regime tensões oblíquas, uma vez que a solicitação externa imposta ao compósito cimentício não está dentro do regime de compressão axial. Além disso, as

propriedades também precisam ser aprimoradas para as aplicações em que a temperatura esteja dentro das principais características de uso, durabilidade e estado último limite, como é o caso da recuperação e produção de pavimentos.

2.2.1. ARGAMASSAS REFORÇADAS COM FIBRA

O avanço da tecnologia dos materiais construtivos contribuiu para a busca de componentes cada vez mais eficientes e menos onerosos, de modo que para sistemas estruturais busca-se principalmente elementos com melhores propriedades de resistência mecânica, boas condições de uso e baixa densidade específica (Venigalla *et al.*, 2022). Deste modo, a incorporação de fibras na argamassa se apresenta como um caminho potencial para resolução de duas problemáticas atuais: grande quantidade de resíduo de fibras que são geradas anualmente e necessidade de aumento da eficiência do compósito.

Vários tipos de fibras podem ser utilizadas como elemento de reforço da argamassa ou unicamente da matriz cimentícia, as mais comuns na bibliografia são: fibra de carbono, de vidro, de basalto, de aço, de PVA, de polietileno, etc. Como estes materiais, por sua vez, possuem propriedades diferentes, consequentemente atuam de maneiras distintas em conjunto com a matriz.

Um estudo realizado por Chen, Ji e Huang (2021) comparou a influência da adição de fibra de PVA, de polietileno e de aço em compósitos cimentícios. Todas as fibras foram incorporados a uma taxa de 2% do volume a uma argamassa cimentícia com resistência à compressão de 60 MPa. As fibras de PVA aumentaram a resistência à compressão em cerca de 5,2% de contribuição, em comparação com o traço padrão, ao passo que as fibras de aço aumentaram em 48,1% esta propriedade, contudo o comportamento pós fissurado do compósito reforçado com fibra de PVA se mostrou mais eficiente que aquele reforçado com fibra de aço, uma vez que obteve maior tenacidade ao passo que manteve a dimensão máxima da abertura de fissuras relativamente igual. As fibras de polietileno resultaram na maior absorção de energia do compósito, em comparação com os outros filamentos, entretanto, não contribui de maneira efetiva para a redução das aberturas das fissuras.

No que tange a incorporação das fibras de poliéster, em um estudo realizado por Gupta, Sengupta e Rao (2008) foi obtido como resultado que para um argamassa reforçada com até 2% de fibra a resistência à compressão aumentou em 17,3%, entretanto, a resistência à flexão da peça não sofreu alteração significativa, correspondendo a 6%. Quanto à durabilidade, avaliando o compósito submetido a condições aceleradas de molhagem e secagem, ela ficou

equiparada ao concreto armado sob condições semelhantes, de modo que a perda da resistência devido à abrasão e a retração por secagem foram consideravelmente reduzidas, representando 25% e 51,61%, respectivamente.

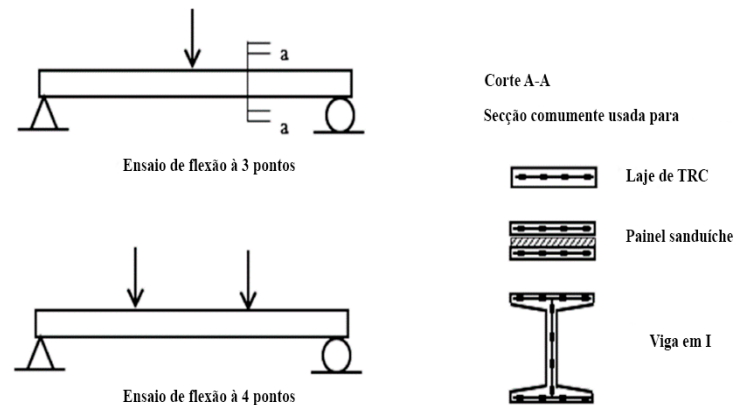
A partir destes pontos é possível observar que as propriedades finais do compósito cimentício reforçado com fibra está intrinsecamente ligado as propriedades da fibra e a sua relação com a matriz cimentícia. Fibras com caráter hidrofóbico possuem força química de ligação com a matriz menor que aquelas que não são, por consequência apresentam maiores dificuldades para controlar a abertura de fissuras, esta última também é diretamente proporcional ao seu diâmetro, além de a tensão máxima de absorção do compósito estar ligada com a resistência a tração da fibra (Chen, Ji e Huang, 2021).

É importante ressaltar que a forma de disposição da fibra na matriz também é fator primordial para a determinação das propriedades mecânicas do compósito, além da quantidade inserida. Neste sentido, composições de compósito reforçado com fibra de PVA com mais de 2% de incorporação de fibra prejudicam as propriedades da matriz, para o caso de fibras de aço o teor máximo é de 4% (Zhang *et al.*, 2020).

A disposição das fibras na peça influencia diretamente as propriedades finais do reforço. Existem dois principais tipos de alocação das fibras: i) fibras dispostas em malhas previamente confeccionadas e ii) fibras incorporadas de maneira aleatória. O reforço de elementos cimentícios com fibras em malha contribui de maneira muito mais eficiente nas propriedades mecânicas, principalmente para peças submetidas à flexão. Este tipo de reforço já é utilizado em peças estruturais de concreto armado com a finalidade de aumentar a resistência, seja por erros construtivos, por alterações de carregamentos ou simplesmente para recuperação da peça (American Concrete Institute, 2013).

Neste tipo de posicionamento, a distância entre malhas é calculado, de modo que as fibras sejam alocadas nas regiões de maior solicitação, como evidenciado na Figura 4. Estruturas cimentícias reforçadas apenas com malhas de fibras são conhecidas como *Textile Reinforced Concrete* (TRC) e possuem algumas vantagens competitivas: não precisam de cobrimento, uma vez que a fibra não oxida, consequentemente as peças são mais esbeltas e mais leves, possuem menos gases de efeito estufa agregado, uma vez que o processo de produção das malhas emitem menos óxidos à atmosfera, além de gastar menos energia para confecção, estando então alinhada com as propostas de desenvolvimento sustentável (Venigalla *et al.*, 2022).

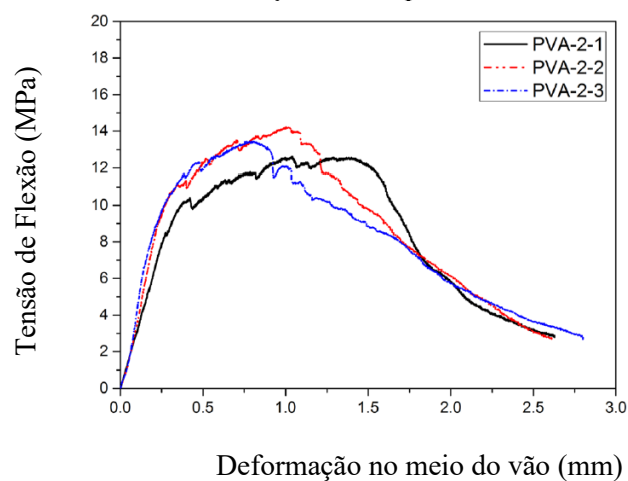
Figura 4 - Posicionamento de malhas para elementos bi-apoiados



Fonte: Adaptada de Venigalla et al., (2022)

As fibras incorporadas de maneira aleatória são conhecidas como *Fiber Reinforcement Concrete* (FRC) e por sua vez possuem menor rigor de posicionamento e nenhum controle neste sentido, assim, não há garantia de que todas as fibras irão atuar de maneira eficiente e na sua capacidade máxima para absorção dos esforços. Contudo, este tipo de reforço da matriz cimentícia reduz a iniciação e propagação de fissuras, aumentando, por consequência, a dureza da matriz e melhorando o comportamento na fase plástica do elemento (Chen, Ji e Huang, 2021). Desta maneira, é possível afirmar que a matriz cimentícia atinge um comportamento mais dúctil, uma vez que após o limite de elasticidade ela ainda absorve uma parcela relativamente alta de energia, atuando assim no regime plástico, conforme apresentado na Figura 5. É importante ressaltar que este resultado varia conforme a fibra utilizada, assim como as demais propriedades.

Figura 5 - Curva de tensão - deformação de compósito cimentício reforçado com fibra PVA



Fonte: Adaptado de Chen, Ji e Huang, (2021)

A eficiência do comportamento do compósito reforçado com fibra é função da resistência à tração da fibra, do seu diâmetro, da sua relação com a água, do seu comprimento e da capacidade de ser agredida pela matriz cimentícia. Uma revisão bibliográfica feita por Venigalla et al. (2022) revelou que a maioria dos artigos publicados sobre o tema apresentam como motivo principal de falha o arrancamento da fibra, evidenciando que o comprimento de ancoragem e, consequentemente o comprimento da fibra, é um fator determinante para a distribuição de tensão, além disso, em outro estudo realizado por Sodrolodabae et al. (2021) foi possível perceber que quando as fibras são agredidas pela matriz cimentícia ou não oferecem resistência às intempéries e ciclos de secagem e molhagem, chegam a perder cerca de 50% da sua capacidade mecânica.

Este tipo de reforço com fibra também possui bastante aplicações práticas já difundidas, assim como o TRC, principalmente em sistemas cuja principal solicitação advém de eventos sísmicos e em locais onde as fissuras são um problema potencial, como barragens, canais de irrigação e fundação de pontes (Zhang *et al.*, 2020). Por fim, com as devidas considerações levadas em conta e corretamente projetadas as fibras podem formar uma ponte de transferência de tensões capaz de transferir os esforços no compósito e melhorar de uma forma controlada as suas capacidades mecânicas (Lin e Li, 1997).

No campo numérico, é possível avaliar a formação das pontes de transferência de tensão e o comportamento mecânico do compósito sob carregamentos externos. Estas predições são possíveis graças ao desenvolvimento do modelo micro mecânico da interface fibra-matriz, que serve como equação geral para compósitos cimentícios reforçados com fibras.

2.3 MODELO ANALÍTICO MICRO MECÂNICO DA FIBRA-MATRIZ

Um modelo analítico micro mecânico é uma representação numérica teórica do comportamento de um determinado material a partir das suas propriedades microscópicas diretas e indiretas, tais como atrito, energia de ligação e dureza da fratura. Usualmente essa representação acontece por meio de uma equação padrão, chamada de equação constitutiva, que relaciona todos esses parâmetros e fornece o resultado para uma determinação de comportamento. Para o caso dos compósitos cimentícios reforçados com fibras existem várias formas de relacionar as variáveis micro mecânicas em uma equação, uma dessas maneiras é conhecida como modelo constitutivo de Oller. Este é um modelo genérico que funciona para compósitos dúcteis e frágeis e está baseado no comportamento não linear do material, usando como base a função clássica de Mohr-Coulomb, evidenciando por tanto, o uso da matriz de

plasticidade nas considerações de cálculo e os fundamentos de elementos finitos (Oñate *et al.*, 1988).

Entretanto, devido a sua generalidade, a complexidade do modelo também é considerável, exigindo um maior poder matemático para formulação ou ajuste. Partindo disso outras equações constitutivas baseadas nos modelos micro mecânicos da interface fibra-matriz surgiram, sendo também, mais específicas. Uma delas é o modelo de arrancamento da fibra, proposta por Wang, Li e Backer, (1988), fundamentalmente baseada na Lei de Coulomb, considera apenas os parâmetros micro mecânicos referentes ao atrito no momento de arrancamento da fibra. Este modelo entretanto, apresentou limitações severas para compósitos que apresentam comportamento dúctil.

Assim, Lin e Li, (1997) propuseram um novo modelo, que englobasse o compósitos de comportamento dúctil, chamados também de compostos com comportamento de pseudo-endurecimento, esta equação ficou conhecida como modelo da ponte de transferência de tensão. Nesta equação é adicionada o conceito de fase de deslizamento da fibra na matriz, além de uma breve consideração do ângulo de inclinação das fibras, o que consequentemente gerou resultados mais precisos.

É importante ressaltar que o trabalho de Lin e Li, (1997) se fundamentou na unificação de modelos micro mecânicos mais simples. A principal característica deste modelo: a ponte de transferência de tensão, foi descrita pela primeira vez por Marshall e Cox, (1987), entretanto não considerava parâmetros importantes, como a fase de deslizamento, a inclinação das fibras, o comprimento de embutimento, etc.

Apesar disso, este modelo ainda possui algumas lacunas e imprecisões, decorrentes do processo de carregamento na fibra e visualizadas no campo experimental. O modelo micro mecânico deste trabalho se baseia principalmente no discorrido por Lin e Li, (1997) com o acréscimo de efeitos ponderadores que consideram as perdas de resistência no processo de carregamento, conforme será discutido.

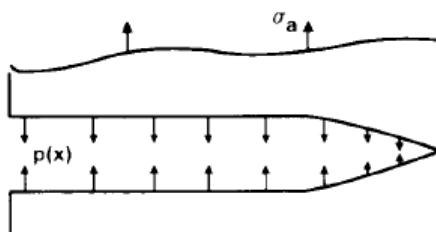
2.3.1. PREDIÇÃO DA PONTE DE TRANSFERÊNCIA DE TENSÃO

Os compósitos cimentícios reforçados com fibras possuem como principais finalidades na construção civil o preenchimento de rachaduras, a melhoria da dureza da peça, o aumento da capacidade da absorção de energia e a melhoria do comportamento pós fissuração do elemento (Sodrolodabae *et al.*, 2021), sendo todas essas funcionalidades verificadas em testes experimentais. A maior eficiência destes parâmetros garantem uma redução do comportamento

frágil do compósito e são possíveis graças ao sistema de ponte de transferência de tensão formado pelas fibras.

Após o compósito entrar em seu estado fissurado as tensões impostas à peça são concentradas nas proximidades dos planos das fissuras, sendo absorvidas e transferidas pelo filamento perpendicularmente, para regiões da matriz sem danos localizados, usualmente as regiões de ancoragem, a este processo dá-se o nome de Ponte de Transferência de Tensão (PTT) (Chen, Ji e Huang, 2021). Este processo de uniformização de carregamento pode ser visto na Figura 6, onde σ_a representa a tensão imposta à peça e $p(x)$ o carregamento distribuído para cada fibra por comprimento de fissura.

Figura 6 - Ponte de transferência de tensão



Fonte: Adaptado de Marshall e Cox, (1988)

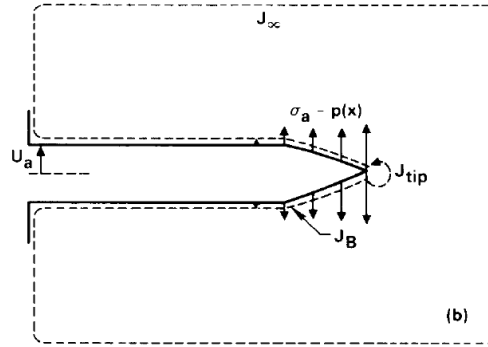
Esta característica na distribuição de tensões do compósito é fundamental para a abertura de novas fissuras menos espessas, gerando um estado reconhecido como Estado Multifissurado (EMF). É justamente esta propriedade que garante o aumento na eficiência de uso da matriz com o aumento da capacidade de absorção de energia.

Uma outra característica crucial para o início do EMF são as propriedades da matriz cimentícia. Quando o compósito atinge seu estágio plástico a PTT é devidamente utilizada, entretanto, a transferência de tensão na fibra deve ser menor que a resistência a fissuração da matriz, também conhecido como dureza da matriz, caso este requisito não seja atendido a fissura irá aumentar seu comprimento indefinidamente com um ínfimo aumento das tensões (Marshall e Cox, 1988). Este comportamento e a influência da tensão da fibra para o aumento no comprimento da fissura pode ser observado na Figura 7, onde σ_a é a tensão aplicada no compósito e $p(x)$ a parcela de tensão uniformemente distribuída nas fibras.

A tensão necessária para estender o comprimento de fissuras pequenas é uma função decrescente da sua própria extensão inicial, entretanto, para aberturas maiores, que representam a maior parte dos casos para compósitos feitos com matriz cimentícia esta tensão se aproxima de um valor constante, entrando no Estado de Fissura Estável (EFE) (Marshall e Cox, 1988).

As primeiras contribuições para prever numericamente a tensão limite foram realizadas por Marshall e Cox (1988) através do método da integral – J.

Figura 7 - Tensão das fibras x Abertura de fissuras



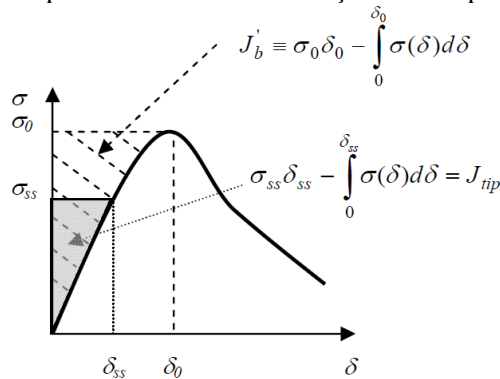
Fonte: Marshall e Cox, (1988)

O Método da Integral – J tem como principal propósito avaliar a formação da PTT no compósito, de modo que a tensão máxima a ser distribuída na fibra não precisa ser quantificada, é preciso apenas que a energia da fratura J_{tip} , definida como a energia necessária para que ocorra a primeira abertura, seja menor que a energia complementar J_B , que é toda a energia absorvida pelo compósito até alcançar a tensão máxima, representadas na Equação 2 e Equação 3, respectivamente, onde K_m é a dureza de fratura da matriz, E_m o seu módulo de Elasticidade, σ_0 a tensão máxima atingida pelo compósito e δ_0 a respectiva abertura de fissura. (Yang *et al.*, 2008). Este requisito está graficamente expresso na Figura 8, para uma curva de tensão – deformação típica de compósitos sob tração.

$$J_{tip} = \frac{K_m^2}{E_m} \quad (2)$$

$$J_B = \sigma_0 \delta_0 - \int_0^{\delta_0} \sigma(\delta) d\delta \quad (3)$$

Figura 8 - Curva típica de tensão - deformação de compósito sob tração



Fonte: Yang *et al.*, (2008)

A contribuição da fibra na PTT é dada pela distribuição axial de tensão ao longo do seu comprimento e pode ser calculada pela Equação 4, onde $P(\delta, \emptyset)$ é a força transmitida pela fibra para uma dada inclinação e abertura de fissura, L_f é o comprimento da fibra, V_f o volume de fibra, A_f a área da fibra, $\emptyset$ a inclinação da fibra e δ a abertura da fissura para uma determinada tensão σ .

Neste modelo preditivo é considerado também a influência da posição da fibra dentro do compósito e sua inclinação, uma vez que para tensões impostas de maneira angular a fibra não atua em sua capacidade máxima, como será discutido adiante (Zheng, Zhang e Wang, 2020).

$$\sigma(\delta) = \frac{V_f}{A_f} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{L_f}{2}} P(\delta, \emptyset) \sin \emptyset \frac{2}{L_f} d\emptyset dl \quad (4)$$

É possível perceber que o funcionamento mecânico do compósito reforçado com fibras dispostas de forma aleatória é governado por algumas propriedades microscópicas, tais como: força de atrito na interface da fibra (τ), comprimento de ancoragem da fibra na matriz (L_e), resistência da fibra (σ_f) e da matriz (σ_m), diâmetro da fibra (D_f) e por fim o módulo de Young da matriz cimentícia (E_m) e da fibra (E_f), postas em evidência no momento da movimentação na interface entre o fio e a matriz cimentícia. Neste aspecto, existem dois estágios importantes, i) o momento de deslizamento da fibra e ii) a etapa de arrancamento. O deslizamento do filamento sempre acontecerá em um compósito cimentício fibroso e é justamente onde ocorre a acomodação e a transferência máxima de tensão, após isto as cargas são uniformizadas e tendem a entrar em um patamar constante (Carozzi *et al.*, 2016), o arrancamento do fio, por sua vez, é consequência da primeira fase e nem sempre ocorrerá, dependendo de algumas variáveis como constante de atrito entre fibra e matriz (τ_0) e resistência da fibra (σ_f) (Yang *et al.*, 2008).

2.3.2. TENSÃO DE DESLIZAMENTO DA FIBRA

O deslizamento da fibra no compósito foi estudado por Carozzi *et al.* (2016) para reforços organizados em redes perpendiculares. Considerando que variação do carregamento é paralelo à fibra, o atrito pode ser calculado conforme a Equação 5, onde p é o perímetro do fio e $\frac{N}{dx}$ o carregamento axial por comprimento de fio, e que a linha elástica da fibra é determinada

pela Equação 6, com E representando a elasticidade, A a área e os demais parâmetros conforme a Equação 5, a equação de compatibilidade de um filamento é indicada na Equação 7.

$$\tau = \frac{1}{p} \frac{N}{dx} \quad (5)$$

$$\frac{N}{dx} = EA \frac{d^2 u}{dx^2} \quad (6)$$

$$\frac{d^2 u}{dx^2} - \frac{p}{EA} \tau = 0 \quad (7)$$

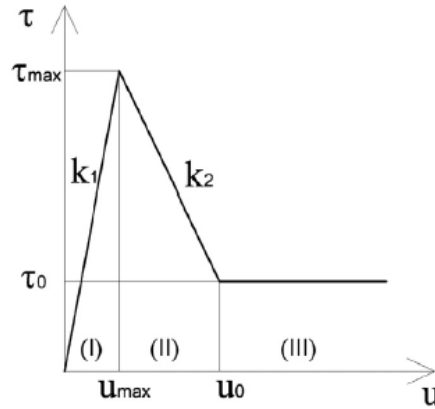
A equação de compatibilidade de um fio, apresentada na Equação 7, define a relação entre a força de arrancamento da fibra e o deslizamento gerado, entretanto é necessário um modelo confiável de cisalhamento-deslocamento para utilizá-lo. Para isso, considera-se a lei de Tensão de Cisalhamento – Deslocamento (TCD) para interface entre matriz cimentícia e fibra têxtil.

A lei de TCD descreve o comportamento do deslizamento em três estágios, conforme observado na Figura 9. No primeiro, o fio está completamente embutido na matriz e o atrito aumenta proporcionalmente com o deslocamento do fio $\tau = k_1 u$. Quando a tensão máxima de cisalhamento é alcançada entra-se no estágio dois, conhecido como fase de amolecimento e, ocorre justamente o contrário: o atrito reduz proporcionalmente ao deslocamento do fio, conforme indicado na Equação 8, onde k_1 e k_2 são as inclinações das curvas para as respectivas fases, u o deslizamento e $\tau_{\max}$ a tensão máxima de cisalhamento. Por fim, alcança-se a terceira fase onde o atrito se torna constante e o deslocamento uniforme, conforme Equação 9 (Carozzi *et al.*, 2016).

$$\tau = -k_2 u + \tau_{\max} \left(\frac{k_1 + k_2}{k_2} \right) \quad (8)$$

$$u_0 = \frac{\tau_0}{k_2} + \tau_{\max} \left(\frac{k_1 + k_2}{k_1 k_2} \right) \quad (9)$$

Figura 9 - Estágios do deslocamento



Fonte: Carozzi et al., (2016)

Deste modo, o deslizamento pode ser entendido como uma propagação da fissura na interface fibra – matriz, após este estágio a ponte de transferência de tensão é governada apenas pelo atrito e seguindo as prerrogativas de Yang et al (2008), a tensão absorvida pode ser calculada seguindo a Equação 10, onde τ_0 é a constante de atrito, u é o deslizamento, G_d é a energia de ligação entre fibra e matriz, calculado conforme a Equação 11, E_f é a elasticidade da fibra, D_f é o diâmetro da fibra e η é o parâmetro que expressa a taxa de efetividade da rigidez da fibra para a rigidez da matriz, calculado conforme a Equação 12.

$$\sigma_{debbonding} = 2 \sqrt{(\tau_0 u + G_d) \left(\frac{2E_f(1+\eta)}{D_f} \right)} \quad (10)$$

$$G_d = \frac{2(P_a - P_b)^2}{\pi^2 E_f D_f^3} \quad (11)$$

$$\eta = \frac{V_f V_m}{E_f E_m} \quad (12)$$

A energia de ligação (G_d), está diretamente relacionada com a ligação química existente entre a fibra e a matriz, podendo ser avaliada após o estágio de deslizamento da fibra, considerando a tensão máxima observada (P_a) e a tensão que indica o fim da fase de deslizamento (P_b) (Yu, Chen e Leung, 2018). Todas as outras propriedades possuem as mesmas definições já introduzidas. Deve ser percebido, portanto, que a fibra está ligada por atrito à matriz e a fase de deslocamento corresponde justamente a ativação da resistência total desta propriedade.

2.3.3. TENSÃO DE ARRANCAMENTO DA FIBRA

Após a fase de deslizamento da fibra a PTT entre a fibra e a matriz é governada exclusivamente pelo atrito na interface (τ_0), deste modo, quanto maior a força de ligação (G_d) existente entre os elementos maior também será a absorção de energia (Yang *et al.*, 2008). Partindo deste ponto, entender a relação entre a tensão empregada na fibra, denominada Tensão de Arrancamento ($\sigma_{\text{pull-out}}$) e a abertura de fissuras (δ) do compósito é a base fundamental para determinar a absorção de energia total da PTT. Considerando que a distribuição de tensão na fibra ocorre de modo axial, conforme observado na Figura 6, a relação entre $\sigma_{\text{pull-out}}$ e δ pode ser prevista pela Equação 13, onde L_e é o comprimento de ancoragem, τ_0 é a constante de atrito, D_f é o diâmetro da fibra, u é o deslocamento, δ_c é a abertura da fissura, calculada conforme a Equação 14, e β é o coeficiente que representa a variação linear da tensão de atrito no estágio de deslizamento, também chamado de coeficiente de resistência ao deslizamento (Lin e Li, 1997).

$$\sigma_{\text{pull-out}} = \left[\frac{\tau_0}{D_f} (L_e - u - \delta_c) \right] \left[1 + \frac{\beta(u - \delta_c)}{D_f} \right] \quad (13)$$

$$\delta_c = \frac{2\tau_0 L_e^2 (1+\eta)}{E_f D_f} + \sqrt{\frac{8G_d L_e^2 (1+\eta)}{E_f D_f}} \quad (14)$$

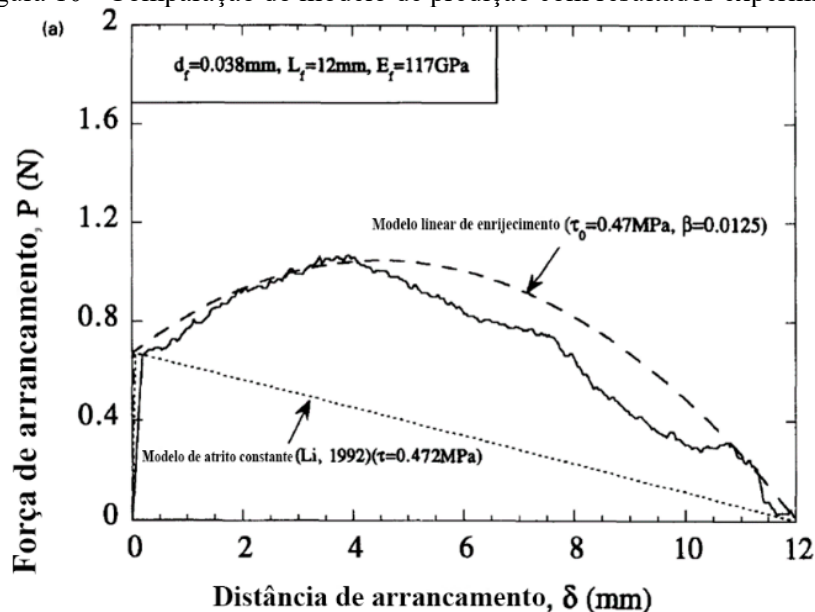
Todavia, uma vez que não existem garantias de que a distribuição de tensão matriz – fibra ocorrerá sempre de maneira axial é preciso considerar a perda na distribuição destes carregamentos, principalmente para fibras com baixa resistência lateral e de flexão. A influência da distribuição oblíqua de forças é sumarizada através do coeficiente de amortecimento (f) que faz parte das propriedades do compósito relativo a fibra (Yang *et al.*, 2008) e pode ser calculada através da Equação 15, onde ϕ é a inclinação considerada para a fibra.

$$\sigma_{fu}(\phi) = \sigma_{fu}(0)e^{-f\phi} \quad (15)$$

Conforme evidenciado por Lin (1997) para fibras sintéticas de polietileno orientadas de forma aleatória no compósito, o modelo de predição para a tensão de arrancamento ($\sigma_{\text{pull-out}}$), representados pelas equações que vão de 10 a 15, obteve boa acurácia quando comparado com

o modelo experimental, vide curva sólida da Figura 10. É preciso observar também, nos mesmos resultados, a importância da consideração da tensão de deslizamento ($\sigma_{\text{debbonding}}$), representada pela curva tracejada, uma vez que com a consideração da variação da tensão de atrito até a obtenção de uma constante (τ_0), obteve-se uma precisão maior para o estado pós-fissurado quando comparado com a consideração simples da tensão de cisalhamento como uma única constante, indicado pela curva pontilhada.

Figura 10 - Comparação do modelo de predição com resultados experimentais



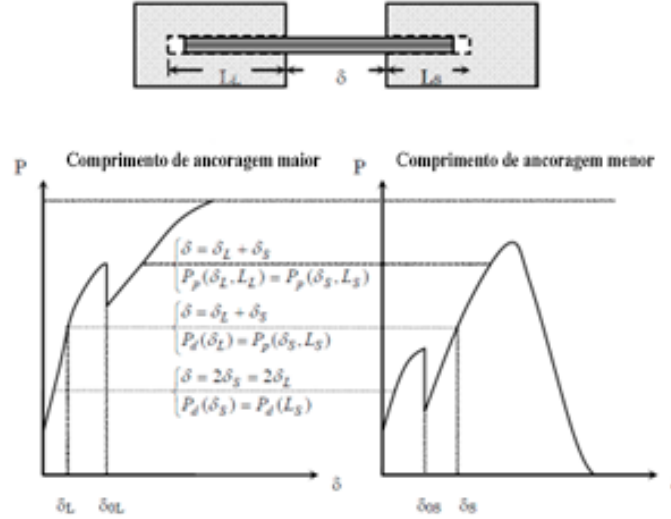
Fonte: Adaptado de Lin e Li, (1997)

É importante ressaltar que para o desenvolvimento das equações que vão de 5 à 14 foi considerado o comportamento de arrancamento de uma extremidade da fibra, neste modelo considera-se apenas um lado da ancoragem da fibra como efetiva, usualmente o lado com menor comprimento de embutimento (L_e), uma vez que possui a menor capacidade de energia de absorção, comparado com o outro lado (Yang *et al.*, 2008).

Todavia, é preciso ressaltar que, para fibras suficientemente resistentes, com capacidade de não romper durante o processo de deslizamento e com alta resistência de atrito, a consideração da tensão de arrancamento ($\sigma_{\text{pull-out}}$) e abertura de fissuras (δ) pode ser feita avaliando as duas extremidades da fibra. Nestas condições a força submetida às extremidades são iguais, devido ao equilíbrio de esforços, entretanto as tensões são diferentes, uma vez que o comprimento de ancoragem de cada uma das pontas também o são, assim, a força de arrancamento máxima será a mesma para as duas regiões. Por fim, a abertura das fissuras são a soma dos deslocamentos de cada um dos lados, calculados separadamente conforme a equação

18 (Wang, Li e Backer, 1988). Esta descrição pode ser vista com maiores detalhes na Figura 11, além da respectiva correspondência entre as forças de arrancamento e abertura de fissuras fornecidas pelas duas pontas.

Figura 11 - Relação P- δ de arrancamento nas duas extremidades



Fonte: Adaptado de Yang et al., (2008)

Por fim, a força de deslizamento e a força de arrancamento, avaliando a contribuição do estágio de deslizamento e absorção de energia das duas extremidades da fibra, podem ser numericamente estimadas através das equações 16 e 17, respectivamente, de modo que a abertura de fissura (δ), apresentada na Equação 18, é então a soma dos deslizamentos das duas extremidades, onde δ_L representa o lado de maior ancoragem e δ_S o de menor, com os outros parâmetros já definidos anteriormente.

$$P_d(\delta) = \pi \sqrt{(\tau_0 \delta + G_d) \left(\frac{E_f D_f^3 (1+\eta)}{2} \right)} \quad (16)$$

$$P_p(\delta, L) = \pi \tau_0 (L - \delta + \delta_0) (D_f + \beta (\delta - \delta_c)) \quad (17)$$

$$\delta = \delta_L + \delta_S \quad (18)$$

Da mesma maneira, como já discutido e apresentado na Figura 11, as forças são iguais para cada uma das pontas da fibra. Para o caso das duas pontas estarem no estágio de arrancamento, após o deslizamento total, a predição numérica é feita através da Equação 19,

enquanto que quando elas estão em estágios diferentes, arrancamento *vs.* Deslizamento, é considerada a Equação 20.

$$P_p(\delta_s, L_s) = P_p(\delta_L, L_L) \quad (19)$$

$$P_d(\delta_L) = P_p(\delta_s, L_s) \quad (20)$$

2.4 EFEITOS PONDERADORES DO MODELO MICRO MECÂNICO

A predição da ponte de transferência de tensão baseada nos parâmetros micro mecânicos decorrentes do atrito, da fase de deslizamento e da fase de arrancamento, são suficientes para caracterizar com certa precisão o comportamento mecânico da argamassa reforçada com resíduo de fibra têxtil, entretanto Yang et al., (2008) percebeu no campo experimental que existiam outras condições de contorno que não estavam sendo contabilizadas na predição numérica: i) a micro fissuração da matriz cimentícia e ii) a perda da resistência da fibra no momento da abertura da fissura, chamado de efeito de Cook – Gordon.

Apesar de não serem coeficientes cruciais para a determinação do comportamento mecânico do compósito cimentício reforçado com fibras têxtil, sua consideração pode deixar os resultados mais precisos, uma vez que indicam na modelagem aquilo que é visto na realidade.

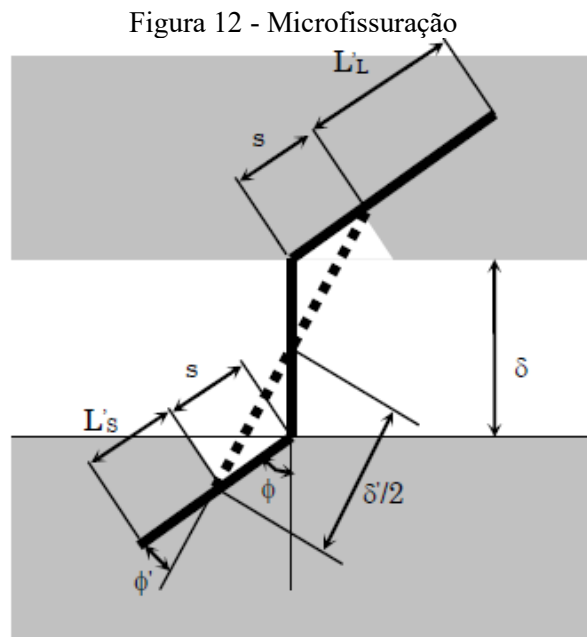
2.4.1. MICROFISSURAÇÃO DA MATRIZ CIMENTÍCIA

As equações compreendidas de 5 à 14 e 16 à 20 são a base para o desenvolvimento da LCCCF, entretanto, partindo da consideração que o mecanismo de distribuição de carregamento é função da interface de interação matriz – fibra, considera-se que este esforço seja transmitido completamente de forma axial, de modo que nenhuma inclinação na fibra é considerada. Contudo, em compósitos reforçados com fibra randomicamente distribuídas é praticamente impossível garantir esta condição, uma vez que não há controle algum sobre o posicionamento dos filamentos dentro da matriz e, conseqüentemente, não há plano principal para formação das fissuras.

Deste modo, para o caso de reforço de compósitos com matriz frágil, como é o caso da matriz cimentícia, inclinações entre o plano de fissura e a fibra geram concentrações de tensão de flexão, podendo gerar a falha local do mecanismo de suporte da fibra: micro fissuração. Este processo pode ser visto na

Figura 12, de maneira que o comprimento da microfissura, para o caso de uma única fibra, pode ser obtido considerando a força exercida (P), o ângulo de inclinação da ancoragem dessa fibra em relação ao seu eixo (ϕ), o diâmetro (D_f), a resistência da matriz cimentícia (σ_m) e a relação existente entre a geometria da fibra e a rigidez da matriz (k), calibrado de forma experimental para cada tipo de fibra (Yang *et al.*, 2008). A influência destes parâmetros para o comprimento (s) da microfissura pode ser visto na Equação 21.

$$s = \frac{P \sin\left(\frac{\phi}{2}\right)}{k D_f \sigma_m \cos^2\left(\frac{\phi}{2}\right)} \quad (21)$$



Fonte: Yang et al., (2008)

Fisicamente, quando ocorre a micro fissuração a concentração de tensão é reduzida e o ângulo de inclinação em relação ao plano de fissura também é alterado (ϕ'), conforme ilustrado na Figura 12, o que melhora o comportamento da fibra, principalmente para aquelas que estão submetidas à forças excêntricas, consequentemente, este processo atrasa o processo de ruptura do filamento, permitindo a abertura de fissuras maiores e o aumento da absorção de energia pela PTT (Yang *et al.*, 2008).

Neste sentido, no caso da predição com o arrancamento nas duas extremidades da fibra, a micro fissuração é considerada pela variação no resultado numérico da abertura da fissura, por conseguinte, é preciso ajustar a avaliação deste parâmetro, outrora indicado na Equação 18, a abertura de fissura efetiva será então indicada pela Equação 23, com a abertura de fissura após

a micro fissuração (δ') calculada conforme a Equação 22 e os outros parâmetros já definidos anteriormente.

$$\delta' = \sqrt{4s^2 + 4s\delta \cos \phi + \delta^2} \quad (22)$$

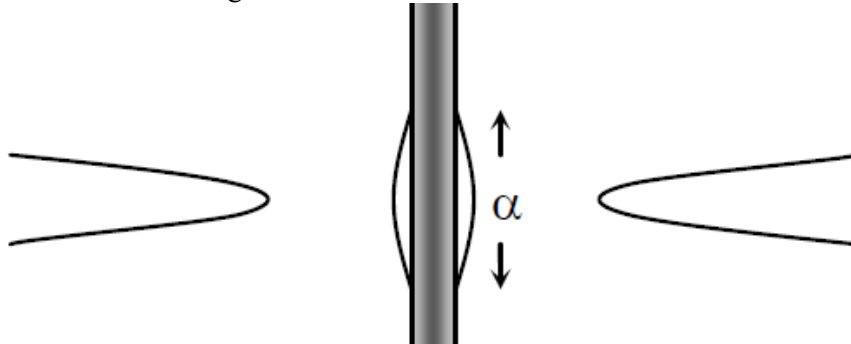
$$\delta_{ef} = \delta' - 2s \quad (23)$$

$$\phi' = \sin^{-1} \left(\delta \frac{\sin(\phi)}{\delta'} \right) \quad (24)$$

2.4.2. EFEITO COOK-GORDON

Um outro mecanismo visto no campo experimental e que não é considerado na predição numérica da LCCCF, porém que influencia diretamente na distribuição e absorção de tensão da PTT é o efeito de Cook Gordon. Durante o início do estágio fissurado, caracterizado pela abertura da primeira fissura, as tensões absorvidas pelo plano de fissura são concentradas na fibra na respectiva linha de propagação ocasionando o deslizamento e esticamento da mesma em uma zona de influência α , considerada também como parâmetro de Cook-Gordon, conforme representado na Figura 13 (Yang *et al.*, 2008).

Figura 13 - Parâmetro de Cook-Gordon



Fonte: Yang et al., (2008)

Em detrimento do alongamento elástico proveniente deste evento acontece um aumento na dimensão final da fissura de δ_{cg} , calculada através da Equação 25, por fim, a abertura total é indicada na Equação 26, representada pela soma da abertura devido ao efeito de Cook-Gordon e da abertura de fissura efetiva, que pode ser calculada pela Equação 18 ou 23, dependendo da necessidade de consideração da micro fissuração.

$$\delta_{cg} = \frac{4\alpha P}{\pi D_f^2 E_f} \quad (25)$$

$$\delta_{tot} = \delta_{cg} + \delta \quad (26)$$

Caso haja a necessidade de considerar a força de arrancamento constante, independente do ângulo de inclinação e posição da fibra na matriz, a abertura devido ao efeito de Cook – Gordon pode ser calculada conforme a Equação 27, onde η_B define a eficiência da PTT em termos de quantidade de fibras ao redor da fissura com respeito a sua orientação e pode ser calculado conforme a Equação 28. Desta maneira é possível quantificar a tensão total da PTT (σ) indiretamente como uma função da abertura total das fissuras (δ) (Yang *et al.*, 2008).

$$\delta_{cg} = \frac{\alpha \sigma}{V_f D_f \eta_B} \quad (27)$$

$$\eta_B = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{L_f}{2}} \sin \theta \frac{2}{L_f} d\theta dl \quad (28)$$

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Sabendo que a equação constitutiva é governada pelos parâmetros micro mecânicos e que estes sofrem grandes variações para cada tipo de compósito, foi preciso caracterizar as principais variáveis que influenciam na predição numérica do comportamento mecânico da argamassa reforçada com fibras têxtil. Para obtenção destes parâmetros e do comportamento mecânico foi utilizado o Laboratório de Estruturas e Materiais (LEMA) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), através de parceria firmada com o Núcleo de Materiais Avançados Compósitos e Componentes para a Construção Civil (NUMAC), do Instituto Federal de Sergipe. Os ensaios e procedimentos experimentais utilizados para determinar cada um dos parâmetros foram sumarizados na Tabela 4.

Tabela 4 - Caracterização dos parâmetros micro mecânicos

Parâmetro	Ensaio	Norma	Local
Resistência à compressão da matriz cimentícia (σ_m)	Compressão axial	NBR 13279	UFAL
Dureza matriz cimentícia (K_m)	Dureza da matriz	ASTM E399-12	UFAL

Elasticidade da matriz cimentícia (E_m)	Elasticidade dinâmica	NBR 15630	IFS
Constante de atrito (τ_0)	Ensaio de arrancamento	(Mendonça, Toledo Filho e Zukowski, 2018)	UFAL
Comprimento de ancoragem (L_e)	Ensaio de arrancamento	(Mendonça, Toledo Filho e Zukowski, 2018)	UFAL
Energia de ligação (G_d)	Ensaio de arrancamento	(Mendonça, Toledo Filho e Zukowski, 2018)	UFAL

Fonte: Autor, (2023)

Para determinar esses parâmetros, foi necessário, inicialmente, produzir o compósito. Dado que a equação constitutiva é paramétrica, suas variáveis micromecânicas são dependentes da interface fibra-matriz da argamassa reforçada com fibras têxteis. Ao caracterizar as propriedades associadas à transferência de tensão pela fibra, torna-se possível avaliar numericamente qualquer compósito produzido com o mesmo material deste trabalho, mas com características distintas de argamassa e volume de fibras. Assim, apenas um traço padrão e um traço de referência são necessários para a definição da predição teórica.

3.1 PRODUÇÃO DO COMPÓSITO

A matriz cimentícia foi produzida utilizando cimento Portland CP II-F e areia com massa específica de 2,59 g/cm³. A água utilizada foi fornecida pelo Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) de Estância-SE. A inserção das fibras seguiu os critérios estabelecidos por Santos (2021), cujo estudo indicou que argamassas reforçadas com resíduos de fibras provenientes da indústria Sergitex, em proporção igual ou inferior a 0,10%, não afetam negativamente as propriedades mecânicas do compósito. Portanto, neste trabalho, foi desenvolvida uma matriz cimentícia fibrosa contendo 0,10% de filamentos, seguindo essas diretrizes.

Tendo em vista que o objetivo do trabalho é aplicar um modelo matemático que consiga prever numericamente a interação entre a matriz cimentícia e os resíduos de fibra, foram produzidas apenas as amostras necessárias para este fim, conforme apresentado na Tabela 5 para o volume de um metro cúbico.

Tabela 5 - Amostras produzidas

Descrição	Cimento (Kg)	Areia (Kg)	Água (L)	Fibra	
AF00	435,5	1742,0	261,3	%	g
AF10	435,5	1742,0	261,3	0,1	2438,8

Fonte: Autor, (2023)

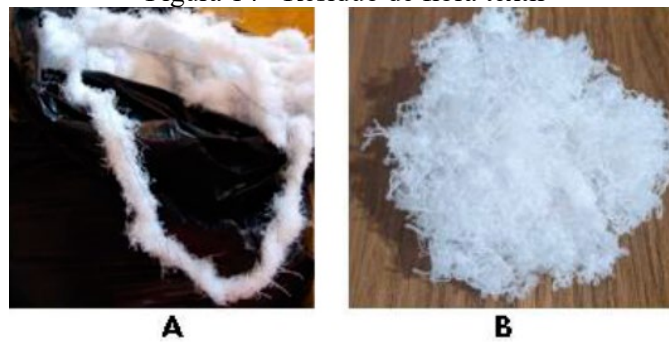
Neste sentido o traço AF00 foi utilizado para determinação da i) resistência a compressão da matriz cimentícia e ii) dureza da argamassa, ao passo que o traço AF10 foi utilizado para a caracterização mecânica e micro mecânica do compósito através do i) ensaio de elasticidade, ii) ensaio de flexão à três pontos, iii) ensaio de tração com fissura única, iv) ensaio de arrancamento da fibra e v) ensaio de dureza da argamassa.

3.1.1. CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DO RESÍDUO DE FIBRA TÊXTIL A BASE DE POLIÉSTER

A obtenção das propriedades do resíduo de fibra foi realizada a partir da revisão bibliográfica dos trabalhos de Soares (2022), Santos (2021) e Santana (2020). Estas pesquisas foram realizadas dentro do Núcleo de Materiais Avançados Compósitos e Componentes para Construção Civil, do Instituto Federal de Sergipe e representam a mesma escória que será utilizada no presente trabalho.

A fibra que será utilizada para reforço da argamassa foi disponibilizada em forma de resíduo pela indústria têxtil Sergitex, localizada em Estância – SE, a partir da parceria entre o grupo de pesquisa intitulado “Núcleo de Materiais Avançados Compósitos e Componentes para Construção Civil” do Instituto Federal de Sergipe, campus Estância e a empresa mencionada. As fibras são resultado do processo de trefilagem, sendo compostas 92% de poliéster e 8% de elastano. Na Figura 14-A é possível observar na terminação a disposição dos fios na forma de camadas aglomeradas, os resíduos estão dispostos nessa configuração, ao passo que na Figura 14-B é possível avaliar os filamentos isolados. Para este trabalho, antes da moldagem de todas as amostras foi preciso deixar as fibras na condição da Figura 14-B, para conseguir avaliar o compósito com fibras dispersas de maneira aleatória.

Figura 14 - Resíduo de fibra têxtil



Fonte: Autor, (2023)

No que diz respeito as propriedades mecânicas dos filamentos que serão utilizadas na modelagem numérica, elas foram determinadas por Soares (2022), ao passo que as propriedades geométricas foram inferidas por Santana (2020), todos os resultados foram sumarizados na Tabela 6.

Tabela 6 - Propriedades mecânicas e geométricas da fibra

Autor	Propriedade	Valor
(Soares, 2022)	Tensão de ruptura (MPa)	(6,97 +- 0,62)
	Elasticidade (GPa)	(1,53 +- 0,29)
(Santana, 2020)	Diâmetro (μm)	95
	Comprimento (mm)	98,80

Fonte: Autor, (2023)

As escórias de fibra têxtil em questão possuem uma alta capacidade de absorção de água, chegando a multiplicar seu peso por 12, entretanto, quando submetida à câmara úmida a saturação é atingida em um período médio de 20 horas (Santana, 2020). Para evitar que esta característica interfira no compósito cimentício os filamentos foram mantidos em ambiente com umidade relativa igual a 100% durante um período de 24 horas.

No campo da durabilidade, Santos (2021) avaliou a degradação das fibras submetidas à i) água destilada, ii) solução de Lawrence e iii) ácido sulfúrico em um período de oito meses através de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), chegando à conclusão que, apesar dos filamentos sofrerem algumas deformações na cadeia manométrica eles apresentam excelente durabilidade quando inseridos em matrizes cimentícias.

3.1.2. GRANULOMETRIA DA AREIA

A granulometria foi avaliada através da NBR 17054: Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022), de modo que a areia utilizada possui dimensão máxima de 2,36 mm e módulo de finura igual a 1,88, conforme os resultados indicados na Tabela 7.

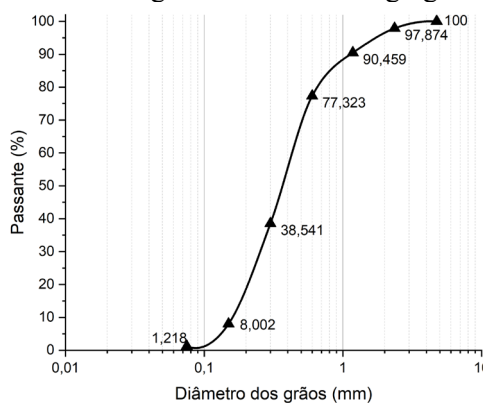
Tabela 7 - Análise granulométrica do agregado miúdo

Peneira	Retido (%)	Retido Acumulado (%)	Passante (%)
4,75 mm	0	0	100
2,36 mm	2,126	2,126	97,874
1,18 mm	7,415	9,541	90,459
600 μm	13,135	22,677	77,323
300 μm	38,783	61,459	38,541
150 μm	30,539	91,998	8,002
75 μm	6,784	98,782	1,218
Fundo	1,218	100,000	0,000

Fonte: Autor, (2023)

Além disso, a areia possui a maior parte dos grãos retidos nas peneiras de 0,15 e 0,3 mm, sendo considerada portanto, como fina segundo as prerrogativas da NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019). A curva granulométrica é apresentada na Figura 15.

Figura 15 - Curva granulométrica do agregado miúdo



(Fonte: Autor, 2023)

3.1.3. PROCEDIMENTO DE MISTURA

Conforme evidenciado por Santos (2021), não há um método padronizado para a mistura de argamassas reforçadas com fibra, ficando a cargo do pesquisador definir qual o procedimento mais eficiente. Deste modo, nesta pesquisa adotou-se as etapas de mistura propostas pela NBR 16541: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura para a realização de ensaios (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016) para a produção da matriz cimentícia e só ao final os filamentos foram adicionados.

Um ponto de observação é a capacidade de absorção de água da escória de fibra, de modo que, antes de iniciar o procedimento de mistura foi necessário forçar a sua saturação através de câmara úmida e remover a quantidade de água absorvida do traço da matriz cimentícia. Assim, a metodologia adotada foi: i) saturação das fibras por um período de 24 horas, ii) separação de amostra de aproximadamente 2 kg de argamassa anidra, ii) adição do cimento na cuba do misturador, iii) adição da água com a redução em massa da quantidade absorvida pela fibra e mistura por 30 segundos, iv) adição da areia e mistura por 60 segundos, v) pausa de 90 segundos, vi) mistura de 60 segundos vii) adição da fibra e mistura manual por 15 segundos. O resultado final destas etapas estão indicados na Figura 16.

Figura 16 - Procedimento de mistura da argamassa fibrosa



Fonte: Autor, (2023)

3.2 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DA ARGAMASSA

O comportamento que a argamassa reforçada com fibras possui é consequência das propriedades da matriz e dos filamentos, além da interação entre os dois, de modo que o

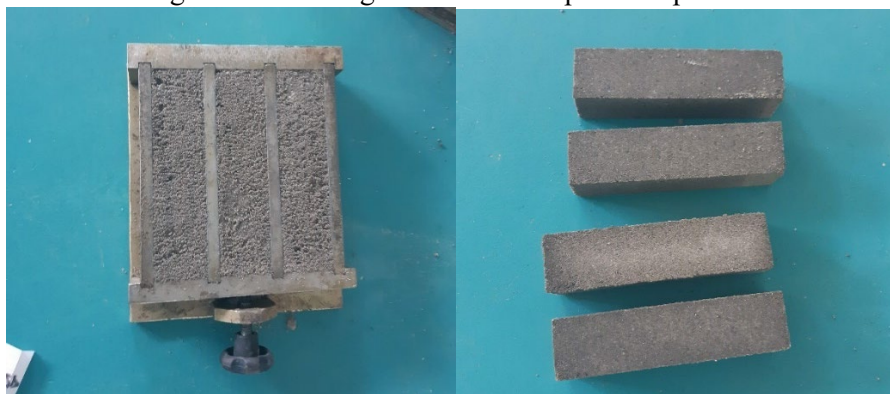
movimento pode ser descrito pela lei de atrito de Coulomb e depende das propriedades geométricas da fibra e da resposta mecânica da argamassa (Marshall et al. 1987).

Deste modo, a caracterização mecânica foi realizada para determinar as propriedades inerentes ao desenvolvimento da predição numérica, identificando as principais propriedades para o desenvolvimento da modelagem matemática. Estes testes são indicados pelo i) ensaio de arrancamento, ii) dureza da matriz cimentícia iii) ensaio de elasticidade e iv) avaliação da resistência à compressão.

3.2.1. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A avaliação da resistência à compressão da matriz cimentícia (σ_m) foi realizada com a amostra AF00 sob a ótica da NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005), este parâmetro é fundamental para a predição numérica da micro fissuração, representada pela equação 21. Para moldagem, foi utilizado uma forma metálica capaz de fazer corpos de prova com dimensões de 40x40x160mm, a compactação foi realizada com 30 socos em cada amostra com auxílio de soquete metálico, o resultado pode ser visto na Figura 17.

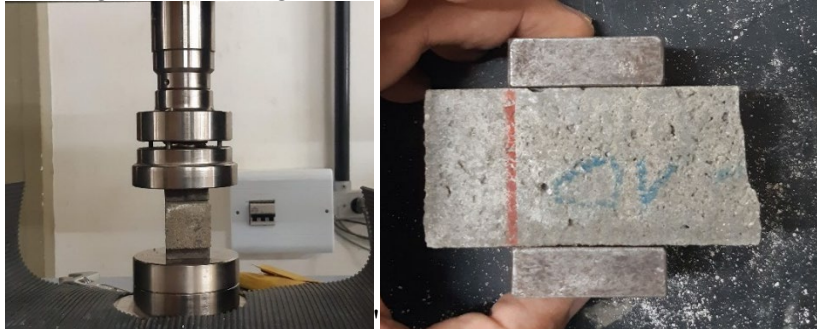
Figura 17 - Moldagem de amostras para compressão



Fonte: Autor, (2023)

Para realização do ensaio foram utilizados 3 corpos de prova rompidos à flexão no ensaio de rigidez da fratura. Conforme indicado na NBR 13279 é preciso que a amostra possua 40x40mm de secção e aproximadamente 80mm de comprimento, de modo que seja possível fixar duas placas quadradas de 40mm em cada face, conforme indicado na Figura 18. A determinação da resistência à compressão é então calculada conforme a Equação 29, onde F_C indica o carregamento máximo.

Figura 18 - Configuração de ensaio de compressão – AF00



Fonte: Autor, (2023)

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (29)$$

Além da caracterização do parâmetro de resistência à compressão da matriz (σ_m), este ensaio também foi utilizado para avaliar a contribuição das escórias de fibras em relação ao traço padrão AF00, neste sentido foram moldados 6 corpos de prova conforme o traço da amostra AF10 e testados conforme a NBR 7215: Cimento portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019), a configuração do ensaio pode ser vista na Figura 19. Neste caso, a determinação numérica da tensão é calculada conforme a Equação 30, onde d representa o diâmetro da amostra em questão.

Figura 19 - Configuração de ensaio de compressão - AF10

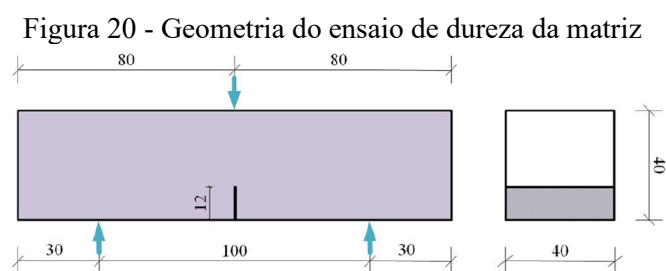


Fonte: Autor, (2023)

$$R_c = \frac{4 \cdot F_c}{\pi d^2} \quad (30)$$

3.2.2. ENSAIO DE DUREZA DA MATRIZ CIMENTÍCIA

A determinação da dureza matriz cimentícia (K_m) é importante para a avaliação numérica da eficiência da ponte de transferência de tensão (PTT) através da caracterização da energia da fratura (J_{tip}). Normatizada pela ASTM E399-12: *Standard test method for linear-elastic plane strain fracture toughness of KIC metallic material* (American Society for Testing and Materials, 2012), a dureza da fratura é um parâmetro micro mecânico que representa a energia absorvida pela matriz até o início do estágio plástico, podendo ser avaliada pelo ensaio de flexão em amostras entalhadas de 40x40x160mm. Para execução deste trabalho foram considerados os procedimentos e critérios de testes de Chen, Ji e Huang (2021), de modo que a geometria do corpo de prova pode ser visualizada na Figura 20.



Fonte: (Chen, Ji e Huang, 2021)

Desta maneira, a configuração do ensaio pode ser visualizada na Figura 21, de modo que a determinação da dureza da matriz foi realizada com o traço AF00 e calculada conforme a Equação 31, onde F_q é a força máxima atingida no ensaio, m é a massa da amostra, g é a aceleração da gravidade, s é o comprimento entre apoios adotado no ensaio, a_0 é a profundidade do entalhe no corpo de prova, t é a largura, h a altura e $f(\alpha)$ é um parâmetro de forma calculado conforme a Equação 32, com α obtido através da Equação 33.



Fonte: Autor, (2023)

$$K_m = \frac{1,5 \left(F_q + \frac{0,001 \times m \times g}{2} \right) 0,001 \times s \times a_0^{\frac{1}{2}}}{t \times h^2} \times f(\alpha) \quad (31)$$

$$f(\alpha) = \frac{1,99 - \alpha(1-\alpha)(2,15 - 3,93\alpha + 2,7\alpha^2)}{(1+2\alpha)(1-\alpha)^{\frac{3}{2}}} \quad (32)$$

$$\alpha = \frac{a_0}{h} \quad (33)$$

Para caracterização da dureza da matriz cimentícia (K_m) foram utilizados quatro corpos de prova com traço AF00, conforme descritos na Tabela 8.

Tabela 8 - Corpos de prova utilizados para determinação da dureza da matriz

Amostra	Traço	Massa (g)	Largura (mm)	Altura (mm)	Comprimento (mm)
CP01	AF00	559,2	40,4	41,1	163,9
CP02	AF00	566,6	41,1	42,4	165
CP03	AF00	559,4	41,9	40,1	163,9
CP04	AF00	563,4	41,7	41,5	163,4
Média		562,2	41,3	41,3	164,1

(Fonte: Autor, 2023)

3.2.3. ENSAIO DE ELASTICIDADE

A elasticidade da matriz cimentícia (E_m) é um parâmetro importante para a predição numérica da PTT, uma vez que alguns dos comportamentos mecânicos são dependentes do seu resultado, tais como i) distribuição dos carregamentos entre matriz e fase dispersa (F_f/F_m), calculado conforme equação 1, ii) energia da fratura (J_{tip}), apresentada na equação 2 e tensão de deslizamento ($\sigma_{debbonding}$), indicada na Equação 10.

A avaliação da elasticidade da matriz foi realizada neste trabalho a partir da amostra AF00 utilizada no ensaio de dureza da matriz, conforme Tabela 8, de maneira dinâmica, seguindo os requisitos da NBR 15630: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008), adotando um comprimento de onda ultrassônica calibrado para 24 kHz, com erro de 6,67%, conforme é indicado na Figura

22. De modo que o resultado numérico foi obtido a partir da Equação 34, com v indicando a velocidade de propagação da onda, ρ a densidade de massa aparente e μ o coeficiente de Poisson, adotado como 0,2 pela recomendação normativa.

Figura 22 - Calibração do comprimento de onda



Fonte: Autor, (2023)

$$E_m = v^2 \rho \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{1-\mu} \quad (34)$$

Considerando que a elasticidade tem impacto direto em boa parte dos resultados intermediários da modelagem numérica, conforme supracitado, também foi verificada a elasticidade dinâmica do compósito cimentício fibroso utilizando o traço AF10, de modo que fosse possível identificar a influência dos resíduos de fibra têxtil nesta propriedade. A configuração do ensaio está apresentada na Figura 23.

Figura 23 - Configuração de ensaio da elasticidade dinâmica



Fonte: Autor, (2023)

3.2.4. ENSAIO DE ARRANCAMENTO DA FIBRA

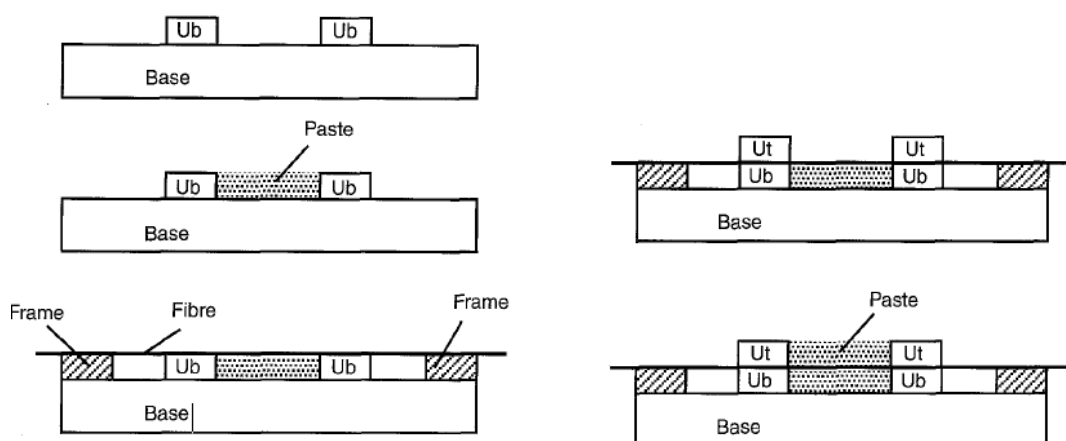
O ensaio de arrancamento da fibra fornece alguns dos principais parâmetros do compósito no que diz respeito ao comportamento mecânico, considerando que a PTT é governada pela Lei de Atrito de Coulomb (Marshall et al. 1987). A partir deste teste é possível avaliar a distribuição da tensão de cisalhamento (τ) no plano de contato entre o filamento e a matriz, caracterizando a fase de deslizamento e arrancamento do fio. A partir disto é possível determinar a constante de atrito (τ_0) e comprimento de ancoragem (L_e), valores que são fundamentais para predição da tensão de deslizamento ($\sigma_{\text{debbonding}}$) e de arrancamento ($\sigma_{\text{pull-out}}$), calculada conforme a Equação 10 e 13, respectivamente.

Uma vez que não possui normativas específicas, uma das primeiras configurações de teste para o arrancamento da fibra foi proposto de maneira generalista por Katz e Li (1996), de modo que não há padronização das dimensões, apenas do método de execução, uma vez que a ideia é fazer a adaptação para qualquer equipamento.

Neste método, inicialmente é preciso i) confeccionar o molde de apoio das fibras e de cobrimento inferior com a matriz, ii) inserir as fibras alinhada com a base, obedecendo a quantidade máxima de 3 fios, iii) inserir outro molde sobre as fibras para realizar o cobrimento superior e iv) pontas das fibras devem ser anexadas a um adesivo de dupla face de alta resistência. Este procedimento está visualmente exemplificado na Figura 24.

Após a confecção e desforma do molde na data de avaliação, preferencialmente quando a matriz tenha atingido a resistência máxima, o molde deve ser cortado longitudinalmente com uma espessura L , que pode ser selecionada de maneira aleatória na primeira análise ou utilizando a Equação 35, com as incógnitas já definidas.

Figura 24 - Procedimento de moldagem para o ensaio de arrancamento



(Fonte: Katz e Li, 1996)

$$L_e = \frac{\sigma_f D_f}{4\tau_0} \quad (35)$$

Para este trabalho foi adotado uma variação do ensaio de arrancamento proposta por Mendonça, Toledo Filho e Zukowski, (2018). Foi utilizado como molde um tubo de PVC de 25mm com comprimentos de 5, 10 e 15mm, representando as ancoragens à serem avaliadas, no eixos cada tubo foi inserido um fio de resíduo de fibra têxtil com comprimento de 10cm mais altura do tubo de PVC, de modo que os corpos de prova moldados podem ser vistos na Figura 25.

Figura 25 - Moldes para o ensaio de arrancamento



Fonte: Autor, (2023)

O experimento foi realizado sob tração direta, com uma garra fixada na extremidade da fibra e a outra na base do tubo, conforme indicado na Figura 26, foi utilizada uma velocidade de carregamento de 4mm por segundo.

Figura 26 - Configuração do ensaio de arrancamento



Fonte: Autor, (2023)

3.3 AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO COMPÓSITO

Com os parâmetros mecânicos e geométricos definidos, tanto para a argamassa quanto para as fibras, foi preciso avaliar o comportamento dos dois materiais em conjunto. Desta maneira, o compósito foi submetido ao ensaio de i) tração direta e ii) flexão para avaliação da influência da fibra e da distribuição de tensão pela PTT. Além disso, estes experimentos foram importantes para verificar a precisão numérica das equações que definem a LCCCF, indicada na equação 4.

3.3.1. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO

O ensaio de flexão foi utilizado para avaliar a relação entre tensão e deformação no compósito, de modo que é possível também verificar a absorção de energia. Normatizada pela BS EN 12467 - *Fibre-cement flat sheets – Product specification and test methods* (British Standard, 2018), foram produzidos 5 corpos de prova com dimensões 20mm x 40mm x 160mm. A confecção dos moldes foi realizada através da adaptação das formas metálicas utilizadas para o ensaio de compressão, com dimensões de 40mm x 40mm x 160mm, de modo que, para atender aos requisitos da espessura a forma foi preenchida com um isopor de 20mm. Estes procedimentos podem ser visualizados na Figura 27.

Figura 27 - Moldagem do corpo de prova para flexão

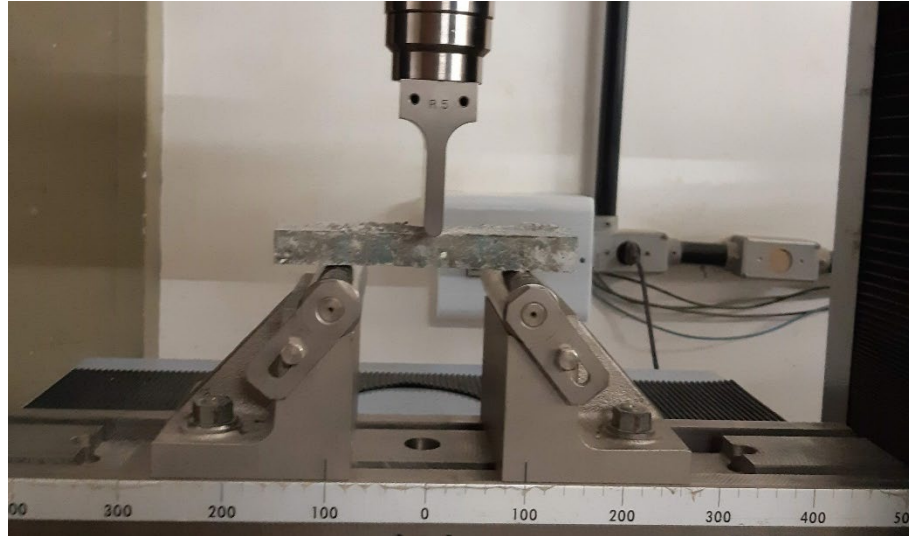


Fonte: Autor, (2023)

O ensaio foi realizado seguindo a configuração de teste de flexão à três pontos, com velocidade de carregamento de 50 N por segundo e pode ser visualizado na Figura 28. A partir dos resultados obtidos, a tensão máxima de resistência a flexão, conhecida como módulo de ruptura, é calculada conforme a equação 36, onde P_{max} representa o carregamento máximo

suportado, L é o vão útil e b e h indicam a largura e a altura da secção transversal do corpo de prova, respectivamente. Da mesma maneira, o índice de dureza (I_G), parâmetro utilizado para classificar a ruptura em frágil ou dúctil, é calculado através da área sobre o gráfico tensão – deformação. Usualmente os valores estão entre 0,4MOR ou o valor da deformação correspondente a 0,1L (Sodrolodabae *et al.*, 2021).

Figura 28 - Configuração de teste de flexão



Fonte: Autor, (2023)

$$MOR_{3P} = \frac{3P_{max}L}{2bh^2} \quad (36)$$

Uma característica importante de ser ressaltada é a possibilidade determinar o módulo de elasticidade na zona pré-fissurada, podendo servir de comparativo com os resultados do ensaio da elasticidade dinâmica. A predição da elasticidade neste caso é realizada através da Equação 31, onde ΔP e Δf são as variações na força e deflexão de dois pontos na região elástica da curva, com as demais variáveis já identificadas.

$$K_{3P} = \frac{\Delta PL^3}{4\Delta fbh^3} \quad (37)$$

3.1 AJUSTE DA EQUAÇÃO CONSTITUTIVA A PARTIR DOS RESULTADO DO MODELO MICRO MECÂNICO DA INTERFACE FIBRA-MATRIZ

A partir da definição numérica dos parâmetros micro mecânicos da interface fibra-matriz da argamassa reforçada com fibras têxtil é possível fazer o ajuste nos parâmetros da

equação constitutiva paramétrica, fundamentalmente baseado nos estudos de Yang et al., (2008), Yu, Chen e Leung, (2018) e She et al., (2022), para isso é preciso inicialmente avaliar a tensão de deslizamento e de arrancamento, conforme as equações 10 e 13, respectivamente, de modo que seja possível confrontar os resultados teóricos e experimentais.

$$\sigma_{debbonding} = 2 \sqrt{(\tau_0 u + G_d) \left(\frac{2E_f(1+\eta)}{d_f} \right)} \quad (10)$$

$$\sigma_{pull-out} = \left[\frac{\tau_0}{D_f} (L_e - u - \delta_c) \right] \left[1 + \frac{\beta(u - \delta_c)}{D_f} \right] \quad (13)$$

Com a caracterização e avaliação da relação entre tensão e deslocamento, bem como da tensão de arrancamento é possível determinar a força aplicada para uma dada abertura de fissura, conforme a equação 17, determinando o principal parâmetro para ajuste da equação constitutiva, representada pela Equação 4. Ao final deste procedimento a dependência entre tensão e deslocamento da fibra, vista na forma de abertura de fissura no compósito, está determinada. Este procedimento foi o mesmo usado por (She *et al.*, 2022).

Com a parametrização micro mecânica da equação constitutiva é possível avaliar a precisão da predição numérica, de modo que se torna possível a otimização dos resultados, quando necessário, através dos coeficientes ponderadores: i) inclinação da fibra ($f\phi$), ii) micro fissuração (s) e iii) efeito de Cook – Gordon (α).

Tendo em vista que está pesquisa caracterizou apenas os parâmetros micro mecânicos da interface fibra-matriz, foram utilizados os resultados bibliográficos para avaliação dos efeitos decorrentes do carregamento e fissuração, conforme indicado na Tabela 9. São os mesmo usados por Yu et al. (2018) e Yang et al. (2008) para uma composição de 0.1% de fibra.

Tabela 9 - Dados de entrada

Parâmetro	Valor inicial (Yu, Chen e Leung, 2018)	Valor inicial (Yang <i>et al.</i>, 2008)
$f\phi$	0,20	0,20
α	$2D_f$	$2D_f$

Fonte: Autor, (2023)

É importante ressaltar que todos os parâmetros variam conforme as propriedades da matriz, do resíduo de fibra e da quantidade utilizada, desta forma, estes parâmetros deverão ser

reavaliados e modificados a partir dos ensaios experimentais realizados com o compósito utilizado no trabalho em questão, até que seja atingido uma precisão mínima entre o modelo teórico e os resultados reais.

Por fim, o objetivo final do ajuste do modelo numérico é determinar a equação baseada na deformação do compósito para determinação da tensão máxima da ponte de transferência de tensão, também chamada de equação constitutiva, conforme equação 4 (Zheng, Zhang e Wang, 2020).

$$\sigma_f(\delta) = \frac{V_f}{A_f} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{L_f}{2}} P(\delta, \varnothing) \sin \varnothing \frac{2}{L_f} d\varnothing dl \quad (4)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As caracterizações dos parâmetros micro mecânicos foram essenciais para a aplicação do modelo teórico paramétrico da interação fibra-matriz para simulação numérica do comportamento mecânico de uma argamassa reforçada com resíduos de fibras submetida a carregamentos de tração e flexão. Como foi evidenciado, a equação constitutiva do modelo micro mecânico da interface entre a fibra e a matriz depende completamente das propriedades inerentes ao atrito, fase de deslizamento e fase de arrancamento.

As avaliações específicas destes parâmetros são essenciais para tornar a predição teórica mais precisa, isso fica evidente na determinação da energia de ligação e coeficiente de atrito, conforme será discutido.

4.1 COMPRESSÃO

O ensaio de compressão da argamassa foi realizado seguindo os requisitos da NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005). Os corpos de prova amostrados foram resultado do ensaio de dureza da matriz, sendo avaliados 3 corpos de provas rompidos ao meio, aproximadamente. Conforme as especificações normativas é preciso apenas que a amostra seja capaz de comportar um aparato quadrado de 40mm de lado. Os resultados foram apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Corpos de provas ensaiados

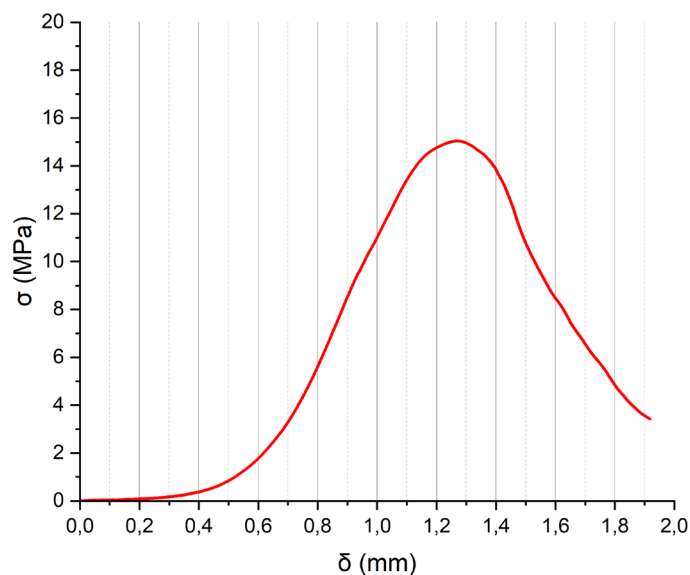
Amostra	Traço	σ_m (MPa)	Desvio Absoluto (MPa)	Desvio relativo (%)
CP01	AF00	15,7	0,4	2,6
CP02	AF00	15,0	0,3	2,0
CP03	AF00	15,4	0,1	0,7
CP04	AF00	15,6	0,3	2,0
CP05	AF00	14,6	0,7	4,6
CP06	AF00	15,0	0,3	2,0

σ_m (MPa)	15,3	Desvio padrão (MPa)	0,4
------------------	------	---------------------	-----

Fonte: Autor, (2023)

Ainda segundo a NBR 13279, o desvio absoluto é caracterizado como a diferença entre a resistência média e a resistência individual de cada corpo de prova, de modo que seu valor para cada corpo de prova não pode ser maior que 0,5 MPa, caso contrário a amostra deve ser descartada e calculada uma nova média. Dito isto, como a amostra CP05 excede os limites normativos ela não foi considerada no cálculo da resistência à compressão da argamassa (σ_m), tendo como resultado o valor de $15,3 \pm 0,4$ MPa. A curva de tensão versus deformação pode ser visualizada na Figura 29.

Figura 29 - Curva de tensão versus deformação na compressão



Fonte: Autor, (2023)

Além da determinação da resistência à compressão da matriz cimentícia (σ_m), este ensaio também serviu para avaliar a influência das fibras no compósito, assim, foram produzidas seis amostras com o traço AF10, descartando do cálculo as três amostras com maior desvio absoluto, conforme indicado na Tabela 11.

Tabela 11 - Resultados das amostras com fibras

Amostra	Traço	σ_m (MPa)	Desvio Absoluto (MPa)	Desvio relativo (%)
CP01	AF00	10,2	2,1	17,3
CP02	AF00	12	0,3	2,7
CP03	AF00	14,9	2,6	20,8
CP04	AF00	12,3	0,0	0,0
CP05	AF00	12,7	0,4	3,0
CP06	AF00	11,4	0,9	7,6

σ_m (MPa)	12,3	Desvio padrão (MPa)	0,4
------------------------------------	------	--------------------------------	-----

Fonte: Autor, (2023)

É possível perceber, a partir da Tabela 11, que a resistência à compressão do compósito foi de $12,3 \pm 0,4$ MPa, cerca de 19,6% menor em comparação com o traço padrão. Partindo da revisão bibliográfica feita por Venigalla et al., (2022), a redução da resistência à compressão com a adição de fibras já era esperada, tendo em vista que a inserção de fibras tende a aumentar a quantidade de vazios da matriz.

No entanto, este valor contradiz as descobertas de Santana, (2020), pois em sua pesquisa, o traço com uma adição de 0,1% de fibra não demonstrou redução significativa dessa propriedade em comparação com o traço padrão. É importante ressaltar que seu trabalho envolveu concreto reforçado com fibras têxteis, enquanto esta pesquisa abordou argamassa, o que pode explicar as discrepâncias nos resultados.

4.2 DUREZA DA MATRIZ CIMENTÍCIA

A dureza da matriz cimentícia é um parâmetro importante para avaliar a formação de ponte de transferência de tensão e do estado de múltiplas fissuras, conforme indicado na

equação 2. Além disso é base para caracterização dos efeitos ponderadores, como a micro fissuração, indicada na equação 21.

A caracterização da dureza da matriz cimentícia (K_m) foi realizada seguindo os procedimentos experimentais da ASTM E399-12: *Standard test method for linear-elastic planestrain fracture toughness of KIC metallic material* (American Society for Testing and Materials, 2012), de modo que foram ensaiados quatro corpos de prova, com os resultados indicados na Tabela 12.

Tabela 12 - Resultados do carregamento dos corpos de prova

Amostra	Traço	F_q (N)	Desvio Absoluto (N)	Desvio Relativo (%)
CP01	AF00	943,6	43,9	4,4
CP02	AF00	1055,1	67,6	6,8
CP03	AF00	959,7	27,8	2,8
CP04	AF00	991,5	4,0	0,4

F_q (N)	964,9	Desvio padrão (N)	24,4
-----------	-------	--------------------------	------

(Fonte: Autor, 2023)

Para determinação do resultado médio de carregamento foi adotado o mesmo procedimento de Chen, Ji e Huang (2021), utilizando os valores correspondentes à três amostras, descartando a que possuiu maior desvio relativo. Assim, como é possível observar na Tabela 12, o corpo de prova CP02 não foi considerado na determinação dos resultados da dureza da matriz (K_m).

Com os carregamentos identificados foi possível determinar o valor de K_m com o seguinte procedimento: i) determinação do valor de α através da equação 33, ii) determinação do parâmetro de forma ($f(\alpha)$) através da equação 32 e por fim iv) caracterização da dureza da matriz (K_m) conforme a equação 31. Para facilitar a observação, as equações citadas estão reescritas abaixo. Por fim, os resultados foram sumarizados na Tabela 13.

$$K_m = \frac{1,5 \left(F_q + \frac{0,001 \times m \times g}{2} \right) 0,001 \times s \times a_0^{\frac{1}{2}}}{t \times h^2} \times f(\alpha) \quad (31)$$

$$f(\alpha) = \frac{1,99 - \alpha(1-\alpha)(2,15 - 3,93\alpha + 2,7\alpha^2)}{(1+2\alpha)(1-\alpha)^{\frac{3}{2}}} \quad (32)$$

$$\alpha = \frac{a_0}{h} \quad (33)$$

Tabela 13 - Resultados da dureza da fratura

Amostra	α	$f(\alpha)$	$K_m \text{ (kPa} \times \text{m}^{\frac{1}{2}}\text{)}$
CP01	0,292	1,839	419,0
CP03	0,299	1,850	434,3
CP04	0,289	1,834	417,3

$K_m \text{ (kPa} \times \text{m}^{\frac{1}{2}}\text{)}$	423,5	Desvio padrão $\text{(kPa} \times \text{m}^{\frac{1}{2}}\text{)}$	9,4
--	-------	--	-----

Fonte: Autor, (2023)

Os resultados apresentados na bibliografia são bem distintos, de modo que ,o trabalho de Chen, Ji e Huang, (2021), para compósito cimentício reforçado com fibra de PVA este valor foi de 254,11 $\text{kPa} \times \text{m}^{\frac{1}{2}}$, ao passo que no de Yang et al., (2008) este valor foi de 500 $\text{kPa} \times \text{m}^{\frac{1}{2}}$. Nesta pesquisa a dureza da matriz foi de $423,5 \pm 9,4 \text{ kPa} \times \text{m}^{\frac{1}{2}}$, isso indica a importância de determinar este parâmetro para o compósito em questão, de modo que é possível analisar de forma mais precisa o seu comportamento.

É importante lembrar que a dureza da matriz cimentícia (K_m) é um parâmetro que avalia a formação da PTT e do estado de múltiplas fissuras, a partir da determinação da energia da fratura (J_{tip}). Considerando que a energia da fratura deve ser menor que a energia complementar (J_B), conforme apresentado na equação 3, valores altos de K_m exigem que a fibra tenha a capacidade de absorver mais energia para a eficiência da distribuição de tensão. Neste trabalho foi feita uma análise inversa dos parâmetros, de modo que inicialmente foi moldado uma amostra padrão para depois determinar a eficiência da PTT, entretanto, este procedimento pode ser avaliado para dosagem do compósito, conforme apresentado por Mendonça, Toledo Filho e Zukowski, (2018).

4.3 ELASTICIDADE

A elasticidade da matriz cimentícia (E_m) foi avaliada pela disseminação de ondas ultrassônicas no compósito utilizando o traço AF00 e seguindo as prerrogativas da NBR 15630: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008). Além da caracterização deste parâmetro, também foi verificada a influência do resíduo de fibra na elasticidade do compósito, a partir do traço AF10, como procedimento de cálculo foi preciso inicialmente determinar a densidade de massa aparente (ρ) das amostras, calculada a partir da relação entre massa e volume final dos corpo de provas, apresentados na Tabela 8. Os resultados foram sumarizados na Tabela 14.

Tabela 14 - Densidade de massa aparente

Amostra	Traço	$\rho \left(\frac{kg}{m^3}\right)$	Desvio absoluto $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	Desvio relativo (%)
CP01	AF00	2052,2	38,8	1,9
CP02	AF00	1970,5	43,0	2,1
CP03	AF00	2031,4	17,9	0,9
CP04	AF00	1992,4	21,1	1,0
CP05	AF00	2058,7	45,3	2,2
CP06	AF00	1975,6	37,9	1,9

$\rho \left(\frac{kg}{m^3}\right)$	2013,5	Desvio padrão $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	39,0
------------------------------------	--------	--	------

CP01	AF10	1968,3	45,2	2,2
CP02	AF10	2019,8	6,3	0,3
CP03	AF10	2047,9	34,4	1,7
CP04	AF10	2016,5	3,0	0,1
CP05	AF10	1981,8	31,7	1,6
CP06	AF10	2053,0	39,5	2,0

$\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right)$	2014,5	Desvio padrão $\left(\frac{kg}{m^3} \right)$	34,2
--------------------------------------	--------	---	------

Fonte: Autor, (2023)

A partir disso, foi possível determinar que a densidade de massa aparente (ρ) da matriz cimentícia é de $(2013,5 \pm 39) \frac{kg}{m^3}$, ao passo que o compósito reforçado com fibra apresentou resultado semelhante $(2014,5 \pm 34) \frac{kg}{m^3}$, uma variação de 0,4%, o que já era esperado, tendo em vista o baixo teor de filamentos adicionados. Com isso foi possível determinar o resultado numérico da elasticidade da matriz cimentícia (E_m) e avaliar a influência da adição de fios neste parâmetro através da Equação 34. Os resultados foram apresentados na Tabela 15, onde t foi o tempo que a onda levou para percorrer a amostra e v a velocidade.

$$E_m = v^2 \rho \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{1-\mu} \quad (34)$$

Tabela 15 - Resultados do ensaio de elasticidade da matriz cimentícia

Amostra	Traço	t (μm)	v ($\frac{mm}{\mu s}$)	E_m (MPa)	Desvio absoluto $\left(\frac{kg}{m^3} \right)$	Desvio relativo (%)
CP01	AF00	35,400	4,630	39593,5	8158,5	26,0
CP02	AF00	37,800	4,365	33791,8	2356,8	7,5
CP03	AF00	40,900	4,007	29358,8	2076,2	6,6
CP04	AF00	41,200	3,966	28205,4	3229,6	10,3
CP05	AF00	41,000	3,959	29034,5	2400,5	7,6
CP06	AF00	40,300	4,012	28625,9	2809,1	8,9

E_m (MPa)	39,9	4,1	30728,4	Desvio padrão (MPa)	2658,0
-------------------------------	------	-----	---------	------------------------------------	--------

CP01	AF10	26,700	3,745	24848,8	6586,2	21,0
------	------	--------	-------	---------	--------	------

CP02	AF10	28,500	3,477	21979,1	9455,9	30,1
CP03	AF10	27,200	3,735	25715,8	5719,2	18,2
CP04	AF10	25,000	4,040	29621,4	1813,6	5,8
CP05	AF10	26,100	3,881	26867,8	4567,2	14,5
CP06	AF10	23,500	4,379	35426,7	3991,7	12,7

E_m (MPa)	27,3	3,7	24854,2	Desvio padrão (MPa)	2555,7
----------------------------	------	-----	---------	----------------------------	--------

Fonte: Autor, (2023)

Assim, a elasticidade da matriz cimentícia (E_m) foi de $30728,4 \pm 2658$ MPa ao passo que a elasticidade do compósito reforçado com fibras foi de apenas $24854,2 \pm 2555$ MPa, indicando que a adição de filamentos reduz esta propriedade mecânica no composto em aproximadamente 19,1%.

É importante perceber que a variação da elasticidade ficou muito próxima da variação encontrada nos resultados de compressão. Tendo em vista que a elasticidade depende diretamente da resistência à compressão a redução encontrada já era previsível (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014).

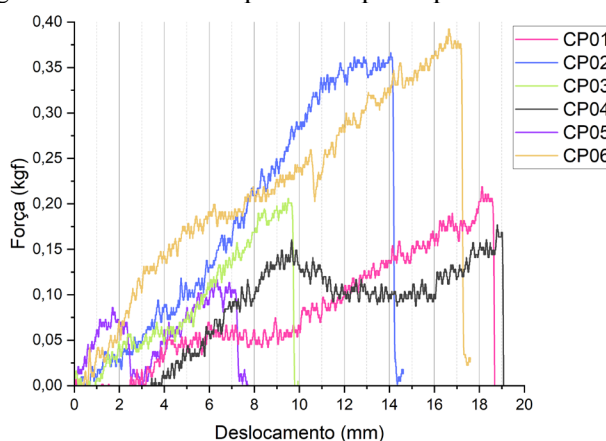
4.4 ENSAIO DE ARRANCAMENTO

O ensaio de arrancamento da fibra não possui uma normativa específica, desta maneira foi utilizado os procedimentos experimentais de Katz e Li (1996) e Mendonça, Toledo Filho e Zukowski, (2018) para sua execução, com a análise numérica feita à luz do trabalho de Carozzi et al. (2016). Com esta configuração de teste foi possível avaliar o comportamento da interface de contato entre fibra e matriz, caracterizando a constante de atrito (τ_0) e o comprimento de ancoragem (L_e). Para isto, foi avaliado a distribuição de carregamento em sete amostras.

Seguindo os procedimentos experimentais de Mendonça, Toledo Filho e Zukowski, (2018), a determinação do comprimento de arrancamento é feita de maneira estimada através do embutimento controlado da fibra na matriz, para isso é preciso identificar o limite superior, primeiro comprimento de ancoragem que ocorre o arrancamento, e inferior, que representa o primeiro comprimento onde ocorre o deslizamento. Neste trabalho adotou-se os embutimentos de 5, 10 e 15 mm, sendo observado que a fibra arrancou-se de todas as amostras e não entrou

em estágio de deslizamento, o único limite identificado pelo ensaio foi o superior, primeiro comprimento com ocorrência de arrancamento, de modo que é possível afirmar que o comprimento de arrancamento L_e é menor que 5mm, assim, os resultados das amostras de 10mm e 15mm não foram necessárias para determinação de nenhuma propriedade. Os resultados do teste de arrancamento para o corpo de prova de 5mm podem ser vistos na Figura 30.

Figura 30 - Resultados para o corpo de prova de 5mm



Fonte: Autor, (2023)

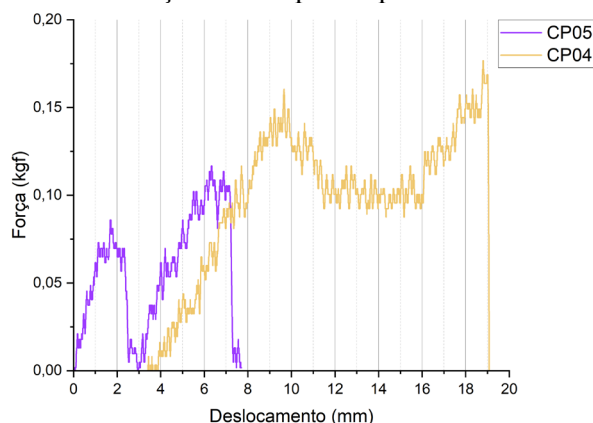
A partir da Figura 30 é possível avaliar uma variação muito grande na força necessária para o arrancamento, isto acontece pela forma como a fibra interage com a matriz. Sua nucleação ocorre entre os filamentos de poliéster e elastano (Soares, 2022), todavia, não há garantia da eficiência deste processo, que depende também da umidade da fibra em questão, de modo que quanto maior o teor de argamassa endurecida com este procedimento maior também a força necessária para o arrancamento da fibra.

Do mesmo modo, os deslocamentos sofreram grande variação, isto porque as fibras possuem uma grande capacidade elástica, podendo dobrar de tamanho, assim, o deslocamento apresentado é a soma do comprimento de ancoragem e a variação de comprimento da fibra. Esta característica dificultou a avaliação dos comprimentos de arrancamento e de deslizamento, uma vez que eles são expressos como somatória do comprimento final.

A transferência de carregamentos se mostrou linear para a maioria dos corpos de prova, exceto para o CP04 e CP05, indicados pelas cores cinza e lilás, respectivamente. Para facilitar a visualização eles foram representados novamente na Figura 31. Lembrando que após a fase de deslizamento a relação de interface é governada apenas pela constante de atrito (τ_0), que representa um coeficiente linear Carozzi et al., (2016) é possível afirmar que com um

comprimento de ancoragem pouco menor de 5mm o deslizamento acontece, com isso em vista foi estimado um comprimento de ancoragem (L_e) de 3mm.

Figura 31 - Avaliação dos corpos de prova CP04 e CP05

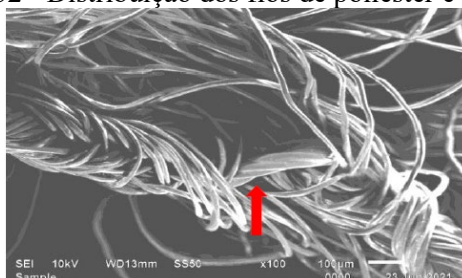


Fonte: Autor, (2023)

Estes dois corpos de prova, que fogem da média, foram os únicos que tenderam a se aproximar do resultado esperado, apresentado na curva padrão da Figura 9, com fase de deslizamento e arrancamento bem definidas. O resultado médio obtido pelas amostras sugerem que a fibra não sofre deslizamento dentro da matriz.

É possível perceber na que a fibra sofre estricção antes de chegar ao seu rompimento, de modo que antes de chegar na fase de deslizamento ela ganha um novo potencial de resistência. Isso comprova e está de acordo com as avaliações de Soares, (2022), que verificou no ensaio de tração das fibras o rompimento inicial das fibras de poliéster e só depois o rompimento do fio de elastano, na Figura 32 é possível observar a distribuição dos filamentos. Lembrando que o resíduo de fibra é composto de 92% de poliéster e 8% de elastano a distribuição de tensão é composta por duas fases: i) contribuição máxima do poliéster e rompimento da maioria dessas fibras e ii) contribuição máxima do elastano e resquício do poliéster.

Figura 32 - Distribuição dos fios de poliéster e elastano



Fonte: Soares, (2022)

A partir disso, a caracterização da tensão de cisalhamento foi feita conforme a Equação 5 para as distribuições de carregamento, ao passo que a energia de ligação (G_d) foi calculada conforme a Equação 11, considerando P_b igual a zero, uma vez que não ocorreu a fase de deslizamento nas amostras apresentadas. Todos os resultados foram sumarizados na Tabela 16.

$$\tau = \frac{1}{p} \frac{N}{dx} \quad (5)$$

$$G_d = \frac{2(P_a - P_b)^2}{\pi^2 E_f D_f^3} \quad (11)$$

Tabela 16 - Resultados do ensaio de arrancamento com CP de 5mm

Amostra	P_a (N)	τ_{max} (MPa)	G_d ($\frac{J}{m^2}$)	Desvio absoluto ($\frac{J}{m^2}$)	Desvio relativo (%)
CP01	2,147	0,768	711,8	336,6	46,2
CP02	3,593	1,285	1994,7	946,4	129,9
CP03	2,019	0,722	629,9	418,4	57,4
CP04	1,733	0,620	464,0	584,3	80,2
CP05	1,145	0,409	202,5	845,9	116,1
CP06	3,848	1,376	2287,1	1238,8	170,1
CP07	-	-	-	-	-

Média	1,966	0,703	601,9	Desvio padrão ($\frac{J}{m^2}$)	126,2
--------------	-------	-------	-------	---	-------

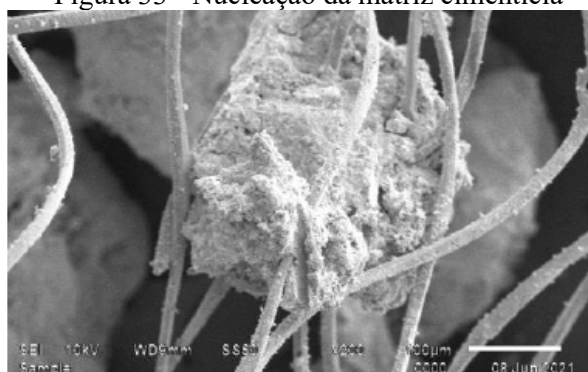
Fonte: Autor, (2023)

Para a determinação da energia de ligação (G_d) foram considerados os resultados das três amostras com menor desvio padrão relativo, desta maneira, foram descartados os resultados do CP02, CP05 e CP06. O corpo de prova CP07 sofreu avarias durante o seu posicionamento na máquina de testes, de modo que os resultados obtidos da amostra foram completamente comprometidos. O valor de G_d foi então caracterizado como $601,9 \pm 126 \frac{J}{m^2}$.

Este valor de energia de ligação está muito acima da média bibliográfica, os resultados deste parâmetro nos trabalhos de Mendonça, Toledo Filho e Zukowski, (2018) e Chen, Ji e

Huang, (2021), para fibras de juta e PVA, respectivamente, são em torno de $6 \frac{J}{m^2}$. Isso revela que existe uma interação muito forte entre a matriz e a fibra e está em paralelo ao evidenciado por Soares, (2022), uma vez que a nucleação da matriz cimentícia acontece dentro da fibra, entre os fios de poliéster e elastano, conforme apresentado na Figura 33.

Figura 33 - Nucleação da matriz cimentícia



Fonte: Soares, (2022)

Tendo em vista que não ocorreu a fase de deslizamento o atrito não sofre variação ao longo do carregamento, sendo determinado conforme a Lei de Coulomb por uma constante linear (τ_0). Desta maneira, para obtenção da constante de atrito foram utilizados os dados de força versus deslocamento já apresentados desconsiderando a influência após a ruptura da fibra, os resultados foram sumarizados na Tabela 17.

Tabela 17 - Constante de atrito

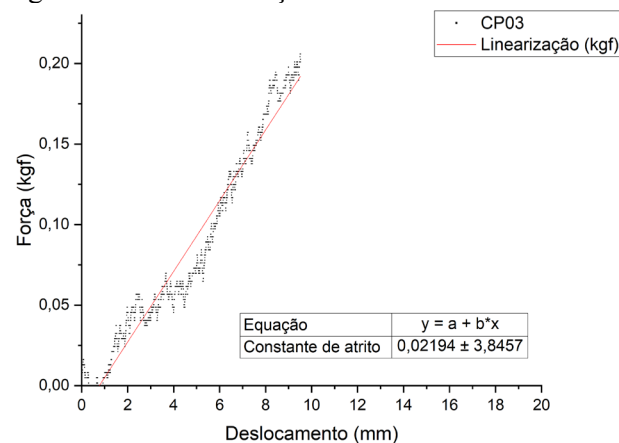
Amostra	τ_0	Desvio absoluto	Desvio relativo (%)
CP01	0,01171	0,0094	44,5
CP02	0,03001	0,0180	85,2
CP03	0,02194	0,0099	46,9
CP04	-	-	-
CP05	-	-	-
CP06	0,02067	0,0086	40,9

Média	0,0181	Desvio padrão $(\frac{J}{m^2})$	0,0056
--------------	--------	---	--------

Fonte: Autor, (2023)

Para determinação da constante linear de atrito (τ_0) os corpos de prova CP05 e CP04 foram descartados em detrimento do seu comportamento não linear, consequência do rompimento em etapas diferentes do filamentos que compõe a fibra: poliéster e elastano. Assim, o valor numérico de τ_0 foi de $0,0181 \pm 0,0056$, com sua caracterização realizada em regime linear e sem a consideração da fase de deslizamento. A curva linear para o corpo de prova CP03 pode ser vista na Figura 34.

Figura 34 - Caracterização do coeficiente de atrito



Fonte: Autor, (2023)

Comparando os resultados com o trabalho de Yu, Chen e Leung, (2018) é possível perceber a discrepância também nos valores do coeficiente de atrito. Enquanto que em seu trabalho foi encontrado o coeficiente, para fibra de PVA, de 0,95, nesta pesquisa ele foi de $0,0181 \pm 0,0056$. Considerando que no trabalho de Yu, Chen e Leung, (2018) a fase de deslizamento foi bem evidente, o resultado de atrito obtido para a argamassa reforçada com resíduo de fibra têxtil significa que após perder a ligação com a matriz a fibra não apresentou quase nenhuma resistência ao carregamento.

4.5 FLEXÃO

A configuração de teste de flexão foi utilizada para determinar o comportamento do compósito reforçado com fibras sob carregamento externo, de maneira que fosse possível quantificar a sua absorção de energia e avaliar o seu comportamento conjunto. Normalizado pela BS EN 12467 - *Fibre-cement flat sheets – Product specification and test methods* (British Standard, 2018), foram ensaiados cinco corpos de prova prismáticos, com os resultados apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Resultados da distribuição de carregamentos

Amostra	P_{max} (N)	Desvio absoluto	Desvio relativo (%)
CP01	451,77	2,57	0,57
CP02	346,39	102,81	22,89
CP03	512,50	63,30	14,09
CP04	512,68	63,48	14,13
CP05	422,65	26,55	5,91

Média	449,20	Desvio padrão $(\frac{J}{m^2})$	69,50
--------------	--------	---	-------

Fonte: Autor, (2023)

Com estes valores foi então possível avaliar o módulo de ruptura (MOR_{3P}) através da equação 36. De modo que, para sua determinação foram utilizados apenas quatro corpos de prova, sendo descartado a amostra com maior desvio em relação à média. Os resultados podem ser vistos na Tabela 19.

$$MOR_{3P} = \frac{3P_{max}L}{2bh^2} \quad (36)$$

Tabela 19 - Resultados do módulo de ruptura

Amostra	MOR_{3P} (MPa)	Desvio absoluto	Desvio relativo (%)
CP01	4,24	0,02	4,87
CP02	3,25	0,96	27,06
CP03	4,80	0,59	7,92
CP04	4,81	0,60	7,95
CP05	3,96	0,25	11,00

Média	4,45	Desvio padrão (MPa)	0,42
--------------	------	----------------------------	------

Fonte: Autor, (2023)

Com a definição do valor numérico módulo de ruptura de $4,45 \pm 0,42$ MPa foi possível então avaliar a absorção de energia do compósito através do seu índice de dureza (I_G), para isso, foram descartados os resultados das amostras CP03 e CP04, uma vez que são as duas que mais se distanciam da média, conforme apresentado na Tabela 20.

Tabela 20 - Avaliação da absorção de energia

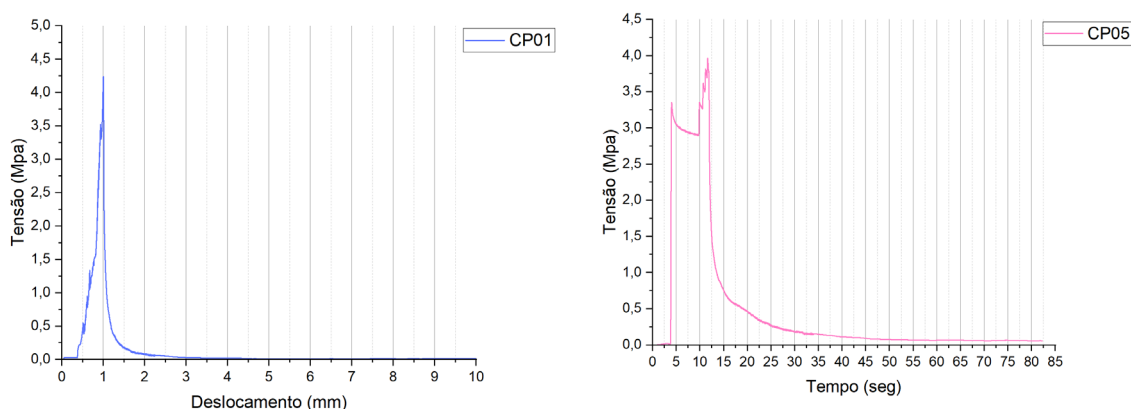
Amostra	$I_G \left(\frac{J}{m^2}\right)$	Desvio absoluto	Desvio relativo (%)
CP01	1399,61	575,24	7,29
CP02	1286,17	688,68	14,80
CP03	745,78	1229,07	50,60
CP04	4599,68	2624,83	204,70
CP05	1842,99	131,86	22,09

Média	1509,59	Desvio padrão $\left(\frac{J}{m^2}\right)$	294,25
-------	---------	---	--------

Fonte: Autor, (2023)

É possível perceber que a energia absorvida pelo compósito está dentro da predição indicada por Sodrolodabae et al., (2021), uma vez que ela foi aproximadamente 40% do módulo de ruptura (MOR_{3p}), resultando em $1,51 \pm 0,29 \frac{kJ}{m^2}$. Para tanto, a deformação máxima obtida no meio do vão central da amostra foi de $0,72 \pm 0,28$ mm, de modo que os resultados podem ser visualizados na Figura 35.

Figura 35 - Gráficos de tensão versus deformação na flexão



Fonte: Autor, (2023)

A partir da Figura 35 é possível verificar que houveram dois perfis de distribuição de tensão na flexão, um de comportamento evidentemente frágil, conforme CP01 e outro que sofreu uma leve estricção mas que também continuou com comportamento frágil, conforme CP05. Essas variações podem ser explicadas pela variação na angulação das fibras, que não é controlado, uma vez que elas são randomicamente distribuídas e também pelo procedimento adotado para moldagem, corpos de prova produzidos em lotes de três, o que pode não ter garantido uniformidade do teor de fibra.

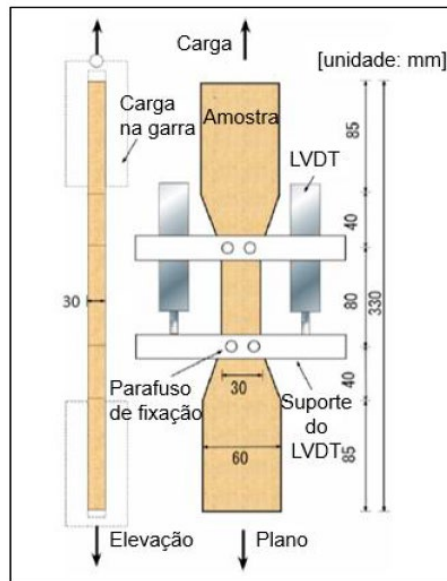
Com isso em vista, é possível verificar que o compósito obteve uma ruptura frágil, evidenciado principalmente pelas amostras CP01 e CP02, uma vez que após atingir o módulo de ruptura (MOR_{3p}) ele não oferece mais resistência para o carregamento externo. A partir disto é possível concluir que a fibra não atinge o estado de múltiplas fissuras, uma vez que após o carregamento máximo não ocorre a estricção do material, também chamado como comportamento de endurecimento, evidenciando que tensão deixa de ser distribuída de maneira uniforme.

Da mesma maneira, na avaliação experimental de Sodrolodabae et al., (2021) para argamassa reforçada com resíduo têxtil, as amostras que obtiveram o índice de dureza (I_G), menor que $3,00 \frac{kJ}{m^2}$ também apresentaram comportamento frágil.

4.6 ENSAIO TRAÇÃO COM FISSURA ÚNICA

O ensaio de tração com corpo de prova entalhado é utilizado para avaliar a relação entre tensão e abertura de fissura, a dependência dessas duas variáveis é expressamente apresentada na equação 4, que representa também a distribuição de tensão no compósito. Este ensaio é normatizado pela E399-12: *Standard test method for linear-elastic plane strain fracture toughness of KIC metallic material* (Japan Society of Civil Engineers, 2008), realizado sobre um corpo de prova de dimensões variáveis, conforme indicado na , deve possuir espessura de no mínimo 13mm e no máximo 50. Para avaliação da abertura de fissura em tensões conhecidas foi utilizado um extensômetro fixado no do corpo de prova, de modo que a deformação medida fosse consequência do processo de fissuração.

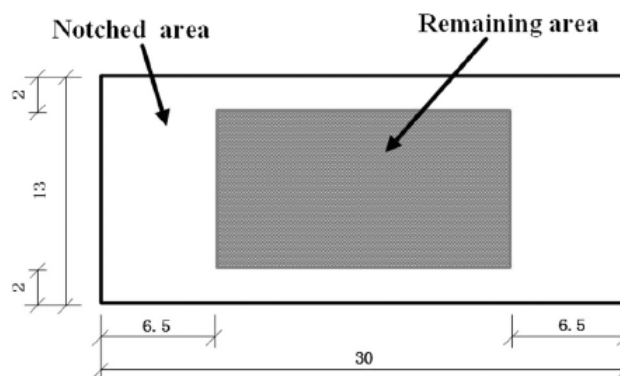
Figura 36 - Configuração de teste do ensaio de tração direta



(Fonte: Japan Society of Civil Engineers, 2008)

A confecção do deve ser realizada seguindo os procedimentos adotados por Chen, Ji e Huang (2021), de modo que as amostras sejam produzidas inicialmente sem nenhum ranhura. A secção do corpo de prova na região da fissura artificial pode ser vista na Figura 37. É importante ressaltar que a função da ranhura é concentrar a abertura de fissura em sua região, a fim de se obter uma leitura mais precisa pelo extensômetro.

Figura 37 - Dimensões do entalhe no corpo de prova



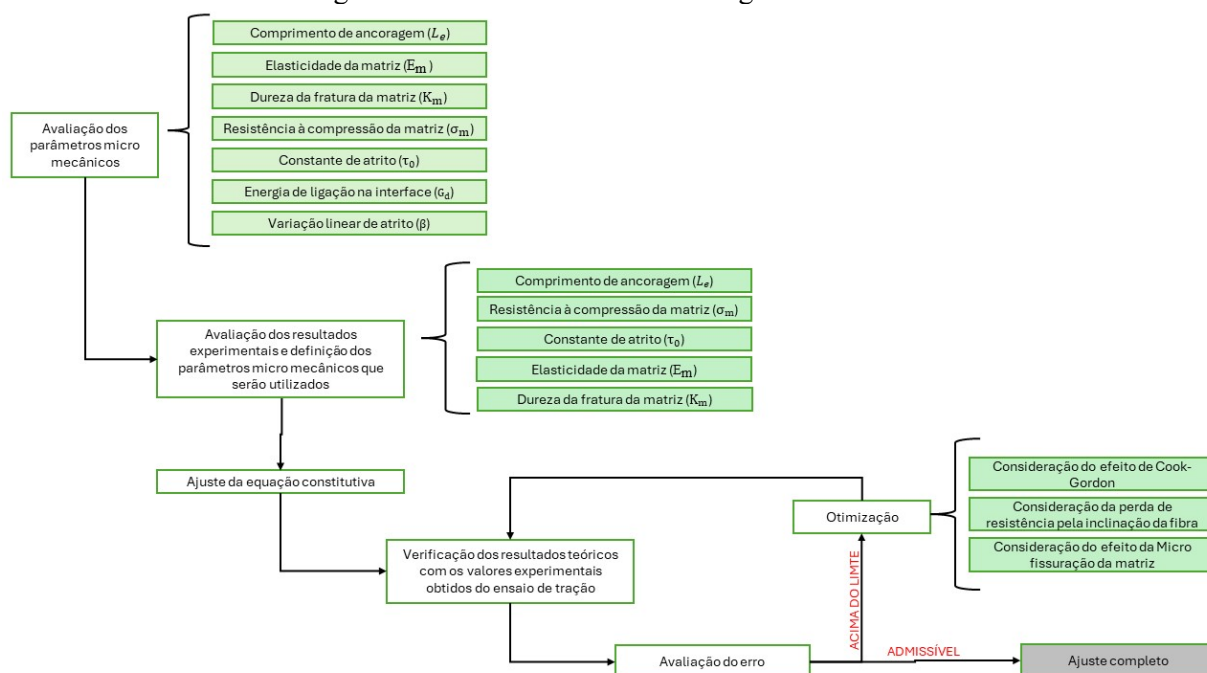
(Fonte: Chen, Ji e Huang, 2021)

Os resultados deste experimento são a fonte para comparação dos resultados teóricos, obtidos pela predição numérica, e os resultados reais. Nesta pesquisa o procedimento de moldagem foi realizada, com pretensão de execução do ensaio no laboratório de mecânica da Universidade de Brasília, entretanto os resultados não foram obtidos à tempo de publicação.

4.7 EQUAÇÃO PARAMETRIZADA

Com os parâmetros micro mecânicos da interface fibra-matriz definidos para a argamassa reforçada com fibras têxtil foi preciso, inicialmente, avaliar quais as variáveis necessárias para representar os resultados experimentais. Tendo em vista que, nas amostras estudadas neste trabalho, a fase de deslizamento não aconteceu, as suas características não foram incluídas na equação, para que a predição numérica se aproxime ao máximo da realidade. Por fim, é possível avaliar a precisão da equação através dos resultados experimentais obtidos do ensaio de tração com fissura única, caso necessário, é possível realizar uma otimização simples com a consideração dos coeficientes ponderadores decorrentes da i) inclinação da fibra ($f\phi$), ii) micro fissuração (s) e iii) efeito de Cook – Gordon (α). Este método de ajuste está representado na Figura 38.

Figura 38 - Procedimento de modelagem numérica



Fonte: Autor, (2023)

Os valores dos parâmetros utilizados como base para parametrização da equação constitutiva foram sumarizados na Tabela 21. Tendo em vista que o comportamento mecânico teórico do compósito não foi confrontado com os resultados experimentais pela inviabilidade de execução do ensaio de tração com fissura única, o procedimento de otimização indicado na Figura 38, não foi realizado neste trabalho.

Tabela 21 - Parâmetros usados no ajuste da equação

Parâmetro	Valor	Unidade
Perda de resistência devido à inclinação ($f\phi$)	0,20	Adimensional
Cook – Gordon (α)	0,19	mm
Resistência a compressão da matriz (σ_m)	15,3 MPa	MPa
Rigidez da matriz (K_m)	923,5±9,4	kPa×m ^{$\frac{1}{2}$}
Elasticidade da matriz (E_m)	30728,4 ± 2658	MPa
Constante de atrito (τ_0)	0,0181 ± 0,0056	Adimensional
Diâmetro (D_f)	95	μm
Comprimento de ancoragem (L_e)	3	mm

Fonte: Autor, (2023)

Desta maneira, os parâmetros foram simplesmente alterados na equação que define o comportamento de arrancamento genérico da fibra, representada pela equação 17, e logo após inseridos na equação constitutiva, indicada na Equação 4. Por fim, a parametrização numérica pode ser vista na equação 38.

$$\sigma(\delta) = 98,8 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{3}{2}} 1,6 - 0,53\delta \sin \phi \frac{2}{3} d\phi dl \quad (38)$$

Apesar de não realizar o procedimento de otimização, os valores numéricos para os coeficientes de micro fissuração e efeito Cook – Gordon podem ser considerados na equação constitutiva em termos de abertura de fissura, conforme indicados na Equação 21 e 25, respectivamente. Para o caso da micro fissuração, basta substituir na Equação 38 a variável de abertura de fissura (δ) pelo valor indicado na equação 39, onde P é a força atuante na fibra, estimado com valor médio de 1,96 N, conforme o ensaio de arrancamento. Da mesma maneira, para a consideração do efeito de Cook-Gordon deve-se usar a Equação 40.

$$\delta_{ef} = \sqrt{4 \left(\frac{3,18 \cdot 10^{-3} \sin\left(\frac{\phi}{2}\right)}{\cos^2\left(\frac{\phi}{2}\right)} \right)^2 + 4 \left(\frac{3,18 \cdot 10^{-3} \sin\left(\frac{\phi}{2}\right)}{\cos^2\left(\frac{\phi}{2}\right)} \right) \delta \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) + \delta^2 - 2 \left(\frac{3,18 \cdot 10^{-3} \sin\left(\frac{\phi}{2}\right)}{\cos^2\left(\frac{\phi}{2}\right)} \right)} \quad (39)$$

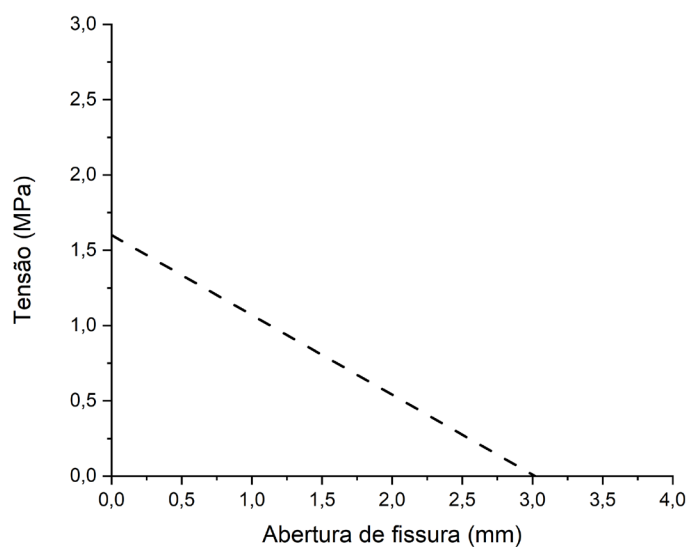
$$\delta_{ef} = \delta + 0,034 \quad (40)$$

Para casos mais simples, onde não há a consideração da micro fissuração, a predição numérica pode ser realizada conforme a equação 41. De modo que a consideração de Cook-Gordon também pode ser realizada através deste modelo simplificado. Sua curva teórica está apresentada na Figura 39.

$$\sigma(\delta)=1,6-0,53\delta \quad (41)$$

É possível perceber, a partir da curva teórica apresentada na Figura 39, que o início do estágio plástico do compósito carregado na tração axial acontece quando a tensão atinge 1,6 MPa, além disso, a abertura máxima de fissura é de 3mm, que é justamente o comprimento de ancoragem adotado. Tomando como base a avaliação realizada por Lin e Li, (1997) e apresentada na Figura 10, a curva deste trabalho obteve semelhança com a predição realizada para compósitos reforçados com fibra sem a consideração da fase de deslizamento.

Figura 39 - Curva teórica do compósito



Fonte: Autor, (2023)

Pela curva teórica também é possível verificar que o compósito não atinge o estado de pseudo-endurecimento, uma vez que após o início da abertura de fissura ele não apresenta resistência ao carregamento externo, o que também está evidente na Figura 10 para curva sem consideração da fase de deslizamento. Apesar do ensaio de tração axial com fissura única não

estar realizado, é possível avaliar pelo gráfico de flexão que o compósito se comporta de maneira frágil e sem formação de múltiplas fissuras, conforme discutido, evidenciando que a equação teórica está condizente com a realidade.

Por fim, a verificação do estado de pseudo-enrijecimento e formação de múltiplas fissuras também pode ser feito pela avaliação da energia complementar (J_B) e energia da fratura (J_{tip}), calculadas conforme a Equação 2 e 3, respectivamente. Considerando neste caso as curvas indicadas no ensaio de flexão, apresentadas na Figura 35, a energia complementar foi de $3,75 \frac{J}{m^2}$, ao passo que a energia da fratura foi de $5,84 \frac{J}{m^2}$. Sabendo que para a obtenção do estado de múltiplas fissuras e comportamento de pseudo-enrijecimento a seguinte inequação deve ser válida: $J_{tip} \leq J_B$ (Yang *et al.*, 2008), é possível comprovar que a argamassa reforçada com fibras têxteis estudada neste trabalho não atingiu a multifissuração, o que está de acordo com as discussões levantadas.

5. CONCLUSÃO

Foi possível perceber que a argamassa reforçada com fibra têxtil, com as proporções indicadas neste trabalho, não atinge o comportamento de múltiplas fissuras, demonstrando que não possui o comportamento de pseudo-endurecimento, comportamento este que evidencia a eficiência da fibra para distribuição das tensões na matriz. Partindo disto, no ajuste numérico da equação constitutiva, os parâmetros que representam a fase de deslizamento não puderam ser considerados, uma vez que esta fase não foi vista nos resultados experimentais.

No compósito ocorreu apenas a fase de arrancamento, visualizada de maneira efetiva no ensaio de arrancamento, e os resultados da energia de ligação (G_d) e coeficiente de atrito (τ_0) corroboram para esta afirmação, uma vez que G_d atingiu valores bem maiores do que os indicados na bibliografia, em estudos sobre compósitos reforçados com fibras com a fase de deslizamento atuante e, em contra partida, τ_0 foi muito abaixo, indicando que após perder a ligação com a matriz a fibra não oferece mais resistência ao carregamento.

Do ponto de vista matemático e, objetivo deste trabalho, essas verificações não fizeram diferença para a caracterização numérica, na realidade, deixaram ela mais simples, uma vez que não ocorre a estricção do compósito ao entrar na fase plástica, de modo que a relação entre tensão e abertura de fissura pode ser representado por, basicamente, uma função afim.

Sob a perspectiva das aplicações da argamassa reforçada, os resultados não exercem um impacto direto, uma vez que, com as informações apresentadas, é possível formular novas

composições desse compósito de acordo com as necessidades do pesquisador. Dessa forma, diferentes teores de fibra podem ser ajustados para otimizar a resistência à flexão, mesmo que isso implique em uma redução correspondente na resistência à compressão, ou vice-versa. A compreensão da micro mecânica da interface fibra-matriz proporciona uma base sólida para avaliar o traço mais adequado para uma aplicação específica. Assim, sugere-se, como uma das possíveis direções para futuras pesquisas, a formulação do compósito cimentício reforçado com fibras têxteis para atender a requisitos específicos de uma aplicação particular.

Apesar disso, em detrimento da não apresentação dos resultados de tração com fissura única, não foi possível avaliar a precisão do modelo numérico, de modo que recomenda-se fazer em trabalhos futuros. Essa verificação tem como consequência a otimização dos parâmetros e consideração de fato dos efeitos ponderadores.

REFERÊNCIAS

ABBAS, Y. M.; KHAN, · M IQBAL; YASSIR, B.; ABBAS, M. Fiber-Matrix Interactions in Fiber-Reinforced Concrete: A Review List of symbols. **Arab J Sci Eng**, v. 41, p. 1183–1198, 2016.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 549.4R-13 - Guide to design and construction of externally bonded fabric-reinforced cementitious matrix (FRCM) systems for repair and strengthening concrete and masonry structures**, Farmington Hills, , 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E399-12: Standard test method for linear-elastic plane strain fracture toughness of K_{IC} metallic material**, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão**, Rio de Janeiro, 2005.

____. **NBR 15630: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica**, Rio de Janeiro, 2008.

____. **NBR 13529:2013 – Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Terminologia**, Rio de Janeiro, 2013.

____. **NBR 16541: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura para a realização de ensaios**, Rio de Janeiro, 2016.

____. **NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos**, Rio de Janeiro, 2019.

____. **NBR16935: Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras — Procedimento**, Rio de Janeiro, 2021.

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

____. **NBR14931: Execução de estruturas de concreto armado, protendido e com fibras — Requisitos**, Rio de Janeiro, 2023.

____. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**, Rio de Janeiro, 2014.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000. v. 1

BENAOUDA, K.; PUENTE, B. **Brasil descarta mais de 4 milhões de toneladas de resíduos têxteis por ano**. Disponível em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/economia/brasil-descarta-mais-de-4-milhoes-de-toneladas-de-residuos-texteis-por-ano/>>. Acesso em: 8 jul. 2023.

BENTUR, ARNON.; MINDESS, SIDNEY. **Fibre reinforced cementitious composites**. Taylor & Francis, 2007.

BRITISH STANDARD. **Fibre-cement flat sheets - Product specification and test methods**, 2018.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. **Construção Civil: desempenho 2021 e cenário para 2022**. Brasília: [s.n.]. Disponível em: <<https://cbic.org.br/aco-representa-maior-peso-entre-aumento-de-custos-da-construcao-diz-estudo/>>. Acesso em: 30 abr. 2023.

CAROZZI, F. G.; COLOMBI, P.; FAVA, G.; POGGI, C. A cohesive interface crack model for the matrix-textile debonding in FRCM composites. **Composite Structures**, 2016.

CEARÁ, L.; BUONO, R. **DE CADA 100 TONELADAS DE LIXO TÊXTIL PRODUZIDAS POR ANO NO BRASIL, APENAS 20 SÃO RECICLADAS**. Disponível em: <<https://piaui.folha.uol.com.br/de-cada-100-toneladas-de-lixo-textil-produzidas-por-ano-no-brasil-apenas-20-sao-recicladadas-enquanto-80-sao-descartadas-indevidamente/>>. Acesso em: 8 jul. 2023.

CHEN, W.; JI, X.; HUANG, Z. Influence of fiber type on mechanical properties of lightweight cement-based composites. **Science and Engineering of Composite Materials**, v. 28, n. 1, p. 249–263, 1 jan. 2021.

COSTA, M.; ROSA, J. M. **Fibras Têxteis No Brasil: Propriedades E Perfil Atual Das Principais Fibras Utilizadas No Setor Do Vestuário**, 9º Colóquio de Moda – Fortaleza (CE) - 2013, 2013

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON.; **Model code 2010 : first complete draft**. 2010.

GRZESIAK, S.; PAHN, M.; SCHULTZ-CORNELIUS, M.; HARENBERG, S.; HAHN, C. Influence of fiber addition on the properties of high-performance concrete. **Materials**, v. 14, n. 13, 1 jul. 2021.

GUPTA, S.; SENGUPTA, J.; RAO, V. V. L. K. Evaluation of polyester fiber reinforced concrete for use in cement concrete pavement works. **Road Materials and Pavement Design**, v. 9, n. 3, p. 441–461, 1 jan. 2008.

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC)**, 2008.

JUNIOR, B. DE O. M. **SETOR TÊXTIL – PRODUÇÃO, COMÉRCIO INTERNACIONAL E PERSPECTIVAS PARA BRASIL, NORDESTE, CEARÁ E PERNAMBUCO EM 2021**. Fortaleza: [s.n.]. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/954/3/2021_CDS_185.pdf>. Acesso em: 8 jul. 2023.

JÚNIOR, W. D. C. **Materials science and Engineering: an introduction**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros técnicos e científicos Editora S.A, 2000. v. 1

KATZ, A.; LI, V. C. A special technique for determining the bond strength of micro-fibres in cement matrix by pullout test, **Journal Of Materials Science Letters**, 1996.

LIN, Z.; LI, V. C. Crack bridging in fiber reinforced cementitious composites with slip-hardening interfaces. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, v. 45, n. 5, p. 763–787, 1 maio 1997.

MARKOVA, I. **Textile Fiber Microscopy: A practical approach**. 1. ed. Hoboken: John Wiley & Sons Ltd, 2019. v. 1

MARSHALL, D. B.; COX, B. N. Tensile fracture of brittle matrix composites: Influence of fiber strength. **Acra merall**, v. 35, n. 11, p. 2607–2619, 1987.

MARSHALL, D. B.; COX, B. N. A J-integral method for calculating steady-state matrix cracking stresses in composites. **Mechanics of Materials**, v. 7, n. 2, p. 127–133, 1 nov. 1988.

MENDONÇA, Y. G. DOS S.; TOLEDO FILHO, R. D.; ZUKOWSKI, B. **Dosagem micromecânica de compósitos cimentícios reforçados com fibras de juta**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2018.

MERCURI, M.; VAILATI, M.; GREGORI, A. Lime-based mortar reinforced with randomly oriented polyvinyl-alcohol (PVA) fibers for strengthening historical masonry structures. **Developments in the Built Environment**, v. 14, 1 abr. 2023.

OÑATE, E.; OLLER, S.; OLIVER, J.; LUBLINER, J. **A constitutive model for cracking of concrete based on the incremental theory of plasticity** *Engineering Computations*, 1 abr. 1988.

PORTAL DA INDÚSTRIA. **Principais setores industriais do estado de Sergipe**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://perfildaindustria.portaldaindustria.com.br/estado/se>>. Acesso em: 2 jul. 2023.

RECENA, F. A. P. **Conhecendo a argamassa**. 2. ed. Porto Alegre: ediPUCRS, 2012.

RIBEIRO, R. P.; JARAMILLO NIEVES, L. J.; BERNARDIN, A. M. Effect of fiberglass waste and fly ash addition on the mechanical performance of Portland cement paste. **Cleaner Materials**, v. 7, 1 mar. 2023.

SANTANA, F. O. **DESENVOLVIMENTO DE MOLDE PARA CONFECÇÃO DE PLACAS DE CONCRETO COM APLICAÇÃO EM PAVIMENTO INDUSTRIAL**. Estância: [s.n.]. Disponível em: <<https://repositorio.ifs.edu.br/biblioteca/handle/123456789/1644>>. Acesso em: 28 jun. 2023.

SANTOS, T. R. DOS. **ARGAMASSA CIMENTÍCIA COM ADIÇÃO DE FIBRAS A BASE DE POLIÉSTER**. Estância: Instituto Federal de Sergipe, 2021.

SHE, P.; WANG, J.; PANG, Z.; LU, C. A Unified Model for Fibers With Divergent Pullout Behaviors in Strain Hardening Cementitious Composites (SHCC). **Frontiers in Materials**, v. 9, 8 mar. 2022.

SOARES, S. DO A. **CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA INCORPORAÇÃO DE FIBRAS A BASE DE POLIÉSTER NA MATRIZ CIMENTÍCIA: ESTUDO POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA E COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS FIBRAS**. Estância: Instituto Federal de Sergipe, 2022.

SODROLODABAE, P.; CLARAMUNT, J.; ARDANUY, M.; FUENTE, A. DE LA. A Textile Waste Fiber-Reinforced Cement Composite: Comparison between Short Random Fiber and Textile Reinforcement. **Materials (Basel)**, v. 14, n. 13, 2021.

SUNAGA, D.; KOBAYASHI, T.; KANAKUBO, T. Modeling of Bridging Law for Bundled Aramid Fiber-Reinforced Cementitious Composite and its Adaptability in Crack Width Evaluation. **Materials 2021, Vol. 14, Page 179**, v. 14, n. 1, p. 179, 2 jan. 2021.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings**

and Construction Sector. Nairobi: [s.n.]. Disponível em:

<[https://globalabc.org/sites/default/files/2023-](https://globalabc.org/sites/default/files/2023-03/2022%20Global%20Status%20Report%20for%20Buildings%20and%20Construction_1.pdf)

[03/2022%20Global%20Status%20Report%20for%20Buildings%20and%20Construction_1.pdf](https://globalabc.org/sites/default/files/2023-03/2022%20Global%20Status%20Report%20for%20Buildings%20and%20Construction_1.pdf)>. Acesso em: 30 abr. 2023.

VENIGALLA, S. G.; NABILAH, A. B.; NASIR, N. A. M.; SAFIEE, N. A.; ABD AZIZ, F. N. A. **Textile-Reinforced Concrete as a Structural Member: A Review** *Buildings*, MDPI, , 1 abr. 2022.

WANG, Y.; LI, V. C.; BACKER, S. Modelling of fibre pull-out from a cement matrix.

International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, v. 10, n. 3, p. 143–149, 1 ago. 1988.

YANG, E.-H.; WANG, S.; YANG, Y.; LI, V. C. Fiber-Bridging Constitutive Law of Engineered Cementitious Composites. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 6, n. 1, p. 181–193, 2008.

YU, J.; CHEN, Y.; LEUNG, C. K. Y. Micromechanical modeling of crack-bridging relations of hybrid-fiber Strain-Hardening Cementitious Composites considering interaction between different fibers. **Construction and Building Materials**, v. 182, p. 629–636, 10 set. 2018.

ZHANG, P.; YANG, Y.; WANG, J.; JIAO, M.; LING, Y. **Fracture models and effect of fibers on fracture properties of cementitious composites—a review** *Materials*, MDPI AG, , 1 dez. 2020.

ZHENG, X.; ZHANG, J.; WANG, Z. Effect of multiple matrix cracking on crack bridging of fiber reinforced engineered cementitious composite. **Journal of Composite Materials**, v. 54, n. 26, p. 3949–3965, 1 nov. 2020.