

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CAMPUS LAGOA DO SINO
CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA
ENGENHARIA AMBIENTAL

Ricardo Manoel Romão

**ESTUDO DO ENSAIO DE DESTACAMENTO (PULLOUT) PARA FIBRAS
VEGETAIS INSERIDAS EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS**

**Buri
2024**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CAMPUS LAGOA DO SINO
CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA
ENGENHARIA AMBIENTAL

Ricardo Manoel Romão

**ESTUDO DO ENSAIO DE DESTACAMENTO (PULLOUT) PARA FIBRAS
VEGETAIS INSERIDAS EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como parte para a obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Ambiental na
Universidade Federal de São Carlos.

Orientação: Prof. Dr. Jonathan Gazzola.

**Buri
2024**

Romão, Ricardo Manoel

Estudo do ensaio de destacamento (Pullout) para fibras vegetais inseridas em compósitos cimentícios / Ricardo Manoel Romão -- 2024.

59f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos, campus Lagoa do Sino, Buri

Orientador (a): Jonathan Gazzola

Banca Examinadora: Inacio Maria Dal Fabbro, Kelen

Cristiane Cardoso

Bibliografia

1. Construção civil. 2. Ensaios mecânicos. 3. Material alternativo. I. Romão, Ricardo Manoel. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)


DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Lissandra Pinhatelli de Britto - CRB/8 7539

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

Folha de Aprovação


Assinatura dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Trabalho de Conclusão de Curso do candidato Ricardo Manoel Romão, realizada em 15/01/2024:

Documento assinado digitalmente
 JONATHAN GAZZOLA
Data: 23/01/2024 14:54:49-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Jonathan Gazzola – Orientador(a)
Centro de Ciências da Natureza – UFSCar – Campus Lagoa do Sino.



Prof. Dr. Inacio Maria Dal Fabbro
Faculdade de Engenharia Agrícola - Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Documento assinado digitalmente
 KELEN CRISTIANE CARDOSO
Data: 18/01/2024 10:14:32-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Kelen Cristiane Cardoso
Centro de Ciências da Natureza – UFSCar – Campus Lagoa do Sino.

AGRADECIMENTO

Dedico este trabalho principalmente à minha mãe Maria dos Anjos Martins, por sempre cuidar de mim até o final, me incentivando e me fazendo correr atrás dos meus objetivos. Ao meu pai, Eduardo Romão, e à minha madrasta, Andreia do Rocio Haus, que estão sempre presentes na minha vida e no meu desenvolvimento. A minha avó, Dione Aparecida Farias Romão por sempre propagar a alegria no meu dia a dia e ao meu Irmão que por todo apoio.

A minha noiva e futura esposa Laís Aparecida de Oliveira, por todo carinho, todo apoio, inspiração e incentivo. Me fazendo sempre dar o meu melhor e me dedicar ao máximo em tudo que eu faço, me fazendo assim poder enxergar um futuro incrível e cheio de realizações que estão por vir.

Ao meu professor orientador Dr. Jonathan Gazzola, por me possibilitar fazer este trabalho, me desenvolvendo assim como profissional e estando apto a seguir com a carreira de pesquisador na área.

A Dra. Kelen Cristiane Cardoso, por me auxiliar durante algumas etapas experimentais do trabalho, assim como conseguir certos equipamentos necessários para sua realização.

Aos técnicos de laboratório Caetano Afonso Lanzoni Troiani, Sinara Oliveira Dal Farra e Ueslei Lopes pela ajuda em etapas específicas do procedimento experimental, me fornecendo treinamento e as habilidades necessárias para o uso dos equipamentos.

A Universidade Federal de São Carlos por possibilitar que eu tivesse acesso ao ensino superior e por fornecer a mesma oportunidade a diversas outras pessoas que convivi e ainda convivo durante todo tempo da graduação e em diante.

RESUMO

ROMÃO, Ricardo Manoel. **Estudo do Ensaio de Destacamento (Pullout) para Fibras Vegetais Inseridas em Compósitos Cimentícios**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de São Carlos, Campus Lagoa do Sino, Buri, 2024.

Diversos materiais são empregados diariamente no setor da construção civil, cada um com matérias-primas distintas, resultando em propriedades e aplicações diversas. Este setor encontra-se em constante evolução devido à realização contínua de novas obras. Com a crescente demanda por sustentabilidade em todos os setores da sociedade, surge a necessidade de aproveitar materiais que, anteriormente, eram simplesmente descartados. Isso implica em uma utilização mais eficaz dos resíduos gerados, aliviando também a pressão sobre os recursos ambientais cuja obtenção ou utilização impacta significativamente o meio ambiente. Uma estratégia para atingir esse objetivo é o desenvolvimento de novos materiais que façam uso dos resíduos anteriormente sem finalidade. Entre esses materiais, destacam-se os compósitos, formados por uma matriz que tem suas características aprimoradas pela combinação com um material de reforço. Dentre as opções de materiais de reforço, incluem-se as fibras vegetais, que, por si só, apresentam uma ampla variedade, cada uma com suas características distintas. Portanto, estudos que buscam avaliar o comportamento específico de cada tipo de fibra como reforço, assim como a metodologia utilizada para essa avaliação, são fundamentais para o desenvolvimento de materiais alternativos que atendam às necessidades atuais e ofereçam uma gama mais ampla de materiais com aplicações distintas para o mercado. Uma das metodologias empregadas para avaliar a incorporação de fibras vegetais em matrizes cimentícias é o ensaio de destacamento, conhecido como "*Pullout*" em inglês. Esse ensaio possibilita testar a efetividade da ligação entre a fibra e a matriz, além de determinar o comprimento crítico da fibra, um fator essencial para avaliar a transmissão de esforços do material quando submetido a uma força. Nesse contexto, o presente trabalho se propôs a estudar a metodologia do ensaio de *Pullout* por meio do teste de materiais compósitos de matrizes cimentícias reforçadas com a fibra do coco verde (*Cocos nucifera L.*).

Palavras-chave: Construção civil. Ensaio de Pullout. Fibra de coco. Material alternativo. Sustentabilidade.

RESUMO EM LÍNGUA ESTRANGEIRA

Romão, Ricardo Manoel. **Study of the Pullout Test for Plant Fibers Embedded in Cementitious Composites**. 2024. Undergraduate final project– Federal University of São Carlos, Lagoa do Sino Campus, Buri, 2022.

Various materials are employed daily in the civil construction sector, each with distinct raw materials, resulting in diverse properties and applications. This sector is in constant evolution due to the continuous realization of new projects. With the growing demand for sustainability in all sectors of society, there arises the need to harness materials that were previously simply discarded. This implies a more effective utilization of generated waste, also alleviating the pressure on environmental resources whose acquisition or use significantly impacts the environment. One strategy to achieve this goal is the development of new materials that make use of previously purposeless waste. Among these materials, composites stand out, formed by a matrix whose characteristics are enhanced through the combination with a reinforcing material. Among the options for reinforcing materials are plant fibers, which, on their own, present a wide variety, each with its distinct characteristics. Therefore, studies that seek to assess the specific behavior of each type of fiber as reinforcement, as well as the methodology used for this evaluation, are crucial for the development of alternative materials that meet current needs and provide a broader range of materials with distinct applications for the market. One of the methodologies employed to assess the incorporation of plant fibers in cementitious matrices is the pullout test. This test allows testing the effectiveness of the bond between the fiber and the matrix, as well as determining the critical length of the fiber, a crucial factor for evaluating the transmission of forces in the material when subjected to a force. In this context, the present study aimed to investigate the pullout test methodology through the testing of composite materials with cementitious matrices reinforced with green coconut fiber (*Cocos nucifera L.*).

Keywords: Alternative material. Civil construction. Coconut fiber. Pullout test. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Mecanismo de transferência de tensões entre a matriz e as fibras.	13
Figura 2 -	Esquema do Ensaio de Pullout	20
Figura 3 -	Trecho inicial da curva de pullout	21
Figura 4 -	Curva de Pullout Obtida no Ensaio de Referência	22
Figura 5 -	Estrutura do coco verde	25
Figura 6 -	Fibras de coco expostas	25
Figura 7 -	Balança de alta precisão	26
Figura 8 -	Estufa de Secagem	26
Figura 9 -	Dessecador	27
Figura 10 -	Cortador de tubo PVC 42mm da marca VONDER	28
Figura 11 -	Moldes de PVC	28
Figura 12 -	Mistura da Argamassa	29
Figura 13 -	Corpos de Prova	30
Figura 14 -	Teste de ruptura em execução	32
Figura 15 -	Sargento utilizado para fixação da fibra na mesa de corte	32
Figura 16 -	Texturômetro durante o teste de cisalhamento	33
Figura 17 -	Mesa de corte durante o teste de cisalhamento da fibra	33
Figura 18 -	Vista dos testes no texturômetro	34
Figura 19 -	Ensaio de destacamento em andamento	34
Figura 20 -	Estereomicroscópio binocular	36
Figura 21 -	Microscópio	36
Figura 22 -	Exemplo de foto tirada de uma fibra com auxílio do microscópio no aumento de 100x	37

Figura 23 - Foto das marcações de milímetros da régua plástica com o aumento de 100x	37
Figura 24 - Layout do software ImageJ	38
Figura 25 - Definindo 1mm no software ImageJ	38
Figura 26 - Exemplo de desenho do perímetro das fibras obtido pelo software	38
Figura 27 - Exemplo de <i>script</i> de comando da elaboração dos gráficos de dispersão	40
Figura 28 - Comportamento do traço rico com o método de encapsulamento	45
Figura 29 - Comportamento do traço rico com o método de inserção	46
Figura 30 - Comportamento do traço médio com o método de encapsulamento	46
Figura 31 - Comportamento do traço médio com o método de inserção	47
Figura 32 - Comparativo entre as configurações	47
Figura 33 - Possível valor de comprimento crítico para o traço rico com o método de encapsulamento	48
Figura 34 - Possível valor de comprimento crítico para o traço rico com o método de inserção	48
Figura 35 - Possível valor de comprimento crítico para o traço médio com o método de encapsulamento	49
Figura 36 - Possível valor de comprimento crítico para o traço médio com o método de inserção	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Propriedades das Matrizes	11
Tabela 2 -	Propriedades das Fibras	11
Tabela 3 -	Fibras Brasileiras	12
Tabela 4 -	Teste de Ruptura	41
Tabela 5 -	Teste de Cisalhamento	42
Tabela 6 -	Traço Rico (Encapsulamento)	43
Tabela 7 -	Traço Rico (Inserção)	43
Tabela 8 -	Traço Médio (Encapsulamento)	44
Tabela 9 -	Traço Médio (Inserção)	44
Tabela 10 -	Rompimentos, Desprendimentos e Falhas	45

Sumário

1. INTRODUÇÃO	8
2. JUSTIFICATIVA	13
3. OBJETIVOS	14
3.1. GERAIS	14
3.2. ESPECÍFICOS	14
4. REVISÃO DA LITERATURA	15
4.1. FIBRAS COMO REFORÇO PARA MATRIZES CIMENTÍCIAS	15
4.2. DIFERENTES INTERPRETAÇÕES DO ENSAIO DE PULLOUT	15
4.3. FIBRA VEGETAL DE COCO	21
5. METODOLOGIA	22
5.1. MATERIAIS	22
5.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	23
5.2.1. Obtenção das fibras	23
5.2.2. Teor de Umidade.	24
5.2.3. Preparação dos Moldes de PVC	26
5.2.4. Preparação dos corpos de prova.	27
5.2.5. Ensaio Mecânicos	29
5.2.5.1. Teste de Ruptura de Fibra	30
5.2.5.2. Determinação da Tensão de Cisalhamento da Fibra	31
5.2.5.3. Ensaio de Destacamento (Pullout)	32
5.2.6. Determinação da Área e Diâmetro da Fibra	34
5.2.7. Tratamento dos Dados do Ensaio de Destacamento	38
6. RESULTADOS	40
6.1. DETERMINAÇÃO DO COMPRIMENTO CRÍTICO ATRAVÉS DA EQUAÇÃO	40
6.1.1. Teste de Ruptura.	40
6.1.2. Teste de Cisalhamento	41
6.2. DETERMINAÇÃO DO COMPRIMENTO CRÍTICO ATRAVÉS DO ENSAIO DE DESTACAMENTO	41
6.3. DISCUSSÃO	49
7. CONCLUSÃO	50
7.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	51
8. REFERÊNCIAS	51

1. INTRODUÇÃO

Dentre os aspectos fundamentais para o desempenho de materiais compósitos com matriz reforçada por fibras, temos a eficiência da ligação interfacial, ou seja, a eficácia das fibras em melhorar as propriedades do compósito, essa eficácia depende da capacidade das fibras de se interconectar, formando uma rede tridimensional que pode resistir às tensões aplicadas. O comprimento crítico das fibras deve ser suficiente para permitir essa interconectividade, mas determinar o comprimento exato é desafiador. Uma das metodologias para se averiguar esse comprimento é através de um ensaio de destacamento, denominado como *pullout* (retirada), ensaio esse que testa a adesão entre fibra e matriz.

Os materiais com características fibrosas são considerados polifásicos por possuírem duas fases básicas distintas, sendo elas as fibras e a matriz onde as fibras se encontram embutidas. As fibras atuam como reforço mecânico da matriz, possuindo normalmente um volume bem menor ao dela. Se tratando da construção civil, as matrizes mais utilizadas são as definidas como frágeis, ou seja, as que se rompem sem deformação plástica, geralmente são argamassas, pastas e concretos aglomerantes minerais (Vendruscolo, 2003).

Fibras são elementos descontínuos com comprimento significativamente maior do que as dimensões da seção transversal. Podem incluir materiais como aço, vidro, fibras sintéticas (polipropileno, carbono, náilon, etc.) e fibras naturais (sisal, madeira, coco, etc.). Utilizando a adição de fibras nas matrizes é possível se atingir melhoras nas propriedades mecânicas dos materiais, como por exemplo resistência à flexão, resistência à tração e ao impacto. O principal benefício que se pode obter reforçando uma matriz frágil com fibras é ocasionar a alteração no comportamento que aquele material teria após sua fissura, assim, o material sofre uma significativa deformação plástica antes do rompimento, caso o contrário, o material se romperia imediatamente após o início da fissuração da matriz. De forma a garantir essa alteração, é necessário a determinação de formatos, comprimentos e volumes de fibras adequados, sendo tais valores objetos de diversas pesquisas e estipulação de modelos teóricos (Agopyan, 1993; Amorim, 2018; Monteiro, 2006).

O emprego de fibras para reforçar materiais não é algo novo no setor da construção civil, datando desde o antigo Egito, onde os materiais vernaculares

conhecidos como adobes e também os tijolos eram reforçados com as raízes das plantas. O cimento-amianto é considerado o primeiro material reforçado com fibras a ser produzido em escala industrial, ocupando até hoje um lugar de destaque, apesar dos riscos de exposição prolongada. Por mais que os materiais fibrosos tenham sido desenvolvidos pensando inicialmente na construção civil, outras áreas da engenharia obtiveram diversos avanços no embasamento científico para produção desses materiais, podemos ressaltar como exemplos as indústrias naval, aeronáutica, bélica e mecânica, principalmente devido aos acontecimentos da segunda guerra mundial. Graças a esse fato, existem diversos estudos sobre matrizes poliméricas e metálicas (Agopyan, 1993).

A partir da década de 1960, com a descoberta dos problemas de saúde derivados da aplicação do amianto na construção civil e das consequentes restrições impostas ao seu uso, a engenharia civil volta a estudar a aplicação dos materiais fibrosos procurando uma alternativa para o amianto. Assim, o engenheiro civil dinamarquês Herbert Krenchel detém os créditos sobre a tese que é considerada pioneira nos estudos dos materiais fibrosos dentro da construção civil, provendo base para a teoria dos compósitos de matrizes frágeis (Krenchel, 1964). Na década de 1970, os estudos de materiais fibrosos, com a elaboração de fibras de vidro resistentes a álcalis, se concentraram no desenvolvimento de cimento reforçados com essas fibras. Em 1980, foram constatadas restrições de durabilidade desses materiais, dessa os estudos voltaram-se as fibras metálicas, nessa época diversas fibras de aço baratas e eficientes foram disponibilizadas para comercialização no mercado. O estudo de fibras para o reforço de matrizes no Brasil teve sua origem em 1980 com o trabalho realizado pelo Centro de Pesquisa e Desenvolvimento (CEPED) na cidade de Camaçari, Bahia (Agopyan, 1993).

No setor da construção civil as matrizes geralmente utilizadas são as frágeis, sendo concretos, argamassas e pastas, onde as propriedades básicas podem ser encontradas na tabela a seguir.

Tabela 1 - Propriedades das Matrizes

Matriz	Massa Específica (Kg/m³)	Módulo de Deformação (GPa)	Resistência à Tração (MPa)	Deformação na Ruptura (%)
Pasta de Cimento Portland	2000-2200	10-25	3-6	0,01-0,05
Pasta de Gesso	1600-1800	2-3	2-3	0,2-0,3
Argamassa de Cimento Portland	2100-2200	25-35	2-4	0,005-0,015
Concreto de Cimento Portland	2200-2400	30-40	1-4	0,005-0,015

Fonte: (Agopyan, 1993)

As fibras mais utilizadas são as de vidro, de amianto crisotila, de propileno, de aço de alta resistência e as de coco. As propriedades dessas fibras podem ser encontradas na tabela a seguir.

Tabela 2 - Propriedades das Fibras

Fibras	Diâmetro (Micrômetro)	Comprimento (mm)	Densidade (Kg/m³)	Resistência à Tração (MPa)
Amianto Crisotila	0,02-30	<40	2500	200-1800
Vidro Tipo E	8-10	10-50	2540	3500
Vidro Resistente a Álcalis (Sem Filamentos)	12,5	10-50	2540	2500
Aço	100-600	10-60	7860	700-2000
Polipropileno Fibrilado	500-4000	20-75	900	400

Fonte: (Agopyan, 1993)

O Brasil também possui suas próprias fibras aplicadas para reforço, estando suas propriedades dispostas na tabela a seguir.

Tabela 3 - Fibras Brasileiras

Fibra	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Alongamento na Ruptura (%)	Celulose (%)	Produção Brasileira (Gton/ano)	Preço (US\$/ton)
Coco	0,21 - 0,37	10 - 200	99 - 116	1,5 - 4,2	23 - 43	50	2	150
Sisal	0,28 - 0,40	30 - 100	275 - 350	15	5	66	0,25	100 - 200
Papel Jornal	-	1 - 2	300 - 500	10 - 40	-	100	0,21	150 - 200
Bambu	-	2,3 - 3,5	73 - 505	5,1 - 24,6	3,2	-	-	-
Juta	0,02 - 0,1	Vários Metros	230	-	3,7 - 6,5	70	-	-
Malva	0,009 - 0,12	1,5 - 5	230	-	5	70	0,25	-
Piaçava	5	500 - 600	140	5,6	6	-	0,1	-

Fonte: (Agopyan, 1993)

Um artigo publicado pela PUC (2023) cita que, no contexto do concreto desprovido de fibras, uma fissura desempenha o papel de uma barreira à propagação de tensões, delineadas de maneira simplificada pelas linhas de tensão nas extremidades da fissura (Figura 1). Caso essa carga supere a resistência da matriz, resultará na ruptura súbita do material. Se a carga for cíclica, a ruptura por fadiga pode ser interpretada de maneira semelhante. A cada ciclo, observa-se uma discreta expansão das microfissuras, acompanhada por um aumento progressivo na concentração de tensões em suas extremidades, culminando na ruptura total do material. Assim que a fissura atinge um comprimento crítico no concreto, ocorre a ruptura abrupta do material, caracterizando um comportamento tipicamente frágil. Nesse cenário, não é possível contar com qualquer capacidade resistente do concreto fissurado.

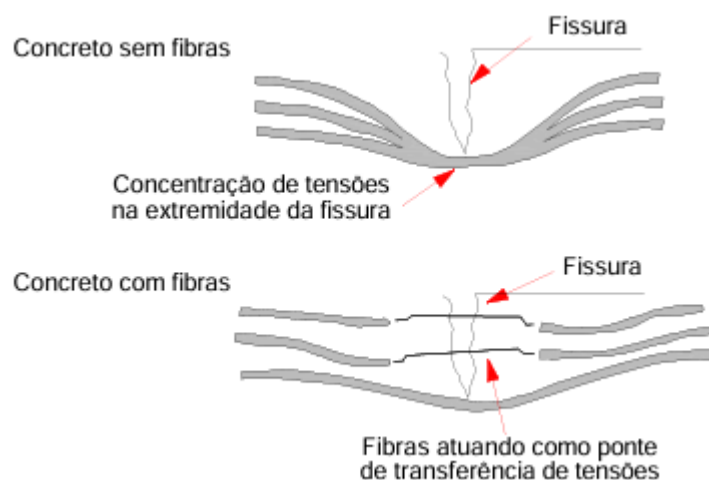


Figura 1. Mecanismo de transferência de tensões entre a matriz e as fibras. Fonte: PUC, 2023.

Ao incorporar fibras com resistência e módulo de elasticidade adequados ao concreto, em uma proporção adequada, o material deixa de exibir um caráter notadamente frágil. Isso ocorre devido à função das fibras como pontes de transferência de tensões, conforme ilustrado na Figura 1. Essa dinâmica resulta em uma considerável diminuição na velocidade de propagação das fissuras no material, transformando-o em um comportamento pseudodúctil ou não frágil. Como resultado, o concreto passa a apresentar certa capacidade resistente mesmo após a fissuração. A introdução de fibras assegura uma redução significativa na incidência de fissuras no concreto. Essa constatação pode justificar sua aplicação, mesmo em concretos convencionalmente armados, como uma forma complementar de reforço para mitigar a fissuração do material.

A determinação do comprimento crítico para matrizes cimentícias é um desafio complexo devido a diversas variáveis e características inerentes a esses materiais. A ampla gama de composições, incluindo diferentes tipos de cimento, aditivos e proporções variadas de componentes, torna difícil estabelecer um comprimento crítico universalmente aplicável. A heterogeneidade intrínseca dessas matrizes, com a presença de agregados e fibras, adiciona dificuldades à modelagem precisa do comportamento do material. Além disso, fatores ambientais, como umidade e temperatura, exercem influência sobre as propriedades da matriz cimentícia, introduzindo uma camada adicional de complexidade na determinação do comprimento crítico. Em situações de carregamento dinâmico, como cargas cíclicas, a propagação de fissuras pode se comportar de maneira distinta em

comparação com carregamentos estáticos, adicionando desafios à análise. A falta de modelos matemáticos precisos, a complexidade dos ensaios experimentais necessários e a variabilidade das propriedades ao longo do tempo são outras dificuldades a serem superadas para uma compreensão abrangente do comportamento fissurante em matrizes cimentícias. A influência significativa da relação água-cimento na resistência e durabilidade da matriz cimentícia adiciona uma camada adicional de complexidade, tornando crucial abordagens multidisciplinares e metodologias robustas para abordar essas questões (Miron *et al*, 2017).

2. JUSTIFICATIVA

O estudo proposto visa aprofundar a compreensão dos compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais, com enfoque especial no comportamento do ensaio de destacamento (*pullout*) dessas fibras. A incorporação de materiais orgânicos, como as fibras de coco, em matrizes cimentícias representa uma abordagem inovadora e sustentável na engenharia de materiais. A justificativa para esse trabalho reside na busca por soluções mais eficientes e ecologicamente responsáveis no desenvolvimento de compósitos estruturais. As fibras vegetais oferecem uma alternativa renovável e de baixo custo em comparação com fibras sintéticas, além de apresentarem propriedades mecânicas que podem melhorar significativamente o desempenho dos compósitos. A determinação do comprimento crítico das fibras de coco no ensaio de destacamento é crucial para otimizar o projeto desses compósitos, garantindo uma distribuição eficaz das fibras na matriz cimentícia. Isso não apenas contribui para o avanço do conhecimento científico nesse campo, mas também abre portas para a aplicação prática desses materiais em projetos de construção mais sustentáveis e duráveis. Ao compreender os mecanismos de destacamento das fibras vegetais em compósitos cimentícios, este estudo visa fornecer informações valiosas que podem ser utilizadas no desenvolvimento de novos materiais de construção com características aprimoradas, promovendo, assim, avanços significativos na área de construções sustentáveis.

3. OBJETIVOS

3.1. GERAIS

Analisar a aplicabilidade da metodologia do ensaio de *pullout* na determinação de comprimento crítico de fibras.

3.2. ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo geral, o trabalho de pesquisa proposto cumpriu as etapas listadas abaixo:

- 3.2.1. Preparar moldes de PVC com as alturas de 05, 10, 15, 20, 25, 30, 35 e 40mm;
- 3.2.2. Preparar as fibras para os ensaios de destacamento e de determinação de comprimento crítico;
- 3.2.3. Moldar os corpos de prova com diferentes tipos de traço (rico e médio) de argamassa e diferentes tipos de acoplamento da fibra (inserção e embutimento);
- 3.2.4. Realizar os ensaios de tração e de cisalhamento e calcular suas tensões máximas de ruptura;
- 3.2.5. Realizar os ensaios de destacamento nos corpos de prova moldados;
- 3.2.6. Realizar as análises estatísticas e plotar os gráficos para determinação do comprimento crítico pelo método do ensaio de destacamento;
- 3.2.7. Calcular o comprimento crítico da fibra de coco pela técnica proposta;
- 3.2.8. Comparar os valores de ensaio com os valores obtidos em literatura.

4. REVISÃO DA LITERATURA

4.1. FIBRAS COMO REFORÇO PARA MATRIZES CIMENTÍCIAS

Materiais compósitos, são aqueles formados por duas ou mais fases onde essas possuem diferentes propriedades físicas e químicas. Dentre eles, aqueles considerados mais importantes no âmbito tecnológico são os que demonstram possuir fase dispersa, com matriz contínua, possuindo forma de fibras. Compósitos reforçados com fibras apresentam vantagens como elevados módulos de elasticidade e de índices de resistência mecânica quando comparados com materiais de densidade semelhante. A "fase dispersa" refere-se a uma parte do material que está distribuída de maneira descontínua na matriz. Em outras palavras, é um componente que está presente na forma de pequenas partículas, fibras, ou outro tipo de estrutura dispersa na matriz do material compósito, já a "matriz contínua" refere-se à fase principal do material que envolve e suporta a fase dispersa (Hull; Clyne, 1981).

A eficiência da ligação da fibra com a matriz, juntamente com a influência do comprimento desta, são importantíssimos para garantir valores altos de rigidez e de resistência para o compósito. Quando as fibras são muito curtas, isso acaba resultando em uma transmissão com pouca eficiência da carga externa aplicada sobre a matriz contínua. Logo, existe a necessidade de um comprimento crítico (l_c) mínimo da fibra para que assim ocorra uma transmissão efetiva dos esforços. Assim, é possível se assegurar que exista maior rigidez e maior resistência na direção em que a fibra está se alinhando (Monteiro, 2006).

4.2. DIFERENTES INTERPRETAÇÕES DO ENSAIO DE PULLOUT

São diversas as metodologias sugeridas para determinação do l_c , dentre elas vale destacar as pesquisas desenvolvidas por Kelly e Tyson (1965), Hull e Clyne (1981) e Yue *et al* (1995).

Kelly e Tyson (1965) estabeleceram um l_c , que tem que ser excedido para que ocorra o rompimento da fibra, sem que ocorra o escorregamento por entre a matriz. Caso o valor determinado seja abaixo do l_c , não ocorre uma transmissão efetiva de carga da matriz para a fibra, assim não ocorreria o rompimento e dessa maneira, a falha do compósito seria regida pela resistência da matriz ou da

interface, dessa forma, prevalecendo a que tiver o valor mais baixo. Valores que têm o comprimento de fibra menor que o crítico, geralmente ocorre falha da interface com o desacoplamento ou “*debonding*” da fibra.

A Lei de Hooke descreve o comportamento elástico de um material, afirmando que a deformação é diretamente proporcional à tensão aplicada, dentro do limite de elasticidade do material. Essa lei é comumente aplicada a materiais que exibem comportamento elástico linear (Beer *et al.*, 2017).

$$\sigma = E * \varepsilon$$

Equação 1. Lei de Hooke. Fonte: Beer et al., 2017.

Onde:

- σ é tensão aplicada no material;
- E é o módulo de elasticidade do material;
- ε é a deformação do material.

O ensaio de pullout, se refere a um teste mecânico projetado para avaliar a aderência entre a fibra e a matriz em um compósito. Quando uma carga é aplicada a uma amostra durante o ensaio de *pullout*, as fibras começam a ser puxadas para fora da matriz cimentícia. A resistência ao *pullout* é uma medida da capacidade da interface entre a fibra e a matriz de cimento de suportar essa carga antes que ocorra a falha. O rompimento pode ocorrer de várias formas, dependendo das propriedades do material, da geometria da amostra e das condições de teste. Alguns dos modos de falha comuns em ensaios de *pullout* para fibras vegetais e matrizes cimentícias incluem a ruptura de adesão, onde a falha ocorre quando a força de adesão entre a fibra e a matriz é superada, resultando na separação da fibra da matriz, a fratura interfacial, onde neste caso, a falha ocorre na interface entre a fibra e a matriz, onde há uma separação entre os dois materiais, a ruptura da fibra, onde as fibras podem se romper antes que ocorra a falha na interface ou na matriz, ou ainda a ruptura da matriz, onde a matriz de cimento pode falhar antes que ocorra a separação entre a fibra e a matriz (Pereira, 2018).

A relação com a Lei de Hooke pode ser vista na fase elástica do ensaio de pullout. Durante essa fase, à medida que a carga é aplicada para retirar a fibra da matriz, a deformação inicial é elástica, e a lei pode ser aplicada para descrever essa relação inicial entre a tensão e a deformação. Segundo a lei, na interface

fibra-matriz, as forças de cisalhamento agindo na fibra devem estar em equilíbrio com as forças de tração. Portanto, é possível igualar a força de cisalhamento máxima na interface à força de tração máxima que a fibra pode suportar antes de falhar.

$$t * A = \sigma_f * A_f$$

Equação 2. Aplicação da Lei de Hooke para o Ensaio de Pullout. Fonte: Pereira, 2018.

Onde:

- t é a tensão de cisalhamento na interface fibra-matriz;
- σ_f resistência à tração da fibra;
- A é área da interface fibra-matriz;
- A_f é a área transversal da fibra.

A área da interface A pode ser aproximada como o perímetro da fibra multiplicado pela profundidade de penetração da matriz na fibra. Assumindo uma penetração média da matriz $L_c/2$, A pode ser escrita como equivalente a $\pi * d * L_c$. Substituindo na equação de equilíbrio de forças e rearranjando para L_c , é obtida a equação geral para determinação do comprimento crítico de fibra (equação 3).

$$l_c = \frac{d * \sigma_f}{2t}$$

Equação 3. Comprimento crítico de fibra. Fonte: Callister & Rethwisch, 2012; Kelly & Tyson, 1965.

Onde:

- d é o Diâmetro da Fibra.

No caso da presença de uma matriz metálica, a tensão cisalhante seria relativa à resistência da própria matriz (t_m). Em caso da presença de matriz polimérica, ela seria relativa a resistência do cisalhamento da interface entre fibra e matriz (t_i).

Em outra dedução do comprimento crítico, proposta por Hull e Clyne (1981), o valor de l_c foi reduzido pela metade, pois foi substituído o raio pelo diâmetro da fibra.

$$l_c = \frac{r * \sigma_f}{2t}$$

Equação 4. Comprimento crítico em função do raio. Fonte: Monteiro, 2006.

Onde:

- r é o Raio da Fibra.

O valor do comprimento crítico atua como um parâmetro que indica a situação da fibra. Dessa forma, fibras contínuas geralmente acabam por possuir um comprimento 15 vezes maior que o l_c , onde $l > l_c$. O comprimento crítico de uma determinada fibra aplicada como reforço para uma matriz possibilita, por meio da equação 3 ou 4, o cálculo da tensão cisalhante na interface fibra-matriz. O valor determinado da tensão na interface está ligado à eficiência da ligação molecular, atômica ou polar entre a superfície da fibra e a matriz. Como esta ligação dá caráter ao grau de acoplamento entre as fases do material compósito, a determinação do valor relativo a tensão de cisalhamento é de importância intrínseca para o projeto de um material composto reforçado com determinada fibra (Monteiro, 2006).

A tensão cisalhante pode ser obtida por meio de cálculos teóricos ou através de experimentos de determinação do comprimento crítico, dessa forma obtendo o valor de t para as equações. Dentre os ensaios para essa determinação, existe o denominado de *pullout*, onde é determinado, de maneira relativamente simples, o comprimento crítico da fibra. Durante o ensaio de *pullout* a fibra é embutida até um determinado comprimento (L) em uma cápsula do material que atua simulando a matriz do compósito testado. Em seguida, o conjunto é submetido à força de tração por meio de garras da máquina que prendem a ponta livre da fibra e a outra extremidade da cápsula. Quando os valores de L são muito baixos, a fibra acaba por escorregar de dentro da cápsula, logo esses valores estão abaixo do l_c . Quando temos $L = l_c$, ocorre o rompimento da fibra sem que haja o escorregamento. Um gráfico similar ao da imagem abaixo pode ser utilizado para obtenção do l_c e conseqüentemente o valor de t por meio da equação 3.

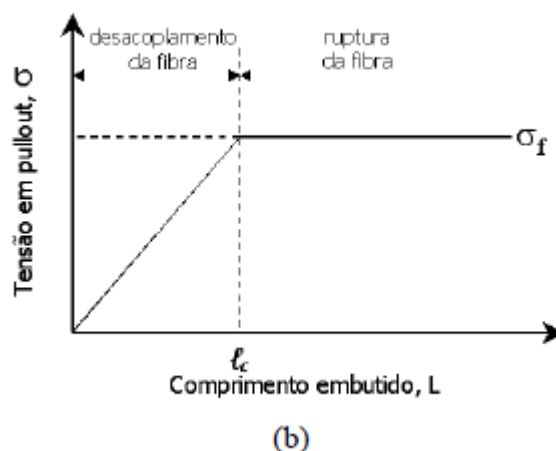


Figura 2. Esquema do Ensaio de Pullout. Fonte: Monteiro, 2006.

Porém, nem sempre é possível que ocorra a obtenção de gráficos simples similares a figura 2. Tal dificuldade é geralmente associada a fibras lignocelulósicas quando embutidas em polímeros, isso ocorre devido à uma grande dispersão estatística dos resultados apresentados (Hull; Clyne, 1981).

A interpretação de um ensaio de *pullout* é relativa à forma ao qual se determina o valor do comprimento crítico, ou demais possíveis parâmetros, por meio do gráfico experimental da variação da tensão com o comprimento embutido. Como ponto de partida, como mostrado na figura 2, ℓ_c seria adquirido por meio da interseção entre duas retas; uma mais inclinada, relativa ao trecho onde a fibra sofre o desacoplamento (*debonding*) da cápsula e outra na posição horizontal, com correspondência ao trecho onde a fibra sofre rompimento sem que ocorra o desacoplar do material que está simulando a matriz. O valor do trecho em horizontal corresponde a resistência à tensão máxima que a fibra consegue absorver. O gráfico de L é formado de pontos que não necessariamente são ajustáveis a duas retas como foi apresentado na figura 2. Dessa forma, o primeiro trecho inclinado, que está relacionado com os comprimentos embutidos até na metade de ℓ_c , pode ser interpretado por uma reta do tipo abaixo.

$$\sigma = \sigma_0 + \frac{k \cdot L}{d}$$

Equação 5. Reta Relativa ao Trecho em que a Fibra se Desacopla. Fonte: Hull & Clyne, 1981.

Onde:

- σ_0 é a tensão de tração inicial;
- k é uma constante relativa a fibra reforçando uma dada matriz

Yue *et al* (1995) propõem a curva de *pullout* como dada em variação da força de desacoplamento da fibra (F_d) em relação a L . Dessa maneira, é proposto um trecho de características parabólicas, não possuindo linearidade desde o ponto inicial em $F_d = 0$ e $L = 0$ até l_c . Posterior ao comprimento crítico, se tem um trecho linear ascendente até o desacoplamento da fibra. Assim, obtém-se a imagem abaixo.

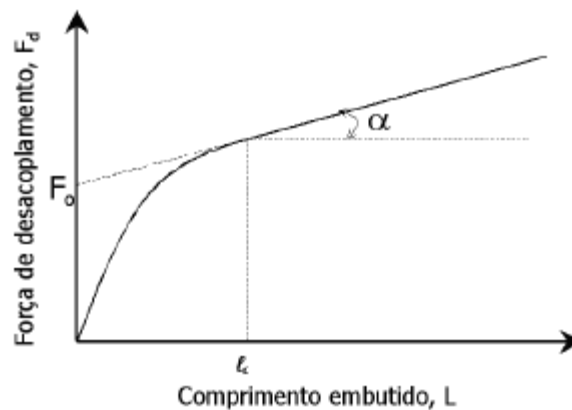


Figura 3. Trecho inicial da curva de pullout. Fonte: Monteiro, 2006; Yue *et al*, 1995.

A partir dos parâmetros da curva representada pela Figura 3, a tensão cisalhante interfacial (t_i) pode ser obtida da seguinte forma:

$$t_i(2\pi r N^{-1}) = F_0 + (\alpha * l_c)$$

Equação 6. Tensão cisalhante interfacial teórica. Fonte: Yue *et al*, 1995.

Onde:

- r é o raio da fibra;
- N é um parâmetro dependente das propriedades físicas da matriz e da fibra, assim como também das características geométricas do corpo de prova;
- F_0 é a força de desacoplamento inicial;
- α é o ângulo formado, detalhado na Figura 3.

4.3. FIBRA VEGETAL DE COCO

Como base para os métodos deste projeto serão utilizados os dados obtidos pelo trabalho de Da Luz e Monteiro (2017), eles realizaram ensaios de *pullout* para determinar o comprimento crítico de fibra da para a fibra vegetal extraída do mesocarpo do coco verde (*Cocos nucifera L.*) embutida na matriz polimérica feita a base de resina epóxi de diglicidil-éter-do-bisfenol-A (DGEBA) e do endurecedor trietilenotetramina (TETA). Obtendo o valor de l_c igual a 12,40 mm abaixo do comprimento onde ocorre o livre desacoplamento da fibra e um segundo valor de l_c igual a 28,75 mm a partir do qual a fibra não desacopla da matriz.

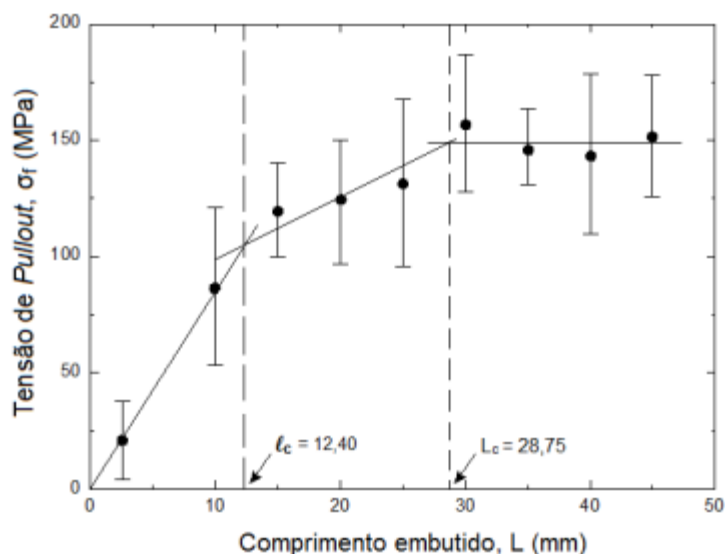


Figura 4. Curva de Pullout Obtida no Ensaio de Referência. Fonte: Da Luz e Monteiro, 2017.

As fibras de coco são compostas principalmente de celulose, lignina e hemicelulose, que são os principais componentes estruturais encontrados nas plantas. Elas têm uma estrutura fibrosa longa e espiralada, que proporciona força e resistência. A fibra de coco é conhecida por sua leveza, durabilidade e resistência à umidade, o que a torna uma escolha popular em muitas aplicações. Quanto ao seu perfil, algumas fibras possuem diâmetros mais constantes, já outras têm uma variação inconstante durante sua extensão, isto está relacionado ao processo de crescimento e à maturidade da fibra. As fibras duras, que são retiradas da casca mais externa e fibrosa do coco, tendem a ter um diâmetro mais constante porque são formadas em uma fase mais avançada de crescimento da planta. Durante esse

estágio, as células da fibra têm uma estrutura mais uniforme e organizada. Por outro lado, as fibras curtas, que são extraídas da parte interna do coco, podem exibir uma variação no diâmetro devido às condições de crescimento, genética da planta e momento da colheita (Castilhos, 2023).

As fibras de coco possuem densidade média de 1,2 g/cm³, valor médio de resistência à tração de 175 MPa e o módulo de elasticidade que varia de 4 a 6 GPa. Cerca de 20,6% de sua composição química é referente à quantidade de extrativos totais (ácidos graxos, algumas resinas, taninos, gomas, açúcares, amido e corantes), 54% Lignina e 25,4% cinza (matéria inorgânica como cálcio e potássio). O comprimento das fibras varia de 15 a 33 cm, já o diâmetro varia de 0,05 a 0,4 mm, sua coloração varia do tom marrom claro ao escuro. O comportamento mecânico de uma fibra de coco pode ser descrito como elástico, o que significa que podem se deformar quando submetidas a uma carga e retornar à sua forma original quando a carga é removida. No entanto, essa elasticidade pode não seguir um comportamento linear em toda a faixa de deformação (Castilhos, 2023; Veloso *et al.*, 2013; Rios *et al.*, 2015).

5. METODOLOGIA

5.1. MATERIAIS

O presente trabalho de pesquisa foi realizado nos laboratórios de Engenharia e de solos da Universidade Federal de São Carlos – Campus Lagoa do Sino e tendo métodos laboratoriais obedecendo às recomendações estabelecidas pelo trabalho de Da Luz e Monteiro (2017). Dessa maneira, os materiais utilizados nos testes foram:

1. Uma unidade de coco verde;
2. Caneta de tinta;
3. Martelo;
4. Colher;
5. Estufa;
6. Lâmina de microscópio;
7. Lâmina de barbeador;
8. Bandeja de metal;

9. Vidro de relógio;
10. Régua Plástica;
11. Tesoura;
12. Estilete;
13. Béquer de 500 mL;
14. Proveta de 100 mL;
15. Balança de alta precisão da marca BEL Engineering, modelo M333;
16. Máquina universal de ensaio de baixa carga (texturômetro da marca Stable Micro Systems, modelo TA.XTplus);
17. Estufa com circulação e renovação de ar da marca New Lab, modelo NL-82-8;
18. Microscópio binocular Zeiss da marca Primo Star;
19. Estereomicroscópio binocular educacional da marca Nova;
20. *Software* Excel;
21. *Software* ImageJ;
22. Plataforma Online Google Colaboratory;
23. Cano PVC com diâmetro de $\frac{3}{4}$ polegada (19,05 mm);
24. Cortador de tubo PVC 42mm da marca VONDER;
25. Cimento Portland tipo F (CP II - F - 32) da marca Votoran;
26. Areia fina lavada;

5.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

5.2.1. Obtenção das fibras

Primeiramente, o coco verde foi cedido pelo estabelecimento “Hortifruti Sacolão Almeida” em Campina do Monte Alegre - SP. As fibras do coco verde encontram-se na região do mesocarpo, como demonstra a figura 5, região protegida pelo Epicarpo (Casca).

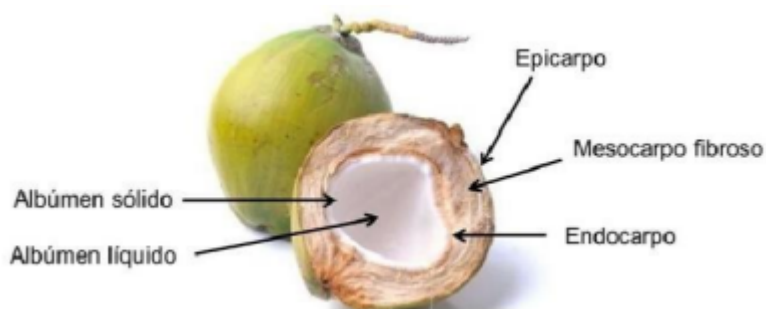


Figura 5. Estrutura do coco verde. Fonte: Silveira, 2018.

Seguindo a metodologia proposta por Barbosa *et al.* (2019), para extração das fibras do coco foi utilizado um martelo para quebra do epicarpo, permitindo a exposição das fibras (Figura 6), possibilitando a extração mecânica de cada uma delas, tomando-se cuidado para que fossem coletadas apenas as fibras de forma unitária e sem presença de agregados.



Figura 6. Fibras de coco expostas. Fonte: Autoria Própria.

5.2.2. Teor de Umidade.

Seguindo o procedimento, posicionou-se a bandeja metálica na balança de alta precisão BEL Engineering, modelo M333 (Figura 7), e seu peso foi registrado. Posteriormente, as fibras foram cuidadosamente dispostas sobre ela, passando

assim por uma nova pesagem. Em seguida, o conjunto com as fibras foi transferido para a estufa da marca New Lab, modelo NL-82-81 (Figura 8), equipada com circulação e renovação de ar. O material foi submetido a uma temperatura constante de 60°C por um período de 24 horas.



Figura 7. Balança de alta precisão. Fonte: Autoria Própria.



Figura 8. Estufa de Secagem. Fonte: Autoria Própria.

Após esse período, as fibras foram levadas ao dessecador (Figura 9) por cerca de 10 minutos e novamente pesadas, possibilitando o cálculo do teor de umidade através da equação 7. Procurando estabilizar o teor de umidade a 0,5%, conforme os métodos de Silva (2019), a amostra foi devolvida à estufa por um período de 48 horas, porém, devido a disponibilidade do equipamento durante essa etapa, a amostra foi transferida da bandeja de metal para um vidro de relógio que

teve sua massa devidamente anotada, após esse período a amostra foi novamente submetida ao dessecador e pesada. Após essa etapa, a amostra foi devolvida para a estufa por outras 24 horas, o processo foi repetido diariamente até que o teor se estabilizasse no valor recomendado, a partir daí as fibras foram armazenadas hermeticamente, sendo uma quantidade separada para a elaboração dos corpos de prova e outras para os testes de ruptura e cisalhamento de fibra.

$$T_U = \frac{M_{úmida} - M_{seca}}{M_{seca}} * 100$$

Equação 7. Determinação do Teor de Umidade. Fonte: Almeida *et al.*,2014.

Onde:

- T_U é o teor de umidade;
- $M_{úmida}$ é massa em gramas das fibras úmidas (antes de colocar na estufa);
- M_{seca} é massa em gramas das fibras após secagem em estufa.



Figura 9. Dessecador. Fonte: Autoria Própria.

5.2.3. Preparação dos Moldes de PVC

Para corte do cano, foram realizadas as marcações com caneta referentes aos comprimentos que seriam inseridos no corpo de prova posteriormente, em seqüência, utilizou-se o cortador tubo PVC (Figura 10), para realizar o corte dos moldes (Figura 11).



Figura 10. Cortador de tubo PVC 42mm da marca VONDER. Fonte: Autoria Própria.



Figura 11. Moldes de PVC. Fonte: Autoria própria.

As cápsulas cilíndricas de compósito cimentício, para inserção da fibra, foram construídas a partir da mistura de areia, cimento e água em diferentes proporções, conhecidas como traços (Cimento:Areia:Água). Foram usados dois traços distintos para esse trabalho: o rico (1:1:0,4) e o médio (1:2:0,5). Escolheu-se dois métodos de inserção das fibras no corpo de prova, o de embutimento, onde os canos de PVC

teriam seu interior preenchido por argamassa e as fibras seriam embutidas posteriormente respeitando seus determinados comprimentos, e o método de encapsulamento, onde as fibras seriam envoltas de argamassa durante a preparação do corpo de prova. Independente do método de inserção, para as fibras na argamassa foi medido o comprimento referente a ela e demarcados através de uma pintura, com caneta, em cada uma das fibras, de forma a delimitar a área de contato, bem como, indicar o destacamento das fibras ou seu rompimento. Foram testados então os comprimentos de 5; 10; 15; 20; 25; 30; 35 e 40mm, sendo 6 repetições para cada comprimento. Portanto, levando em consideração as configurações de tipo de traço, método de inserção da fibra, os diferentes comprimentos e o número de repetições, determinou-se que deveriam ser elaborados 196 moldes para corpos de prova utilizando o cano de PVC.

5.2.4. Preparação dos corpos de prova.

Utilizando a quantidade de corpos de prova e o respectivo volume de cada um deles, foi estimado que seriam necessários 0,62 litros de argamassa para cada traço durante a composição dos corpos de prova, dessa maneira, optou-se produzir aproximadamente 1 litro de argamassa para cada um dos traços a fim de garantirmos material suficiente para composição. Para o traço rico, (1:1:0,4), com auxílio de um béquer, foram medidos 500 mL da areia fina, em seguida, adicionou-se 500 mL de cimento Portland tipo F e foi efetuada a mistura utilizando de uma colher, posteriormente, adicionou-se 200 mL de água, com auxílio de uma proveta, para composição do concreto. Para o traço médio (1:2:0,5), o procedimento foi realizado de forma análoga, utilizando os valores de 500 mL de cimento, 1000 mL de areia e 250 mL de água para a composição.



Figura 12. Mistura da Argamassa. Fonte: Autoria própria.

Com os traços prontos, os corpos de prova foram compostos através de dois métodos distintos, o método de inserção, onde primeiramente a argamassa foi colocada nos moldes e em sequência a fibra de coco foi introduzida, e o método de encapsulamento, onde os corpos de prova foram moldados introduzindo argamassa ao redor da fibra dentro do molde. Para ambos os métodos, foi deixada uma ponta da fibra para fora do corpo de prova, permitindo que a garra fosse anexada nessas pontas durante os ensaios mecânicos. Dessa maneira, os corpos de prova foram identificados quanto a seu traço, método de encaixe da fibra e altura do corpo de prova, sendo então deixados em processo de cura do concreto do dia 25/09/2023 ao dia 01/11/2023, totalizando 37 dias de cura (Figura 13).



Figura 13. Corpos de Prova. Fonte: Autoria própria.

5.2.5. Ensaios Mecânicos

De maneira a estabelecer um comparativo entre resultados de comprimento crítico, foi proposto um ensaio de destacamento de *Pullout* e também a determinação do mesmo através da equação 3. Para a determinação através da equação, foram necessários um teste de ruptura da fibra de coco e um teste para determinação da tensão de cisalhamento da fibra. Para determinação das tensões de tração e cisalhamento da fibra foram utilizadas as equações a seguir.

$$\sigma = \frac{F_{\text{Tração}}}{A}$$

Equação 8. Cálculo de tensão de tração. Fonte: Cesar, 2017.

Onde:

- σ é a tensão de tração em MPa;
- $F_{\text{tração}}$ é a força de tração em N;
- A é a área da fibra em mm².

$$\tau = \frac{F_{\text{cisalhamento}}}{A}$$

Equação 9. Cálculo da tensão de cisalhamento. Fonte: Cesar, 2017.

Onde:

- τ é a tensão de cisalhamento em MPa;
- $F_{\text{cisalhamento}}$ é a força de cisalhamento em N;

Já para a determinação do comprimento crítico por meio do ensaio de destacamento, através dos dados registrados pelo ensaio, foram elaborados gráficos, através do software estatístico R, de força de destacamento (N) x comprimento embutido (mm) semelhantes a figura 4, mas em termos de força invés de tensão. Segundo o trabalho de Da Luz e Monteiro (2017), é possível identificar os comprimentos críticos através da interseção entre os dois primeiros trechos lineares do gráfico, ou seja, onde ocorre a primeira variação significativa na inclinação da curva.

5.2.5.1. Teste de Ruptura de Fibra

Foram selecionadas 11 fibras de coco, identificadas de F1 a F11 em uma planilha do *software* Microsoft Office Excel, Essas fibras foram fixadas através de duas garras, uma presa na ponta inferior da fibra e outra na superior (Figura 14), no texturômetro, desta maneira, definindo os parâmetros de força inicial como 70 gf (grama-força), de velocidade pré teste de 300mm/min, velocidade pós teste de 600mm/min e velocidade do teste como 4,8mm/min, deu-se início ao teste, onde a fibra seria puxada até seu rompimento e desta maneira a resistência à tração máxima registrada pelo aparelho foi anotada para o cálculo do comprimento crítico.



Figura 14. Teste de ruptura em execução. Fonte: Autoria Própria.

5.2.5.2. Determinação da Tensão de Cisalhamento da Fibra

Para a determinação da tensão de cisalhamento, foi acoplada uma pequena mesa de corte ao texturômetro, em cima dela, as mesmas fibras do teste de ruptura foram presas horizontalmente, uma a uma a cada teste com auxílio de dois sargentos (Figura 15), e foi inserida a lâmina plana na parte de cima do aparelho. Utilizando os mesmos parâmetros do teste de ruptura, a lâmina descia de forma a entrar em contato com a fibra, aplicando a carga até o rompimento (Figuras 16 e 17).



Figura 15. Sargento utilizado para fixação da fibra na mesa de corte. Fonte: Autoria própria.

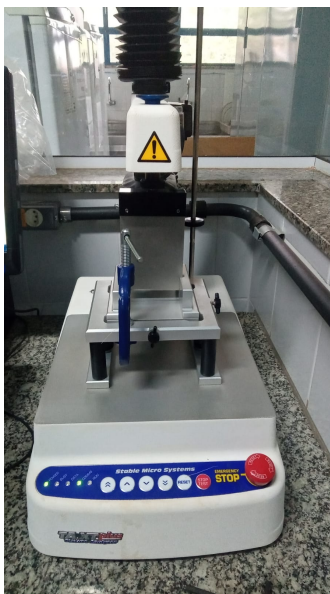


Figura 16. Texturômetro durante o teste de cisalhamento. Fonte: Autoria Própria.



Figura 17. Mesa de corte durante o teste de cisalhamento da fibra. Fonte: Autoria Própria.

5.2.5.3. Ensaio de Destacamento (Pullout)

Após o período de cura, os corpos de prova foram encaminhados para o laboratório de engenharia, onde foi realizado o ensaio de destacamento. Assim, para iniciar o processo, o texturômetro foi configurado com a instalação da garra de tensão e a subsequente calibração utilizando o sistema de aquisição de dados. A seguir, os corpos de prova moldados foram colocados de maneira individual no texturômetro, onde as fibras na ponta dos corpos de prova foram fixadas através da garra. Em seguida, as fibras foram submetidas ao teste de destacamento (Figuras

18 e 19) com os parâmetros de força inicial 0,098N, velocidade pré teste de 300mm/min, velocidade pós teste de 600mm/min e velocidade do teste de 2,4mm/min. Foram registradas observações relativas ao desprendimento das fibras da cápsula, seja por escorregamento ou por ruptura da fibra vegetal.

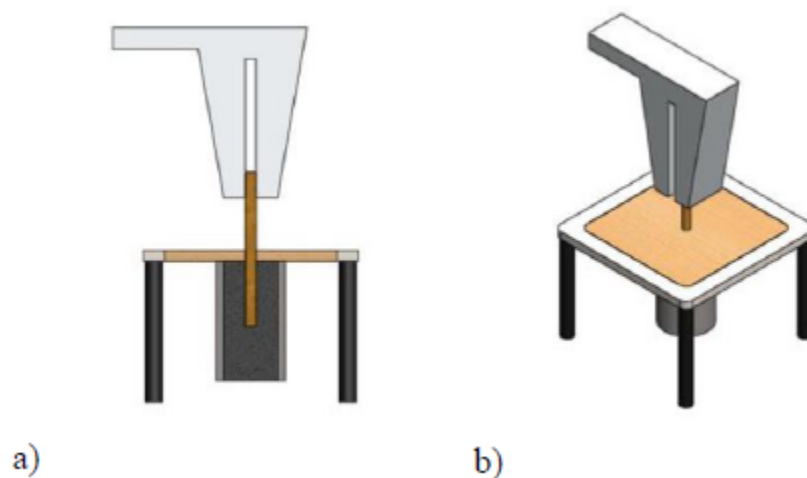


Figura 18. Vista dos testes no texturômetro. a) Vista de corte arranjo experimental. b) Vista geral do arranjo experimental. Fonte: Silva, 2019.

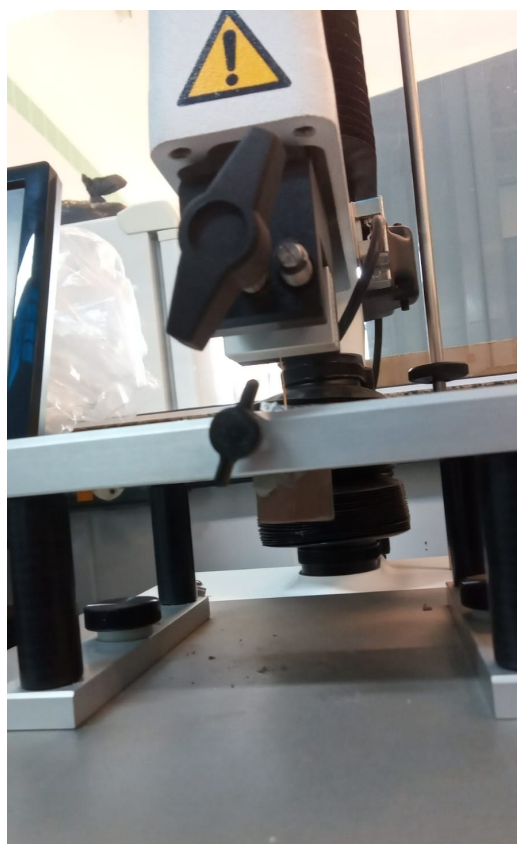


Figura 19. Ensaio de destacamento em andamento. Fonte: Autoria Própria.

5.2.6. Determinação da Área e Diâmetro da Fibra

Para que fosse possível realizar a comparação entre os dados obtidos pelo ensaio de destacamento e a equação 3, foi necessário a obtenção do diâmetro da fibra para determinação do comprimento através da equação. Desta forma, foram separadas as mesmas fibras utilizadas nos ensaios de ruptura e cisalhamento e determinou-se suas áreas por meio do *software* Image J e foi utilizada a equação abaixo para encontrar os diâmetros das respectivas fibras.

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}}$$

Equação 10. Determinação da área da fibra através do diâmetro. Fonte: Nacarato *et al.*, 1990.

Para utilização da equação 10, foi feito uso do Estereomicroscópio binocular educacional da marca Nova (Figura 20), da lâmina de microscópio e da lâmina de barbear. As fibras utilizadas nos ensaios de ruptura e cisalhamento foram separadas e tiveram uma minúscula parte de suas pontas, vistas por meio do Estereomicroscópio, cortadas com auxílio da lâmina de barbear em cima da lâmina de microscópio. Assim, foi tomado cuidado para que as fibras estivessem posicionadas nas lâminas de microscópio de forma a obter uma vista superior da ponta e não das laterais da fibra, dessa forma, a lâmina com a fibra foi levada ao Microscópio binocular Zeiss da marca Primo Star (Figura 21), onde foi utilizada a câmera do celular modelo e6s da marca Motorola para que fossem tiradas fotos das fibras com o aumento de 100x no microscópio (Figura 22), ainda utilizando o microscópio e o mesmo aumento, foi tirada uma foto também das marcações de milímetros de régua plástica (Figura 23) de maneira a servir como medida de referência para o software de tratamento de Imagens, já que era necessário estabelecer uma relação entre os pixels na imagem e as unidades físicas reais, cada pixel na imagem tem uma correspondência física em milímetros, e essa correspondência é estabelecida pela calibração usando a régua como padrão.



Figura 20. Estereomicroscópio binocular. Fonte: Autoria Própria.

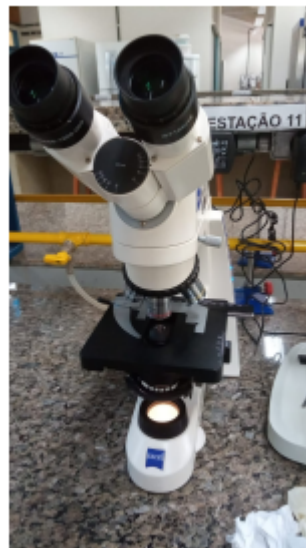


Figura 21. Microscópio. Fonte: Autoria Própria.



Figura 22. Exemplo de foto tirada de uma fibra com auxílio do microscópio no aumento de 100x.
Fonte: Aatoria Própria.

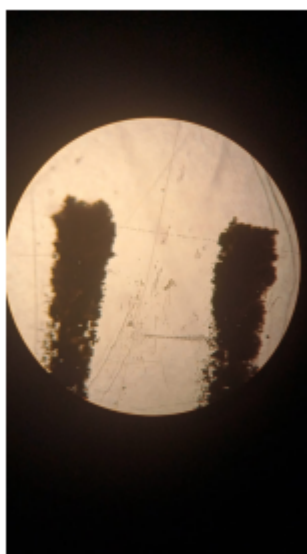


Figura 23. Foto das marcações de milímetros da régua plástica com o aumento de 100x. Fonte:
Aatoria Própria.

Para o uso do Software ImageJ (Figura 24), foi inserida no software a imagem com a foto da régua plástica, entre o meio das marcações de milímetros foi traçada uma linha (Figura 25), possibilitando o uso do comando “Set Scale” para o software entender aquela distância como 1mm. Em seguida, uma a uma, foram abertas as respectivas imagens das fibras no programa, foi usado o comando “Crop” para o recorte apenas da área de interesse, a imagem foi exportada para 8 bits e foram usados os comandos “Make Binary” e “Filter Median” para melhoramento das

imagens. Por fim, foi usado o comando “Analyze Particles” para obtenção dos valores de área para cada fibra.

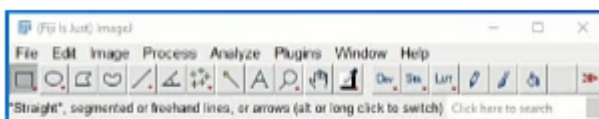


Figura 24. Layout do software ImageJ. Fonte: Cardoso, 2023.

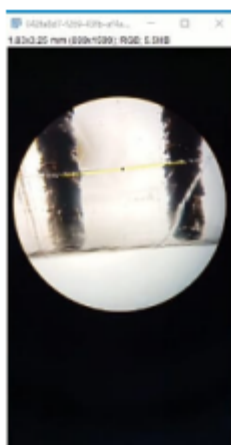


Figura 25. Definindo 1mm no software ImageJ. Fonte: Cardoso, 2023.

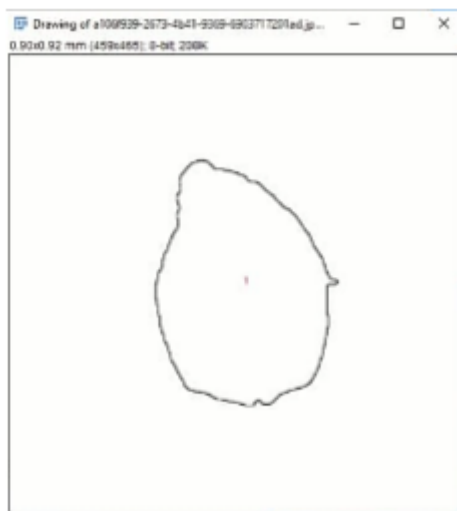


Figura 26. Exemplo de desenho do perímetro das fibras obtido pelo software. Fonte: Cardoso, 2023.

5.2.7. Tratamento dos Dados do Ensaio de Destacamento

Para o tratamento das informações adquiridas pelo ensaio de destrancamento e como consequência a obtenção dos valores de comprimento crítico para cada configuração testada, primeiramente foi feito o uso do software editor de planilhas Microsoft Office Excel, nele foram anotadas as informações de força de destacamento para cada corpo de prova, desta forma, para cada configuração, foi possível o cálculo da média das forças para cada comprimento e também o desvio padrão relacionado a elas. Nesta etapa também foram calculadas as variações percentuais das forças de destacamento e suas respectivas médias para as quatro configurações testadas.

Através desses valores, utilizou-se a plataforma Google Colaboratory para elaboração dos gráficos de dispersão relacionados através da linguagem de programação Python. Para isso, utilizando a plataforma, criou-se uma base de dados com as informações dos testes, assim, definindo a força média como eixo Y e o comprimento embutido como eixo X, desta forma, foram usadas sequências de comandos para desenhar os gráficos, posteriormente foram adicionadas linhas de códigos para representar os comprimentos críticos, resultando em *scripts* semelhantes ao da figura 27.

```

import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

# Dados
comprimentos_rico_encapsulamento = np.array([5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40])
forças_medias_rico_encapsulamento = np.array([1.655, 2.605, 3.444, 2.818, 2.471, 2.298, 4.306, 1.662])
desvios_padrao_rico_encapsulamento = np.array([0.568, 0.623, 0.804, 0.467, 0.806, 1.299, 3.215, 0.468])

# Possível comprimento crítico
comprimento_critico_rico_encapsulamento = 15

# Criar o gráfico de dispersão
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.errorbar(comprimentos_rico_encapsulamento, forças_medias_rico_encapsulamento,
             yerr=desvios_padrao_rico_encapsulamento, marker='o', linestyle='-', color='blue',
             label='Traço Rico - Encapsulamento', ecolor='darkgray', capsize=5)

# Adicionar linha indicando o possível comprimento crítico
plt.axvline(x=comprimento_critico_rico_encapsulamento, linestyle='--', color='red', label='Possível Comprimento Crítico')

# Configurações do gráfico
titulo = 'Gráfico de Força Média x Comprimento - Traço Rico - Encapsulamento'
plt.title(titulo)
plt.xlabel('Comprimento (mm)')
plt.ylabel('Força Média (N)')

# Definir mais intervalos nos eixos x e y
plt.xticks(np.arange(0, 45, 5))
plt.yticks(np.arange(0, 5, 0.5))

plt.legend()
plt.grid(True)

# Exibir o gráfico
plt.show()

```

Figura 27. Exemplo de script de comando da elaboração dos gráficos de dispersão. Fonte: Autoria Própria.

6. RESULTADOS

6.1. DETERMINAÇÃO DO COMPRIMENTO CRÍTICO ATRAVÉS DA EQUAÇÃO

6.1.1. Teste de Ruptura.

Através do *Software* Microsoft Office Excel e da equação 8 foi possível anotar os valores em Newton do força de tração registrada no ensaio de ruptura, através delas e da área da fibra obtida pelo *software* ImageJ, foi possível a determinação da resistência à tração média das fibras de coco em megapascal. Consequentemente, a partir dos dados das áreas das fibras, foi possível calcular os diâmetros pela equação 10.

Tabela 4 - Teste de Ruptura

Fibra de Coco	Força de Pico (N)	Área da Fibra (mm ²)	Tensão de tração (MPa)	Diâmetro da Fibra (mm)
F1	1,271	0,0658	19,32	0,290
F2	1,444	0,0592	24,39	0,275
F3	1,461	0,0461	31,69	0,242
F4	1,376	0,0367	37,49	0,216
F5	1,757	0,0569	30,88	0,269
F6	1,914	0,0832	23,00	0,326
F7	1,830	0,0399	45,86	0,225
F8	2,046	0,0275	74,40	0,187
F9	2,020	0,0840	24,05	0,327
F10	1,920	0,0439	43,74	0,236
F11	1,530	0,0444	34,46	0,238
Média Aritmética	1,688	0,0506	33,34	0,254

Fonte: Autoria Própria

6.1.2. Teste de Cisalhamento

Da mesma forma, utilizou-se o *software* para anotar os dados dos testes de cisalhamento e determinar a tensão por meio da equação 9.

Tabela 5 - Teste de Cisalhamento

Fibra de Coco	Força de Pico (N)	Tensão de Cisalhamento (MPa)
F1	8,194	124,53
F2	7,899	133,43
F3	9,324	202,26
F4	6,433	175,29
F5	7,233	127,12
F6	8,328	100,10
F7	7,234	181,30
F8	13,893	505,20
F9	9,027	107,46
F10	11,424	260,23
F11	7,423	167,18
Média	8,765	164,08

Fonte: Autoria Própria

Desta forma, aplicando a equação 3 e utilizando os valores médios de tensão de tração, tensão de cisalhamento e de diâmetro da fibra, foi possível o cálculo do comprimento crítico de fibra, determinando o valor de 0,024 mm.

6.2. DETERMINAÇÃO DO COMPRIMENTO CRÍTICO ATRAVÉS DO ENSAIO DE DESTACAMENTO

Durante o ensaio de destacamento, registraram-se os valores de força de tração para cada corpo de prova, juntamente com a observação de rompimento ou desprendimento da fibra. As médias e desvios padrão foram calculados, utilizando o *software* Excel, para cada comprimento testado, sendo o processo repetido para todas as configurações avaliadas.

Tabela 6 - Traço Rico (Encapsulamento)

Comprimento (mm)	Força Média (N)	Desvio Padrão
5	1,655	0,568
10	2,605	0,623
15	3,444	0,804
20	2,818	0,467
25	2,471	0,806
30	2,298	1,299
35	4,306	3,215
40	1,662	0,468

Fonte: Autoria Própria

Tabela 7 - Traço Rico (Inserção)

Comprimento (mm)	Força Média (N)	Desvio Padrão
5	4,22	1,413
10	1,513	0,426
15	1,493	0,690
20	2,307	0,681
25	1,933	1,037
30	1,455	1,053
35	1,287	0,303
40	4,418	3,595

Fonte: Autoria Própria

Tabela 08 - Traço Médio (Encapsulamento)

Comprimento (mm)	Força Média (N)	Desvio Padrão
5	4,020	0,671
10	2,870	0,698
15	2,922	0,680
20	2,417	0,482
25	3,279	0,758
30	3,610	0,423
35	2,436	0,832
40	2,882	0,751

Fonte: Autoria Própria

Tabela 9 - Traço Médio (Inserção)

Comprimento (mm)	Força Média (N)	Desvio Padrão
5	1,460	0,485
10	2,579	1,307
15	1,090	0,375
20	1,980	0,704
25	3,517	0,853
30	2,312	0,262
35	2,055	0,746
40	2,224	0,770

Fonte: Autoria Própria

Ainda através do *software* Excel, foi elaborada uma tabela quantificando o número de desprendimentos, rompimentos e falhas no teste, estas falhas se deram pela fibra não apresentar agarre algum a matriz cimentícia, não possibilitando o ensaio. Além disso, foi calculada também a variação percentual dos valores de força de destacamento para cada configuração

Tabela 10 - Rompimentos, Desprendimentos e Falhas

	Rompimentos	Desprendimentos	Falhas	Variação Percentual (%)
Traço Rico - Encapsulamento	25	19	4	39,412
Traço Rico - Inserção	13	24	11	59,394
Traço Médio - Encapsulamento	27	21	0	20,613
Traço Médio - Inserção	14	30	4	49,608

Fonte: Autoria Própria

Através dos dados de força média e desvio padrão foi possível, utilizando a plataforma Google Colaboratory, a elaboração de gráficos de dispersão que representassem o comportamento das amostras.

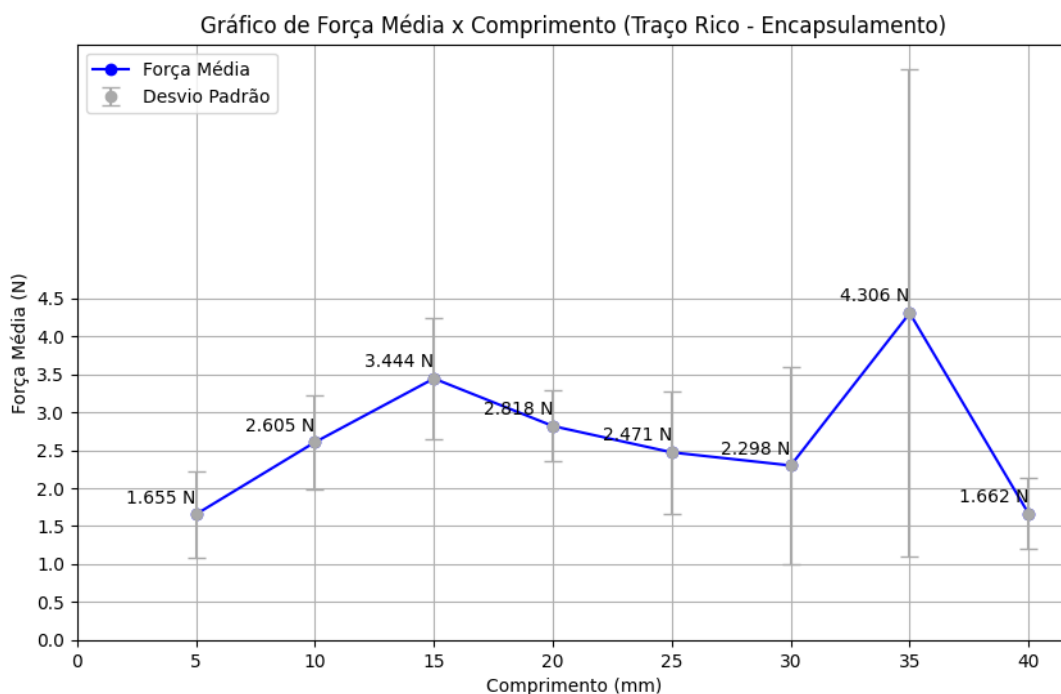


Figura 28. Comportamento do traço rico com o método de encapsulamento. Fonte: Autoria Própria.

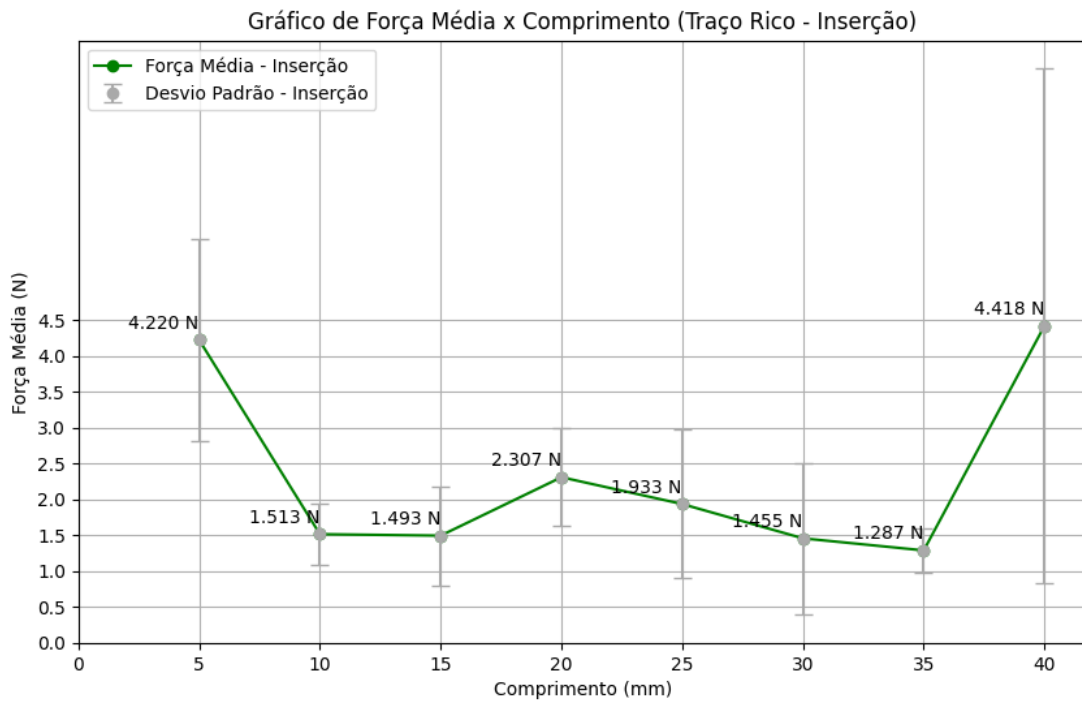


Figura 29. Comportamento do traço rico com o método de inserção. Fonte: Autoria Própria.

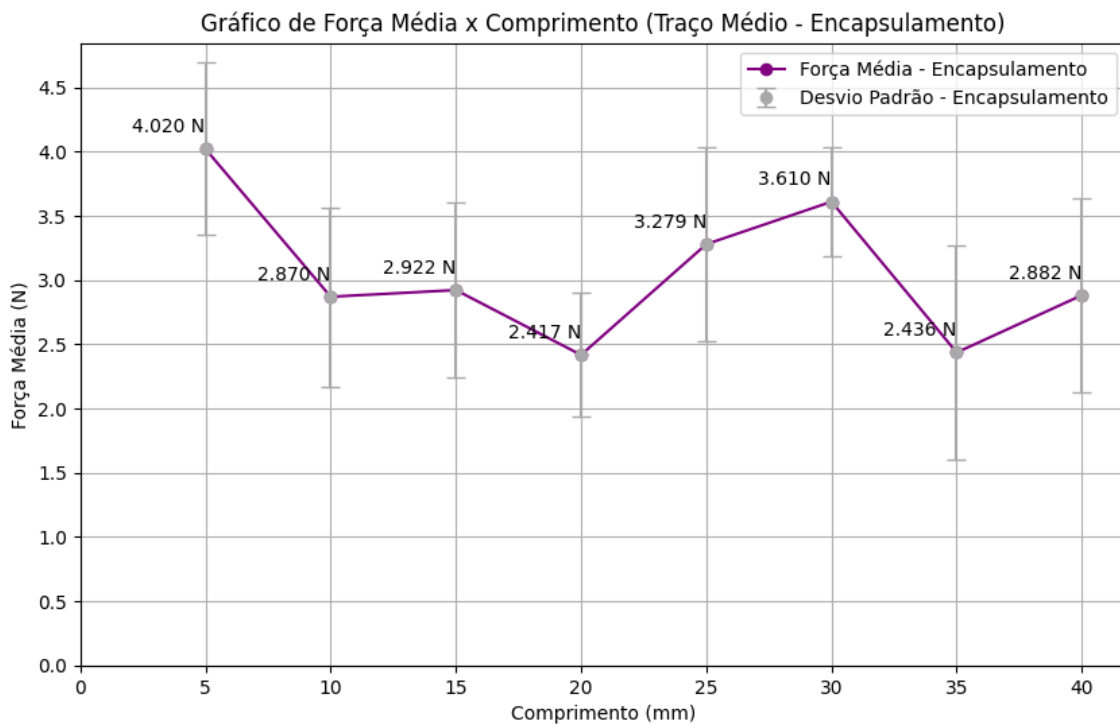


Figura 30. Comportamento do traço médio com o método de encapsulamento. Fonte: Autoria Própria.

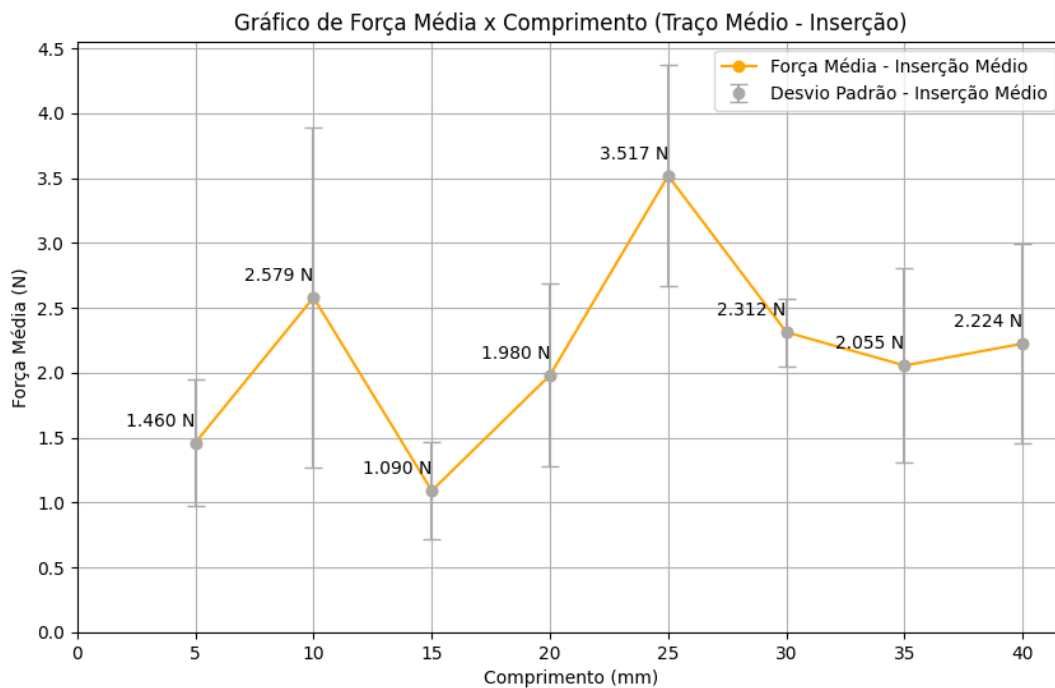


Figura 31. Comportamento do traço médio com o método de inserção. Fonte: Autoria Própria.

Obtendo os gráficos relativos a cada configuração, foi possível a união dos gráficos, possibilitando a visualização das diferenças de comportamento entre as configurações testadas.

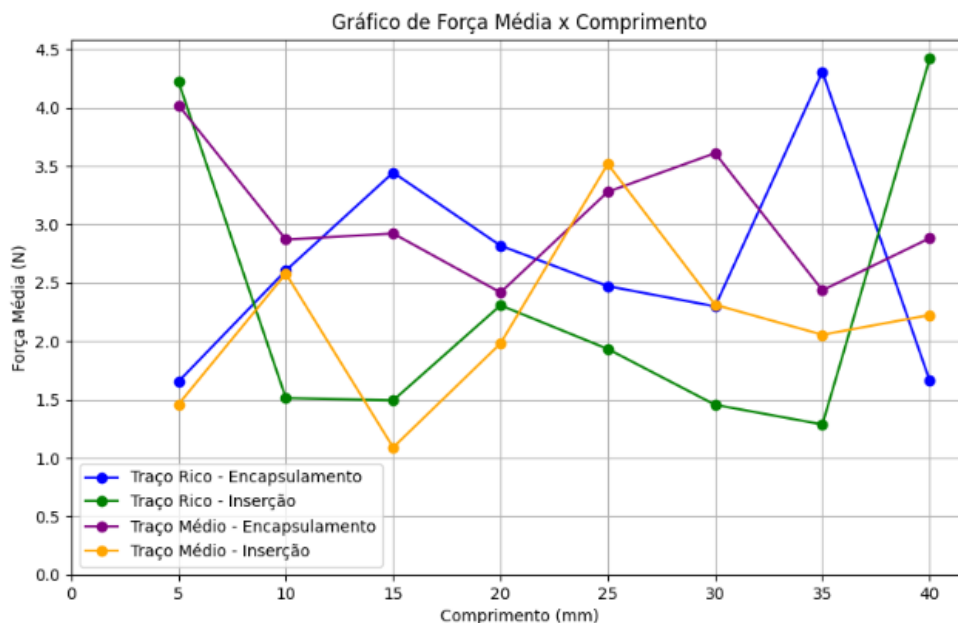


Figura 32. Comparativo entre as configurações. Fonte: Autoria Própria.

Através dos gráficos e da metodologia de Da Luz e Monteiro (2017), foi possível traçar os possíveis pontos que representassem os comprimentos críticos.

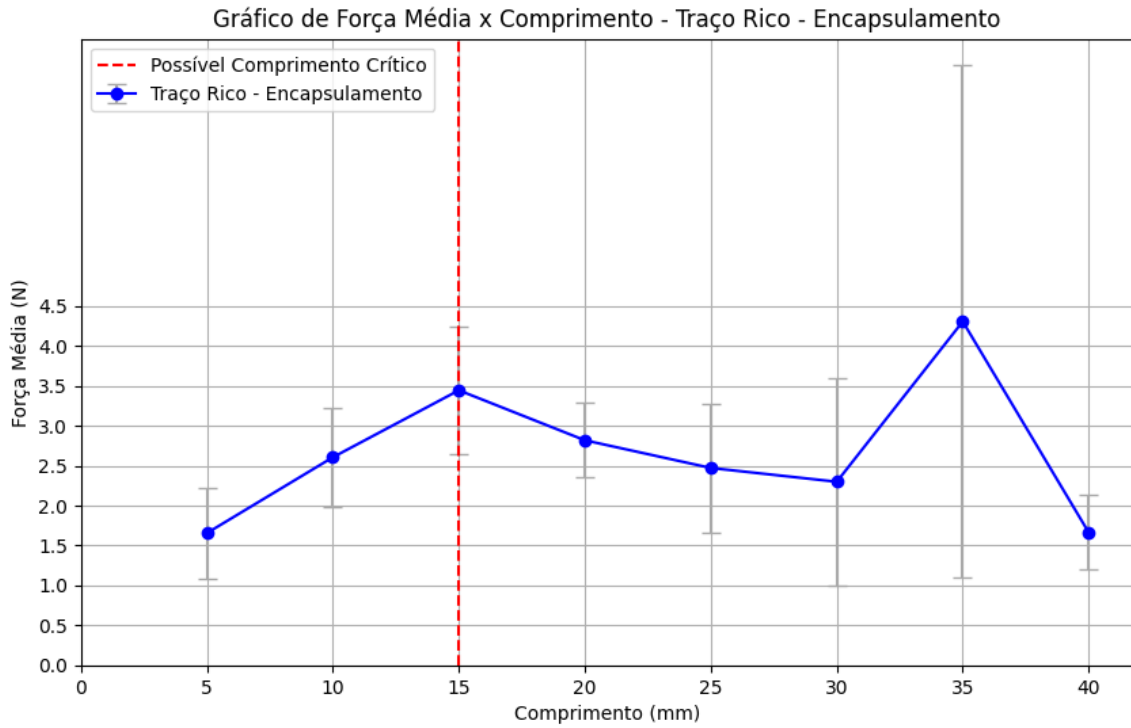


Figura 33. Possível valor de comprimento crítico para o traço rico com o método de encapsulamento.

Fonte: Autoria Própria.

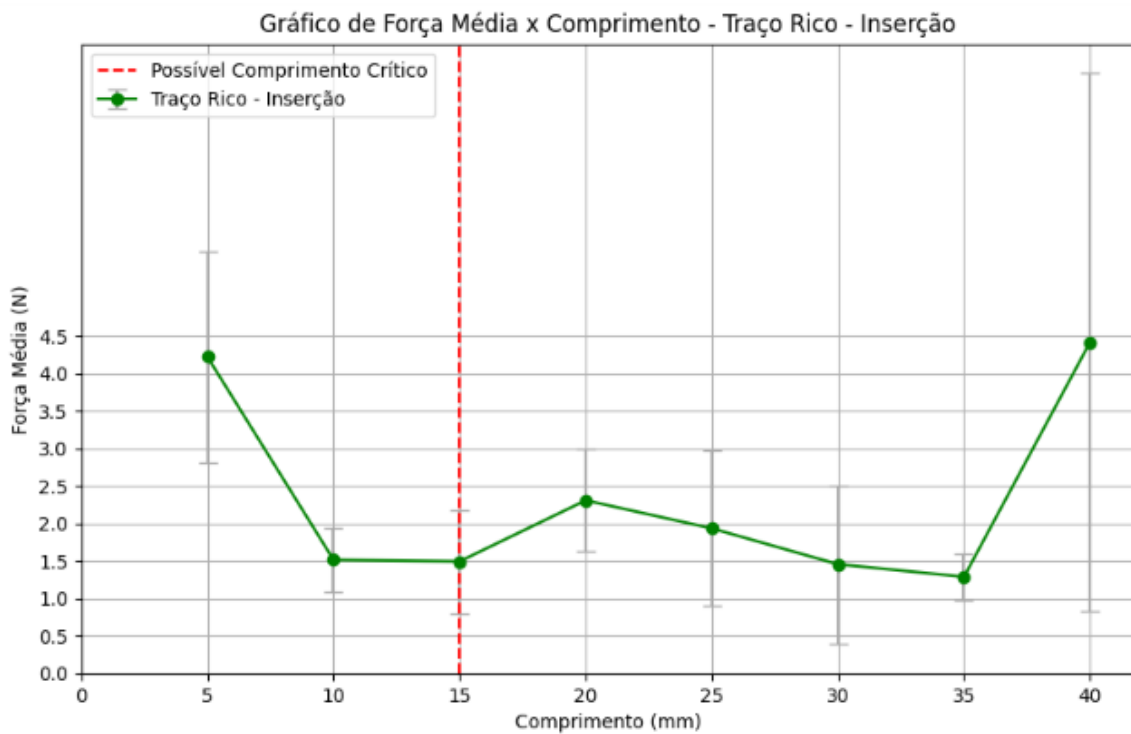


Figura 34. Possível valor de comprimento crítico para o traço rico com o método de inserção. Fonte:

Autoria Própria.

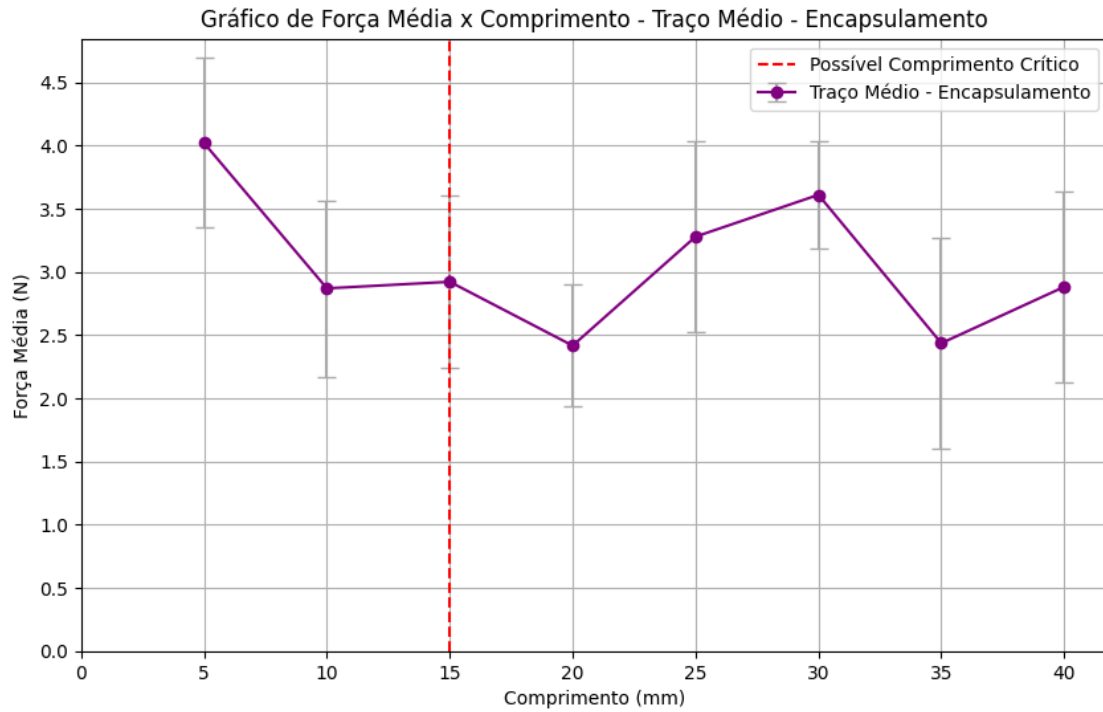


Figura 35. Possível valor de comprimento crítico para o traço médio com o método de encapsulamento. Fonte: Autoria Própria.

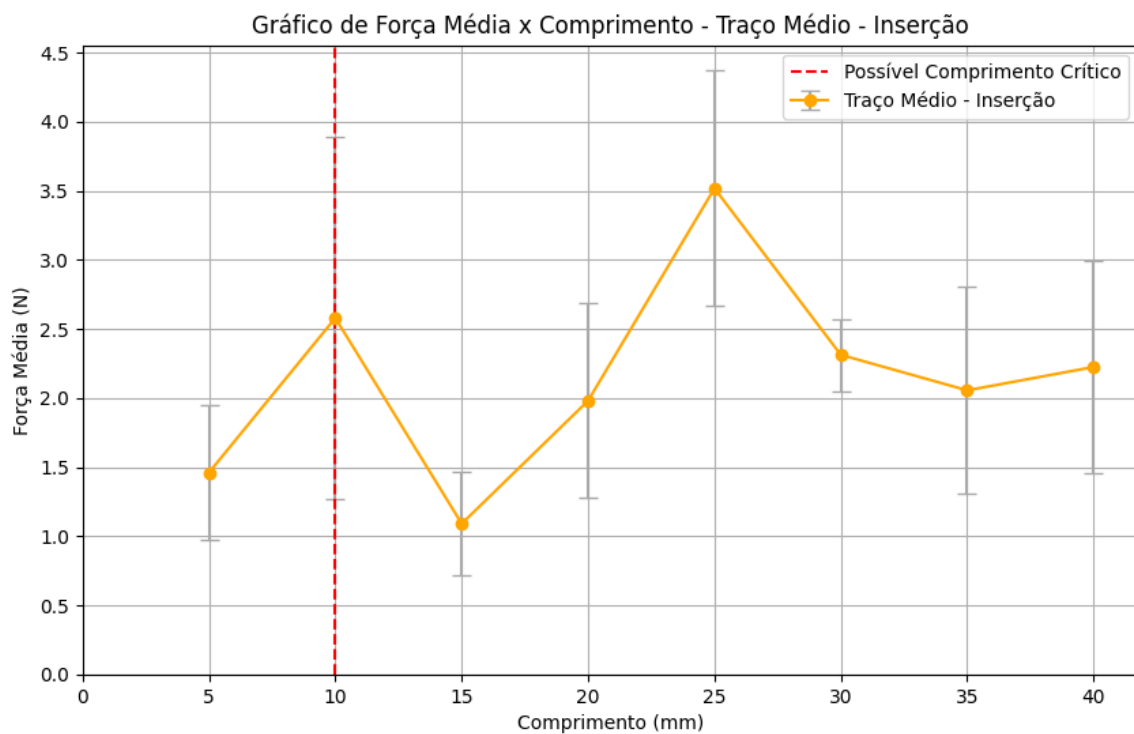


Figura 36. Possível valor de comprimento crítico para o traço médio com o método de inserção. Fonte: Autoria Própria.

Desta maneira, os traços ricos, tanto com o método de encapsulamento quanto de inserção registraram o comprimento crítico de 15mm, já o traço médio, registrou o comprimento de 15mm no método de encapsulamento e 10mm no método de inserção.

6.3. DISCUSSÃO

Os resultados do ensaios de destacamento foram avaliados a partir de gráficos de força aplicada por comprimento, diferente do recomendado por Da Luz e Monteiro (2017), que sugerem a elaboração de gráficos de tensão por comprimento, dificultando a avaliação dos resultados deste ensaio, para contornar este problema, deveria ter sido efetuada a determinação do diâmetro de cada fibra após o ensaio de destacamento. Já a determinação de L_c por meio da equação 3 foi elaborada através de ensaios realizados diretamente na fibra, ao invés da mesma inserida no corpo de prova como sugere Callister e Rethwisch (2012), isto ocorreu pois o texturômetro utilizado é próprio para testes em produtos alimentícios, um ensaio de cisalhamento utilizando um corpo de prova com matriz cimentícia poderia danificar o aparelho, desta forma uma adaptação foi necessária.

Os resultados de comprimento crítico através da equação 3 não foram satisfatórios, apresentando o valor de 0,024 mm, muito inferior ao valor de 12,40 mm determinado anteriormente pelo ensaio de Da Luz e Monteiro (2017). Um dos fatores que pode explicar esta discrepância se deve ao fato da fibras terem sido fragilizadas ao serem anexadas na garra durante o ensaio de tração, danificando a fibra na área em contato com a garra, fazendo com que as fibras tivessem rompimento nesta região ao invés de no meio da fibra, não atingindo assim a tensão máxima. Outro fator que pode ter influenciado nos valores de L_c abaixo do esperado é o fato de que algumas fibras não apresentavam o diâmetro constante durante toda a sua extensão,

Já para os ensaios de destacamento, o traço rico com o método de encapsulamento apresentou uma variação significativa, especialmente em comprimentos mais curtos e mais longos, sugerindo uma maior sensibilidade a mudanças no comprimento, já o mesmo traço com o método de inserção apresentou uma elevada força média inicial, seguida por uma diminuição e um

aumento posterior, exibindo uma tendência de pico em torno do comprimento 15 mm. Já em relação ao traço médio com o método de encapsulamento, ele mostrou uma tendência de aumento nas forças médias de forma mais estável em comparação com o traço rico o mesmo método de encaixe da fibra, enquanto o mesmo traço com o método de inserção exibe uma variação pronunciada nas forças médias em relação ao comprimento. Isso é evidenciado pela mudança significativa nas magnitudes das forças em diferentes pontos de comprimento.

Três das quatro configurações testadas apresentaram possíveis comprimentos críticos em 15mm enquanto uma apresenta em 10mm, se compararmos com os 12,40mm determinados pelo trabalho de Da Luz e Monteiro (2017), podemos pressupor que o comprimento crítico da fibra de coco se encontra entre os valores de 10 e 15mm, porém estes dados apresentaram elevadas variações percentuais, dificultando afirmar esse intervalos como situando o comprimento crítico de fato, dificuldade essa apontada anteriormente pelos estudos de Hull e Clyne (1981).

Dentre os outros fatores analisados entre as configurações de traço e método de encaixe da fibra, foi possível observar que, durante os ensaios, o traço médio possuía uma maior adesão da fibra com a matriz, constatação ressaltada pelo fato deste traço apresentar menos falhas durante o teste de destacamento em relação ao traço rico. O método de encapsulamento da fibra também apresentou resultados mais interessantes, registrando maior número de rompimentos.

7. CONCLUSÃO

O estudo da incorporação de fibras vegetais lignocelulósicas em matrizes cimentícias é uma área de pesquisa promissora no desenvolvimento de materiais de construção mais sustentáveis e com propriedades melhoradas. As fibras vegetais, provenientes de fontes renováveis, têm sido consideradas alternativas interessantes para substituir parcial ou totalmente as fibras sintéticas tradicionalmente utilizadas em compósitos cimentícios. No entanto, a determinação do comprimento crítico das fibras vegetais ainda é um desafio significativo nesse campo de pesquisa, pois um maior número de trabalhos ainda precisam ser publicados de forma a se determinar a melhor maneira da obtenção desse fator.

Além dos métodos de obtenção do comprimento crítico, a área dos materiais sustentáveis, ainda demanda que outros tipos de fibra, assim como matrizes, com diferentes características sejam testadas, ampliando os possíveis setores de aplicação para estes reforços.

7.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se que para trabalhos posteriores, a determinação do comprimento crítico, utilizando o ensaio de destacamento, seja elaborada com base no traço médio utilizando o método de encaixe da fibra de encapsulamento e com maior número de repetições para cada comprimento testado, desta maneira, diminuindo a variação percentual entre os resultados de força média obtidos, diminuindo também o número de falhas e obtendo mais rompimentos das fibras. Para a determinação através da equação geral, sugere-se a utilização de uma máquina de ensaio universal com maior capacidade para a realização dos ensaios de cisalhamento com a fibra inserida no corpo de prova. Para os ensaios de destacamento e tração, recomendo também a utilização de algum material, como uma tira de borracha, para diminuir possíveis danos que a fibra possa ter na região onde ocorre o contato com a garra do aparelho utilizado. E por fim, podem ser testadas também metodologias de tratamento da fibra vegetal que ajudem com a adesão da mesma com a matriz cimentícia.

8. REFERÊNCIAS

AGOPYAN, Vahan. **SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE MATERIAIS REFORÇADOS COM FIBRAS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL**. São Paulo: Usp, 1993. 138 p.

ALMEIDA, Diego Henrique de *et al.* **DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE E DENSIDADE BÁSICA PARA ESPÉCIES DE PINUS E EUCALIPTO**. Revista Científica Eletrônica de Ciências Aplicadas da Fait, Itapeva, v. 1, n. 1, p. 1-7, abr. 2014. Disponível em: http://fait.revista.inf.br/imagens_arquivos/arquivos_destaque/GJqhOS2OjOZ3IRW_2014-4-16-16-31-23.pdf. Acesso em: 14 jun. 2023.

AMORIM, Raphaella de Souza Serapião. **ANÁLISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA E TRANSMITÂNCIA EM BLOCOS DE CONCRETO TRANSLÚCIDO**. 2018. 94 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas - FATECS, Brasília, 2018. Disponível em: <https://repositorio.uniceub.br/jspui/bitstream/prefix/13237/1/21422027.pdf>. Acesso em: 22 jan. 2024.

BARBOSA, Richard Antony; SOUZA, George Ribeiro; SILVA, Valdirene Aparecida da; GONÇALVES, Erika Peterson. **EXTRAÇÃO DE FIBRAS DE COCO PARA APLICAÇÃO EM MATERIAIS DE ENGENHARIA**. XX Encontro Latino Americano de Iniciação Científica, São José dos Campos, v. 1, n. 1, p. 1-6, 27 out. 2019. Disponível em: http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2016/anais/arquivos/RE_0970_0709_01.pdf. Acesso em: 10 jan. 2023.

BEER, F. P.; JOHNSTON JR., E. R.; DEWOLF, J. T. **Mecânica dos Materiais**. 5. ed. São Paulo: McGraw-Hill Education, 2017. ISBN-13: 978-8580556768.

CALLISTER, Willian; RETHWISCH, David. **CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS: uma Introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: Ltc - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2012. 845 p. Disponível em: https://drive.google.com/file/d/1Ult54oZ_plmEivk9hwdAKOTLy6vLo0Id/view?usp=sharing. Acesso em: 05 jun. 2023.

CASTILHOS, Lisiane Fernanda Fabro de. **DOSSIÊ TÉCNICO: fibra de coco**. Curitiba: Instituto de Tecnologia do Paraná, 2021. 28 p. Disponível em: <http://www.respostatecnica.org.br/dossie-tecnico/downloadsDT/NTY0MA==>. Acesso em: 14 jun. 2023.

CESAR, Paulo. **AULA: propriedades dos materiais**. São Paulo: Usp, 2017. 17 slides, P&B. Disponível em: chrome-extension://efaidnbmnribpcaajpcglclefindmkaj/https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2663917/mod_resource/content/1/Aula%20-%20Propriedades%20dos%20Materiais%20-%20Paulo%20Cesar.pdf. Acesso em: 30 nov. 2023.

DA LUZ, Fernanda Santos; MONTEIRO, Sergio Neves. **AVALIAÇÃO DA ADESÃO INTERFACIAL DAS FIBRAS DE COCO E PALF NA MATRIZ EPÓXI POR ENSAIO PULLOUT**. São Paulo, 2017. Disponível em:

<https://scholar.archive.org/work/p2u2h4fa2zcfj14kyi25kuidxi/access/wayback/https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/download-pdf/avaliacao-da-adesao-interfacial-das-fibras-de-cocoe-palf-na-matriz-epoxi-por-ensaio-pullout>. Acesso em: 10 jan. 2023.

HULL, D., CLYNE T.W., **AN INTRODUCTION TO COMPOSITE MATERIALS**, CAMBRIDGE, CAMBRIDGE UNIVERS. Press, 1981. Disponível em: <https://www.slideshare.net/SubodhKumar56/d-hull-t-w-clyne-an-introduction-to-composite-materials-cambridge-solid-state-science-seriescambridge-university-press-1996>. Acesso em: 06 mar. 2022. (HULL; CLYNE, 1981)

KELLY, A., TYSON, W.R., **HIGH STRENGTH MATERIALS**, Nova York, Wiley, 1965.

Krenchel, H. (1964). **FIBRE REINFORCEMENT**: theoretical and practical investigations of the elasticity and strength of fibre-reinforced materials.

MÍDIA2. Direção de Kelen Cristiane Cardoso. Buri: Ufscar, 2023. (3 min.), mp4, son., color. Disponível em: https://drive.google.com/file/d/1EMWTzQNaGbB9144yOEBrv4jn7eJ_c7_f/view. Acesso em: 30 nov. 2023.

MIRON L.E.R.D., Luis & Koleva, D.A.. (2017). **CONCRETE DURABILITY**: Cementitious materials and reinforced concrete properties, behavior and corrosion resistance. 10.1007/978-3-319-55463-1. Disponível em: <https://www.technicalbookspdf.com/concrete-durability-cementitious-materials-and-reinforced-concrete-properties-behavior-and-corrosion-resistance-by-luis-emilio-rendon-diaz-miron-and-dessi-a-koleva/>. Acesso em: 30 nov. 2023.

MONTEIRO, Sergio Neves. Ensaio de Pullout em Fibras Lignocelulósicas: uma metodologia de análise. **REVISTA MATÉRIA**, Rio de Janeiro, v. 11, n. 3, p. 1-8, 11 set. 2006. Disponível em: <http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10789>. Acesso em: 05 mar. 2022.

NACARATO, Adair Mendes; MIGUEL, Antonio; FUNCIA, Manoel Amaral; MIORIN, Maria Ângela. **TÓPICOS DE ENSINO DE MATEMÁTICA**. Campinas: Delta Xis Editora Ltda, 1990. 46 p. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://repositorio.ufsc.br/bitstream/h>

andle/123456789/218469/14%20-%20%C3%81reas%20e%20Per%C3%ADmetros.pdf?sequ
ence=1&isAllowed=y. Acesso em: 30 nov. 2023.

NEW LAB (Brasil). **ESTUFA COM CIRCULAÇÃO E RENOVAÇÃO DE AR NL-82-81.**
2023. Disponível em:

<https://www.newlabequipamentos.com.br/produto/0000094/ESTUFA-COM-CIRCULACAO-E-RENOVACAO-DE-AR--NL-82-81--81-LITROS->. Acesso em: 05 maio 2023.

PEREIRA, Larissa de Fátima Chaves. **SIMULAÇÃO POR ELEMENTOS FINITOS DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MATERIAIS COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS NATURAIS.** 2018. 62 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Mecânica, Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018. Disponível em:

<https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/46811/1/LARISSA%20DE%20F%C3%81TIMA%20CHAVES%20PEREIRA-SIMULA%C3%87%C3%83O%20POR%20ELEMENTOS%20FINITOS%20DO%20COMPORTAMENTO%20MEC%20NICO%20DE%20MATERIAIS%20COMP%C3%93SITOS%20REFOR%C3%87ADOS%20COM%20FIBRAS%20NATURAIS.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2024.

PEREIRA, Warley Augusto *et al.* **DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FIBRA DA FOLHA DO BURITI.** Revista Matéria, Rio de Janeiro, v. 26, n. 1, p. 1-22, 13 set. 2020.

Pontifícia Universidade Católica (PUC). **CONCRETO COM FIBRAS.** 2023. Disponível em: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/34905/34905_4.PDF. Acesso em: 30 nov. 2030.

RIOS, Alexandre de Souza; PENNAFORT JÚNIOR, Luiz Carlos Gonçalves; LIMA, Abner Guilherme Teixeira; DEUS, Enio Pontes de. **COMPORTAMENTO MORFOLÓGICO E MECÂNICO DE FIBRAS DE COCO TRATADAS SUPERFICIALMENTE E DE MANTAS DE FIBRA DE COCO.** **ABM Proceedings**, Rio de Janeiro, v. 1, n. 1, p. 1-11, 21 ago. 2015. Anual. Disponível em:

<https://abmproceedings.com.br/en/article/download-pdf/comportamento-morfologico-e-mecanico-de-fibras-de-coco-tratadas-superficialmente-e-de-mantas-de-fibra-de-coco>. Acesso em: 24 jan. 2024.

SILVA, Karla Isis Lima. **ESTUDO DA INCORPORAÇÃO DE PALHA DE SOJA COMO REFORÇO FIBROSO NA PRODUÇÃO DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS.** 2019. 67 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de São Carlos, Buri, 2019. Disponível em:

<https://drive.google.com/file/d/1NZwHyAYTU1E6i9NWbKmNdblgaIsjVpm6/view?usp=sharing>. Acesso em: 15 jun. 2023.

SILVEIRA, Alberto Jorge da Mota. **VIABILIDADE TÉCNICA DE PIRÓLISE DA BIOMASSA DO COCO**: produção de bioóleo, biocarvão e biogás. 2018. 62 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Energia da Biomassa, Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2018. Disponível em: <https://www.repositorio.ufal.br/bitstream/riufal/5742/3/Viabilidade%20t%C3%A9cnica%20da%20pir%C3%B3lise%20da%20biomassa%20do%20coco%20produ%C3%A7%C3%A3o%20de%20bio%C3%B3leo,%20biocarv%C3%A3o%20e%20biog%C3%A1s.pdf>. Acesso em: 24 ago. 2023.

VELOSO, Yago Matheus da Silva; SOUZA, Italo Edwin Santos; SANTOS, José Vieira dos; LEITE, Manuela Souza. **REUTILIZAÇÃO DA FIBRA DA CASCA DO COCO VERDE PARA A PRODUÇÃO DE MATERIA PRIMA INDUSTRIAL**. Cadernos de Graduação, Aracajú, v. 17, n. 1, p. 91-98, out. 2013. Disponível em: <https://periodicos.set.edu.br/cadernoexatas/article/download/579/570/3678>. Acesso em: 22 jan. 2024.

VENDRUSCOLO, Márcio Antônio. **ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE MATERIAIS COMPÓSITOS FIBROSOS PARA A APLICAÇÃO COMO REFORÇO DE BASE DE FUNDAÇÕES SUPERFICIAIS**. 2003. 248 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/2646>. Acesso em: 10 jan. 2023.

YUE, C.Y., LOOI, H.C., QUEK, M.Y., “ASSESSMENT OF FIBRE-MATRIX ADHESION AND INTERFACIAL PROPERTIES USING THE PULLOUT TEST”, International Journal Adhesion and Adhesives, v. 15, pp. 73-80, 1995.