



INSTITUTO FEDERAL DE SERGIPE  
COORDENADORIA DE ENGENHARIA CIVIL  
SILVIA DO AMPARO SOARES

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA INCORPORAÇÃO DE FIBRAS TÊXTEIS À BASE DE  
POLIÉSTER NA MATRIZ CIMENTÍCIA DE ARGAMASSAS: ESTUDO POR  
MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA E DO COMPORTAMENTO  
MECÂNICO DAS FIBRAS

ESTÂNCIA  
2023

SILVIA DO AMPARO SOARES

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA INCORPORAÇÃO DE FIBRAS TÊXTEIS À BASE DE  
POLIÉSTER NA MATRIZ CIMENTÍCIA DE ARGAMASSAS: ESTUDO POR  
MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA E DO COMPORTAMENTO  
MECÂNICO DAS FIBRAS

Trabalho de conclusão de curso 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  
2023

S676c Soares, Silvia do Amparo.  
Caracterização física da incorporação de fibras têxteis à base de poliéster na matriz cimenteira de argamassas: estudo por microscopia eletrônica de varredura e do comportamento mecânico da fibra. / Silvia do Amparo. Soares. - Estância, 2023.  
70 f.; il.

Monografia (Graduação) – Bacharelado em Engenharia Civil. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe – IFS, 2023.

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

1. Fibra têxtil. 2. Matriz cimentícia. 3. Microscopia eletrônica de varredura. 4. Tração. I. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe - IFS. II. Lima, Thiago Augustus Remacre Munareto. III. Título.

CDU: 624: 621.775.8-034.14

SILVIA DO AMPARO SOARES

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA INCORPORAÇÃO DE FIBRAS TÊXTEIS À BASE DE  
POLIÉSTER NA MATRIZ CIMENTÍCIA DE ARGAMASSAS: ESTUDO POR  
MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA E DO COMPORTAMENTO MECÂNICO  
DAS FIBRAS

Trabalho de conclusão de curso 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.

Aprovado em: 27/01/2023

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Thiago Augustus Remacre Munareto Lima  
IFS – Instituto Federal de Sergipe

---

Prof<sup>a</sup>. Dra. Ana Amélia Mota dos Santos  
IFS – Instituto Federal de Sergipe

---

Prof. Me. Arthur Behenck Aramburu  
UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por me permitir chegar até aqui.

A Maria Luzileide Conceição do Amparo, minha mãe, por acreditar em mim quando eu mesma duvidei. Obrigado pelo amor, compreensão e cuidados.

A Silvio Soares, Sávyo Azevedo Soares e Mileide Emanuelli Soares pelo apoio e incentivo.

A Lincoln Costa Modesto dos Santos, pelo amor, carinho, paciência, incentivo e companheirismo nos mais diversos momentos.

Aos meus amigos conquistados durante o curso, Nayara, Henrique, Jobson, Taiane, Rainara, Nora, Camilla, Larissa, Sávio e Érica, por toda ajuda, amizade, estímulo e compreensão.

Ao meu orientador Thiago Augustus Remacre Munareto Lima pela orientação, conversas, conselhos e por acreditar no meu potencial.

A todos os demais professores do curso de engenharia civil do Instituto Federal de Sergipe, campus Estância que contribuíram com a minha formação.

A todos os funcionários do Instituto Federal de Sergipe, que também contribuíram indiretamente para a minha formação.

Ao Laboratório da Universidade Federal de Sergipe - Centro Multiusuário de Nanotecnologia (CMNano), pela contribuição na análise da microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Ao técnico Ítalo Araújo e ao professor Sandro Amico, membros do Grupo de Materiais Compósitos e Nanocompósitos, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pela contribuição para a realização do ensaio de caracterização mecânica da fibra analisada neste estudo.

Por fim, a todos aqueles que de alguma forma me incentivaram.

## RESUMO

O uso de fibras como método de reforço para matrizes cimentícias cresce cada vez mais, geralmente com o objetivo de reforçar as propriedades deficientes da matriz e diminuir ou substituir o uso do aço. Esse crescimento está diretamente relacionado ao aumento no número de estudos a respeito da utilização dos mais diversos tipos de fibras para suprir necessidades específicas encontradas nos materiais de base cimentícia. Diante do exposto, esta pesquisa tem por finalidade avaliar morfologicamente as fibras à base de poliéster e elastano a partir de sua dispersão junto a matriz cimentícia e determinar os coeficientes mecânicos, módulo de elasticidade, tensão de ruptura, módulo de resiliência e tenacidade da fibra têxtil. Para isso, foi adotado um traço de argamassa com fibra têxtil intitulado AF100 e uma amostra da fibra à base de poliéster e elastano em seu estado natural (AF0). As duas amostras foram encaminhadas para avaliação através da microscopia eletrônica de varredura (MEV). Com base nas imagens obtidas percebeu-se a existência de grande sinergia microscópica entre a fibra têxtil e a micro estrutura da matriz cimentícia. Também se tornou possível a visualização de micro ranhuras superficiais no fio de poliéster geradas pela degradação do meio ambiente químico da matriz cimentícia. Essas ranhuras, por sua vez, aumentam a área superficial de contato entre fibra e matriz e, assim, podem auxiliar na formação de micro pontes de transferência de tensão por atrito entre a matriz cimentícia e as fibras, quando dispersas na mistura. Após tornar-se conhecida essa interação, fez-se necessária uma avaliação mecânica da fibra para verificar como os coeficientes mecânicos da fibra, aliados a sua significativa interação com a matriz cimentícia, poderiam beneficiar o elemento construtivo onde fossem inseridas. Observou-se que a fibra possui comportamento dúctil semelhante ao aço, com região elástica proeminente e aumento de resistência após a estrição devido ao entrelaçamento natural dos fios de poliéster. Assim, concluiu-se que, a aplicação da fibra têxtil em material de base cimentícia, como concretos e argamassas, poderá fornecer grande contribuição, principalmente, em aplicações específicas, como os materiais que necessitam de alta resistência ao impacto e a esforços recorrentes, aumentando assim, a durabilidade das estruturas.

**Palavras-Chave:** Fibra têxtil. Matriz cimentícia. Microscopia eletrônica de varredura. Tração.

## ABSTRACT

The use of fibers as a reinforcing method for cementitious matrices is growing more and more, generally with the objective of reinforcing the deficient properties of the matrix and diminishing or replacing the use of steel. This growth is directly related to the increase in the number of studies regarding the use of the most diverse types of fibers to meet specific needs found in cement-based materials. In view of the above, this research aims to morphologically evaluate the fibers based on polyester and elastane based on their dispersion in the cementitious matrix and determine the mechanical coefficients, modulus of elasticity, tensile stress, modulus of resilience and tenacity of the textile fiber. For this, a mortar mix with textile fiber named AF100 and a fiber sample based on polyester and elastane in its natural state (AF0) were adopted. The two samples were sent for evaluation through scanning electron microscopy (SEM). Based on the images obtained, it was noticed the existence of a great microscopic synergy between the textile fiber and the microstructure of the cementitious matrix. It also became possible to visualize superficial micro grooves in the polyester thread generated by the degradation of the chemical environment of the cementitious matrix. These grooves, in turn, increase the surface area of contact between the fiber and the matrix and, thus, may help in the formation of micro bridges for stress transfer by friction between the cementitious matrix and the fibers, when dispersed in the mixture. After this interaction became known, a mechanical evaluation of the fiber was necessary to verify how the mechanical coefficients of the fiber, allied to its significant interaction with the cementitious matrix, could benefit the constructive element where they were inserted. It was observed that the fiber has a ductile behavior similar to steel, with a prominent elastic region and an increase in resistance after stretching due to the natural interweaving of the polyester threads. Thus, it was concluded that the application of textile fiber in cement-based material, such as concrete and mortar, can provide a great contribution, mainly in specific applications, such as materials that require high resistance to impact and recurrent efforts, increasing thus, the durability of structures.

**Keywords:** Textile fiber. Cement matrix. Scanning electron microscopy. Traction.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Esquema de concentração de tensões.                                     | 21 |
| Figura 2 – Esquema de concentração de tensões com reforço de fibras.               | 22 |
| Figura 3 – Ponte de transferência de tensão.                                       | 24 |
| Figura 4 – Cadeia manométrica do poliéster.                                        | 25 |
| Figura 5 – Cadeia manométrica do elastano.                                         | 25 |
| Figura 6 – Fibras de poliéster e elastano                                          | 26 |
| Figura 7 - Fibras à base de poliéster e elastano em processo de hidratação.        | 26 |
| Figura 8 - Desenho esquemático: microscópio óptico e eletrônico de varredura.      | 28 |
| Figura 9 - Desenho esquemático dos componentes do MED                              | 29 |
| Figura 10 – MEV da fibra de coco <i>in natura</i> e inserida em argamassa          | 30 |
| Figura 11 – Representação de ensaio de tração                                      | 31 |
| Figura 12 – Modelo de viga engastada com diferentes representações                 | 32 |
| Figura 13 – Diagrama de tensão-deformação convencional para um material dúctil     | 33 |
| Figura 14 – Exemplo de estricção em barra de aço                                   | 35 |
| Figura 15 – Representação de forças de tração e compressão                         | 36 |
| Figura 16 – Gráfico tensão-deformação para materiais frágeis e dúcteis             | 39 |
| Figura 17 – Disposição da fibra têxtil para a análise de microscopia               | 42 |
| Figura 18 - Disposição do porta amostra contendo a fibra no equipamento Emic 23-5D | 43 |
| Figura 19 - Disposição do porta amostra no equipamento Emic 23-5D                  | 44 |
| Figura 20 – Microscopias da fibra em diferentes magnificações                      | 46 |

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 21 – Esquema de concentração de tensões com reforço de fibras. | 47 |
| Figura 22 – Ponte de transferência de tensão.                         | 50 |
| Figura 23 – Cadeia manométrica do poliéster.                          | 51 |
| Figura 24 – Cadeia manométrica do elastano.                           | 52 |
| Figura 25 – Esquema de concentração de tensões.                       | 56 |
| Figura 26 – Esquema de concentração de tensões com reforço de fibras. | 57 |

## LISTA DE ABREVIATURAS, SÍGLAS E SÍMBOLOS

ABCP – Associação brasileira de Cimento Portland

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CIMM - Centro de Informação Metal Mecânica

CRF – Concreto Reforçado com Fibras

CP – Cimento Portland

IBRACON – Instituto Brasileiro de Concreto

FIES – Federação das Indústrias do Estado de Sergipe

Lp – Limite de Proporcionalidade

MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura

NUMAC<sup>3c</sup> – Núcleo de Materiais Avançados e Componentes para a Construção Civil

PET – *poli tereftalato de etila*

Ur – Módulo de Resiliência

Ut – Módulo de Tenacidade

## SUMÁRIO

|                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b>                                                                                               | 12 |
| 1.1 JUSTIFICATIVA                                                                                                 | 14 |
| 1.2 OBJETIVOS                                                                                                     | 15 |
| 1.2.1 <b>Objetivo geral</b>                                                                                       | 15 |
| 1.2.2 <b>Objetivos específicos</b>                                                                                | 15 |
| <b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b>                                                                                      | 16 |
| 2.1 CIMENTO PORTLAND                                                                                              | 16 |
| 2.1.1 <b>Principais tipos de Cimento Portland</b>                                                                 | 16 |
| 2.2 CONCRETOS E ARGAMASSAS                                                                                        | 17 |
| 2.3 SURGIMENTO E PROPAGAÇÃO DE FISSURAS EM CONCRETOS E ARGAMASSAS                                                 | 17 |
| 2.4 MATRIZ CIMENTÍCIA                                                                                             | 19 |
| 2.4.1 <b>Processo de pega e endurecimento da matriz cimentícia</b>                                                | 20 |
| 2.4.2 <b>A microestrutura da matriz cimentícia</b>                                                                | 20 |
| 2.4.3 <b>Matriz cimentícia reforçada com fibra</b>                                                                | 20 |
| 2.4.4 <b>Concreto reforçado com fibra</b>                                                                         | 22 |
| 2.5 PONTES DE TRANSFERÊNCIA DE TENSÃO                                                                             | 23 |
| 2.6 FIBRAS DE POLIÉSTER E ELASTANO                                                                                | 25 |
| 2.6.1 <b>Classificação química do poliéster</b>                                                                   | 25 |
| 2.6.2 <b>Classificação química do elastano</b>                                                                    | 26 |
| 2.6.3 <b>Preparação das fibras</b>                                                                                | 26 |
| 2.7 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) COMO TÉCNICA DE INVESTIGAÇÃO DA MICROESTRUTURA DA MATRIZ CIMENTÍCIA | 28 |
| 2.8 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS                                                                          | 31 |
| 2.8.1 <b>Ensaio de tração</b>                                                                                     | 31 |
| 2.8.2 <b>Tensão</b>                                                                                               | 32 |
| 2.8.3 <b>Deformação</b>                                                                                           | 33 |
| 2.8.4 <b>Gráfico de tensão-deformação</b>                                                                         | 34 |

|         |                                                                                      |    |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.8.4.1 | <i>Comportamento elástico</i> .....                                                  | 35 |
| 2.8.4.1 | <i>Comportamento plástico</i> .....                                                  | 35 |
| 2.8.4.2 | <i>Materiais dúcteis</i> .....                                                       | 36 |
| 2.8.4.3 | <i>Materiais frágeis</i> .....                                                       | 37 |
| 2.8.4.4 | <i>Lei de hooke e módulo de elasticidade</i> .....                                   | 37 |
| 2.8.5   | <b>Energia de deformação</b> .....                                                   | 38 |
| 2.8.5.1 | <i>Resiliência</i> .....                                                             | 38 |
| 2.8.5.2 | <i>Tenacidade</i> .....                                                              | 39 |
| 2.8.6   | <b>Comportamento mecânico das matrizes cimentícias</b> .....                         | 39 |
| 2.8.7   | <b>Comportamento mecânico de fibra têxtil</b> .....                                  | 40 |
| 3       | <b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....                                                     | 42 |
| 3.1     | ENSAIO DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....                                   | 42 |
| 3.2     | ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DA FIBRA.....                                      | 44 |
| 3.2.1   | <b>Obtenção do módulo de resiliência, tenacidade e elasticidade das fibras</b> ..... | 45 |
| 3.2.1.1 | <i>Módulo de resiliência</i> .....                                                   | 45 |
| 3.2.1.2 | <i>Módulo de tenacidade</i> .....                                                    | 46 |
| 3.2.1.3 | <i>Módulo de elasticidade</i> .....                                                  | 46 |
| 4       | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....                                                 | 47 |
| 4.1     | MICROSCOPIA ELETRONICA DE VARREDURA (MEV).....                                       | 47 |
| 4.2     | CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS FIBRAS .....                                             | 52 |
| 4.2.1   | <b>Propriedades mecânicas das fibras à base de poliéster e elastano</b> .....        | 52 |
| 4.2.1.1 | <i>Módulo de resiliência</i> .....                                                   | 55 |
| 4.2.1.2 | <i>Módulo de tenacidade</i> .....                                                    | 56 |
| 4.2.1.3 | <i>Módulo de elasticidade</i> .....                                                  | 58 |
| 4.2.3   | <b>Diagrama comparativo comportamento do aço x fibra</b> .....                       | 60 |
| 5       | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....                                                    | 62 |
|         | <b>REFERÊNCIAS</b> .....                                                             | 64 |

## 1 INTRODUÇÃO

Os materiais de construção mais utilizados no mundo são aqueles provenientes do cimento, como os concretos e argamassas. A sua ampla utilização está ligada ao fato de que estes materiais possuem diversas vantagens, tais como, fácil moldabilidade, resistência mecânica, durabilidade, boa resistência à água e um melhor custo/benefício quando comparado a outros materiais construtivos. (CAPELIN, et al. 2020).

Os concretos e argamassas convencionais são materiais frágeis por natureza, possuem uma boa resistência a compressão, o que é importante para a construção civil porém, um desempenho relativamente fraco em relação a forças de tração (AMARAL; SILVA; MORAVIA, 2017). Para alterar essa característica e evitar uma ruptura súbita e frágil do elemento, são incorporados reforços na matriz cimentícia (SHAFEI, et al. 2021).

Estudos identificam estratégias eficazes para combater essa deficiência encontrada nos compósitos cimentícios, como a utilização do aço, método mais antigo e comumente utilizado em larga escala em todo o mundo. No Brasil, segundo Inaba (2017), em meados do século XIX, época de grandes modificações socioeconômicas no país, o aço começou a ser utilizado, oportunizando um extraordinário estímulo no campo da construção civil. O reforço com barras de aço ampliou consideravelmente a relação resistência/peso do concreto, entre outras contribuições estruturais. (SILVA, et al. 2019). No entanto, apesar de sua grande importância e necessidade no âmbito da construção civil, o aço possui algumas desvantagens, como o alto custo e sua vulnerabilidade em relação a exposição, devido a possibilidade de corrosão. (OLIVEIRA; COELHO, 2019).

Diante disso, com o objetivo de diminuir custos e melhorar propriedades, surgiu a necessidade de buscar materiais que pudessem reduzir o uso do aço em elementos de base cimentícia. Mediante esse cenário, alguns pesquisadores iniciaram estudos acerca da incorporação de fibras em matrizes cimentícias, os quais serão citados no decorrer do trabalho, com o intuito de fornecer outras opções viáveis economicamente e estruturalmente eficientes, para que dessa forma pudessem diminuir ou até mesmo, substituir o aço em determinados elementos construtivos. (SHAFEI, et al., 2021).

Para Amorim (2018), a necessidade do desenvolvimento de materiais mais resistentes e baratos foram importantes para o surgimento de compósitos, materiais que são resultantes da mistura de dois ou mais componentes distintos, com propriedades melhoradas. O uso de fibras

como carga de reforço em matrizes cimentícias diminui o custo e mantém a qualidade do produto. A principal contribuição das fibras ocorre no estado endurecido do compósito, após a ruptura da matriz cimentícia, fornecendo resistência residual ao elemento (LEITE; CASTRO, 2020). As fibras agem como ponte de transferência de tensão, reduzindo a concentração de tensões nas extremidades das fissuras e formando uma espécie de costura, a qual é capaz de impedir ou limitar o agravamento do estado fissurado da matriz cimentícia (MARTINS, 2016).

De acordo com o trabalho de Leite e Castro (2020), as fibras também melhoram a distribuição das fissuras e limitam as aberturas destas, reduzindo a exposição da matriz ao ambiente. O reforço com fibras é apropriado para estruturas com alta capacidade de distribuição de tensões e que possuam necessidade de resistência a tração. A matriz cimentícia é um dos fatores que também exerce grande influência no desempenho do concreto reforçado com fibras, interferindo na fluidez da mistura e na aderência entre as fibras e a matriz. (LEITE; CASTRO, 2020).

Nesse contexto, referente as fibras utilizadas como reforço de material cimentício, têm-se atualmente no mercado da construção civil diversos tipos, sendo mais comuns as fibras de aço, vidro e polietileno (PET). No entanto, já existem alguns estudos como os de Santos (2021) e Santana (2019) onde comprova-se a eficácia de um tipo de fibra oriunda do processo fabril de confecção têxtil, através de estudos referentes a degradação química e a durabilidade da fibra. A qual é composta por 8% de elastano e 92% de poliéster, por isso chamada de fibra à base de poliéster e elastano ou fibra têxtil.

Para Shafei (2021), as principais características que devem ser estudadas quando pretende-se incorporar qualquer tipo de fibra em compósitos cimentícios são: módulo de elasticidade, resistência a tração, deformação final e a ligação ou interação existente entre a fibra utilizada e a matriz cimentícia onde a mesma será inserida.

Diante do exposto, o presente trabalho tem como finalidade, estudar as características físicas das fibras à base de poliéster e elastano, bem como sua incorporação e, consequentemente, interação dentro de um traço padrão de matriz cimentícia. De modo que seja possível mensurar as propriedades que poderão ser melhoradas com a incorporação desse material e como isso influenciará nas características finais da mistura cimentícia como um todo.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

De acordo com o Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), (2009), o concreto é o material mais consumido no mundo, por ser um elemento construtivo amplamente disseminado e necessário. Estima-se que anualmente são consumidas 11 bilhões de toneladas de concreto, o que dá, aproximadamente, um consumo médio de 1,9 toneladas de concreto por habitante por ano, valor inferior apenas ao consumo de água (*Federación Iberoamericana de Hormigón Premesclado (FIHP)*, apud PEDROSO, 2009).

O concreto, assim como os demais materiais provenientes de matrizes cimentícias, apresentam inúmeras vantagens, principalmente em relação a compressão axial. No entanto, por ser um material cerâmico, possui ruptura frágil e ao ser submetido a esforços de tração, se rompe repentinamente quando sua resistência mecânica é superada (SANTOS, 2021). Para minimizar a influência de esforços de tração em concretos e argamassas, na grande maioria dos casos utiliza-se o aço ou, como método mais recente e com grande potencial de crescimento, fibras dos mais diversos materiais.

Quanto a utilização de fibras como método de reforço, cita-se as fibras à base de poliéster e elastano, as quais, de acordo com Santos (2021), diminuem de maneira significativa a incidência de abertura e de propagação de fissuras nas argamassas assim como auxiliam na durabilidade do material. Além disso, por se tratar de um resíduo gerado pela indústria têxtil, a utilização dessas fibras pode ser classificada com uma atividade sustentável.

As fibras à base de poliéster são oriundas de um processo fabril, onde são descartadas e geram resíduos para a indústria têxtil. De acordo com o Sistema Moda Itália (2016), o setor têxtil faz parte das atividades de maior influência, a nível global, do ponto de vista ambiental, no que se refere a geração de resíduo. Esse setor é responsável por cerca de 3,4 milhões de toneladas de emissões globais de gases de efeito estufa por ano, além de consumir em média 7,5 milhões de litros de água e utilizar 6 milhões de toneladas de produtos químicos, nos processos de tingimento, estamparia e acabamento.

Trazendo essa análise, é importante salientar que a indústria têxtil é um dos setores que possuem maior representatividade no estado de Sergipe, de acordo com o levantamento realizado pela Federação das Indústrias do Estado de Sergipe (FIES), no seu estudo mais recente feito no ano de 2012, constatou-se que Sergipe dispõe de um total de 13 fábricas desse seguimento e o município de Estância, por sua vez, hospeda 4 das 13 indústrias citadas, o que

faz dele um dos principais polos desse setor. Desse modo, as fibras analisadas neste trabalho, são resíduos gerados durante o processo têxtil de trefilagem de fibras artificiais e sintéticas, esses resíduos são originados em forma de rebarbas de fibras, as quais são constituídas por 92 % de poliéster e 8 % de elastano. Este material foi fornecido por uma indústria têxtil local, fabricante de jeans, situada no município de Estância-Se que gera, ao ano, cerca de 108 toneladas de resíduos de rebarbas provenientes desse processo de confecção de jeans.

Assim, este trabalho visa esclarecer as interações físicas existentes entre a matriz cimentícia e as fibras à base de poliéster e elastano bem como, possibilitar uma reutilização para este material, que até então é descartado como resíduo ambiental, inserindo-o na construção civil como método de reforço de matrizes cimentícias. Para tal, emprega-se nesse estudo a teoria de pontes de transferência de tensão entre a fibra e a microestrutura da matriz cimentícia.

## 1.2 OBJETIVOS

Nos tópicos a seguir, são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos.

### 1.2.1 Objetivo geral

Avaliar morfologicamente as fibras à base de poliéster e elastano, provenientes do processo de trefilagem de jeans, a partir da sua interação junto a matriz cimentícia e determinar quantitativamente, mediante análise do comportamento físico, os coeficientes mecânicos da fibra e sua capacidade de agir como ponte de transferência de tensão na matriz cimentícia.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Realizar análise microscópica da morfologia e dispersão espacial da fibra têxtil;
- Avaliar a interação da fibra têxtil com a microestrutura da matriz cimentícia para um traço padrão;
- Obter os coeficientes mecânicos da fibra têxtil empregada;

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 CIMENTO PORTLAND

O Cimento Portland é o principal constituinte da matriz cimentícia e consequentemente do concreto e das argamassas, ele é obtido a partir do clínquer Portland, material resultante da calcinação a aproximadamente 1450 °C de uma mistura de calcário e argila e eventuais corretivos químicos de natureza silicosa, aluminosa ou ferrífera (BATTAGIN, 2005).

De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (2002), o clínquer em pó tem a peculiaridade de desenvolver uma reação química em presença de água, na qual ele, primeiramente, torna-se pastoso e, em seguida, endurece, adquirindo elevada resistência e durabilidade. Porém, para uma potencialização dessas e de outras propriedades, existem vários materiais que são empregados como adições na composição do Cimento Portland, como o gesso que tem a função de controlar o tempo de pega (tempo do início do endurecimento). Assim, de acordo com a sua porcentagem na composição do cimento, acabam constituindo outros diversos tipos de cimento que podem ser encontrados atualmente no mercado.

#### 2.1.1 Principais tipos de Cimento Portland

Existem no Brasil vários tipos de Cimento Portland, diferentes entre si, principalmente em função de sua composição. Todos os tipos de cimento são regidos por normas da ABNT específicas, tendo como especificação a norma ABNT NBR 16697, assim, como demonstrado na Tabela 1, os principais tipos oferecidos no mercado de acordo com a Associação Brasileira do Cimento Portland (2002) são:

Tabela 1 – Principais tipos de Cimento Portland

| Tipos de Cimento Portland                     | Sigla    | Norma      |
|-----------------------------------------------|----------|------------|
| Cimento Portland comum                        | CP I     | NBR 5.732  |
| Cimento Portland composto                     | CP II    | NBR 11.578 |
| Cimento Portland de alto-forno                | CP III   | NBR 5.735  |
| Cimento Portland pozolânico                   | CP IV    | NBR 5.736  |
| Cimento Portland de alta resistência inicial  | CP V ARI | NBR 5.733  |
| Cimento Portland resistente aos sulfatos      | CP - RS  | NBR 5.737  |
| Cimento Portland branco                       | CP - B   | NBR 12.989 |
| Cimento Portland de baixo calor de hidratação | CP - BC  | NBR 13.116 |

Fonte: Associação Brasileira do Cimento Portland (ABCP), (2002).

Dentre esses, o Cimento Portland comum (CP I) é referência por suas características e propriedades, aos demais tipos básicos de Cimento Portland. O que os diferenciam é a

proporção de clínquer e sulfatos de cálcio e de adições (tais como escórias, pozolanas e material carbonático) acrescentadas no processo de moagem. O material carbonático é conhecido no jargão da indústria como fíler calcário (ABCP, 2002). Os diferentes tipos de cimento, agregados, adições e aditivos permitem gerar concretos com características especiais, formulados para apresentar bom desempenho em situações específicas (CAETANO, L. F. et al. 2005).

## 2.2 CONCRETOS E ARGAMASSAS

Helene (2007) ressalta que o concreto de Cimento Portland é o mais importante material estrutural e de construção civil da atualidade, podendo ser considerado como uma das descobertas mais interessantes da história do desenvolvimento da humanidade e sua qualidade de vida. Semelhante a popularidade do concreto, as argamassas também são amplamente utilizadas nas construções, e possuem diversas variações, traços e compósitos empregados.

O conhecimento das características e propriedades de diferentes tipos de materiais de construção leva ao emprego adequado dos mesmos e abre possibilidade para inovações tecnológicas, as quais têm sido fundamentais na viabilização de soluções cada vez mais sofisticadas ao longo da história da construção civil. Os concretos e argamassas, por exemplo, são alguns dos elementos mais utilizados no setor da construção e são base para diversas pesquisas e estudos, cujo objetivo principal, na maioria dos casos, é o aprimoramento de materiais e técnicas já conhecidas. Isso se dá, devido as suas diversas possibilidades de utilização. (RIBEIRO et al., 2006).

A versatilidade desses insumos vem sendo cada vez mais explorada, através da incorporação de elementos nas suas matrizes para melhorar propriedades ou minimizar deficiências, como por exemplo o aço ou as fibras. Esses elementos adicionados aos concretos ou argamassas, são estudados e adicionados de acordo com as características que se pretende melhorar, como por exemplo: resistência, plasticidade, consistência, capacidade de restrição de fissuras, etc. (HELENE, 2007).

## 2.3 SURGIMENTO E PROPAGAÇÃO DE FISSURAS EM CONCRETOS E ARGAMASSAS

Segundo Ehrenbring, et al. (2018), ao analisar as características físicas das matrizes cimentícias, observa-se que um dos problemas mais comuns e difíceis de serem controlados é o surgimento e propagação de fissuras, o qual é causado, muitas das vezes, por falhas ligadas a

movimentações térmicas. Ainda, de acordo com Ehrenbring, et al. (2018), caso esse problema não seja previsto ou controlado, essas fissuras tem potencial de causar acidentes estruturais ainda mais graves. A fissuração de elementos como pilares, vigas e paredes produz redistribuição das tensões no componente fissurado e nos elementos que estiverem em contato com ele. Segundo Thomaz (2020), as possíveis causas desta fissuração são: falha na execução das peças, falha no cálculo estrutural ou o mau uso da edificação.

As estruturas de concreto armado são propensas ao surgimento de fissuras, que se caracterizam como pontos de entrada de agentes agressivos, como os cloretos, os quais aceleraram o processo de corrosão das armaduras e consequente redução da vida útil das estruturas (ZIEGLER, 2020). Em casos mais extremos, é possível que essas manifestações patológicas levem as edificações à ruína, causando o risco de perda de vidas e prejuízos econômicos (FERREIRA, 2021).

Sahade (2005) afirma que as fissuras comprometem a estética, influenciam no desempenho térmico e acústico do ambiente, danificando sua estanqueidade e vedação contra a área externa. Somado a isso, a ocorrência de infiltração de água na estrutura pode provocar ou acelerar o processo de corrosão das armaduras, comprometendo sua resistência e durabilidade. Além disso, de acordo com Ferreira (2021), as fissuras podem despertar sensação de insegurança, desconforto visual e mental nos usuários da edificação em que se acomete. Em relação a conceituação das trincas e fissuras, tem-se como referência as definições descritas no trabalho de Oliveira (2012), onde as fissuras são classificadas de acordo com o tamanho da sua abertura, como demonstrado no Quadro 1.

| PATOLOGIA | ABERTURA                   |
|-----------|----------------------------|
| Fissura   | $\leq 0,5$ (mm)            |
| Trinca    | $0,5 \leq e \leq 1,5$ (mm) |
| Rachadura | $1,5 \leq e \leq 5,0$ (mm) |

Quadro 1 - Classificação de trincas, fissuras e rachaduras de acordo com a abertura. (Oliveira, 2012)

Quanto as fissuras em edificações, estas possuem duas classificações: geométricas e mapeadas. As geométricas são aproximadamente lineares, seguindo uma direção predominante e normalmente derivam da movimentação diferencial do substrato (SAHADE, 2005). Já as mapeadas ocorrem em todas as direções simultaneamente, geralmente ocasionadas pela retração do material. Ambas são subdivididas em ativas e passivas (CORSINI, 2010). As ativas

apresentam variações sensíveis na abertura ao longo do tempo, enquanto as passivas possuem abertura constante, ou seja, não se expandem nem se retraem mais (ABNT, 2013).

Diante disso, umas das maneiras de se evitar os diversos problemas causados pela presença de fissuras em materiais de matriz cimentícia é o emprego de fibras nesse compósito. Pois, sabe-se que a adição de fibras, em proporção adequada e com estudo prévio a respeito da sua interação com os demais materiais constituintes, afeta as propriedades do material resultante, diminuindo seu potencial de fissuração (EHRENBRING, et al. 2018).

## 2.4 MATRIZ CIMENTÍCIA

A cal hidráulica e o cimento pozolânico (de origem vulcânica) já eram conhecidos pelos romanos como aglomerante (ANDRADE, 2016), a partir desses materiais é formada uma matriz cimentícia similar à que utilizamos atualmente. As matrizes cimentícias atuais, em sua maioria, são compostas por agregados, Cimento Portland e água, e quando dosada de maneira adequada pode apresentar propriedades mecânicas elevadas, como resistência a compressão, módulo de elasticidade e durabilidade, além de ser base para elaboração de alguns dos materiais mais consumidos no mundo, como as argamassas e concretos. A matriz cimentícia também está presente na elaboração de grande parte dos novos materiais que vem surgindo atualmente para os mais diversos fins ligados ao setor da construção civil.

Por compor a estrutura básica do concreto, que é o material mais consumido no mundo hoje, aproximadamente 11 milhões de toneladas por ano, (MEHTA; MONTEIRO, 2008), os elementos que constituem a matriz cimentícia são consumidos também em grande escala no setor, tornando justificável a busca constante pelo aperfeiçoamento das suas propriedades, buscando torná-las mais eficientes, ou seja, reduzindo características indesejáveis para a função a qual o material for empregado e aprimorando suas propriedades já consideradas benéficas para determinada utilização. Esses ajustes são feitos através da incorporação de outros elementos nessa base cimentícia, como aço, fibras de aço, de polipropileno, entre outros materiais, aditivos ou semelhantes. As fibras de aço são mais aplicadas para combater as fissuras de médio e longo prazo, ocasionadas por efeitos de cargas cíclicas e impactos, e as fibras de polipropileno mais usadas para combater os efeitos da retração, nas primeiras idades do concreto (PEREIRA, 2017).

#### **2.4.1 Processo de pega e endurecimento da matriz cimentícia**

Dentre as principais características a serem observadas em um compósito cimentício está o seu tempo de pega e processo de endurecimento. Na prática, os tempos de pega referem-se às etapas do processo de endurecimento, solidificação ou enrijecimento do cimento e, em consequência, da matriz cimentícia. Também são utilizados os termos perda de plasticidade, perda de trabalhabilidade ou ainda cristalização (AOKI, 2010).

O cimento necessita de água para formar um processo cristalino que conduz a sua solidificação. Usa-se o termo “hidratação” para designar as reações deste processo. Porém, os compostos que formam o cimento (aluminatos e silicatos na maioria) não reagem com a mesma velocidade, ou melhor, não se hidratam ao mesmo tempo. As reações com aluminatos ocorrem primeiro e são as responsáveis pela perda da consistência e pela pega. Já as reações com os silicatos respondem pelo endurecimento e ganho de resistência mecânica em idades posteriores (METHA; MONTEIRO, 2008).

Segundo Pereira (2018), o termo pega refere-se à solidificação da pasta de cimento. O início de pega marca o momento que a pasta se torna não trabalhável. Da mesma maneira, as operações como: lançamento, compactação e acabamento do concreto, tornam-se de difícil execução. O tempo que leva para solidificar completamente é denominado tempo de fim de pega, que não deve ser muito longo para evitar atrasos no processo de construção.

#### **2.4.2 A microestrutura da matriz cimentícia**

Aparentemente simples, porém altamente complexa, a tecnologia de produção das matrizes cimentícias possuem uma distribuição heterogênea de compostos sólidos de várias formas e tamanhos ((EHRENBRING, et al. 2018).

Por ser um material amplamente utilizado no mercado, os compostos de base cimentícia são cada vez mais estudados a fim de se obter informações que possam contribuir com o aperfeiçoamento do material, principalmente no que se refere a sua capacidade de restrição de fissuras, que é um dos principais problemas enfrentados no setor construtivo. Para isso, conhecer a microestrutura desse composto é fundamental para qualquer estudo desse segmento.

#### **2.4.3 Matriz cimentícia reforçada com fibra**

A partir dos estudos de Figueiredo (2011), é possível perceber que a adição de fibras poliméricas em matrizes cimentícias no Brasil tem, em sua maioria a aplicação em pisos

industriais, na ordem de 75 % a 85 % à época do levantamento, no entanto, Europa e Estados unidos apresentam uma realidade distinta. A começar por uma normalização definida quanto ao uso, além de casos de utilização mais específicos e sofisticados, como o concreto reforçado com fibras para reforço estrutural em lajes suspensas e o uso das fibras aplicadas diretamente em concretos autoadensáveis.

Sabe-se que o concreto e as argamassas possuem baixa resistência a esforços de tração, o equivalente a 10% dos esforços a compressão (YU et al., 2016), algo que justifica a inserção das fibras com o intuito de mitigar o aparecimento de fissuras por retração, aumentar a resistência a tração e proporcionar elementos mais duráveis. O uso de fibras se tornou um procedimento eficaz de reforço, com o intuito de superar as limitações de resistência à tração e aspecto frágil dos concretos convencionais (CHASIOTI; VECCHIO, 2017).

Segundo estudo realizado por Tharun et al. (2018), a incorporação desse material em determinadas matrizes, aumentam as propriedades de resistência a compressão, resistência a tração, impacto, força e resistência a abrasão e também podem evitar problemas de corrosão em estruturas. Já Silva (2006), relata que o bom desempenho da adição de fibras está diretamente associado com aspectos tecnológicos inerentes à fibra, à matriz e ao preparo do compósito. Ressalta-se também que para que o produto final desempenhe suas funções, é necessário que propriedades físicas e mecânicas da fibra e da matriz, além da distribuição volumétrica da fibra na matriz, sejam consideradas no momento da produção do compósito.

Os materiais que podem compor um compósito podem ser classificados em dois tipos: a matriz e o elemento de reforço. A matriz é o que confere estrutura ao material compósito, preenchendo os espaços vazios que ficam entre os materiais reforços e mantendo-os em suas posições relativas. Os elementos de reforço são os que realçam as propriedades mecânicas do material compósito como um todo. (LUCENA, 2017)

Para Bentur e Mindess (2005), a principal função das fibras adicionadas em matrizes cimentícias é de controlar o aparecimento e a propagação das fissuras, sejam elas causadas pelos mais diversos fenômenos, além de melhorar sua capacidade de absorver energia. Também proporciona melhorias na resistência ao impacto, propriedades de fadiga e resistência à abrasão. De acordo com o estudo realizado por Hannant (2000), após a matriz frágil fissurar é possível observar o efeito do reforço que a pequena quantidade de fibras adicionada proporciona ao material, seja em níveis microscópicos ou a partir de rachaduras visíveis, devido à baixa deformação antes da ruptura da matriz de cimento, em comparação com as fibras.

#### 2.4.4 Concreto reforçado com fibra

Mais de 60 anos se passaram desde que o concreto reforçado com fibras (CRF) foi introduzido no mercado. Atualmente, muitos tipos desse CRF são usados para várias aplicações na indústria da construção (LARSEN, et al. 2020). De acordo com a necessidade do elemento a ser reforçado e do tipo de fibra utilizada, consegue-se aumentar significativamente algumas das principais propriedades do concreto e por outro lado, diminuir deficiências as quais fazem com que esse compósito muitas vezes perca boa parte de sua vida útil.

Testes experimentais mostram que a dosagem de fibras melhora a capacidade de absorção de energia do concreto e aumenta a robustez dos elementos de concreto. O concreto reforçado com fibra também foi ilustrado como um material para o desenvolvimento da sustentabilidade da infraestrutura em elementos como placas de fachada, colunas, vigas ou paredes. (GRZESIAK, 2021)

De acordo com Figueiredo (2011), assim que se principia o crescimento de cada nova fissura, a área disponível de suporte de carga é reduzida causando um aumento das tensões presentes nas extremidades das fissuras, como mostrado na Figura 1. Quando esta tensão supera a resistência à tração da matriz, ocorre a ruptura abrupta do material.

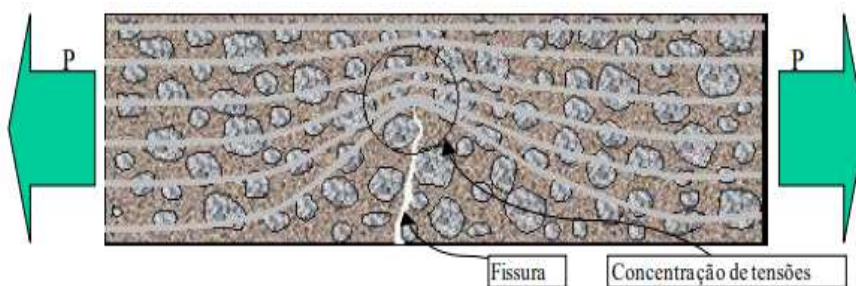


Figura 1 - Esquema de concentração de tensões (Figueiredo, 2011)

Esse comportamento frágil do concreto pode ser melhorado empregando-se materiais que ajudem a minimizar ou combater essas tensões de tração do elemento, para isso geralmente utiliza-se barras de aço, porém, de maneira crescente, tem-se utilizado alguns tipos de fibras como forma de aumentar a resistência a tração da matriz. Para Plizzari e Mindess (2019), a adição de fibras no concreto pode diminuir o aparecimento e propagação de fissuras, elevando a resistência do compósito ao impacto, quando comparado ao concreto sem fibras. Além disso, proporcionam uma resistência a propagação de fissuras que possam surgir na matriz devido a retração da pasta de cimento. (FIGUEIREDO, 2011).

As fibras melhoram a distribuição das fissuras e limitam seu estado de abertura, reduzindo a exposição do concreto ao ambiente. O reforço com fibras é apropriado para estruturas com alta capacidade de distribuição de tensões. No caso de estruturas com tensões localizadas e tensões dispersas, podem ser utilizados simultaneamente reforços locais com barras de aço e fibras dispostas aleatoriamente no concreto. (CASTRO, 2020)

Baseando-se nos estudos mais atuais relacionados a utilização das fibras, de modo mais generalizado, em compósitos cimentícios, resume-se que o papel fundamental das fibras consiste em controlar a largura da fissura e reduzir seu crescimento através da formação de uma espécie de ligação entre as bordas das rachaduras à medida em que começam a se abrir. Também são capazes de reduzir a fragmentação da superfície e aumentar sua resistência ao desgaste, agindo como ponte de transferência de tensão para reduzir a concentração de tensão, principalmente, nas extremidades das fissuras. Como exemplificado na Figura 2.

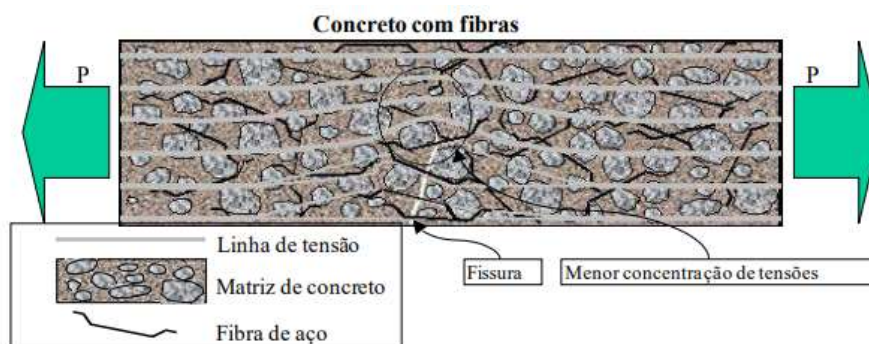


Figura 2 - Esquema de concentração de tensões com reforço de fibras (Figueiredo, 2011)

Para Shafei et al. (2021) a razão para a contribuição geral positiva das fibras é sua capacidade de superar rachaduras através das chamadas pontes de transferência de tensão, as quais possuem como finalidade facilitar a transferência de cargas de uma ponta a outra da fenda.

## 2.5 PONTES DE TRANSFERÊNCIA DE TENSÃO

Sabe-se que o concreto e por consequência as matrizes cimentícias possuem uma ótima resistência a esforços de compressão, além de também possuir resistência a abrasão, desgaste e até a climas inóspitos, a depender da composição da sua matriz. No entanto, de maneira geral, essas matrizes não possuem uma boa resistência a esforços de tração, motivo pelo qual o aço é amplamente utilizado junto ao concreto, formando o concreto armado (CARVALHO, et al. 2018).

O aço atua de forma a combater os esforços de tração submetidos ao elemento ou bloco de concreto armado, dissipando, combatendo e redistribuindo esses esforços de maneira uniforme por todo o elemento. Porém, por ser um material de alto custo no mercado, o aço acaba elevando o preço das construções o que gera uma necessidade de buscar novos componentes para substituí-lo no concreto ou diminuir a quantidade utilizada, dessa necessidade surgiram nos últimos anos diversos estudos cuja finalidade seria analisar a utilização de fibras das mais variadas tipologias como método de reforço, não só para o concreto, mas também para outros materiais de matriz cimentícia, como as argamassas por exemplo. As fibras de aço para concreto começaram a ser utilizadas no Brasil a partir da década de 1990. Hoje, é possível a especificação segura e execução com critérios internacionais de qualidade (CARVALHO, et al. 2018).

A ideia por trás das fibras dos mais diversos materiais, que são utilizadas em uma matriz cimentícia é a mesma, utilizar das suas propriedades para dissipar esforços de tração submetidos ao elemento. As fibras também reduzem a concentração de tensões nas extremidades das fissuras de flexão e de cisalhamento controlando sua propagação em todas as direções, uma vez que elas estão distribuídas no concreto de forma aleatória (MARTINS, 2016).

Dessa forma, cria-se uma ponte de transferência de tensão entre matriz cimentícia, argamassa ou concreto e fibra, proporcionando benefícios diversos, como a diminuição da área de aço utilizada e projetada para o elemento e a diminuição também do seu peso próprio, o surgimento ou aumento de propriedades auto cicatrizantes e muitas outras, a depender da microestrutura da fibra e suas características de interação junto a matriz na qual for inserida (MARTINS, 2016).

Uma das principais propriedades estudadas ao inserir determinado tipo de fibra em uma matriz cimentícia, é sua capacidade de interagir com esse material, pois através dessa interação as fibras conseguirão atuar de forma eficaz formando pontes de transferência de tensão (MARTINS, 2016). Esse termo é empregado porque a fibra age formando uma ligação entre as extremidades da matriz cimentícia em seu estado fissurado, como demonstrado na Figura 3, formando uma espécie de costura. Essa ligação impede, ou limita a expansão da fissura.

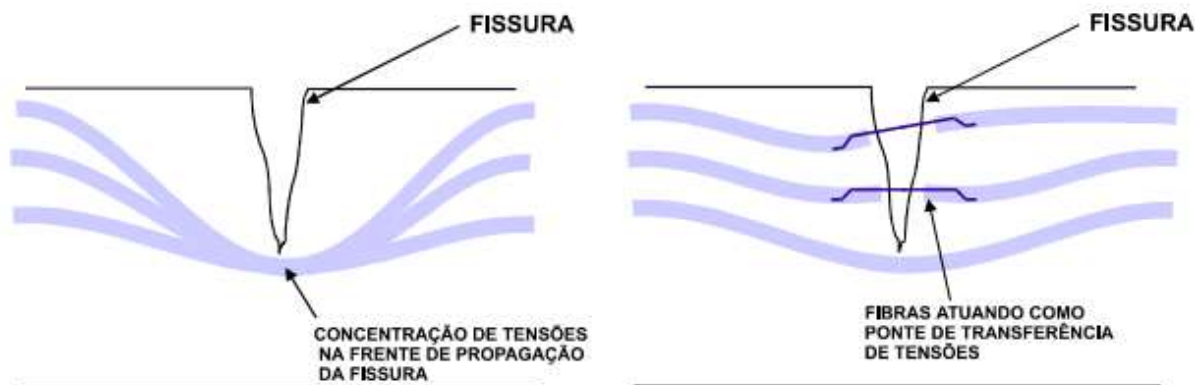


Figura 3 - Ponte de transferência de tensão (Martins, 2016)

## 2.6 FIBRAS DE POLIÉSTER E ELASTANO

As fibras analisadas nesta pesquisa foram fornecidas em forma de resíduo pela Sergitex Indústria Têxtil LTDA, situada no município de Estância/SE, a qual trabalha com fiação de fibras artificiais e sintéticas desde o ano de 2010. Esse contato se deu a partir da parceria público privada, entre o grupo de pesquisa “Núcleo de Materiais Avançados Compósitos e Componentes para a Construção Civil (NUMAC<sup>3c</sup>)” do Instituto Federal de Sergipe, Campus Estância e a Sergitex.

As fibras disponibilizadas pela empresa são provenientes do processo de trefilagem de fibras artificiais e sintéticas, o qual gera resíduos em formas de rebarbas de fibras constituídas, segundo o fabricante, por 92 % poliéster e 8 % de elastano, conforme evidenciado nos resultados dos ensaios de caracterização química do trabalho de Santos (2021).

### 2.6.1 Classificação química do poliéster

O poliéster é um polímero barato, de fácil manuseio e com excelentes propriedades mecânicas (TEIXEIRA, 2019). Na indústria têxtil ele pode ser utilizado de forma pura ou misturado com algodão, viscose, náilon, linho ou lã, em proporções variadas, para a confecção de peças (SANTOS, 2021). Esses fios pertencem a categoria de tereftalato de polietileno (PET) (DOPKO, 2018). A cadeia principal do poliéster contém ligações  $C = C$ , sendo que são essas ligações que permitem as ligações cruzadas ou reticulação (TEIXEIRA, 2019), e com o aumento dessa reticulação, a estrutura se torna mais rígida.



Figura 4 - Cadeia manométrica do poliéster (LIMA, 2020)

### 2.6.2 Classificação química do elastano

O elastano, é uma fibra sintética pertencente a classificação genérica das fibras elastoméricas sendo descrita como um poliuretano segmentado, pode ser esticado de quatro a sete vezes o seu comprimento, retornando ao seu comprimento original quando a tensão é relaxada. As fibras de elastano são comumente utilizadas no processo fabril têxtil, na confecção de malhas e outras peças, quase sempre em conjunto com outros tecidos ou fibras sintéticas (VASCONCELOS, 2012).

O poliuretano segmentado foi desenvolvido a partir da polimerização da borracha natural, com etapas para a sua constituição, as quais tem por objetivo a formação de um segmento flexível, a criação de irregularidades e o início e término do segmento rígido. (VASCONCELOS, 2012) Estas etapas quando aplicadas ao processo fabril de constituição do elastano, formam a cadeia manométrica vista na Figura 5.

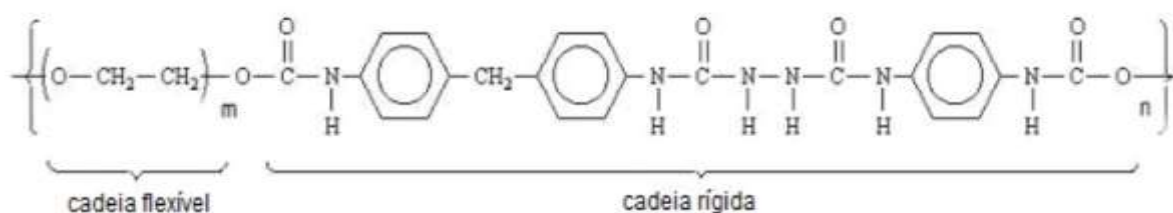


Figura 5 – Cadeia manométrica do elastano (LOPES, 2009 apud SANTOS, 2021)

### 2.6.3 Preparação das fibras

Para análise do material em laboratório, foi necessária sua preparação prévia, visto que se tratava de sobras de um processo fabril, e apresentavam-se como um “cordão” com inúmeros filamentos, o que dificultaria sua interação junto a matriz onde fosse inserida impossibilitando a análise real e precisa, a qual seria imprescindível. Dessa forma, se fez necessário desagregar os pequenos filamentos dispostos no comprimento do cordão, filamentos esses que serão de fato o material analisado na pesquisa em questão, como demonstrado na Figura 6.

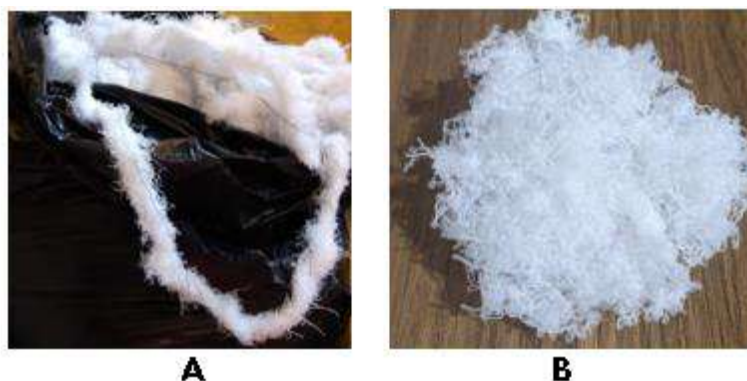


Figura 6 – Fibras de poliéster e elastano: (A) como recebida da fábrica e (B) desagregada em laboratório (Santos, 2021)

Outro fator a ser levado em consideração antes de iniciar o estudo em si é em relação a capacidade de absorção de água que as fibras a base de poliéster e elastano possuem, para que esse fator não comprometesse ou alterasse os resultados finais da pesquisa em questão. Em estudo realizado por Santana (2021), foi observado que as fibras à base de poliéster e elastano quando submersas na água e em uma temperatura média de 25°C, sob pressão atmosférica, absorvem água de maneira intensa por um período de 8 a 20 horas, após esse tempo as fibras já não absorvem mais quantidade significativa de água. Dessa forma, antes da preparação do traço, as fibras precisariam ser hidratadas, como mostra a Figura 7, por um período mínimo de 8 horas e máximo de 20 horas. A quantidade de água absorvida pela fibra foi subtraída do valor da água de amassamento do traço, para que assim essa quantidade acrescida não tivesse influência na relação água/cimento da mistura.



Figura 7 - Fibras à base de poliéster e elastano em processo de hidratação (Santos, 2021).

## 2.7 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) COMO TÉCNICA DE INVESTIGAÇÃO DA MICROESTRUTURA DA MATRIZ CIMENTÍCIA

O microscópio eletrônico de varredura (MEV), em inglês *sanning électron microscopy* (SEM), é um dos instrumentos mais utilizados para a análise de características microestruturais de materiais sólidos devido a sua versatilidade e alta resolução de suas imagens agregadas a ótima qualidade e precisão de informações visuais. Trata-se de um tipo de microscópio que caracteriza e analisa microestruturas de amostras, empregado em diversas áreas, o instrumento gera imagens com aspecto tridimensional e fornece informações referentes a natureza química do material, possibilitando a identificação da estrutura analisada, sua morfologia e os elementos químicos que a compõem, além de permitir analisar também a topografia da superfície da amostra (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007). O uso da técnica de análise de imagens em conjunto com a MEV tem se tornado, nos últimos anos, uma ferramenta importante para o estudo de materiais cimentícios, tais como argamassas e concretos (CORREIA et al, 2014). Sendo um tipo especial de microscópio, o MEV é capaz de produzir imagens de alta resolução da superfície de qualquer material sólido, possibilitando, de forma rápida, a observação da morfologia da amostra (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007). No campo da micromorfologia, o MEV é um dos instrumentos mais úteis disponíveis para a observação e análise de microestruturas e microagregados (BRIZZI et al., 2019).

Segundo as pesquisadoras Dedavid; Gomes e Machado, (2007), a principal função de qualquer microscópio é tornar visível ao olho humano o que for muito pequeno para tal. Ainda de acordo com o estudioso, a forma mais antiga e usual é a lupa seguida do microscópio óptico, que ilumina o objeto com luz visível ou luz ultravioleta. Entretanto, existe um limite máximo de resolução devido aos efeitos de difração, para os microscópios ópticos, esse limite é de um aumento de até 2000 vezes, pois, acima disso detalhes menores tornam-se imperceptíveis. Um microscópio eletrônico de varredura (MEV) utiliza um feixe de elétrons no lugar de fótons utilizados em um microscópio óptico convencional, o que permite solucionar o problema de resolução (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007).

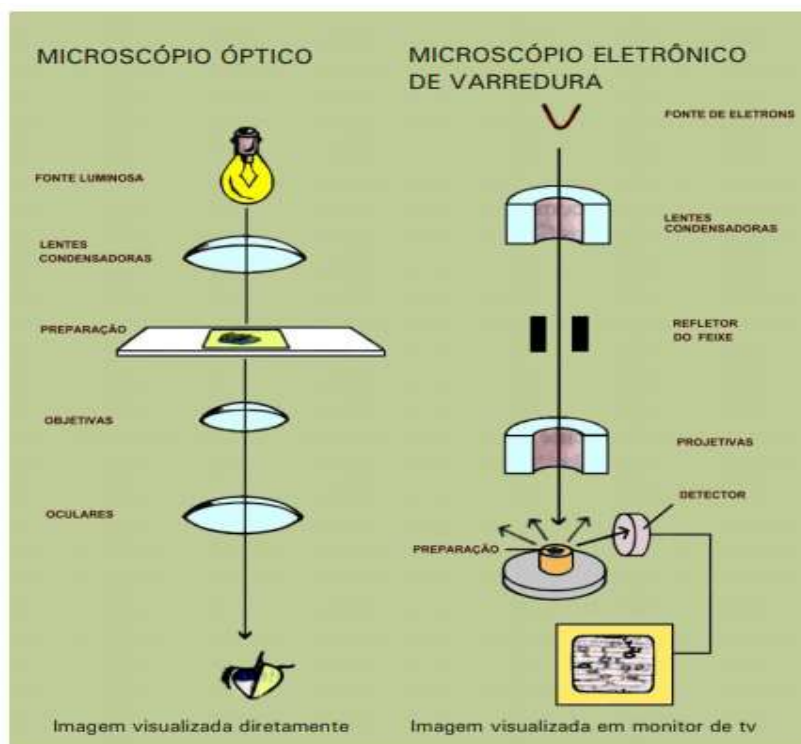


Figura 8 - Desenho esquemático: microscópio óptico e eletrônico de varredura (Dedavid, et al. 2007).

A microscopia eletrônica de varredura permite a obtenção de uma imagem ampliada da amostra a partir da interação de um feixe de elétrons com o material (MANNHEIMER, 2017). Uma característica importante do MEV é a aparência tridimensional da imagem das amostras, resultado direto da grande profundidade de campo (MONTEIRO, 2017). Possibilita também o exame em pequenos aumentos e com grande profundidade de foco, o que é extremamente útil, pois a imagem eletrônica complementa a informação dada pela imagem óptica (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007). O MEV convencional apresenta uma coluna óptico-eletrônica adaptada a uma câmara porta amostra, sistema eletrônico, detectores e sistema de vácuo. Seu princípio de funcionamento está baseado na utilização de um feixe de elétrons de pequeno diâmetro para explorar a superfície da amostra, ponto a ponto, por linhas sucessivas e transmitir o sinal do detector a uma tela catódica cuja varredura está perfeitamente sincronizada com aquela do feixe incidente (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007).

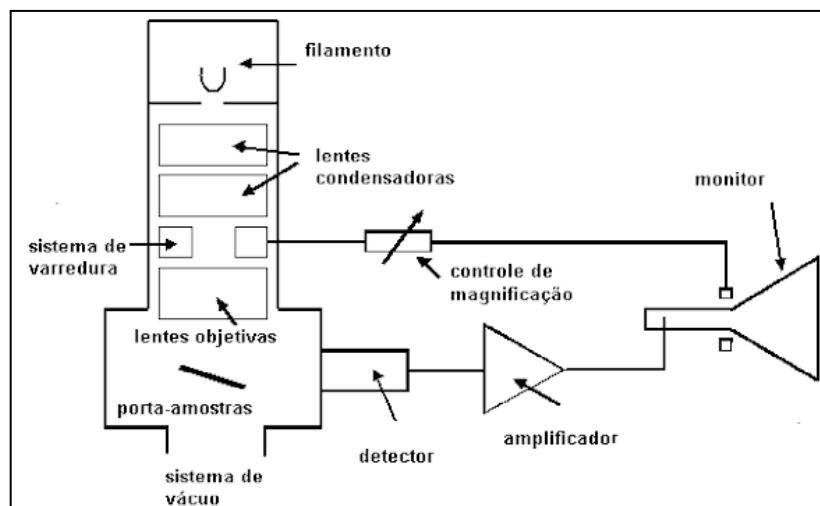


Figura 9 - Desenho esquemático dos componentes do MEV (Dedavid, et al. 2007).

Este dispositivo apresenta um poder de resolução maior em relação ao microscópio óptico convencional, e é mais indicado para pesquisas com foco em análise de imagens de ordem macroscópica, dada a profundidade da análise do MEV, na ordem de um aumento de 10.000 vezes.

Conforme observado através dos trabalhos de Capelin, et al. (2020) e Souza, et al. (2017), a técnica de MEV é amplamente empregada como método investigativo quando se trata da incorporação de fibras na matriz cimentícia. Os autores Amorim; de Melo; de Paiva Júnior, e DE DEUS, (2018), também utilizaram a microscopia eletrônica de varredura como ferramenta para a caracterização de fibras de sisal para avaliar a viabilidade de sua utilização. Na Figura 10 (a), extraído do artigo de Capelin, et al. (2020) podemos ver a fibra de coco *in natura* com ampliação de 1000x e na Figura 10 (b) vemos a mesma fibra inserida em traço de argamassa também com ampliação de 1000x, o objetivo da análise dos autores em questão foi avaliar os efeitos das fibras de coco nas propriedades de argamassas cimentícias, utilizando, entre outros métodos, a microscopia eletrônica de varredura.

Com o estudo realizado, no que se refere a análise realizada por MEV, concluiu-se que houve uma falta de ligação entre a matriz cimentícia e a fibra de coco, pois a mesma não aderiu de forma efetiva ao material cimentício. Também foi observada uma provável interferência da fibra na propriedade de hidratação do cimento, trazendo como consequência uma maior fragilização da argamassa na interface fibra-matriz.

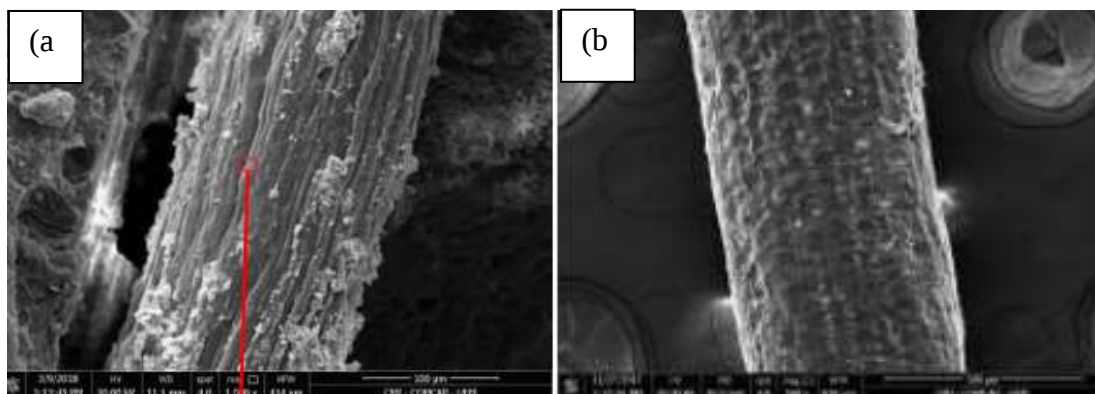


Figura 10 – (a) MEV da fibra de coco *in natura* com magnificação de 1000X; (b) MEV da argamassa com fibra de coco com magnificação de 1000X (Capelin, 2020)

Seguindo a mesma linha investigativa, este trabalho também irá empregar a técnica de MEV em ambiente de baixo vácuo para analisar a dispersão e morfologia das fibras na matriz cimentícia do traço padrão deste estudo.

## 2.8 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS

Através do estudo das propriedades mecânicas pode-se definir o comportamento do material quando sujeito a esforços físicos. Essas definições estão relacionadas à capacidade do material resistir ou transmitir esforços aplicados sem se romper ou deformar-se de maneira incontrolável (HIBBELER, 2010). Dentre essas propriedades, serão abordadas de maneira teórica e sucinta as principais e de maior necessidade para o entendimento deste artigo, que são:

- Ensaio de tração
- Tensão
- Deformação
- Gráfico de tensão-deformação
- Energia de deformação
- Propriedades mecânicas das matrizes cimentícias

### 2.8.1 Ensaio de tração

Devido a necessidade de conhecer as propriedades dos materiais, foram desenvolvidos diversos tipos de ensaios para determiná-las. A maioria das propriedades mecânicas estão interligadas, por meio da composição química, arranjo microestrutural ou processo de fabricação. Assim, é possível estimar algumas propriedades conhecendo outras. O ensaio de tração é um dos mais completos (SERIGHELLI; TURRA; JOSÉ, 2016).

De acordo com Beer (2011), o ensaio de tração é empregado como uma forma de quantificar a resistência mecânica de um determinado material. Também é utilizado para avaliar visualmente, através dos resultados gráficos, como o material se comporta quando submetido a esse tipo de solicitação física e assim, avaliar sua melhor e mais segura aplicação.

Este ensaio consiste na aplicação de uma força crescente, em um corpo de prova padronizado, promovendo a deformação do material na direção do esforço (Figura 11), que tende a alongá-lo o máximo possível até fraturar. Devido a facilidade de execução e reprodutibilidade dos resultados, esse ensaio é amplamente utilizado. Com ele é possível determinar o gráfico de tensão deformação e medir as principais propriedades do material analisado (BIOPDI, 2016).



Figura 11 – Representação de um ensaio de tração (BIOPDI, 2016)

### 2.8.2 Tensão

Segundo com Hibbeler (2010), de forma generalista, pode-se descrever tensão como a intensidade da força interna sobre um plano específico (área) que passa por um ponto, em outras palavras, define-se tensão como força por unidade de área. Esse valor é calculado através da Equação 1:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Onde,

$\sigma$  = Tensão;  $F$  = Força e  $A$  = Área

### 2.8.3 Deformação

Quando uma força é aplicada a um corpo, ocorre uma mudança na forma e no tamanho dele. Essas mudanças são denominadas deformações e podem ser demasiadamente visíveis ou praticamente imperceptíveis se não forem utilizados equipamentos que façam medições precisas (HIBBELER, 2010).

Segundo Beer (2011), para determinar a distribuição real das tensões dentro de um componente, é necessário analisar as deformações que ocorrem naquele componente. Essa deformação então é tida como uma grandeza adimensional e representa um valor médio específico tomado sobre a extensão do segmento observado. É usual também representar o valor da deformação como “ $\epsilon$ ”.

Utilizando um exemplo elaborado pelo Centro de Informação Metal Mecânica (CIMM), (2022), para melhor entendimento, considera-se um corpo simples em forma de viga engastada (impedida de executar movimentos de rotação e translação) submetida a uma carga de tração  $F$ , onde se desprezam os efeitos do peso próprio (Figura12).

Dessa forma, sejam  $P_0$  e  $Q_0$  dois pontos marcados sobre a peça antes do carregamento, a uma distância  $l_0$  um do outro. Após o carregamento os pontos estarão nas posições  $P_f$  e  $Q_f$ , significando que o segmento original aumentou um valor  $\Delta l$ .

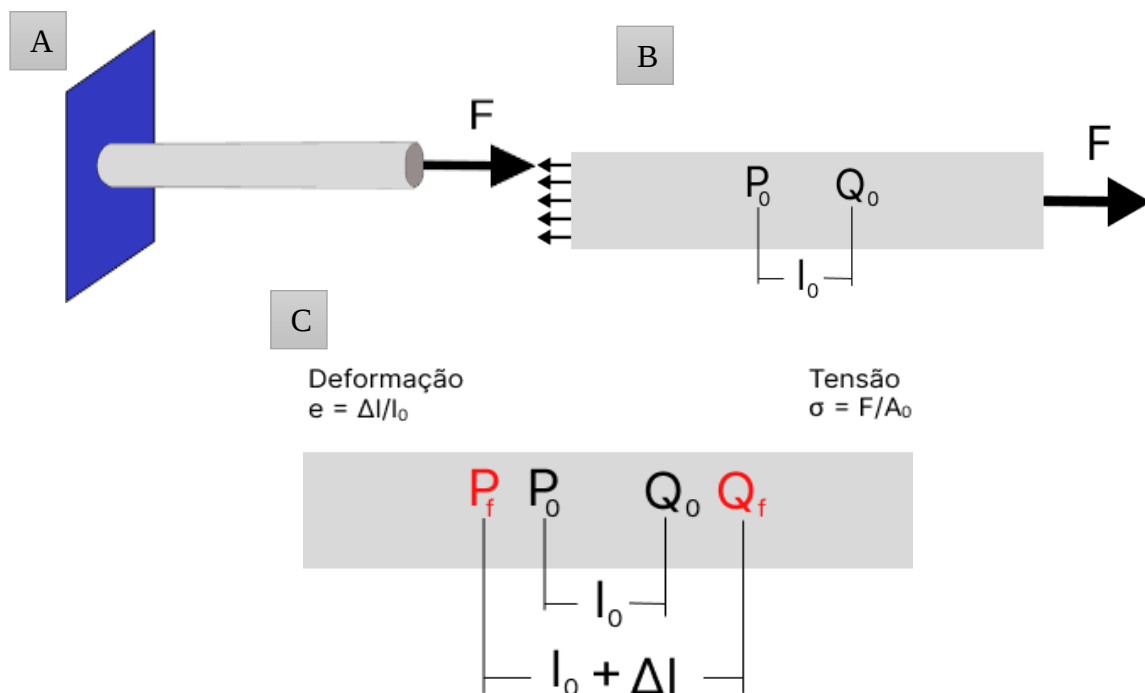


Figura 12 – Modelo de viga engastada; (a) Submetida a força de tração  $F$ ; (b) Representação das distâncias entre pontos; (c) Representação das distâncias entre pontos após carregamento (A autora, 2022).

### 2.8.4 Gráfico de tensão-deformação

De acordo com Hibbeler (2010), por meio dos dados obtidos em um ensaio de tração, é possível calcular os valores da tensão e da deformação correspondentes no corpo de prova e, então, construir um gráfico com esses resultados. Se os valores correspondentes de tensão ( $\sigma$ ) e deformação ( $\epsilon$ ) forem marcados em um gráfico no qual a ordenada é a tensão e a abscissa é a deformação, a curva resultante é denominada “diagrama tensão-deformação” (BEER, 2011).

Um dos elementos mais examinados no ensaio de tração é o aço, devido às suas características de resistência contra esse tipo de esforço. No demonstrativo da Figura 13, retirado do livro de Hibbeler (2010), observa-se um diagrama característico para um corpo de prova de aço obtido através do ensaio de tração, onde, através da curva resultante pode-se identificar quatro regiões diferentes de comportamento do material dependendo do grau de deformação nele induzido. Essas regiões são: região elástica, escoamento, endurecimento por deformação e estricção. Sendo a primeira pertencente ao comportamento elástico e as demais ao comportamento plástico. Esse gráfico será utilizado para exemplificar o comportamento de um material submetido a um ensaio de tração.

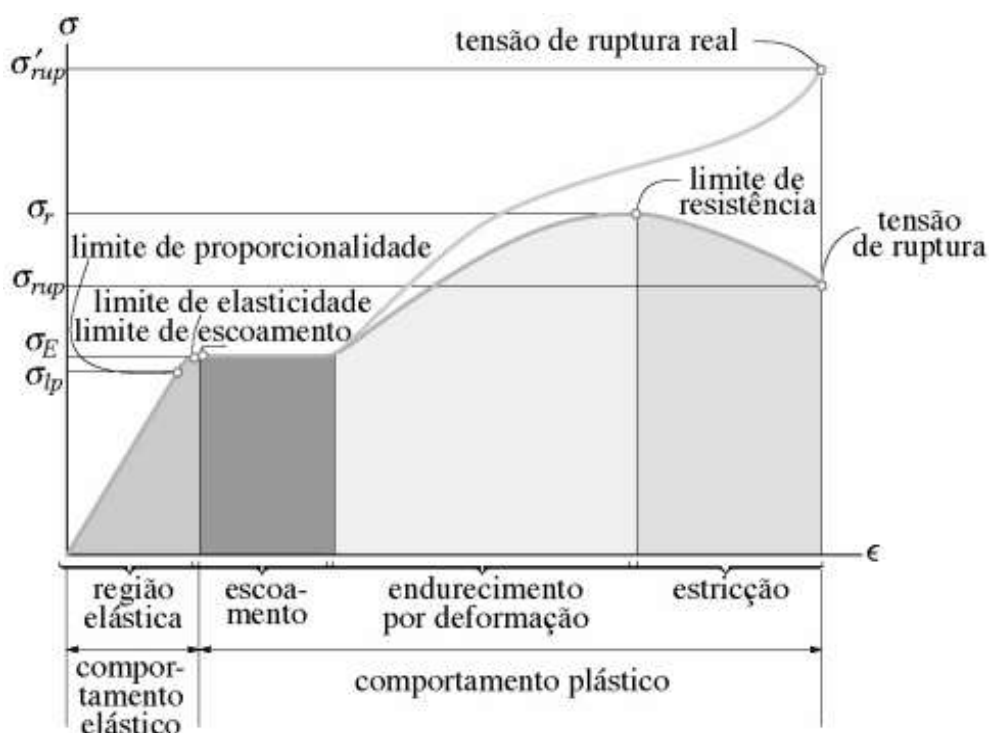


Figura 13 – Diagrama de tensão-deformação convencional para um material dúctil (aço) (HIBBELER, 2010)

#### 2.8.4.1 Comportamento elástico

O comportamento elástico do material ocorre quando as deformações no corpo de prova estão dentro da primeira região mostrada na figura 13, a região elástica. Onde a tensão é proporcional a deformação, caracterizando o material como linearmente elástico. O limite superior da tensão nessa relação linear é denominado limite de proporcionalidade ( $L_p$ ) (HIBBELER, 2010).

Como demonstrado por Hibbeler (2010), o limite de proporcionalidade é o limite ao qual a tensão aplicada não é mais proporcional ao alongamento, ou seja, o material não apresenta mais linearidade. Se a tensão ultrapassar ligeiramente esse limite, o material ainda pode responder de maneira elástica, entretanto, a reta do gráfico tende a encurvar-se e achatar-se, isso continua até a tensão atingir o limite de elasticidade. Vale ressaltar que ao atingir esse ponto, se a carga for removida o corpo de prova ainda voltará a sua forma original. Em alguns casos, como no do aço, raramente é possível determinar o limite de elasticidade, visto que está muito próximo do limite de proporcionalidade.

#### 2.8.4.1 Comportamento plástico

A primeira região do comportamento plástico é chamada de escoamento. Quando há um pequeno aumento na tensão acima do limite de elasticidade o material passa a se deformar de maneira permanente. Esse comportamento é indicado a partir da segunda região da curva da Figura 13. A tensão que causa o escoamento é chamada de tensão de escoamento ( $\sigma_e$ ) ou ponto de escoamento e a deformação que ocorre é denominada deformação plástica (HIBBELER, 2010)

Na segunda região do comportamento plástico, como demonstrado na Figura 13, pode-se citar o endurecimento por deformação, o qual é caracterizado pelo crescimento da curva à medida em que o escoamento termina e aplica-se uma carga adicional ao corpo de prova. Essa curva tem um crescimento contínuo, mas torna-se mais achatada ao atingir uma tensão máxima denominada como limite de resistência ( $\sigma_r$ ) (BEER, 2011).

A terceira região do gráfico representado na Figura 13 é chamada de endurecimento por deformação, e ocorre de forma uniforme ao longo de todo o comprimento do corpo, enquanto este se alonga à medida que sua seção transversal diminui (HIBBELER, 2010).

A partir da região de endurecimento por deformação, ao ultrapassar o ponto denominado limite de resistência, a área da seção transversal começa a diminuir, porém, em uma região localizada do corpo de prova e não em todo o seu comprimento. Essa diminuição gradativa em uma região específica à medida em que o corpo de prova se alonga é chamada de “constricção” ou “estricção”, demonstrada na quarta região da Figura 13 e exemplificada na Figura 14.

Com o decréscimo dessa área, o corpo de prova tende a suportar cada vez menos carga. Nesse cenário, o diagrama tensão-deformação passa a curvar-se para baixo até o corpo de prova quebrar, ou seja, até o mesmo não suportar mais carga e atingir sua tensão de ruptura ( $\sigma_{rup}$ ) (HIBBELER, 2010).



Figura 14 - Exemplo de estrição em barra de aço (HIBBELER, 2010)

#### 2.8.4.2 Materiais dúcteis

De maneira geral, os materiais podem ser considerados como dúcteis ou frágeis, a depender das suas características no diagrama de tensão x deformação. Tendo como base as regiões do gráfico anteriormente explicadas, sabe-se que os materiais dúcteis são aqueles que possuem a capacidade de sofrer grandes deformações antes de se romper, quando submetidos a esforços. Tal deformação pode ser medida através da porcentagem de alongamento, ou da porcentagem de redução de área (HIBBELER, 2010).

Os materiais considerados dúcteis, são frequentemente utilizados dentro da construção civil para absorver esforços de tração e utilizar da sua propriedade de ductilidade para se deformar (escoar) antes de romper, evitando rupturas abruptas que seriam desastrosas no âmbito da engenharia. O principal exemplo de material dúctil utilizado na construção civil é o aço, devido as suas características de ductilidade, as quais acabam complementando materiais deficientes dessa propriedade, como o concreto e os demais compósitos de matriz cimentícia (BEER, 2011).

### 2.8.4.3 Materiais frágeis

Os materiais frágeis, ao contrário dos materiais dúcteis são denominados assim por apresentarem um comportamento oposto quando sujeitos a tensões. A ruptura desses materiais acontece de forma quase que abrupta por apresentarem pouco ou nenhum escoamento antes da falha (TOLEDO, 2010).

Comumente, esse tipo de material possui as suas propriedades de resistência a compressão (força contrária à tração) muito maiores que a sua resistência a tração, como é o caso do concreto, por esse motivo o concreto reforçado com barras de aço (concreto armado) é um dos materiais de construção mais utilizados, dada a sua flexibilidade, e por apresentar-se como um material completo quanto as propriedades de compressão e tração (TOLEDO, 2010).

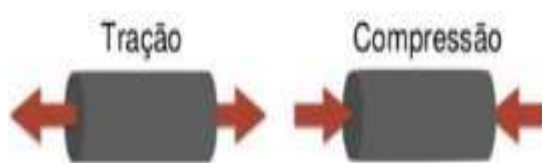


Figura 15 – Representação de forças de tração e compressão (TOLEDO, 2010).

### 2.8.4.4 Lei de hooke e módulo de elasticidade

A partir das observações do diagrama de tensão-deformação, surge a lei de Hooke. Robert Hooke observou que para a maioria dos materiais existe uma relação linear entre tensão e deformação dentro da região elástica e que por consequência, um aumento na tensão provoca um aumento proporcional na deformação. A Equação 2 demonstra como essa lei pode ser expressa matematicamente:

$$\sigma = E * \varepsilon \quad (2)$$

Onde:

$\sigma$  = Tensão;  $\varepsilon$  = Deformação e  $E$  representa a constante de proporcionalidade conhecida como módulo de elasticidade, a qual é uma das propriedades mais importantes utilizadas para o desenvolvimento de equações básicas da engenharia. No entanto, tanto a expressão numérica da lei de Hooke como o módulo de elasticidade, só podem ser aplicados na região linear-elástica dos materiais, pois estão relacionados a relação proporcional de tensão e deformação (ARANHA, et al, 2016).

De acordo com Santos (2017), o módulo de elasticidade ( $E$ ) é uma propriedade mecânica que indica a rigidez de um material, consequentemente, materiais muito rígidos, como o aço,

possuem grandes valores de “ $E$ ”, entretanto, materiais esponjosos como a borracha vulcanizada possuem valores mais baixos dessa grandeza. De acordo com Hibbeler (2010), esse valor pode ser obtido através da manipulação da expressão numérica da lei de Hooke, como demonstrado na Equação 3.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3)$$

Onde,

$E$  = Módulo de Elasticidade;

$\sigma$  = Tensão e

$\varepsilon$  = Deformação.

### 2.8.5 Energia de deformação

Por definição, energia é a capacidade de produzir trabalho, ou seja, energia é o trabalho gerado durante a aplicação de uma força em um corpo, o qual se deformará a uma distância e em uma certa direção. O produto de força e distância é o trabalho interno de um corpo sob ação externa, e este trabalho é armazenado como energia de deformação ( $U$ ) (MASCIA, 2021).

De acordo com Beer (2011), quando um material sofre deformação devido a aplicação de uma carga externa, tende a armazenar energia internamente, em todo o seu volume. Essa energia armazenada é denominada energia de deformação, pois está relacionada com as deformações no material. O conceito de energia de deformação é particularmente útil na determinação dos efeitos de forças de impacto sobre estruturas ou componentes de máquinas.

#### 2.8.5.1 Resiliência

Resiliência ( $U_r$ ) é a capacidade de um material absorver energia quando deformado elasticamente e devolvê-la quando descarregado o esforço que provocou a deformação. Nessa região, um material recebe tensão e deforma apenas elasticamente, ou seja, não há deformações dimensionais permanentes no corpo, quando a tensão cessar, ele volta ao seu estado inicial (HIBBELER, 2010).

O valor absoluto relacionado a resiliência do material, conhecido como módulo de resiliência, pode ser obtido através da integral da área sob a curva do gráfico de tensão-deformação, porém, apenas na região elástica, pois a resiliência está diretamente ligada a capacidade do material se deformar de maneira reversível, como explicado anteriormente

(MASCIA, 2021). Outra maneira de se obter esse valor é através da Equação 4, retirada do livro de Hibbeler (2010):

$$U_r = \frac{1}{2} \sigma_{lp} \varepsilon_{lp} \quad (4)$$

Onde:

$U_r$  = Energia de resiliência ou módulo de resiliência

$\sigma_{lp}$  = Tensão no limite de proporcionalidade

$\varepsilon_{lp}$  = Deformação no limite de proporcionalidade

#### 2.8.5.2 Tenacidade

Para Callister (2009), tenacidade é definida como a energia absorvida por um material até a sua ruptura, envolvendo a energia gasta com deformações elásticas (reversível, sem deslocamentos permanentes após o reforço mecânico) e plásticas (quando ocorre mudança dimensional permanente). Outra definição aceita é a de Figueiredo (2011), o qual explica que tenacidade é a área sob a curva do gráfico de tensão-deformação, que representa o trabalho dissipado no material.

Segundo Pimentel, et al. (2016), tenacidade é uma importante característica para os materiais compósitos, principalmente os que são constituídos por fibras, sendo geralmente aceito que um dos principais papéis desempenhados pelas fibras é prover tenacidade às matrizes frágeis. Ou seja, um material tenaz, quando aplicado em uma matriz com características de fragilidade, contribui para a maior absorção de energia, podendo assim, retardar sua ruptura.

#### 2.8.6 Comportamento mecânico das matrizes cimentícias

As matrizes cimentícias possuem uma composição básica formada por cimento e água, geralmente acrescido de agregado miúdo e agregado graúdo. O cimento adicionado à água forma a pasta de cimento, quando se acrescenta o agregado miúdo, tem-se a argamassa e ao empregar-se nessa mistura o agregado graúdo, forma-se o concreto (BASTOS, 2019).

Essas composições acabam atribuindo à matriz uma propriedade de fragilidade típica de materiais cerâmicos e, conseqüentemente, fornece baixos valores para a resistência a tração, o que leva a necessidade de reforçar o material para esse tipo de esforço. Por outro lado, propicia uma alta resistência a compressão, o que a torna extremamente útil para o uso na construção civil (BASTOS, 2019).

Ao analisar o gráfico tensão-deformação para um ensaio de tração, Figura 16, é possível comparar o comportamento de materiais frágeis, como os provenientes de matrizes cimentícias (como o concreto) com os materiais dúcteis, explicados anteriormente, e perceber suas diferenças. O material frágil não é capaz de obter uma região significativa de deformação ao ultrapassar seu limite de proporcionalidade, por isso, sua ruptura vem logo após a deformação elástica (JÚNIOR; SILVA, 2017).

Assim, sabe-se que a tenacidade equivale à área sob a curva do gráfico, ou seja, quanto maior a curva, mais energia o material é capaz de absorver durante a aplicação de uma força e, consequentemente, mais tardia será sua ruptura. Como os materiais frágeis não possuem essa característica de alongamento de curva, torna-se evidente sua deficiência quanto a propriedade mecânica de tenacidade, sendo este um material não tenaz ou pouco tenaz. Em contrapartida, o material frágil, mesmo com uma área de deformação consideravelmente menor, quando comparado com os materiais dúcteis, o mesmo pode suportar tensões mais elevadas antes de chegar a sua ruptura. (BEER, 2011).

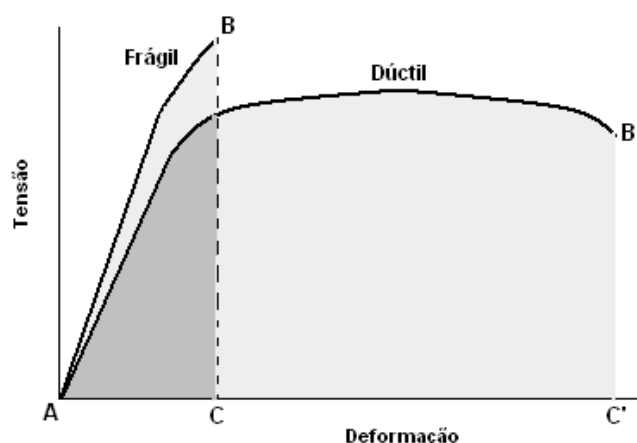


Figura 16 – Gráfico tensão-deformação para materiais frágeis e dúcteis (CALLISTER, 2009)

### 2.8.7 Comportamento mecânico de fibra têxtil

De acordo com Venigalla, et al. (2022), as fibras naturais feitas de produtos de origem animal não são aplicáveis no campo da construção, enquanto as fibras produzidas à base de plantas podem ser usadas até certo ponto por tratamento químico. As fibras mais adequadas e comumente usadas em estruturas de engenharia são as fibras sintéticas por causa de suas propriedades mecânicas aprimoradas e natureza estável. As fibras sintéticas normalmente têm melhores propriedades mecânicas, como maior resistência à tração e módulo de elasticidade em comparação com as fibras naturais, tornando-as preferíveis para uso em aplicações estruturais.

Sobre o comportamento mecânico das fibras têxteis, algumas regras práticas derivadas da mecânica podem ditar as propriedades preferenciais dos têxteis para uso em matrizes de cimento. Por exemplo, é desejável trabalhar-se com têxteis que possuem módulo elástico relativamente alto, bem como alta resistência. Características que, de acordo com Venigalla, et al. (2022), são comuns dentre algumas fibras têxteis já estudadas, como as fibras de algodão, linho e poliéster, por exemplo. O módulo elástico e a resistência da fibra, dependem também do seu processo de produção. Ou seja, um mesmo material pode resultar em fibras tanto de alta quanto de baixa resistência a depender do seu processo de fabricação. Dessa forma, sabendo-se que, de acordo com Borsoi, et al. (2011), o processo de entrelaçamento dos fios aumenta a sua resistência a tração, conclui-se que, um mesmo fio, pode possuir resistências diferentes quando entrelaçados ou não.

Um conjunto de fibras combinadas entrelaçadas e usadas para costurar, tecer ou tricotar é chamado de fio. Um único fio é chamado de filamento e, quando combinado em milhares, é chamado de mecha. O principal problema com o uso de têxteis diretamente como reforço é sua fraca aderência ao concreto o que proporciona um comportamento mecânico ineficiente quando agregado a matriz cimentícia. Para melhorar a aderência dos fios na matriz, três técnicas de fabricação foram desenvolvidas: fios trançados, fiados por fricção e fios misturados (NAAMAN, 2010). Tendo conhecimento dessas informações, ressalta-se que, as fibras analisadas nesse trabalho são constituídas de fios de poliéster e elastano, os quais são trançados entre si, o que pode resultar em uma melhor aderência junto a matriz cimentícia. Dessa forma, torna-se necessária a análise da microestrutura da fibra, da sua interação junto a matriz cimentícia, bem como do seu comportamento mecânico quando submetido a esforços de tração, e assim, analisar a aplicabilidade da fibra e seus benefícios.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção do trabalho é descrito os procedimentos e metodologias adotadas nas técnicas investigativas de caracterização física das fibras estudadas, bem como, uma descrição dos procedimentos de preparação do traço padrão de matriz cimentícia e das amostras experimentais enviadas para a caracterização por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

#### 3.1 ENSAIO DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Inicialmente, para se atingir os objetivos propostos no presente trabalho no âmbito do estudo da morfologia e microestrutura da matriz cimentícia com fibras, foi submetida a proposta de pesquisa nº30/2021, Investigação por microscopia eletrônica da durabilidade de fibras a base de poliéster em argamassas e concretos fissurados, no Centro Multiusuário de Nanotecnologia (CMNano) da Universidade Federal de Sergipe, campus São Cristóvão. O CMNano é um laboratório multiusuário institucional que visa atender as necessidades de pesquisa e de serviços tecnológicos em microscopia eletrônica e preparação de amostras para toda comunidade científica e institutos de pesquisa na região e do país. A proposta foi aceita e os experimentos foram executados no equipamento SEM-LV (JSM 6510LV).

Esse modelo de microscópio, é composto por três tipos de componentes básicos: fonte de elétrons, lentes magnéticas e detectores. Os quais conseguem através de sua alta performance caracterizar amostras de maneira rápida e precisa, sendo possível obter imagens de topografia utilizando elétrons secundários (SE), e assim estudar a porosidade, defeitos, contaminações, granulometria, morfologia entre outros aspectos de diversos tipos de materiais. O equipamento também realiza análises qualitativas da composição química de certa região das amostras por meio dos seus detectores.

Foram disponibilizadas para análise de MEV duas amostras distintas, a primeira foi feita com a fibra em seu estado natural após sua preparação prévia em laboratório, mantida em dessecador de sílica por 72 horas antes do ensaio. A amostra de fibra empregada no ensaio de microscopia está representada pelo exemplar da Figura 17.

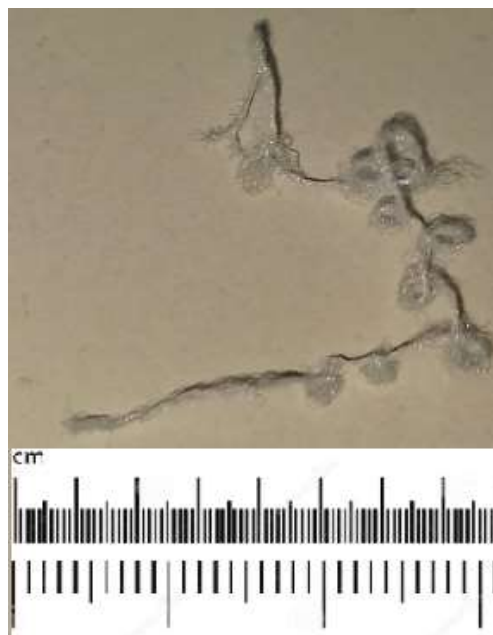


Figura 17 – Disposição da fibra têxtil à base de poliéster e elastano empregada para a análise de microscopia.  
(A autora, 2022).

A segunda amostra, traço de argamassa padrão intitulada de AF100, foi obtida de uma alíquota de um fragmento de 3 cm x 3 cm proveniente do lascamento superficial de um corpo de prova de argamassa em placa (40 cm de largura x 40 cm de comprimento x 3 cm de espessura). O traço da argamassa AF100 é composto por matriz cimentícia e fibras têxtil em proporções de massa descrito na Tabela 2. Este traço foi desenvolvido no trabalho de conclusão de curso da pesquisadora Santos (2021), onde foi analisada a degradação físico-química das fibras à base de poliéster e elastano. Seus resultados, principalmente no aspecto da caracterização química da fibra têxtil de poliéster e elastano, foram tomados como base de pesquisa para este trabalho.

Tabela 2 - Composição do traço padrão do corpo de prova em placa

Traço para um corpo de prova medindo 0,40 m (largura) x 0,40 m  
(comprimento) x 0,03 m (espessura)

| DESCRIÇÃO | CIMENTO (Kg) | AREIA (Kg) | ÁGUA (L) | FIBRA        |
|-----------|--------------|------------|----------|--------------|
| AF100     | 1,608        | 9,647      | 0,804    | 0,10% 12,06g |

Fonte: A autora, 2022.

Como preparação para o ensaio no equipamento, as amostras de microscopia foram dispostas sobre *stubs* metálico cilíndrico, empregado como porta amostras, e fixada em sua base com fita adesiva a base de carbono e posteriormente metalizadas com grãos de ouro para aumentar a resolução espacial da imagem durante os processos de magnificação e varredura da amostra por canhão de elétrons do microscópio. A configuração de working distance (distância entre a superfície da amostra e a arte inferior da lente objetiva) empregada no microscópio foi

de 9 mm ~ 12 mm, operando em modo varredura, tensão de filamento em 10 KV e magnificações variáveis de 75 X a 4000 X.

### 3.2 ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DA FIBRA

Com o objetivo de conhecer os coeficientes mecânicos das fibras deste trabalho, foi realizado um ensaio de tensão-deformação no laboratório de ensaios mecânicos do Grupo de Materiais Compósitos e Nanocompósitos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Para realizar os ensaios nas fibras estudadas, foi necessário construir um porta amostra de suporte de papel para que fosse possível colocá-las estiradas no equipamento de tensão. Foram utilizados mordentes lisos e, ao posicionar as amostras no equipamento, foram realizados cortes nas abas de papel para liberar diretamente o ensaio nas fibras (ver Setup 0 na figura 18).

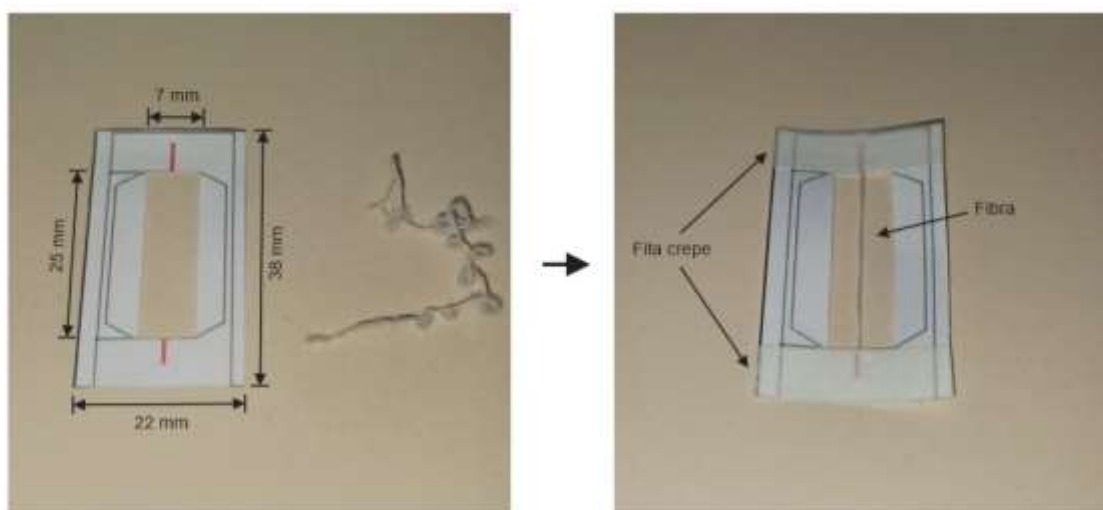


Figura 18 - Layout do setup 0 da disposição do porta amostra concebido para o ensaio de tensão-deformação da fibra (A autora, 2022).

Ao todo foram ensaiadas 16 fibras, de modo que fosse possível obter-se uma maior assertividade nos resultados e consequentemente um menor desvio padrão devido a variação na deformação da fibra. A distância medida entre as garras de acoplamento foi de 25 mm. Os ensaios foram realizados utilizando a taxa de 1,2 mm/min, em um equipamento Emic 23-5D, com célula de carga de 100N, e o porta amostra foi disposto no equipamento conforme Figura 19.

Os arquivos foram coletados em Raw Data o que possibilitou a determinação de informações do módulo de elasticidade, dados das forças de escoamento e ruptura, bem como, determinação de tensões e deformação máxima.

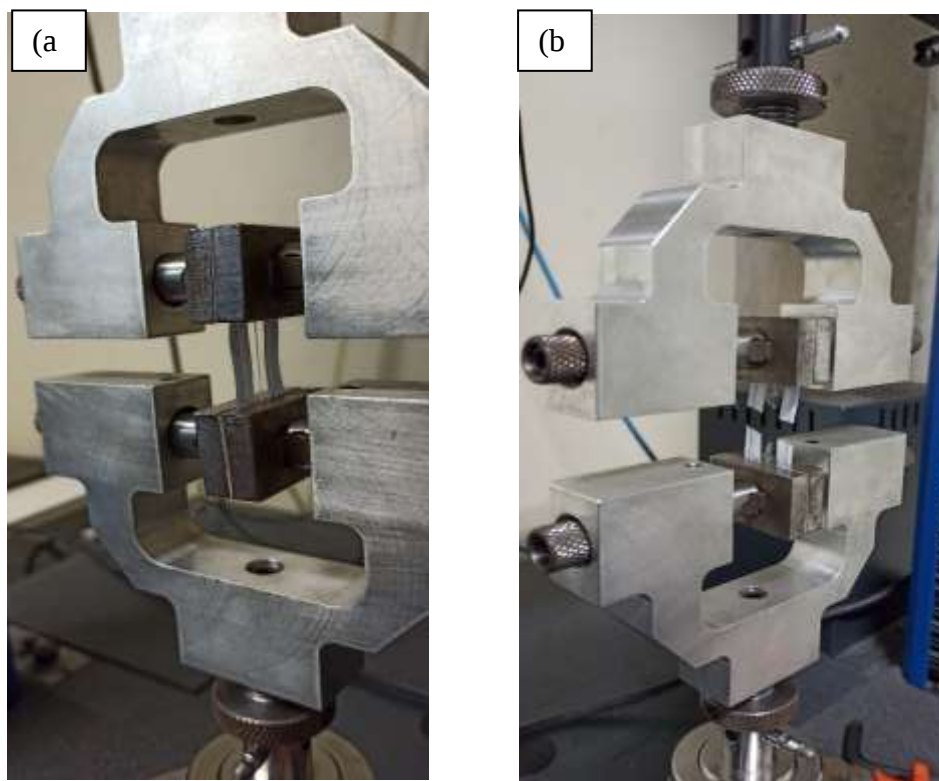


Figura 19 - Disposição do porta amostra contendo a fibra no acessório das garras de tensão do equipamento Emic 23-5D. Em (a) estado inicial, sem deformação das fibras. Em (b) estado de deslocamento final das garras após o seccionamento das fibras. (A autora, 2022).

### 3.2.1 Obtenção do módulo de resiliência, tenacidade e elasticidade das fibras

A partir da energia de deformação oriunda dos esforços aplicados nas fibras durante o ensaio, foi possível obter-se os valores correspondentes aos módulos de tenacidade, resiliência e elasticidade das fibras à base de poliéster e elastano. Para isso, após a análise física da fibra, obteve-se como parte dos resultados 16 planilhas, uma para cada ensaio, com os valores das cargas aplicadas ( $F$ ) e das suas respectivas deformações ( $\epsilon$ ), bem como suas tensões máximas de ruptura. A partir disso, foram criados 16 gráficos de tensão-deformação, um por ensaio, de modo que facilitasse a análise dos resultados e a aplicação dos parâmetros de obtenção de dados de resiliência, tenacidade e elasticidade das fibras.

#### 3.2.1.1 Módulo de resiliência

No diagrama de tensão-deformação resultante do ensaio de tração o ponto referente ao limite de proporcionalidade ( $L_p$ ) possui duas coordenadas,  $\sigma_{Lp}$  (tensão no limite de proporcionalidade) e  $\epsilon_{Lp}$  (deformação no limite de proporcionalidade). Essas coordenadas foram obtidas para os 16 corpos de provas e, através delas, utilizando a Equação 4 foi calculado o módulo de resiliência de cada uma das fibras ensaiadas.

### *3.2.1.2 Módulo de tenacidade*

O módulo de tenacidade ( $ut$ ), é obtido a partir da curva do diagrama de tensão-deformação, comumente calculado através da integral dessa curva, pelo somatório das áreas de figuras geométricas conhecidas (método aproximado) ou por meio de softwares (método mais preciso). Para o presente trabalho, foi utilizado o programa ORIGIN PRO 2022b, versão teste de estudante, um software gráfico para análise de dados estatísticos. Onde foram obtidos os valores resultantes das integrais das áreas dos 16 ensaios.

### *3.2.1.3 Módulo de elasticidade*

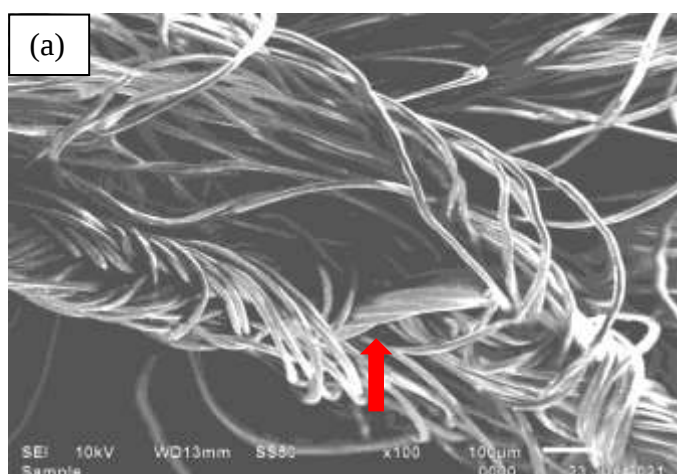
Como descrito no item 2.8.4.4, o módulo de elasticidade deve ser calculado na fase linear da região elástica do gráfico de tensão-deformação, essa fase é delimitada no ponto denominado limite de proporcionalidade ( $L_p$ ), dessa forma, tomou-se os valores correspondentes à tensão e a deformação nesse ponto do gráfico para as 16 fibras ensaiadas e aplicou-os à Equação 3, assim obtendo-se o módulo de elasticidade de cada um dos fios.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico serão abordados os resultados obtidos no decorrer do trabalho, através das imagens produzidas por meio da microscopia eletrônica de varredura e da caracterização mecânica das fibras a base de poliéster e elastano.

### 4.1 MICROSCOPIA ELETRONICA DE VARREDURA (MEV)

Através da análise microscópica das fibras têxtil, foi possível conhecer a morfologia da fibra investigada e como ela se comporta quando inserida em uma matriz cimentícia. Na primeira imagem da Figura 20, pode-se perceber que a fibra têxtil é composta por duas fibras. A primeira são fios de poliéster entrelaçados e a segunda é um cordão de elastano de espessura  $\sim 100\ \mu\text{m}$ , conforme indicação na Figura 20-(a), entrelaçado e organizado entre os fios de poliéster. Na mesma imagem de microscopia, Figura 20-(b), é possível perceber que alguns fios de poliéster estão desarranjados e dispersos, evidenciando uma maior desorganização física desse material quando o cordão de elastano está ausente. Aparentemente, pressupõe-se que o cordão de elastano unifica os fios de poliéster, mantendo o trançado helicoidal dos fios de poliéster com a unidade da fibra têxtil. Já na segunda imagem percebe-se a dispersão espacial das fibras inseridas dentro matriz cimentícia, os *clusters* da matriz cimentícia estão envoltos de fibras para a amostra de argamassa do traço AF100 analisado.



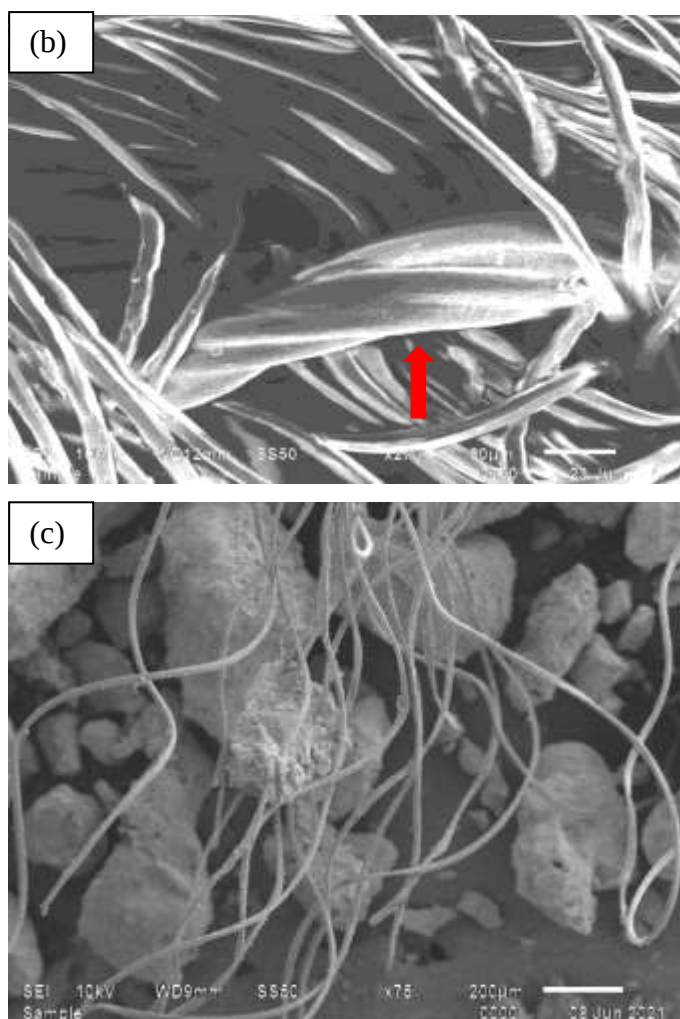
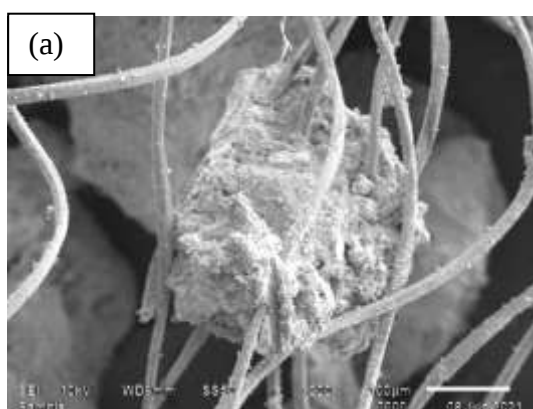


Figura 20 – (a) imagem de microscopia da fibra *in natura* com magnificação de 100x e sinalização do cordão de elastano, (b) fibra *in natura* com magnificação de 270x e (c) Microscopia das fibras dispersas em matriz cimentícia com magnificação de 76x. (A autora, 2022).

Uma análise mais detalhada da microscopia da Figura 20-(c), percebe-se que os *clusters* da matriz cimentícia são penetrados por fios de poliéster, isso sugere que há uma ótima sinergia microscópica entre a fibra têxtil empregada e a micro estrutura da matriz cimentícia. Já no compilado de imagens demonstradas na Figura 21, observa-se de maneira mais clara a união micrométrica da matriz cimentícia com a fibra e seus fios de poliéster.



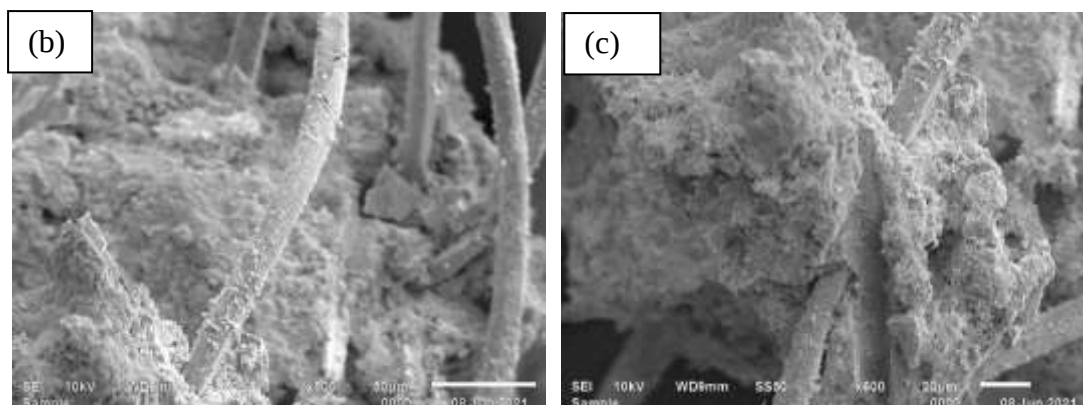


Figura 21 – Imagem de microscopias da fibra na matriz cimentícia (a) com magnificação de 200x (b) com magnificação de 500x (c) com magnificação de 600x. (A autora, 2022).

Essa sinergia da fibra com a microestrutura da matriz cimentícia pode ser explicada por alguns motivos: (i) sabe-se que o traço utilizado neste estudo é composto por cimento, agregado miúdo (areia fina) e água, acrescidos da fibra têxtil de poliéster e elastano. Durante a mistura, o cimento naturalmente passa pelo seu processo químico de hidratação, uma reação de expansão térmica que inicia a fase de endurecimento. Neste cenário os grãos de cimento aglutinam-se com os grãos de areia e moléculas de água e concorrem fisicamente com as fibras pelos espaços vazios no corpo de prova de moldagem do traço. Com esta hipótese as fibras são confinadas dentro da matriz pelo endurecimento e solidificação da argamassa dentro do corpo de prova de moldagem. O fator de confinamento espacial potencializa a ligação direta entre fibra e a matriz; (ii) Além disso, também é preponderante para essa conexão, o fato de as fibras inseridas no traço de argamassa AF100 estarem no estado entumecido, as fibras são embebidas na água por até 20 horas conforme descrito na seção 2.6.3 deste trabalho.

Devido a esta metodologia de preparação do traço, as fibras possuem um gradiente positivo de moléculas de água em seus interstícios devido ao processo prévio de hidratação dos filamentos da fibra, esse fator acaba favorecendo a nucleação *in situ* e coalescência de grãos aglutinantes de cimento + agregado miúdo, e assim, formando *clusters* nos interstícios entre os fios de poliéster durante o processo de pega e endurecimento da argamassa. Neste concerne, ao longo dos diversos processos físico-químicos envolvidos na pega e formação de fases cristalinas da argamassa, os grãos iniciais da matriz cimentícia sofrem nucleação dentro dos interstícios dos fios de poliéster e que através do processo de coalescência granular, que é a união dos grãos, a matriz cimentícia envolve os diversos fios de poliéster da fibra conforme demonstrado na figura 21-(a).

Essa interação micrométrica entre fibra-matriz cimentícia forma uma ligação física que é favorecida por ranhuras formadas na superfície dos fios de poliéster inseridos no traço de argamassa investigado. A Figura 14 com diferentes magnificações de microscopia, evidencia escamação e micro ranhuras na superfície dos fios de poliéster que podem estar atreladas a uma degradação superficial sofrida pelos fios de poliéster provocada por pH básico da argamassa, próximo a 13 (treze) (LACHOVICZ, 2020). Este fenômeno de degradação superficial de fibras a base de poliéster, corrobora com os estudos físico-químicos realizados nos trabalhos de Santos, (2021) e Betiole e Silva (2005), este último específicos para fibras de polietileno (PET), onde as fibras foram dispostas em diversas soluções agressivas com pH ácido e básico que simulam o ambiente químico da argamassa/concreto, tais como a solução de Lawrence (0,46 g/L de  $\text{Ca(OH)}_2$  + 3,45 g/L de KOH + 0,88 g/L de NaOH) (ROLIM, 2010) que se aproxima das condições alcalinas encontradas nas argamassas e concretos. Os resultados de Betiole e Silva (2005) apontaram uma leve degradação superficial da fibra de polietileno (PET) quando expostas a solução Lawrence aquecida a 50° C, enquanto que os resultados de FT-IR (espectroscopia no infravermelho por Transformada de Fourier) de Santos (2021) revelaram que a solução de Lawrence promoveu uma degradação molecular da fibra a base de poliéster do traço AF100, com sutil degeneração da cadeia manométrica das cadeias de hidroxila (OH) e estiramento da ligação C=O.

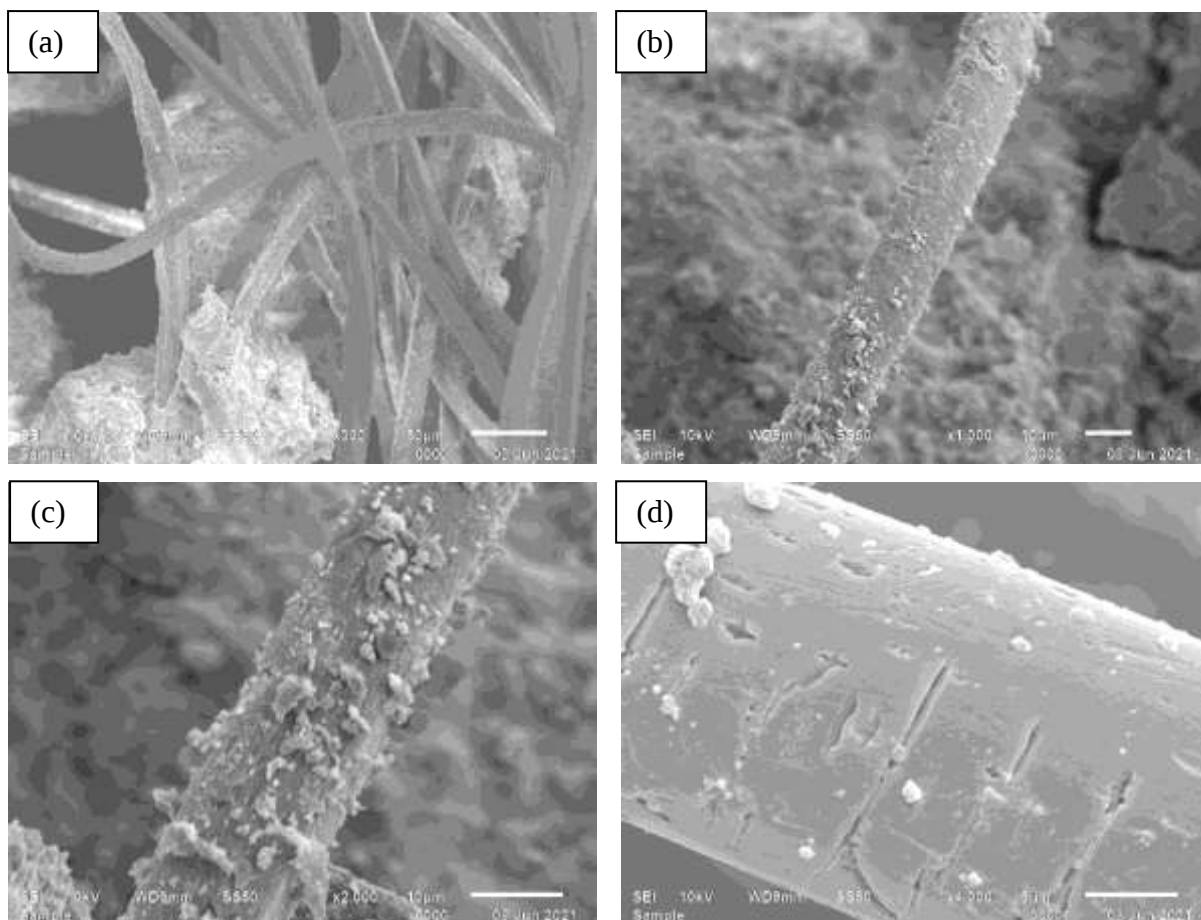


Figura 22 – microscopia da fibra envolta por matriz cimentícia (a) com magnificação de 330x (b) detalhe do fio de poliéster com magnificação de 1000x, (c) com magnificação em região de 2000x e (d) com magnificação de região da fibra de 4000x. (A autora, 2022).

Conforme evidenciado nas microscopias da figura 22- (b) e (c), uma análise mais detalhada da morfologia revela que o fio de poliéster possui espessura de 10  $\mu\text{m}$  e está recoberto por grãos dispersos sobre a superfície. Estes grãos podem ser provenientes da precipitação de fases minerais da matriz cimentícia ao longo do processo de pega e endurecimento do traço de argamassa. Já a figura 22 (d) com magnificação de 4000X evidencia as micro ranhuras superficiais no fio de poliéster geradas pela degradação do meio ambiente químico da matriz cimentícia. Como dito, estas ranhuras aumentam a área superficial de contato entre fibra e matriz com incremento do atrito de interface e, assim, beneficia a formação de micro pontes de transferência de tensão por atrito entre o compósito (matriz cimentícia) e a fase dispersa dos fios de poliéster. Através dos dados microscópicos analisados e aqui apresentados foram observadas algumas características positivamente peculiares das fibras. Mediante esses resultados promissores, fez-se necessário entender com maior profundidade as características mecânicas desse material estudado, e assim, analisar outras possíveis propriedades favoráveis para seu emprego na construção civil como método de reforço de matrizes cimentícias.

Portanto, na próxima seção, serão abordados os resultados obtidos dos ensaios de tensão e deformação da fibra à base de poliéster e elastano empregada na matriz cimentícia no traço de argamassa apresentado nesse estudo.

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS FIBRAS

Através do ensaio de caracterização mecânica descrito no item 3.2 do presente trabalho, foi possível obter-se dados relacionados as propriedades físicas das fibras à base de poliéster e elastano. A seguir serão apresentados os resultados provenientes da análise dessas propriedades.

### 4.2.1 Propriedades mecânicas das fibras à base de poliéster e elastano

Após a aquisição dos dados planilhados oriundos do ensaio mecânico, utilizando o programa ORIGIN PRO 2022b, versão teste de estudante, foram elaborados gráficos de tensão-deformação para os 16 fios de fibras ensaiadas (Figura 23).

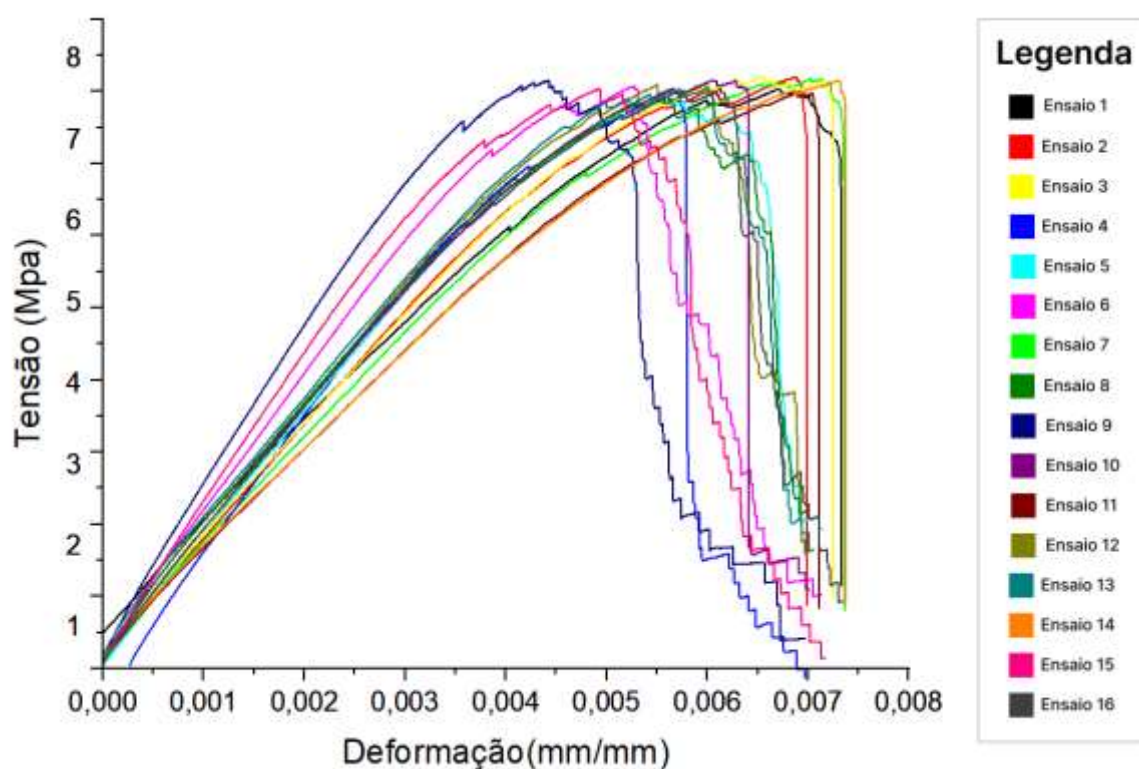


Figura 23 – Gráficos de tensão-deformação resultante da análise física dos 16 ensaios de fibra (A autora, 2022)

Como pode ser observado no gráfico da Figura 23, as fibras analisadas possuem comportamento semelhante, principalmente em relação as tensões máximas, as quais estão entre 7~8 Mpa para todas as fibras ensaiadas, o que demonstra um padrão de resistência entre elas quase que constante. Porém, algumas diferenças também são evidenciadas, como o as

deformações sofridas pela fibra ao longo do ensaio, observa-se que algumas conseguem ter uma deformação mais alongada, como a fibra do ensaio nº 14, que representa um alongamento de ~29% do comprimento longitudinal inicial, enquanto outras atingem sua tensão de ruptura mais precocemente, ou seja, possuem um nível de deformação menor, como a fibra nº 9, que obteve um alongamento máximo de ~23%, valores que podem ser visualizados no Quadro 2. Uma possível explicação para esse comportamento é o fato de que a fibra possui filamentos entrelaçados entre si, os quais rompem-se de maneira não uniforme, cada filamento possui um comportamento único e à medida em que a fibra desfia, perde resistência e rompe-se quando atinge sua tensão máxima de ruptura, esse processo de desfiação da fibra durante a aplicação da força no ensaio, torna a sua deformação inconstante, e com um nível de variação relativamente alto.

| ENSAIO                     | DESLOCAMENTO<br>MÁXIMO<br>(mm) | DEFORMAÇÃO<br>MÁXIMA<br>(%) |
|----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| 1                          | 6,69                           | 26,76%                      |
| 2                          | 7,32                           | 29,26%                      |
| 3                          | 7,03                           | 28,10%                      |
| 4                          | 6,62                           | 26,50%                      |
| 5                          | 6,26                           | 25,04%                      |
| 6                          | 6,60                           | 26,38%                      |
| 7                          | 6,15                           | 24,62%                      |
| 8                          | 6,72                           | 26,90%                      |
| 9                          | 6,63                           | 26,54%                      |
| 10                         | 6,45                           | 25,78%                      |
| 11                         | 6,02                           | 24,09%                      |
| 12                         | 5,93                           | 23,71%                      |
| 13                         | 6,39                           | 25,55%                      |
| 14                         | 6,83                           | 27,34%                      |
| 15                         | 6,78                           | 27,14%                      |
| 16                         | 6,90                           | 27,61%                      |
| <b>MÉDIA</b>               | <b>6,58</b>                    | <b>26,33%</b>               |
| DESVIO PADRÃO              | 0,37                           | 1,48%                       |
| COEFICIENTE DE<br>VARIAÇÃO | 5,62%                          | 5,62%                       |
| VALOR MÁXIMO               | 7,32                           | 29,26%                      |
| VALOR MÍNIMO               | 5,93                           | 23,71%                      |

Quadro 2 – Deslocamentos e deformações máximas obtidas mediante ensaio de tração (A autora, 2022)

Para uma melhor visualização desses resultados obtidos, escolheu-se utilizar o ensaio de tensão-deformação nº 1, por possuir melhor qualidade de traço e maior nitidez quanto aos seus limites e resistências, para que assim pudesse ser elaborado um outro gráfico regionalmente demarcado (Figura 24) com base nas etapas de deformações mecânicas pelas quais um material passa quando submetido a um esforço de tração. Conforme explicado no item 2.8.4 do presente trabalho.

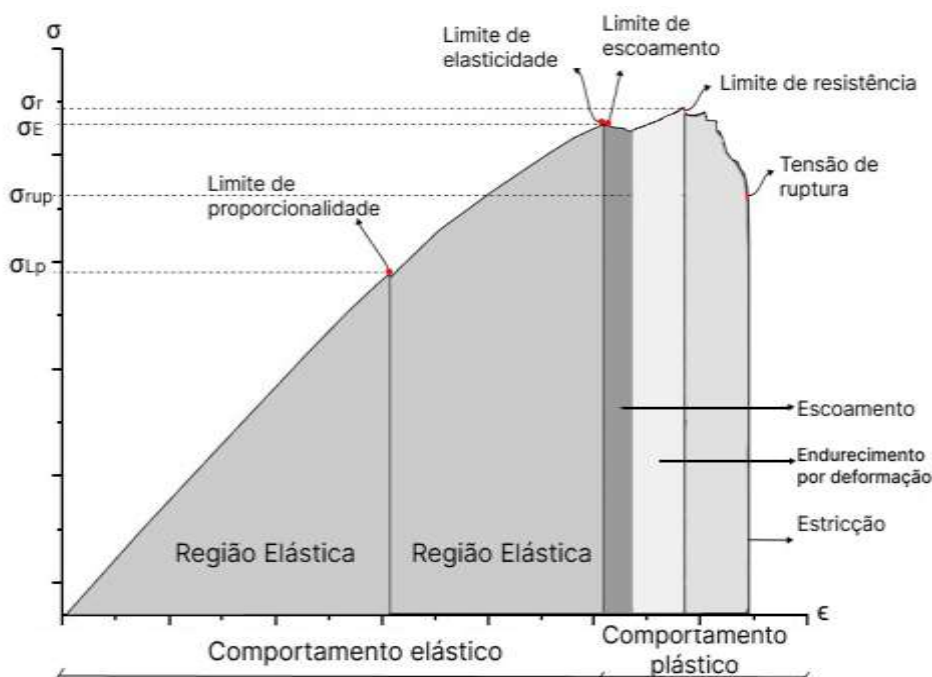


Figura 24 – Diagrama tensão-deformação criado a partir da caracterização física do ensaio nº1 (A autora, 2022)

Ao observar o gráfico demonstrado na Figura 24, algumas propriedades mecânicas, anteriormente explicadas podem ser claramente evidenciadas nas fibras estudadas, dentre elas: tensão limite de proporcionalidade ( $\sigma_{Lp}$ ), tensão limite de elasticidade ( $\sigma_E$ ), tensão limite de resistência ( $\sigma_r$ ) e tensão limite de ruptura ( $\sigma_{rup}$ ), as quais podem ser conferidas no Quadro 3. Com esses dados obtidos, foi possível calcular o módulo de resiliência, elasticidade e tenacidade das fibras, além de identificar suas tensões máximas suportadas para cada região do gráfico. Ressalta-se que, como foram analisadas 16 fibras distintas e obtidos todos esses dados para cada uma, serão utilizadas a média dos mesmos como valor padrão para futuras análises de resultados.

| ENSAIO                  | Tensão limite de proporcionalidade ( $\sigma_{Lp}$ ) Mpa | Tensão limite de elasticidade ( $\sigma_E$ ) Mpa | Tensão limite de resistência ( $\sigma_r$ ) Mpa | Tensão de ruptura ( $\sigma_{rup}$ ) Mpa |
|-------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------|
| 1                       | 6,12                                                     | 7,86                                             | 8,02                                            | 7,17                                     |
| 2                       | 5,12                                                     | 7,84                                             | 8,25                                            | 6,96                                     |
| 3                       | 1,56                                                     | 8,15                                             | 8,23                                            | 7,43                                     |
| 4                       | 4,29                                                     | 7,20                                             | 8,12                                            | 7,59                                     |
| 5                       | 7,97                                                     | 7,97                                             | 7,98                                            | 6,82                                     |
| 6                       | 7,98                                                     | 7,86                                             | 8,12                                            | 6,98                                     |
| 7                       | 5,94                                                     | 7,47                                             | 7,80                                            | 7,44                                     |
| 8                       | 6,16                                                     | 7,77                                             | 8,15                                            | 7,37                                     |
| 9                       | 5,31                                                     | 7,23                                             | 7,74                                            | 6,37                                     |
| 10                      | 4,77                                                     | 7,89                                             | 8,20                                            | 7,97                                     |
| 11                      | 5,68                                                     | 7,45                                             | 8,02                                            | 7,18                                     |
| 12                      | 5,04                                                     | 7,88                                             | 7,97                                            | 5,99                                     |
| 13                      | 5,81                                                     | 7,16                                             | 7,65                                            | 5,94                                     |
| 14                      | 5,10                                                     | 7,83                                             | 8,20                                            | 7,90                                     |
| 15                      | 5,09                                                     | 7,41                                             | 8,09                                            | 6,18                                     |
| 16                      | 6,36                                                     | 7,73                                             | 8,09                                            | 6,23                                     |
| <b>MÉDIA</b>            | <b>5,78</b>                                              | <b>7,64</b>                                      | <b>8,03</b>                                     | <b>6,94</b>                              |
| DESVIO PADRÃO           | 1,06                                                     | 0,28                                             | 0,18                                            | 0,67                                     |
| COEFICIENTE DE VARIAÇÃO | 18,34%                                                   | 3,66%                                            | 2,24%                                           | 9,65%                                    |
| VALOR MÁXIMO            | 7,98                                                     | 8,15                                             | 8,25                                            | 7,97                                     |
| VALOR MÍNIMO            | 1,56                                                     | 7,16                                             | 7,65                                            | 5,94                                     |

Quadro 3 – Tensões limites obtidas mediante gráfico tensão-deformação da amostra de fibra (A autora, 2022)

Destaca-se que, para os cálculos da média, desvio padrão e coeficiente de variação, dos quadros 3, 4, 5 e 6 foi desconsiderado o ensaio da fibra nº 3, por se tratar de um ponto fora da curva, pois, apresentou um valor significativamente menor que todos os demais ensaios, dessa forma implicando na precisão dos dados e confiabilidade dos resultados.

#### 4.2.1.1 Módulo de resiliência

Aplicando os valores correspondentes a tensão e a deformação da amostra no limite de proporcionalidade do gráfico gerado, obteve-se os módulos de resiliência das 16 fibras analisadas, bem como a média dos resultados, desvio padrão, coeficiente de variação e valores máximo e mínimo, como demonstrado no Quadro 4.

| ENSAIO                   | MÓDULO DE RESILIÊNCIA<br>(Ur) MJ/m <sup>3</sup> |
|--------------------------|-------------------------------------------------|
| 1                        | 0,01233                                         |
| 2                        | 0,00847                                         |
| 3                        | 0,00225                                         |
| 4                        | 0,00519                                         |
| 5                        | 0,02471                                         |
| 6                        | 0,02282                                         |
| 7                        | 0,01072                                         |
| 8                        | 0,01183                                         |
| 9                        | 0,00919                                         |
| 10                       | 0,00644                                         |
| 11                       | 0,00949                                         |
| 12                       | 0,00721                                         |
| 13                       | 0,01040                                         |
| 14                       | 0,00801                                         |
| 15                       | 0,00784                                         |
| 16                       | 0,01275                                         |
| <b>Média</b>             | <b>0,01116</b>                                  |
| Desvio padrão            | 0,00556                                         |
| Coefficiente de Variação | 49,82%                                          |
| Valor máximo             | 0,02471                                         |
| Valor mínimo             | 0,00225                                         |

Quadro 4 – Módulos de resiliência das 16 fibras ensaiadas, média e demais índices de variações (A autora, 2022)

Dessa forma, para ser estudado como parte das conclusões deste trabalho, será considerado o valor médio de 0,011 MJ/m<sup>3</sup> como módulo de resiliência das fibras à base de poliéster e elastano. Considera-se que, quanto maior a capacidade da fibra de absorver energia sem se deformar, melhor a sua aplicabilidade em elementos que demandem esforços repetitivos e constantes, como viadutos, pontes e estradas, assim, podendo contribuir restringindo ou minimizando o surgimento de fissuras nesses elementos. Esse conhecimento acerca dessa capacidade do material pode contribuir com a definição da sua melhor aplicabilidade dentre os elementos de base cimentícia.

#### 4.2.1.2 Módulo de tenacidade

Com o auxílio do programa ORIGIN PRO 2022b foram calculadas as integrais das áreas dos diagramas de tensão-deformação das 16 fibras ensaiadas, dessa forma obtendo-se o módulo de tenacidade de cada uma delas, assim como a média e os demais valores de referência, como exposto no Quadro 5.

| ENSAIO                   | MÓDULO DE TENACIDADE<br>( $U_t$ ) MJ/m <sup>3</sup> |
|--------------------------|-----------------------------------------------------|
| 1                        | 0,03815                                             |
| 2                        | 0,03971                                             |
| 3                        | 0,03914                                             |
| 4                        | 0,03859                                             |
| 5                        | 0,04125                                             |
| 6                        | 0,04316                                             |
| 7                        | 0,03524                                             |
| 8                        | 0,04098                                             |
| 9                        | 0,04731                                             |
| 10                       | 0,03752                                             |
| 11                       | 0,03133                                             |
| 12                       | 0,03863                                             |
| 13                       | 0,03732                                             |
| 14                       | 0,03559                                             |
| 15                       | 0,04814                                             |
| 16                       | 0,04127                                             |
| <b>Média</b>             | <b>0,03958</b>                                      |
| Desvio padrão            | 0,00424                                             |
| Coefficiente de Variação | 10,71%                                              |
| Valor máximo             | 0,04814                                             |
| Valor mínimo             | 0,03133                                             |

Quadro 5 – Módulo de tenacidade, média e demais índices de variações da amostra de fibras (A autora, 2022)

Assim, será considerado 0,040 MJ/m<sup>3</sup> como valor médio do módulo de tenacidade, ou seja, o valor referente a quantidade de energia absorvida pela fibra até a sua ruptura. Acredita-se que esse módulo seja sensível a quantidade de fios de poliéster presente na fibra, devido a sua característica de absorção de energia durante a aplicação de forças de tração, conforme observado no ensaio mecânico, exposto na Figura 25, antes de alcançar a tensão de ruptura da fibra, ocorre o desfiação dos fios de poliéster à medida em as pinças mecânicas efetuam esforços de tração.



Figura 25 – Processo de desfiação dos fios de poliéster da fibra têxtil (A autora, 2022)

Mesmo em processo de desfiação dos fios, a fibra continuava resistindo a tensões cada vez maiores, tal processo ocorre na região plástica do gráfico exposto na Figura 24, especificamente na fase de endurecimento por deformação. Assim, supõe-se que os fios passam a absorver mais energia e consequentemente ganham mais resistência devido ao rearranjo e entrelaçamento das fibras remanescentes tracionadas durante a fase de desfiação. Esse fator acaba contribuindo para a análise da aplicação dessa fibra em matrizes cimentícias específicas, as quais necessitem de boa resistência ao impacto, e a tensões maiores que a tensão de escoamento desse material, que é a partir da qual a deformação plástica se inicia.

#### 4.2.1.3 Módulo de elasticidade

Tomando os valores referentes a tensão no limite de proporcionalidade ( $\sigma_{Lp}$ ) e a deformação no limite de proporcionalidade ( $\epsilon_{Lp}$ ), e aplicando-os à Equação 3, calculou-se os módulos de elasticidade dos 16 ensaios, bem como a média dos dados, o coeficiente de variação e o valor máximo e mínimo dentre todos os resultados (Quadro 6).

| ENSAIO                  | MÓDULO DE ELASTICIDADE (E) GPa |
|-------------------------|--------------------------------|
| 1                       | 1,52                           |
| 2                       | 1,55                           |
| 3                       | 0,54                           |
| 4                       | 1,77                           |
| 5                       | 1,29                           |
| 6                       | 1,40                           |
| 7                       | 1,65                           |
| 8                       | 1,61                           |
| 9                       | 1,53                           |
| 10                      | 1,77                           |
| 11                      | 1,70                           |
| 12                      | 1,76                           |
| 13                      | 1,62                           |
| 14                      | 1,62                           |
| 15                      | 1,65                           |
| 16                      | 1,56                           |
| <b>Média</b>            | <b>1,60</b>                    |
| Desvio padrão           | 0,14                           |
| Coeficiente de Variação | 8,75%                          |
| Valor máximo            | 1,77                           |
| Valor mínimo            | 0,54                           |

Quadro 6 – Módulo de elasticidade, média e demais índices de variações para 16 ensaios (A autora, 2022)

Com isso, para quantificar o módulo de elasticidade das fibras à base de poliéster e elastano será utilizado o valor de 1,60 GPa. Espera-se que a quantidade de elastano presente na fibra contribua diretamente com esse valor, ou seja, fibras que apresentem quantidade elevadas de elastano, é esperado que esse modulo de elasticidade seja maior. Logo, a quantidade de elastano pode determinar a aplicação final da fibra em produtos cimentícios que necessitem de melhor desempenho elástico, como os elementos que sofrem esforços submetidos a variações térmicas, como argamassas com propriedades térmicas.

### 4.2.3 Diagrama comparativo comportamento do aço x fibra

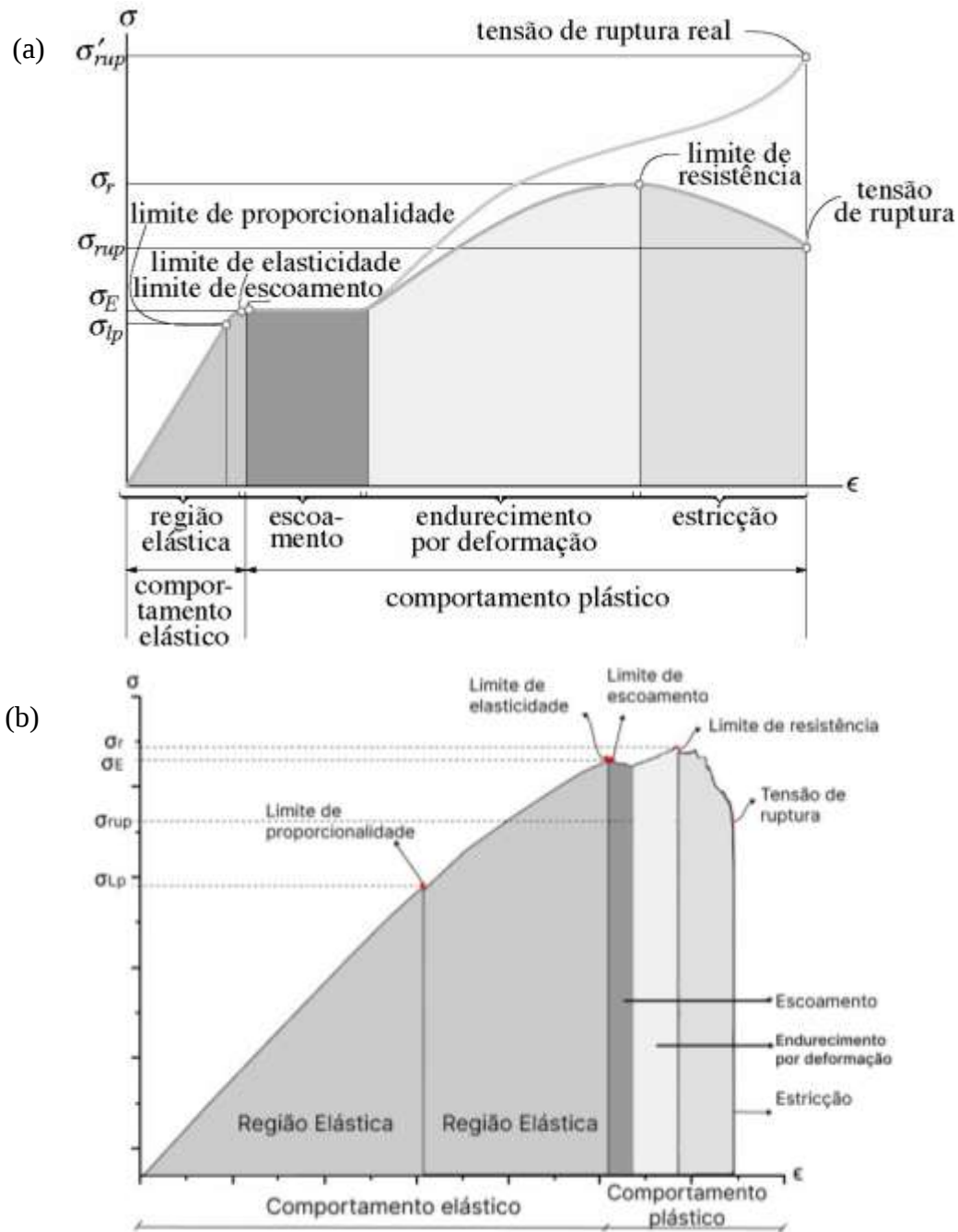


Figura 26 – Comparação dos diagramas de tensão-deformação (a) ensaio da fibra nº 1 (b) material dúctil (aço) (A autora, 2022)

Comparando-se os gráficos da Figura 26, constata-se uma semelhança nos regimes de comportamento mecânico da curva de tensão-deformação. Percebe-se que, os dois materiais possuem comportamento dúctil. Porém, sem precisão de valores devido a falta de compatibilidade de escala de ambos os gráficos. O intuito da comparação é apenas qualitativo e comportamental. Torna-se também imprescindível ressaltar que essa semelhança se dá em

proporções excessivamente menores quando comparadas as resistências suportadas por ambos os materiais (fibra à base de poliéster e elastano vs. aço).

Considerando as observações acima citadas, nota-se que na primeira fase da região elástica os gráficos se comportam de maneira praticamente idêntica, com uma proporcionalidade entre tensão e deformação, já na segunda fase dessa região, a fibra continua com a região elástica acentuada, porém, não mais com a tensão proporcional a deformação. Já na fase de escoamento, o aço apresenta uma tensão constante, já no gráfico da fibra essa tensão não chega a ser constante, no entanto, há pouca variação e a fibra acaba perdendo resistência. Conforme discutido, essa perda de resistência se dá devido ao processo de estricção seguido por desfiamento da fibra, onde alguns dos seus fios de poliéster rompem-se. Ao passar para a fase de endurecimento por deformação, tanto o aço quanto a fibra ganham resistência. De acordo com Fredel (2018), o aço ganha resistência devido a um rearranjo dos átomos presentes em sua composição, já as fibras, acredita-se que esse ganho de resistência seja devido a nova disposição espacial ao qual as fibras são submetidas no processo de desfiamento, pois, à medida em que a fibra perde fios de poliéster, os fios remanescentes se entrelaçam e rearranjam-se ocupando os espaços vazios deixados pelos fios rompidos, assim, ganhando resistência.

De forma resumida, considera-se que a fibra passa por 3 estágios de deformação, no primeiro estágio a fibra está se alongando, assim, tanto o poliéster quanto o elastano deformam-se. No segundo estágio, a fibra perde seção transversal de maneira rápida, pois os fios de poliéster começam a desfiar, no entanto o elastano continua se alongando. Já no terceiro estágio o cordão de elastano permanece se deformando até a ruptura da fibra.

Após as análises apresentadas, referentes a microscopia eletrônica de varredura e o ensaio mecânico ao qual a fibra foi submetida, trazendo uma análise geral, torna-se possível comparar-se os resultados alcançados e observar que, a forte interação ocorrida entre a fibra e a matriz, somada aos resultados mecânicos obtidos com o ensaio de tração, reforça a hipótese levantada inicialmente, de que, ao empregar-se a fibra têxtil em uma matriz cimentícia, suas características mecânicas contribuirão com um aumento de resistência no material, visto que, ocorre grande sinergia entre a fibra e a microestrutura presente na composição dos materiais que compõem a matriz cimentícia (areia, água e cimento), ou seja, a fibra terá grande facilidade em interagir junto a matriz e somar seus benefícios mecânicos de ductilidade, resiliência, tenacidade e elasticidade, assim minorando as fragilidades do compósito e contribuindo com um aumento de resistência nesse material.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Baseando-se nos resultados da microscopia eletrônica de varredura, acredita-se que, as fibras a base de poliéster e elastano tendem a interagir com a matriz cimentícia, por meio dos *clusters* de argamassa formados em volta das fibras interligando os materiais e fazendo com que as fibras estejam intimamente vinculadas a essa matriz. Uma vez que, é proposto que o cimento realize a nucleação de suas fases cristalinas nos interstícios entre os fios da fibra entumecida. Outro fator considerado a partir dessa observação é a possibilidade de criação de pontes de transferência de tensão, por meio das fibras, contribuindo com o alívio das tensões nas extremidades das fissuras existentes no material cimentício, minorando a propagação das fissuras e evitando uma maior abertura das mesmas.

Por meio do ensaio de caracterização mecânica, observou-se que a fibra estudada possui uma significativa resistência a tração, e que possui comportamento mecânico de material dúctil semelhante ao aço. Essas características da fibra, são resultados da sua composição, elastano e poliéster. Acredita-se que o comportamento dúctil da fibra dependa da quantidade de cada um deles na sua composição. Ambos os materiais trabalham de forma diferente, tornando o comportamento mecânico da fibra único. Espera-se que o elastano contribua propiciando uma maior elasticidade, e conseqüentemente, resiliência ao material e o poliéster propicie maior tenacidade. Portanto, dependendo do tipo de esforço aplicado, pode-se escolher a proporção ideal de poliéster e elastano da fibra, facilitando a escolha da aplicação do compósito formado entre a matriz cimentícia e a fibra têxtil em determinados elementos construtivos.

Dessa forma, conforme os resultados expostos, o trabalho não propõe que a fibra seja um substitutivo para o aço, mas sim algo que venha a beneficiar matrizes cimentícias, inclusive, as que constituem o concreto e até mesmo o concreto armado, em aplicações específicas, como os materiais que necessitam de alta resistência ao impacto e a esforços recorrentes, assim como, reparos estruturais localizados. Devido a interação presente entre fibra e matriz cimentícia e, ao comportamento benéfico da fibra quando submetida a esforços de tração, espera-se que, quando somadas essas contribuições, a utilização da fibra contribua com a evolução dos sistemas construtivos atuais e ajude a solucionar possíveis carências existentes no cenário da construção civil no aspecto da saúde e durabilidade das edificações.

Como complemento para esse estudo e forma de continuar progredindo nesse campo de pesquisa, segue algumas sugestões de trabalhos futuros:

- Determinar a energia de ligação entre a fibra e matriz cimentícia, para atuar na criação de pontes de transferência de tensão, e assim, promover um compósito capaz de restringir a abertura e propagação de fissuras com o incremento de tensões aplicadas;
- Avaliar a aplicação da fibra como agente de reparo estrutural localizado em estruturas do tipo vigas que demandem um aprimoramento do comportamento dúctil da matriz cimentícia.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-2: Edificações habitacionais – desempenho**. Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_. **NBR 13069: Concreto projetado — Determinação dos tempos de pega em pasta de Cimento Portland, com ou sem a utilização de aditivo acelerador de pega**. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 16607: Cimento Portland — Determinação dos tempos de pega**. Rio de Janeiro, 2018.

AGENDA 2030. **Conheça a agenda 2030**. <<http://www.agenda2030.org.br/sobre/>>. Acesso em: 17 mai. 2021.

ALEX THARUN P. J.; NISHMA V. M.; ASWATHY L. S.; SRUTHY SREEKUMAR; APARNA A. V. **Strength Characteristic Study of Polyester Fiber Reinforced Concrete**. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 2018.

ALVES, T. S.; Santos, M. L. L. O. **Avaliação de Manifestações Patológicas em Revestimentos Argamassados de Fachada: Um Estudo de Caso em um Condomínio na Cidade de São Luís-MA**. Open Journal Systems, 2021. Disponível em <<http://201.48.93.203/index.php/construindo/article/view/8318>>. Acesso em: 11 dez. 2021.

AMARAL, J.C.; SILVA, L.; MORAVIA, W.G. **Análise experimental da adição de fibras poliméricas nas propriedades mecânicas do concreto**. Revista matéria, v.22, n.1, 2017. Disponível em <<https://doi.org/10.1590/S1517-707620170001.0112>> Acesso em: 05 fev. 2022.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI- 544.1R-96: Report on fiber reinforced concrete, Committee 544**. Farmington Hills: ACI, 2002.

ANDRADE, B. S. O. **Concreto armado: um estudo sobre o processo histórico, características, durabilidade, proteção e recuperação de suas estruturas**. Universidade Federal de Minas Gerais, Rio de janeiro. 2016.

AOKI, J. **Início e Fim de Pega. Qual a utilidade?** Portal itambé. Disponível em <<https://www.cimentoitambe.com.br/massa-cinzenta/inicio-e-fim-de-pegas-qual-a-utilidade/#>> Acesso em: 10 jan. 2022.

ARANHA, N.; OLIVEIRA, J. M.; BELLIO, L. O.; BONVENTI, W. **A lei de Hooke e as molas não-lineares, um estudo de caso**, Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 38, nº 4, e4305, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Boletim técnico, Guia básico de utilização do Cimento Portland**. São Paulo, 2002.

BATTAGIN, A. F. **Concreto: ciência e tecnologia**. Instituto Brasileiro do Concreto. IBRACON, São Paulo. 2005.

BENTUR, Arnon; MINDESS, Sidney. **Fiber reinforced cementitious composites**. 2. ed. Nova Iorque: Taylor & Francis, 2005, 474 p.

BETIOLI, A. M.; SILVA D. A. **Evaluation of durability of PET fibers under diverse aggressive environments**. 10DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components, Lyon, (França). Apr. 2005.

BIOPDI, **Ensaio de Tração**. Disponível em: <<https://biopdi.com.br/artigos/ensaio-de-traacao/#:~:text=O%20Ensaio%20de%20Tra%C3%A7%C3%A3o%20fornece,material%20espec%C3%ADfico%20para%20determinado%20fim.>> Acesso em: 02/07/2022.

BOGHOSSIAN, E.; WEGNER, L. D. Use of Flax Fibres to Reduce Plastic Shrinkage Cracking in Concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, n. 10, p. 929-937, 2008.

BRITES, Mariana de Melo, et al. **Poliéster de alta tecnologia: na fabricação de roupas esportivas**. Anais de 2010. Disponível em: <<https://bv.fapesp.br/pt/instituicao/2505/associacao-brasileira-de-estudos-e-pesquisas-em-moda-abepem/>>. Acesso em: 24 mai. 2021.

CAETANO, L. F.; PEREIRA, B. M.; SIMONETTI, C. G.; ESTELA O. **Avaliação do emprego de fibras para geração de compósitos de matriz cimentícia com características especiais**. Feira de Iniciação Científica (14.: 2005 out. 17-21: Porto Alegre, RS).

CARINO, N. J.; CLIFTON, J. R. **Prediction of Cracking in Reinforced Concrete Structures**. Building and Fire Research Laboratory National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899, 1995.

CARVALHO, L. L. C.; MOTA, C. A. **Uso de Fibras de Aço para Execução do Concreto Armado**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2018.

CASTRO, A. L.; LEITE, A. M. **Influência da matriz cimentícia no comportamento de concretos reforçados com fibras**, Rev. IBRACON Estrut. Mater. 13 (03) - May-Jun 2020.

CHASIOTI, S. G.; VECCHIO, F. J. Shear behavior and crack control characteristics of hybrid steel fiber-reinforced concrete panels. **ACI Structural Journal**, [s. l.], v. 114, n. 1, p. 209–220, 2017.

CM Nano. **Microscópio de varredura eletrônica (MEV) TEM 120kV (JEM1400plus)** <<https://sites.google.com/cm nano.ufs.br/cm nano/p%C3%A1gina inicial/tem120kv?authuser=0>> Acesso em: 11 jul. 2021.

CIMM - Centro de Informação Metal Mecânica, **Deformação e Tensão de Engenharia**. Disponível em: <[https://www.cimm.com.br/portal/material\\_didatico/6522-deformacao-e-tensao-de-engenharia#:~:text=A%20deformação%20de%20engenharia%20é%2C%20portanto%20uma%20grandeza%20adimensional%20e,valor%20“e”%20como%20percentual](https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6522-deformacao-e-tensao-de-engenharia#:~:text=A%20deformação%20de%20engenharia%20é%2C%20portanto%20uma%20grandeza%20adimensional%20e,valor%20“e”%20como%20percentual)> Acesso em 02/07/2022.

CORSINI, R. **Trinca ou fissura?**. Técnica. n. 160, Jul. 2010. Disponível em <[https://www.academia.edu/29245558/Trinca\\_ou\\_fissura\\_T%C3%A9cnica](https://www.academia.edu/29245558/Trinca_ou_fissura_T%C3%A9cnica)> Acesso em: 07 dez. 2021.

CUPERTINO, L. F. **Modelagem do Módulo de Young em Nanocompósitos Através de Inteligência Computacional**. 2009. 82 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

DEDAVID, A. B.; GOMES, I. C.; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparo de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.

DOPKO, Michael. **Fiber Reinforced Concrete: Tailoring composite properties with discrete fibers**. 2018. 178 f. Tese (Mestrado) – Programa de Comitê de Estudo, Universidade Estadual de Iowa. Ames, 2018.

EHRENBRING, H. Z.; TUTIKIAN, B. F.; QUININO, U. C. de M. **Análise comparativa da retração por secagem de concretos com fibras novas e recicladas de poliéster**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 18, n. 3, p. 195-209, jul./set. 2018.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SERGIPE (FIES). **Cadastro Industrial**. Sergipe. 2012. Disponível em: <<http://www.fies.org.br/servicos/cadastroindustrial>>. Acesso em: 18 dez. 2020.

FERREIRA, G. H. **Fissuras em Edificações de Concreto Armado: revisão e estudo de caso.** Trabalho de conclusão de curso – Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

FERREIRA, G.; SANTANA, V.; GARCIA, D.; MENDES J. **Avaliação de fissuras em edificações de concreto armado: estudo de caso em uma residência unifamiliar.** CONPAT 2021 BRASIL, 2021. Disponível em: < <https://doi.org/10.4322/conpat2021.544>> Acesso em: 06 Jan 2022.

FIGUEIREDO, A. D. d. **Concreto Reforçado com Fibras.** 2011. 256 f. Tese (Livre-Docência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

FREDEL, M. C.; ORTEGA, P.; BASTOS, **Propriedades mecânicas: Ensaaios Fundamentais.** Vol. 1 CERMAT. Disponível em: <<https://cermat.ufsc.br/wp-content/uploads/2015/03/APOSTILA-DO-LABORATORIO-DE-PROPRIEDADES-MEC-160315.pdf>> Acesso em: 03/01/2023.

GRZESIAK, S.; PAHN, M.; SCHULTZ-CORNELIUS, M.; HARENBERG, S.; HAHN, C. **Influence of fiber addition on the properties of high performance.** Department of Civil Engineering, Technical University of Kaiserslautern - Kaiserslautern, Germany, 2021.

HANNANT, D. J. **Cement-based Composites:** Comprehensive Composite Materials, University of Surrey, Guildford, UK, 2000. 40 p.

HELENE, Paulo. ANDRADE, Tibério. Concreto de Cimento Portland. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.** São Paulo: Ibracon, 2007. V2, Cap. 27, p. 905 -944.

INABA, Roberto. **Construções Metálicas: O uso na Construção Civil. Artigo Técnico.** Portal Metálica, 2017. Disponível em < <https://metalica.com.br/construcoes-metalicas-o-uso-do-aco-na-construcaocivil-4/>> Acesso em: 05 fev. 2022.

JEOL USA Inc. **Products.** Disponível em: <<https://www.environmental-expert.com/companies/jeol-usa-inc-50174/products>> Acesso em 18 Jan 2022.

LACHOVICZ, P. O. Influência do tipo malha metálica e do tipo de argamassa na realcalinização eletroquímica de estruturas de concreto carbonatado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

LARSEN, I. L.; TERJETHORSTENSEN, R. **The influence of steel fibres on compressive and tensile strength of ultra-high-performance concrete: A review.** Construction and Building Materials Volume 256, Set 2020.

LEITE A. M.; CASTRO, A. L. **Influência da matriz cimentícia no comportamento de concretos reforçados com fibras.** IBRACON Structures and Materials Journal. 2020. Vol. 13, nº 3.

LIMA, Camila Nilma. **Otimização do processo de tingimento da fibra de poliéster utilizando cumarina como carrier.** 126 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de PósGraduação em Engenharia Têxtil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2020.

LUCENA, J. C. T. **Concreto reforçado com fibras de polipropileno: estudo de caso para aplicação em painel alveolar de parede fina.** 2017. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

MARTINS, B.G. **Estudo dos mecanismos de transferência de tensões de cisalhamento em concreto fissurado com e sem reforço de fibras de aço: uma análise exploratória.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil. Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2016.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: microstructure, properties and materials.** McGraw-Hill Education. 4º Ed. California, 2014.

MEZZOMO, M. H.; MORAES, A. G. **Determinação do módulo de elasticidade em aços e alumínio através da frequência natural comparado ao ensaio de tração,** A.G. revista Matéria, v.25, n.2, 2020.

OLIVEIRA, A. M. D. **Fissuras, trincas e rachaduras causadas por recalque diferencial de fundações.** Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 96. 2012.

OLIVEIRA, D. M. e COELHO, T. S., **Estudo comparativo entre estrutura mista de aço e concreto e Estrutura de concreto armado na ampliação das faculdades Doctum de caratinga-mg.** Faculdade doctum de Caratinga, Caratinga, 2019.

PEDROSO, F. L., **Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem**. Instituto Brasileiro do Concreto. IBRACON, São Paulo, p. 14. 2009.

PEREIRA, Eric V. **Influência de Fibras de Aço no Comportamento Mecânico e nos Mecanismos de Fissuração de Concretos Autoadensáveis**. 2017. 170 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2017.

PEREIRA, J. P. S.; SILVA, R. P.; GALVÃO, R. R. L. **O uso do penetrômetro de bolso como ferramenta para estabelecer o tempo de pega do concreto com materiais da região de Goiânia**. Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2018.

PLIZZARI, G.; MINDESS, S. **Fiber-reinforced concrete. Developments in the Formulation and reinforcement of concrete**. (second edition), p. 257-287, 2019. Disponível em <<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102616-8.00011-3>> Acesso em: 19/12/2021.

RIBEIRO, C. C.; PINTO, J. D. S.; STARLING, T. **Materiais Da Construção Civil**. 2º Edição, Editora FMG. Belo Horizonte. 2006.

ROLIM, P. H. B. **Reação álcali-agregado: avaliação do método químico de ensaio**. Florianópolis, SC, 2010.

SAHADE, R. F. **Avaliação de sistemas de recuperação de fissuras em alvenaria de vedação**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. São Paulo, p. 188. 2005.

SANTANA, F. O.; SANTOS, T. R.; BARROS, N. B.; LIMA, T. A. R. M.; SILVA, P. H. G.; **Concreto autocicatrizante e antifissurante com adição de catalisador cristalino e fibras a base de poliéster**. Anais da Semana Nacional de Ciência e Tecnologia (SNCT). Instituto Federal de Sergipe. Estância, 2021.

SANTOS, T. R. **Argamassa cimentícia com adição de fibras a base de poliéster**. 2021. 66 f. Trabalho de conclusão de curso - Curso de Engenharia Civil do Instituto Federal de Sergipe, Estância, 2021.

SHAFEI, B.; KAZEMIAN, M.; DOPKO, M.; NAJIMI, M.; **State-of-the-Art Review of Capabilities and Limitations of Polymer and Glass Fibers Used for Fiber-Reinforced Concrete**. Materials 2021. Disponível em: < <https://doi.org/10.3390/ma14020409> >. Acesso em 10/01/2022.

SILVA, V. A.; COSTA JÚNIOR, R. F.; VIANNA, A. C. S. L.; BARTKO, N.; RODRIGUES JÚNIOR, A. S.; GOMES, G. J. C. **Análise do comportamento de estruturas de concreto com fibra de polipropileno sob flexão**. Revista Teccen. 2019.

SISTEMA MODA ITALIA. **Sostenibilità nell'industria Tessile-Abbigliamento-Moda (Sustainability in the Textile-Clothing-Fashion Industry) (2)**. São Paulo, 2016. Disponível em: < <https://www.sistemamodaitalia.com/it/sostenibilita>>. Acesso em: 11 jul. 2021.

SILVA, R. P. **Argamassas com adição de fibras de polipropileno – estudo do comportamento reológico e mecânico**. São Paulo, 2006. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2006.

TEIXEIRA, L. A. **O efeito da modificação química das fibras de curauá nas propriedades morfológicas, térmicas e mecânicas de compósitos de poliéster**. FGA/FT/UnB, Universidade de Brasília, Distrito Federal, 2019. 95 f.

THOMAZ, E. **Trincas em edifícios, causas, prevenção e recuperação**. Revista ampliada, 2ª ed. 2020.

VASCONCELOS, F. B. **Influência dos parâmetros de regulação de máquina nas características físicas de malhas de poliamida-elastano**. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

VEIGA, M. D. R. D. S. **Comportamento de argamassas de revestimento de paredes**. Faculdade de Engenharia da Universidade Do Porto. [S.l.]. 1998.

YANG, E.; WANG, S.; YANG, Y.; LI, V. C. **Fiber-Bridging Constitutive Law of Engineered Cementitious Composites**. Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 6, No. 1, 181-193, Feb. 2008.

YU, R.; BEERS, L. V.; BROUWERS, H. J. H.; SPIESZ, P. **Impact Resistance of a Sustainable Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC)**. Under Pendulum Impact Loadings. Construction and Building Materials, v. 107, p. 203-215, 2016.