

## Ensaio de pull out em fibra de polietileno tereftalato para avaliar o comprimento crítico em matriz cimentícia

### Pull out test on polyethylene terephthalate fiber to evaluate the critical length in cementitious matrix

Keize Delvalle dos Santos Ferraz Cereja<sup>1</sup> , Sergio Luis González Garcia<sup>1</sup>, Gabryel de Carvalho Alves<sup>1</sup>, Rafael da Silva Hortencio<sup>1</sup>, Eduardo Atem de Carvalho<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Estadual do Norte Fluminense, Laboratório de Engenharia Civil. Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

e-mail: keizedelvalle@hotmail.com, liluiser@yahoo.com.br, gabryeldecarvalhoalves@hotmail.com, rshortencio@gmail.com, eatem@uenf.br

#### RESUMO

Este trabalho investigou a eficiência da adesão entre fibras de polietileno tereftalato (PET) reciclada e a matriz cimentícia, visando determinar o comprimento crítico de ancoragem das fibras de PET em concretos reforçados. Ensaio de Pull out foram realizados para avaliar a interação entre fibra-matriz e a tensão máxima de cisalhamento. Os resultados indicaram que fibras de PET com comprimento de ancoragem de 20 e 30 mm apresentaram escorregamento, enquanto as fibras de PET com 40 e 50 mm mostraram deformação sem escorregamento, evidenciando a necessidade de um maior comprimento de embutimento para melhorar a ancoragem das fibras de PET e uma melhor distribuição de tensões. A análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) revelou que a superfície lisa das fibras de PET prejudica a aderência com a matriz, sugerindo que para a utilização deste material devem ser adotados maiores comprimentos de embutimento, melhoram o desempenho do concreto reforçado. O estudo concluiu que o comprimento crítico mínimo de ancoragem foi de 40 mm a fim de otimizar a transferência de tensões.

**Palavras-chave:** Pull out; Fibras de Pet; Tamanho crítico; Matriz cimentícia; Tensão cisalhante.

#### ABSTRACT

This study investigates the adhesion efficiency between recycled PET fibers and the cementitious matrix, aiming to determine the critical anchorage length of the fibers in reinforced concrete. Pull-out tests were performed to evaluate the fiber-matrix interaction and the maximum shear stress. The results indicated that fibers with anchorage lengths of 20 and 30 mm presented slippage, while fibers of 40 and 50 mm showed deformation without slippage, evidencing the need for a longer embedment length to improve anchorage and stress distribution. Scanning Electron Microscopy (SEM) analysis revealed that the smooth surface of the PET fibers impairs adhesion with the matrix, suggesting that for the use of this material, longer embedment lengths improve the performance of reinforced concrete. The study concludes that the minimum critical anchorage length is 40 mm for better stress transfer.

**Keywords:** Pull out; Pet fibers; Critical size; Cementitious matrix; Shear stress.

#### 1. INTRODUÇÃO

A utilização do concreto reforçado com fibras (CRF) na construção civil está em um constante crescimento, sendo alvo de muitos estudos [1–7]. Isso se deve ao seu comportamento pós-fissuração, que diferentemente do concreto simples apresenta um comportamento frágil e de baixa capacidade de deformação, o CRF apresenta características mecânicas de um material quase dúctil, devido à atuação das fibras como ponte de transferência de tensões nas aberturas de fissuras. Segundo ROCHA *et al.* [8] no CRF a tenacidade aumenta à medida que as fibras começam a ser tracionadas, isso ocorre devido a absorção de energia à medida que se deformam quando submetidas à tração, até que ocorra a ruptura da fibra ou o escorregamento na interface fibra/matriz.

O comprimento da fibra e sua ligação com a interface da matriz cimentícia são fatores primordiais para um CRF com elevada resistência e rigidez. Comprimentos de ancoragem muito curtos proporcionam uma baixa transmissão de esforços entre a fibra e a matriz, causando o escorregamento da fibra sem que haja escoamento. Dessa forma, é primordial que seja definido um comprimento “ótimo” de ancoragem para que ocorra uma transferência efetiva de esforços entre a fibra e a matriz.

Embora diversos autores tenham desenvolvido estudos sobre concretos reforçados com fibras de PET, poucos se dedicaram à análise detalhada das características da ligação entre a fibra de PET e a matriz. O trabalho de LIN *et al.* [9], investigou esse aspecto, contribuindo significativamente para a compreensão do comportamento interfacial entre a fibra de PET e a matriz cimentícia. No entanto, em grande parte dos estudos anteriores, os tamanhos das fibras de PET foram adotados de forma aleatória, sem uma padronização criteriosa que possibilitasse avaliar, de forma sistemática, o efeito do comprimento ou da geometria na ancoragem e adesão da fibra.

Segundo MINEIRO *et al.* [10], existem dois tipos principais de mecanismos de ligação entre a matriz e a fibra: as ligações físico-químicas, que envolvem atrito interfacial e adesão e as ligações mecânicas, promovidas pelo entrelaçamento das fibras ou pela sua geometria. Entre esses mecanismos, a ancoragem mecânica é a que mais influencia o comportamento ao arrancamento da fibra, sendo considerada a forma mais eficaz de ligação na matriz cimentícia.

Para analisar esse fenômeno da ligação interfacial têm sido amplamente utilizados ensaios de Pull out. Esse ensaio tem por objetivo simular o comportamento de ponte de transferência de tensões do CRF, com uma ou múltiplas fibras inseridas em uma matriz, onde se aplica uma tração uniaxial na fibra até que ela seja completamente arrancada da matriz [11, 12]. Nesse processo, de forma inicial ocorre uma coesão entre os componentes, logo em seguida o deslocamento interfacial, contato friccional deslizante e, caso haja a ancoragem mecânica, deformação das fibras e a plasticidade do material.

A Figura 1 apresenta o esquema de ensaio de *Pull out*, onde uma fibra de PET é embutida na matriz cimentícia e submetida a tração uniaxial até o arrancamento. O comprimento de embutimento da fibra (L) é um parâmetro fundamental na avaliação da aderência com a matriz, a eficiência da ancoragem está diretamente relacionada ao índice de aspecto (AR) da fibra de PET, definido como a razão entre o comprimento (L) e o perímetro (p) da fibra [13, 14], conforme mostra a equação 1. Para comprimentos menores que o comprimento crítico de ancoragem a fibra escorrega e para comprimentos maiores ou iguais ao comprimento crítico, a fibra se deforma e logo rompe.

$$AR = \frac{L}{p} \quad (1)$$

Onde:

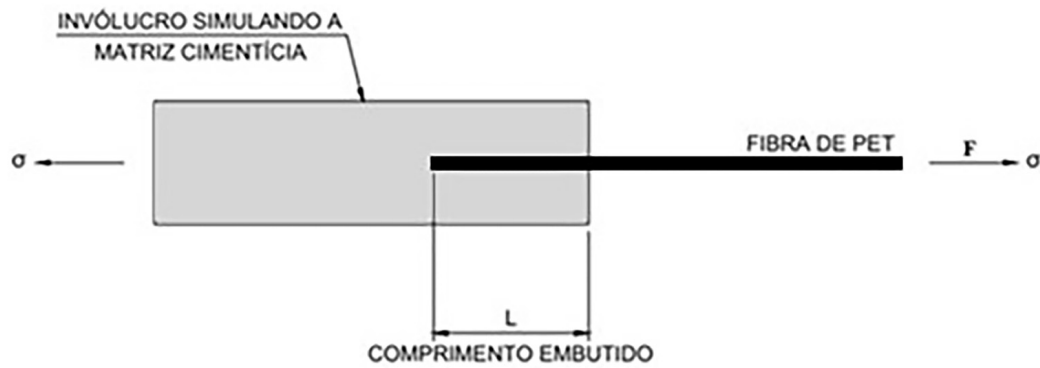
L = Comprimento de embutimento

p = Perímetro

A matriz cimentícia acrescido de fibras de PET reciclada, em particular, surge como uma alternativa promissora e sustentável, considerando-se o impacto ambiental positivo de reutilizar esse tipo de resíduo. As pontes de tensão geradas pelas fibras, permitem que estruturas mantenham uma melhor coesão após a formação de fissuras [15]. Essa característica contribui para aumentar a durabilidade e a capacidade de carga de estruturas sujeitas a condições adversas, como variações térmicas e cargas cíclicas. Contudo, este comportamento se deve através de fatores como o comprimento de embutimento, o diâmetro e a aderência da fibra à matriz.

A resistência do CRF está diretamente ligada à ancoragem e à interface fibra/matriz. Além disso, o comprimento crítico da fibra de PET é um parâmetro fundamental: define o mínimo necessário para que a fibra ancore na matriz antes de escorregar. Quando a fibra atinge esse comprimento, há uma melhor distribuição das tensões, o que aumenta a resistência ao arrancamento [13]. Contribuindo para redução na retração do concreto, e diminuição de fissuras indesejadas. A sustentabilidade e o desempenho mecânico deste tipo de concreto o tornam uma opção viável para aplicações em pavimentos, revestimentos e estruturas de contenção, onde a resistência à fissuração é um requisito importante.

Nesse sentido, esse trabalho tem o objetivo de avaliar a eficiência da adesão entre a fibra de PET e a matriz de cimentícia, e determinar o tamanho crítico mínimo da fibra na matriz e a tensão máxima cisalhante. O tamanho adequado e a adesão fibra-matriz são fundamentais para a melhoria da resistência à tração, tenacidade e durabilidade do concreto reforçado com fibras.



**Figura 1:** Esquema de ensaio Pull out.

## 2. METODOLOGIA

O presente estudo analisou o tamanho crítico das fibras de polietileno tereftalato (PET) em matriz cimentícia a base de cimento Portland, através de ensaios de Pull out, onde corpos-de-prova foram produzidos e ensaiados para avaliar além da interface entre a fibra e a matriz, também o tamanho efetivo de ancoragem crítico da fibra na matriz cimentícia com argamassa de resistência à compressão de aproximadamente 45 MPa.

As fibras foram preparadas nas dimensões de  $2,5 \text{ mm} \pm 0,3 \text{ mm}$  de largura, 0,25 mm de espessura, foram adotados quatro tamanhos de ancoragem, nas dimensões 20, 30, 40, 50 mm. resultando em diferentes índices de aspecto. O índice de aspecto, definido como a razão entre o comprimento da fibra e sua espessura, influencia diretamente na capacidade de ancoragem. De acordo MARTINS *et al.* [13], fibras com maior índice de aspecto tendem a melhorar a transferência de tensões na matriz, desde que bem ancoradas.

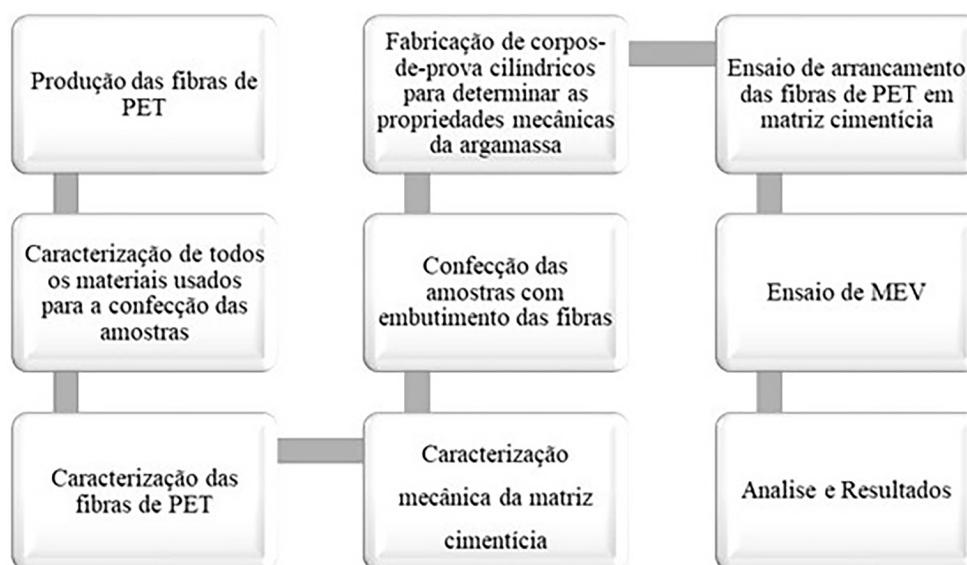
A metodologia seguiu as seguintes etapas conforme ilustra a Figura 2.

### 2.1. Materiais

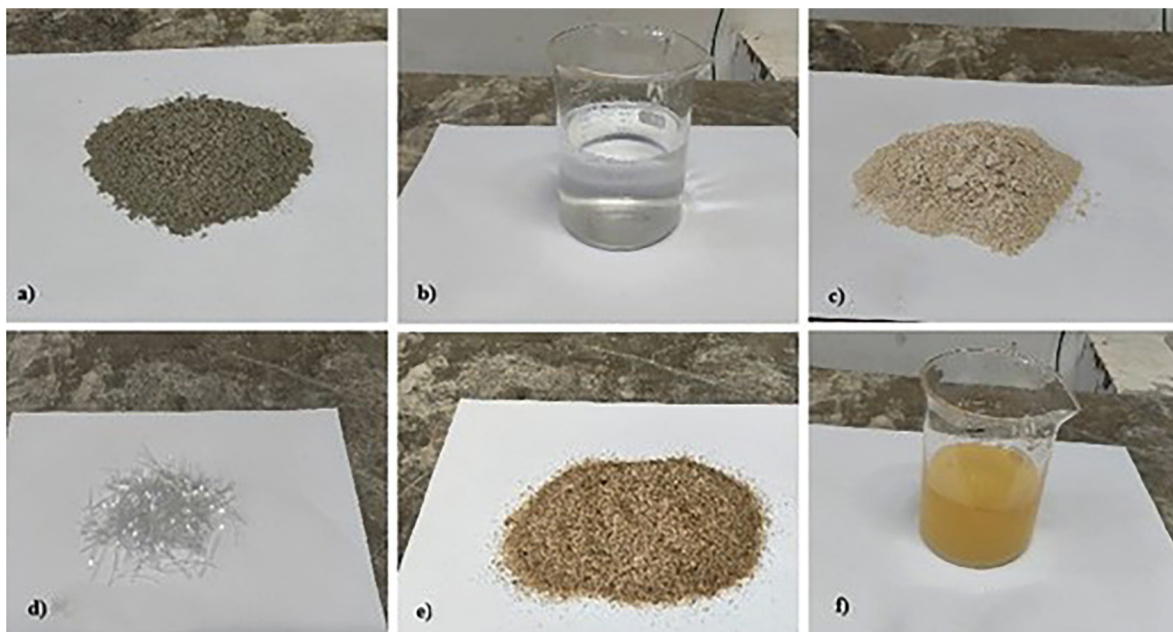
Os materiais utilizados no estudo são mostrados na Figura 3.

### 2.2. Métodos

O estudo teve início com a confecção das fibras de PET, e a fabricação dos moldes para o ensaio de arrancamento do tipo Pull out, conforme as normas ACI 440.3R [16] e europeia FIB Bulletin 40 [17]. Para a matriz foi utilizada uma argamassa com resistência à compressão média de 45 MPa na qual as fibras foram embutidas nos



**Figura 2:** Organograma da metodologia.



**Figura 3:** Materiais utilizados na pesquisa: a) cimento CPV-ARI, b) água, c) Metacaulim, d) fibras de PET, e) areia, f) Superplastificante.

tamanhos determinados. Após a moldagem os corpos-de-prova permaneceram em cura úmida por 28 dias até a realização do ensaio de Pull out.

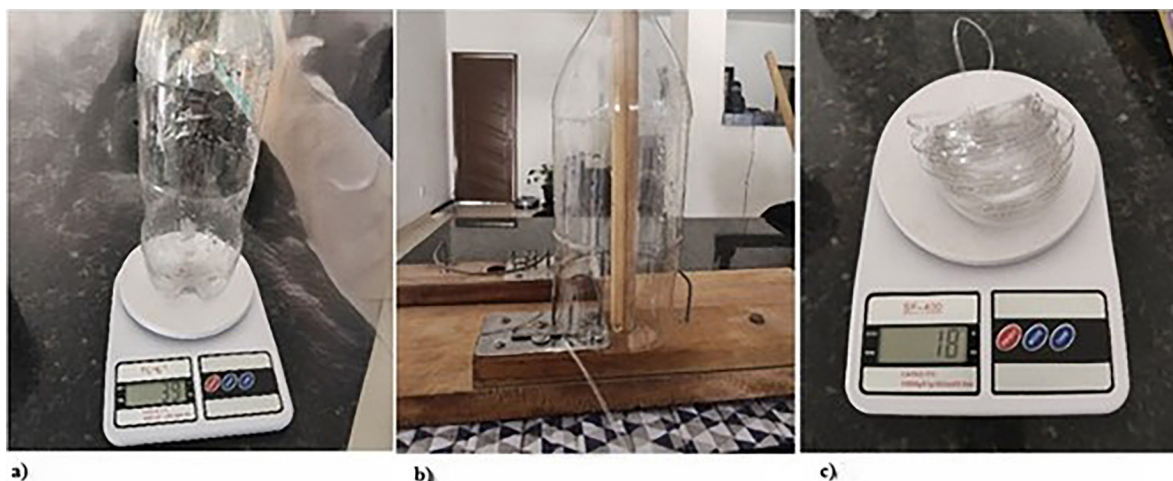
#### 2.2.1. Confeção das fibras de PET

No processo de confecção das fibras de PET, foram coletadas e higienizadas garrafas recicladas de 2 litros. Onde as garrafas foram transformadas em tiras de 2,5 mm de largura conforme ilustra a Figura 4.

#### 2.2.2. Caracterização mecânica das fibras

A determinação da massa específica das fibras realizou-se de acordo com a norma ABNT NBR 16942:2021 [18]. Já os ensaios de tração foram conduzidos por intermédio da máquina universal de ensaios INSTRON 5582, localizada no Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV) da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF). Os corpos de prova foram submetidos a carregamento axial com o objetivo de avaliar a resistência à tração das fibras utilizadas no estudo.

A análise morfológica das fibras de PET ocorrerá por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), com o objetivo de observar suas características microestruturais antes da incorporação ao concreto. Para isso, foi



**Figura 4:** Confeção de fibra de PET: a) garrafa higienizada; b) desfiador de fibra; c) fibra aproveitável.



**Tabela 1:** Dosagem da matriz cimentícia.

| DOSAGEM DA MATRIZ          | (Kg/m³) |
|----------------------------|---------|
| Cimento Portland CPV-ARI   | 543,134 |
| Metacaulim                 | 362,09  |
| Areia                      | 905,22  |
| Água                       | 353,04  |
| Superplastificante Glenium | 9,05    |

utilizado um microscópio da marca Shimadzu, modelo SSX-550, operado a 20 kV, no Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV) da UENF.

### 2.2.3. Composição e produção das argamassas

A matriz cimentícia utilizada para o ensaio foi a argamassa, como visualizado na Tabela 1.

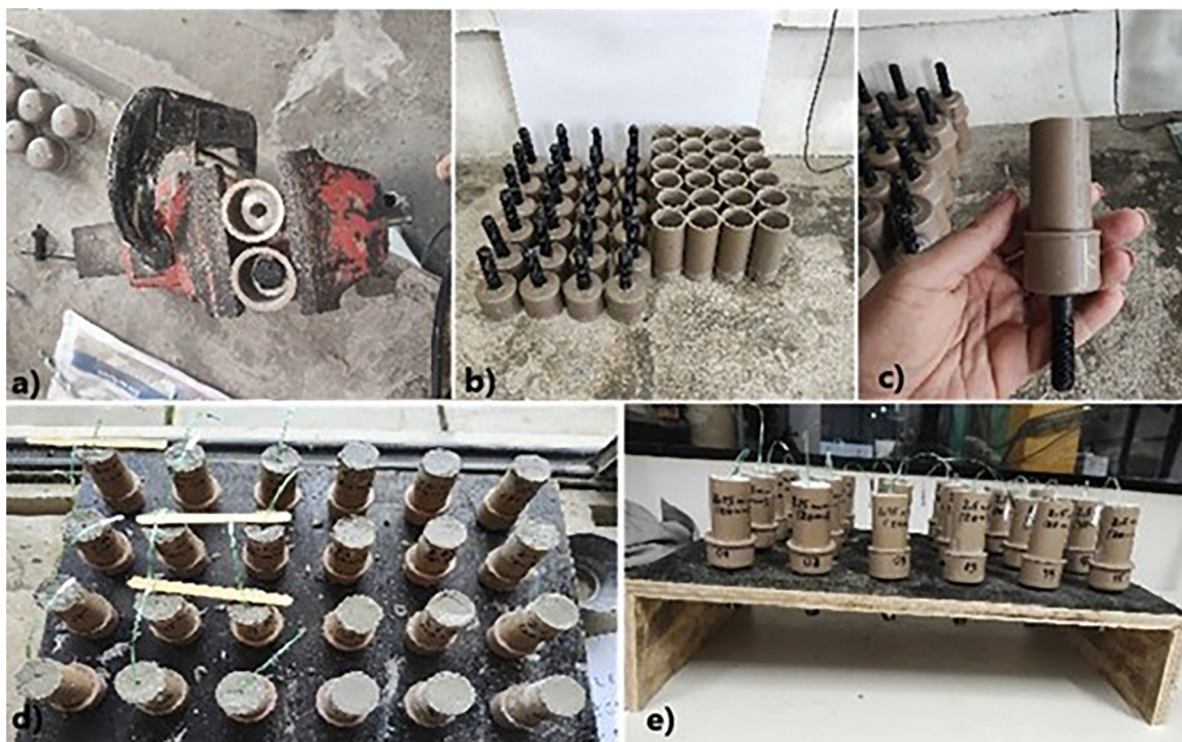
### 2.2.4. Ensaios de caracterização mecânica da matriz

Para a caracterização mecânica da matriz, foram moldados seis corpos-de-prova cilíndricos (50 mm de diâmetro e 100 mm de altura) em formas metálicas. Três amostras foram destinadas à resistência à compressão e três ao ensaio de tração por compressão diametral. Realizados conforme a norma ABNT NBR 5739 [19] em prensa universal Shimadzu® de 500kN no laboratório de estruturas do LECIV/UENF.

### 2.3. Ensaio de pull out

Para analisar o comprimento crítico e tensão cisalhante interfacial entre a fibra de PET e a matriz cimentícia, foi realizado o ensaio de escorregamento Pull out, que caracteriza os aspectos de desempenho e a eficácia da ligação interfacial.

O ensaio avaliou a aderência da fibra à matriz cimentícia, tensão cisalhante máxima ( $\tau_{\max}$ ) que foi determinada através da Equação 1. Consistiu em um teste de pull out, onde foi avaliado o comprimento das fibras



**Figura 5:** Confeção dos corpos-de-prova para o ensaio de Pull out: a) realização do furo no fundo do cap; b) - colocação do parafuso e corte do tubo para ancoragem das fibras; c) - colagem do tubo no cap; d) concretagem e embutimento das fibras com os diferentes comprimentos de ancoragem e e) – Secagem da matriz por 24h.



**Figura 6:** a) - Ensaio de Pull out e b) - corpos-de-prova com escorregamento da fibra.

a serem utilizadas como reforço em matriz cimentícia. O experimento foi realizado na máquina universal INSTRON 5582 no LAMAV/UENF.

$$\tau_{max} = \frac{F}{A} \quad (2)$$

Onde:  $\tau_{max}$  é a tensão cisalhante máxima; F é a força máxima aplicada e A é a área da fibra em contato com a matriz (mm).

As fibras foram preparadas nas dimensões de  $2,5 \pm 0,3$  mm de largura, 0,25 mm de espessura, sendo adotados 4 tamanhos de embutimento, nas dimensões 20, 30, 40, 50 mm. O procedimento de preparação dos corpos-de-prova iniciou-se com o preparo dos moldes e das fibras. Foram moldados os três corpos-de-prova para cada tamanho de embutimento. Todo o processo é apresentado na Figura 5.

A Figura 6(a) apresenta a realização do ensaio na máquina universal INSTRON® 5582 com velocidade de 2 mm/seg e a Figura 6(b) um dos corpos de prova onde ocorreu escorregamento.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

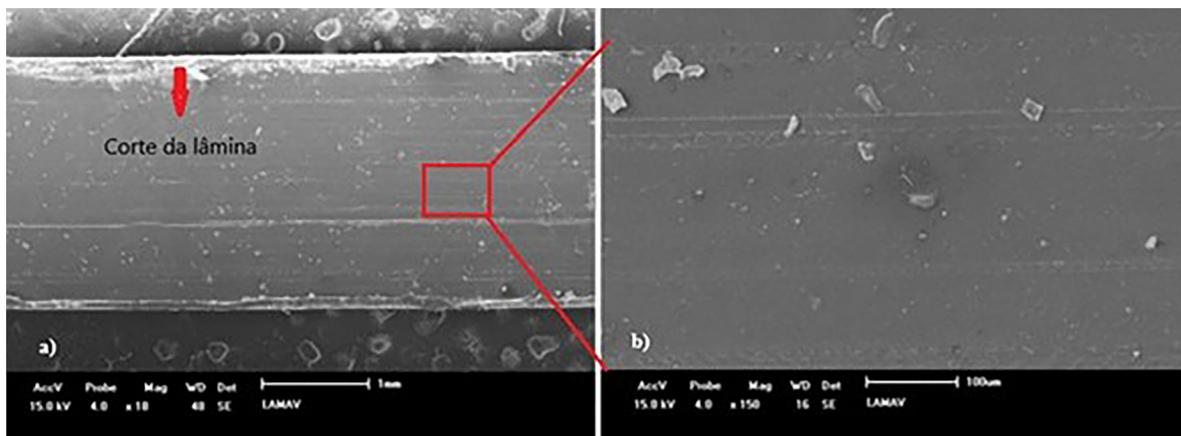
#### 3.1. Ensaio de caracterização da fibra de PET

A massa específica das fibras de PET foi determinada conforme a norma ABNT NBR 16942:2021 [18], apresentando valor de  $0,352 \text{ g/cm}^3$ . Os resultados obtidos no ensaio de tração estão apresentados na Tabela 2, evidenciando a resistência das fibras utilizadas neste estudo.

A Figura 7 apresenta a imagem obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura da fibra de PET utilizada neste estudo, antes da sua incorporação à matriz de concreto. Observa-se que a superfície da fibra se apresenta

**Tabela 2:** Resultados dos ensaios à tração das fibras.

| CORPOS-DE-PROVA | FORÇA MÁXIMA (N) | TENSÃO MÁXIMA (MPa) | TENSÃO MÉDIA (MPa) | DP(MPa) | CV(%) |
|-----------------|------------------|---------------------|--------------------|---------|-------|
| 1               | 83,791           | 178,28              | 177,91             | 3,94    | 2,21% |
| 2               | 81,320           | 174,51              |                    |         |       |
| 3               | 87,041           | 174,78              |                    |         |       |
| 4               | 83,393           | 185,32              |                    |         |       |
| 5               | 85,618           | 176,90              |                    |         |       |
| 6               | 85,278           | 177,66              |                    |         |       |



**Figura 7:** Microscopia Eletrônica de Varredura: fibra sem tratamento mecânico, a) ampliação de 18X e b) ampliação de 150X.

lisa e sem qualquer tipo de tratamento superficial. Essa característica morfológica é relevante, pois influencia diretamente na aderência entre a fibra e a matriz cimentícia. Superfícies lisas tendem a dificultar a ancoragem mecânica, reduzindo a eficiência da transferência de tensões na interface fibra-matriz.

No entanto seu comportamento está de acordo com o que é discutido por MINEIRO *et al.* [10], onde apontam que fibras com geometria ou rugosidade superficial mais acentuadas favorecem mecanismos de ancoragem e melhoram a interação com a matriz. Nesse contexto, o emprego de fibras com maior comprimento pode ser uma estratégia compensatória, uma vez que fibras mais longas apresentam maior área de contato e melhor capacidade de ancoragem por efeito de entrelaçamento e atrito interno, atenuando os efeitos negativos associados à baixa rugosidade superficial.

A ausência de rugosidade na fibra de PET analisada é resultado da não aplicação de tratamento superficial nas fibras. Tal escolha foi proposital, optou-se por utilizar fibras de PET sem tratamento superficial, com o objetivo de avaliar o desempenho estrutural do compósito em condições mais próximas da aplicação prática e sustentável, aproveitando diretamente o material reciclado. Essa abordagem permitiu analisar a contribuição mecânica natural da fibra, isolando o efeito de sua presença e geometria no comportamento ao cisalhamento.

Apesar de tratamentos superficiais melhorarem a aderência fibra-matriz, eles envolvem processos adicionais que aumentam o custo e o impacto ambiental. Assim, o uso de fibras sem modificações está alinhado a uma proposta mais viável e sustentável.

A caracterização da matriz cimentícia no estado endurecido apresentou os seguintes resultados: Resistência à compressão média foi de  $45 \pm 1,5$  MPa e a resistência a tração indireta de  $4,97 \pm 0,25$  MPa.

### 3.2. Ensaio de arrancamento da fibra na matriz cimentícia

Com o objetivo de determinar o comprimento crítico da fibra de PET e a tensão máxima ( $\tau_{\text{máx}}$ ), obtida no instante antes do escorregamento da fibra com a matriz cimentícia, fornecendo assim o tamanho crítico mínimo de embutimento da fibra de PET em matriz cimentícia.

Na Tabela 3 são apresentados os resultados dos ensaios de pull out e seus parâmetros estatísticos.

Nas Figuras 8 e 9 são apresentadas as curvas tensão cisalhante ( $\tau$ ) vs escorregamento do 20, 30 mm e 40, 50 mm de embutimento, respectivamente.

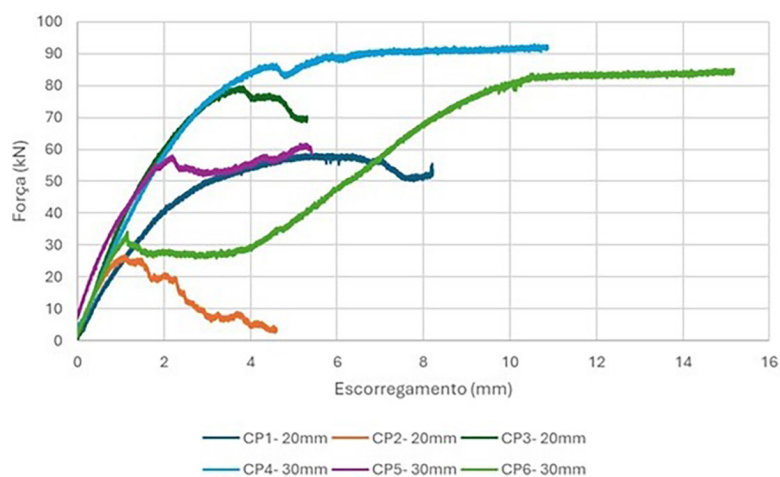
As amostras com 20 mm (CP1, CP2, CP3) têm picos mais baixos comparados às amostras de 30 mm (CP4, CP5, CP6). Isso sugere que o comprimento maior da fibra aumenta a resistência ao arrancamento, devido a uma maior área de interação. Nos corpos-de-prova com 40 mm de ancoragem da fibra (CP-7, CP-8, CP-9) e 50 mm (CP-10, CP-11, CP-12) apresentaram curvas bem similares, com maior estabilidade após o pico, o comprimento adicional contribui para uma melhor dissipação de energia, não apresentaram escorregamento e sim deformação plástica. Nota-se que diferente dos comprimentos de 20 e 30 mm de ancoragem, não teve queda tensão, devido ao rearranjo das moléculas das fibras de PET, que resultam em aumento da resistência da fibra.

Após a realização dos ensaios de Pull out, os corpos-de-prova onde as fibras mostraram escorregamento (FE) e as fibras que não apresentaram escorregamento (FD), assim como a matriz cimentícia, foram submetidos ensaios de MEV, mostrados nas Figuras 10, 11 e 12.

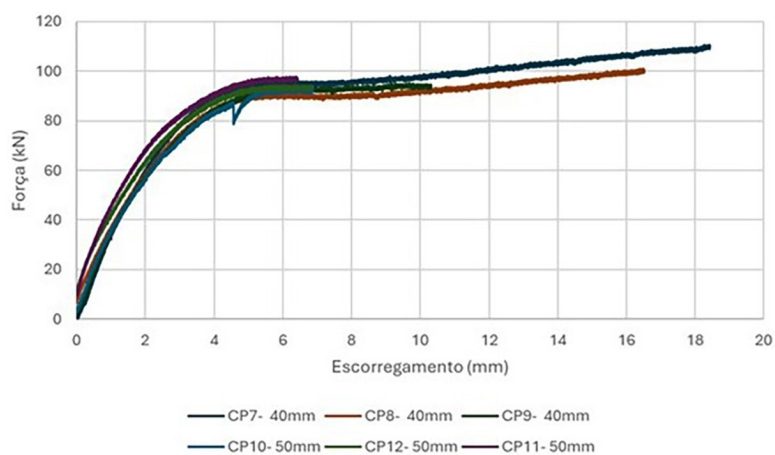
**Tabela 3:** Resultados dos ensaios de pull out e seus parâmetros estatísticos.

| CORPOS-DE-PROVA | COMPRIMENTO DE ANCORAGEM (mm) | FORÇA MÁXIMA (N) | $\tau_{\max}$ (MPa) | $\tau_{\max, med}$ (MPa) | DP (MPa) | CV (%) |
|-----------------|-------------------------------|------------------|---------------------|--------------------------|----------|--------|
| CP-1-20         | 20                            | 58,6             | 0,54                | 0,63                     | 0,10     | 15%    |
| CP-2-20         |                               | 66,0             | 0,61                |                          |          |        |
| CP-3-20         |                               | 79,8             | 0,73                |                          |          |        |
| CP-1-30         | 30                            | 90,3             | 0,56                | 0,49                     | 0,10     | 20%    |
| CP-2-30         |                               | 61,8             | 0,38                |                          |          |        |
| CP-3-30         |                               | 85,2             | 0,52                |                          |          |        |
| CP-1-40         | 40                            | 85,2             | 0,52                | 0,46                     | 0,02     | 5%     |
| CP-2-40         |                               | 105,9            | 0,49                |                          |          |        |
| CP-3-40         |                               | 101,0            | 0,47                |                          |          |        |
| CP-1-50         | 50                            | 93,3             | 0,34                | 0,35                     | 0,00     | 1%     |
| CP-2-50         |                               | 97,8             | 0,35                |                          |          |        |
| CP-3-50         |                               | 94,3             | 0,35                |                          |          |        |

Onde: DP - é o desvio padrão; Cv é o coeficiente de variação.

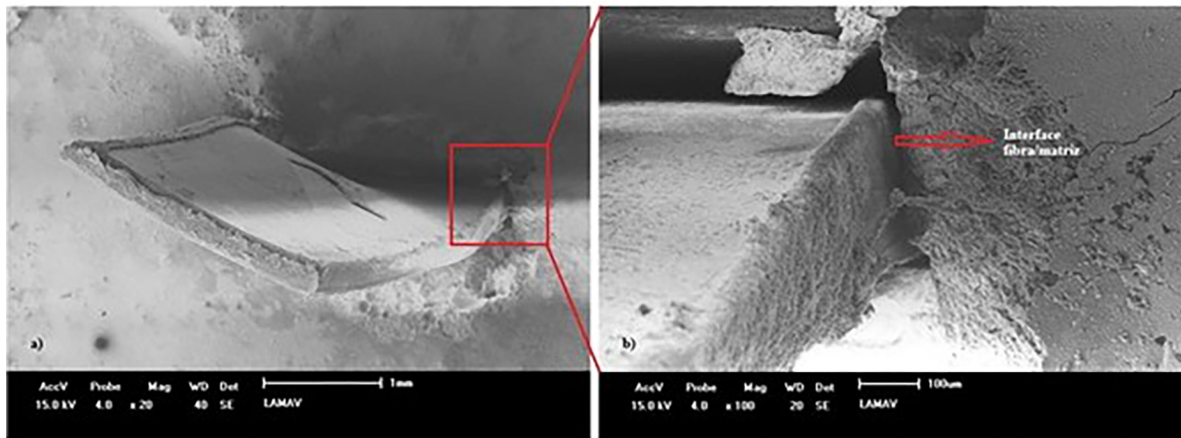


**Figura 8:** Curvas força vs escorregamento dos corpos-de-prova com comprimentos de ancoragem de 20 e 30 mm.  
Fonte: Própria

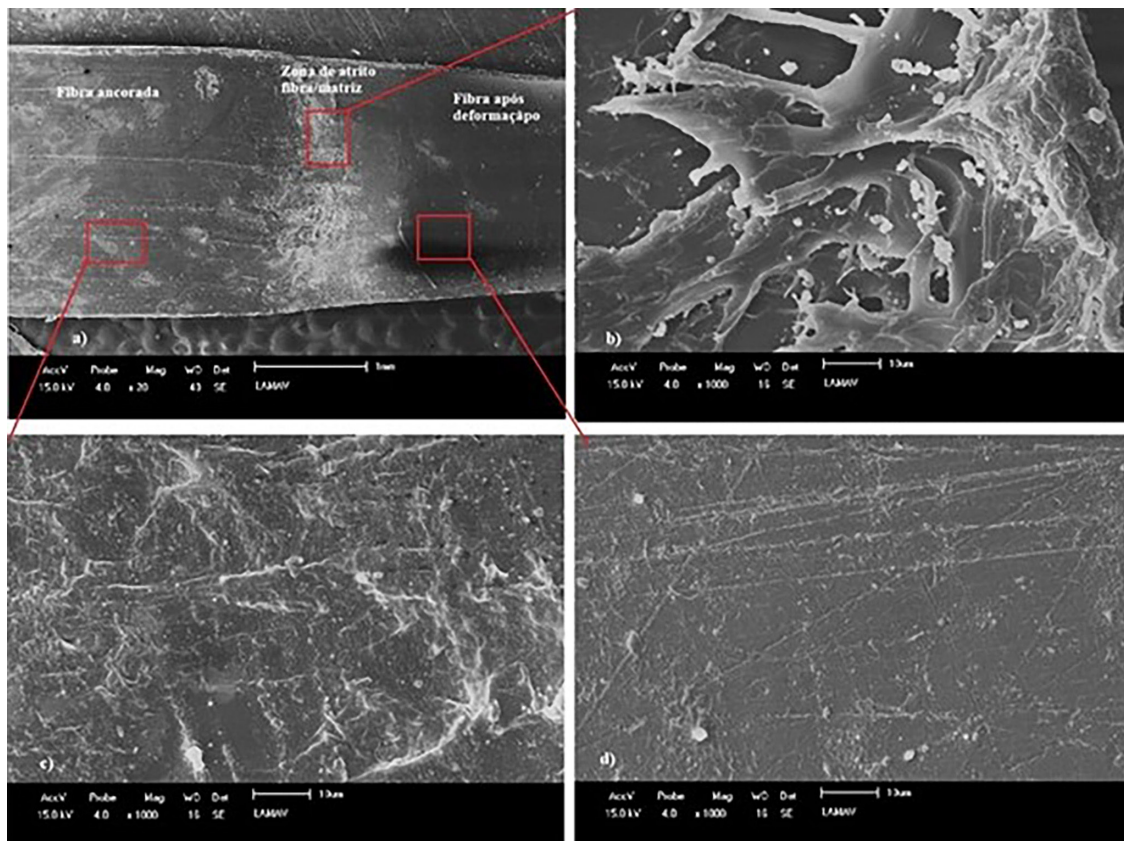


**Figura 9:** Curvas força vs escorregamento dos corpos-de-prova com comprimentos de ancoragem de 40 e 50 mm.



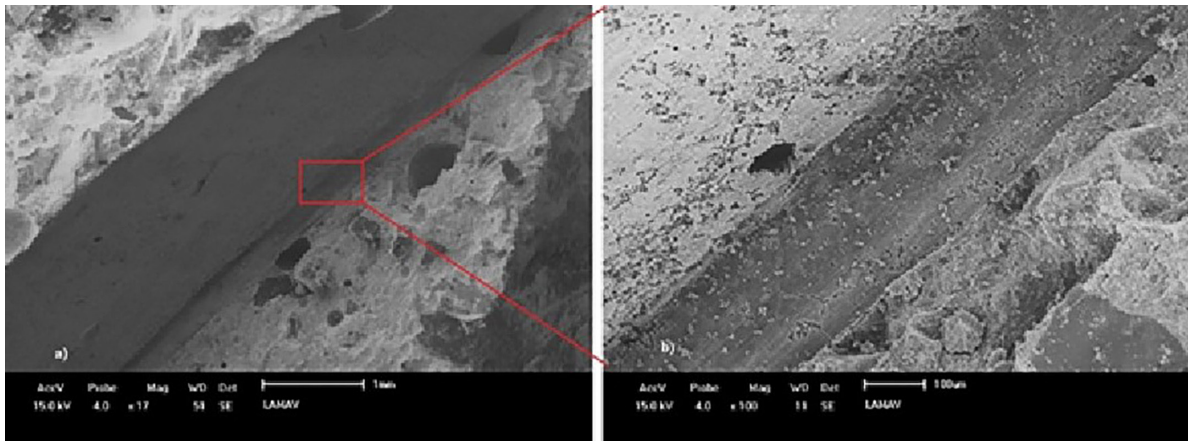


**Figura 10:** MEV após o ensaio: (a)- FE ampliação de 20X e (b)- FE ampliação de 100X Fonte: Própria.



**Figura 11:** MEV após o ensaio: (a)- FD ampliação de 20X, (b)- FD zona de atrito matriz/ fibra ampliação de 1000X, (c)- FD parte ancorada ampliação de 1000X e (d)- FD fibra após deformação ampliação de 1000X.

A análise realizada pelo MEV, as Figuras 10, 11, e 12 acima mencionadas evidenciam que, na fibra que apresentou escorregamento, não foram observados resíduos da matriz aderido à fibra, indicando uma fraca aderência fibra/matriz conforme ilustrado na Figura 10. A Figura 11 por sua vez detalhou uma análise da fibra que apresentou deformação, na Figura 11(a) os detalhes sofreram ampliação de 1000X em três pontos, na Figura 11(b) a interface de atrito entre fibra e matriz que apresentou sinais de degradação devido ao atrito gerado durante o ensaio, na Figura 11(c) a face da fibra ancorada na matriz sofreu degradação em decorrência das condições ambientais alcalinas da matriz e por fim na Figura 11(d) a face deformada da fibra, observada após o ensaio



**Figura 12:** MEV após o ensaio: (a)- matriz ampliação de 17X e (b) matriz ampliação de 100X.

de Pull out, exibiu uma superfície lisa, sem alterações significativas. A Figura 12, por sua vez, revelou a face da fibra embutida na matriz cimentícia, onde foi observou-se descolamento da fibra da matriz. Nessa região, a superfície da matriz exibiu uma aparência lisa, sem sinais de irregularidades ou características rugosas que poderiam favorecer uma melhor aderência entre a fibra e a matriz.

#### 4. CONCLUSÕES

Esta pesquisa apresentou resultados do comportamento da fibra de PET em matriz cimentícia através do ensaio de pull out. notou-se que os tamanhos iniciais de ancoragem ensaiados de 20 e 30 mm não tiveram tamanho suficiente para ancoragem da fibra quando submetida ao ensaio de arrancamento, no entanto os comprimentos de ancoragens de 40 e 50 mm se deformaram sem apresentar escorregamento até a aplicação da carga máxima, fornecendo assim o tamanho mínimo de embutimento de 40 mm. As fibras de PET com 50 mm apresentam maior resistência e estabilidade, enquanto fibras mais curtas de 20 mm mostraram comportamento menos eficiente. Este padrão confirma que o aumento da área de contato entre a fibra e a matriz melhora a aderência e a capacidade de resistir ao arrancamento. Este comportamento se dá pela interface fibra/matriz que por sua face lisa apresenta uma falha na aderência com a matriz, sendo essencial para um melhor desempenho para este tipo de fibra, a necessidade de um maior comprimento de embutimento para efetivar a ancoragem e uma melhor distribuição de tensões, este comportamento pode ter mais clareza através da análise realizada pelo MEV, que sugere uma aderência inadequada entre os dois materiais. Este estudo foi fundamental para a análise do tamanho crítico mínimo da fibra, pois evidenciou que a superfície lisa da fibra analisada é desfavorável para a aderência entre a fibra e a matriz. A ausência de características rugosas ou de microestruturas que possam promover a interação mecânica entre os dois materiais compromete a eficiência da aderência. O tamanho crítico adequado entre a fibra e a matriz é um fator crucial para o desempenho mecânico do compósito, uma vez que a ancoragem efetiva da fibra na matriz é responsável pela transferência de esforços e pela melhora das propriedades do material. Portanto, a avaliação da interface fibra/matriz e a identificação de características que possam melhorar essa aderência são essenciais para aperfeiçoar o comportamento dos compósitos e determinar as condições ideais para o uso de fibras em matrizes cimentícias. A principal contribuição deste estudo foi em fornecer resultados preliminares sobre o comportamento da interface fibra/matriz sob condições de fadiga, ampliando o conhecimento necessário para a incorporação de fibras de PET em concretos reforçados. Considerando que as fibras analisadas apresentam aderência inadequada com a matriz, torna-se fundamental determinar o tamanho mínimo de ancoragem a ser utilizado. Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a aplicação de tratamentos mecânicos nas fibras para melhorar a aderência com a matriz. Uma boa adesão das fibras de PET reciclado ao concreto pode, assim, contribuir para o desenvolvimento de concretos mais sustentáveis e resistentes.

#### 5. BIBLIOGRAPHY

- [1] ASSAAD, J.J., KHALIL, M., KHATIB, J., "Alternatives to enhance the structural performance of pet-modified reinforced concrete beams", *Environments*, v. 9, n. 3, pp. 37, 2022. doi: <http://doi.org/10.3390/environments9030037>.
- [2] CORÓ, A.G., *Investigação das propriedades mecânicas de concretos reforçados com fibras PET*, Ijuí, UNIJUI, 64 p., 2002.

- [3] FOTI, D., “Use of recycled waste pet bottles fibers for the reinforcement of concrete”, *Composite Structures*, v. 96, pp. 396–404, 2013. doi: <http://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.09.019>.
- [4] FRATERNALI, F., CIANCIA, V., CHECHILE, R., *et al.*, “Experimental study of the thermo-mechanical properties of recycled PET fiber-reinforced concrete”, *Composite Structures*, v. 93, n. 9, pp. 2368–2374, 2011. doi: <http://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.03.025>.
- [5] MOHAMMED ALI, T.K., “Shear strength of a reinforced concrete beam by PET fiber”, *Environment, Development and Sustainability*, v. 23, n. 6, pp. 8433–8450, 2021. doi: <http://doi.org/10.1007/s10668-020-00974-w>.
- [6] NECKEL, R.M., “*Shear strength of concrete beams with high-density polyethylene fibers addition*”, Tese de B.Sc., Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2022.
- [7] SIDDIQUE, R., KHATIB, J., KAUR, I., “Use of recycled plastic in concrete: a review”, *Waste Management*, v. 28, n. 10, pp. 1835–1852, 2008. doi: <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.09.011>. PubMed PMID: 17981022.
- [8] ROCHA, T.S., CARDOSO, D.C.T., BITENCOURT JUNIOR, L.A.G., “Macro synthetic fiber pullout behavior in short- and long-term tests”, *Construction & Building Materials*, v. 384, pp. 131491, 2023. doi: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131491>.
- [9] LIN, Xiuyi *et al.* Recycling polyethylene terephthalate wastes as short fibers in strain-hardening cementitious composites (SHCC). *Journal of hazardous materials*, v. 357, p. 40–52, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.05.046>.
- [10] MINEIRO, M.L.R., MONTE, R., MANZOLI, O.L., *et al.*, “An integrated experimental and multiscale numerical methodology for modeling pullout of hooked-end steel fiber from cementitious matrix”, *Construction & Building Materials*, v. 344, pp. 128215, 2022. doi: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128215>.
- [11] ABDALLAH, S., FAN, M., CASHELL, K.A., “Bond-slip behaviour of steel fibres in concrete after exposure to elevated temperatures”, *Construction & Building Materials*, v. 140, pp. 542–551, 2017. doi: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.148>.
- [12] WILLE, K., NAAMAN, A.E., “Pullout behavior of high-strength steel fibers embedded in ultra-high-performance concrete”, *ACI Materials Journal*, v. 109, n. 4, pp. 479–488, 2012.
- [13] MARTINS, A.R., ALMEIDA, R.S., SOUZA, C.R., “Impacto do tratamento superficial de fibras de PET na aderência fibra-matriz em concretos reforçados”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 35, n. 6, pp. 04023072, 2023.
- [14] NAAMAN, A.E., NAJM, H., “Bond-slip mechanisms of steel fibers in concrete”, *ACI Materials Journal*, v. 88, pp. 135–145, 1991.
- [15] SILVA, D.F., LIMA, L.B., SOUZA, T.C., “Desempenho mecânico de concreto de alta resistência com fibras de PET reciclado”, *Construction & Building Materials*, v. 380, pp. 131102, 2023.
- [16] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, *ACI 440.3R-04 Guide test methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for reinforcing or strengthening concrete structures*, Farmington Hills, ACI, 2004.
- [17] FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON, *Fiber reinforced polymer reinforcement in reinforced concrete structures*, Bulletin 40, Lausanne, FIB, 2007.
- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *ABNT NBR 16942 Fibras poliméricas para concreto: requisitos e métodos de ensaio*, Rio de Janeiro, ABNT, 2021.
- [19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *ABNT NBR 5739 Concreto: ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*, Rio de Janeiro, ABNT, 2018.

## DISPONIBILIDADE DE DADOS

Os dados que dão suporte aos resultados deste estudo estão disponíveis mediante solicitação ao autor correspondente.