

## ANÁLISE DO POTENCIAL DE FIBRAS PET RESIDUAIS DE CABOS DE ANCORAGEM DE PLATAFORMA OFFSHORE COMO REFORÇO FIBROSO EM ARGAMASSA

DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/congea.15.24.III-024>

Jacqueline dos Santos (\*), Nathália Pacheco Teixeira, Ana Lúcia Nazareth da Silva, Vivian Karla Castelo Branco Louback Machado Balthar

\* Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Escola Politécnica – Rio de Janeiro, RJ, Brasil; jaqueline.santos.pea2022@poli.ufrj.br.

### RESUMO

O descomissionamento das plataformas offshore é um processo complexo, o qual deve visar a sua sustentabilidade, incluindo a gestão de seus resíduos plásticos, principalmente os cabos de ancoragem. Estes cabos são constituídos, basicamente, de fibras de poliéster à base de poli(tereftalato de etileno) (PET) e por não serem biodegradáveis, não devem ser descartados no fundo do mar ou usados em recifes artificiais. Os cabos possuem alto valor agregado, visto que o PET é um polímero de engenharia, o que torna um incentivo a sua utilização como matéria-prima, com uma ampla variedade de aplicações. Este estudo tem como propósito investigar o potencial do PET como reforço fibroso em argamassa. Desta forma, foram conduzidos experimentos para avaliar o efeito das fibras PET na trabalhabilidade e no desempenho mecânico de uma argamassa de referência (sem reforço fibroso) e em argamassas reforçadas com fibras PET em diferentes frações volumétricas (0,25%, 0,50%, 0,75% e 1,00%), nos comprimentos de 15mm e 20mm. Os materiais foram submetidos a ensaios de caracterização conforme as normas técnicas aplicáveis. Para o ensaio de compressão uniaxial, corpos de prova cilíndricos foram moldados e mantidos em cura úmida até os 28 dias de idade. Para verificar o efeito das fibras na trabalhabilidade da argamassa fresca, foi realizado o ensaio de índice de consistência logo após o preparo das argamassas. Os resultados dos ensaios de índice de consistência indicaram que as fibras PET afetaram a trabalhabilidade, porém, demonstraram bom adensamento em mesa vibratória para a moldagem dos corpos de prova. Na análise de compressão uniaxial, foram observadas variações significativas entre as resistências à compressão de pico das argamassas com fibras de 15mm e 20mm em relação à argamassa de referência, sobretudo nas misturas com maior teor de fibras (0,75% e 1,00%). Na continuidade da pesquisa será avaliado o comportamento sob flexão das argamassas fibrosas para a verificar se o comprimento das fibras adotado terá aderência com a matriz para proporcionar benefícios à tenacidade. Este estudo visa não apenas melhorar as propriedades mecânicas da argamassa, mas também demonstrar o potencial de redução de resíduos, como os oriundos dos processos de descomissionamento de plataformas de petróleo, bem como, a otimização do uso de recursos naturais na construção civil, alinhando-se aos princípios de sustentabilidade.

**PALAVRAS-CHAVE:** Fibras PET, Argamassa, Resíduos, Reciclagem, Trabalhabilidade, Resistência à compressão.

### INTRODUÇÃO

O descomissionamento das instalações de estruturas de óleo e gás O&G *offshore* no Brasil é um desafio, sendo necessário estabelecer procedimentos regulatórios e critérios adequados de execução, que utilizem técnicas modernas, sustentáveis e economicamente atrativas (OLIVEIRA *et al.*, 2021). Quando o processo de descomissionamento de estruturas de O&G *offshore* é realizado de forma inadequada, pode causar a poluição ambiental por resíduos sólidos perigosos e não perigosos, efluentes líquidos (água de lastro e óleos), além de emissões atmosféricas (SANT'ANA e MARUJO, 2023). De acordo com Resolução ANP N° 817/2020, o descomissionamento de instalações contempla a destinação adequada de materiais, resíduos e rejeitos (ANP, 2020).

Ao considerar a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), o aproveitamento destes resíduos auxilia no alcance dos objetivos: (I) proteção da saúde pública e da qualidade ambiental; (II) não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos; e (III) incentivo à indústria da reciclagem, tendo em vista fomentar o uso de matérias-primas e insumos derivados de materiais recicláveis e reciclados (BRASIL, 2010). Um dos aspectos que ajudam a evitar os impactos negativos é a preparação de um sistema de logística reversa, além de aumentar a circularidade do processo. Se bem realizada, a logística reversa diminui o risco da atividade, tempo de desmontagem, consumo de energia e custo de transporte (SANT'ANA e MARUJO, 2023). Os resíduos passíveis de logística reversa contemplam as cerâmicas, o aço e os cabos de ancoragem, principalmente suas fibras (SANT'ANA e MARUJO, 2023).

Os cabos de ancoragem possuem a finalidade de manter a posição de sistemas flutuantes, como as plataformas semissubmersíveis, FSO's (do inglês, *Floating Storage and Offloading*), FPSO's (do inglês, *Floating Production*

*Storage and Offloading*) ou navios cisternas. A fim de evitar o peso dos cabos cada vez **com maiores comprimentos**, os sistemas de ancoragem de amarra e cabos de aço inicialmente utilizados pela indústria foram sendo substituídos por cabos de fibra sintética (ASSIS, 2013). Na composição dos cabos de fibra sintética é comum o uso de polímeros plásticos, entre eles o polietileno, a poliamida, o poliéster, o polipropileno, a poliaramida e o polietileno de alta densidade (ASSIS, 2013). Estes cabos merecem atenção, pois não são compostos por materiais biodegradáveis. Com o descomissionamento das plataformas *offshore* previsto para os próximos anos no país, uma grande quantidade de cabos sintéticos de poliéster será descartada. Por não serem biodegradáveis, os cabos de poliéster não devem ser descartados no oceano (SUDAIA *et al.*, 2018). Isso ressalta a urgência de se desenvolver métodos eficazes para o reaproveitamento dos filamentos desses cabos, visando minimizar o impacto ambiental.

Uma forma interessante para o reaproveitamento dos cabos de poliéster é como reforço fibroso em misturas cimentícias, uma vez que a baixa capacidade de deformação normalmente apresentada por esses materiais pode ser mitigada pela incorporação de fibras, devido ao seu efeito de ponte de transferência de tensões na matriz. Oliveira *et al.* (2021) identificaram que os materiais poliméricos mais utilizados na formulação de concretos, principalmente na forma de fibras curtas, são polipropileno (PP), polietileno (PE), poli (álcool vinílico) (PVA), poli(cloreto de vinila) (PVC), nylon, aramidas e poliésteres. Mesmo com possíveis ganhos ambientais, é essencial a avaliação do desempenho dos produtos cimentícios com plásticos residuais em sua composição, por meio de ensaios laboratoriais de caracterização experimental. Estes foram casos dos estudos realizados por Oliveira *et al.* (2021) e Teixeira e Balthar (2023), que utilizaram fibras PET de cabos de ancoragem de plataformas de petróleo. Oliveira *et al.* (2021) avaliaram o efeito de resíduos PET de cabo de ancoragem na compressão e absorção de água de concretos. O concreto de referência, composto por cimento, areia, brita e água ( $a/c = 0,55$ ), teve a areia substituída por fibras PET em teores de 5% e 10%. Aos 28 dias, os concretos alcançaram as resistências de  $25,7 \pm 1,5$  MPa (REF),  $29,0 \pm 2,4$  MPa (5% fibras) e  $18,5 \pm 0,7$  MPa (10% fibras). As absorções totais de água foram de 6,3% (REF), 5,0% (5% fibras) e 8,1% (10% fibras). Os autores atribuíram à queda de resistência pelo uso das fibras e a degradação deste material em ambiente alcalino, que está relacionada à geometria da fibra, ao grau de dispersão e aderência fibra-matriz (OLIVEIRA *et al.*, 2021). Teixeira e Balthar (2023) utilizaram em sua pesquisa as fibras PET retiradas de um cabo de ancoragem utilizado em uma plataforma *offshore* por 10 anos. O microconcreto de referência era composto pelos seguintes materiais: 453,06 kg/m<sup>3</sup> (cimento CPV-ARI), 189,43 kg/m<sup>3</sup> (sílica ativa), 269,47 kg/m<sup>3</sup> (microesfera cerâmica), 448,08 kg/m<sup>3</sup> (água) e 11,73 kg/m<sup>3</sup> (dispersante). As fibras tinham 10 mm de comprimento, 28,9 µm de diâmetro (média de três medições no comprimento de 22 filamentos) e resistência à tração média de 1014 MPa. A referência (REF) foi reforçada com fibras PET por substituições de todos os materiais nas frações volumétricas de 0,5% (PET0,5) e 1,0% (PET1,0). As autoras verificaram o prejuízo causado pelas fibras na trabalhabilidade, uma vez que a área medida no ensaio de miniespalhamento da mistura de referência foi de  $76,6 \pm 7,6$  cm<sup>2</sup>. Também foram observadas reduções na resistência à compressão entre a referência e as misturas fibrosas, que foram iguais a 26,5 MPa (REF), 15,4 MPa (PET0,5) e 13,7 MPa (PET1,0). Este comportamento se repetiu no módulo de elasticidade, com resultados de 7,9 GPa (REF), 6,4 GPa (PET0,5) e 5,9 GPa (PET1,0). As autoras concluíram que embora as fibras tenham impactado negativamente em algumas propriedades, as resistências alcançadas foram adequadas para a produção de painéis de vedação estruturais. Além disso, o uso de fibras PET proporcionou benefícios significativos à capacidade de deformação dos materiais (TEIXEIRA e BALTHAR, 2023).

Com o intuito de promover soluções mais sustentáveis para o descarte dos cabos de ancoragem das plataformas *offshore*, **formulações cimentícias** com fibras de poliéster à base de **poli(tereftalato de etileno)** (PET). Este estudo investiga o potencial de reutilização dos filamentos de PET como reforço fibroso em argamassas. A pesquisa visou o aproveitamento das propriedades mecânicas e dimensionais dessas fibras, mesmo sendo materiais residuais, contribuindo para a redução de impactos ambientais. Até o momento, foram analisados os efeitos das fibras PET nos estados fresco e endurecido de argamassas sem reforço, de argamassas com diferentes frações volumétricas de PET e em dois comprimentos diferentes (15mm e 20mm). O programa experimental foi conduzido no Núcleo de Ensino e Pesquisa em Materiais e Tecnologias de Baixo Impacto Ambiental na Construção Sustentável (NUMATS – POLI/COPPE/UFRJ), reforçando o compromisso com práticas de gestão ambiental e construção sustentável.

## OBJETIVOS

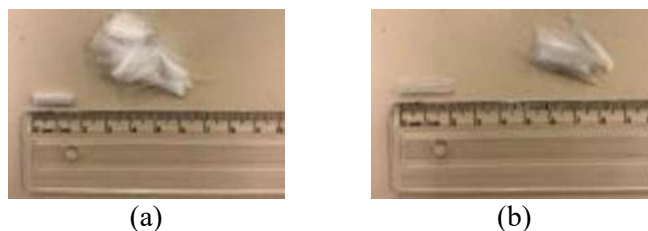
A pesquisa teve como objetivo um melhor gerenciamento dos resíduos gerados no descomissionamento de plataformas offshore no Brasil, propondo a mitigação dos impactos ambientais por meio do reaproveitamento dos filamentos de cabos de poliéster. A estratégia apresentada busca não apenas reduzir o descarte inadequado de resíduos, mas também introduzir uma alternativa sustentável para a indústria da construção civil, utilizando uma fibra residual de alto desempenho. O estudo avaliou a viabilidade de incorporar essas fibras, obtidas a partir do corte de filamentos de cabos de ancoragem, em misturas cimentícias, promovendo o conceito de economia circular. Para alcançar os objetivos citados, a capacidade de reforço das fibras foi estudada em argamassa, analisando os efeitos na trabalhabilidade e no desempenho mecânico em compressão uniaxial. Comparou-se uma argamassa de referência (sem reforço fibroso) com argamassas reforçadas com fibras de PET em diferentes frações volumétricas (0,25%, 0,50%, 0,75% e 1,00%). Além

disso, na continuidade da pesquisa, será avaliado o efeito das fibras PET no desempenho mecânico sob flexão e nas propriedades físicas das argamassas, reforçando o papel do reaproveitamento de resíduos como uma solução inovadora e ecologicamente responsável para os desafios ambientais no setor petrolífero.

## METODOLOGIA

### Caracterização dos Materiais

Os seguintes materiais foram adotados para as confecções das argamassas: cimento CPV-ARI, areia lavada de rio, água do sistema de abastecimento do RJ e fibras PET com 15 mm de comprimento (Figura 1a) e de 20 mm (Figura 1b), obtidas pelo corte de filamentos de um cabo de ancoragem de plataforma *offshore* doados pelo IMA – UFRJ.



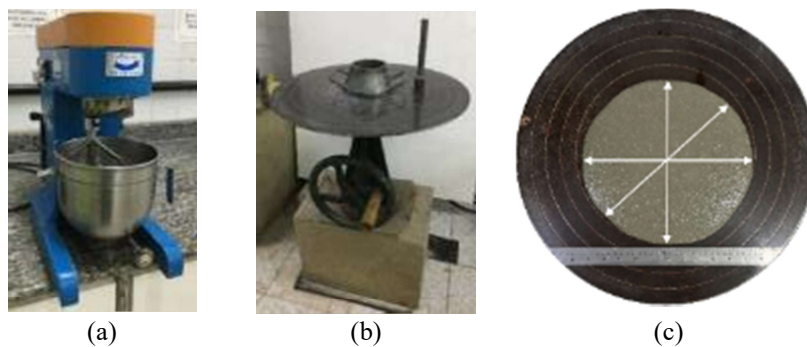
**Figura 1: Aspectos das fibras após os cortes: (a) Fibras com 15 mm de comprimento; (b) Fibras com 20 mm de comprimento.**

A composição química do cimento foi determinada a partir de análise semiquantitativa por espectroscopia por fluorescência de energia dispersiva de raios-X e sua perda ao fogo (média de três amostras), de acordo com o procedimento da norma ABNT NM 18 (2012). As massas específicas do cimento e das fibras PET foram obtidas por picnometria a gás hélio, enquanto as massas específicas e absorção de água da areia foram avaliadas (em triplicata), de acordo com as normas ABNT NBR 16916 (2021). A distribuição granulométrica do cimento foi determinada por ensaio de granulometria a laser, enquanto para a areia foi adotado o procedimento da norma ABNT NBR 17054 (2022), respectivamente. As fibras também foram submetidas às análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) para a medição do diâmetro, que foi realizado em 3 pontos ao longo do comprimento de 22 filamentos, e para a verificação de sua morfologia. Adicionalmente, as fibras foram submetidas ao ensaio de resistência à tração direta, que foi realizado em 14 amostras preparadas de acordo com a metodologia da ASTM C1557 (2014).

### Dosagem e Caracterização das Argamassas

A dosagem das argamassas teve uma relação entre as massas de cimento e de areia de 1: 3, enquanto a relação água-cimento foi de 0,7. Os consumos dos materiais granulares da argamassa de referência foram os seguintes: 452,20 kg/m<sup>3</sup> (cimento), 1356,60 kg/m<sup>3</sup> (areia) e 316,54 kg/m<sup>3</sup> (água). Além da argamassa de referência (REF), foram avaliadas argamassas confeccionadas com fibras de 15 mm ou 20 mm de comprimento, denominadas em função do comprimento das fibras como M15 ou M20, em diferentes frações volumétricas para ambos os comprimentos (com a fração volumétrica também informada na nomenclatura de cada argamassa). As proporções dos materiais granulares e da água foram mantidas e as fibras substituíram parcialmente todos os materiais em frações volumétricas de 0,25% (M15-0,25 e M20-0,25), 0,50% (M15-0,50 e M20-0,50), 0,75% (M15-0,75 e M20-0,75) e 1,00% (M15-1,00 e M20-1,00). As argamassas foram preparadas de acordo com o procedimento da norma ABNT NBR 16541 (2016), em uma argamassadeira com capacidade de 5 litros (Figura 2a).

O ensaio do índice de consistência foi realizado logo após o preparo das argamassas, seguindo o procedimento da norma ABNT NBR 13276 (2016), com o objetivo de verificar o impacto das fibras na trabalhabilidade da argamassa fresca. O ensaio foi realizado em triplicata, em uma mesa para índice de consistência (Figura 2b). Para iniciar o ensaio, tanto a superfície da mesa de consistência quanto as paredes do molde em formato de tronco de cone foram previamente umedecidas. Em seguida, o molde foi centralizado na mesa e preenchido com três camadas de argamassa, sendo aplicados 15, 10 e 5 golpes com o soquete em cada camada, respectivamente. Após o preenchimento, a superfície foi nivelada com uma espátula, e o molde, então, removido. Posteriormente, a mesa de consistência sofreu 30 quedas em um intervalo de 30 segundos. O índice de consistência foi determinado pela média três leituras do diâmetro da argamassa espalhada, conforme ilustrado na Figura 2c.



**Figura 2: Preparo e caracterização reológica das argamassas: (a) Argamassadeira; (b) Mesa para índice de consistência com tronco e soquete; (c) Indicações das medições dos diâmetros.**

Para o ensaio de compressão uniaxial foram moldados corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura, os quais foram mantidos desmoldados após 24 horas e mantidos em cura úmida até os 28 dias de idade, com seu faceados em torno mecânico antes da realização do ensaio para a garantia da planificação e paralelismo das superfícies. O ensaio de compressão uniaxial foi realizado em quatro corpos de prova por mistura, em uma prensa com célula de carga de 100kN e com velocidade de deslocamento do travessão de 0,1 mm/min.. Os deslocamentos longitudinais foram medidos por dois transdutores elétricos diametralmente opostos e fixados na zona central do corpo de prova (Figura 3).



**Figura 3: Ensaio de compressão uniaxial. Fonte: Autor do Trabalho.**

A partir das curvas tensão *versus* deformação registradas nos ensaios de compressão uniaxial foram calculados os módulos de elasticidade secantes das argamassas através da Equação 1.

$$E = \left( \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_{a2} - \varepsilon_{a1}} \right) \quad \text{equação (1)}$$

Onde:

E – Módulo de elasticidade (GPa);

$\sigma_2$  – Tensão correspondente à 30% da tensão máxima (MPa);

$\sigma_1$  – Tensão correspondente à deformação  $\varepsilon_{a1}$  (MPa);

$\varepsilon_{a2}$  – Deformação axial correspondente à tensão  $\sigma_2$  (mm/mm);

$\varepsilon_{a1}$  – Deformação axial igual a  $5 \times 10^{-5}$  (mm/mm).

As propriedades das argamassas foram submetidas à análise estatística pelo método da Análise de Variância (ANOVA) do programa computacional OriginPro2016. Para a comparação das médias foi adotado o Método de Tukey, a um nível de confiança igual a 95%.

## RESULTADOS

### Propriedades dos Materiais

A composição química do cimento e sua perda ao fogo média estão apresentadas na Tabela 1, com a predominância de óxido de cálcio (CaO) e dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>) e em conformidade com os critérios da norma ABNT NBR 16697 (2018) em relação aos teores de PF e MgO (menores ou iguais a 6,5%) e SO<sub>3</sub> (menor ou igual a 4,5%). A massa específica do cimento foi igual a 3080,6 ± 3,5 kg/m<sup>3</sup>. A absorção de água da areia foi igual a 2,34 ± 0,13 %, enquanto suas massas específicas foram iguais a: 2386,4 ± 15,0 kg/m<sup>3</sup> (condição seca) e a 2442,3 ± 18,0 kg/m<sup>3</sup> (condição saturada superfície seca).



Tabela 1. Composição química do cimento. Fonte: Teixeira e Balthar (2023).

Material	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	SrO	TiO <sub>2</sub>	PF
CPV-ARI	12,57	3,54	4,10	68,74	0,46	3,55	0,32	0,26	6,34 ± 0,05

As curvas típicas das distribuições granulométricas do cimento e da areia estão apresentadas na Figura 4. Os seguintes diâmetros mínimos (D<sub>10</sub>), médios (D<sub>50</sub>) e máximos (D<sub>90</sub>) foram alcançados pelos materiais granulares: D<sub>10</sub> = 2,71 ± 0,01 µm, D<sub>50</sub> = 17,07 ± 0,06 µm e D<sub>90</sub> = 42,47 ± 0,08 µm (cimento); D<sub>10</sub> = 0,21 ± 0,01 mm, D<sub>50</sub> = 0,70 ± 0,02 mm e D<sub>90</sub> = 2,11 ± 0,03 mm (areia).

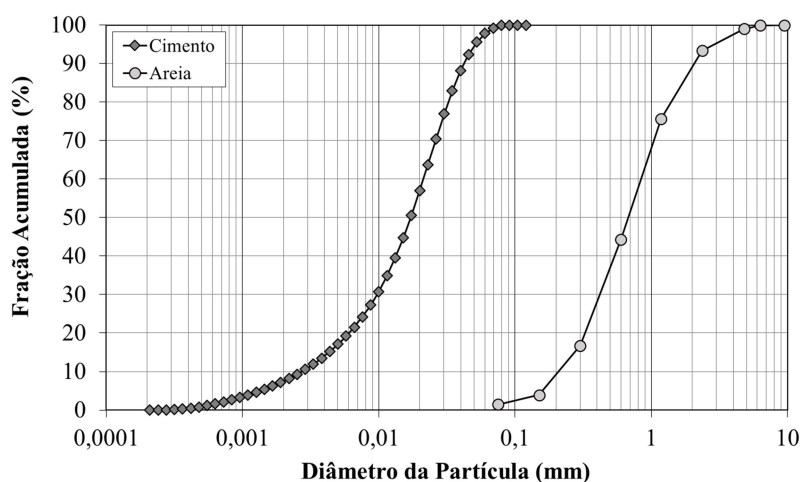


Figura 4: Distribuição granulométrica do cimento e da areia.

As fibras PET apresentaram massa específica igual a 1445,0 ± 0,9 kg/m<sup>3</sup> e diâmetro médio de 30,8 ± 1,6 µm (Figura 5a). A morfologia cilíndrica da fibra pode ser observada na Figura 5b (MEV, ampliação 1800x). A resistência à tração direta das fibras foi igual a 1033 ± 195 MPa (CV = 18,8%). Os aspectos da fibra antes e após o ensaio de tração estão ilustrados na Figura 5c e Figura 5d, respectivamente.

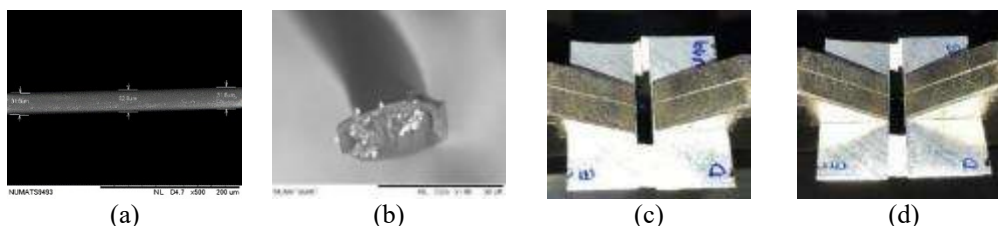


Figura 5: Aspectos da fibra: (a) Medição de diâmetro; (b) MEV da fibra; (c) Fibra íntegra; (d) Fibra rompida. Fonte: Autor do Trabalho.

### Reologia das Argamassas

Os aspectos das consistências das argamassas estão apresentados na Figura 6a (REF), Figura 6b (M15-0,25), Figura 6c (M15-0,50), Figura 6d (M15-0,75), Figura 6e (M15-1,00), Figura 6f (M20-0,25), Figura 6g (M20-0,50), Figura 6h (M20-0,75) e Figura 6i (M20-1,00). Os índices de consistência médios das argamassas, os respectivos desvios-padrões (DP) e coeficientes de variação (CV), estão apresentados na Tabela 2. De acordo com as análises estatísticas dos resultados, os reforços fibrosos impactaram em variações significativas entre os índices de consistência das argamassas fibrosas e a REF, com reduções nessa propriedade de até 39%, ao comparar argamassas M15-1,00 e REF e de 41% ao comparar argamassas M20-1,00 e REF. Entretanto, é possível observar que as misturas não apresentaram segregação ou exsudação, mesmo para as frações mais elevadas de fibras, o que demonstra trabalhabilidade o suficiente para que as mesmas sejam moldadas apenas com vibração mecânica. Teixeira e Balthar (2023) observaram comportamentos semelhantes, onde os microconcretos fibrosos não apresentaram segregação ou exsudação dos materiais, porém demonstraram maior viscosidade em comparação à mistura de referência.

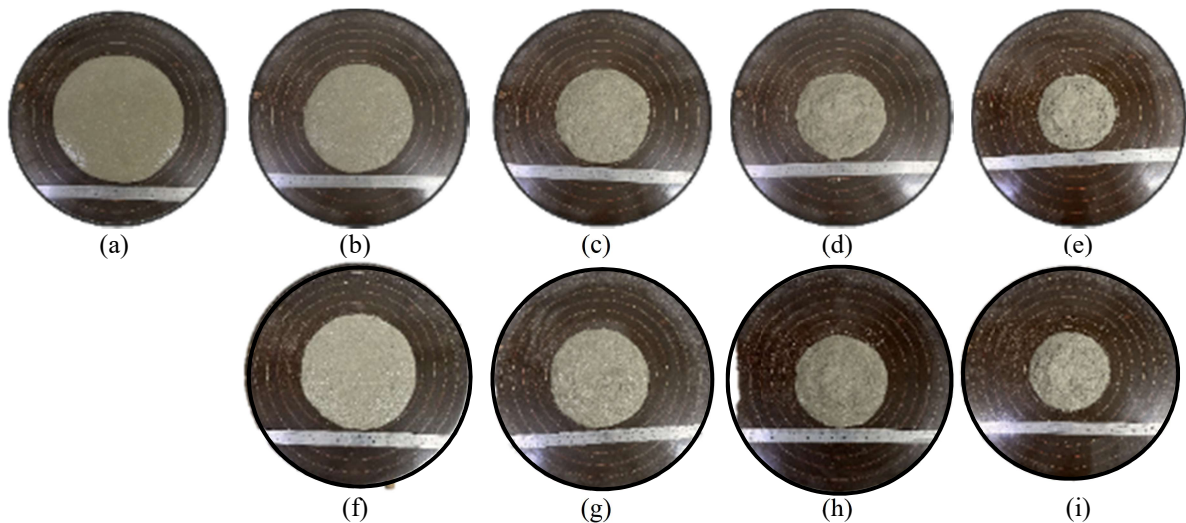


Figura 6: Aspectos das argamassas espalhadas: (a) REF; (b) M15-0,25; (c) M15-0,50; (d) M15-0,75; (e) M15-1,00; (f) M20-0,25; (g) M20-0,50; (h) M20-0,75; (i) M20-1,00. Fonte: Autor do Trabalho.

Tabela 2. Índices de consistência das argamassas.

Mistura	Índice de Consistência $\pm$ DP (mm) / CV
REF	309 $\pm$ 1,0 / 0,3
M15-0,25	256 $\pm$ 7,7 / 3,0
M15-0,50	228 $\pm$ 3,5 / 1,5
M15-0,75	207 $\pm$ 2,5 / 1,2
M15-1,00	188 $\pm$ 6,3 / 3,4
M20-0,25	258 $\pm$ 1,7 / 0,6
M20-0,50	224 $\pm$ 3,8 / 1,7
M20-0,75	206 $\pm$ 4,2 / 2,0
M20-1,00	182 $\pm$ 1,7 / 0,9

### Propriedades Mecânicas das Argamassas

As curvas típicas tensão *versus* deformação das argamassas estão apresentadas na Figura 7a (REF, M15-0,50 e M15-1,00) e Figura 7b (REF, M20-0,50 e M20-1,00). Os resultados médios de resistência à compressão de pico ( $f_c$ ), módulo de elasticidade (E) e deformação axial de pico ( $\epsilon_a$ ) das argamassas, bem como os respectivos desvios-padrões (DP) e coeficientes de variação (CV), estão apresentados na Tabela 3. Os aspectos dos corpos de prova após os ensaios estão mostrados na Figura 8a (REF), Figura 8b (M15-0,25), Figura 8c (M15-0,50), Figura 8d (M15-0,75), Figura 8e (M15-1,00), Figura 8f (M20-0,25), Figura 8g (M20-0,50), Figura 8h (M20-0,75) e Figura 8i (M20-1,00).

As análises estatísticas dos resultados indicaram variações significativas entre as resistências à compressão de pico das argamassas com fibras de 15mm em relação à argamassa de referência, com decréscimos nesta propriedade de 14,9% (M15-0,25), 17,6% (M15-0,50), 24,6% (M15-0,75) e 22,3% (M15-1,00). Ao comparar as resistências das argamassas com fibras de 20mm com a REF também ocorreram variações significativas, com reduções de resistência iguais a 20,0% (M20-0,25), 18,3% (M20-0,50), 21,9% (M20-0,75) e 31,7% (M20-1,00). No entanto, os reforços fibrosos não impactaram em variações significativas entre os módulos de elasticidade das argamassas estudadas para ambos os comprimentos de fibras, com exceção da M20-0,50, cujo módulo foi 14,1% superior ao da REF. Os reforços fibrosos também não impactaram em variações significativas entre as deformações axiais de pico das argamassas estudadas para ambos os comprimentos de fibras. Os modos de ruptura dos corpos de prova foram predominantemente por cisalhamento (ver as Figuras 8a-i), com a ocorrência do comportamento frágil pela REF e do comportamento dúctil pelas argamassas fibrosas, provavelmente devido à elevada tenacidade das fibras de poliéster presentes na composição.

Durante o desenvolvimento da pesquisa havia a expectativa sobre prejuízos à resistência à compressão de pico, uma vez que as fibras PET substituíram parcialmente todos os materiais das argamassas, inclusive o cimento. Esse comportamento está de acordo com a literatura, conforme as pesquisas de Oliveira *et al.* (2021) e de Teixeira e Balthar (2023). Oliveira *et al.* (2021) relataram uma diminuição máxima de 28,0% na resistência à compressão de concreto com fibras PET de cabos de ancoragem, em substituição parcial à areia. Da mesma forma, Teixeira e Balthar (2023) observaram uma queda de até 48,3% na resistência de microconcretos reforçados com fibras PET de cabos de ancoragem (PET1,0). Magalhães e Fernandes (2015) constataram uma redução de até 55,5% na resistência de compósitos cimentícios reforçados com fibras PET, obtidas por extrusão de flocos de garrafas plásticas, em comparação à referência.

Entretanto, é importante ressaltar que ao comparar as curvas tensão-deformação das misturas fibrosas com a REF, tanto para as argamassas com fibras de 15mm (Figura 7a) quanto para as misturas com fibras de 20mm (Figura 7b), é possível verificar que as fibras PET proporcionaram benefícios à capacidade de deformação. A resistência de pico da REF sofreu uma queda brusca, com o fim do ensaio caracterizado pela ruptura do material a uma deformação média de  $7399\mu\epsilon$ . Já as argamassas fibrosas sofreram quedas da resistência de pico mais suaves que a REF, com a manutenção do ensaio até deformações máximas cerca de 4 vezes superiores à deformação máxima da mistura de referência. Além disso, observa-se que as áreas sob as curvas típicas das argamassas fibrosas são maiores em comparação à da argamassa de referência, evidenciando um aumento da tenacidade com a adição de fibras e com o aumento do teor de fibras. A diferença de comportamento entre a argamassa de referência e as argamassas fibrosas indica que as fibras desempenharam o papel de ponte de transferência de tensões.

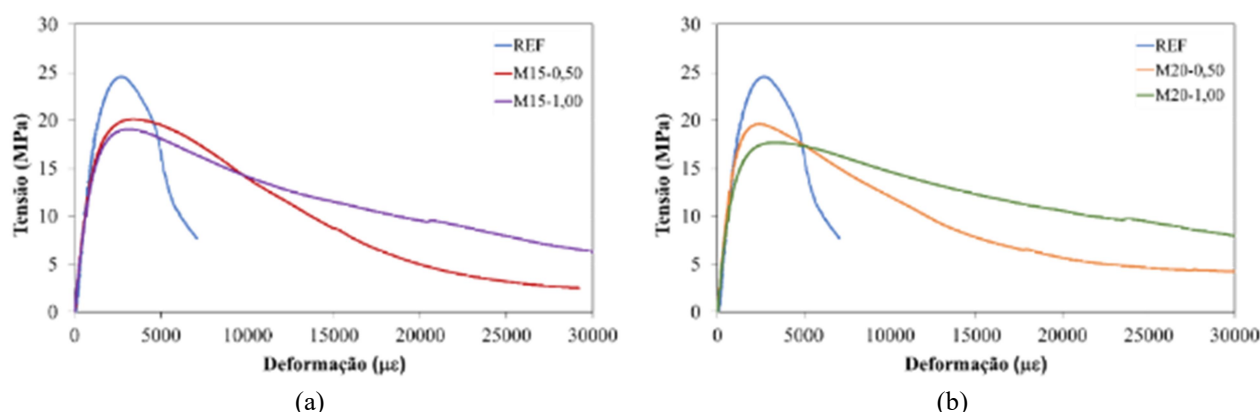
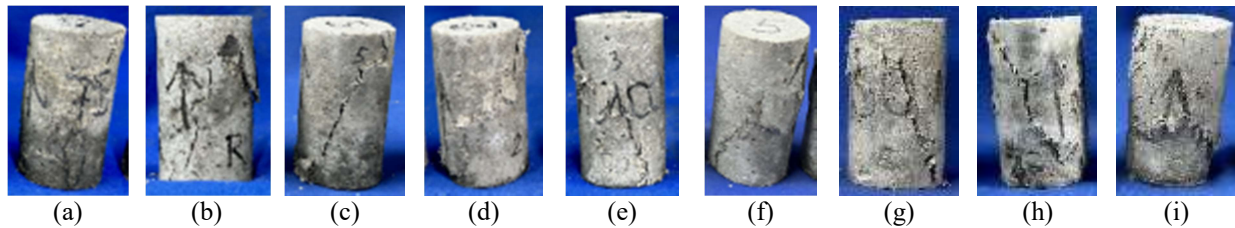


Figura 7: Curvas típicas tensão-deformação das argamassas. (a) REF, M15-0,50 e M15-1,00; (b) REF, M20-0,50 e M20-1,00. Fonte: Autor do Trabalho.

Tabela 3. Propriedades mecânicas das argamassas. Fonte: Autor do Trabalho.

Mistura	$f_c \pm DP$ (MPa) / CV	$E \pm DP$ (GPa) / CV	$\epsilon_a \pm DP$ ( $\mu\epsilon$ ) / CV
REF	$24,8 \pm 0,2$ / 0,9	$17,8 \pm 0,4$ / 2,0	$2775 \pm 246$ / 8,9
M15-0,25	$21,1 \pm 0,7$ / 3,5	$19,6 \pm 1,3$ / 6,9	$2768 \pm 206$ / 7,4
M15-0,50	$20,5 \pm 0,8$ / 4,0	$18,5 \pm 0,7$ / 4,0	$3121 \pm 218$ / 7,0
M15-0,75	$18,7 \pm 0,8$ / 4,5	$18,8 \pm 0,9$ / 4,7	$3045 \pm 137$ / 4,5
M15-1,00	$19,3 \pm 0,7$ / 3,6	$18,2 \pm 1,5$ / 8,2	$2844 \pm 189$ / 6,7
M20-0,25	$19,8 \pm 1,0$ / 5,2	$18,3 \pm 0,5$ / 2,5	$2593 \pm 167$ / 6,4
M20-0,50	$20,3 \pm 0,9$ / 4,3	$20,3 \pm 1,6$ / 8,0	$2670 \pm 209$ / 7,8
M20-0,75	$19,4 \pm 1,3$ / 6,8	$19,2 \pm 1,0$ / 5,0	$2607 \pm 225$ / 8,6
M20-1,00	$16,9 \pm 0,9$ / 5,1	$19,2 \pm 0,7$ / 3,7	$2876 \pm 493$ / 17,1



**Figura 8: Modos de ruptura das argamassas: (a) REF; (b) M15-0,25; (c) M15-0,50; (d) M15-0,75; (e) M15-1,00; (f) M20-0,25; (g) M20-0,50; (h) M20-0,75; (i) M20-1,00. Fonte: Autor do Trabalho.**

## CONCLUSÕES

Com os experimentos realizados até o momento foi possível investigar o efeito das fibras PET em dois comprimentos na trabalhabilidade de uma argamassa e em suas propriedades mecânicas no estado endurecido, através das análises de resistência à compressão, módulo de elasticidade e deformação axial.

Através dos ensaios de índice de consistência, foram constatados prejuízos à trabalhabilidade em relação à argamassa de referência para todos os teores adotados e com os dois comprimentos de fibras. Entretanto, as argamassas fibrosas apresentaram consistências o suficiente para a moldagem dos corpos de prova com adensamento em mesa vibratória. Além disso, as misturas não apresentaram segregação ou exsudação, mesmo nas frações mais elevadas de fibras, demonstrando aspecto homogêneo.

Os resultados dos ensaios mecânicos indicaram que as argamassas com a adição das fibras PET apresentaram desempenho aceitável, sem variações entre os módulos de elasticidades e entre as deformações axiais de pico das argamassas estudadas, ainda que na resistência à compressão de pico tenha ocorrido decréscimos nas misturas fibrosas, em relação a mistura de referência.

A próxima etapa da pesquisa avaliará o comportamento das argamassas fibrosas sob flexão, com o objetivo de verificar se o comprimento das fibras adotado terá aderência com a matriz para proporcionar benefícios à tenacidade. O reaproveitamento das fibras de poliéster provenientes dos cabos de ancoragem de plataformas *offshore* como reforço fibroso em argamassas representa uma alternativa sustentável para a gestão de resíduos, especialmente diante dos impactos ambientais gerados pelo descomissionamento de plataformas de petróleo. Além disso, essa solução apresenta à indústria da construção civil um novo material para o reforço de misturas cimentícias, promovendo práticas mais ecológicas e responsáveis.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), Resolução N° 817, de 24 de abril de 2020.
2. American Society for Testing and Materials (ASTM), **ASTM C1557**: Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus of Fibers, U.S.A, 2014.
3. Assis, J.S. **Sistemas de ancoragem de plataformas: manuseio de âncoras em águas profundas**. Repositório Institucional da Produção Científica da Marinha do Brasil (RI-MB), 2013.
4. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), **NBR 16916**: Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.
5. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), **NBR 17054**: Agregados — Determinação da composição granulométrica — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022.
6. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.
7. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), **NBR 16541**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro, 2016.
8. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), **NBR NM 18**: Cimento Portland – Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012.
9. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), **NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos, Rio de Janeiro, 2018.
10. BRASIL. Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm)>. Acesso em: 17 set. 2024.
11. Magalhães, M.S., Fernandes, M.S.V. Bending behaviour of recycled PET fiber reinforced cement-based composite. *International Journal of Engineering and Technology*, V. 7, 2015.



12. Sant'ana, J. F.; Marujo, L. G.. **Boas práticas na logística reversa do descomissionamento offshore de óleo e gás.** Revista de Engenharia de Produção, Rio de Janeiro, v. 10, n. 2, p. 123-145, 2023.
13. Sudaia, D.P., Bastos, M.B., Fernandes, E.B., Nascimento, C.R., Pacheco, E.B.A.V., Silva, A.L.N. **Sustainable recycling of mooring ropes form decommissioned offshore platforms.** Marine Pollution Bulletin, vol. 135, 2018.
14. Oliveira, C.I.R., Acevedo, N.I.A., Rocha, M.C.G., Souza, I.D., Reyes, V.M.T., Assis, J.T. **Desenvolvimento e caracterização de concretos produzidos com substituição parcial do agregado miúdo por resíduos de cabos de plataformas de petróleo.** Revista Matéria, v.26, n.2, 2021.
15. Teixeira, N.P., Balthar, V.K.C.B.L.M. **Caracterização Física e Mecânica de Microconcretos Leves Reforçados com Fibras PET Residuais para Aplicação em Elementos Arquitetônicos.** Congresso Luso-Brasileiro em Arquitetura e Engenharia, 2023.