

7º CONRESOL

7º Congresso Sul-Americano
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade

CURITIBA/PR - 14 a 16 de Maio de 2024

ESTUDO DA REOLOGIA E DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ARGAMASSAS REFORÇADAS COM FIBRAS PET DE CABO DE ANCORAGEM DE PLATAFORMA OFFSHORE

DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/conresol.7.24.I-009>

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

* 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

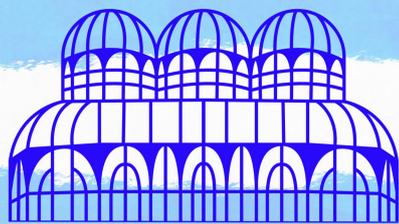
O descomissionamento das plataformas offshore é um procedimento complexo que demanda um amplo conhecimento técnico, especialmente na gestão de materiais pós-consumo, incluindo as linhas de amarração. Estas últimas são produzidas a partir de fios de poliéster à base de polietileno tereftalato (PET), e descartá-las como sucata representaria um desperdício, considerando seu elevado valor agregado. O objetivo desse estudo é investigar o potencial das fibras PET, provenientes desses cabos, como reforço fibroso em argamassa. Para tal fim, foram conduzidos experimentos para investigar o impacto das fibras PET na trabalhabilidade e no desempenho mecânico das argamassas 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%). 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. O ensaio de índice de consistência foi realizado imediatamente após o preparo das argamassas, para verificar o efeito das fibras na trabalhabilidade da argamassa fresca, de acordo com a norma ABNT NBR 13276 (2016). Os resultados dos ensaios de índice de consistência indicaram que as fibras PET afetaram a trabalhabilidade, porém, demonstraram adequação para a moldagem dos corpos de prova com adensamento em mesa vibratória. Na análise de compressão uniaxial, foram observadas variações significativas na resistência à compressão de pico, sobretudo nas misturas com maior teor de fibras (0,75% e 1,00%). Na continuidade da pesquisa será possível avaliar o comportamento das argamassas fibrosas sob flexão, além de explorar suas aplicações potenciais, em consonância com a demanda crescente por soluções que promovam a reciclagem de polímeros, contribuindo para a redução dos impactos ambientais dos descomissionamento de plataformas de petróleo.

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

ABSTRACT

The decommissioning of offshore platforms is a complex procedure that requires extensive technical knowledge, especially in the management of post-consumer materials, including mooring lines. The latter are produced from polyester yarns based on polyethylene terephthalate (PET), and discarding them as scrap would represent a waste, considering their high added value. The objective of this study is to investigate the potential of PET fibers, from these cables, as fibrous reinforcement in mortar. To this end, experiments were conducted to investigate the impact of PET fibers on the workability and mechanical performance of reference mortars (without fibrous reinforcement) and mortars reinforced with PET fibers at different volumetric fractions (0.25%, 0.50%, 0.75% and 1.00%). The materials were subjected to characterization tests in accordance with applicable technical standards. For the uniaxial compression test, cylindrical specimens were molded, and were kept in wet cure until 28 days of age. The consistency index test was carried out immediately after preparing the mortars, to verify the effect of the fibers on the workability of the fresh mortar, in accordance with the ABNT NBR 13276 (2016) standard. The results of the consistency index tests indicated that PET fibers affected workability, however, they demonstrated suitability for molding specimens with densification on a vibrating table. In the uniaxial compression analysis, significant variations in peak compressive strength were observed, especially in mixtures with higher fiber content (0.75% and 1.00%). As the research continues, it will be possible to evaluate the behavior of fibrous mortars under flexion, in addition to exploring their potential applications, in line with the growing demand for solutions that promote the recycling of polymers, contributing to reducing the environmental impacts of decommissioning oil platforms.

KEY WORDS: Mortar, Waste, PET fibers, Workability, Compressive strength.



INTRODUÇÃO

O descomissionamento de plataformas de petróleo em águas profundas (*offshore*) é um procedimento que ocorre na fase conclusiva de um projeto de exploração e produção de petróleo e gás natural, geralmente após 25 anos de operação do poço. Segundo o relatório divulgado pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) em 2018, estima-se que no Brasil exista 158 instalações de produção *offshore*, 24 sondas de perfuração e há a previsão de instalação de 18 novas unidades de produção até 2022. De acordo com os dados fornecidos pela ANP, 41% dos projetos *offshore* tinham ultrapassado a marca dos 25 anos de operação em 2018, enquanto 44% estavam na faixa de 15 a 25 anos de atividade (MACEDO, 2018). Com o envelhecimento dos campos de óleo e gás *offshore* em operação, o Brasil entrou na era do descomissionamento, uma vez que os campos maduros alcançaram o fim de seu ciclo econômico ou deixaram de ser produtivos (REBELLO, 2019).

A resolução da ANP que aborda o descomissionamento de instalações de exploração e produção de petróleo e gás natural, incorpora uma definição abrangente do descomissionamento, enfatizando a destinação adequada de materiais, resíduos e rejeitos, destacando assim a relevância atribuída às questões ambientais (ANP, 2020). A seleção do método de descomissionamento mais adequado é uma decisão complexa, que envolve uma análise abrangente dos impactos, especialmente os ambientais e está interligada com as considerações financeiras e socioeconômicas (SUDAIA et al., 2018). Existem diferentes sistemas de ancoragem utilizados para manter as plataformas estáveis em águas profundas e os tipos mais comuns são: ancoragem em catenária e ancoragem *Taut-Leg*. Com o avanço da exploração e produção em águas ultraprofundas, o peso da linha de ancoragem começou a se tornar um problema devido ao tipo de ancoragem e os cabos utilizados, usualmente feitos em aço. Então, novas soluções foram desenvolvidas, tais como, o uso de cabos sintéticos, mais leves que os canos de aço, e o uso de sistemas de ancoragem tensionados (ASSIS, 2013). As fibras mais utilizadas nos cabos de ancoragem são as seguintes: sisal, polietileno, poliamida, poliéster (muito utilizado para ancoragem de plataformas, com vida útil aproximada de 20 anos), polipropileno, poliaramida e HMPE (ASSIS, 2013).

Entre os diferentes tipos de instalações de produção *offshore*, as plataformas flutuantes do tipo FPSO (do inglês, “*Floating Production Storage and Offloading*”) possuem linhas de ancoragem compostas por cabos sintéticos de poliéster. Esses cabos são compostos por milhares de filamentos de polietileno tereftalato (PET) unidos em subcabos e revestidos por elemento filtrante e capa trançada. Os cabos de ancoragem que possuem como matéria-prima o poliéster à base de PET, por não serem biodegradáveis, não podem ser descartados no fundo do mar ou usados em recifes artificiais (SUDAIA et al., 2018). Além disso, por terem sido submetidos aos esforços de tração por anos, o reaproveitamento desses cabos em uma nova plataforma não é indicado. Em resumo, diante dos descomissionamentos das plataformas *offshore* no país nos próximos anos, será descartada uma elevada quantidade de cabos sintéticos de poliéster, o que torna urgente o estudo de métodos eficazes para o reaproveitamento dos filamentos desses cabos.

Uma forma interessante para o reaproveitamento de filamentos de 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. Na literatura há pesquisas nas quais as fibras PET foram adotadas como agregados em concreto (OLIVEIRA et al., 2021) e como reforço fibroso em microconcretos (MAGALHÃES e FERNANDES, 2015; TEIXEIRA e BALTHAR, 2023). 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) adotaram fibras PET obtidas de um cabo de ancoragem utilizado em uma plataforma *offshore* por 10 anos. O microconcreto de referência apresentava os seguintes consumos de materiais: $453,06 \text{ kg/m}^3$ (cimento CPV-ARI), $189,43 \text{ kg/m}^3$ (sílica ativa), $269,47 \text{ kg/m}^3$ (microesfera cerâmica), $448,08 \text{ kg/m}^3$ (água) e $11,73 \text{ kg/m}^3$ (dispersante). As fibras tinham 10 mm de comprimento, $28,9 \mu\text{m}$ 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 mini-espalhamento da mistura de referência foi de $76,6 \pm 7,6 \text{ cm}^2$, com reduções nas misturas fibrosas de 61,2% (PET0,5) e 81,8% (PET1,0). 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). O módulo de

elasticidade apresentou o mesmo comportamento, 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 objetivo de encontrar soluções mais sustentáveis para a destinação dos cabos de ancoragem das plataformas *offshore* compostos por fibras de poliéster à base de tereftalato de polietileno (PET), este estudo propõe explorar o potencial dos filamentos de PET como reforço fibroso em argamassa, tendo em vista o seu bom desempenho quanto às propriedades mecânicas e dimensional, mesmo sendo uma fibra residual. Até o momento, foram investigados os efeitos das fibras PET nos estados fresco e endurecido de uma argamassa sem reforço fibroso e de argamassas reforçadas com fibras PET em diferentes frações volumétricas. O programa experimental foi realizado no Núcleo de Ensino e Pesquisa em Materiais e Tecnologias de Baixo Impacto Ambiental na Construção Sustentável (NUMATS – POLI/COPPE/UFRJ).

OBJETIVOS

A pesquisa teve como objetivos a mitigação dos impactos ambientais do descomissionamento de plataformas *offshore* no Brasil pelo reaproveitamento dos filamentos dos cabos de poliéster, a apresentação de uma fibra residual de bom desempenho à indústria da construção e a produção de argamassas com boa capacidade de deformação. Para alcançar os objetivos citados, a capacidade de reforço das fibras obtidas pelo corte de filamentos de um cabo de ancoragem em uma mistura cimentícia. Para tanto, foram avaliados os efeitos das fibras na trabalhabilidade e no desempenho mecânico sob compressão uniaxial de uma argamassa sem reforço fibroso (matriz de referência) e de argamassas reforçadas com fibras PET em diferentes frações volumétricas (0,25%, 0,50%, 0,75% e 1,00%). Além das propriedades avaliadas, na continuidade da pesquisa será avaliado o efeito das fibras PET no desempenho mecânico sob flexão e no desempenho físico das argamassas.

METODOLOGIA

Materiais e métodos

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

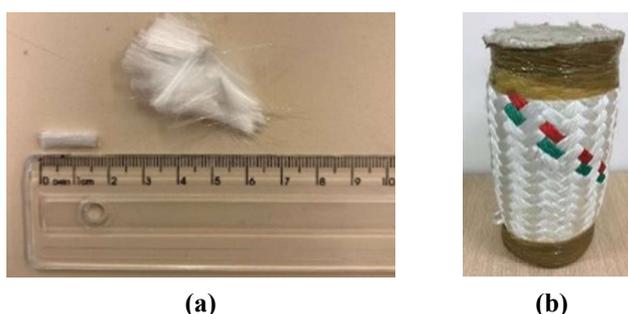


Figura 1: (a) Fibras com 15 mm de comprimento. Fonte: Autor do Trabalho; (b) Cabo. Fonte: Teixeira e Balthar (2023).

Caracterização dos materiais

A composição química do cimento, por análise semiquantitativa por espectroscopia por fluorescência de energia dispersiva de raios-X, e sua perda ao fogo média, de acordo com a norma ABNT NM 18 (2012), estão apresentadas na Tabela 1. O cimento é composto principalmente por CaO e SiO₂ e atende aos critérios da norma ABNT NBR 16697 (2018) em relação aos teores de PF e MgO (menores ou iguais a 6,5%) e SO₃ (menor ou igual a 4,5%). A massa específica do cimento por picnometria a gás hélio foi igual a 3080,6 ± 3,5 kg/m³. A areia foi avaliada de acordo com o procedimento da norma ABNT NBR 16916 (2021) e apresentou absorção de água igual a 2,34 ± 0,13 % e massas específicas (ME) iguais a 2386,4 ± 15,0 kg/m³ (condição seca) e a 2442,3 ± 18,0 kg/m³ (condição saturada superfície seca). Os materiais granulares foram avaliados quanto à distribuição granulométrica por granulometria a laser (cimento)

e de acordo com a norma ABNT NM 248 (2001) (areia) e apresentaram os seguintes diâmetros mínimos (D_{10}), médios (D_{50}) e máximos (D_{90}): $D_{10} = 2,71 \pm 0,01 \mu\text{m}$, $D_{50} = 17,07 \pm 0,06 \mu\text{m}$ e $D_{90} = 42,47 \pm 0,08 \mu\text{m}$ (cimento); $D_{10} = 0,21 \pm 0,01 \text{ mm}$, $D_{50} = 0,66 \pm 0,02 \text{ mm}$ e $D_{90} = 2,11 \pm 0,03 \text{ mm}$ (areia). As curvas típicas das distribuições granulométricas do cimento e da areia estão apresentadas na Figura 2.

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

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

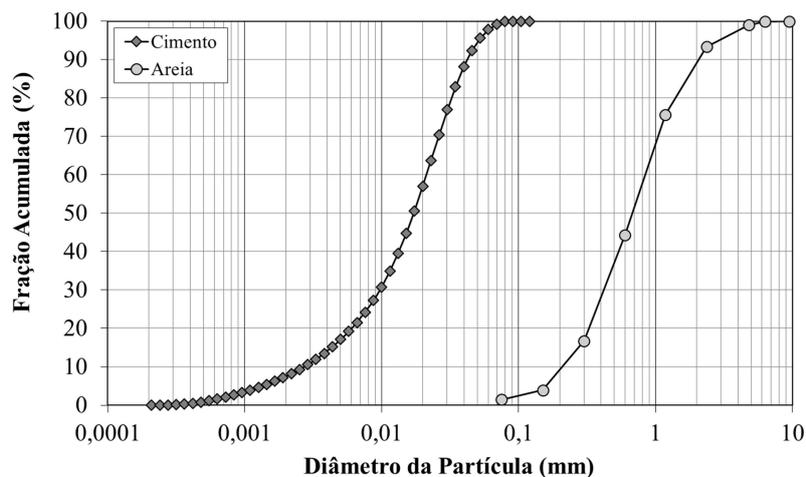


Figura 2: Distribuição granulométrica do cimento.

A massa específica por picnometria à hélio das fibras PET foi igual a $1445,0 \pm 0,9 \text{ kg/m}^3$. O diâmetro médio das fibras, medido por microscopia eletrônica de varredura (MEV) em 3 pontos ao longo do comprimento em 22 filamentos, foi igual a $30,8 \pm 1,6 \mu\text{m}$. A morfologia cilíndrica da fibra pode ser observada na Figura 3a (MEV, ampliação 1800x), enquanto a medição do diâmetro está mostrada na Figura 3b (MEV, ampliação 500x). A resistência à tração direta das fibras, igual a $1033 \pm 195 \text{ MPa}$ (18,8%) foi determinada em 14 amostras preparadas de acordo com a metodologia da ASTM C1557 (2014). Os aspectos da fibra antes e após o ensaio de tração estão ilustrados na Figura 3c e Figura 3d, respectivamente.

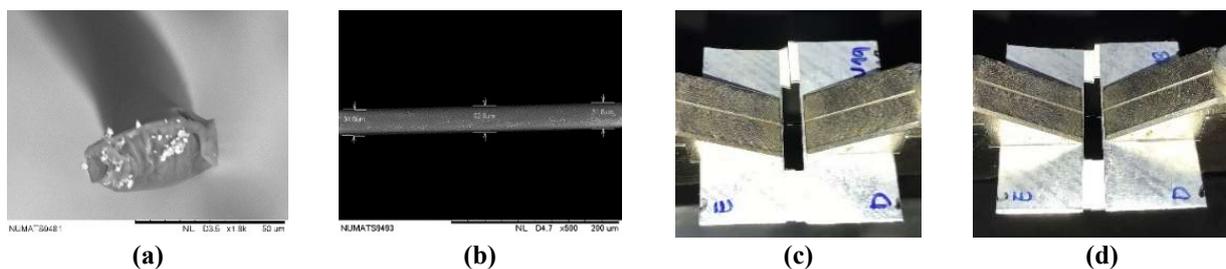


Figura 3: Aspectos da fibra: (a) MEV da fibra (forma cilíndrica); (b) MEV da fibra (diâmetro); (c) Fibra íntegra; (d) Fibra rompida. Fonte: Autor do Trabalho.

Métodos

O traço das argamassas apresentou uma relação entre as massas de cimento e de areia de 1: 3, enquanto a relação água-cimento foi igual a 0,7. Os consumos dos materiais granulares da argamassa de referência foram os seguintes: $452,20 \text{ kg/m}^3$ (cimento), $1356,60 \text{ kg/m}^3$ (areia) e $316,54 \text{ kg/m}^3$ (água). Definido o traço de referência (REF), foram produzidas argamassas com diferentes frações volumétricas de fibras PET por substituições parciais de todos os materiais em teores de 0,25% (M15-0,25), 0,50% (M15-0,50), 0,75% (M15-0,75) e 1,00% (M15-1,00). As argamassas foram preparadas de acordo com o procedimento da norma ABNT NBR 16541 (2016), em uma argamassadeira com capacidade de 5 litros (Figura 4a). O procedimento de mistura das argamassas foi realizado de acordo com as seguintes etapas:

- Pesagem dos materiais granulares em um saco plástico e pesagem da água em um béquer;
- Inserção dos materiais granulares na cuba da argamassadeira;
- Realização da mistura em velocidade baixa (V_1) por 30 segundos, com a inclusão de 75% do volume da água na cuba durante os primeiros 10 segundos e das fibras no tempo restante;
- Alteração da velocidade para a alta (V_2) e manutenção da mistura por 60 segundos;
- Com o equipamento desligado, realização da raspagem da cuba e da pá;
- Restabelecimento da mistura em velocidade baixa com a adição do restante da água (25% do volume) durante 10 segundos e manutenção da mistura até completar 60 segundos.

O ensaio de índice de consistência foi realizado imediatamente após o preparo das argamassas, de acordo com o procedimento da norma ABNT NBR 13276 (2016), para verificar o efeito das fibras na trabalhabilidade da argamassa fresca. O ensaio foi realizado em triplicata, em uma mesa para índice de consistência (Figura 4b), com as medições de três diâmetros distintos da argamassa espalhada (Figura 4c).

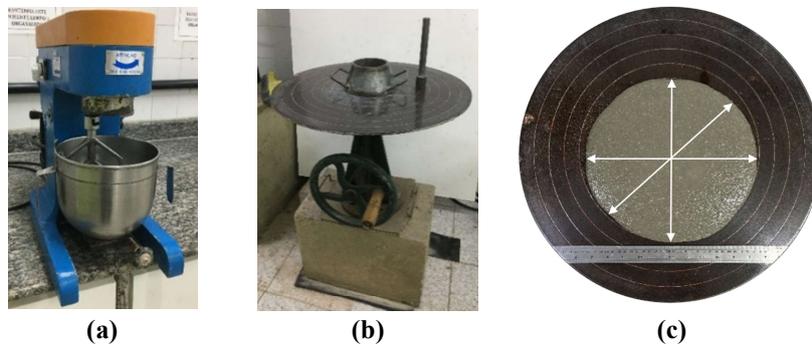


Figura 4: Preparo e caracterização reológica das argamassas: (a) Argamassadeira; (b) Mesa para índice de consistência com tronco e soquete; (c) Medições dos diâmetros. Fonte: Autor do Trabalho.

Corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura foram moldados para os ensaios de compressão. Após 24 horas de cura úmida, os corpos de prova foram desmoldados, faceados em torno mecânico e mantidos em cura úmida até a idade de ensaio (28 dias). O ensaio compressão uniaxial foi realizado de acordo com a metodologia da norma ABNT NBR 5739 (2018) 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 fixados na zona central do corpo de prova (Figura 5).



Figura 5: Ensaio de compressão uniaxial. Fonte: Autor do Trabalho.

A partir das curvas tensão *versus* deformação obtidas nos ensaios de compressão uniaxial foram calculados os módulos de elasticidade secante 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);

σ_2 – Tensão correspondente à 30% da tensão máxima (MPa);
 σ_1 – Tensão correspondente à deformação ϵ_{a1} (MPa);
 ϵ_{a2} – Deformação axial correspondente à tensão σ_2 (mm/mm);
 ϵ_{a1} – Deformação axial igual a 5×10^{-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

Índice de consistência

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) e Figura 6e (M15-1,00). Os valores dos índices de consistência das argamassas médios e os respectivos desvios-padrões (DP) e coeficientes de variação (CV) estão apresentados na Tabela 2. De acordo com a análise estatística dos resultados, os reforços fibrosos impactaram em variações significativas entre os resultados das argamassas fibrosas e a REF, com reduções no espalhamento de até 39%, ao comparar argamassas M15-1,00 e REF. Entretanto, é possível observar que as misturas não apresentaram segregação ou exsudação, mesmo para as frações mais elevadas de fibras. Além disso, todas as misturas avaliadas apresentaram trabalhabilidade o suficiente para moldagens apenas com vibração mecânica. Os mesmos comportamentos foram observados por Teixeira e Balthar (2023), cujos microconcretos fibrosos não apresentaram segregação ou exsudação entre os materiais, mas se mostraram mais viscosos que a mistura de referência.

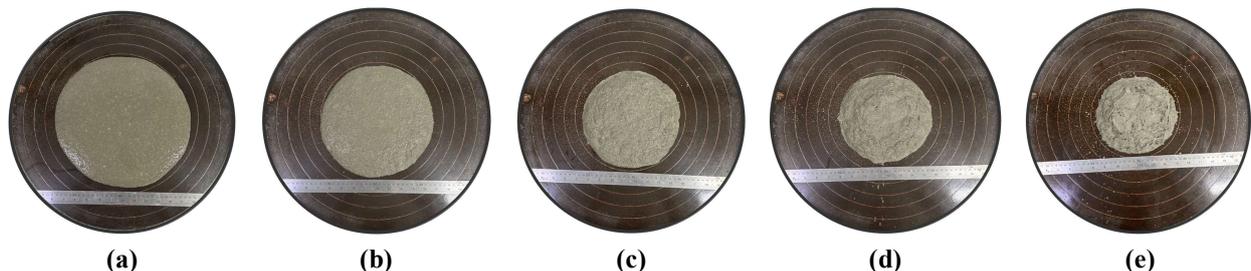


Figura 6: Aspectos das argamassas espalhadas: (a) REF; (b) M15-0,25; (c) M15-0,50; (d) M15-0,75; (e) M15-1,00.
Fonte: Autor do Trabalho.

Tabela 2. Índices de consistência das argamassas. Fonte: Autor do Trabalho.

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

Propriedades mecânicas

As curvas típicas tensão *versus* deformação das argamassas estão apresentadas na Figura 7. Os resultados da resistência à compressão (f_c), módulo de elasticidade (E) e deformação axial (ϵ_a), os respectivos desvios-padrões (DP) e coeficientes de variação (CV) das argamassas 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) e Figura 8e (M15-1,00).

As análises estatísticas dos resultados indicaram variações significativas entre as resistências à compressão de pico, com decréscimos nesta propriedade de 14,9% (M15-0,25), 17,3% (M15-0,50), 24,6% (M15-0,75) e 22,2% (M15-1,00), em relação a argamassa de referência. Os reforços fibrosos não impactaram em variações significativas entre os módulos de elasticidades das argamassas estudadas, nem das deformações axiais de pico. Os modos de ruptura dos corpos de prova foram predominantemente por cisalhamento (ver as Figuras 8a-e).

Os prejuízos observados na resistência à compressão de pico eram esperados, já que as fibras PET substituíram parcialmente todos os materiais das argamassas, inclusive o cimento. Além disso, esse comportamento está em consonância com a literatura. Magalhães e Fernandes (2015) observaram redução na resistência de compostos cimentícios reforçado com fibras PET pela extrusão de flocos de garrafas plásticas de até 55,5% em relação à referência. Oliveira et al. (2021) verificaram decréscimo máximo na resistência à compressão de concreto com fibras PET de cabo da ancoragem em substituição parcial de areia igual a 28,0%. Teixeira e Balthar (2023) observaram queda na resistência de microconcretos reforçados com fibras PET de cabo de ancoragem até 48,3% (PET1,0).

Entretanto, ao comparar as curvas tensão-deformação das misturas fibrosas com a REF apresentadas na Figura 7, 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 $7399\mu\epsilon$. As argamassas fibrosas sofreram quedas da resistência de pico mais suaves que a REF, com a manutenção do ensaio até deformações máximas cerca de 6 vezes superiores à deformação máxima da mistura de referência. Essa variação de comportamento entre a argamassa de referência e as argamassas fibrosas indica que as fibras atuaram como ponte de transferência de tensões. Além disso, é possível observar que as áreas abaixo das curvas típicas das argamassas fibrosas são maiores que a área abaixo da curva da REF, indicando o aumento da tenacidade com a incorporação de fibras.

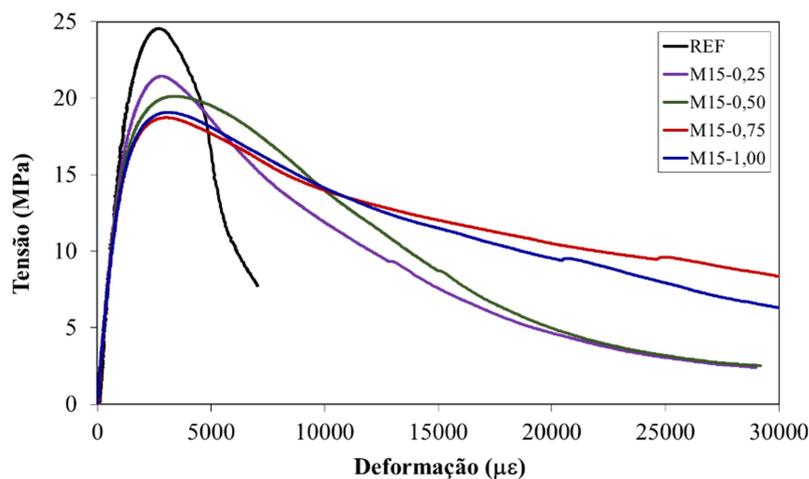


Figura 7: Curvas típicas tensão-deformação das argamassas. Fonte: Autor do Trabalho.

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 ± 246 / 8,9
M15-0,25	$21,1 \pm 0,7$ / 3,5	$19,6 \pm 1,3$ / 6,9	2768 ± 206 / 7,4
M15-0,50	$20,5 \pm 0,8$ / 4,0	$18,5 \pm 0,7$ / 4,0	3121 ± 218 / 7,0
M15-0,75	$18,7 \pm 0,8$ / 4,5	$18,8 \pm 0,9$ / 4,7	3045 ± 135 / 4,5
M15-1,00	$19,3 \pm 0,7$ / 3,6	$18,2 \pm 1,5$ / 8,2	2844 ± 189 / 6,7

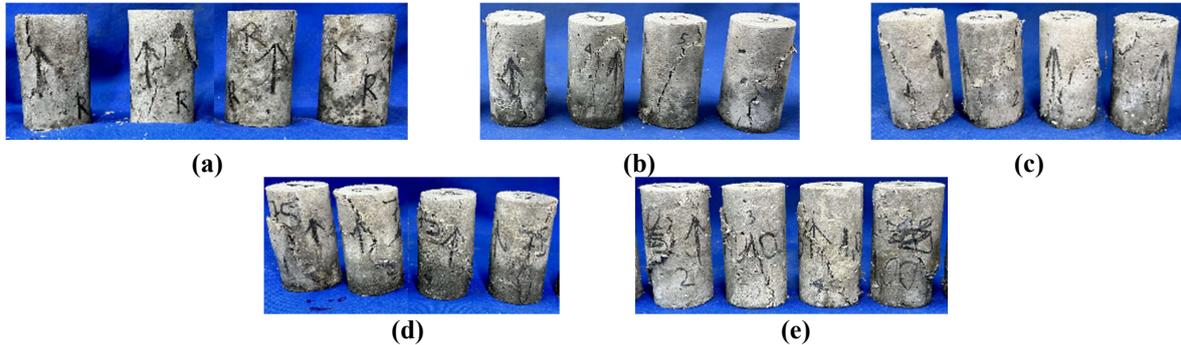


Figura 8: Modos de ruptura das argamassas: (a) REF; (b) M15-0,25; (c) M15-0,50; (d) M15-0,75; (e) M15-1,00.
Fonte: Autor do Trabalho.

CONCLUSÕES

Nos estudos experimentais realizados até o momento, foi possível investigar o efeito das fibras PET na trabalhabilidade de uma argamassa e em suas propriedades mecânicas no estado endurecido.

Os ensaios de índice de consistência indicaram que, embora as fibras tenham promovido prejuízos à trabalhabilidade em relação à argamassa de referência para todos os teores adotados, as argamassas fibrosas se mostraram homogêneas e apresentaram consistências o suficiente para a moldagem dos corpos de prova com adensamento em mesa vibratória.

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 com maiores teores de fibra, em relação a mistura de referência.

Na continuidade da pesquisa será avaliado o comportamento sob flexão das argamassas fibrosas para a verificar se o comprimento de fibras adotado terá aderência com a matriz para proporcionar benefícios à tenacidade, como ocorrido no comportamento sob compressão. Os resultados obtidos até o momento indicam ser possível o aproveitamento das fibras de poliéster proveniente dos cabos de ancoragem de plataformas marítimas como reforços fibrosos em argamassas. A aplicação proposta nessa pesquisa para o reaproveitamento dos resíduos de cabos de ancoragem de poliéster, além de contribuir para a redução dos impactos ambientais dos descomissionamento de plataformas de petróleo, apresenta um novo material à indústria da Construção Civil para reforço de misturas cimentícias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), Resolução No 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 NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2001.
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. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), **NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.
11. Macedo, M.M.B. **Descomissionamento de instalações marítimas: perspectivas para o Brasil**. Relatório Técnico, Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2018.
12. 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.
13. Rebello, A. **Decommissioning of Subsea Facilities in Brazil (OTC-29712-MS)**. Offshore Technology Conference, Brazil, 2019.
14. 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 from decommissioned offshore platforms**. *Marine Pollution Bulletin*, vol. 135, 2018.
15. 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.
16. 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.