CADERNOS UniFOA 20 ANOS
Edição 56 | 2026
e-ISSN: 1982-1816
Data de submissão: 25/08/2026 Data de Aprovação: 12/11/2026

Projeto e fabricação, por manufatura aditiva, de vaso de expansão de guinchos hidráulicos para reboque de embarcações marítimas

Design and additive manufacturing of an expansion vessel for hydraulic winches used in towing maritime vessels

[1] Adriana Cruz do Bonfim
[1] Lucas Benini
[1] Roger Matsumoto Moreira
[1] Walber Paschoal da Silva
[2] Erik Gustavo Del Conte

1 Universidade Federal Fluminense, UFF, Niterói, Rio de Janeiro, Brasil
2 Universidade Federal do ABC, UFABC, Santo André, São Paulo, Brasil

RESUMO

A Resolução A.765(18) da Organização Marítima Internacional (IMO) estabelece diretrizes para o projeto de sistemas de reboque marítimo que garantam resistência, confiabilidade e segurança, tanto em condições normais quanto em condições de emergência, além de prever mecanismos secundários de operação, em caso de falhas. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo projetar e fabricar um protótipo, por manufatura aditiva, de um vaso de expansão hidráulico, empregando material polimérico como alternativa a materiais metálicos comumente empregados nessa aplicação. Inicialmente, foi caracterizado o material metálico com composição desconhecida de um vaso metálico de um reboque marítimo utilizado em ambiente *offshore*. Com base nessa caracterização e efetuado o projeto conceitual do vaso, foram selecionados dois materiais poliméricos com resistência mecânica equivalente: o PACF15 e PA6HT. Após realizados ensaios de tração desses materiais selecionou-se o PA6TH para fabricação aditiva de *Fused Deposition Modeling* (*FDM*). A impressão considerou a espessura de 1,2 mm para topo e base e densidade de 55%. O protótipo do vaso de pressão de PA6HT foi submetido e aprovado nos ensaios de estanqueidade, suportando pressões em torno de 1 bar, sem apresentar vazamentos. Esta pesquisa contribui para o aprimoramento de componentes hidráulicos marítimos, alinhados às exigências normativas da IMO e aos avanços tecnológicos da manufatura aditiva aplicada à engenharia naval.

Palavras-chave:

Guincho de reboque. Vaso de expansão. Manufatura aditiva. FDM. Polímeros.

ABSTRACT

International Maritime Organization (IMO) Resolution A.765(18) establishes guidelines for marine towing systems, emphasizing structural strength, reliability, and safety under normal and emergency operating conditions. This study presents the design and additive manufacturing of a hydraulic expansion vessel prototype using a polymeric material as an alternative to conventional metallic materials for marine towing applications. Initially, the metallic material of an expansion vessel used in an offshore towing system was characterized to establish a reference for the proposed design. Based on the characterization results and the conceptual design requirements, two polymeric materials with suitable mechanical strength, PACF15 and PA6HT, were evaluated through tensile testing. PA6HT was subsequently selected for fabrication using fused deposition modeling (FDM). The prototype was manufactured with a 1.2 mm top and bottom wall thickness and a 55% infill density. The fabricated vessel was subjected to leak-tightness testing and successfully withstood pressures of approximately 1 bar without detectable leakage. The results demonstrate the feasibility of using PA6HT and FDM for manufacturing a functional hydraulic expansion vessel prototype, showing adequate dimensional integrity and leak-tightness under the tested conditions. The study contributes to the development of polymeric hydraulic components for marine applications and highlights the potential of additive manufacturing as an alternative manufacturing route for naval engineering components.

Keywords:

Towing winch. Expansion vessel. Additive manufacturing. FDM. Polymers.

CC BY NC SA

1 INTRODUÇÃO

As operações de reboque marítimo são essenciais para o transporte seguro de estruturas e embarcações em diversos contextos, como navegação comercial e exploração *offshore*. A Organização Marítima Internacional (IMO), MSC/Circ.884 (1974), apresenta diretrizes abrangentes voltadas à estabilidade, resistência estrutural, vedação contra intempéries, fixação de cargas e arranjos de conexão em operações de reboque. Essas orientações visam reduzir perigos, preservar a segurança das estruturas rebocadas e garantir a eficiência das operações sob diferentes cenários ambientais e condições adversas. De forma complementar, a Resolução A.765(18) da IMO (1974) reforça a importância de projetar sistemas de reboque (como guinchos hidráulicos, elétricos ou híbridos), para suportar condições normais e de emergência, garantindo resistência, confiabilidade e segurança. A norma também recomenda o uso de sistemas de reboque secundários ou de emergência para permitir a recuperação em casos de falhas, além de destacar a necessidade de planejamento detalhado, inspeções prévias e medidas preventivas para mitigar riscos à navegação e ao meio ambiente durante as operações de reboque.

O ambiente *offshore* representa um setor estratégico para a produção de energia, englobando desde a exploração de petróleo e gás até novas fontes, como a energia eólica e das ondas. No cenário marinho, a corrosão é uma condição inevitável e precisa ser considerada. Dessa forma, torna-se imprescindível direcionar atenção ao reforço de estruturas que já foram afetadas por esse processo, além de realizar avaliações que assegurem sua confiabilidade e prolonguem sua durabilidade (Zavvar *et al*., 2025). A corrosão é o principal mecanismo de falha em estruturas metálicas *offshore*, com taxas que podem ultrapassar 0,8 mm/ano na superfície do mar e comprometer rapidamente a integridade estrutural.

Estudos em diferentes mares mostram que profundidade, sazonalidade e exposição influenciam significativamente a degradação de aços (O`neill e Mehmanparst, 2024). A operação, nessas regiões, particularmente em águas profundas, impõe desafios significativos devido às severas condições do meio marinho. A gestão do ciclo de vida das estruturas *offshore*, incluindo instalação, operação e manutenção, é complexa e envolve custos consideravelmente superiores, quando comparada a operações terrestres (Morais Junior, 2013). Avaliações periódicas são essenciais para identificar sinais de corrosão, determinar sua aceitabilidade e sugerir parâmetros, como espessura, rugosidade e alterações mecânicas que descrevam a resistência do material. Essa problemática é especialmente relevante para componentes metálicos sujeitos a altos níveis de corrosão, como vasos de pressão, exigindo soluções avançadas de fabricação e reparo.

Diante da inovação da fabricação de componentes da indústria *offshore*, a manufatura aditiva, ou impressão 3D, possibilita fabricar formas que, anteriormente, eram praticamente impossíveis ou só poderiam ser produzidas por métodos baseados em processos tradicionais de fabricação (Hällgren *et al.,* 2016), e que podem ser fabricadas na própria embarcação. O impacto da integração da manufatura aditiva na cadeia de suprimentos, a correlação com o fenômeno do *reshoring* e seu efeito na sustentabilidade ambiental têm sido investigados por Calignano e Mercurio (2023). De acordo com esses autores, a principal vantagem para adoção da tecnologia de manufatura aditiva é a flexibilidade no projeto e proximidade com o cliente, considerando que essa nova tecnologia permite eliminar problemas relacionados ao tempo de transporte. É enfatizado que, em casos extremos, os clientes poderiam se tornar produtores, retirando o fluxo físico ao longo da cadeia de suprimentos.

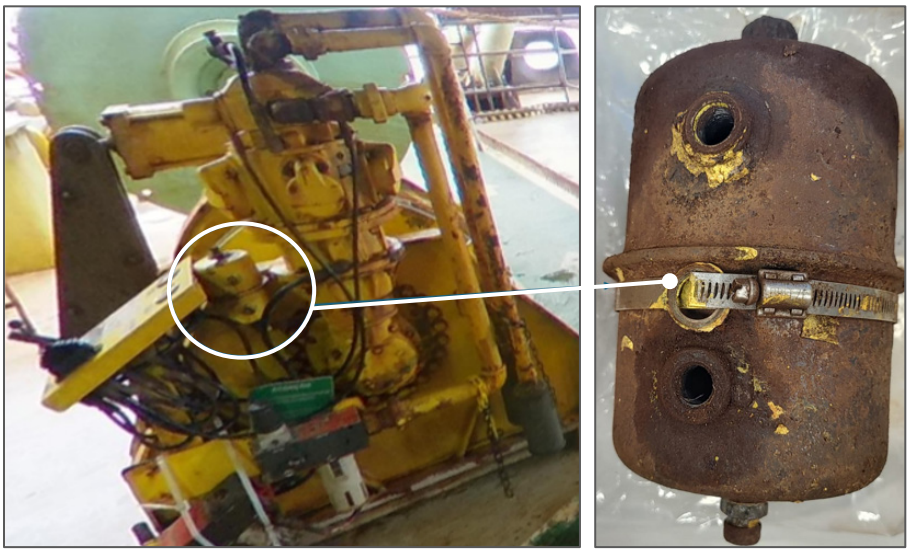
Há diversos processos de manufatura aditiva, sendo que cada tipo possui uma maneira diferente de fabricar o componente. Por exemplo, a impressão por modelagem de deposição fundida (do inglês *Fused Deposition Modeling*, FDM) usa polímero em forma de filamento nas impressoras. A estereolitografia (SLA) usa resina líquida como matéria-prima, enquanto a sinterização seletiva a *laser* (SLS) cria objetos 3D com materiais granulados de cerâmica, plástico e metal. Ambos os métodos são usados na fabricação por manufatura aditiva (Sinotti, 2023). O tipo de material utilizado é classificado de acordo com a tecnologia abordada.

Os polímeros retratam o grupo que é mais frequentemente utilizado para fins de impressão 3D (Korniejenko *et al*., 2024).

Segundo Falkonakis *et al*. (2024), durante o ciclo de vida de um navio, o acesso a peças de reposição é limitado. Navios mercantes têm um problema recorrente que é a dificuldade na manutenção e reparos em alto mar. O dilema de manter um armazenamento de peças onerosas em detrimento a um peso morto e uma complexa cadeia de abastecimento pode ser remediado pela fabricação a bordo de componentes. Nesse cenário, os guinchos são amplamente empregado nas operações *offshore*, possuindo diversas finalidades, como manuseio de âncoras e reboque de cargas. O guincho de manuseio de âncoras, mais robusto e localizado na ré, é equipado com coroas de barbotin para recolher e transmitir amarras. Já o guincho de reboque, posicionado à vante, realiza trabalhos similares com menor capacidade de carga e sem o uso de barbotin (Lima Junior, 2014). Os guinchos de reboque são equipamentos essenciais no ambiente marítimo, projetados para suportar cargas pesadas e realizar o transporte, manobra e posicionamento de embarcações e estruturas flutuantes (Nunes *et al*., 2024). Sua principal finalidade é gerar força de tração, permitindo que uma embarcação seja deslocada ou posicionada de forma segura e eficiente (Valladão, 2016). Sua potência e precisão garantem estabilidade, alinhamento e segurança durante as operações, tornando-os indispensáveis para o controle eficaz das atividades aquáticas.

Um componente fundamental para o funcionamento desse tipo de guincho é o vaso ou tanque de expansão, um dispositivo utilizado para segurança e proteção das instalações hidráulicas sujeitas às variações de pressão. O tanque de suplementação funciona como um reservatório intermediário, recebendo óleo dos tanques de armazenamento ou de dreno por meio de uma bomba de transferência. Esse óleo é, então, direcionado pela bomba de suplementação ao vaso de expansão (Figura 1) - componente central deste estudo - que opera a uma pressão de 1 bar e tem a função de abastecer o sistema hidráulico do guincho de reboque. Esse sistema é essencial para compensar as perdas hidráulicas, garantindo a operação eficiente do equipamento (Lima Junior, 2014).

Figura 1 - Guincho de reboque: destaque do vaso de expansão.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A ausência de um vaso de expansão em condições adequadas, como no caso da Figura 1, compromete diretamente o desempenho e a confiabilidade do sistema hidráulico do guincho, uma vez que esse componente é responsável por absorver variações de pressão e prevenir sobrecargas que podem levar a

falhas operacionais. Como, por exemplo, na Figura 1, o vaso de expansão metálico encontra-se severamente deteriorado, apresentando corrosão avançada e perda de integridade estrutural - situação incompatível com as exigências de segurança e continuidade operacional da embarcação. A inexistência de reposição imediata desse componente agrava o risco de paradas não programadas e de danos ao conjunto hidráulico.

Nesse contexto, a manufatura aditiva surge como alternativa tecnicamente viável e ágil, permitindo a fabricação sob demanda de um novo vaso de expansão em material resistente à corrosão, com geometria ajustada às necessidades do sistema. A adoção dessa solução mitiga a indisponibilidade do componente e demonstra o potencial da tecnologia para suprir lacunas críticas de manutenção em ambientes *offshore*.

O objetivo deste trabalho é projetar e fabricar, por manufatura aditiva, o protótipo de um vaso de expansão hidráulico, empregando material polimérico como alternativa à fabricação subtrativa com materiais metálicos comumente empregados nessa aplicação.

2 METODOLOGIA

O presente estudo foi desenvolvido a partir da análise aplicada do comportamento de um vaso de expansão em condições reais de operação, inserido no contexto de uma empresa estatal. Em observância às normas internas de confidencialidade e segurança industrial, informações referentes à localização, ao equipamento específico e às características operacionais não são divulgadas, sendo apresentados apenas os dados essenciais à condução da investigação científica.

O vaso de expansão metálico analisado (componente original do sistema de guincho de reboque para navios, observado na Figura 1), foi fabricado em material metálico de composição desconhecida. O equipamento opera sob pressão de 1 bar (0,1 MPa), possui massa de 2 kg e capacidade volumétrica de 2,1 litros de óleo hidráulico. A caracterização da composição química do material metálico do vaso foi efetuada pelo ensaio de fluorescência de raios X (FRX), empregando-se o analisador portátil de FRX S1 TITAN, que permite realizar análises não destrutivas.

Após a caracterização da composição química, foi desenvolvido um projeto conceitual de um vaso de expansão a ser fabricado por manufatura aditiva com material polimérico, visando à substituição do material metálico nesse componente. Para tal, utilizou-se o sistema *Autodesk Fusion 360*, empregado para a modelagem tridimensional (CAD), voltada à manufatura aditiva (processo de FDM). O projeto conceitual considerou os critérios de segurança, resistência mecânica, compatibilidade do material com o fluido e pressão de operação descritos nas normas NR-13 (Brasil, 2021) (que regulamenta vasos de pressão) e BPVC Seção VIII (ASME, 2025). Por se tratar de um projeto para manufatura aditiva, considerou-se, no projeto conceitual, as diretrizes da norma ISO/ASTM 52910 (ASTM, 2018), que trata do *design* para manufatura aditiva.

Finalizado o projeto conceitual do vaso de expansão, foram avaliados dois materiais poliméricos que possuem resistência mecânica simular ao material metálico do vaso de expansão caracterizado. Foram selecionados os polímeros PACF15 e PA6HT. A Tabela 1 apresenta as características desses materiais.

Tabela 1 – Comparação entre as fichas técnicas dos materiais poliméricos.

Propriedade	**PACF15**	**PA6HT (Nylon HT)**
Temperatura de deflexão térmica (HDT)	≈ 120 ºC (estimado para nylon CF)	90 ºC (1,80 MPa)
Temperatura de serviço	≈ 100–120 ºC	120 ºC contínuo / 160 ºC temporário
Tensão de ruptura / escoamento	103,2 MPa	85 MPa
Módulo elástico	8,386 GPa	3,4 GPa
Alongamento na ruptura	2,4%	3,6%
Resistência ao impacto (Charpy)	16,4–18,1 kJ/m²	Sem quebra
Deformação à tração em ruptura	1,78% a 2,39%	11,7% (horizontal)
Temperatura de transição vítrea (Tg)	≈ 44-55 °C	≈ 70 °C
Observações	Alta resistência, porém anisotrópico	Alta tenacidade e estabilidade térmica

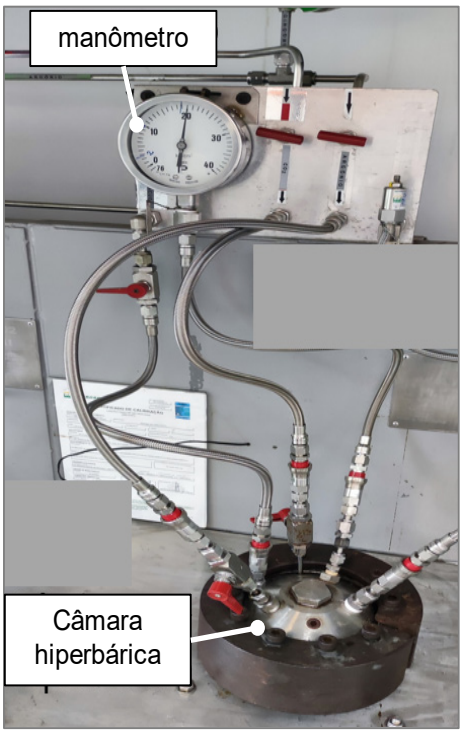
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Foram fabricados corpos de prova desses dois materiais para ensaios de tração, seguindo-se as recomendações da norma ASTM D638-22 (ASTM, 2022), que trata do método de ensaio padrão para propriedades de tração de plásticos. Os corpos de prova foram fabricados pela impressora 3D Ultimaker modelo S7, empregando-se o mesmo processo de manufatura aditiva FDM. Os ensaios de tração dos corpos de prova foram realizados na máquina universal de ensaios Instron 5900R, seguindo-se as recomendações da norma ASTM D638-22 (ASTM, 2022). Os corpos de prova foram produzidos na orientação horizontal, considerada a condição mais crítica para ensaios de tração em peças fabricadas por FDM, uma vez que a solicitação mecânica ocorre predominantemente no plano das camadas depositadas, evidenciando os efeitos da anisotropia típica do processo. Ao todos, foram fabricados 10 corpos de prova de PACF15 e 7 de P6HT.

Após a análise dos resultados dos ensaios de tração, selecionou-se o material polimérico para fabricação do vaso polimérico por FDM. Seguiu-se a seguinte metodologia: modelagem da geometria em CAD (1), conversão para STL (2), fatiamento e geração do *G-code* (3). Em seguida, foram definidos os parâmetros de impressão (4): material, temperatura, velocidade e demais ajustes operacionais da Ultimaker S7. Em seguida, fabricou-se o componente (5) e, posteriormente, sua remoção da mesa de impressão (6). Após essa etapa, realizou-se o pós-processamento (7), envolvendo limpeza, remoção de suportes e inspeção dimensional. Os parâmetros de impressão utilizados neste trabalho foram definidos no *software* Ultimaker Cura, garantindo a configuração adequada do *G-code* para a fabricação do vaso de expansão.

Por fim, o vaso fabricado com o polímero selecionado foi avaliado pelo ensaio de estanqueidade, utilizando-se uma câmera hiperbárica do Laboratório Institucional Confidencial (Figura 2), equipada com manômetro analógico para monitoramento da pressão interna. O ensaio consistiu em submeter o protótipo a níveis controlados de pressão hidrostática, verificando-se a integridade das vedações, por meio da observação de variações no manômetro e inspeção visual de vazamentos, com aplicação das pressões de 0,5 bar, 1 bar e 1,2 bar.

Figura 2 - Câmara hiperbárica.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

3 RESULTADOS

3.1 Caracterização do vaso de expansão metálico

Os resultados da análise de fluorescência Raios X (FRX) são apresentados na Tabela 2. Nessa tabela, a notação "<LOD" (*Limit of Detection* – Limite de Detecção) indica que a concentração do elemento está abaixo do limite mínimo detectável pelo equipamento, conforme definido pela *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC, 1997). Isso indica que esses elementos podem estar presentes apenas em concentrações inferiores à sensibilidade do método.

Tabela 2 - Caracterização do material metálico do vaso de expansão.

Medição 1		Medição 2		Medição 3	
Elemento	**%**	**Elemento**	**%**	**Elemento**	**%**
Fe	99,12	Fe	99,25	Fe	98,69
Mn	0,21	Mn	0,20	Mn	0,19
Al	0,01	Al	0,01	Al	0,01
Si	0,33	Si	0,19	Si	0,66
S	0,09	S	0,12	S	0,14
Ni	0,02	Ni	0,11	Ni	0,07
Cu	<LOD	Cu	<LOD	Cu	0,04
Nb	<LOD	Nb	<LOD	Nb	<LOD
Pb	0,11	Pb	<LOD	Pb	0,05
Ti	0,11	Ti	0,10	Ti	0,14
W	<LOD	W	<LOD	W	<LOD
Sn	-	Sn	<LOD	Sn	<LOD
P	<LOD	P	<LOD	P	<LOD

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A composição elementar obtida por fluorescência de raios X (FRX) indica que o material do vaso metálico avaliado se enquadra na faixa típica dos aços carbono de baixo teor de carbono da série AISI 1000, especialmente aqueles próximos às ligas AISI 1005 a AISI 1015. Esses materiais são caracterizados pela predominância de ferro, acompanhada de pequenas quantidades de elementos residuais, como manganês, silício, enxofre e fósforo, composição compatível com os resultados obtidos nas três medições realizadas. Como referência, o aço AISI 1010 apresenta cerca de 0,08–0,13% de carbono (não detectável por FRX) e teores residuais de Mn, Si, S e P em faixas semelhantes às observadas (SAE, 2014; ASM, 1990).

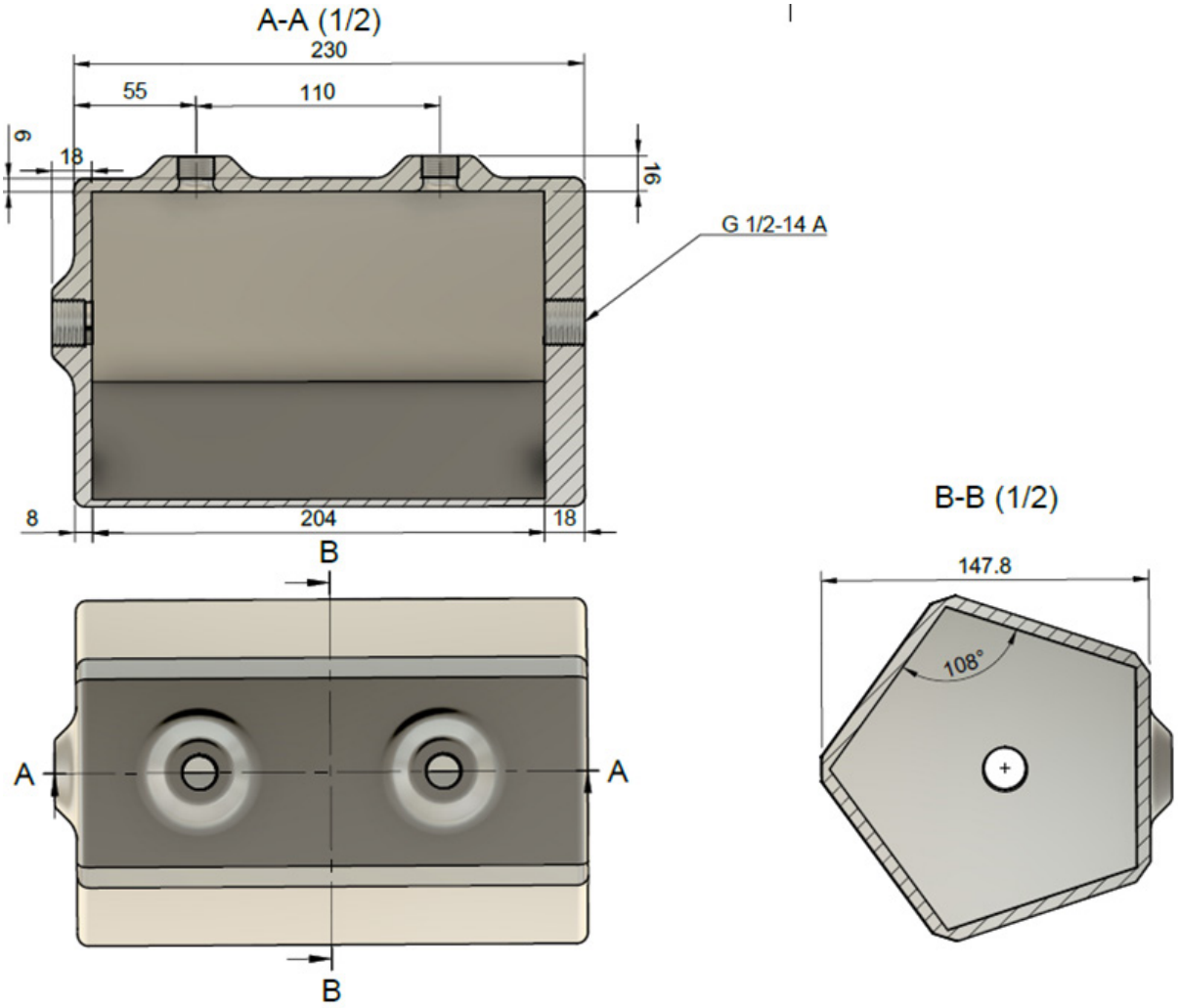
A elevada predominância de ferro e a ausência de elementos de liga anticorrosiva em teores significativos - como o Cr, com, pelo menos, 11 %p (Callister Júnior e Rethwisch, 2016) - explicam o grau avançado de degradação observado no vaso metálico (Figura 1). Embora o componente apresentasse um revestimento superficial amarelo, este não se mostrou eficaz para o ambiente marítimo, seja por inadequação do material, desgaste, falhas localizadas ou perda de continuidade ao longo do tempo. Como consequência, verificou-se corrosão generalizada, com comprometimento da integridade estrutural e redução substancial da vida útil do equipamento.

Nesse contexto, a substituição por um vaso de expansão polimérico produzido por manufatura aditiva apresenta justificativa técnica consistente, sobretudo considerando a maior resistência à corrosão, menor massa, possibilidade de otimização geométrica e melhor desempenho em atmosferas agressivas.

3.2 Projeto conceitual do vaso de expansão polimérico

A Figura 3 apresenta a geometria do vaso de expansão projetado. A adoção de um formato hexagonal está associada às características e limitações da tecnologia de manufatura aditiva disponível da impressora Ultimaker S7, que utiliza o processo FDM e que foi empregada para a fabricação do vaso de expansão.

Figura 3 - Desenho técnico do vaso de expansão projetado.

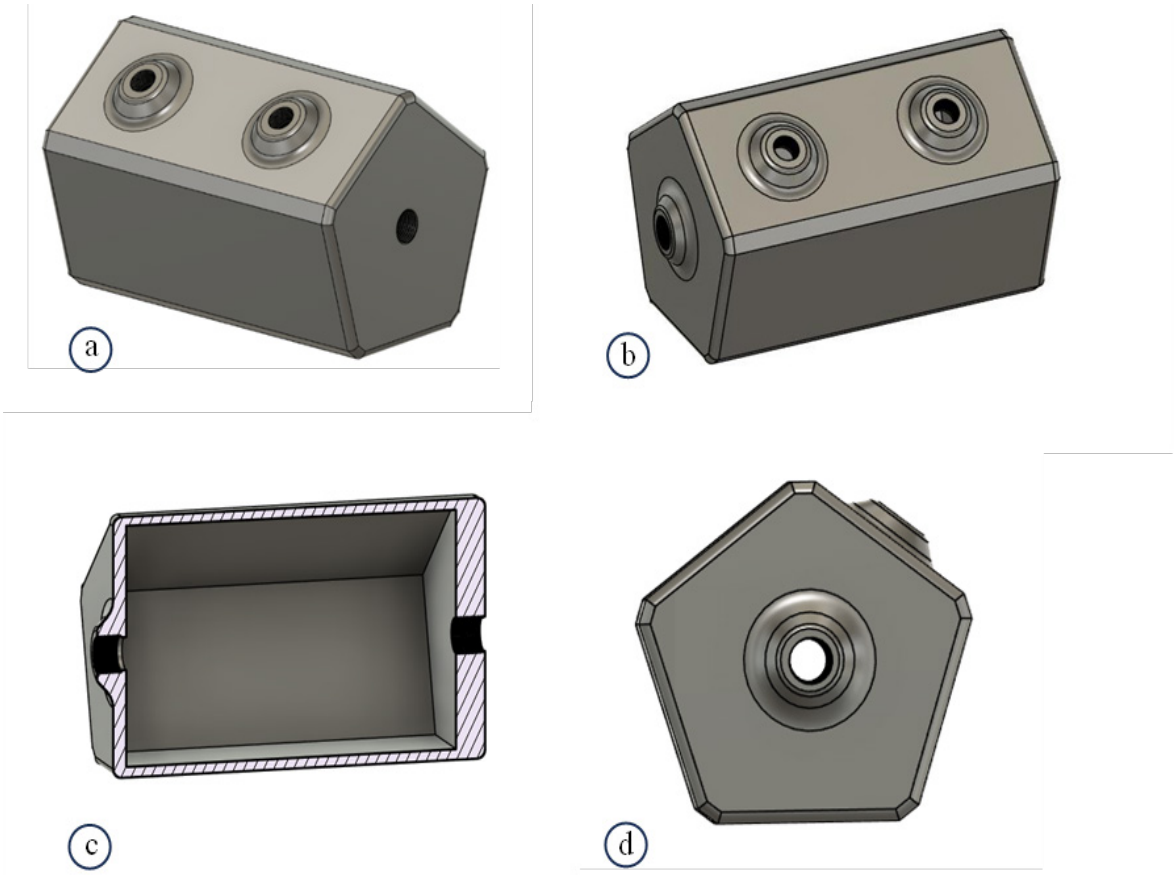


Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A impressão de superfícies completamente cilíndricas nesse processo apresenta desafios significativos relacionados à definição geométrica, especialmente para paredes com grandes alturas, devido à necessidade de sucessivas aproximações poligonais e à limitação da resolução planar da máquina. Em impressoras FDM, superfícies curvas são discretizadas em segmentos lineares, cuja suavidade depende diretamente do número de subdivisões possíveis, limitado pelo sistema de fatiamento e pela precisão mecânica do equipamento (Gibson *et al*., 2015). Além disso, a fabricação de cilindros com paredes finas tende a aumentar o risco de vibrações, pequenas imprecisões dimensionais e deformações térmicas, fenômenos conhecidos em processos FDM e mais pronunciados em geometrias curvas contínuas. Nesse sentido, a escolha da geometria hexagonal possibilita melhor estabilidade dimensional durante a impressão; maior área de apoio entre camadas, reduzindo efeitos de empenamento (*warping*); definição mais precisa das faces externas, devido à predominância de planos verticais; facilidade de fabricação dentro das tolerâncias da Ultimaker S7. Do ponto de vista funcional, a forma hexagonal não compromete o volume interno necessário nem o desempenho do vaso, mantendo as características geométricas essenciais ao acoplamento no guincho. Assim, a geometria final representa um compromisso eficiente entre viabilidade de fabricação, compatibilidade funcional e desempenho estrutural do componente.

A Figura 4 mostra mais vistas e corte do vaso de expansão polimérico desenvolvido. Destaca-se que a geometria tridimensional foi definida a partir das dimensões obtidas do vaso metálico original, sendo, então, adaptada ao novo formato hexagonal necessário para o encaixe no guincho. As vistas exibidas — (a') e (a") com o modelo externo sólido, (a) com o corte seccional interno e (c) com a vista frontal — permitem avaliar a continuidade das superfícies, a espessura das paredes, as interfaces de conexão e a compatibilidade funcional do componente antes das etapas seguintes de conversão para o formato STL, fatiamento e fabricação (etapas da AM). Essa representação é fundamental para validar a solução geométrica proposta, assegurando que o componente atende aos requisitos dimensionais e estruturais definidos no projeto.

Figura 4 - Representações da modelagem CAD do vaso de expansão polimérico orientado na posição horizontal - (a) e (b): vistas isométricas do modelo externo; (c), corte seccional longitudinal, evidenciando o volume interno; (d), vista frontal, permitindo a análise da geometria hexagonal e das interfaces de conexão.



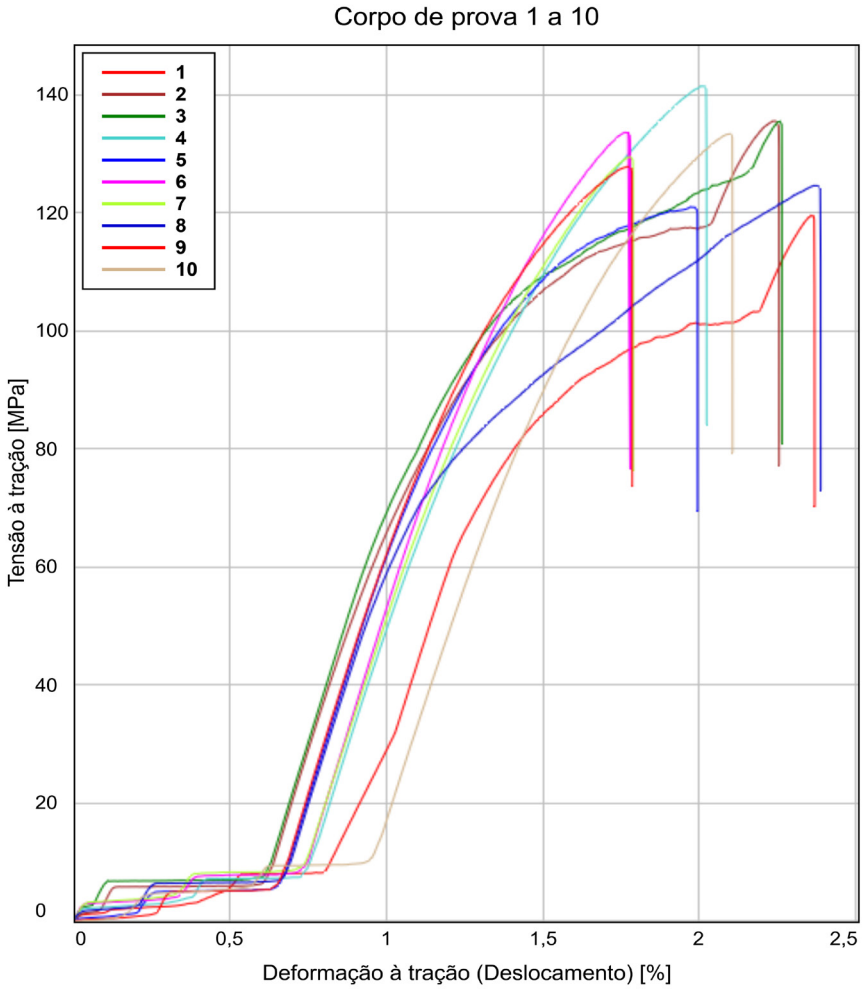
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

3.3 Seleção do material polimérico

A Figura 5 apresenta as curvas tensão–deformação obtidas nos ensaios de tração do polímero PACF15, enquanto a Tabela 3 reúne os valores quantitativos de módulo elástico, tensão de ruptura e deformação na ruptura das amostras ensaiadas. Observa-se, no início de todas as curvas, um trecho com inclinação reduzida, caracterizando um comportamento quase horizontal. Esse fenômeno não está associado a uma resposta intrínseca do material PACF15, e sim a efeitos experimentais recorrentes em ensaios de tração, como a acomodação inicial do corpo de prova nas garras da máquina, a eliminação de folgas do sistema de fixação e o alinhamento progressivo da amostra antes da aplicação efetiva da carga axial. Esse trecho inicial

é comumente desconsiderado na determinação do módulo elástico, conforme práticas consolidadas para ensaios mecânicos de polímeros e compósitos.

Figura 5 - Curvas tensão–deformação obtida no ensaio de tração do PA CF15.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Após essa fase de acomodação, as curvas apresentam um crescimento acentuado da tensão com o aumento da deformação, caracterizando o regime elástico do material. A elevada inclinação desse trecho evidencia a alta rigidez do PACF15, resultado direto da incorporação de 15% de fibras curtas de carbono à matriz polimérica. Os valores de módulo elástico obtidos situam-se majoritariamente entre 5.800 e 7.800 MPa, conforme indicado na Tabela 3, refletindo o comportamento típico de polímeros reforçados com fibras.

Tabela 3 - Resultados do ensaio de tração realizados PACF15: módulo de elasticidade, tensão de ruptura e deformação na ruptura.

CP	Módulo (Corda 0,05 % - 2 %) [MPa]	Deformação à tração (Desloc.) em Ruptura (Padrão) [%]	Tensão à tração em Ruptura (Padrão) [MPa]	Deformação à tração (Desloc.) em Escoamento (Inclin. zero) [%]	Tensão à tração em escoamento (Inclinação zero) [MPa]	Módulo Young [MPa]
1	5836,74	2,37	119,31	1,99	101,38	16091,2
2	7265,92	2,25	134,82	-----	-----	16200,16
3	7357,64	2,26	135,21	-----	-----	16841,46
4	7397,05	2,02	141,09	-----	-----	16119,46
5	7451,26	1,99	120,55	-----	-----	16974,38
6	7794,11	1,78	132,97	-----	-----	17090,45
7	7422,74		1,79	129,22	-----	16099,56
8	6254,6		2,39	124,22	-----	16646,71
9	7887,29		1,78	127,44	-----	16820,49
10	6178,97		2,1	133,27	-----	15910,53

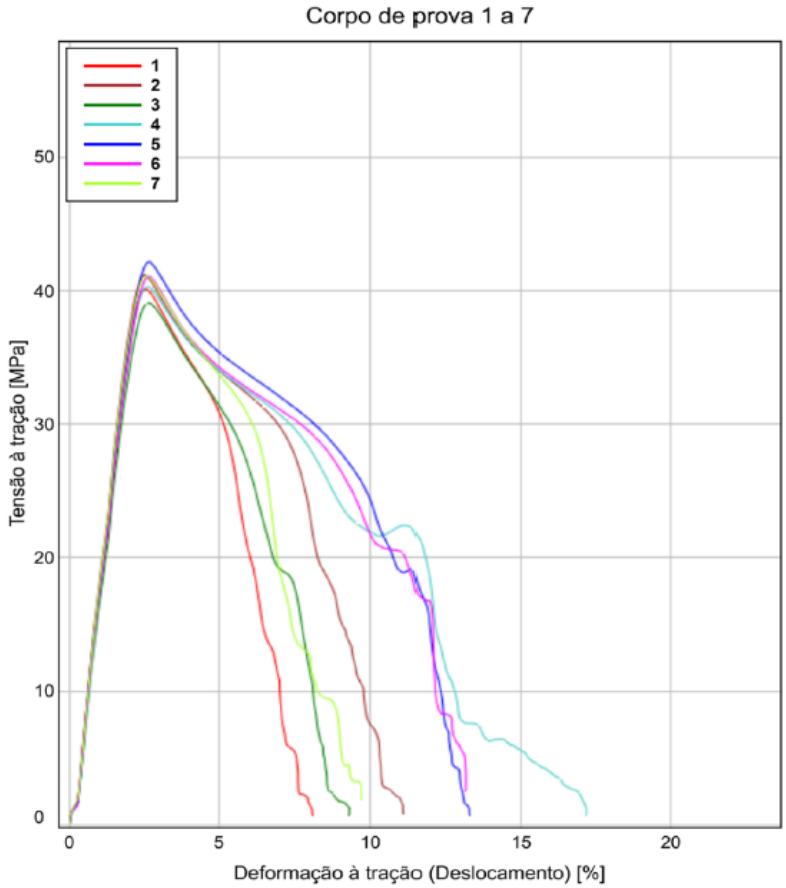
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

O *software* da máquina de ensaio de tração também identificou, por regressão linear automática no trecho inicial das curvas, valores de módulo superiores a 16.000 MPa. Esses valores elevados indicam a predominância da resposta elástica inicial controlada pelas fibras de carbono, especialmente sensível orientação das camadas e à direção de solicitação mecânica.

No que se refere ao comportamento pós-elástico, observa-se que o PACF15 apresenta região plástica bastante limitada (Figura 5). As curvas evidenciam pequenas deformações adicionais após o fim da linearidade, seguidas de ruptura abrupta, com deformações finais variando entre, aproximadamente, 1,78% e 2,39%. Esse comportamento confirma o caráter rígido e pouco dúctil do material, típico de compósitos poliméricos reforçados com fibras curtas, nos quais o aumento de rigidez ocorre em detrimento da capacidade de redistribuição de tensões. As variações observadas entre as curvas individuais são consideradas normais e podem ser atribuídas a fatores inerentes ao processo FDM, como anisotropia mecânica, pequenas diferenças na deposição das camadas, orientação local das fibras de carbono, presença de micro vazios e variações geométricas residuais entre os corpos de prova.

A Figura 6 apresenta as curvas tensão–deformação obtidas nos ensaios de tração do polímero PA6HT. A Tabela 4 apresenta os valores quantitativos de módulo elástico, tensão de ruptura e deformação na ruptura das amostras ensaiadas.

Figura 6 - Curvas tensão–deformação obtida no ensaio de tração do P6HT.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Tabela 4 - Resultados do ensaio de tração realizados PA6 HT: módulo de elasticidade, tensão de ruptura e deformação na ruptura.

CP	Módulo (Corda 0,05 % - 2 %) [MPa]	Deformação à tração (Desloc.) em Ruptura (Padrão) [%]	Tensão à tração em Ruptura (Padrão) [MPa]	Deformação à tração (Desloc.) em Escoamento (Inclin. zero) [%]	Tensão à tração em escoamento (Inclinação zero) [MPa]	Módulo Young [MPa]
1	1809,92	8,08	1,3	2,52	40,12	2232,71
2	1867,41	11,11	1,38	2,49	41,2	2305,77
3	1715,62	9,32	1,27	2,63	39,08	2111,2
4	1796,67	17,17	1,29	2,58	40,33	2222,73
5	1827,36	13,26	1,33	2,64	42,15	2241,32
6	1783,71	13,15	4,35	2,63	41,08	2199,13
7	1839,52	9,72	3,06	2,55	41,14	2285,84

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A comparação entre os materiais analisados, Tabelas 3 e 4, reforça a interpretação dos resultados. Embora o PACF15 apresente elevada resistência à tração e alto módulo elástico, sua baixa deformação admissível e comportamento frágil sob tração limitam sua aplicação em componentes sujeitos a variações volumétricas, pulsações hidráulicas e transientes operacionais, mesmo em sistemas que operam próximos à pressão atmosférica. Nessas condições, a baixa ductilidade aumenta o risco de fratura súbita. Em contraste, o

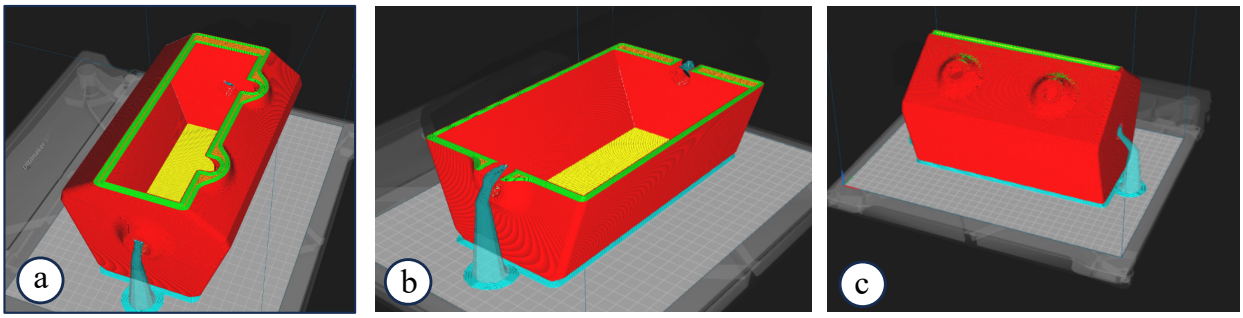
PA6HT apresenta propriedades mais equilibradas, incluindo maior alongamento na ruptura, maior tenacidade e comportamento mecânico mais homogêneo, características mais adequadas para o funcionamento seguro de um vaso de expansão hidráulico.

O PA6HT apresenta tenacidade superior ao PACF15, confirmada tanto pelos ensaios de tração realizados quanto pelas fichas técnicas dos fabricantes (Tabela 1). Em suma, os resultados dos ensaios de tração do PACF15 (Figura 5 e Tabela 3) confirmam a sua elevada rigidez e resistência instantânea, ao mesmo tempo em que evidenciam suas limitações quanto à ductilidade e tolerância a deformações. Isso justifica tecnicamente a seleção do PA6HT como material final do vaso de expansão desenvolvido neste trabalho.

3.4 Fabricação do vaso de expansão por FDM empregando o polímero PA6HT

A Figura 7 apresenta a etapa de fatiamento do modelo tridimensional, momento em que o arquivo STL é processado pelo *software* da impressora para a geração das camadas de impressão. Nessa fase, o *software* aplica diferentes cores para representar funções específicas durante a impressão: as paredes externas são exibidas em vermelho/laranja, o preenchimento interno (*infill*), em amarelo, e as estruturas de suporte necessárias para regiões inclinadas aparecem em azul. A orientação da peça na posição horizontal é claramente visualizada, garantindo maior estabilidade durante o processo de deposição de material.

Figura 7 – Representação do vaso de expansão polimérico orientado na posição horizontal no *software* de fatiamento da Ultimaker S7: (a) e (b) mostram o modelo no modo fatiado, evidenciando as paredes externas, em vermelho; o preenchimento interno em amarelo e as estruturas de suporte, em azul; (c) apresenta o modelo completo antes do fatiamento, permitindo verificar sua orientação e enquadramento dentro da área útil da mesa de impressão.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

As vistas frontais (a), isométrica (b) e lateral (c) da Figura 7 permitem verificar o correto enquadramento do modelo dentro do volume útil da mesa da Ultimaker S7, assegurando que a peça será fabricada sem colisões ou extrapolação dos limites da máquina. Essa etapa é essencial, pois confirma que a geometria projetada no CAD foi de fato produzida com fidelidade pelo equipamento, antecedendo a geração do *Gcode*, que direcionará todo o processo de impressão. A Tabela 5 apresenta os parâmetros de temperaturas, a Tabela 6 mostra os parâmetros de preenchimento e a Tabela 7 apresenta os parâmetros de topo e base do processo FDM.

Tabela 5 - Parâmetros principais de temperatura e fluxo configurados para impressão FDM na impressora Ultimaker S7.

Parâmetro	Valor	Unidade
Temperatura do Volume de Construção	37,0	°C
Temperatura de Impressão	265,0	°C
Temperatura de Impressão da Camada Inicial	265,0	°C
Temperatura Inicial de Impressão	265,0	°C
Temperatura Final de Impressão	255,0	°C
Temperatura da Mesa de Impressão	60,0	°C
Temperatura da Mesa de Impressão (Camada Inicial)	60,0	°C
Fator de Compensação de Encolhimento Horizontal	100,0	%
Fator de Compensação de Encolhimento Vertical	100,0	%
Fluxo	100,0	%
Fluxo da Parede	100,0	%
Fluxo da Parede Externa	100,0	%

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Tabela 6 - Parâmetros principais de preenchimento (*infill*) configurados para impressão por FDM na impressora Ultimaker S7.

Parâmetro	Valor	Unidade
Densidade de Preenchimento	55,0	%
Distância entre Linhas	0,7273	mm
Padrão de Preenchimento	Gyroid	-
Sobreposição do Preenchimento	10,0	%
Largura da Sobreposição	0,04	mm
Espessura da Camada de Preenchimento	0,2	mm
Preenchimento antes das Paredes	Ativado	-
Conectar Linhas de Preenchimento	Ativado	-

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

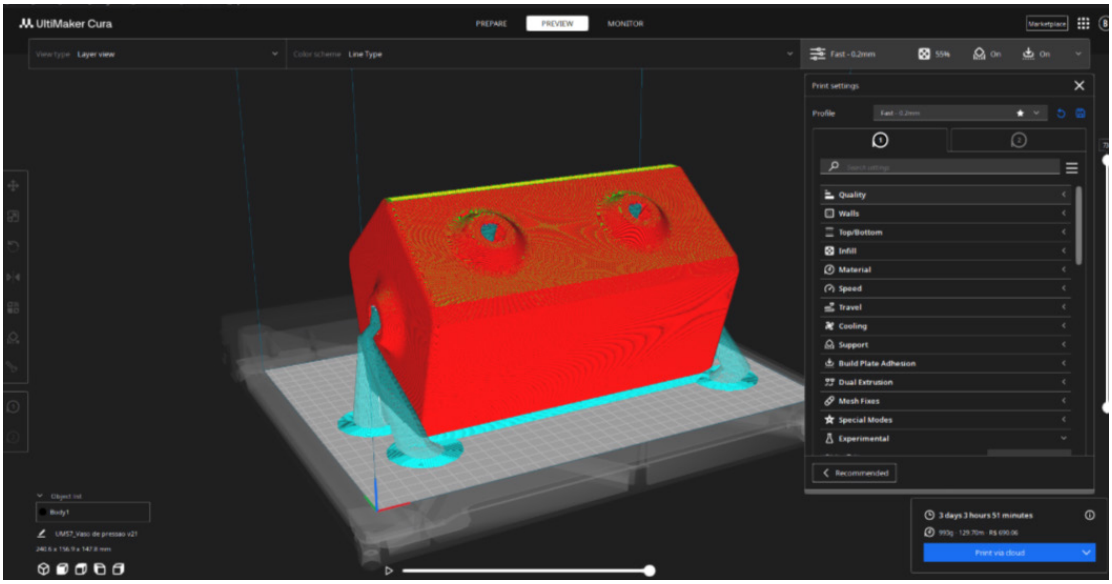
Tabela 7 – Parâmetros principais de topo e base configurados para impressão por FDM na impressora Ultimaker S7.

Parâmetro	Valor	Unidade
Camadas de Pele Superior	1	-
Largura da Linha Superior	0,4	mm
Padrão da Pele Superior	Linhas	-
Ordem Monotônica Superior	Ativado	-
Espessura Topo/Base	1,2	mm
Espessura do Topo	1,2	mm
Camadas Superiores	12	-
Espessura da Base	1,2	mm
Camadas Inferiores	12	-
Camadas Inferiores Iniciais	12	-
Padrão Topo/Base	Linhas	-
Padrão da Camada Inicial Inferior	Linhas	-

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A Figura 8 apresenta a interface do vaso de expansão desenvolvido, empregando-se os parâmetros apresentados nas Tabelas 5 a 7. Os principais parâmetros de topo e base (Tabela 7) são espessura de 1,2 mm, para topo e base, 12 camadas em cada extremidade e padrão de linhas para acabamento. A largura da linha superficial é de 0,4 mm e a ordem monotônica está ativada para melhor qualidade visual. Os principais parâmetros de preenchimento (Tabela 6) são densidade de 55%, padrão Gyroid e distância entre linhas de 0,7273 mm.

Figura 8 - Visualização no Ultimaker Cura do vaso de expansão fatiado, destacando as camadas e suportes gerados a partir dos parâmetros definidos para a impressão.

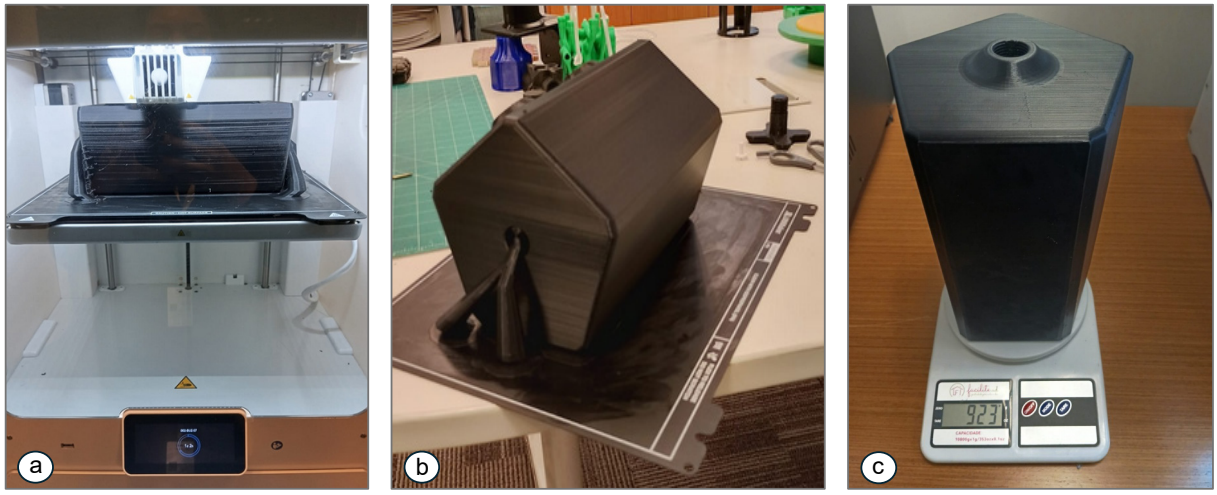


Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A Figura 9 apresenta a fabricação por FDM. Inicialmente foi impressa a estrutura auxiliar (base), seguido da impressão das primeiras camadas. O tempo de impressão da base foi de 2 dias e 21 horas. Já as primeiras camadas mostradas na Figura 9(a), foi de 2 dias e 5 horas. A Figura 9(b) mostra o vaso impresso

juntamente com a base e as estruturas de apoio, totalizando 11 dias e 8 horas. Após a finalização da impressão, a peça passou pelo pós-processamento, no qual foram removidas as estruturas de suporte, a base e efetuada a limpeza do vaso, conforme Figura 9(c).

Figura 9 – Fabricação por FDM do vaso de expansão polímero PA6HT: (a) etapa intermediária da fabricação; (b) base, componente e estruturas fabricadas; (c) vaso de expansão pós-processado e finalizado.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Como observado na Figura 9(c), o vaso de expansão fabricado em PA6HT apresentou acabamento satisfatório, evidenciando a qualidade do processo FDM e fidelidade ao projeto conceitual. Por fim, o vaso fabricado passou pelos ensaios de estanqueidade, nos quais foram aplicadas pressões entre 0,5 bar e 1,2 bar. Durante o a execução desses ensaios, não foram identificados vazamentos visíveis no componente, tendo o protótipo sido aprovado no ensaio. Esses resultados evidenciam a integridade da vedação e da estrutura impressa em PA6HT para as condições de pressão ensaiadas.

3.5 Discussão

Os resultados obtidos demonstraram a estabilidade do processo de manufatura aditiva por deposição de material fundido (FDM — *Fused Deposition Modeling*) durante mais de 70 h de impressão contínua do polímero PA6HT, utilizando o equipamento Ultimaker S7. O acompanhamento das diferentes etapas do processo, incluindo a preparação e adesão da primeira camada à plataforma, a formação da estrutura de suporte, a construção progressiva das camadas e a consolidação da geometria final, evidenciou condições adequadas de processamento ao longo de todo o ciclo de fabricação. Observou-se adequada adesão à plataforma de construção, estabilidade dimensional e controle das condições térmicas de processamento, resultando na obtenção de um componente estruturalmente íntegro, com massa final de 923 g.

O pós-processamento foi realizado mediante a remoção dos elementos de suporte, permitindo a inspeção visual das superfícies e da geometria obtida. Após a remoção dos suportes, verificou-se a manutenção da integridade geométrica do componente, com superfície predominantemente uniforme e adequada correspondência entre a peça fabricada e a geometria definida no modelo CAD. Esses resultados indicam que os parâmetros empregados no processo de impressão foram adequados à fabricação do componente proposto, não sendo observadas falhas macroscópicas que comprometessem sua integridade estrutural.

O ensaio de estanqueidade apresentou resultado satisfatório, evidenciando a ausência de vazamentos detectáveis nas condições estabelecidas para o ensaio. Esse resultado constitui um indicativo da continui-

dade e da integridade das paredes do componente fabricado, aspecto fundamental para sua aplicação como vaso de expansão em um sistema hidráulico. Entretanto, a aprovação no ensaio de estanqueidade não deve ser interpretada isoladamente, como comprovação da capacidade do componente de suportar todas as condições de pressão e carregamento presentes durante a operação. A avaliação da resistência estrutural em serviço requer a consideração conjunta das pressões de projeto, dos ciclos de carregamento, da temperatura de operação, da orientação de fabricação, da anisotropia característica do processo FDM e das propriedades mecânicas do material nas condições reais de utilização.

No contexto da aplicação proposta, o componente está submetido não apenas à pressão interna, mas também a variações de pressão decorrentes dos ciclos de acionamento do sistema hidráulico. Dessa forma, o desempenho do PA6HT deve ser analisado considerando tanto seu comportamento mecânico sob carregamento estático quanto sua resposta a solicitações cíclicas e de longa duração. Os resultados experimentais obtidos neste trabalho indicam que o processo de fabricação empregado apresentou estabilidade e repetibilidade suficientes para a obtenção de um protótipo funcional, com integridade geométrica e estanqueidade compatíveis com os requisitos preliminares estabelecidos para a aplicação.

Ressalta-se, entretanto, que as fichas técnicas dos materiais avaliados no presente trabalho não disponibilizaram informações suficientes acerca de propriedades relacionadas ao comportamento dependente do tempo, tais como módulo de fluência, deformação sob carregamento sustentado e relaxação de tensões. Essa limitação é particularmente relevante para a aplicação em estudo, uma vez que o vaso de expansão permanece submetido à pressão interna durante períodos prolongados, além de estar sujeito a ciclos de variação de pressão associados à operação do guincho hidráulico. Em materiais poliméricos semicristalinos, como as poliamidas, o comportamento viscoelástico e a dependência das propriedades mecânicas em relação à temperatura e ao tempo podem influenciar significativamente a deformação acumulada e a capacidade de retenção de carga ao longo da vida útil do componente.

Adicionalmente, a resposta mecânica do componente fabricado por FDM é influenciada pela natureza anisotrópica da peça, decorrente da adesão entre camadas e da orientação dos cordões de deposição. Portanto, os valores de propriedades mecânicas obtidos para o material em condições convencionais de ensaio não devem ser diretamente extrapolados para o componente impresso sem a devida consideração dos parâmetros de fabricação e da orientação de construção.

Como continuidade deste estudo, recomenda-se a realização de ensaios de fluência e de relaxação de tensões, bem como ensaios de fadiga sob carregamento cíclico representativo das condições de operação do guincho hidráulico. Para a caracterização do comportamento à fluência, podem ser considerados procedimentos normativos aplicáveis a materiais poliméricos, como a ASTM D2990 (ASTM, 2026). Recomenda-se, adicionalmente, a realização de ensaios sob diferentes níveis de pressão e temperatura, de modo a estabelecer a influência dessas variáveis sobre a deformação e a integridade do componente. A combinação desses ensaios com análises dimensionais permitirá uma avaliação mais abrangente da vida em serviço e dos fatores de segurança associados à utilização do vaso de expansão fabricado por manufatura aditiva.

4 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo projetar e fabricar, por manufatura aditiva FDM, um protótipo de vaso de expansão hidráulico em material polimérico, avaliando sua viabilidade para aplicação em sistemas hidráulicos de reboque marítimo. Com os resultados obtidos, conclui-se que:

– A caracterização do vaso de expansão metálico, utilizado como referência para o desenvolvimento do protótipo polimérico, foi realizada por espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX). Os

resultados permitiram identificar a composição química do material e classificá-lo como um aço-carbono da série AISI 1000, apresentando composição compatível com a faixa das ligas AISI 1005 a AISI 1015, constituindo a referência metalúrgica para o desenvolvimento e seleção do material polimérico;

– O projeto conceitual do vaso de expansão foi desenvolvido considerando as limitações e os parâmetros de processamento da impressora empregada na fabricação por FDM. A geometria pentagonal foi definida de modo a compatibilizar os requisitos de manufaturabilidade do processo com os requisitos estruturais e funcionais do componente, permitindo a fabricação da geometria proposta dentro das capacidades do equipamento utilizado;

– A seleção do material polimérico foi realizada com base na análise comparativa de propriedades mecânicas, resistência térmica e processabilidade por manufatura aditiva. O PA6HT apresentou o conjunto de propriedades mais compatível com os requisitos do projeto, associado à adequada processabilidade pela tecnologia FDM disponível, sendo, portanto, selecionado para a fabricação do protótipo do vaso de expansão hidráulico;

– Em comparação ao vaso de expansão metálico, o modelo polimérico desenvolvido apresenta vantagens em termos de leveza, facilidade de fabricação e possibilidade de customização, mas pode demandar cuidados extras em relação à resistência a impactos e à exposição prolongada a altas temperaturas. De modo geral, os resultados obtidos demonstram que a eventual substituição do vaso de expansão metálico por um modelo polimérico fabricado por manufatura aditiva é viável, desde que sejam respeitadas as limitações do material e do processo e, consequentemente, do projeto do vaso de expansão adaptado a manufatura aditiva;

– A manufatura aditiva por FDM demonstrou potencial para a fabricação do protótipo do vaso de expansão hidráulico, proporcionando redução de massa, flexibilidade na fabricação da geometria pentagonal definida em projeto, redução do tempo de manufatura e rastreabilidade dos parâmetros do processo. O desempenho apresentado pelo PA6HT nos ensaios realizados, associado à integridade geométrica e à estanqueidade do componente, indica a viabilidade técnica preliminar da utilização de materiais poliméricos em componentes auxiliares de sistemas hidráulicos embarcados. Entretanto, a aplicação em ambiente *offshore* requer validações complementares, a fim de avaliar o comportamento do componente sob condições operacionais reais.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (ASME). BPVC Section VIII: **Rules for construction of pressure vessels**, division 1. New York: ASME, 2025.

ASM HANDBOOK COMMITTEE. **Properties and selection: irons, steels, and high-performance alloys**. (ASM Handbook, v. 1). Materials Park, OH: ASM International, 1990.

ASTM INTERNATIONAL (ASTM). ASTM D638-22: **Standard test method for tensile properties of plastics**. West Conshohocken, PA: ASTM, 2022.

ASTM INTERNATIONAL (ASTM). ASTM D2990: **Standard Test Methods for Tensile, Compressive, and Flexural Creep and Creep-Rupture of Plastics**. West Conshohocken, PA: ASTM, 2026.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego (MTE). **NR-13: caldeiras, vasos de pressão, tubulações e tanques metálicos de armazenamento.** Brasília, DF: MTE, 2021.

CALIGNANO, F.; MERCURIO, V. An overview of the impact of additive manufacturing on supply chain, reshoring, and sustainability. **Cleaner Logistics and Supply Chain**, v. 7(100103), p.01-10, 2023. https://doi.org/10.1016/j.clscn.2023.100103

CALLISTER JR., W.D.; RETHWISCH, D.G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

FALKONAKIS, I.; LOTFIAN, S.; YETER, B. Multi-criteria decision analysis of an innovative additive manufacturing technique for onboard maintenance. **Sustainability**, v. 16(3763). 03-18, 2024. https://doi.org/10.3390/su16093763

GIBSON, I.; ROSEN, D. W.; STUCKER, B. **Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing.** 2. ed. New York: Springer, 2015.

HÄLLGREN, S.; PEJRYD, L.; EKENGREN, J. Additive manufacturing and high-speed machining: Cost comparison of short lead time manufacturing method. **Procedia CIRP**, v. 50, p. 384-389, 2016. https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.049

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO); ASTM INTERNATIONAL (ASTM). ISO/ASTM 52910: **additive manufacturing — design — requirements, guidelines and recommendations.** Geneva: ISO, 2018.

IMO. Regra 62 da SOLAS 1974. Disponível em: https://www.imo.org. Acesso em: 13 jan. 2026.

KORNIEJENKO, K.; GĄDEK, S.; DYNOWSKI, P.; TRAN, D. H.; RUDZIEWICZ, M.; POSE, S.; GRAB, T. Additive manufacturing in underwater applications. **Applied Sciences**, v. 14(4), p. 01-20, 2024. https://doi.org/10.3390/app14041346

LIMA JUNIOR, Mouaci Almeida. **Sistema de guinchos de embarcações de manuseio de âncoras**, 2014. Monografia (Curso de Aperfeiçoamento para Oficial de Máquinas), Centro de Instrução Almirante Graça Aranha, Rio de Janeiro, 2014.

MORAIS JUNIOR, J. M. **Petróleo em águas profundas: uma história tecnológica da Petrobras na exploração e produção offshore**. Ipea; Petrobras, Brasília, Brasil, 2013.

NUNES, V. R. *et al*. Sistema de produção e distribuição de energia elétrica em um AHTS (*Anchor Handling Tug Supply*). **Revista Naval e Oceânica**, Rio de Janeiro, v. 1, p. 37-53, 2024. https://doi.org/10.12957/rno.2024.87890

O'NEILL, F.; MEHMANPARAST, A. A review of additive manufacturing capabilities for potential application in offshore renewable energy structures. **Forces in Mechanics**, v. 14, p. 100-255, 2024.https://doi.org/10.1016/j.finmec.2024.100255

SAE INTERNATIONAL (SAE). SAE J403: **chemical compositions of SAE carbon steels.** Warrendale, PA: SAE, 2014.

SINOTTI, J. N. **Manufatura 4.0: entendendo a evolução**. [S.l.]: Publicação independente, 2023.

VALLADÃO, Marcos de Oliveira Dias. **Solução de docagem para estaleiro de reparo de embarcações de apoio offshore.** 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Naval e Oceânica), Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

ZAVVAR, E.; ROSA-SANTOS, P.; TAVEIRA-PINTO, F.; GHAFOORI, E. Lifetime extension of offshore support structures of wind turbines: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 217(115788), p. 01-27, 2025 https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115788