



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

Trituração de Dutos Flexíveis *Offshore*: Desafios para a reciclagem e a Sustentabilidade na Indústria de óleo e Gás

Isabela Fernandes de Oliveira

Universidade Federal do Rio de Janeiro / isabela.oli86@gmail.com

Lais Bubach Carvalho Simão

Universidade Federal do Rio de Janeiro / lais.bubach@pep.ufrj.br

Beatriz Bandeira dos Santos

Universidade Federal do Rio de Janeiro / biabandeira@pep.ufrj.br

Fernanda Rodrigues Lago

Universidade Federal do Rio de Janeiro / fernandalago@lts.coppe.ufrj.br

Ana Tereza Marques Parente

Universidade Federal do Rio de Janeiro / anaparente@sage.coppe.ufrj.br

Marcelo Igor Lourenço de Souza

Universidade Federal do Rio de Janeiro / migor@lts.coppe.ufrj.br

Resumo

O descomissionamento de estruturas submarinas da indústria de petróleo e gás representa um desafio técnico, ambiental e ocupacional relevante no Brasil, especialmente quanto à gestão dos resíduos gerados. Nesse âmbito, os dutos flexíveis destacam-se pela complexidade de sua composição, que combina camadas metálicas e poliméricas, exigindo métodos específicos de desmonte. Este estudo analisou o processo de trituração



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

desses dutos, considerando seus aspectos técnicos, regulatórios e de saúde e segurança do trabalhador. A partir de observações diretas, foi elaborado um fluxograma do processo e uma análise SWOT para identificar forças, fraquezas, oportunidades e ameaças. Os resultados indicam que a trituração é um processo mecanizado e replicável, com potencial para ampliar a reciclagem de materiais metálicos, embora apresente limitações na recuperação de polímeros e riscos ocupacionais associados à operação dos equipamentos. A adoção de inovações tecnológicas e de práticas ergonômicas podem mitigar esses riscos e ampliar a eficiência operacional. Além disso, propõe-se a incorporação dos princípios da Economia da Funcionalidade e da Cooperação (EFC) como estratégia para fortalecer a sustentabilidade e a valorização do trabalho nos processos de reciclagem, contribuindo para um modelo mais seguro, justo e alinhado aos objetivos de desenvolvimento sustentável.

Palavras-chave: Descomissionamento *offshore*, Dutos flexíveis, Reciclagem, Trituração, Saúde e segurança do trabalhador.

Abstract

The decommissioning of subsea structures in the oil and gas industry represents a significant technical, environmental, and occupational challenge in Brazil, particularly regarding the management of generated waste. In this context, flexible pipes stand out due to the complexity of their composition, which combines metallic and polymeric layers and requires specific dismantling methods. This study analyzed the shredding process of these pipes, considering its technical, regulatory, and occupational health and safety aspects. Based on direct observations, a process flowchart and a SWOT analysis were developed to identify strengths, weaknesses, opportunities, and threats. The results indicate that shredding is a mechanized and replicable process with the potential to enhance the recycling of metallic materials, although it presents limitations in polymer recovery and occupational risks associated with equipment operation. The adoption of technological innovations and ergonomic practices can mitigate these risks and improve operational efficiency. Furthermore, the incorporation of the principles of the Functional



and Cooperative Economy (EFC) is proposed as a strategy to strengthen sustainability and enhance the value of work within recycling processes, contributing to a safer, fairer, and more sustainable model aligned with the Sustainable Development Goals.

Keywords: Offshore decommissioning, Flexible pipes, Recycling, Shredding, Occupational health and safety.

Resumen

El desmantelamiento de estructuras submarinas en la industria del petróleo y gas representa un desafío técnico, ambiental y ocupacional relevante en Brasil, especialmente en lo que respecta a la gestión de los residuos generados. En este contexto, los ductos flexibles se destacan por la complejidad de su composición, que combina capas metálicas y poliméricas, lo que requiere métodos específicos de desmantelamiento. Este estudio analizó el proceso de trituración de estos ductos, considerando sus aspectos técnicos, regulatorios y de salud y seguridad del trabajo. A partir de observaciones directas, se elaboró un diagrama de flujo del proceso y un análisis FODA para identificar fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas. Los resultados indican que la trituración es un proceso mecanizado y replicable, con potencial para ampliar el reciclaje de materiales metálicos, aunque presenta limitaciones en la recuperación de polímeros y riesgos ocupacionales asociados a la operación de los equipos. La adopción de innovaciones tecnológicas y prácticas ergonómicas puede mitigar estos riesgos y aumentar la eficiencia operativa. Además, se propone la incorporación de los principios de la Economía de la Funcionalidad y la Cooperación (EFC) como estrategia para fortalecer la sostenibilidad y la valorización del trabajo en los procesos de reciclaje, contribuyendo a un modelo más seguro, justo y alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Palabras clave: Desmantelamiento offshore, Ductos flexibles, Reciclaje, Trituración, Salud y seguridad ocupacional.

1. INTRODUÇÃO

O petróleo e o gás natural figuram entre as principais fontes de energia que impulsionam a economia mundial e sua indústria produtora está presente ao redor do mundo. No Brasil, estão presentes mais de 120 plataformas em produção offshore (ANP, 2021). Essa infraestrutura está envelhecendo no mundo (DOYLE et al., 2008) e, particularmente, no Brasil existem 72 processos em trâmite para descomissionamentos de plataformas offshore (ANP, 2025). Esse envelhecimento tem sido motivo para uma preocupação global com o fim de vida dessas estruturas e a iminência de uma grande quantidade de iniciativas de descomissionamento, o que implica em custos imprevisíveis, altos riscos operacionais, impactos sociais e ambientais (SOARES et al., 2023; FOWLER et al., 2014; MARTINS et al., 2020).

O descomissionamento envolve todos os processos constituintes da desativação de uma instalação, incluindo a desconstrução ou o desmonte dos componentes dessa estrutura e o direcionamento desses componentes para reuso, reciclagem ou destinação final (FAM et al., 2018). No Brasil o descomissionamento é regido pela Resolução da Agência Nacional de Petróleo (ANP) nº 817, de 24 de abril de 2020 (ANP, 2020), que exige a remoção total das estruturas – exceto em regime de exceção, quando análises justifiquem a permanência in situ parcial ou total.

O processo de descomissionamento de instalações de produção offshore de petróleo e gás é complexo e gera custos elevados, atraindo interesse e espaço na literatura recente (CAPOBIANCO et al., 2021). Dentre as estruturas que compõem um sistema offshore de produção, os equipamentos submarinos requerem atenção especial devido à sua natureza sensível e aos desafios logísticos associados ao seu processo de descomissionamento (MARTINS et al., 2020).

O descomissionamento de estruturas submarinas apresenta alto potencial de geração de resíduos e materiais. Em um contexto em que a indústria de Óleo & Gás (O&G) enfrenta pressões crescentes para adotar práticas mais sustentáveis na gestão do fim de vida útil das suas estruturas operacionais offshore (SENAVIRATHNA; GALAPPATHTHI; RANJAN, 2022), iniciativas de reuso e reciclagem das instalações contribuem para a adoção de um novo paradigma alinhado aos princípios da economia circular, que emerge como uma alternativa ao insustentável modelo econômico linear

pautado na tríade extrair-produzir-descartar (em inglês, *take-make-waste*) e gera benefícios ambientais para diversos setores industriais ao promover o retorno de materiais às cadeias de valor como matéria prima secundária através de fluxos reversos (SOUZA & ANGELO, 2021).

Algumas das principais estruturas listadas nos Projetos de Descomissionamento de Instalações (PDIs) disponíveis no site da ANP são dutos rígidos, dutos flexíveis, *manifolds* e umbilicais (ANP, 2020). Os dutos rígidos e os *manifolds* são compostos majoritariamente por aço e como este é um material infinitamente reciclável e o mais reciclado do mundo, já está incorporado no *core-business* das indústrias siderúrgicas a utilização da sucata metálica como matéria prima secundária e a sucata de aço proveniente do descomissionamento de equipamentos do setor de O&G pode constituir uma importante fonte de oferta deste resíduo no país (OLIVEIRA et al., 2024).

Os dutos flexíveis apresentam uma estrutura mais complexa, resultante da utilização de diversos materiais em sua composição. Essa estrutura constitui um produto que não é facilmente desconstruído ou reciclado, necessitando do desenvolvimento de métodos de desmantelamento seguros, ecológicos e econômicos (ZHANG et al., 2023).

Dessa maneira, embora os dutos flexíveis sejam compostos majoritariamente por aço, a presença das camadas helicoidais metálicas intercaladas com camadas poliméricas (TANG, 2023) exige que os materiais que compõem o duto sejam separados antes que possam ser reciclados. Atualmente duas rotas tecnológicas diferentes são utilizadas para essa separação: a trituração dos dutos utilizando-se equipamentos do tipo *shredder* e o desmantelamento manual dos dutos.

Esse trabalho tem como objetivo apresentar a trituração das linhas flexíveis no Brasil, discutindo suas principais vulnerabilidades e potencialidades considerando-se aspectos de saúde e segurança operacional, assim como aspectos técnicos do processo e aspectos regulatórios.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Cenário brasileiro

Os resíduos gerados após o descomissionamento dos sistemas submarinos de produção de petróleo offshore são considerados resíduos sólidos, cuja gestão é regida pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), com exceção dos rejeitos radioativos. A PNRS é o principal marco legal que rege a reciclagem no Brasil, estabelecendo princípios, objetivos, instrumentos e diretrizes para a gestão integrada e o gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos gerados no contexto urbano e industrial, nas etapas de pré e pós consumo.

A aplicação da PNRS sobre o descomissionamento offshore deve ser harmonizada, ainda, com os objetivos da Política Nacional do Meio Ambiente (Lei 6.938/1981), da Política Marítima Nacional (Decreto 12.481/2025), da Política Nacional sobre os Recursos do Mar (Decreto 5.377/2005) e da Lei do Plano de Gerenciamento Costeiro (7.661/1988), visto que o descomissionamento de estruturas marítimas, ao final de seu ciclo de vida, é previsto na Política Marítima Nacional (Decreto 12.481/2025) como uma das diretrizes voltadas à conservação e ao uso sustentável da biodiversidade e dos ecossistemas marinhos, costeiros e fluviolacustres. Destaca-se ainda que todas as atividades laborais do processo, desde a retirada das estruturas do leito marinho até sua reciclagem, devem seguir as prescrições previstas nas Normas Regulamentadoras do Ministério do Trabalho e Emprego pertinentes (BRASIL, [s.d. b]).

Nesse contexto, a Política estabelece como orientação estratégica o incentivo ao descomissionamento dessas estruturas, assegurando sua destinação final de forma ambientalmente adequada, em consonância com os princípios da reciclagem verde e da prevenção da poluição hídrica. Para que seja viável a reciclagem dos dutos flexíveis é necessário executar uma etapa de pré-tratamento, que consiste no desmonte dos dutos, de maneira a possibilitar a separação dos materiais que compõem essa estrutura complexa. Atualmente duas rotas tecnológicas diferentes são utilizadas para essa separação prévia: a trituração dos dutos utilizando-se equipamentos do tipo *shredder* e o desmantelamento manual dos dutos.

2.2. Composição das Linhas Flexíveis e os Desafios de sua Reciclagem



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

No cenário nacional, desde o início da exploração de petróleo e gás em águas profundas, os dutos flexíveis foram considerados a opção mais adequada para o transporte de fluidos provenientes das instalações offshore. Tais dutos apresentam vantagens significativas em relação aos dutos rígidos, não apenas pela maior facilidade de manuseio, mas também pela eficiência nos processos de transporte, instalação e operação (MARINHO, 2007).

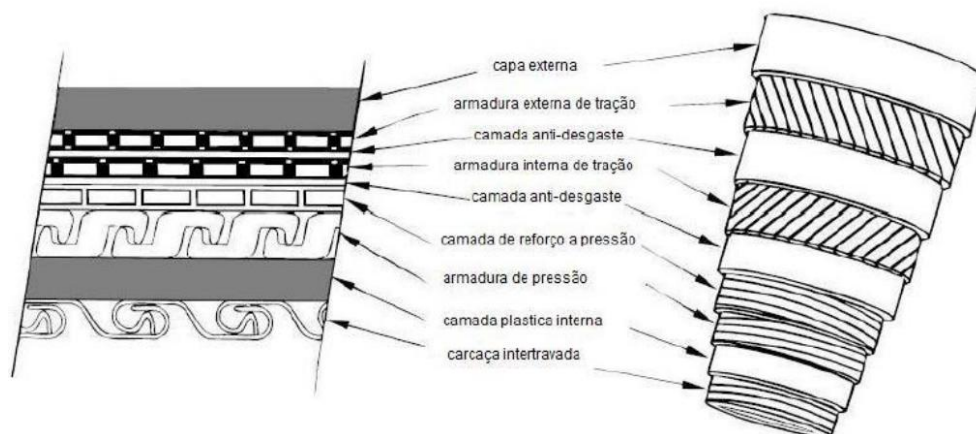
Como consequência, a indústria brasileira de O&G é marcada pelo uso extensivo de dutos flexíveis e umbilicais submarinos, cujos comprimentos totais podem ultrapassar 300 km em um único projeto de descomissionamento (FGV, 2021), e cujo descomissionamento se configura como um desafio particular ao país. O Centro para Descomissionamento da Austrália (CODA) estima que aproximadamente 5.695 quilotoneladas de infraestrutura offshore precisarão ser removidas das áreas offshore da Austrália, porém, essa estrutura é composta majoritariamente por dutos rígidos (CODA 2022). O relatório de descomissionamento da OEUK (*Offshore Energies UK*) de 2024, por sua vez, aponta um total de 68,3km de linhas descomissionadas em 2023 e cerca de 326km em 2024. Os dados evidenciam a magnitude do cenário brasileiro em comparação a outras regiões no que se refere a utilização e quantidade de dutos flexíveis descomissionados, os quais serão, em etapa posterior, desmanchados para fins de reciclagem.

Por tal motivo, ressalta-se que o conhecimento aprofundado das camadas estruturais e dos materiais constituintes desses dutos é importante, pois tais aspectos condicionam as estratégias de corte, separação e tratamento durante o desmanche das linhas para a recuperação mais eficiente dos materiais. Os dutos flexíveis são amplamente utilizados nas operações de produção e transporte de óleo e gás no ambiente offshore, sendo compostos por múltiplas camadas de materiais metálicos e poliméricos, cuja combinação assegura o desempenho global requerido para tais aplicações (API, 2002).

As camadas metálicas, incluindo a carcaça, a armadura de pressão e as armaduras de tração, fornecem a resistência necessária para suportar os esforços externos. As camadas poliméricas garantem a vedação do sistema, enquanto as fitas antidesgaste minimizam o atrito entre os componentes metálicos. O número de camadas em dutos

flexíveis varia conforme os requisitos operacionais (YE, 2025). Sendo assim, a versatilidade desses dutos se dá pela sua própria constituição em camadas (DAULT, 2024). A Figura 1 ilustra os detalhes de cada camada.

Figura 1. Camadas típicas das paredes de um duto flexível



Fonte: Dault (2025)

A carcaça interna, armadura de pressão e tração são camadas metálicas de aço carbono e/ou inox, sendo facilmente absorvidas pela indústria siderúrgica como matéria-prima secundária. Por outro lado, a camada plástica interna ou barreira de pressão, as camadas antidesgaste, fita de alta resistência e capa externa são compostas de materiais poliméricos, como poliamida (PA), fluoreto de polivinilideno (PVDF), polietileno de alta densidade (PEAD) e aramidas (NIELSEN, 2008). Tais polímeros possuem potencial de serem reciclados e reinseridos na cadeia produtiva com novas utilizações.

DIAS et al (2025) apontam que, de modo geral, embora envelhecidos devido ao tempo operacional, os polímeros provenientes de linhas flexíveis descomissionadas mantêm a capacidade de suportar carregamentos mecânicos e térmicos, bem como resistência às ações químicas. Módulos de perda e armazenamento de misturas de PVDF reciclado (resíduos de processamento) com PVDF novo permanecem adequados após envelhecimento térmico, demonstrando viabilidade para reaproveitamento (CIRILO, 2017).

Apesar disso, a reciclagem e a reutilização de polímeros de engenharia configuram um processo complexo. O mercado desses materiais reciclados permanece restrito, tanto devido a seus elevados custos quanto das rigorosas exigências de desempenho, que frequentemente conduzem os fabricantes à preferência pelo uso de materiais virgens, sobretudo por razões de segurança (DIAS et al, 2025). Nesse contexto, o desenvolvimento de técnicas, tecnologias e melhores práticas de separação desses materiais provenientes de linhas flexíveis descomissionadas na indústria de O&G é uma demanda importante , mas ainda em evolução.

3. MÉTODO

Este artigo aborda a trituração de dutos flexíveis provenientes do descomissionamento de estruturas submarinas da indústria de O&G , que constitui um processo particular no âmbito das atividades de reciclagem. A natureza exclusiva do processo, combinada com a lacuna identificada na literatura em relação ao estudo das etapas em terra de projetos de descomissionamento (Santos et al., 2024), motivou o desenvolvimento deste trabalho na forma de um estudo de caso (Yin, 2005).

O estudo de caso é um método de observação da realidade social que faz uso de diversas técnicas de investigação social, como entrevistas, observação participante, revisão de documentos e coleta de histórias de vida (Godoy, 2005). Consiste em uma estratégia de pesquisa que permite explorar um fenômeno dentro de seu contexto real, apoiando-se em múltiplas fontes de evidência para aumentar a robustez dos resultados (Yin, 2005).

A coleta de dados foi realizada por meio de observações diretas, com o objetivo de garantir a robustez dos dados do estudo de caso. Essa abordagem permitiu reunir informações focadas e direcionadas sobre os temas da pesquisa, além de registrar eventos em tempo real, essenciais para a identificação de riscos à saúde e segurança dos trabalhadores. Os dados coletados foram registrados em diários de campo pelos autores, incluindo descrições dos serviços realizados pelo grupo. Esses dados foram utilizados para construir um modelo do processo observado, consistindo em uma representação

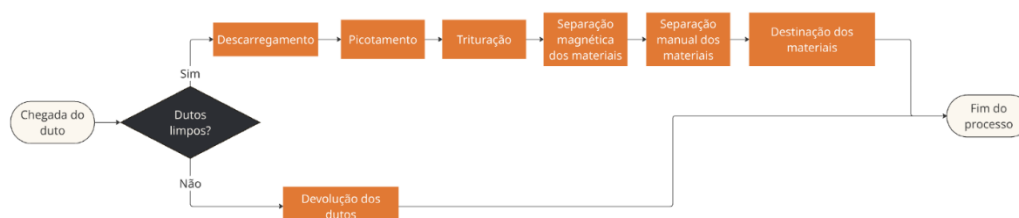
abstrata da realidade observada, apresentada por meio de um fluxograma, com o objetivo principal de facilitar a compreensão de um processo (Baldam et al., 2014). Os dados coletados também foram utilizados para gerar uma descrição detalhada das atividades, possibilitando a compreensão do trabalho a partir dos conceitos da Análise Ergonômica do Trabalho (Wisner, 1987; Guérin et al., 2001).

A análise dos dados coletados foi apoiada pela aplicação de uma Matriz SWOT, que consiste em uma ferramenta de planejamento estratégico que analisa um negócio através de quatro elementos: Forças (Strengths), Fraquezas (Weaknesses), Oportunidades (Opportunities) e Ameaças (Threats). As Forças e Fraquezas são fatores internos controláveis, enquanto as Oportunidades e Ameaças são fatores externos sobre os quais a empresa não tem controle (Chiavenato, 2004). Dessa maneira, os aspectos internos analisados pela Matriz SWOT foram resultado dos dados primários coletados, enquanto os aspectos externos foram avaliados a partir de revisão documental de literatura científica, relatórios técnicos e regulamentações pertinentes.

4. RESULTADOS

As principais etapas do processo de trituração de dutos flexíveis podem ser observadas na Figura 2, que são: Recebimento e preparação dos dutos flexíveis (etapa 1); Trituração (etapa 2); Separação do aço carbono, aço inox e polímeros (etapa 3); Separação manual dos polímeros (etapa 4); Moagem dos polímeros (etapa 5) e Pirólise (etapa 6). A figura 2 demonstra o fluxograma do processo.

Figura 2. Fluxograma do processo de trituração de flexíveis



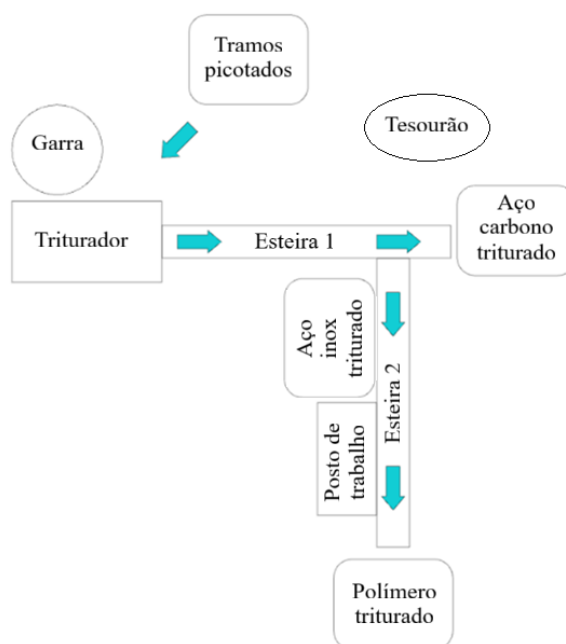
Fonte: Os autores (2025)

Para desenvolvimento dos processos, os equipamentos utilizados incluíram triturador, garras, pá-carregadeira e tesourão. A capacidade diária de trituração é de

aproximadamente 100 Ton/dia, operando em horário comercial. Na primeira etapa do processo, os tramos de dutos flexíveis, com comprimentos aproximados de 6 metros, são recebidos por via terrestre e descarregados em um pátio pavimentado e impermeabilizado, dotado de um sistema de contenção e captação de óleo. Posteriormente, os dutos são seccionados em fragmentos menores por meio de uma tesoura hidráulica industrial, acoplada em uma retroescavadeira. Componentes metálicos, como conexões e outros acessórios eventualmente acoplados aos dutos, são removidos antes da trituração e destinados diretamente à reciclagem siderúrgica.

Os fragmentos picotados são então introduzidos no equipamento de trituração com o auxílio de pás carregadeiras, iniciando o processo de trituração propriamente dito. No interior do equipamento, o material é submetido ao impacto de oito martelos e, em seguida, classificado granulometricamente por uma grade de peneiramento. O fluxo de alimentação é coordenado pelo operador da sala de comando, que sinaliza a disponibilidade do equipamento para o recebimento de um novo lote de material. A Figura 3 apresenta o layout da área de processamento, juntamente com a representação esquemática do fluxo de material.

Figura 3. Fluxo do material no triturador e nas esteiras de separação



Fonte: Os autores (2025)

A terceira etapa do processo consiste na separação das frações de aço carbono, aço inoxidável e polímeros. Inicialmente, o material processado é transportado pela Esteira 1, onde um sistema de separação magnética remove o aço carbono, que é então direcionado para um ponto de coleta específico. O material remanescente, uma mistura de aço inoxidável e polímeros, prossegue para a Esteira 2. Nesta segunda esteira, operadores realizam a segregação manual do aço inoxidável, depositando-o em uma caçamba designada, conforme layout da Figura 3. O fluxo de material restante, agora composto exclusivamente por polímeros, continua até o final da Esteira 2, onde é coletado.

As frações de aço carbono e aço inoxidável, segregadas por via magnética e manual, respectivamente, são armazenadas para posterior envio à indústria siderúrgica. A massa de polímeros, por sua vez, é submetida a uma etapa adicional de triagem manual, na qual se seleciona uma parcela para reciclagem mecânica. Este processo recupera aproximadamente 50% da massa total de polímeros contida nos dutos triturados. Uma análise estratégica do processo de trituração, contemplando suas forças, fraquezas, oportunidades e ameaças, é apresentada na Matriz SWOT da Figura 4.

Figura 4. Matriz SWOT aplicada ao processo de trituração

S	W
Previsibilidade de duração das atividades Alta produtividade, chegando a 100t/dia Facilidade de padronização do processo	Trabalho exposto a intempéries Exposição dos trabalhadores a ruído e calor Exposição dos trabalhadores a riscos associados a esforços repetitivos nas atividades de separação de resíduos com auxílio de esteiras rolantes Degradação de parte dos polímeros, impossibilitando sua destinação para a reciclagem
O	T
Previsão de grande número de projetos de descomissionamento de estruturas submarinas Potencial de integração dos catadores de materiais recicláveis e reutilizáveis na etapa de separação, em conformidade com a PNRS	Investimento inicial para instalação de uma planta de trituração é alto quando comparado a outros métodos de desmonte de flexíveis Alta variabilidade do preço de polímeros reciclados

Fonte: Os autores (2025)

5. DISCUSSÕES

Uma das principais fraquezas identificadas no processo de trituração é a dificuldade de separar os polímeros e direcioná-los para a reciclagem, levando a um

aproveitamento somente parcial dos resíduos resultantes do descomissionamento e reduzindo o desempenho do processo em aspectos ambientais e econômicos. No processo mapeado uma melhoria de processo já havia sido implementada para reduzir essa perda, através da incorporação de uma segunda separação feita depois da passagem do material pelas esteiras do triturador. Essa fraqueza poderia ser mitigada de forma mais extensa e evitando a exposição dos trabalhadores ao esforço repetitivo pela adoção de inovações tecnológicas voltadas para a identificação e separação dos polímeros (BREDÁCS et al., 2025; DE LIMA RIBEIRO, 2024, WERNER et al., 2023).

Outra maneira de mitigar essa fraqueza seria a associação da trituração a uma planta de pirólise para a reciclagem dos polímeros cuja reciclagem mecânica se torne inviável depois da trituração, seja por inviabilidade técnica (impossibilidade de se separar os polímeros ou degradação do polímero por exposição a altas temperaturas durante a trituração) ou econômica.

As demais fraquezas identificadas no processo dizem respeito à exposição dos trabalhadores ao risco. Embora não seja possível eliminar completamente os riscos associados a um processo produtivo, o avançado grau de mecanização do processo facilita a sua padronização e a subsequente tomada de ações de mitigação desses riscos, através da adoção de melhores práticas do mercado para a operação dos equipamentos utilizados e aderência a normas de segurança.

O grau de mecanização do processo é uma consequência direta dos equipamentos utilizados, o que resulta em um investimento inicial para a implementação de uma planta de trituração mais alto do que o de outros métodos de desmonte de flexíveis, representando uma ameaça a esse tipo de processo. Entretanto, é também responsável pelas suas maiores forças: a previsibilidade da duração das atividades e a alta produtividade comprovada, que garantem confiabilidade na capacidade produtiva e na capacidade de processar lotes de material dentro de prazos pré-definidos, e a facilidade de padronização e replicabilidade do processo, que podem contribuir para uma implementação relativamente rápida de novas plantas, facilitando o treinamento de novos trabalhadores e contribuindo para aumentar a quantidade de plantas de trituração existentes no país, cujo pequeno número pode ser percebido por operadoras de petróleo

inclinadas a adotarem a trituração como rota de desmonte para seus dutos flexíveis descomissionados como uma ameaça.

A velocidade com que essas novas plantas podem ser implementadas - e a quantidade de novas plantas que vão surgir - são impactadas, entretanto, pela ameaça representada pela flutuação dos preços de polímeros reciclados no mercado. Essa ameaça poderia ser mitigada por políticas de incentivo à reciclagem e pela construção de um ecossistema de cooperação em que as empresas não sintam a necessidade de competir entre si, reduzindo ainda mais suas margens de lucro e ameaçando a viabilidade econômica de seus processos.

Um ecossistema dessa natureza pode ser incentivado através da adoção de um modelo de negócio alinhado com os princípios da Economia da Funcionalidade e da Cooperação (EFC), que oferece um referencial que integra a dimensão do trabalho e o bem-estar social às estratégias de sustentabilidade. A EFC propõe um modelo de negócio focado na construção de Ecossistemas Cooperativos Territoriais, onde o valor é gerado não apenas pela circularidade, mas pelas relações de cooperação e pela valorização da atividade laboral. Ao aplicar esta abordagem aos processos de desmanche de dutos flexíveis, os trabalhadores são reconhecidos como agentes centrais da transformação, promovendo inovação social e soluções resilientes (SILVA et al., 2019).

A emergência da necessidade deste novo modelo evidencia-se na cadeia atual analisada de desmanche de dutos flexíveis, marcada pela intensa competição que resulta em precarização do trabalho e riscos à segurança. Como alternativa, a EFC considera a formação de Ecossistemas Cooperativos Territoriais (GAGLIO; LORIOL; DU TERTRE, 2011), que superam a lógica concorrencial por meio da colaboração entre os atores, do compartilhamento de recursos e da participação ativa dos trabalhadores (LIMA et al., 2019). Assim, o desmantelamento transcende sua função de fim de ciclo, tornando-se uma oportunidade para a regeneração de valores, o fortalecimento do território e um desenvolvimento social e ambientalmente justo.

O desmanche onshore dos dutos flexíveis e umbilicais configuram uma etapa crítica do processo de descomissionamento de sistemas submarinos de produção de O&G, cujos riscos para a saúde ocupacional e a segurança do trabalhador são pouco

compreendidos, em contraste às operações offshore do processo. Independente do processo utilizado para o desmonte, as atividades são por vezes realizadas em condições de trabalho que carecem melhorias e em territórios socialmente vulneráveis e demandam análise mais aprofundada não apenas para garantia de requisitos regulamentares e melhoria das condições de trabalho, mas também para o desenvolvimento socioeconômico dos territórios onde as empresas se instalam.

Para fomentar a criação de postos de trabalho adequados e melhorias operacionais, é necessário adotar uma abordagem centrada na análise do trabalho real, que considera as variabilidades e os determinantes da atividade de trabalho (DANIELLOU & BÉGUIN, 2007). Em conformidade com a legislação brasileira, a metodologia da Análise Ergonômica do Trabalho (AET), prevista na Norma Regulamentadora 17, permite compreender a dinâmica laboral e as estratégias desenvolvidas pelos trabalhadores. (BRASIL, [s.d. a]). A AET preconiza a construção colaborativa de soluções e melhorias, valorizando o saber tácito dos trabalhadores para enfrentar as demandas do ambiente de trabalho. (GUÉRIN et al., 2001). Essa abordagem não só promove um ambiente laboral mais seguro e eficiente, mas também contribui para a redução da incidência de adoecimentos e afastamentos. Dessa forma, a saúde e o bem-estar dos trabalhadores consolidam-se como pilares para a sustentabilidade do processo de desmanche *onshore* (Béguin, 2006).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O descomissionamento de estruturas submarinas consiste em um processo complexo que apresenta ao mesmo tempo altos custos associados e alto potencial de geração de resíduos e materiais. No cenário nacional, grande parte dos resíduos provenientes do descomissionamento de estruturas submarinas de produção de O&G é composto por dutos flexíveis descomissionados, cuja estrutura interna exige a adoção de um processo de desmonte que possibilite a separação das suas camadas. Atualmente, duas rotas tecnológicas diferentes são utilizadas para essa separação, e este estudo deteve-se em analisar as principais vulnerabilidades e potencialidades do processo de trituração.

O processo de trituração é marcado por um grau relativamente alto de mecanização, que eleva o investimento inicial necessário para a implementação do processo, porém resulta em maior padronização e replicabilidade dos processos, previsibilidade da duração das atividades e alta produtividade. As principais fraquezas do processo referem-se à exposição dos trabalhadores a riscos que, embora não possam ser completamente neutralizados, podem ser mitigados pela adoção de melhores práticas do mercado para a operação dos equipamentos utilizados e aderência a normas de saúde e segurança, e à degradação sofrida pelos polímeros, dificultando a sua separação e subsequente reciclagem. Essa fraqueza, por sua vez, pode ser atenuada pela adoção de melhorias de processo – várias das quais foram observadas no mercado brasileiro.

Merece destaque, entretanto, a ameaça representada pela flutuação dos preços de polímeros reciclados no mercado, agravada pelo caráter fortemente concorrencial competitivo do mercado de reciclagem. A intensa competição identificada resulta em precarização do trabalho e riscos à saúde e segurança do trabalhar, e aponta para o grande potencial da criação de um ambiente cooperativo através da implementação da abordagem da EFC como uma ferramenta frente a principal ameaça identificada no presente estudo.

A construção e a implementação de ecossistemas cooperativos a partir de uma abordagem baseada na EFC, assim como a análise de viabilidade técnica e econômica das soluções propostas para mitigação das fraquezas do processo, consistem em possibilidades de desenvolvimentos de pesquisas futuras, dando continuidade aos achados do presente estudo, cuja principal limitação consistiu na impossibilidade de realizar uma Análise Ergonômica do Trabalho a fim de para mapear riscos reais aos quais os trabalhadores estão expostos, por restrições de tempo e recursos, tendo se limitado a coleta de dados através de observações pontuais.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer à FAPERJ - Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro, Processo SEI E-26/203.732/2025, à Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), cuja gestão das bolsas de



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

mestrado no Programa de Recursos Humanos (PRH-ANP) é realizada pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) – e pela Fundação COPPETEC – Fundação para Coordenação de Projetos, Pesquisas e Estudos Tecnológicos), e à Petróleo Brasileiro S.A. (PETROBRAS) que apoiaram técnica e financeiramente os autores na preparação do trabalho.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). Painel dinâmico de dados da produção de petróleo e gás natural. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiaZjFIMWI0MDgtNWNiNC00OTZILWI3NGQtOGI0Mi1iN2VmLTEyNGFmY2FkYzkyMyJ9> . Acesso em: 29 set. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). Resolução ANP nº 817, de 24 de abril de 2020. 2020a. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-817-2020-dispoe-sobre-o-descomissionamento-de-instalacoes-de-exploracao-e-de-producao-de-petr>. Acesso em: 29 set. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP); FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS (FGV). Descomissionamento offshore no Brasil: oportunidades, desafios e soluções. 2021.

API – AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Recommended practice for flexible pipe. 2002.

BALDAM, R.; VALLE, R.; ROZENFELD, H. Gerenciamento de processos de negócio – BPM: uma referência para implantação prática. 2014.

BÉGUIN, P. Ergonomia e projeto: contribuições para a epistemologia da atividade. In: DANIELLOU, F. (Org.). A ergonomia em busca de seus princípios. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.

BRASIL. MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. Norma Regulamentadora nº 17: Ergonomia. [S. l.]: [s. n.], [s. d. a]. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/assuntos/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/normas-regulamentadoras/nr-17>. Acesso em: 7 out. 2025.

BRASIL. MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. Normas Regulamentadoras – NR. [S. l.]: [s. n.], [s. d. b]. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/assuntos/inspecao-do-trabalho/seguranca-e-saude-no-trabalho/ctpp-nrs/normas-regulamentadoras-nrs>. Acesso em: 30 set. 2025.

BREDÁCS, M. et al. Progress towards composition-based inline sorting and recycling of multilayer polymer packaging. *Sustainable Materials and Technologies*, v. 44, p. e01385, 2025.

CAPOBIANCO, N. et al. Toward a sustainable decommissioning of offshore platforms in the oil and gas industry: a PESTLE analysis. *Sustainability (Switzerland)*, v. 13, n. 11, 2021.

CHIAVENATO, I. Planejamento estratégico. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2004.

CIRILO, M.; COSTA, M. F. Blends of PVDF with its processing waste: study of the mechanical properties of the blends thermally aged. *The Minerals, Metals & Materials Series*, p. 247–257, 2017.

CODA. Understanding Australia's decommissioning value chain. 2022. Disponível em: <https://www.industry.gov.au/publications/australias-offshore-resources-decommissioning-roadmap/understanding-australias-decommissioning-value-chain>. Acesso em: 5 out. 2025.

DANIELLOU, F.; BÉGUIN, P. Methodology of ergonomic action: approaches to real work. In: FALZON, P. (Ed.). *Ergonomics*. São Paulo: Edgard Blücher, 2007.

DAULT, D.; CAMPOS, L. C. R. Uso de dutos flexíveis e umbilicais na produção de petróleo nos campos do pré-sal. *TEC-USU*, Rio de Janeiro, v. 7, n. 1, p. 98–143, 2024.

DE LIMA RIBEIRO, A. et al. Multi-sensor characterization for an improved identification of polymers in WEEE recycling. *Waste Management*, v. 178, p. 239–256, 2024.

DIAS, J. et al. Physical–chemical properties of recycled samples made from discarded parts of polymers used in flexible pipelines. v. 2, n. 1, 31 mar. 2025.

DOYLE, M. W. et al. Environmental science: aging infrastructure and ecosystem restoration. *Science*, 18 jan. 2008.

FAM, M. L. et al. A review of offshore decommissioning regulations in five countries – strengths and weaknesses. *Ocean Engineering*, 15 jul. 2018.

FGV ENERGIA. Descomissionamento offshore no Brasil: oportunidades, desafios & soluções. Ano 8, jan. 2021. Disponível em: <https://fgvenergia.fgv.br>. Acesso em: 5 out. 2025.

FOWLER, A. M. et al. A multi-criteria decision approach to decommissioning of offshore oil and gas infrastructure. *Ocean and Coastal Management*, v. 87, p. 20–29, 2014.

GAGLIO, G.; LORIOL, J.; DU TERTRE, C. (Orgs.). *L'économie de la fonctionnalité: une voie nouvelle vers un développement durable?* Paris: Octarès, 2011.



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

GODOY, A. S. Estudo de caso qualitativo. In: GODOI, C. K.; BANDEIRA DE MELLO, R.; SILVA, A. B. (Orgs.). Pesquisa qualitativa em estudos organizacionais: paradigmas, estratégias e métodos. São Paulo: Saraiva, 2005.

GUÉRIN, F. et al. Compreender o trabalho para transformá-lo: a prática da ergonomia. São Paulo: Edgard Blücher, 2001.

LIMA, F. P. A. et al. Ecossistemas cooperativos de produção e inovação servicial: Economia da Funcionalidade e da Cooperação (EFC) e desenvolvimento territorial. In: SEMINÁRIO SOBRE A ECONOMIA MINEIRA, 18., 2019, Diamantina. Anais... Diamantina: Cedeplar/UFMG, 2019.

MARINHO, M. G. et al. Surface monitoring techniques for a continuous flexible riser integrity assessment. Offshore Technology Conference Proceedings, OTC-18946-PP, 2007.

MARTINS, I. D. et al. Dimensionality reduction for multi-criteria problems: an application to the decommissioning of oil and gas installations. Expert Systems with Applications, v. 148, 15 jun. 2020.

NIELSEN, K. G.; KRISTIANSEN, M.; BENDIKSEN, E. Flow assurance and optimal design of thermal characteristics in flexible pipes. In: Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 2008. OTC 19397.

OLIVEIRA, I. F. et al. GHG emissions avoided by closing the loop in the decommissioning of subsea equipment. Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, 2024.

OFFSHORE DECOMMISSIONING REPORT 2024. The decommissioning outlook for the UK's offshore energy industry. [S. l.: s. n.], 2024. Disponível em: <https://oeuk.org.uk/wp-content/uploads/2024/11/OEUK-Decommissioning-Report-2024.pdf>. Acesso em: 3 out. 2025.

SANTOS, B. B. et al. Segurança do trabalhador e saúde ocupacional no descomissionamento de sistemas de produção de óleo e gás: uma revisão sistemática. Revista Ação Ergonômica, v. 18, n. 2, 2024.

SENAVIRATHNA, G. R. U.; GALAPPATHTHI, U. I. K.; RANJAN, M. T. T. A review of end-life management options for marine structures: state of the art, industrial voids, research gaps and strategies for sustainability. Cleaner Engineering and Technology, v. 8, p. 100489, jun. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100489>. Acesso em: 20 mar. 2024.

SILVA, P. S. R. S. et al. Economia da funcionalidade e da cooperação: da produção de alimentos ao bem-estar alimentar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE INOVAÇÃO E GESTÃO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO, 12., 2019, São Paulo. Anais... São Paulo: Blucher, 2019. p. 1308–1320.



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

SOARES, L. N. et al. Decommissioning of umbilicals and flexible pipes: a sensitivity analysis in decision-making process. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON OCEAN, OFFSHORE AND ARCTIC ENGINEERING, 42., 2023, Melbourne, Austrália. Proceedings... New York: ASME, 2023.

SOUZA, D. P.; ANGELO, A. C. M. Avaliação do ciclo de vida do descomissionamento de dutos rígidos de produção de petróleo offshore. In: Congresso Brasileiro de Gestão do Ciclo de Vida, 2021, Online. Contribuições para os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável, 2021.

TANG, M. Flexible pipes. In: Pipeline engineering – design, failure, and management. London: IntechOpen, 2023. ISBN 978-1-83768-000-9. Disponível em: <https://www.intechopen.com/chapters/85818>

WERNER, T.; TAHA, I.; ASCHENBRENNER, D. An overview of polymer identification techniques in recycling plants with focus on current and future challenges. Procedia CIRP, v. 120, p. 1381–1386, 2023.

WISNER, A. Ergonomia ou a ciência do trabalho. São Paulo: Editora Manole, 1987.

YE, W. et al. Finite element study on the wet collapse mechanism of a flexible pipe with eroded carcass. Ocean Engineering, v. 329, p. 121124, 12 abr. 2025.

YIN, R. K. Estudo de caso: planejamento e métodos. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

ZHANG, X. et al. Techno-economic and environmental analysis of decommissioned flowline, umbilical, and tubular for breakwaters. Buildings, v. 13, n. 1, 2023.