

Efeito da deformação plástica acumulada no desempenho à fadiga de aço super duplex empregados em tubos umbilicais para produção de petróleo

Effect of accumulated plastic strain on fatigue performance of super duplex steel used in umbilical tubes for oil production

Efecto de la deformación plástica acumulada en el rendimiento de fatiga del acero súper dúplex utilizado en tubos umbilicales de producción de petróleo

Recebido: 29/03/2022 | Revisado: 04/04/2022 | Aceito: 08/04/2022 | Publicado: 13/04/2022

Antelmo Santos Chaves

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6340-9418>
Universidade Federal de Sergipe, Brasil
E-mail: antelmoautomacao@yahoo.com.br

Wilton Walter Batista

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6667-8947>
Universidade Federal de Sergipe, Brasil
E-mail: wiltonwalter@hotmail.com

Sandro Griza

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4413-1179>
Universidade Federal de Sergipe, Brasil
E-mail: sandro.griza@gmail.com

Raphael Cardoso

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5847-751X>
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, Brasil
E-mail: raphaelcardoso28@gmail.com

Brenno Lima Nascimento

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5280-9763>
Universidade Federal de Sergipe, Brasil
E-mail: brenno.limanasc@gmail.com

Matheus Mariano da Silva Reis

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9467-1646>
Universidade Federal de Sergipe, Brasil
E-mail: mmariano641@gmail.com

Renan Celestino Silva Santos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2202-679X>
Universidade Federal de Sergipe, Brasil
E-mail: renan_celestino@outlook.com

Resumo

O cabo umbilical é hoje uma das grandes tecnologias utilizadas para controle de equipamentos no leito marinho na produção de petróleo *offshore* em águas profundas e ultraprofundas. O umbilical é composto por vários componentes, inclusive tubo de aço para transporte de fluidos para controle hidráulico de equipamentos no leito. Tais tubos são susceptíveis à fadiga durante a vida em operação do umbilical. A resistência a fadiga é influenciada pela deformação plástica acumulada (*APS*) sofrida pelos tubos durante todo processo de fabricação até instalação/armazenamento em carretéis. Esse presente estudo investigou se a maneira como acontece a *APS* influencia na resistência à fadiga dos tubos. Para isso, foram usinados corpos de prova de fadiga a partir de tubo super duplex de umbilical, os quais receberam 5% de *APS* por flexão cíclica de duas formas diferentes: flexão repetida e flexão alternada. Análises microestruturais e de microdureza foram realizadas nos corpos de prova após fratura por fadiga. Não houve diferença significativa nem na microestrutura, e nem na microdureza dos dois grupos de amostras após a fratura por fadiga. Porém, o grupo submetido a deformação plástica alternada apresentou menor resistência a fadiga. Portanto, a maneira como os tubos são deformados durante a fabricação e armazenamento influencia o seu desempenho em fadiga.

Palavras-chave: Ensino; Aço inoxidável super duplex; Umbilical; *APS*; Fadiga.

Abstract

The umbilical cable is today an important technology used to control equipment on the seabed in the production of offshore oil in deep and ultra-deep waters. The umbilical is composed of several components, including steel tube for transporting fluids for hydraulic control of equipment in the bed. Such tubes are susceptible to fatigue during their life in umbilical operation. Fatigue strength is influenced by the accumulated plastic strain (*APS*) undergone by the tubes during the entire manufacturing process until installation/storage on spools. This present study investigated whether

the way in which the APS is applied influences the fatigue strength of the tubes. Fatigue test specimens were machined from super duplex umbilical tube, which received 5% of APS by cyclic bending in two different ways: repeated bending and alternating bending. Microstructural and microhardness analyzes were performed on the specimens after fatigue fracture. No significant difference neither in microstructure, nor on the microhardness of the two groups of specimens was found after fatigue fracture. However, the group subjected to alternating plastic strain experienced lower fatigue strength. Therefore, the way in which the tubes are deformed during manufacture and storage influences their fatigue performance.

Keywords: Teaching; Super duplex stainless steel; Umbilical; APS; Fatigue.

Resumen

El cable umbilical es hoy una de las grandes tecnologías utilizadas para el control de equipos en el lecho marino en la producción petrolera offshore en aguas profundas y ultraprofundas. El umbilical se compone de varios componentes, incluyendo tubo de acero para transporte de fluidos para control hidráulico de equipos en el lecho. Dichos tubos son susceptibles de sufrir fatiga durante su vida en funcionamiento del umbilical. La resistencia a la fatiga está influenciada por la deformación plástica acumulada (APS) que sufren los tubos durante todo el proceso de fabricación hasta su instalación/almacenamiento en bobinas. El presente estudio investigó si la forma en que ocurre la APS influye en la resistencia a la fatiga de los tubos. Para ello, se mecanizaron probetas de ensayo de fatiga a partir de tubos umbilicales super dúplex, los cuales recibieron 5% de APS por flexión cíclica de dos maneras diferentes: flexión repetida y flexión alterna. Se realizaron análisis microestructurales y de microdureza en las muestras después de la fractura por fatiga. No hubo diferencia significativa ni en la microestructura, ni sobre la microdureza de los dos grupos de muestras después de la fractura por fatiga. Sin embargo, el grupo sometido a deformación plástica alterna presentó menor resistencia a la fatiga. Por lo tanto, la forma en que se deforman los tubos durante la fabricación y el almacenamiento influye en su comportamiento ante la fatiga.

Palabras clave: Enseñanza; Acero inoxidable súper dúplex; Umbilical; APS; Fatiga.

1. Introdução

A produção de petróleo *offshore* vem tomando um direcionamento para águas cada vez mais profundas e distantes da costa. Essa realidade leva grandes empresas exploradoras de petróleo a investirem em novas tecnologias e buscarem novas formas de produção. Uma dessas tecnologias são os cabos umbilicais, apontados como um dos grandes desafios técnicos que a indústria petrolífera *offshore* teve que enfrentar (Morais, 2013), e continua enfrentando no sentido de otimizar continuamente o projeto dos elementos que constituem o umbilical.

Os cabos umbilicais são elementos fundamentais nos sistemas de controle de produção de petróleo. Eles são responsáveis por conectar as unidades de produção flutuantes (navios e plataformas) aos equipamentos instalados no fundo do mar. A norma *Internacional Organization for Standardization* (ISO 13628-5) (2009) define um cabo umbilical submarino como um compósito formado pelo conjunto de diversos elementos como cabos elétricos, de fibra ótica e tubos de aço ou termoplásticos, responsáveis pela energização e comunicação remota dos elementos em solo oceânico. Os elementos do umbilical são envoltos geralmente em material elastomérico e possuem ainda arames de armadura de tração como elementos de reforço abaixo da capa polimérica externa (Swanson, 1995; Wagner, 2014).

O cabo umbilical após ser colocado em serviço, pode sofrer danos por fadiga devido as solicitações impostas pelos movimentos marinhos. Os tubos de aço são componentes do umbilical susceptíveis à fadiga. As características cargas cíclicas de operação somadas às condições ambientais severas a que estão submetidos os tubos faz com que eles sejam fabricados preponderantemente a partir de aço inoxidável super duplex (AISD), que são ligas que apresentam excelentes propriedades mecânicas e de corrosão, além de alta resistência à fadiga (Reboh et al., 2011; Silva, 2015; Dainezi et al., 2021).

Os tubos, após sua fabricação em geral por laminação a frio, passam por algumas operações de enrolamento e desenrolamento em carretéis ou bobinas, desde sua armazenagem na siderúrgica, passando pela sua montagem no umbilical e depois quando é lançado ao mar para o serviço. Todas essas etapas resultam em certa quantidade de deformação plástica. A soma dessas deformações plásticas, que afetará inclusive o desempenho em fadiga dos tubos, dá origem a um parâmetro denominado de deformação plástica acumulada (*accumulated plastic strain*, APS, na sigla em inglês), e que deve ser levado em consideração nos projetos de fadiga dos tubos, de acordo com a norma *Det Norske Veritas* (DNV) (2016).

Estudos indicam que a *APS* influencia o desempenho em fadiga dos tubos de aço de umbilicais (Burgos et al., 2012; Drumond et al., 2018; Lin et al., 2018). Porém, as sucessivas deformações plásticas dos tubos não deverão ocorrer sempre na mesma posição e direção, e isso poderá acarretar em diferentes níveis de tensões/deformações residuais acumuladas em diferentes locais da superfície do tubo. Segundo Li et al. (2021) e Guo et al. (2019) o nível de tensões residuais poderá favorecer ou prejudicar o desempenho em fadiga do tubo. Principalmente devido ao efeito Bauschinger, no qual explica que a tensão limite de escoamento de um material metálico sofre diminuição, quando a deformação imposta sobre ele é invertida (Han et al., 2005).

Se as deformações residuais após a aplicação da *APS* forem positivas na região do tubo que virá a ser solicitado em fadiga, então espera-se redução de desempenho em fadiga; mas ao contrário, se forem negativas, então espera-se que o desempenho em fadiga seja melhorado.

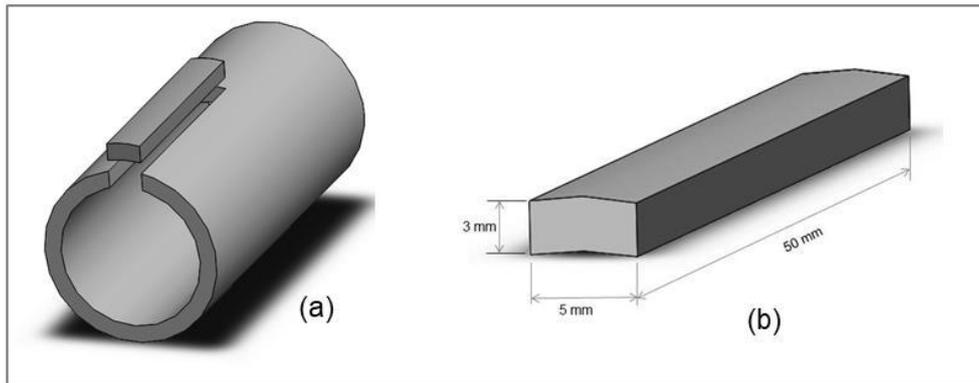
O tubo laminado inicialmente é bobinado em um carretel, e então levado até a fábrica que o desbobinará e o montará no umbilical. Este será o primeiro ciclo repetido de *APS*, desconsiderando eventuais deformações menores e torções que possam ocorrer durante a montagem do umbilical. Depois disso, o próprio umbilical com o tubo montado em seu interior será bobinado em um grande carretel. Nesta circunstância, se o tubo no interior do umbilical for mantido na mesma posição angular original, ou seja, uma determinada geratriz do tubo mantiver a sua posição relativa, então há duas possibilidades de *APS* neste passo: o tubo será enrolado no mesmo sentido do bobinamento anterior, promovendo um novo ciclo repetido de *APS*; ou o tubo será enrolado no sentido contrário, promovendo um ciclo alternado de *APS*, ou seja, o enrolamento será no sentido contrário ao anterior. Esta ambivalência no sentido de enrolamento do tubo pode se repetir ainda no momento em que o umbilical é lançado ao mar. Portanto, teremos mais um ciclo de *APS* que pode ser ou repetido ou alternado. Entretanto, o umbilical tenderá a corrigir seu dobramento quando finalmente for lançado ao mar, seguindo o alinhamento de seu eixo, devido ao seu peso próprio, o que promove a última etapa de *APS* se modelada para a situação próxima da realidade, aqui novamente desconsiderando dobramentos devido a correntes marinhas, devido a boias, devido à aproximação do umbilical ao leito oceânico, entre outros.

Dessa forma, o intuito do presente estudo é simular duas diferentes condições limites idealizadas de aplicação da *APS* que os tubos de umbilicais podem sofrer. Uma condição limite é aquela em que o tubo sofre as sucessivas deformações máximas de bobinagem/desbobinagem todas no mesmo sentido, sobre a mesma geratriz do tubo: deformação repetida. A outra condição limite é a que as sucessivas deformações máximas alternem seu sentido a cada ciclo: deformação alternada. Se nós considerarmos que a deformação plástica de cada ciclo seja a mesma em módulo, então o presente modelo representa os dois limites possíveis de *APS*. Qualquer outra situação em que a geratriz do tubo mude de posição, ou seja, o tubo sofra algum giro entre as etapas de *APS*, promoverá a *APS* total entre os dois limites na região mais solicitada em fadiga do tubo. Portanto, o objetivo do estudo é investigar como os dois limites estudados da *APS* poderão influenciar na resistência à fadiga dos tubos, após sua colocação em serviço.

2. Metodologia

A liga utilizada no presente estudo foi o aço inoxidável super duplex UNS S32750, conhecido comercialmente como SAF 2507. A liga foi adquirida na forma de tubo contendo 31,4 mm de diâmetro externo e 3 mm de parede, conforme esquema da Figura 1a, donde foram retirados os corpos de provas (CPs) para ensaio de fadiga. Os CPs com dimensões de 50 mm x 5 mm x 3 mm, conforme Figura 1b, foram retirados no sentido de laminação do tubo. Espectrometria de emissão ótica (Foundry Master XPert Oxford) foi feita no intuito de determinar a composição química do material.

Figura 1 - CP utilizado para fadiga extraído do tubo. (a) CP retirado no sentido de laminação do tubo. (b) Dimensões do CP.



Fonte: Autores (2022).

Os CPs usinados foram submetidos à APS no intuito de simular as deformações plásticas sofridas pelos tubos de umbilicais durante os processos de instalação e armazenamento nos carretéis. Essas deformações foram aplicadas de duas formas diferentes, promovendo dois grupos de estudo distintos: deformação por flexão cíclica repetida e deformação por flexão cíclica alternada, cada grupo foi composto por 9 CPs que foram submetidos a 5% de APS.

Segundo Burgos et al. (2012) e Santos (2008), os danos que um tubo de aço de umbilical sofrerá durante os processos de fabricação até sua instalação no mar, será menor que 20% de APS. Em seu estudo, por exemplo, Burgos et al. (2012) realizaram ensaios de fadiga com níveis de 0%, 2% e 6% de APS. Já Santos (2008) aplicou patamares que variaram de 0% até 30% de APS; o autor aplicou valores acima do esperado prevendo eventuais rebobinamentos adicionais no chão de fábrica, pátio do cliente ou embarcação de instalação.

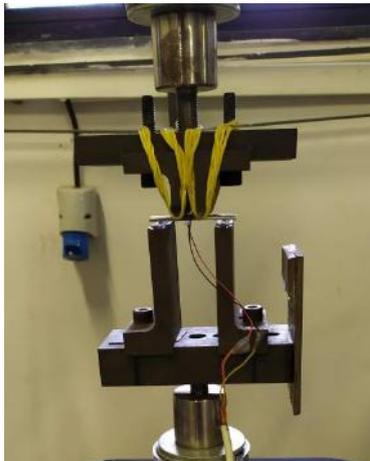
No presente estudo, optou-se em aplicar 5% de APS, e não aplicar patamares superiores, pois o principal objetivo aqui é comparar as duas condições de deformação quanto a fadiga, aplicando um valor razoável de APS segundo Burgos et al. (2012).

2.1 Aplicação da APS

A APS de 5% foi aplicada por flexão cíclica a quatro pontos utilizando máquina servo-hidráulica MTS Landmark modelo 3010, contendo célula de carga de 100 kN, seguindo critérios normativos da norma DNV (2016), bem como metodologia descrita em (Burgos et al., 2012; Santos, 2008), e conforme modelo apresentado na Figura 2.

Para o grupo alternado, foram aplicados seis ciclos para que fosse atingido os 5% de APS. Entretanto, para o grupo repetido, foram aplicados os seis ciclos de deformação repetida, mais três ciclos finais para tornar reto o CP, a fim de idealizar a forma final do umbilical quando ele é lançado ao mar. Nas três primeiras amostras de cada grupo, a APS foi aplicada utilizando extensômetro de resistência elétrica axial (Kyowa KFGS-5-120-C1-11), disposto na direção do eixo principal do CP. Nos demais CPs, a APS foi realizada diretamente pelo controle de deslocamento da máquina, utilizando a média do deslocamento necessário para atingir o percentual de deformação que foi obtido nos ensaios dos três primeiros CPs, uma vez que se percebeu que o desvio das deformações em função dos deslocamentos foi desprezível. As deformações medidas pelos extensômetros foram adquiridas através de aquisitor de dados (Lynx ADS 2000/AL2161/AC2122-VB), utilizando frequência de amostragem de 10 Hz.

Figura 2 - Aplicação da APS por flexão a quatro pontos utilizando um extensômetro (*strain gauge*) para controlar a deformação em cada ciclo.



Fonte: Autores (2022).

A aplicação da APS cíclica repetida teve por objetivo simular a condição em que o tubo tenha sofrido todas as deformações plásticas sempre no mesmo sentido e sobre a mesma geratriz, mais um bloco de cargas no sentido inverso, para tornar o CP reto.

O objetivo da aplicação da APS alternada, foi simular a condição em que todas as deformações plásticas sofridas pelos tubos aconteçam alternando-se em 180° a cada ciclo. Na flexão cíclica alternada, houve a necessidade da aplicação de deformações simétricas nos dois lados do CP, para garantir a mesma deformação nos dois sentidos, sendo necessário para isso o uso do controle pelo deslocamento. O strain gauge, nesse caso, foi utilizado nos três primeiros CPs para garantir que os 5% de APS tenham sido atingidos.

Na deformação do tipo flexão alternada, as amostras sofrerão danos por efeito Bauschinger. O efeito Bauschinger pode ser demonstrado através de uma curva de histerese, que é o resultado da tensão em função da deformação plástica de um material submetido a um carregamento cíclico.

Uma das considerações de Han et al. (2005) para que ocorra o efeito Bauschinger, é que o movimento de discordâncias no sentido contrário ao da deformação inicial é facilitado pela presença de tensões residuais localizadas. As tensões residuais são aquelas que permanecem na peça mesmo após a retirada de todas as forças externas anteriormente aplicadas sobre ela (Almen & Black, 1963; Rossini et al., 2012).

É importante ressaltar também que durante a solitação cíclica, a liga metálica pode tanto encruar como amolecer, a depender de suas condições termomecânicas iniciais. Considera-se que os materiais trabalhados a frio amolecem no ensaio, enquanto materiais recozidos tendem a encruar.

Quando o material está altamente encruado, resultado de um processo de trefilação ou laminação, por exemplo, após as deformações plásticas cíclicas o material passa a amolecer ciclicamente e como consequência disso ocorrerá uma diminuição da tensão limite de escoamento do material. Por outro lado, se agora o material está em um estado recozido, com a deformação plástica cíclica, o material ganha resistência à deformação plástica, ou seja, encrua.

2.2 Ensaio de fadiga

Após a aplicação da APS, os CPs de ambos os grupos foram submetidos a ensaio para determinação da resistência à fadiga através da construção de suas curvas S-N. Para o desenvolvimento das curvas S-N, foram usados procedimentos descritos nas normas *British Standard Iso* (ISO 12107) (2003) e *American Society for Testing and Materials* (ASTM E739)

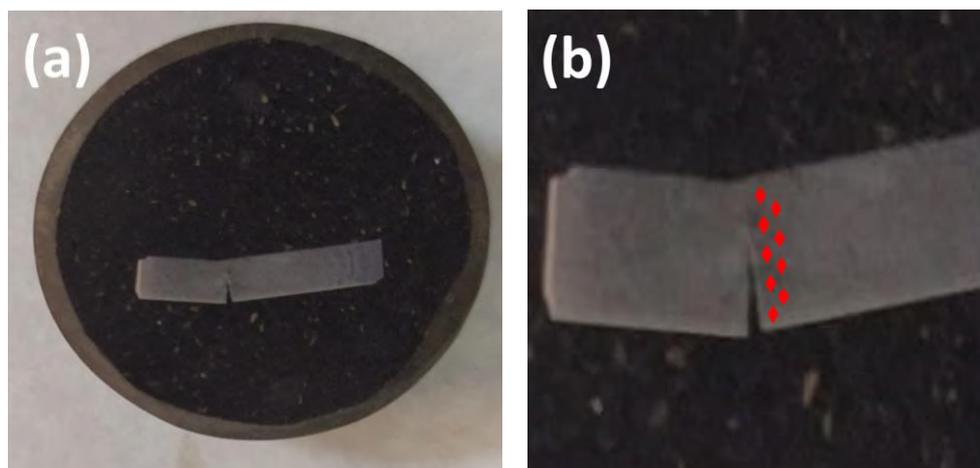
(2015a), bem como metodologia em (Lima et al., 2021). A resistência a fadiga corresponde à tensão em que o material se rompe após certo número de ciclos de aplicação da carga.

Os ensaios de fadiga foram realizados por flexão cíclica alternante, utilizando máquina servo-hidráulica MTS Landmark modelo 3010 com célula de carga de 100 kN. Os parâmetros de teste foram: fadiga a três pontos, frequência de 10 Hz, razão de carregamento $R = 0,1$ ao ar e controle por limite de tensão aplicada. Foi considerada como limite os CPs que não se romperam até atingirem 1×10^6 ciclos.

2.3 Metalografia e Microdureza

Após os ensaios de fadiga foi realizada análise metalográfica por microscopia ótica em um CP fraturado de cada grupo. Essa análise teve como objetivo investigar possíveis alterações da microestrutura próxima a região de ruptura. A microscopia realizada foi baseada na norma *American Society For Testing And Materials* (ASTM E3-01) (2001), bem como em (Santos, Lima, Nascimento, Fontes & Griza, 2021). A Figura 3a apresenta uma amostra preparada para realização da metalografia.

Figura 3 - (a) CP (alternado) fraturado por fadiga, embutido em baquelite para realização da metalografia. (b) sinalização dos locais onde foi medida a microdureza.



Fonte: Autores (2022).

A análise metalográfica foi realizada em microscópio ótico Leica, modelo DM 2500M. As amostras passaram pelo processo de lixamento com granulometrias progressivas, partindo da #120 até a #1500 mesh, com posterior polimento mecânico usando pasta de diamante (até $1 \mu\text{m}$) como agente polidor. Para o ataque foi usado o reagente de Kroll (1mL HF, 2 mL HNO₃, para 1000 mL H₂O), com tempo de imersão de aproximadamente 10 segundos (Asm Handbook Metals, 1991).

Amostras metalográficas foram utilizadas também para realização dos testes de microdureza, que foram aplicados conforme esquema da Figura 3b, com indentações tipo dente de serra. O procedimento de microdureza foi baseado no estudo de (Trindade et al., 2021).

A primeira indentação de microdureza foi aplicada a 4,2 mm da superfície solicitada em fadiga, e a 0,2 mm da superfície de fratura. As demais indentações foram realizadas a cada 0,21 mm da anterior (superfície de fadiga), e alternando entre 0,2 e 0,3 mm (superfície de fratura). O objetivo do teste de microdureza foi analisar se ocorreu junto a região de fratura significativas alterações de dureza, ocasionadas pelas diferentes APSs aplicadas. Para medir a microdureza Vickers, foi utilizado o equipamento Future Tech FM 800. Foram utilizadas 2 amostras de cada grupo, e para análise foi empregada a carga de 1 Kgf durante 10 segundos.

3 Resultados e Discursões

3.1 Análise química

A Tabela 1 apresenta o resultado da análise química por espectrometria de emissão ótica que foi realizada como técnica analítica para determinação da composição elementar do aço inoxidável super duplex UNS32750.

Tabela 1 - Resultado da análise química do AISD UNS32750 (% em peso).

Aço (UNS)	Composição química (% peso)								
	Si	Mn	Mo	S	Cr	P	Ni	Cu	C
S32750	0,29	0,63	3,27	0,006	24,7	0,02	6,66	0,49	0,03
ASTM A 789	0,8 máx	1,2 máx	3 - 5	0,02 máx	24 - 26	0,035 máx	6 - 8	0,5 máx	0,03 máx

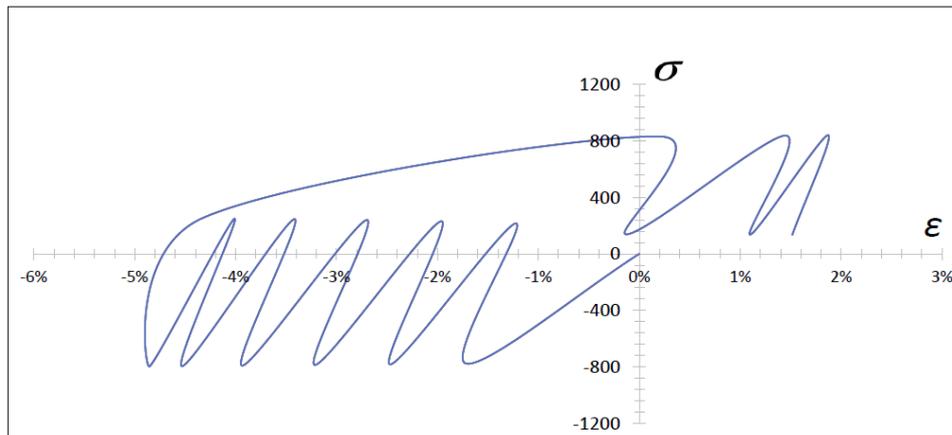
Fonte: Autores (2022).

A Tabela 1 apresenta os teores, em percentual do peso total, dos principais elementos de liga encontrados no aço estudado. Pode ser afirmado que os teores estão todos no limite de tolerância e exigência para que o material possa ser considerado um aço inoxidável super duplex, *American Society For Testing And Materials* (ASTM A 789) (2001).

3.2 Aplicação da APS (Curvas de histerese)

As Figuras 4 e 5 apresentam as duas curvas de histerese que representam a aplicação da carga nos CPs durante aplicação da APS.

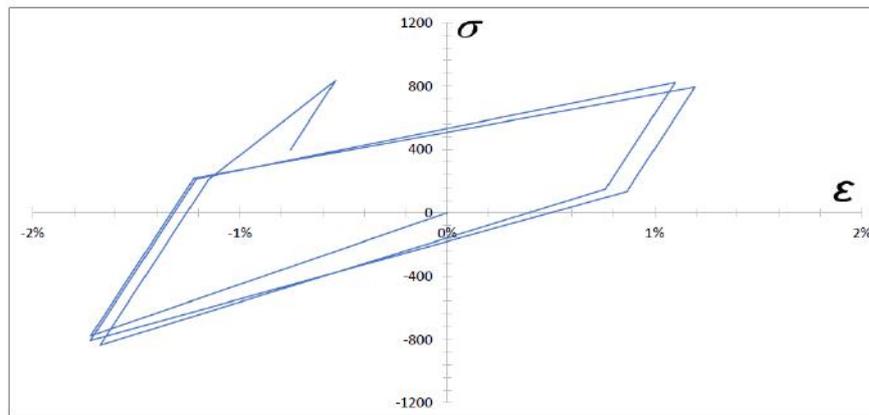
Figura 4 - Curva de histerese mecânica por deformação repetida.



Fonte: Autores (2022).

A curva de histerese é o resultado da tensão em função da deformação na região central dos CPs, onde a máxima tensão principal será a maior possível durante os ensaios de fadiga.

Figura 5 - Curva de histerese mecânica por deformação alternada.



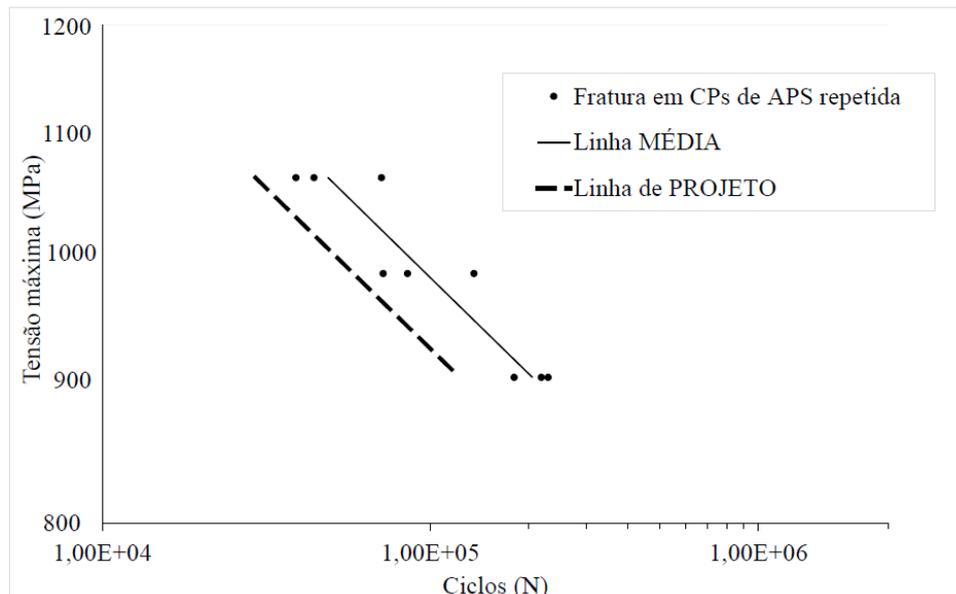
Fonte: Autores (2022).

As curvas apresentadas foram obtidas por simulação a partir do carregamento aplicado para ambas, medindo a deformação e tensão máximas na região central do CP, região esta que experimentou as maiores tensões principais máximas, de 134 MPa e 398 MPa, respectivamente, para os grupos de APS repetida e APS alternada, como pode ser visto no final do histórico de ambas as curvas de histerese.

3.3 Curva S-N

No presente estudo foram construídas duas curvas S-N, uma para cada grupo de APS: deformação alternada e deformação repetida.

Figura 6 - Curva S-N obtida do ensaio de fadiga do grupo de APS repetida.



Fonte: Autores (2022).

Cada curva S-N (Figuras 6 e 7) foi obtida a partir do ensaio de 9 CPs em três patamares diferentes, ou seja, três diferentes níveis de tensões máximas cíclicas usando três CPs para cada nível. Essa quantidade de CPs está dentro das recomendações mínima necessárias da norma *American Society for Testing and Materials* (ASTM E739) (2015b), que

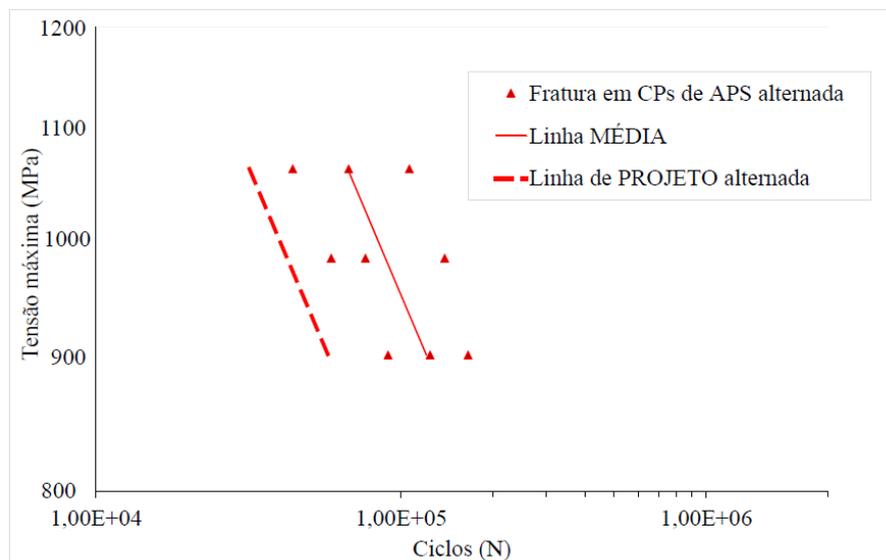
recomenda de 6 a 12 CPs para pesquisas comparativas como no caso do presente estudo. A replicação aproximada de 67% resultante do procedimento é considerada boa pelos critérios normativos.

Na Figura 6 é apresentada a curva S-N da APS repetida. Os pontos marcados em preto representam CPs que romperam até o limite de 1×10^6 ciclos.

Os CPs que não romperam foram ensaiados a 100, 120 e 150% da tensão de escoamento da liga, respectivamente a tensões máximas cíclicas de 530, 640 e 795 MPa. Com efeito, o primeiro patamar da curva repetida foi obtido a partir dos CPs fraturados à tensão de 901 MPa, o segundo sob tensão de 980 MPa e o terceiro patamar teve os CPs fraturados a tensão 1060 MPa, como pode ser visto na Figura 6.

O ensaio de fadiga com CPs sob APS alternada, Figura 7, foi realizado com os mesmos parâmetros que o anterior. Por isso os primeiros CPs foram ensaiados no patamar de 901 MPa, seguindo os mesmos níveis de tensões da curva repetida.

Figura 7 - Curva S-N obtida do ensaio de fadiga do grupo de APS alternada.

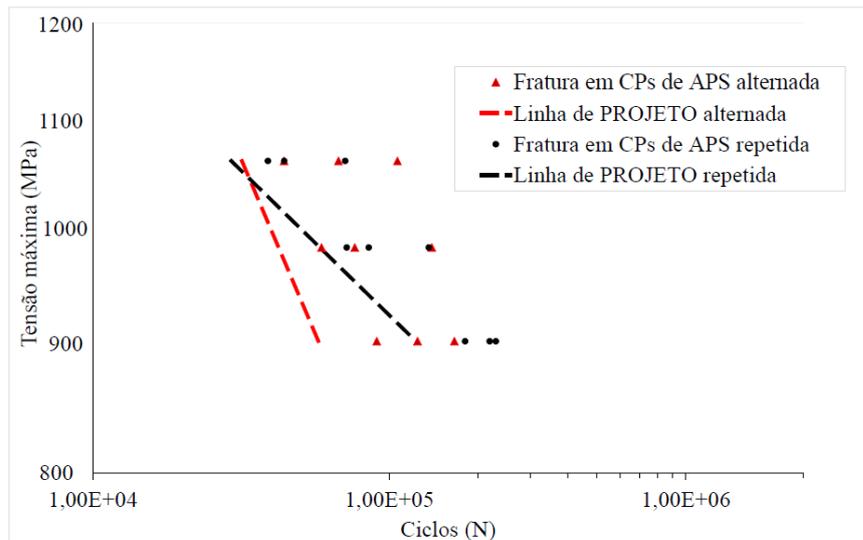


Fonte: Autores (2022).

Ainda analisando as Figuras 6 e 7, observa-se que foram traçadas duas linhas: uma contínua e uma tracejada. A linha contínua corresponde a curva S-N média/mediana, ou seja, representa o valor médio da resistência a fadiga em cada patamar de tensão. Entretanto, a linha tracejada, muito utilizada nos projetos de fadiga de tubulações submarina, corresponde a curva de projeto, a qual fornece uma estimativa de sobrevivência dos CPs ensaiados. Uma curva de projeto pode ser derivada a partir da curva média menos duas vezes seu desvio-padrão (DNV, 2016), ou seja, é a curva média deslocada para a esquerda em função do desvio-padrão. A curva de projeto deve fornecer uma probabilidade de sobrevivência de 97,7%, ou seja, no limite da linha tracejada, existe 97,7% de probabilidade de que não ocorra a fratura por fadiga do CP para o nível de tensão específico e o número de ciclos atingido. Portanto, a curva média representa menor probabilidade de sobrevivência.

Alguns aspectos de ambas as curvas podem ser analisados. A curva da APS alternada apresentou-se mais inclinada e contendo os pontos de fratura mais dispersos. A dispersão dos pontos é refletida no deslocamento mais para a esquerda da curva de projeto. Quanto maior o distanciamento entre as linhas (de projeto e média), mais conservadora será a curva de fadiga. Por outro lado, a curva de APS repetida é menos inclinada e possui menor dispersão dos pontos de fratura. Isso indica que esta APS repetida apresenta melhor desempenho quanto a resistência a fadiga para o limite de 1 milhão de ciclos. A Figura 8 apresenta ambas curvas de projeto onde é possível confirmar a melhor resistência a fadiga do grupo APS repetida.

Figura 8 - Análise comparativa entre as curvas S-N das APSs alternada e repetida.



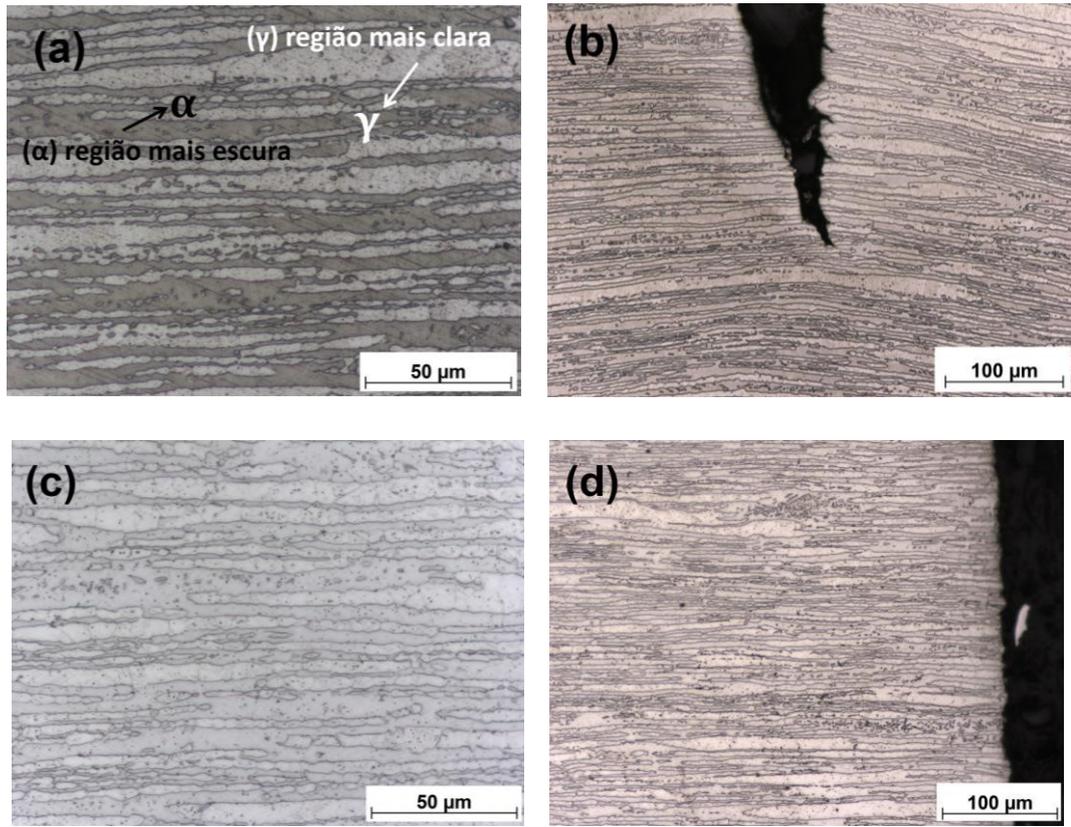
Fonte: Autores (2022).

Ainda analisando a Figura 8, os resultados das curvas de projeto S-N corroboram com estudos anteriores realizados sobre fadiga em tubos de umbilicais, onde é confirmado que os AISDs de umbilical, quando são submetidos a APS, têm sua resistência a fadiga diminuída (Buitrago et al., 2006; Dobson, 2007; Drumond et al., 2018).

3.4 Metalografia e Microdureza

A Figura 9 apresenta a microestrutura, na região próximo da fratura, do AISD SAF 2507 utilizado no presente estudo. Verifica-se mais nitidamente nas Figuras 9a-c, a microestrutura de fase dupla constituída pela fase austenita (γ) e pela fase ferrita (α), típico dos AISDs, (Amiri et al., 2021). Os grãos estão alongados na direção do processo de laminação durante a fase de fabricação dos tubos.

Figura 9 - Microestrutura do AISD UNS S32750 após a fratura por fadiga, a partir de CPs retirados de tubo de umbilical. (a,b) região da fratura com APS alternada. (c,d) região da fratura com APS repetida.

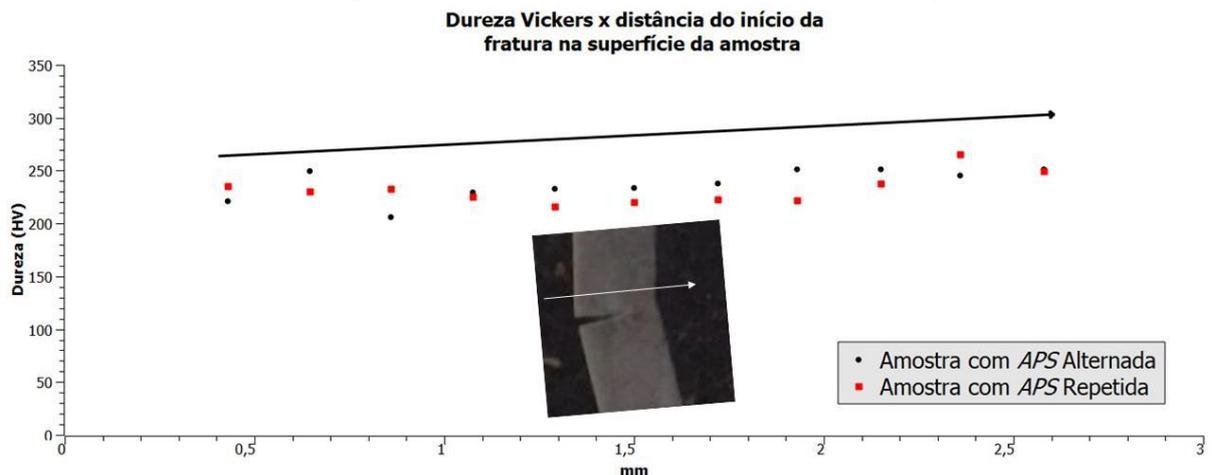


Fonte: Autores (2022).

Nas Figuras 9b (APS alternada) e 9d (APS repetida) pode ser observada a região junto à extensão das fraturas. É possível notar nos dois grupos, que a deformação aplicada durante a fadiga não provocou bandas de deformação ou outro aspecto que denote mudança microestrutural ou encruamento.

Na Figura 10 é apresentado os perfis de microdureza dos dois grupos de deformação (alternado e repetido). O ensaio foi realizado junto a região de fratura de cada amostra (como visto anteriormente na Figura 3b), e pode ser analisada conforme o sentido da seta na Figura 10. Pode ser observado que não houve significativas alterações na dureza ocasionada pela diferença de APS aplicada.

Figura 10 - Perfil de dureza superficial de duas amostras sob APS alternada e APS repetida.



Fonte: Autores (2022).

Como já supracitado, a APS poderá comprometer diretamente a vida em operação dos tubos de aço de umbilical. Dessa forma, o estudo da APS em tubos super duplex torna-se importante, uma vez que a simples falha de um desses componentes, em uma estrutura umbilical, poderá representar grandes prejuízos econômicos, ambientais e até mesmo levar a perda de vida humana.

4. Considerações Finais

Nesse estudo, o efeito da APS na fadiga foi investigado através de ensaios de fadiga com amostras retiradas de tubos de umbilical. A partir dos resultados encontrados, as seguintes conclusões podem ser estabelecidas:

- ✓ A APS aplicada, tanto a alternada como a repetida, não provocaram alterações em nível microestrutural no material de estudo.
- ✓ A microdureza na região da fratura de fadiga dos dois grupos também foram bastante semelhantes, sem diferenças significantes.
- ✓ O grupo de corpos de prova que foram submetidos a APS alternada apresentou menor resistência a fadiga, ou seja, teve sua vida a fadiga diminuída. Portanto, a maneira como os tubos se deformaram influencia na sua vida a fadiga.

Os resultados demonstrados neste estudo podem servir para o desenvolvimento de novas pesquisas que explorem demais parâmetros sobre fadiga em tubos super duplex de umbilicais. A análise de fadiga em patamares maiores de APS seria interessante. Estudos de desempenho da liga submetida a diferentes níveis de APS e sob ambientes agressivos variados de temperatura, pressão de CO₂, pressão de H₂S, cloretos, água do mar sintética, também seria importante para o aprofundamento do conhecimento do desempenho da liga em serviço.

Referências

- Almen, J. O. & Black, P. H. (1963). *Residual Stresses and Fatigue in Metals*. MacGraw Hill, Book Company. New York.
- American Society for Testing & Materials. ASTM A 789/A 789M – 1a (2001). *Standard Specification for Seamless and Welded Ferritic/Austenitic Stainless Steel Tubing for General Service*. November.
- American Society for Testing & Materials. ASTM E739 (2015a). *Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (ϵ -N) Fatigue Data*. EUA. Filadélfia.
- American Society for Testing & Materials. ASTM E739 (2015b). *Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (ϵ -N) Fatigue Data*. EUA. West Conshohocken.
- American Society for Testing & Materials. ASTM E3-01 (2001). *Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens*. EUA. West Conshohocken.
- Amiri, E. *et al.* (2021). Study and selection of most appropriate filler rod for GTAW of S32750 super duplex steel joints: A comprehensive study on microstructural, mechanical and corrosion properties. *Materials Chemistry and Physics*. Elsevier.
- Asm Handbook Metals. (1991). *Metallography and Microstructures*, ASM International 10th Edition Metals Handbook. Vol 9.
- British Standard Iso. BS ISO 12107. (2003). *Metallic materials - Fatigue testing - Statistical planning and analysis of data*. Londres.
- Buitrago, J., Doynov, K. & Fox, A. (2006). Effect of reeling on welded umbilical tubing fatigue. *25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. Germany.
- Burgos, D. F. S. *et al.* (2012). Effects of plastic deformation on fatigue life of superduplex steel tube umbilical. *31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. Brazil.
- Dainezi, I., Borges, S. H., Sousa, L. L. de. & Mariano, N. A. (2021). Temperature and time effect of thermal aging treatment on microstructure and corrosion resistance of UNS S31803 duplex stainless steel. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 8. Brasil.
- Dobson, A. (2007). Effect of strain history on steel tube umbilical. *26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. USA.
- Det Norske Veritas (DNV). (2016). *Fatigue design of offshore steel structures*. Recommended Practice, DNVGL-RP-C203.

- Drumond, G. P. *et al.* (2018). Pipelines, risers and umbilicals failures: A literature review. *Ocean Engineering* 148 (2018) 412–425.
- Guo, J. *et al.* (2019). Recent progress of residual stress measurement methods: A review. *Chinese Journal of Aeronautics*, (2021), 34(2): 54–78. Elsevier.
- Han, K.; Tyne, C. J. V. & Levy, B. S. (2005). Effect of Strain and Strain Rate on the Bauschinger Effect Response of Three Different Steels. *Metallurgical and materials transactions A*, v. 36A, 2005, p. 2379-2384.
- ISO 13628-5. (2009). “*Petroleum and natural gas industries – Design and operation of subsea production systems – Part 5: Subsea umbilicals*”. British Standard. December.
- Li, D. *et al.* (2021). Residual stress measurements of lean duplex stainless steel welded sections. *Journal of Constructional Steel Research* 186 (2021) 106883. Elsevier.
- Lima, G. D., Nascimento, B. L., Alves, I. S., Jr; Trindade, M. P. & Griza, S. (2021). Fatigue behavior and life predictions of thermally oxidized Ti6Al4V alloy according to oxidation parameters. *Engineering Failure Analysis*. Elsevier, Brasil.
- Lin, S. *et al.* (2018). Effect of cyclic plastic deformation on microstructure and mechanical properties of weld metals used for reel-lay pipeline steels. *Materials Science & Engineering A*. Elsevier.
- Morais, J. M. (2013). Petróleo em águas profundas: uma história tecnológica da Petrobras na exploração e produção offshore. *IPEA*, Brasília.
- Reboh, Y. *et al.* (2011). Caracterização de solda em aço inoxidável super duplex em fadiga. *11ª Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos*. Pernambuco.
- Rossini, N. S., Dassisti, M., Benyounis, K. Y. & Olabi, A. G. (2012). Methods of measuring residual stresses in components. *Material & Design* 35 (2012) 572–588. Elsevier.
- Santos, M. C. (2008). Accumulated plastic strain evaluation of steel tube for umbilical cables. *27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. Portugal.
- Santos, S. V., Lima, G. D., Nascimento, B. L., Fontes, L. S., Griza, S. (2021). The effect of cold working and solution heat treatment on microstructure and mechanical behavior of Ti35Nb2.5Sn alloy. *Tecnologia em metalurgia, materiais e mineração*, v. 18, p. e2453. Brasil.
- Silva, B. R. S. (2015). *Estudo da fragilização pelo hidrogênio em juntas soldadas de tubos do aço inoxidável super duplex UNS S32750*. Dissertação M.Sc., COPPE – UFRJ, Rio de Janeiro.
- Trindade, M. P., Jesus, I. G. C., Reis, M. M. S., Nascimento, B. L., Santos, F. P. & Griza, S. (2021). Quantitative analysis of localized corrosion in tensile armor wire of flexible riser submitted to sweet stress corrosion cracking testing with crevice. *Tecnologia em metalurgia, materiais e mineração*, v. 18, p. E2451. Brasil.
- Swanson, R. C. (1995). Metal Tube Umbilicals - Deepwater and Dynamic Considerations. *Offshore Technology Conference*. Texas, USA.
- Wagner, O. (2014). An Innovating Premium Tubular Solution for Umbilical’s Applications. *Offshore Technology Conference*. Texas, USA.