

## PROPOSTA DE METODOLOGIA SIMPLIFICADA PARA TESTES DE FADIGA EM ARAMES DE ARMADURA DE UMBILICAIS SUBMARINOS \*

*Brenno Lima Nascimento<sup>1</sup>  
Matheus Porto Trindade<sup>2</sup>  
Matheus Mariano da Silva Reis<sup>3</sup>  
Gustavo Dória Lima<sup>4</sup>  
Thiago Santana Gama<sup>5</sup>  
Samuel Deoterionio da Silva<sup>6</sup>  
José Fábio Abreu de Andrade<sup>7</sup>  
Sandro Griza<sup>8</sup>*

### Resumo

Esse estudo tem como objetivo apresentar uma metodologia simplificada para preparação de amostras de arames da armadura de umbilicais para testes de fadiga, visto a importância desses testes em garantir a confiabilidade do umbilical e a complexidade das metodologias aplicadas atualmente. Arame de 5,5 mm de diâmetro fabricado em aço médio carbono altamente deformado a frio e protegido por camada de zinco foi objeto do estudo. O procedimento proposto foi baseado no efeito de concentração de tensões devido ao acabamento superficial, e consistiu em melhorar o acabamento das extremidades de fixação dos arames, além de controlar a pressão de fixação imposta pelas garras da máquina de teste. A aplicação da metodologia proposta no estudo resultou nas fraturas das amostras de fadiga dentro da base de medida. O fator de superfície tem grande efeito em ligas de alta dureza, e conseqüentemente as regiões extremas das amostras tiveram maior resistência à fadiga do que a região central, desde que a pressão de aperto das garras não fosse excessiva a ponto de produzir significativas endentações nas amostras. Adicionalmente, foi aplicada a metodologia para a comparação entre a resistência à fadiga dos arames sem e com solda circunferencial. Arames soldados apresentaram resistência à fadiga inferior aos dos arames sem solda.

**Palavras-chave:** Umbilicais submarinos; Arames; Fadiga; Armadura de tração.

### PROPOSED SIMPLIFIED METHODOLOGY FOR FATIGUE TESTS ON ARMOR WIRES OF SUBMARINE UMBILICAL

#### Abstract

This study aims to present a simplified evolutionary methodology for the preparation of umbilical armor wires samples for fatigue tests, considering the importance of these tests to guarantee umbilical reliability and the complexity of the recent applied methodologies. Wire of 5,5 mm diameter made of medium carbon steel, highly deformed in the cold and protected by a zinc layer, was the object of the study. The proposed procedure was based on the effect of stress concentration due to the surface finishing, and was to improve the finishing of the wire ends, besides controlling the clamping pressure imposed by the machine claws. The application of the methodology proposed in the study resulted in fractures of the samples within the measurement base. The surface factor has a large effect on high hardness alloys, and consequently the end regions of the specimens had greater fatigue strength than the central region, provided the clamping pressure of the claws was not excessive. Additionally, the methodology for the comparison between fatigue strength of wires without and with circumferential welding was applied. Welded wires showed lower fatigue strength than weldless wires.

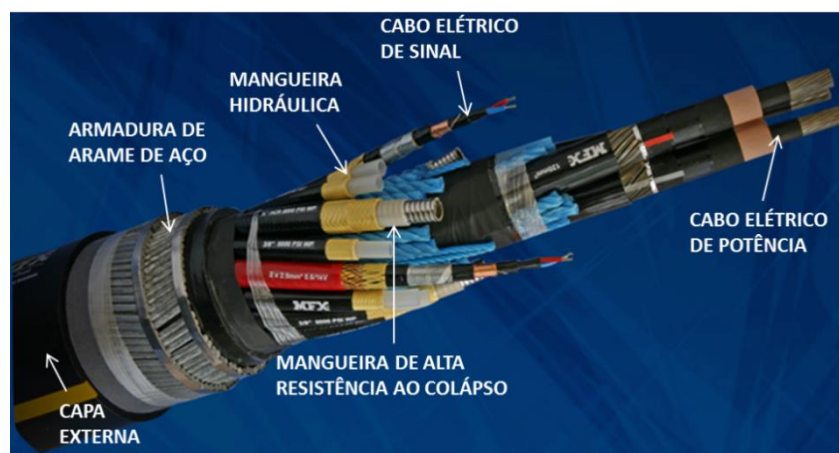
**Keywords:** Submarine Umbilicals; Armor Wires; Fatigue.

- <sup>1</sup> *Graduando em Engenharia Mecânica, Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Sergipe, Brasil.*
- <sup>2</sup> *Engenheiro Mecânico, Mestrando, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (P2CEM), Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Sergipe, Brasil.*
- <sup>3</sup> *Graduando em Engenharia de Materiais, Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais (DCEM), Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Sergipe, Brasil.*
- <sup>4</sup> *Engenheiro Mecânico, Doutorando, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (P2CEM), Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Sergipe, Brasil.*
- <sup>5</sup> *Engenheiro Mecânico, Engenheiro de projetos, Setor de Engenharia de Produto, MFX do Brasil Equipamentos de Petróleo, Salvador, Bahia, Brasil.*
- <sup>6</sup> *Engenheiro Mecânico, Mestre, Engenheiro de projetos, Setor de Engenharia de Produto, MFX do Brasil Equipamentos de Petróleo, Salvador, Bahia, Brasil.*
- <sup>7</sup> *Engenheiro Mecânico, Mestre, Supervisor de Engenharia, Setor de Engenharia de Testes e Qualificações, MFX do Brasil Equipamentos de Petróleo, Salvador, Bahia, Brasil.*
- <sup>8</sup> *Engenheiro Mecânico, Doutor, Docente, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (P2CEM), Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Sergipe, Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

Umbilicais submarinos são fundamentais no controle remoto de processos de operação offshore, pois são desenvolvidos para fazer desde o transporte de fluidos de injeção até o fornecimento de energia elétrica e de sinais óticos em águas profundas [1].

De forma geral, os componentes que constituem o umbilical podem ser classificados em dois grandes grupos: funcionais e estruturais. O primeiro grupo é caracterizado por elementos que realizam uma função particular no sistema, assim como mangueiras, cabos elétricos e óticos, enquanto que o outro grupo se destaca por contribuir no aspecto da resistência estrutural do umbilical [2,3]. Os arames de aço da armadura de tração pertencem a este último grupo e estão dispostos em camadas helicoidais nas camadas mais externas do umbilical (Figura 1).



**Figura 1.** Corte transversal de umbilical híbrido composto por mangueiras termoplásticas, cabos elétricos e armadura de arame de aço. [4]

Os arames da armadura estão sujeitos a grandes esforços axiais impostos ao umbilical durante operação. Conseqüentemente, a armadura é determinante na vida útil do equipamento. Desta forma, testes de fadiga nos arames são mandatórios para garantir a confiabilidade do umbilical e para verificação da matéria prima e dos processos de soldagem de segmentos de arames. As soldas entre segmentos de arames são imprescindíveis para garantir o comprimento necessário da armadura ao longo de todo o comprimento do umbilical.

Para testes de fadiga em segmentos de arames, há dificuldade de aplicar a carga cíclica axial no corpo de prova, sem que ocorra a falha na região de fixação da amostra, o que inutiliza o experimento. Isto se deve ao fato de ser difícil produzir extremidades de fixação adequadas em arames que possuem geralmente pequenos diâmetros. Esse problema promoveu ultimamente o desenvolvimento de métodos de padronização do teste axial cíclico, através de minuciosa preparação das extremidades de fixação. Tagliari et al. [5], por exemplo, propôs, após diversas experimentações, um método eficiente em que as extremidades de fixação do corpo de prova são polidas, então é colado sobre elas tubo de cobre de diâmetro adequado que sofrerá as deformações localizadas (endentações) devido ao aperto das garras e, por fim, uma rosca nas extremidades do arame permite a colocação de uma arruela que auxiliará na fixação e evitará o deslizamento do tubo durante o carregamento cíclico dos testes de fadiga. Porém, a elaboração minuciosa deste procedimento motivou a busca por uma metodologia que pudesse facilitar a

preparação das amostras a fim de se ter simplicidade, semelhante aproveitamento dos testes, ou seja, reduzida perda de corpos de prova, e mantendo a validade dos resultados. O benefício da simplificação seria o menor tempo de preparação dos corpos de prova.

Nossa hipótese é que, se os arames são fabricados a partir de aço altamente encruado e submetido a deposição de camada protetora de zinco, então o desempenho em fadiga dos arames é altamente susceptível a condição superficial. A literatura básica de engenharia indica que há grande variação do fator de correção de desempenho em fadiga devido ao acabamento superficial, que pode ser medido pelo fator de superfície  $k_a$  da regra de Marin [6], que corrige a resistência a fadiga de um componente em relação a resistência a fadiga de uma amostra devidamente preparada e tendo superfície esmeradamente polida. Esta variação é ainda mais pronunciada quanto mais resistente ou de maior dureza for a liga. Além disso, camadas de deposição superficial como as de zinco tendem a reduzir o desempenho em fadiga [7]. Isto pode ser explicado pelas tensões residuais positivas que ocorrem na camada durante sua deposição, tensões estas que embora sejam pequenas em relação a resistência do substrato de aço, podem incentivar a formação de trincas prévias na camada e estas, por sua vez, terão efeito na nucleação da fadiga no substrato.

Portanto, este estudo propõe a simplificação da fabricação dos corpos de prova de fadiga através da simples retirada da camada de zinco e melhoramento superficial das extremidades de fixação dos corpos de prova às garras da máquina de testes.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os arames de armadura de tração estudados consistem em fio-máquina, fabricado em aço médio carbono proveniente do processo de trefilação, contendo diâmetro de 5,5 mm e camada galvânica depositada na superfície.

Dois grupos foram estudados: Arames contínuos, sem solda; e arames cujos corpos de prova apresentavam solda em sua meia altura. A solda é realizada através de procedimento de aquecimento localizado de extremidades de arames por descarga elétrica e aplicação subsequente ao aquecimento de força de contato axial.

Inicialmente, foram feitos testes de tração nos arames, conforme a norma ASTM E8M [8], para determinar a tensão de escoamento, que serve como parâmetro para os testes de fadiga. Posteriormente, foi realizada a preparação dos corpos de prova de 200 mm de comprimento e 80 mm de base de medida, de acordo com a metodologia desenvolvida por Tagliari et al. [5]. Entretanto, modificações foram feitas nesta metodologia, de forma que a melhoria do acabamento superficial das extremidades, através do lixamento, eliminou a necessidade de colagem de tubo de cobre e de se usinar rosca nas extremidades de fixação do arame.

A metodologia proposta consistiu primeiramente em executar o lixamento da região das extremidades dos arames, que serão apertadas pelas garras, a partir do uso de lixas com granulometria decrescente, começando com a lixa de 80 Mesh para retirada da camada galvânica do arame, seguida do uso das outras lixas até a de granulometria de 600 Mesh para melhoria do acabamento superficial.

Após o refinamento superficial dos extremos dos arames, os ensaios foram conduzidos em máquina servo-hidráulica MTS modelo 370.10, seguindo as recomendações das normas ASTM E739 [9] e ISO 12107 [10]. Foram usadas garras com mordentes planos dentados modelo MTS 647.10 e pressão de aperto de até 750 psi. Este valor de pressão de aperto foi testado em corpos de prova prévios e

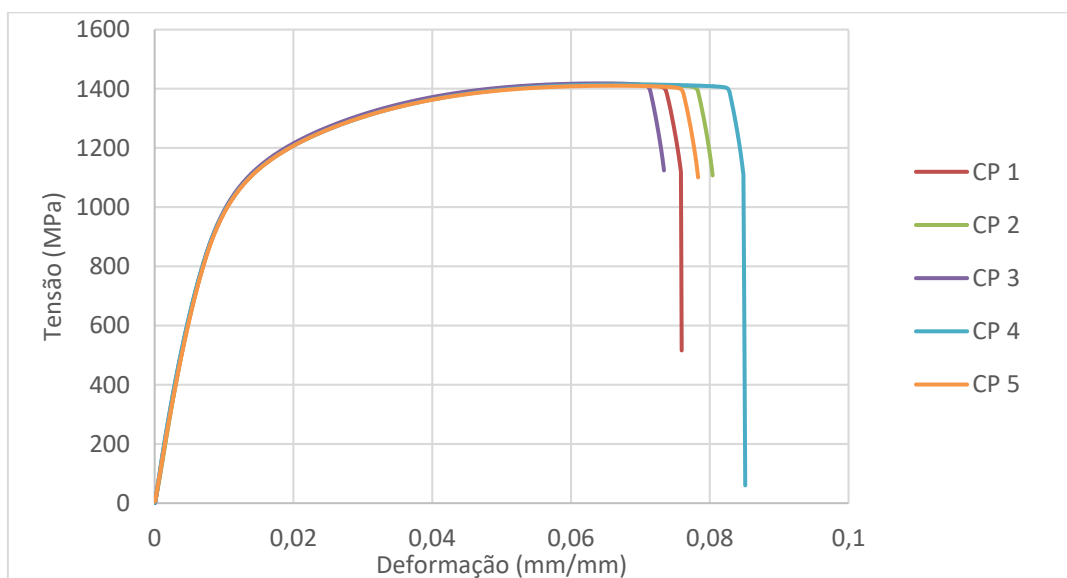
mostrou-se no limite máximo de pressão para evitar excessivas endentações na superfície do corpo de prova, a ponto de transferir a fratura para estas endentações. A frequência de 20 Hz e razão de carregamento  $R = 0,1$  foram adotadas para os testes de fadiga.

Para a elaboração de cada curva S-N foram utilizados dezesseis corpos de provas distribuídos em quatro níveis de tensão correspondentes a percentuais da tensão de escoamento dos arames. O critério usado para validar a metodologia consistiu na ruptura dos arames ocorrer na distância útil entre garras. Os registros macroscópicos das zonas de fraturas foram obtidos através de microscópio estereoscópico Zeiss Stemi 2000C.

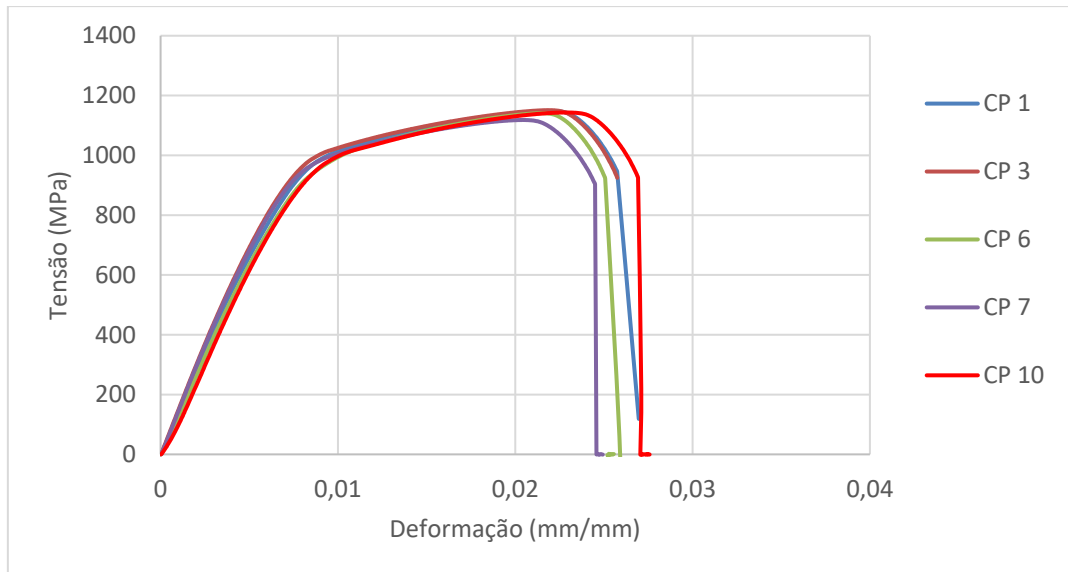
### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Ensaios de tração

Os resultados dos ensaios de tração nos arames sem solda e com solda circunferencial podem ser visualizados nas Figuras 2 e 3. Os valores médios encontrados para tensão de escoamento foram de 943 MPa para arames sem solda e 951MPa para os arames com solda, característicos de ligas de alta dureza.



**Figura 2.** Curvas tensão x deformação obtidas nos ensaios de tração de arames sem solda.



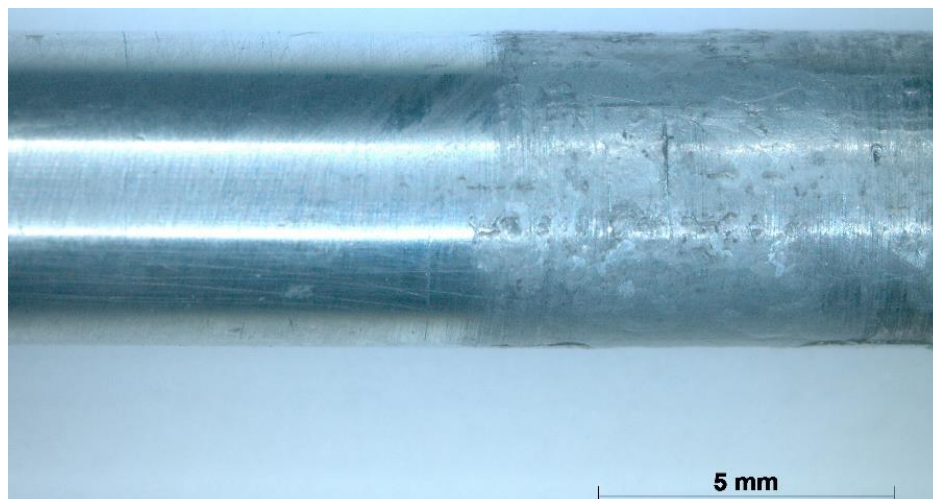
**Figura 3.** Curvas tensão x deformação obtidas nos ensaios de tração de arames soldados.

### 3.2 Desenvolvimento da metodologia proposta

O acabamento superficial dos corpos de prova para os testes de fadiga foi obtido rotacionando as extremidades em torno das lixas até a superfície lixada alcançar aspecto brilhoso. As Figuras 4 e 5 mostram a diferença entre a superfície do arame como recebido e da superfície lixada.

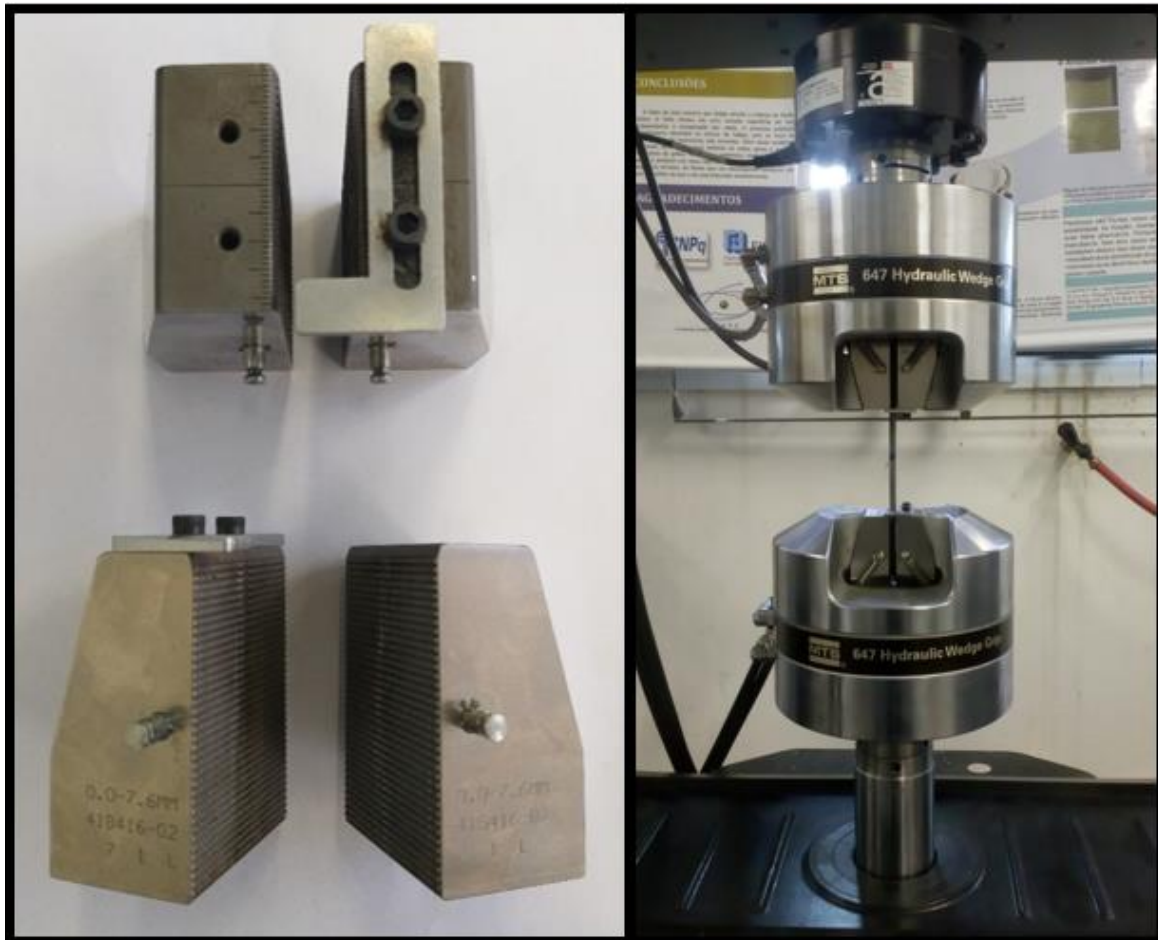


**Figura 4.** Corpo de prova antes (arame superior) e após (arame inferior) acabamento superficial nas extremidades.



**Figura 5.** Aspecto em detalhe da superfície lixada (lado esquerdo) e da superfície sem acabamento (lado direito).

Após o refinamento superficial dos extremos dos arames, optou-se por utilizar mordentes planos dentados (Figura 6) nos testes de fadiga em vez de mordentes com cunha em V dentada, comumente empregados para corpos de prova cilíndricos, pois nos mordentes planos a área de contato com a superfície do arame é menor que a dos mordentes com cunha em V e, assim, foi pressuposto que quanto menor essa área, menor a quantidade de marcas de aperto (endentações) imprimidas pelos dentes dos mordentes nos arames. Conseqüentemente, menor a probabilidade de que nessas marcas ocorra a nucleação de uma trinca que leve a ruptura do arame dentro das garras durante os testes de fadiga.



**Figura 6.** Mordentes planos dentados modelo 647.10 (lado esquerdo) e corpo de prova fixado nas garras da máquina de ensaios de fadiga com esses mordentes (lado direito).

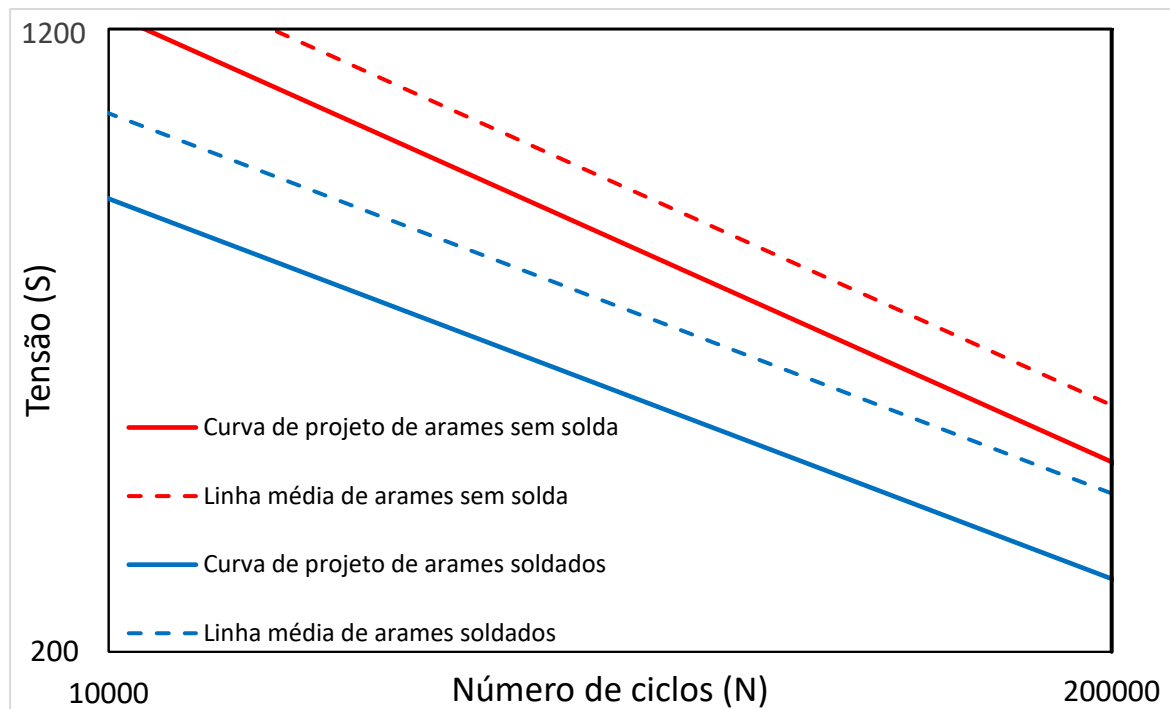
### 3.3 Ensaios de fadiga

A aplicação da metodologia proposta nos testes de fadiga para os arames resultou em apenas um arame sem solda inválido, cuja ruptura ocorreu dentro da garra, mas esse corpo de prova foi facilmente substituído por outro arame que rompeu dentro dos limites da distância entre garras. Dessa forma, aplicando os procedimentos estatísticos previstos nas normas ASTM E739 [9] e ISO 12107 [10] foram feitas as

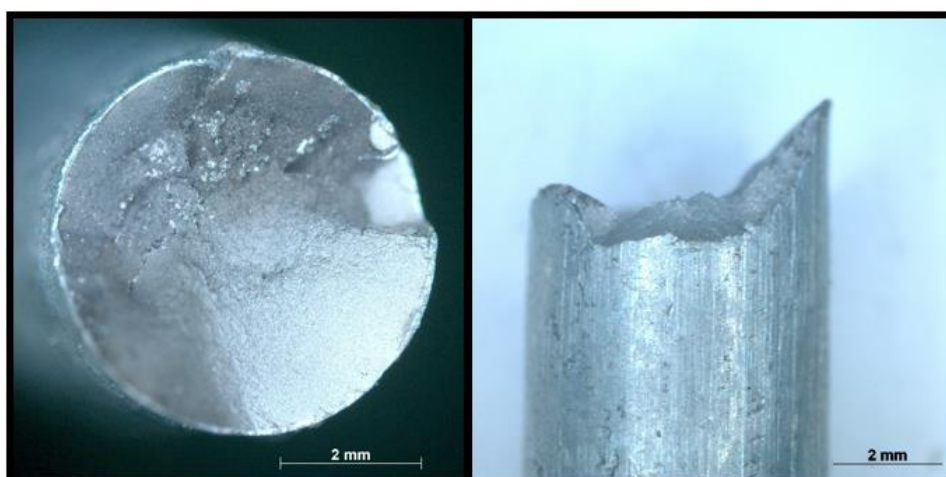
curvas S-N, que podem ser visualizadas na Figura 7. Os arames soldados apresentaram resistência à fadiga inferior aos arames sem solda.

As Figuras 8 e 9 mostram o aspecto da fratura dos corpos de prova sem solda e soldados. Nessas imagens é possível constatar que as fraturas ocorreram nas superfícies não acabadas superficialmente, localizadas na base de medida do corpo de prova.

A partir dos resultados dos testes, foi possível determinar as equações da curva de projeto dos arames da armadura de tração de um umbilical específico, cujos testes em escala real do produto acabado, apresentaram correlação superior à 90%, comprovando assim a confiabilidade da metodologia proposta.

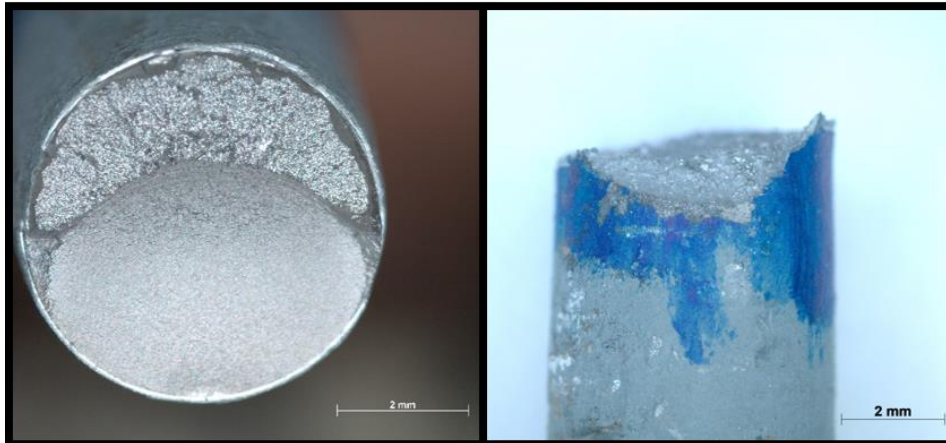


**Figura 7.** Curvas de fadiga S-N dos arames sem solda e soldados.



**Figura 8.** Aspecto da fratura de arames sem solda.





**Figura 9.** Aspecto da fratura de arames soldados.

#### 4. CONCLUSÕES

A metodologia proposta é de fácil aplicação, o que permite o levantamento de curvas de fadiga em menor tempo se comparado aos métodos tomados como referência. A metodologia mostrou ser adequada, seja para arames sem solda, seja para arames soldados, nas configurações utilizadas neste estudo, ou seja, arames de relativa alta dureza (deformados a frio), contendo camada galvanizada.

O fator de superfície tem grande efeito em ligas de alta dureza, e conseqüentemente as regiões extremas das amostras tiveram maior resistência à fadiga do que a região central, desde que a pressão de aperto das garras não fosse excessiva. Além disso, o uso de mordentes planos dentados em vez de mordentes com cunha em V dentada, contribuiu para a redução das chances de nuclear uma trinca nas extremidades do arame, visto que tais mordentes planos apresentam menor área de contato com o arame a ser testado. O controle de pressão das garras também é importante para evitar endentações excessivas que possam transferir a fratura para a zona de fixação dos corpos de prova.

Esse conjunto de fatores possibilitou que a ruptura ocorresse preferencialmente dentro da base de medida, tornando confiável a metodologia. Apenas um corpo de prova dos 17 testados rompeu junto a zona de fixação, o que não impediu o menor tempo de ensaios se comparado ao tempo que seria gasto na preparação dos corpos de prova a partir do procedimento mais conservativo utilizado como parâmetro para este estudo. Convém informar que a metodologia foi atestada pela boa representatividade dos dados das curvas S-N quando utilizados em testes de escala real do umbilical submarino.

#### Agradecimentos

A CAPES, CNPq e Fapitec, pelo apoio financeiro para o desenvolvimento do estudo. A MFX, pelo suporte técnico e fornecimento de amostras para ensaios.

#### REFERÊNCIAS

- 1 Bai Y, Bai Q. Sistemas marítimos de produção de petróleo. Rio de Janeiro, RJ: Elsevier, 2016.
- 2 Bai Y, Bai Q. Subsea engineering handbook. Elsevier, 2010.

- 3 Reboh Y. “Efeito do dano causado por fadiga de baixo ciclo sobre o desempenho a fadiga de alto ciclo em tubos de aço superduplex UNS 32750 aplicados em umbilicais submarinos”. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 2014, 84 p.
- 4 Catálogo de Umbilicais. Salvador: MFX do Brasil; 2019.
- 5 Tagliari M, Cosser T, Campello G, Matoso G, Bertencello J, Argüllo F, et al. Proposed methodology for fatigue testing on umbilical round armor wires. In: 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Proceedings of the ASME 2017, 2017 June 25-30; Trondheim, Norway.
- 6 Shigley JE, Mischke CR, Budynas RG. Projeto de engenharia mecânica. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.
- 7 Buršák M, Mamuzić I, Fatigue properties of galvanized higher-strength steel sheets, METALURGIJA 46 (2007) 4, 277-280.
- 8 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials - ASTM E8M. American Society for Testing and Materials; 2016.
- 9 Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life ( $\epsilon$ -N) Fatigue Data - ASTM E739. American Society for Testing and Materials. Filadélfia; 2015.
- 10 Metallic materials — Fatigue testing — Statistical planning and analysis of data. British Standard ISO. BS ISO 12107; Londres; 2003.