

## ANÁLISE DE FALHA DE ARAMES DE ARMADURA DE TRAÇÃO DE UMBILICAL SUBMARINO\*

*Brenno Lima Nascimento<sup>1</sup>*

*Matheus Porto Trindade<sup>2</sup>*

*Matheus Mariano da Silva Reis<sup>3</sup>*

*Abraão Santos Silva<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

O presente estudo teve o objetivo de descobrir a causa raiz que levou a falha de arames da armadura de tração de umbilical submarino durante testes de fadiga, além de compreender a dinâmica da falha. Os arames foram previamente divididos em grupos de acordo com o aspecto visual da fratura: frágil, dúctil e com aparente corte mecânico. Para examinar as fraturas foram feitas análises macroscópicas e análises microestruturais em planos contidos na região de início de fratura. A estratégia de investigação adotada consistiu em identificar a relação dos cortes com as fraturas, observar se os cortes aconteceram antes ou após os testes, examinar se houve deformação plástica por torção oriunda da fabricação e verificar a existência de falhas metalúrgicas nos arames selecionados que promovessem o início da falha. Foi constatado que não houve torção plástica e que a falha dos arames ocorreu por fadiga associada a marcas de corte mecânico presentes na maioria dos arames de forma sistemática, ocasionando a progressiva redução da secção resistente da armadura até o seu total colapso.

**Palavras-chave:** Análise de Falha; Umbilical Submarino; Arames de Armadura de Tração

### FAILURE ANALYSIS OF SUBMARINE UMBILICAL TENSION ARMOR WIRES

#### Abstract

The present work had the objective of discovering the root cause that led to the failure of tension armor wires of a submarine umbilical during fatigue tests, besides to understand the dynamics of the failure. The wires were previously divided into groups according to fracture aspect: fragile, ductile and with cut. For examine the fractures, macroscopic analyzes and microstructural analyzes were performed on planes contained in the region of fracture initiation. The investigation strategy adopted was to identify the relationship between cuts and fractures, to observe whether the cuts occurred before or after the tests, to examine whether there was plastic deformation by twist from the fabrication and to verify the existence of metallurgical failures in the selected wires that promoted the beginning of the fault. It was verified that there wasn't plastic twist and that the failure of the wires occurred due to fatigue associated with mechanical cutting marks present in most of the wires in a systematic way, causing the progressive reduction of the resistant section of the armature until its total collapse.

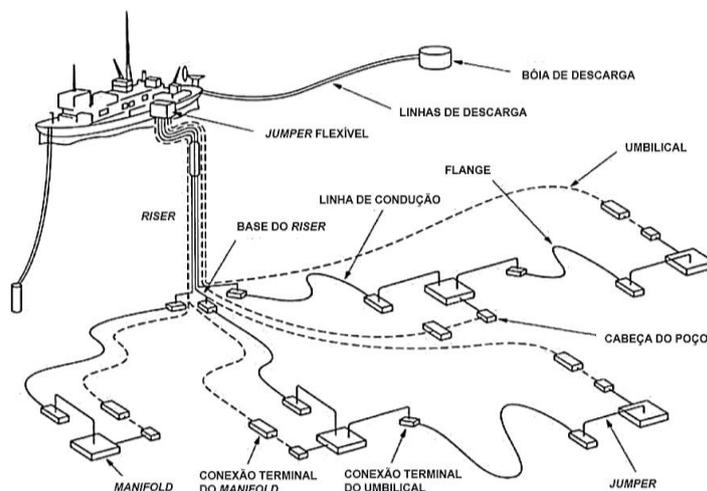
**Keywords:** Failure analysis; Submarine Umbilicals; Tension Armor Wires

- <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 de Materiais, Mestre, 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

A demanda mundial por energia tem apresentado um crescimento irrefreável desde meados do século XX, situação explicitada pela dependência do mercado dos combustíveis fósseis, com representação de cerca de 80% da matriz energética [1]. Portanto, ainda se faz vital para o suprimento de energia a manutenção da estabilidade do fornecimento de combustíveis fósseis. O esgotamento de reservas conhecidas de fácil produção (como em terra firme e águas rasas) motiva a prospecção em meios progressivamente desafiadores, tendo como principal exemplo a produção de petróleo ao largo da costa (*offshore*) em águas ultra profundas. Como obstáculos relevantes pode-se destacar pressão, esforços mecânicos, a própria distância entre a superfície e o poço de petróleo, exigindo um aperfeiçoamento constante do projeto do sistema de produção para correto funcionamento e incremento da durabilidade de seus elementos [2].

As linhas de produção, injeção e auxiliares em águas ultra profundas certamente envolvem linhas de grande comprimento e dentre todos os componentes de um sistema de produção de águas profundas (Figura 1), pode-se destacar a severidade de falhas relacionadas às linhas de conexão entre o solo oceânico (cabeças de poço) e a superfície. Dentre essas linhas, pode-se destacar o conjunto de cabos elétricos, de fibra ótica e tubos de aço ou termoplásticos, responsáveis pela energização e comunicação remota dos elementos em solo oceânico, denominados de umbilicais.



**Figura 1.** Componentes básicos de um sistema de produção de petróleo. [3]

Os umbilicais que apresentam cargas altas de tração e torque - normalmente os que apresentam em sua composição tubos metálicos e/ou mangueiras termoplásticas, devem possuir uma armadura constituída por pares de camadas de arames de aço carbono de alta resistência montados no duto em configurações contra-helicoidais, com a finalidade de limitar a torção, alongamento e deformação do duto quando submetido a cargas axiais de operação e prover a estabilidade necessária enquanto em operação cíclica [3]. A Figura 2 mostra alguns elementos presentes no tubo umbilical.



**Figura 2.** Corte transversal de umbilical híbrido com mangueiras termoplásticas e cabos elétricos. [4]

Diversos estudos têm discutido mecanismos de falha em armaduras de umbilicais, relacionados a instalação, projeto e operação [5] e também têm se voltado a predição da vida útil de seus componentes sob fadiga [6]. Este estudo tem o intuito de identificar a causa raiz da falha de armaduras de tração de aço de alta resistência, analisando aspectos metalúrgicos e relacionados a fadiga do material.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Materiais e Métodos

Os arames da armadura que romperam durante teste de fadiga do umbilical consistem em fio-máquina, proveniente do processo de trefilação, contendo uma camada galvânica depositada na superfície e compunham a armadura mais externa do umbilical. Os arames foram divididos em grupos de acordo com o aspecto da fratura, sendo distinguidos em grupo com corte, grupo de fratura frágil e grupo de fratura dúctil (com escoamento tipo taça-cone). De acordo com o que foi observado da falha, o grupo de arames identificado como com corte (Figura 3) aparentava possuir marcas de corte abrasivo/mecânico junto às fraturas. Dessa forma, para identificar a causa raiz da falha as seguintes estratégias foram tomadas:

- identificar a relação dos cortes com as fraturas, e se os cortes foram realizados antes ou depois do teste de fadiga;
- analisar as fraturas dos demais arames dos demais grupos;
- verificar possíveis falhas metalúrgicas nos arames selecionados que poderiam estar relacionadas ao início da falha;
- identificar deformação plástica por torção dos arames, oriunda da sua montagem em hélice na fabricação do umbilical.



**Figura 3.** Grupos de arames analisados.

### 2.1.1 Análise de Falha

As superfícies de fratura das amostras com corte (Figura 4) foram analisadas antes e após limpeza branda com o uso de agente tensoativo e escova de cerdas macias, seguido de ultrassom em álcool. As demais fraturas dos demais grupos também foram analisadas. Análises de baixo aumento das fraturas foram realizadas em estereomicroscópio (Zeiss Stemi 2000C). A análise microestrutural foi realizada através da preparação de amostras em plano passando pela região de início de fratura de arames selecionados por terem maior zona de propagação de fadiga. As amostras foram polidas em pasta de diamante de 1  $\mu\text{m}$  e atacadas com reativo de Nital 2%. As metalografias foram obtidas em microscópio ótico (Leica DM 2500 M).



Figura 4. Grupos de 13 arames recebidos para análise e identificados como arames com corte.

### 2.1.2 Análise de Torção do Arame

Um dos arames do grupo de fratura frágil de maior comprimento foi selecionado para análise de torção. Ele foi limpo com água quente para retirada de resina. Ao longo do comprimento do arame há marcas longitudinais de fabricação (trefilação e deposição de camada protetora). Se a marcação é realizada de forma a seguir em linha com o eixo longitudinal de simetria do arame, então as marcas podem ser utilizadas como referência para avaliação de torção. Ao longo de um determinado comprimento do arame, a torção pode ser medida pelo ângulo de giro das marcas. O arame foi posto alinhado sobre mesa de medição e fixado para evitar giro.

Um padrão de marca de fabricação foi escolhido para referência. Imagens em microscópio estereoscópico (Zeiss Stemi 2000) foram obtidas em duas regiões distantes 144 mm entre si (esta distância foi medida através de altímetro de resolução 0,01 mm). As imagens permitiram obter a distância das marcas de referência até a geratriz extrema da parede do arame (medida transversal a seção do arame). O ângulo de torção é então medido pela relação entre a diferença das distâncias medidas até a geratriz extrema (transversal) e o comprimento de medida (longitudinal) de 144 mm. No tópico 2.2.2 deste estudo, os resultados desse procedimento são apresentados e analisados.

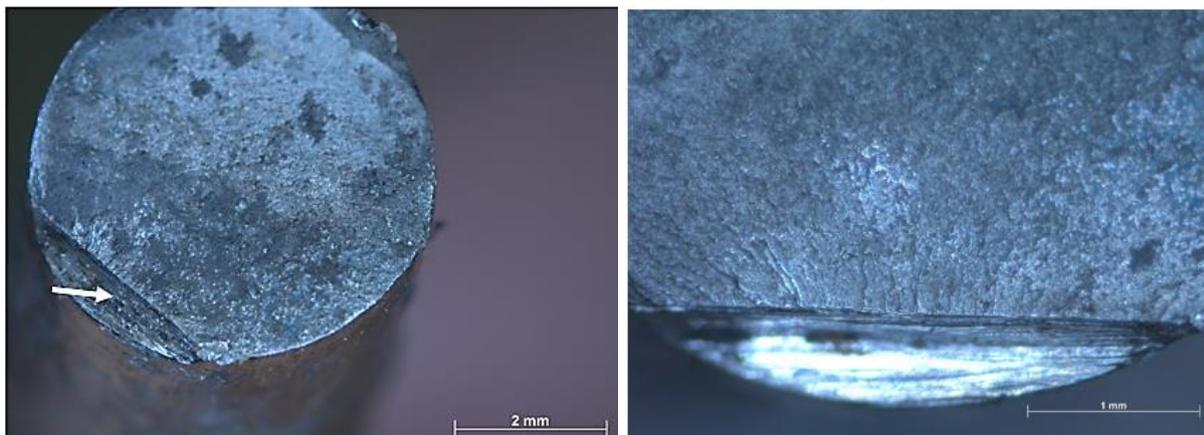
## 2.2 Resultados e Discussão

### 2.2.1 Análise de Falha

As fraturas analisadas iniciaram junto a marcas de corte mecânico, como pode ser observado na Figura 5. Esta peculiaridade foi verificada na maior parte das amostras tanto no grupo das amostras com corte quanto nos denominados de fratura frágil. A Figura 5 apresenta a superfície de fratura por fadiga do arame que apresentou a maior superfície plana de propagação (Amostra 11 da Figura 4), iniciando na marca de corte. O início da fadiga é associado às marcas de catraca junto ao fundo do corte. Estas marcas evidenciam que a fadiga iniciou no fundo do corte realizado previamente ao ensaio de fadiga. Além disso, resina epóxi aderida à superfície do corte e da fratura indica que o corte foi realizado antes do teste de fadiga do umbilical. A fratura apresenta extensa propagação plana estável até atingir a ruptura instável final, formando o plano inclinado de cisalhamento final em posição diametralmente oposta ao início da fratura. Este arame foi identificado como o primeiro a fraturar, pois apresentou maior superfície de propagação.

A Figura 6 mostra a fratura da Amostra 8. Esta foi a amostra que apresentou a segunda maior propagação plana deste grupo. O mecanismo de falha é o mesmo da amostra anterior. A amostra 5 (Figura 7) também apresentou marca de corte como origem da fratura por fadiga. Porém, a propagação de fadiga plana é menor que as das amostras anteriores, indicando que esta foi consequência das anteriores. Neste caso também é possível associar o início da fadiga com a marca de corte. Além disso, pode ser notado que o corte está coberto por resina, indicando que ele foi produzido antes do teste de fadiga. Outra evidência vista em todos arames que contém a marca de corte é que a marca é inclinada (oblíqua) ao eixo do arame, como é evidenciado na Figura 7.

No grupo de fraturas frágeis foi identificada uma amostra que também foi uma das primeiras a romper pois também apresenta grande superfície de propagação de fadiga a partir da marca de corte (Figura 8).



**Figura 5.** À esq.: Superfície de fratura por fadiga do arame (Amostra 11 da Fig. 4) iniciada na marca de corte (indicado pela seta). Resina aderida sobre a superfície do corte tornando-o opaco indica que este foi realizado previamente ao teste de fadiga. À dir.: detalhe das marcas de catraca de início de fadiga após limpeza da fratura para retirada da resina. A superfície de corte fica brilhosa após a retirada da resina.



**Figura 6.** Superfícies de fratura de arame junto a marcas de corte após limpeza (Amostra 8 da Figura 2). Mesmo aspecto da amostra anterior (Fig. 5).

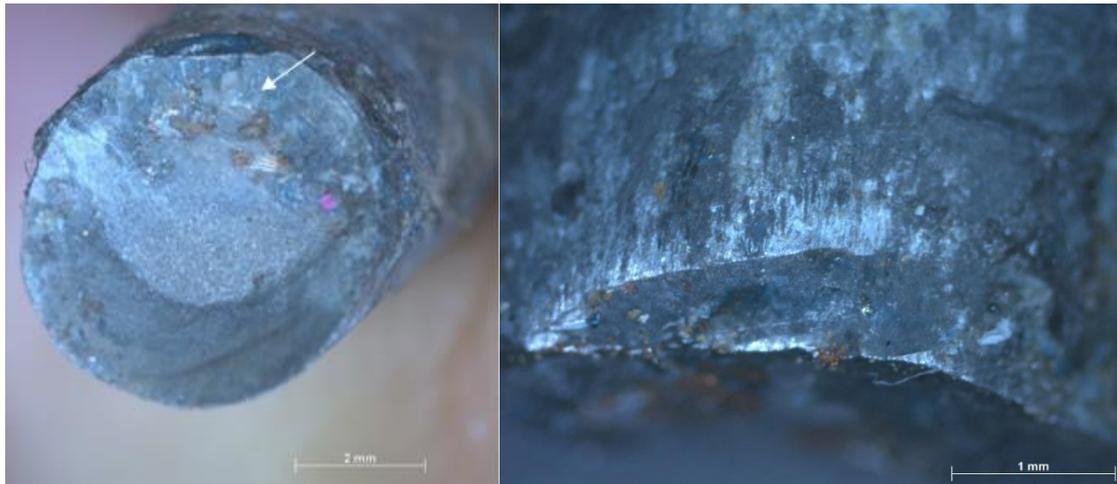
Todas as demais amostras dos grupos com corte, de fraturas frágeis e de fraturas dúcteis apresentaram aspectos de fratura por consequência da fratura da Amostra 11. As evidências disso são fraturas por fadiga secundária (com superfície menor de propagação a partir de corte inicial, como nas Figuras 6 a 8) na maioria das amostras; fraturas monotônicas dúcteis por sobrecarga final (grupo com escoamento), ou ausência de fratura, e sim superfície de corte por serra mecânica ou guilhotina (tesoura de corte de arames) em ambas extremidades. A Figura 9 mostra fratura da Amostra 10, que tem aspecto distinto das demais anteriormente apresentadas. Esta apresenta corte profundo e brilhoso (sem adesão de resina) seguido de ruptura por sobrecarga monotônica de flexão. Isto indica que a amostra foi cortada e rompida na seleção dos arames para análise, ou seja, após o teste de fadiga.

A Figura 10 mostra uma das extremidades da Amostra 12, cuja superfície é típica de corte mecânico, sem fratura em nenhuma das extremidades. Supondo que não tenha sido montado um arame totalmente partido no umbilical, esta amostra foi cortada em suas duas extremidades para a análise. A Figura 11 representa uma das amostras do grupo denominado de fratura dúctil, cuja fratura tem aspecto taça-cone de ruptura monotônica por sobrecarga final. A Tabela 1 apresenta o quantitativo das ocorrências de fratura dos arames.

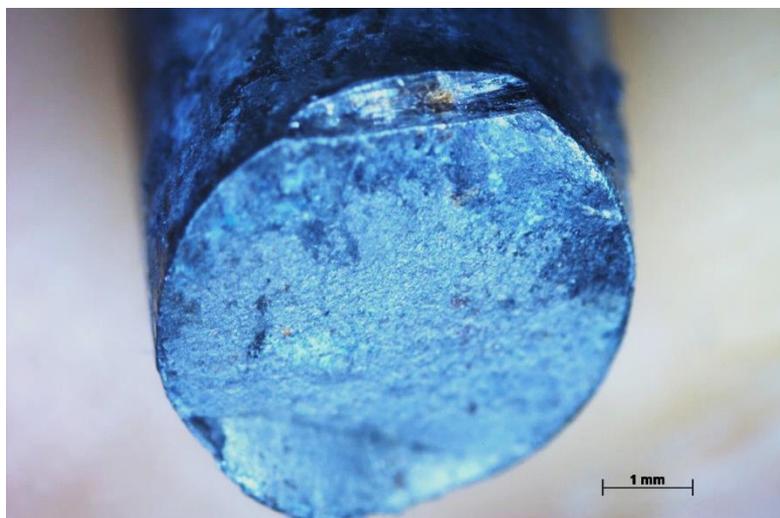
**Tabela 1.** Quantitativo de modos de falha de todos arames analisados

<b>Modo de Falha</b>	<b>Corte</b>	<b>Dúctil</b>	<b>Outros<sup>1</sup></b>
Quantidade de Arames	33	4	9

1) serrados em ambas extremidades ou com fratura a partir de serra posterior ao ensaio.



**Figura 7.** Fratura da amostra 5. À esq.: fratura que também apresentou marca de corte como origem da falha (seta). À dir.: a marca de corte de origem da fadiga. O corte está coberto por resina e é oblíquo em relação ao eixo do arame.



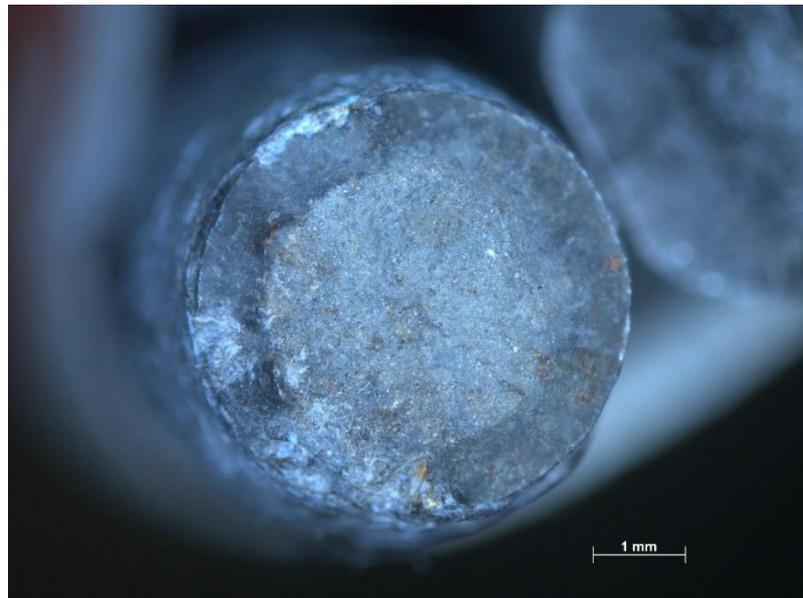
**Figura 8.** Amostra do grupo de fraturas frágeis, que também foi uma das primeiras a romper pois também apresenta grande superfície de propagação de fadiga a partir da marca de corte.



**Figura 9.** Fratura da Amostra 10, que apresenta corte profundo e brilhoso (sem adesão de resina) seguido de ruptura por sobrecarga monotônica de flexão.

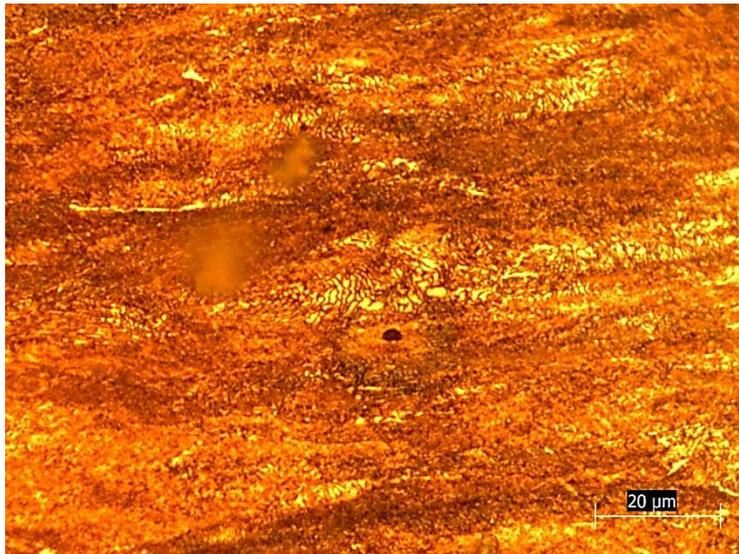


**Figura 10.** Amostra 12, cuja superfície é típica de corte mecânico, sem fratura.

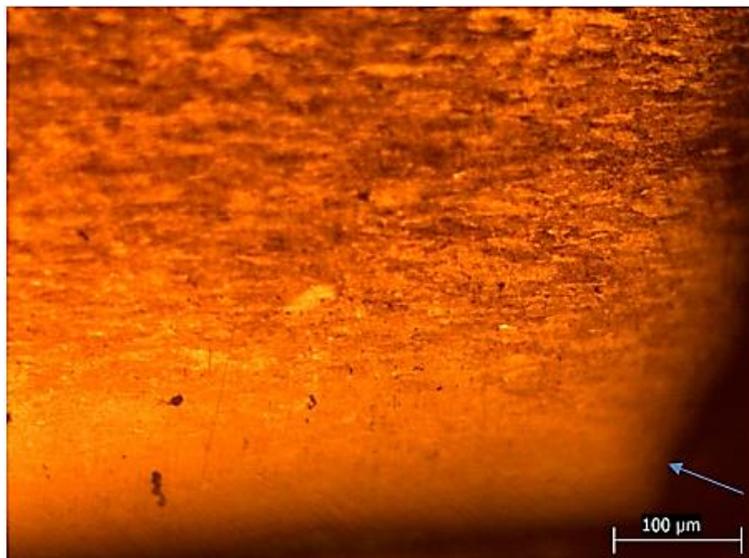


**Figura 11.** Amostra do grupo denominado de dúctil, com escoamento, cuja superfície é típica de sobrecarga monotônica (taça-cone).

A análise microestrutural indicou que o arame foi fabricado em liga de aço composta de microestrutura de perlita e ferrita altamente deformada a frio (Figura 12). Não foram identificados defeitos metalúrgicos associados à falha da Amostra 11 (Figura 13), que foi a primeira a romper. A microestrutura da Amostra 8 também está apresentada (Figura 14).



**Figura 12.** Amostra 11. Microestrutura composta de perlita e ferrita deformadas a frio.

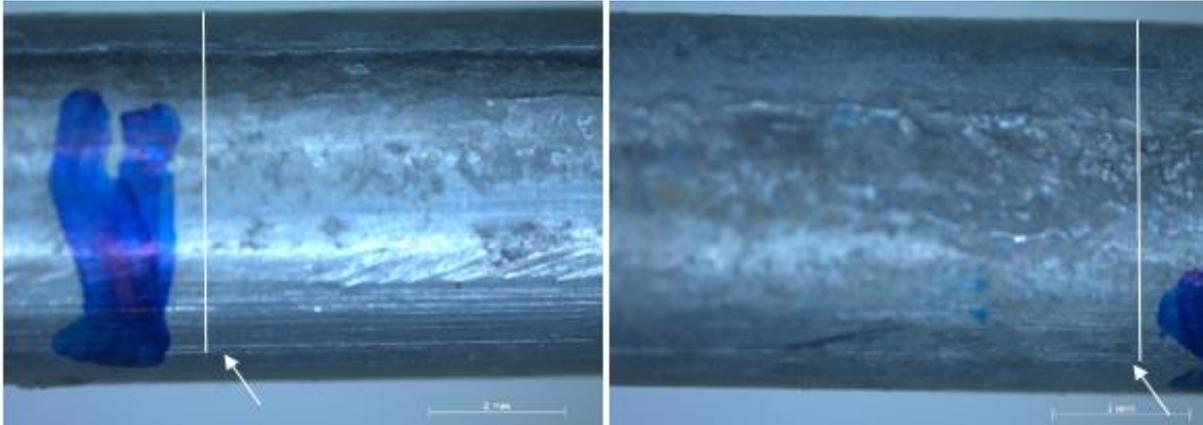


**Figura 13.** Amostra 11. Microestrutura junto ao início da fadiga, mostrando ausência de defeito metalúrgico (seta).

### 2.2.2 Análise de Torção

A Figura 14 apresenta o resultado da análise dimensional do arame. As imagens mostram que não há diferença na distância da marca de fabricação até a geratriz extrema do arame, no comprimento de 144 mm. Portanto, o arame não sofreu deformação plástica de torção.

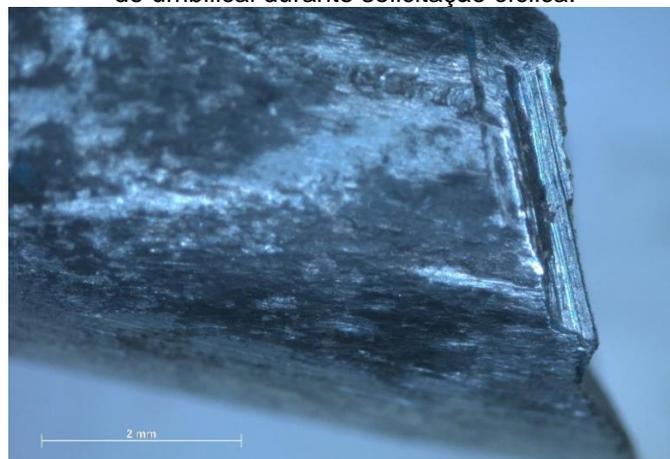
Imagens de defeitos superficiais desse arame também foram obtidas. A Figura 15 mostra marcas de deformação devido ao atrito sob pressão entre as armaduras interna e externa do umbilical durante solicitação cíclica. A Figura 16 mostra a marca de corte que originou a fadiga desse arame.



**Figura 14.** Deslocamento relativo da marca de referência (setas) em relação a geratriz extrema do arame ao longo do comprimento de 144 mm. Como não há diferença de deslocamento (as linhas brancas verticais são idênticas), não ocorreu torção plástica do arame.



**Figura 15.** Marcas de deformação devido ao atrito sob pressão entre as armaduras interna e externa do umbilical durante solicitação cíclica.



**Figura 16.** A marca de corte oblíqua que originou a fadiga desse arame.

### 3 CONCLUSÃO

A falha do umbilical que ocorreu durante o teste de fadiga foi incentivada por fraturas por fadiga associadas a cortes mecânicos nos arames, realizados previamente ao teste de fadiga. A propagação da fadiga do umbilical iniciou no Arame 11, a partir de marca de corte prévio ao ensaio. A medida que a fadiga foi propagando neste arame, a maioria dos demais arames também começou a sofrer propagação de fadiga sob carga cíclica cada vez maior, visto que a seção resistente do conjunto de armadura reduzia-se. Finalmente, alguns arames nos quais a fadiga ainda não tinha se manifestado romperam por sobrecarga monotônica de forma dúctil.

A marca de corte que foi a causa raiz da falha ocorreu na maioria dos arames analisados, seja no grupo denominado com corte, seja nos dois grupos denominados de frágeis. A marca é oblíqua (inclinada) ao eixo do arame. A inclinação pode ser associada ao ângulo de hélice do arame no enrolamento para a montagem do umbilical, e indica que a pequena marca de corte foi realizada de forma sistemática nos arames, na etapa de montagem do conector de extremidade. Demais aspectos de fratura por sobrecarga monotônica e aspectos de corte para separação de amostras foram identificados, mas são secundários para a identificação da causa raiz da falha do umbilical. Não foram verificados defeitos metalúrgicos que pudessem incentivar a falha nos arames analisados. O arame não sofreu torção plástica durante a fabricação do umbilical.

### **Agradecimentos**

CAPES, CNPq, FINEP e MFX.

### **REFERÊNCIAS**

- 1 El-Sherik AM. Trends in oil and gas corrosion research and technologies: production and transmission. Cambridge: Elsevier Ltd.; 2017.
- 2 Bai Y, Bai Q. Subsea engineering handbook. Oxford: Elsevier; 2012.
- 3 Bai Y, Bai Q. Subsea pipelines and risers. Oxford: Elsevier Ltd; 2005.
- 4 MFX do Brasil. Catálogo de Umbilicais. Salvador: MFX do Brasil; 2019.
- 5 Bryant MJ. Umbilical failure - mechanisms and avoidance. Subsea control and data acquisition. 1990; 22: 177-193.
- 6 Hoffman J, Dupont W, Reynolds B. OTC 13203 - A Fatigue-Life Prediction Model for Metallic Tube Umbilicals. In: Offshore Technology Conference; 2001 30 April – 3 May; Houston, EUA. Texas: OTC; 2001. p. 1-5.