

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

ESTUDO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO EM FADIGA DE MATERIAIS METÁLICOS DA ARMADURA DE TRAÇÃO EM CABOS UMBILICAIS

CON-2016-0557

Thamise Sampaio Vasconcelos Vilela, thamise.vilela@prysmiangroup.com¹

Maria Olívia de Barros Almeida, maria.almeida@prysmiangroup.com¹

Michelli Siqueira Monteiro de Barros, michelli.barros@prysmiangroup.com¹

Rafael Nunes Torres, rafael.torres@prysmiangroup.com¹

Wilson Zacheo, wilson.zacheo@uol.com.br

¹Prysmian Suflex, Rua Principal, 50 Porto de Santana, Cariacica-ES, Brasil.

Resumo: A falha por fadiga em cabos umbilicais, invariavelmente ocasiona graves danos (ambientais/econômicos) aos sistemas de produção de petróleo, uma vez que em bom funcionamento garante o correto gerenciamento do fluxo de petróleo. Estudos, construção e análises de curvas de fadiga em protótipos ou em cabos completos são complicados, longos e de alto custo, por isso, muitas vezes, a análise em fadiga se dá para cada material que os compõe, como por exemplo o material da camada metálica (armadura de tração). A armadura de tração é composta por fios de aço carbono galvanizado (de seção circular ou retangular), que são dispostos por número par de camadas de fios enrolados helicoidalmente em sentidos opostos. As principais funções da armadura de tração são: resistir a carga axial, bem como oferecer uma rigidez à torção do cabo umbilical, sendo, de fato, um elemento estrutural fundamental do cabo. Portanto, o conhecimento da vida em fadiga e das propriedades mecânicas dos fios presentes nos cabos umbilicais ganham destaque na indústria de petróleo, uma vez que falhas em serviço poderão ser evitadas representando benefícios econômicos à indústria. Esse trabalho tem como objetivo avaliar comparativamente as curvas de fadiga, adquiridas experimentalmente de alguns materiais estruturais utilizados pela Prysmian Surflex e a curva da DNV de forma a estabelecer um padrão de acordo com o nível de resistência e a área de cada material. As curvas serão definidas a partir de testes de fadiga do tipo de esforço tração-tração e quatro níveis de tensão. Com as curvas S-N confeccionadas, será possível estabelecer modelos de projetos com previsões de uso de diferentes classes de materiais, proporcionando alternativas de projeto com melhor custo-benefício.

Palavras-chave: cabo umbilical, fadiga, propriedade mecânica, fio de aço carbono galvanizado, curva S-N.

1. INTRODUÇÃO

Os umbilicais submarinos têm grande importância na atual produção offshore de petróleo. Seu custo representa cerca de 5% do custo total médio de um sistema de produção. O sistema de produção aqui considerado inclui poços, árvores de natal, linhas flexíveis, umbilicais, facilidades de produção e a própria plataforma. Seu custo pode variar desde cerca de 200 milhões a 1,5 bilhões de dólares aproximadamente, Souza, 1998. Assim sendo, trata-se de um item que tem um custo aproximado, entre 10 e 75 milhões de dólares por sistema de produção.

Com a descoberta de novas reservas de petróleo e gás em águas ultra profundas, observam-se condições de exploração mais rigorosas (altas pressões e temperaturas elevadas no fundo do oceano, força das correntes marinhas e ondas, ambiente corrosivo, etc). Como as cargas operacionais aumentam, a possibilidade de falhas mecânicas nas estruturas offshore são maiores. Assim, o desenvolvimento de estruturas flutuantes e submarinas complexas que resistam às intempéries torna-se necessário. Como solução para alguns desses problemas utilizam-se, entre outros, os cabos umbilicais mais resistentes.

A estrutura dos cabos umbilicais provém da combinação de elementos com funções hidráulicas, elétricas (potência e sinal) e/ou fibras óticas, juntamente com elementos estruturais metálicos ou compósitos isolados por camada plástica

(Fig. 1). Esse conjunto de materiais deve atender todas as especificações de funcionamento de acordo com a demanda do cliente.

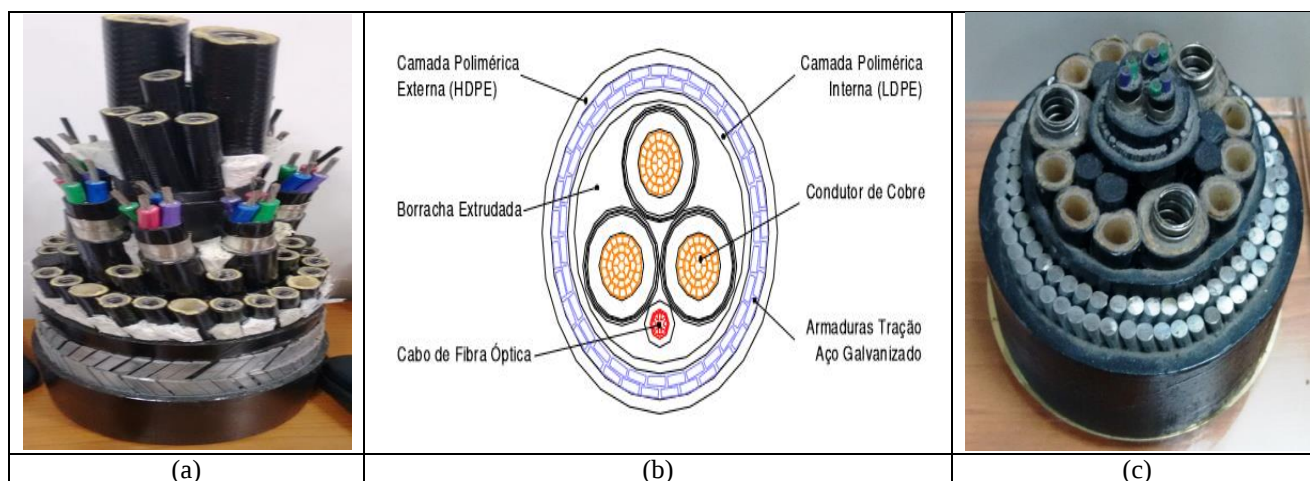


Figura 1. Estrutura de diferentes cabos umbilicais. Estruturas (a) e (b) têm fios retangulares na armadura de tração e (c) estrutura com fios redondos na armadura de tração.

Esses cabos são instalados em plataformas ou FPSO's (Floating Production, Storage and Offloading – Unidade Flutuante de Produção, Armazenamento e Transferência, Fig. 2) de exploração de petróleo. Os cabos umbilicais, uma vez instalado consta de duas zonas que estão sobre solicitações muito diferentes. A primeira zona é a parte suspensa desde a unidade de produção até o fundo do mar, a qual atuam cargas de natureza dinâmica, originadas pelas ondas, correnteza, ventos e movimentações do sistema de produção flutuante. A segunda zona é a parte dos cabos que se encontra assentada no leito marinho, em que as cargas atuantes são as estáticas. As plataformas em constante movimento gerado pelas condições ambientais são responsáveis por uma série de esforços de tração, flexão e torção que podem gerar falhas de caráter estrutural como a fadiga.

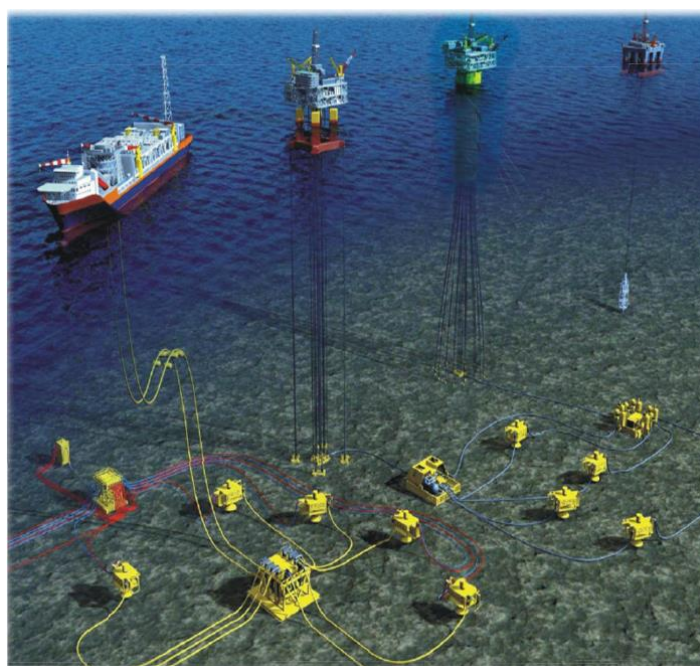


Figura 2. Exemplo de cabos umbilicais em plataformas e FPSO's (Floating Production, Storage and Offloading – Unidade Flutuante de Produção, Armazenamento e Transferência).

A falha por fadiga em cabos umbilicais, invariavelmente ocasiona graves danos (ambientais/econômicos) aos sistemas de produção de petróleo, uma vez que em bom funcionamento garante o correto gerenciamento do fluxo de petróleo. Estudos, construção e análises de curvas de fadiga em protótipos ou em cabos completos são complicados e de alto custo, por isso, muitas vezes, a análise em fadiga se dá para cada material que os compõe, como por exemplo o material da camada metálica (amadura de tração).

A armadura de tração é composta por fios de aço carbono galvanizado (de seção circular ou retangular, Fig. 1), que são dispostos por número par de camadas de fios enrolados helicoidalmente em sentidos opostos. As principais funções da armadura de tração são: resistir a carga axial, bem como oferecer uma rigidez à torção do cabo umbilical, sendo, de fato, um elemento estrutural fundamental do cabo. Portanto, o conhecimento da vida em fadiga e das propriedades mecânicas dos fios presentes nos cabos umbilicais ganham destaque na indústria de petróleo, uma vez que falhas em serviço poderão ser evitadas/previstas representando benefícios econômicos à indústria, bem como a prevenção de desastres ambientais e perdas de vida humana devido à falha de um umbilical.

Fadiga mecânica é o fenômeno de ruptura progressiva de materiais sujeitos a ciclos repetidos de tensão ou deformação. O estudo do fenômeno é de importância para o projeto de máquinas e estruturas, uma vez que a grande maioria das falhas em serviço são causadas pelo processo de fadiga, cerca de 90% de todas as falhas metálicas, Callister, 2005. De um modo geral para que ocorra fadiga são necessários que três fatores sejam aplicados juntos: solicitações dinâmicas, solicitações de tração e deformação plástica.

A falha por fadiga ocorre devido à nucleação e propagação de defeitos em materiais devido a ciclos alternados de tensão/deformação. Inicialmente as tensões cisalhantes provocam um escoamento localizado gerando intrusões e extrusões na superfície; isto aumenta a concentração de tensões dando origem a uma descontinuidade inicial. À medida que esta descontinuidade vai ficando mais "aguda" a mesma pode começar a propagar gerando uma "trinca de fadiga" cujo tamanho aumentará progressivamente até a fratura do componente.

Esse trabalho tem como objetivo avaliar comparativamente as curvas de fadiga de fios chatos de aço galvanizados, que são materiais estruturais utilizados pela Prysmian Surfex de forma a estabelecer um padrão de acordo com o nível de resistência e a área de cada material. Assim será possível estabelecer modelos de projetos com previsões de uso de diferentes classes de materiais, mesmo que ainda não homologados pela empresa, proporcionando alternativas de projeto com melhor custo-benefício.

2. FADIGA E A CURVA S-N

A fadiga é um tipo de falha mecânica causada pela aplicação repetida e localizada de carregamentos (tensões ou deformações) variáveis por um determinado período, sendo que sua característica principal é a propagação lenta e gradual de trincas, levando o material ao desgaste e ruptura repentina, após um determinado número de ciclos, Brandão, 2013. Em complemento, Norton, 2004, relata que, o termo fadiga é utilizado para descrever qualquer falha devido a cargas variantes no tempo. A falha pode ocorrer com um nível de tensão abaixo da tensão de escoamento do material para cargas estáticas. A ruptura por fadiga é sempre uma ruptura frágil, mesmo para materiais dúcteis. A resistência à fadiga de um material depende de diversos fatores como as propriedades mecânicas (dureza, resistência mecânica e limite ao escoamento), composição química, acabamento superficial, a maneira com o qual o carregamento é aplicado, a temperatura de operação, umidade do ambiente e defeitos de fabricação deste material, Brandão, 2013.

A falha por fadiga é um importante fator para caracterizar e estimar a vida útil dos materiais, bem como do produto que é constituído por esses materiais. Frequentemente, a superfície de fratura por fadiga irá mostrar algumas características macroscópicas de fácil identificação e associação ao fenômeno da fadiga, tais como as marcas de praia (Fig. 3).

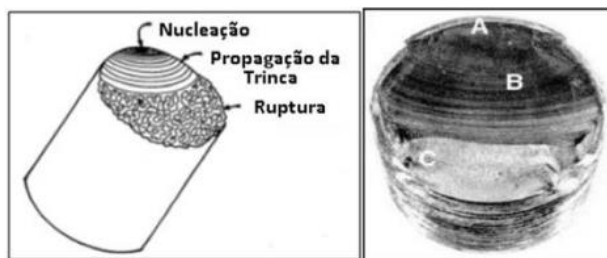


Figura 3. Exemplos de características macroscópicas da fratura por fadiga. Adaptado de Brandão, 2013.

A dificuldade de prevenção da fadiga não está em identificar seus causadores, e sim na eliminação de tais causadores ou agravantes, que geralmente são elementos essenciais ao funcionamento da máquina. No entanto, este efeito prejudicial pode ser minimizado durante a elaboração de um projeto. Mas sem dúvida alguma, o componente mais prejudicial do ponto de vista da fadiga é o entalhe, por isso, a melhoria na vida de fadiga em máquinas com entalhes é muito difícil de ser atingida.

Existem três fatores básicos responsáveis pela fadiga:

- Tensão máxima aplicada;
- Amplitude da tensão cíclica;
- Número de ciclos.

Fatores como: ambiente corrosivo, variações de temperatura, área do material, tensões residuais (combinadas e/ou concentradas), também influenciam no processo de falha por fadiga.

A amplitude de tensão varia sobre uma média de tensão σ_m , definido como a média de uma máxima e mínima tensão no ciclo, ou, Eq. 1:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (1)$$

A faixa de tensão, é simplesmente a diferença entre $\sigma_{\max}$ e $\sigma_{\min}$, ou seja, Eq. 2:

$$\sigma_r = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (2)$$

E a amplitude de tensão é apenas a metade deste faixa de tensão, ou, Eq. 3:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (3)$$

2.1. Tensões Cíclicas

A tensão aplicada pode ser de natureza axial, fletora ou de torção. Tais cargas podem ser de natureza senoidal e regulares, como mostra o gráfico (a) da Fig. 4, no qual a amplitude é simétrica em relação ao nível de stress zero, alternando entre um máximo trativo ($\sigma_{\max}$) e um mínimo compressivo ($\sigma_{\min}$) de magnitudes iguais, esse tipo é referido como ciclo de tensões reversas, representado no gráfico (a), Fig. 4.

Outro tipo, chamado ciclo de tensões flutuantes, apresentado no gráfico (b) da Fig. 4, a máxima e mínima tensões são assimétricas em relação ao nível de tensão zero.

Além destes tipos de tensões cíclicas, há também casos em que a estrutura é submetida a um carregamento aleatório, gráfico (c) da Fig. 4, no qual as tensões cíclicas variam em amplitude, módulo e frequência.

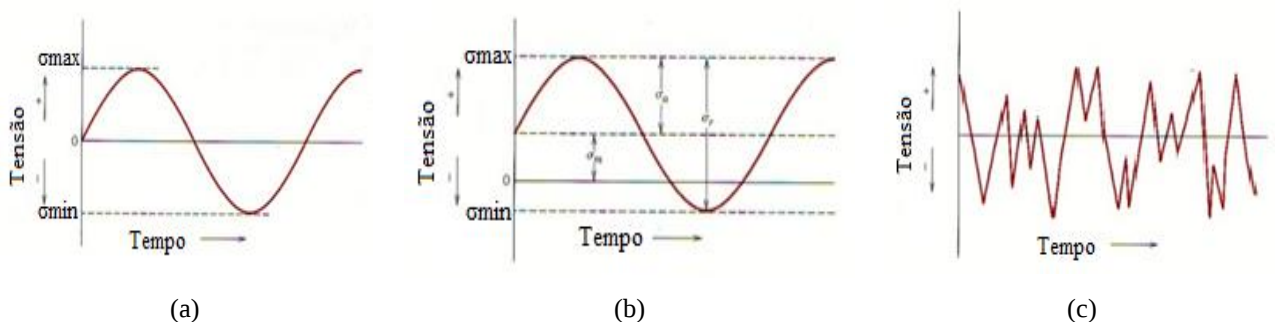


Figura 4. Tipos de carregamentos: (a) Ciclo de tensão reverso; (b) Ciclo de tensão flutuante (c) Carregamento aleatório.

2.2. Curva S-N

Uma maneira rápida e prática de se apresentar resultados de ensaios para fadiga, pode ser observado a partir da curva tensão versus número de ciclos, conhecida como curva S-N, ou curva de Wöhler, onde S é amplitude de tensão aplicada e N é o número de ciclos até iniciação da trinca de um material durante um teste de fadiga.

As propriedades de fadiga, assim como outras propriedades mecânicas, podem ser determinadas em testes de simulação. O aparato experimental deve ser projetado para reproduzir da melhor maneira possível as condições as quais o material estará exposto, tais como magnitude de tensão, periodicidade, tempo de aplicação, frequência, tipo de carregamento, etc. O comportamento de diferentes materiais pode ser ensaiado, para posterior comparação, através de corpo de provas com dimensões e condições superficiais normalizadas, de tal forma que tais dimensões sejam representativas das propriedades do material.

Para determinar a curva S-N de um material, Fig. 5, um corpo de prova normalizado é submetido a tensões cíclicas de uma dada amplitude e mede-se o número de ciclos que o material resiste antes de falhar. Este teste mecânico é repetido para vários corpos de prova com tensões de diferentes magnitudes. O teste procura determinar a vida do componente para cada amplitude de tensão aplicada.

O modelo S-N caracteriza a chamada fadiga policíclica, uma vez que o comportamento à fadiga, para uma grande parte dos materiais metálicos, é, normalmente, controlado por tensões elásticas. Os dados experimentais de um ensaio de fadiga uniaxial podem ser representados em um gráfico S-N em escala logarítmica (log-log), Fig. 5, onde a equação é linearizada (Eq. 4).

$$\sigma_a = AN_f^b \quad (4)$$

Onde o parâmetro A é escrito como: $A = 2^b \sigma_f$, em que σ_f é o coeficiente de resistência à fadiga e b é o expoente de resistência à fadiga ou expoente de Basquin. Esses coeficientes são obtidos a partir dos ensaios uniaxiais.

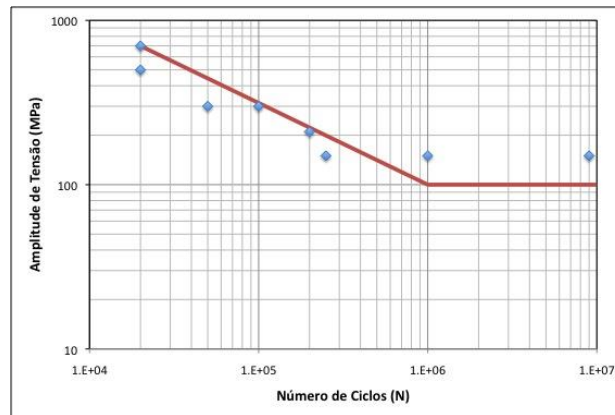


Figura 5. Representação da Curva S-N (ou Curva de Wöhler).

Como indica o gráfico, quanto maior a magnitude da tensão, menor o número de ciclos que o material resiste antes de falhar. Para ligas ferrosas e ligas de titânio, a curva S-N se torna constante para valores elevados de número de ciclos (N), como mostra o gráfico Fig.5, indicando que abaixo deste nível de tensão, chamado de limite de fadiga, a falha não ocorrerá por fadiga, ou seja, a vida a fadiga é dita infinita. A curva S-N de ligas não ferrosas, normalmente, não apresentam limite de fadiga, uma vez que a tensão decresce continuamente com o número de ciclos de aplicação de carga.

2.2.1. Curva S-N da DNV

Existem várias normas e práticas recomendadas para um projeto de estruturas sujeitas ao fenômeno de fadiga. A Prática Recomendada DET NORSKE VERITAS RECOMMENDED PRACTICE C203, 2010, Fatigue design of offshore steel structures, é bastante utilizada como referência no projeto de estruturas offshore. Essa prática apresenta curvas S-N que auxiliam na elaboração de projetos, uma vez que as curvas foram elaboradas a partir de testes realizados em detalhes típicos encontrados em diversos projetos, tais como: diferentes tipos de esforços e ambiente de aplicação. Para escolher uma curva para determinado projeto é preciso levar em conta alguns fatores, como:

- A geometria do entalhe;
- Geometria do material implementado;
- A direção da aplicação da variação de tensões;
- Método de execução da solda e nível de inspeção;
- Ambiente onde a estrutura irá operar.

As curvas apresentadas na norma são curvas médias dos ensaios de fadiga menos dois desvios padrões, isto é, o que atribui estatisticamente uma confiabilidade de aproximadamente de 97,5%. A Figura 6 apresenta as curvas S-N para estruturas em ambiente marinho com proteção catódica.

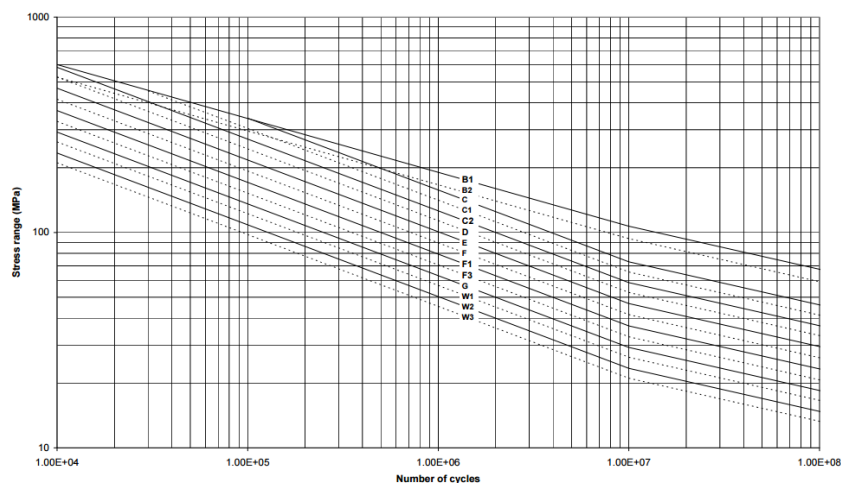


Figura 6. Curvas S-N para estruturas em ambiente marinho com proteção catódica da DNV, fonte DNV RP 203.

A Figura 7 representa os parâmetros usados para estimar as curvas da Fig. 6.

Table 2-1 S-N curves in air						
S-N curve	$N \leq 10^7$ cycles		$N > 10^7$ cycles $\log \bar{a}_2$ $m_2 = 5,0$	Fatigue limit at 10^7 cycles *)	Thickness exponent k	Structural stress concentration embedded in the detail (S-N class), ref. also equation (2.3.2)
	m_1	$\log \bar{a}_1$				
B1	4.0	15.117	17.146	106.97	0	
B2	4.0	14.885	16.856	93.59	0	
C	3.0	12.592	16.320	73.10	0.15	
C1	3.0	12.449	16.081	65.50	0.15	
C2	3.0	12.301	15.835	58.48	0.15	
D	3.0	12.164	15.606	52.63	0.20	1.00
E	3.0	12.010	15.350	46.78	0.20	1.13
F	3.0	11.855	15.091	41.52	0.25	1.27
F1	3.0	11.699	14.832	36.84	0.25	1.43
F3	3.0	11.546	14.576	32.75	0.25	1.61
G	3.0	11.398	14.330	29.24	0.25	1.80
W1	3.0	11.261	14.101	26.32	0.25	2.00
W2	3.0	11.107	13.845	23.39	0.25	2.25
W3	3.0	10.970	13.617	21.05	0.25	2.50
T	3.0	12.164	15.606	52.63	0.25 for SCF ≤ 10.0 0.30 for SCF > 10.0	1.00

Figura 7. Parâmetros das Curvas S-N para estruturas em ambiente marinho com proteção catódica da DNV, fonte DNV RP 203.

Analisando o gráfico da Fig. 6 e os valores da tabela da Fig. 7, pode-se perceber que as curvas S-N da Prática Recomendada da DNV possuem duas inclinações, o primeiro trecho com um coeficiente angular igual e o segundo trecho com um coeficiente angular igual a cinco.

A curva padrão da DNV, que é usada como padrão para avaliação da vida em fadiga de armaduras de um cabo umbilical, é a curva B1. Os parâmetros da curva são, conforme Fig. 7:

- $N < 10^7$ $m_1=4,0$; $\log(a_1) = 15,117$
- $N > 10^7$: $m_2=5,0$; $\log(a_2) = 17,146$

3. MATERIAIS E MÉTODO

3.1. Materiais

O material empregado na fabricação dos arames (fios) que fazem parte da armadura de tração é o aço carbono galvanizado. A armadura de tração é composta por número par de camadas de fios. Os fios podem ser de seção circular ou retangular e são enrolados helicoidalmente em sentidos contrários. Esses fios têm como funções: resistir quase toda a carga axial e pressão externa, oferecendo rigidez à torção no cabo umbilical (Witz; Tan, 1992). O material desses arames deve apresentar algumas características básicas, como: alto limite de resistência à tração (acima de 800 MPa) e baixa deformação na ruptura (menos de 20%), Léporé, 2003. Os ensaios de fadiga foram realizados em dois tipos de fio chato de aço galvanizado (seção transversal retangular), Fig. 1, utilizados na armadura de tração de cabos umbilicais. Esses fios são de classes diferentes: EHS (Extra High Strength), ou Classe C – fio chato de aço galvanizado A, e UHS (Ultra High Strength) – fio chato de aço galvanizado B.

A diferença entre esses dois materiais está envolta das principais propriedades mecânicas, tais como Limite Resistência à Tração e Limite ao Escoamento. A Tabela 1 apresenta os valores das propriedades mecânicas dos fios estudados, que foram repassadas pelo fornecedor.

Tabela 1. Propriedades Mecânicas dos Fios A e B.

Material	Carga Máxima [kN]	Limite de Resistência [MPa]	Alongamento na Ruptura [%]	Limite ao Escoamento (a 0,2%) [MPa]	Área Nominal [mm ²]
A	29,94	1026,14	10,04	890,14	28
B	46,15	1280,12	8,52	1019,89	36

3.2. Método

Os carregamentos variáveis do fenômeno de fadiga podem ser representados experimentalmente a partir de testes laboratoriais. O método dos testes consiste em descrever os procedimentos necessários para a confecção da curva de fadiga, a qual baseia-se no registro do número de ciclos para a ruptura de um material em função da amplitude de tensão aplicada.

Para a obtenção da curva S-N do material testado, o material será ensaiado nas seguintes condições:

- Tipo de esforços: Tração-tração;
- Quatro níveis de tensão;
- Meio: ar;
- Razão de tensão: 0,1;
- Temperatura de ambiente de teste: $(23,5 \pm 3)^{\circ}\text{C}$;
- Frequência de teste: entre 2-6 Hz, dependendo da tensão aplicada.

Os ensaios que atingirem 10^6 ciclos e sem romper serão considerados run out. Para os testes foi utilizada uma máquina de ensaios de fadiga Instron, dotada de célula de carga com escala mínima de 1 Kgf a 10000 Kgf + 0,1%, Fig. 8.



Figura 8. Máquina de testes mecânicos Instron.

Amostras de 300 mm de comprimento dos arames de seção retangular foram utilizados na realização dos testes de fadiga. Para cada nível de tensão serão testados, pelo menos 5 corpos de prova, lembrando que se tem quatro níveis de tensão. O número de corpos de prova deverá ser escolhido a partir dos critérios de replicância estabelecidos pela ASTM E 739-91.

Para a determinação das forças a serem aplicadas na amostra a Eq. 5 foi utilizada:

$$F = \sigma \cdot A \quad (5)$$

Onde: σ é o nível de tensão e A é área da seção transversal do fio.

A curva (S-N) será obtida com a razão de carregamento de $R = 0,1$, conforme Eq. 6:

$$\frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = 0,1 \quad (6)$$

Os níveis de tensão sugeridos para o ensaio são:

Nível 1: Os corpos de prova devem ser ciclados com a carga máxima de 50 % da carga de escoamento.

Nível 2: Os corpos de prova devem ser ciclados com a carga máxima de 60 % da carga de escoamento.

Nível 3: Os corpos de prova devem ser ciclados com a carga máxima de 70 % da carga de escoamento.

Nível 4: Os corpos de prova devem ser ciclados com a carga máxima de 80 % da carga de escoamento.

Onde S_y é a tensão no escoamento à 0,2%.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O valor da tensão do escoamento foi usado como referência para determinar os níveis de tensão utilizados no teste de fadiga. As tensões utilizadas nos testes não devem ultrapassar 90% do valor do escoamento a fim de garantir a condição elástica do material requerida na curva S-N. A Figura 9 representa amostras dos fios A e B antes de serem ensaiadas.



(a)



(b)

Figura 9. Amostras de fio de aço galvanizado seção retangular antes de serem testadas (a) Fio A e (b) Fio B.

A Figura 10 mostra os níveis de tensão utilizados nos testes e os valores nominais de tensões e forças.

Fio Chato de Aço Galvanizado A Classe C						Fio Chato de Aço Galvanizado B UHS					
$\sigma_{\max}$ [MPa]	$\Delta\sigma$ [MPa]	$\sigma_{\min}$ [MPa]	σ_m [MPa]	$F_{\max}$ [kgf]	$F_{\min}$ [kgf]	$\sigma_{\max}$ [MPa]	$\Delta\sigma$ [MPa]	$\sigma_{\min}$ [MPa]	σ_m [MPa]	$F_{\max}$ [kgf]	$F_{\min}$ [kgf]
722	650	72	397	2063	206	947	852	95	521	3478	348
611	550	61	336	1746	175	828	746	83	456	3043	304
500	450	50	275	1429	143	710	639	71	391	2608	261
389	350	39	214	1111	111	592	533	59	325	2173	217

(a)

(b)

Figura 10. Níveis de tensão utilizados nos testes de fadiga. (a) Níveis de tensão para o Fio A e (b) Níveis de tensão para o Fio B.

O gráfico da Fig. 11 ilustra os resultados encontrados para os fios A e B testados, acompanhado da respectiva banda de confiança (97,5% de confiabilidade) calculada de acordo com a metodologia conforme ASTM E 739, cuja nomenclatura é Curva Proposta. O gráfico também compara os dados obtidos após ensaio de fadiga e a curva padrão da DNV (curva B1), DNV RP C203, 2010, que é usada como padrão para avaliação da vida em fadiga de armaduras de umbilical.

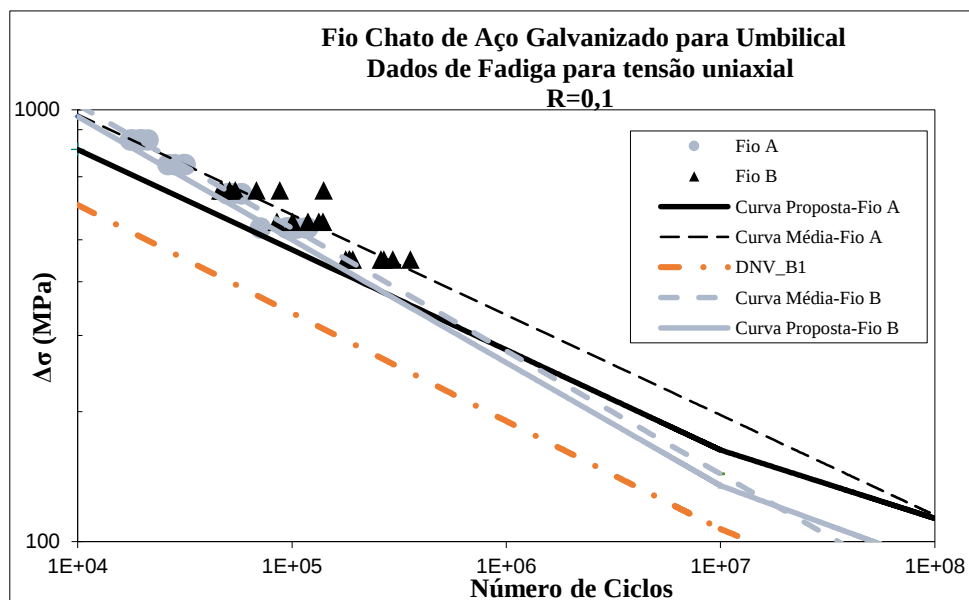


Figura 11. Curva S-N dos fios A e B 10x2,8 mm.

É possível notar que mesmo com uma banda de confiança extrapolada com duas vezes o desvio padrão dos dados, o que atribui estatisticamente uma confiabilidade de aproximadamente 97,5%, os dados se mostraram menos conservadores que a curva da sugerida pela DNV, DNV RP C203, 2010. Os parâmetros da curva da banda de confiança para o fio chato de aço galvanizado A classe C são:

- $N < 10e7$: $m1 = 4,31$; $\log(a1) = 16,542$
- $N > 10e7$: $m2 = 6,31$; $\log(a2) = 20,967$

Já os parâmetros da curva média para o fio A são:

- $m1 = 4,31$; $\log(a1) = 16,891$

Os parâmetros da curva da banda de confiança para fio chato de aço galvanizado B UHS são:

- $N < 10e7$: $m1 = 3,51$; $\log(a1) = 14,47$
- $N > 10e7$: $m2 = 5,52$; $\log(a2) = 18,78$

Os parâmetros da curva média para o fio B são:

- $m1 = 3,51$; $\log(a1) = 14,56$

Os dados apresentados se tornam importantes com relação à aplicabilidade da curva utilizada em projeto. É possível verificar, a partir da Fig. 11, que a diferença de áreas e de propriedades mecânicas (Limite de Resistência à Tração e Limite ao Escoamento) traz resultados diferentes e, consequentemente, curvas distintas. Para níveis de tensão altos, a partir da curva proposta do Fio B é verificado um comportamento mais conservador que o a curva proposta do fio A. Já para níveis de tensão mais baixos o Fio A tem um comportamento mais conservador que o Fio B. Há uma interseção

das curvas propostas dos Fios A e B, demonstrando que em um certo nível de tensão os dois materiais possuem o mesmo comportamento em fadiga.

Na Figura 12 são apresentados alguns corpos de prova fraturados após serem testados.



Figura 12. Amostras de fio de aço galvanizado seção retangular após de serem testadas (a) Fio A e (b) Fio B.

5. CONCLUSÃO

As curvas de fadiga dos dois materiais estruturais (fios chatos de aço galvanizado A e B) utilizados pela Prymian Surfex, obtidas experimentalmente e comparadas à curva da DNV, tornam-se importantes em relação à aplicabilidade em projeto. Com os resultados obtidos é possível afirmar que os materiais A e B possuem uma resistência à fadiga superior à apresentada pela DNV, mostrando serem menos conservadores que a curva sugerida.

A diferença de áreas e de propriedades mecânicas (limite de resistência à tração e limite ao escoamento) fornecem resultados diferentes e, consequentemente, curvas distintas. Para níveis de tensão altos, a partir da curva proposta do Fio B é verificado um comportamento mais conservador (níveis de tensão maiores para um mesmo número de ciclo) que o a curva proposta do fio A. Já para níveis de tensão mais baixos o Fio A tem um comportamento mais conservador que o Fio B. Há uma interseção das curvas propostas dos Fios A e B, demonstrando que em um certo nível de tensão os dois materiais possuem o mesmo comportamento em fadiga. Assim, o projetista de um cabo umbilical utilizar qualquer um dos fios testados levando em conta a curva de fadiga desses materiais, proporcionando alternativas de projetos com melhor custo-benefício.

6. AGRADECIMENTOS

Agradeço a Prymian Surfex por fornecer a estrutura para realização dos testes, bem como o apoio à pesquisa e desenvolvimento em relação aos projetos de cabos umbilicais e desenvolvimentos de materiais que o constituem. Agradeço também aos meus colegas e co-autores desse artigo pela ajuda e compreensão para finalizarmos esse trabalho com sucesso.

7. REFERÊNCIAS

- Souza, L.A.L., 1998, “Rigidez à flexão de cabos umbilicais submarinos”, Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, M.Sc., Engenharia Oceânica, Rio de Janeiro, XIII, 99 p.29,7 cm.
- Callister, W.D.J., 2005, “Fundamentals of Materials Science and Engineering”, An Integrated Approach, New York, EUA, John Wiley & Sons, Inc.
- Brandão, R.P., 2013, “Projeto mecânico de uma máquina de ensaio de fadiga por flexão rotativa”, Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- Norton, R.L., 2004, “Projeto de Máquinas”. 2. ed. Porto Alegre, Brasil, Bookman.
- Lépore, P.F., 2003, “Implementação de um procedimento de projeto estrutural e homologação de umbilicais”, Tese (Doutorado), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 200p.
- Witz, J.A.; Tan, Z., 1992, “On the flexural structural behavior of flexible pipes, umbilicals and marine cables”, Marine Structures, v. 5, p. 205-227.
- DNV (DET NORSKE VERITAS) RP C203, 2010, “Fatigue design of offshore steel structures”.
- Berge, S, Langhelle, N.K., Eggen, T.G., 2009, “Environmental Effects of Fatigue Strength of Armour Wire for Flexible Risers”, ASME 2009 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Vol. 6: Materials Technology; C.C. Mei Symposium on Wave Mechanics and Hydrodynamics; Offshore Measurement and Data Interpretation, Honolulu, Hawaii, USA, May 31–June 5 2009, Paper No. OMAE2009-80262, pp. 327-334; 8 p.
- ASTM E 739-91, 1991, “Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (ϵ -N) Fatigue data”.

8. RESPONSABILIDADE AUTURAL

“Os autores Thamise Sampaio Vasconcelos Vilela, Rafael Nunes Torres, Maria Olivia de Barros Almeida, Michelli Siqueira Monteiro de Barros e Wilson Zacheo são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

EXPERIMENTAL STUDY OF BEHAVIOR IN METALLIC MATERIALS FATIGUE DRAW ARMOR IN UMBILICAL CABLES

CON-2016-0557

Thamise Sampaio Vasconcelos Vilela, thamise.vilela@prysmiangroup.com¹

Maria Olívia de Barros Almeida, maria.almeida@prysmiangroup.com¹

Michelli Siqueira Monteiro de Barros, michelli.barros@prysmiangroup.com¹

Rafael Nunes Torres, rafael.torres@prysmiangroup.com¹

Wilson Zacheo, wilson.zacheo@uol.com.br

¹Prysmian Suflex, Rua Principal, 50 Porto de Santana, Cariacica-ES, Brasil.

Abstract. *The fatigue failure in umbilicals invariably cause severe damage (environmental / economic) the oil production systems, as well functioning ensures the correct management of the flow of oil. Studies construction and analysis fatigue curves of prototypes or complete cables are complicated, long and expensive, so often the analysis in fatigue occurs for each material composing them, such as the material of the layer metal (traction armor).*

The tensile armor consists of galvanized carbon steel wire (circular or rectangular) that are arranged in an even number of layers of wires helically wound in opposite directions. The main draw of armor functions are: to resist axial load, as well as offering a torsional stiffness of the umbilical cord, and, in fact, a key structural element of the cable. Therefore, knowledge of the fatigue life and the mechanical properties of wires present in the umbilicals are highlighted in the oil industry, as service failures can be avoided representing economic benefits to industry and the greater reliability of the projects. This work aims to comparatively evaluate the fatigue curves obtained experimentally some structural materials used by Prysmian Suflex and DNV curve in order to establish a pattern according to the level of resistance and area of each material. The curves will be plot from fatigue tests on the type of traction-to-traction effort and four stress levels. With the S-N curves made, you can establish models of projects with forecasts of the use of different classes of materials, providing design alternatives with better cost-benefit.

Keywords: *umbilical cable, fatigue, mechanical properties, galvanized steel wire, S-N curve.*

"The authors Thamise Sampaio Vilela Vasconcelos, Rafael Nunes Torres, Maria Olivia de Barros Almeida, Michelli Siqueira Monteiro de Barros and Wilson Zacheo are solely responsible for the content of this work."