

# INFLUÊNCIA DE DEFORMAÇÕES PLÁSTICAS ACUMULADAS (APS) NO LIMITE DE RESISTÊNCIA À FADIGA DE TUBOS DE AÇO SUPER DUPLEX<sup>1</sup>

Jhonny Dias de Oliveira<sup>2</sup>

Luiz Gustavo Pires Coelho<sup>3</sup>

Antonio Pereira do Nascimento Filho<sup>2</sup>

Rafael Loureiro Tanaka<sup>2</sup>

Flávio José da Silva<sup>4</sup>

Temístocles de Souza Luz<sup>4</sup>

## Resumo

Tubos de aço super duplex são usados extensivamente em cabos umbilicais para controle e monitoramento de instalações submarinas para produção de petróleo. Os esforços em alto mar são simulados e cargas são estimadas para calcular a vida útil dos cabos umbilicais e de seus componentes. Fazer estes cálculos através de ensaios de fadiga em amostras virgens pode trazer resultados diferentes dos reais, isso porque, nas fases de fabricação, armazenamento e instalação, há um acúmulo de deformações plásticas nos tubos devido aos processos de bobinamento e desbobinamento. Estas deformações plásticas são denominadas APS, do inglês, Accumulated Plastic Strains. E este estudo tem como objetivo avaliar a influência que o APS tem na vida útil de tubos de aço super duplex, bem como verificar se métodos analíticos são boas aproximações para prever o comportamento sob fadiga desses componentes. Isso será feito a partir de comparações de curvas S-N geradas a partir de 3 métodos: método experimental (ensaios práticos realizados em máquina cíclica uniaxial de tração); método analítico baseado na literatura; e método analítico baseado na norma DNV. Os resultados mostram que os ensaios práticos ficaram bem próximos e com mesmo comportamento previsto nos cálculos utilizando metodologia descrita na norma DNV, porém divergentes dos resultados segundo método desenvolvido na literatura.

**Palavras-chave:** Deformação plástica acumulada; Fadiga; Tubo aço super duplex.

## INFLUENCE OF ACCUMULATED PLASTIC STRAINS ON FATIGUE LIFE OF SUPER DUPLEX STEEL TUBES

### Abstract

Super Duplex Steel Tubes are used extensively in umbilical cables for control and monitoring of underwater installations for oil production. The stresses from sea are simulated, loads are estimated and the life of umbilical cables and their components are calculated. Although, develop these calculations through fatigue tests on virgins samples can bring different results from the reality because, in the steps of manufacturing, storage and installation, there is an accumulation of plastic deformation on the tubes due to the process of reeling and unreeling. This research has the purpose of evaluate the influence that these APS have in the life of super duplex steel tubes, and to verify if analytical methods are good approximations to predict the behavior of these components under fatigue. This will be done by comparing SN curves generated from three methods: the experimental method (practical tests performed in uniaxial cyclic tensile machine); analytical method based on the literature; and analytical method based on the standard DNV. The results show that the practical tests were very close and with the same behavior expected from calculations using the methodology described in Standard DNV, but, divergent from results of the method developed in the literature.

**Key words:** Accumulated plastic strain; Fatigue; Super duplex steel tube.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 67º Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro – RJ.*

<sup>2</sup> *Engenheiro da Prysmian, Vila Velha - ES.*

<sup>3</sup> *Engenheiro da Suncocke, Vitória - ES.*

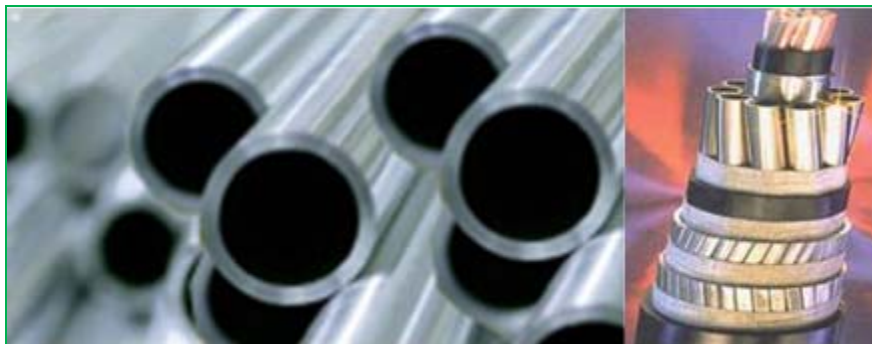
<sup>4</sup> *Prof. Dr. em Engenharia Mecânica – UFES.*

## 1 INTRODUÇÃO

Quando um componente é submetido a esforços ciclos ou flutuantes, mesmo que as tensões aplicadas sejam menores que sua tensão de ruptura, este componente poderá falhar por fadiga. Isto porque há uma tensão limite sob a qual cada componente pode operar sem falhar por fadiga, ou seja, ter vida infinita se solicitado somente a esses esforços. Uma maneira de representar graficamente a vida sob fadiga é feita por meio de curvas S-N (S é a tensão e N é número de ciclos). Portanto, analisar e determinar essas tensões limites e o comportamento dos materiais durante as solicitações cíclicas é de extrema importância para os engenheiros.

As falhas por fadiga têm seu início pela formação de micro-trincas. Essas micro-trincas se evoluem e se propagam até causar a falha do componente, isto porque com o evoluir do número de ciclos, as deformações plásticas se acumulam, gerando um esgotamento da ductilidade dos grãos cristalinos do material. É importante dizer que as deformações plásticas acumuladas (Accumulated Plastic Strain – APS) não são adquiridas apenas durante a operação do componente, mas antes mesmo deste estar desempenhando sua função, já armazena deformação plástica devido a processos de fabricação, armazenamento e instalação.

Nos tubos de aço Super Duplex, cuja aplicação se dá em cabos umbilicais (Figura 1), destinados à interligação entre plataformas de petróleo e equipamentos submersos, a análise do acúmulo de deformação plástica é essencial, uma vez que esses tubos são submetidos constantemente à bobinamentos e desbobinamentos.



**Figura** Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento.. Tubos de aço Super Duplex aplicados em cabos umbilicais.

Considerando as condições citadas acima, em resumo, o objetivo deste estudo é comparar curvas S-N geradas a partir de dados obtidos por ensaios de fadiga em amostras de tubos com 30% de APS, com curvas S-N de amostras virgens (sem APS) de acordo com a norma DNV,<sup>(1)</sup> regulamentadora para cabos umbilicais, bem como avaliar a confiabilidade de se utilizar o método analítico, encontrado em Shigley e Mishke,<sup>(2)</sup> como razoável aproximação da vida em fadiga dos tubos de aço. Este último, que consiste em uma aproximação da curva S-N baseada em ensaios já realizados e nos fatores de projeto de cada componente, é descrito neste estudo como o *método analítico baseado na literatura*.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Material

O objeto de estudo, SANDVIK SAF 2507, é um aço de estrutura cristalina austenítica-ferrítica, formado por uma liga especial de Cromo, Níquel e Molibdênio em sua maioria com 0,03% de Carbono que resultam em excelentes características ao material como alta resistência mecânica, boa soldabilidade, propriedades físicas que oferecem vantagens à sua fabricação, alta resistência à corrosão, entre outras. O tubo de aço estudado tem diâmetro interno de ½" (12,7mm) e espessura de parede de 1,46mm.

### 2.2 Método Descrito na Literatura

A literatura adotada como referência apresenta métodos de obtenção de curva S-N e estimativas da vida sob fadiga na região de alto ciclo. Nesta subseção, é apresentado o método analítico descrito no livro Shigley e Mishke.<sup>(2)</sup> Este método é recomendado para estimativa do limite de resistência à fadiga de diferentes aços, como Aços Carbono e Aços Liga, com diferentes microestruturas predominantes, como Ferrita, Perlita ou Martensita, mas não faz referência quanto ao seu uso no estudo de aços super duplex, pois, na época da publicação desse livro, não haviam sido feitos estudos aprofundados sobre esse aço.

Este método consiste em um memorial de cálculo baseado em fatores e constantes obtidos após ensaios feitos em laboratório, visto que na literatura encontram-se resultados já ensaiados de diferentes tipos de amostras.

Foi observado em uma grande quantidade de amostras de dados reais de ensaios que o limite de resistência à fadiga varia entre 40 a 60% da resistência à tração para aços de até 1.460 MPa aproximadamente. Chegando à seguinte conclusão para os aços:

$$S'_e = \begin{cases} 0,504 \times S_{ut} & S_{ut} \leq 1460 \text{ MPa} \\ 740 \text{ MPa} & S_{ut} > 1460 \text{ MPa} \end{cases} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde  $S_{ut}$  é o limite de tração mínima e  $S'_e$  é o limite de resistência a fadiga. Porém este valor não é definitivo, e sim, um valor de partida para a estimativa.

Tomando conhecimento deste valor inicial, deverá ser feita uma correção deste valor levando em consideração os fatores modificadores do limite de resistência à fadiga.

Esses fatores são baseados nas seguintes particularidades.

- material: composição, base de falha, variabilidade;
- manufatura: método, tratamento térmico, corrosão por microabrasão, condição de superfície, concentração de tensão;
- ambiente: corrosão, temperatura, estado de tensão, tempo de relaxação; e
- projeto: tamanho, forma, vida, estado de tensão, concentração de tensão, velocidade, microabrasão, escoriação.

Portando, para uma melhor aproximação do limite de resistência à fadiga, deve-se corrigir o valor  $S'_e$  estimado inicialmente.

$$S_e = S'_e \times k_a \times k_b \times k_c \times k_d \times k_e \times k_f \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde  $S_e$  é o valor do limite de fadiga final já aproximado. Os valores de k são os fatores modificadores e serão apresentados a seguir:

- Fator de modificação de superfície  $k_a$ ;

- Fator de tamanho  $k_b$ ;
- Fator de carregamento  $k_c$ ;
- Fator de temperatura  $k_d$ ;
- Fator de confiabilidade  $k_e$ ; e
- Fator de efeitos Diversos  $k_f$ ;

Após estimar o valor de  $S_e$ , é possível calcular o número de ciclos no qual o componente irá falhar em uma determinada tensão. Para este cálculo, usa-se a seguinte equação empírica.

$$N = \left(\frac{S_e}{S_f}\right)^{\frac{1}{b}} \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde:

$N$  - Número de ciclos.

$S_f$  - É a tensão exercida

$a$  e  $b$  - São coeficientes para parametrização da curva  $S - N$

### 2.3 Método Descrito na Norma DNV

A metodologia de cálculo a seguir foi obtida da norma DNV-RP-C203 (abril 2008),<sup>(1)</sup> que apresenta recomendações para análises baseadas em testes de fadiga em amostras de tubos de aço que não sofreram deformações provenientes de bobinamentos (sem APS). A partir de dados experimentais, dentro de uma faixa de diâmetro, espessura de parede e propriedades mecânicas, esta norma plota uma curva S-N mínima a ser tomada como referência e critério de aceitação no que diz respeito à confiabilidade.

Como a própria norma explicita, foram feitos diversos ensaios com tubos variando seus dimensionais dentro das faixas especificadas. Várias curvas S-N foram geradas a partir desses ensaios e a mais crítica delas, ou seja, a que possui os menores números de ciclos até a ruptura dos tubos, é a usada como referência.

Para se traçar a curva S-N, a seguintes expressões foram usadas:

Para  $N \leq 10^7$ :

$$\text{Log}(N) = 14,1 - 3,5 \times \log \left[ S \cdot \left(\frac{t}{t_{ref}}\right)^{0,25} \right] \quad (\text{Eq. 4})$$

Para  $N > 10^7$ :

$$\text{Log}(N) = 17,143 - 5,0 \cdot \log \left[ S \cdot \left(\frac{t}{t_{ref}}\right)^{0,25} \right] \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde,

$t$  = espessura da parede do tubo = 1,46 mm.

$t_{ref}$  = espessura de referência adotada pela norma = 1,0 mm.

$S$  = Amplitude de tensão =  $\frac{S_{max} + S_{min}}{2}$

## 2.4 Método Experimental

Aqui será apresentado todo o procedimento experimental que envolve o cálculo e aplicação das deformações plásticas (APS) nos tubos de aço inoxidável super duplex, bem como os parâmetros de ensaio e ferramentas de cálculo da vida em fadiga para se obter a curva S-N. A Figura 2 ilustra a sequencia da metodologia experimental.

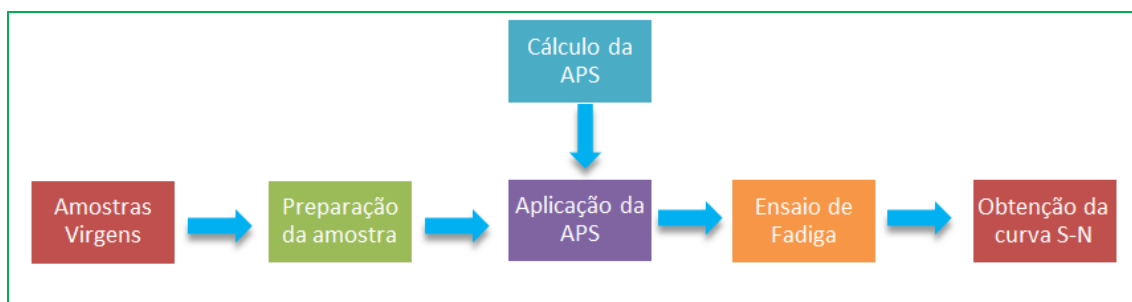


Figura 2. Fluxograma referente ao procedimento experimental.

### 2.4.1 Cálculo da APS

A deformação elástica para o material do tubo, SAF 2507, segundo a metodologia cálculo desenvolvida pelo fabricante dos tubos de aço, explicitada no documento da Sandvik Materials Technology,<sup>(3)</sup> é expressa da seguinte forma:

$$S_y = \epsilon_{elástica} \times E \quad (Eq. 6)$$

Onde:

$\epsilon_{elástica}$  = Deformação elástica

$S_y$  = Limite de escoamento

$E$  = Módulo de elasticidade

A deformação plástica acumulada (APS) para cada etapa é determinada subtraindo-se a porção da deformação elástica do total da deformação sofrida. Para a primeira bobinagem, temos a equação abaixo.

$$\epsilon_{plástica\_primeiro\_bobinamento} = \epsilon_{total\_primeiro\_bobinamento} - \epsilon_{elástica} \quad (Eq. 7)$$

Para se calcular o nível de APS na primeira bobinagem, os seguintes parâmetros e relações são considerados em norma:

$$\epsilon_{total\_primeiro\_bobinamento} = \frac{r}{R} \quad (Eq. 8)$$

Onde:

$r$  = raio externo do tubo

$R$  = raio do tambor da bobina

$\epsilon_{total\_primeiro\_bobinamento}$  = Deformação total sofrida no primeiro bobinamento

Analogamente, para o i-ésimo bobinamento:

$$\epsilon_{plástica\_i-ésimo\_bobinamento} = \epsilon_{total\_i-ésimo\_bobinamento} - \epsilon_{elástica} \quad (Eq. 9)$$

Mas, a partir do segundo bobinamento, como há a deformação elástica contida do primeiro bobinamento, cada etapa tem uma deformação total igual à deformação plástica do primeiro bobinamento, como mostra a equação abaixo.

$$\epsilon_{\text{total } j\text{-ésimo\_bobinamento}} = \epsilon_{\text{plástica\_primeiro\_bobinamento}} \quad (\text{Eq. 10})$$

Assim, a deformação plástica acumulada em cada etapa é determinada segundo a equação abaixo.

$$\epsilon_{\text{plástica } j\text{-ésimo\_bobinamento}} = \epsilon_{\text{plástica\_primeiro\_bobinamento}} - \epsilon_{\text{elástica}} \quad (\text{Eq. 11})$$

Para a primeiro desbobinamento, é considerado o valor da deformação plástica do primeiro bobinamento subtraindo-se a porção elástica contida, conforme as equações abaixo.

$$\epsilon_{\text{total\_primeiro\_desbobinamento}} = \epsilon_{\text{plástica\_primeiro\_bobinamento}} \quad (\text{Eq. 12})$$

$$\epsilon_{\text{plástica\_primeiro\_desbobinamento}} = \epsilon_{\text{plástica\_primeiro\_bobinamento}} - \epsilon_{\text{elástica}} \quad (\text{Eq. 13})$$

Analogamente, para o i-ésimo desbobinamento, seguem as equações abaixo:

$$\epsilon_{\text{total\_primeiro\_desbobinamento}} = \epsilon_{\text{plástica\_primeiro\_bobinamento}} \quad (\text{Eq. 14})$$

$$\epsilon_{\text{plástica\_primeiro\_desbobinamento}} = \epsilon_{\text{plástica\_primeiro\_bobinamento}} - \epsilon_{\text{elástica}} \quad (\text{Eq. 15})$$

As amostras dos tubos são fornecidas em varas de 4 metros de comprimento com uma solda Sandvik no centro. Essas varas são soldadas umas nas as outras e acondicionadas em uma bobina de recebimento, a fim de se obter o comprimento suficiente para fazer os repasses necessários de uma bobina para a outra. Isso porque todas as amostras selecionadas para o ensaio devem estar compreendidas na faixa do tubo que foi bobinado e desbobinado. O acúmulo das deformações plásticas é alcançado pelo método de repasse entre bobinas. Para a correta execução do procedimento, é necessário que as bobinas tenham tambor de mesmo diâmetro e que estejam posicionadas em linha. A Figura 3 mostra o procedimento de repasse dos tubos para o estudo em questão.

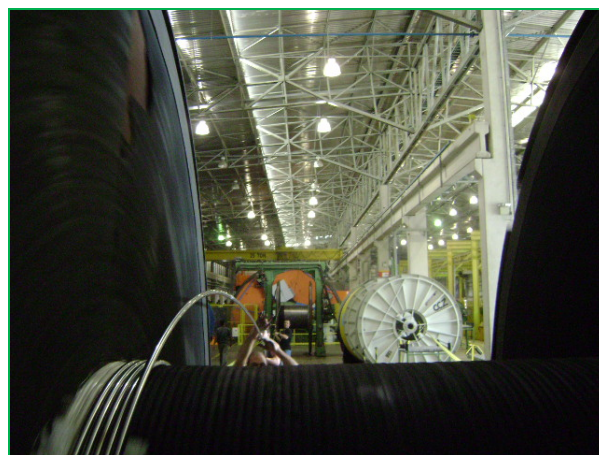


Figura 3. Procedimento de aplicação do APS

O diâmetro do tambor juntamente com as características do tubo como Módulo de Elasticidade e Tensão de Escoamento são o que definem o número de repasses necessários para que a deformação plástica acumulada (APS) desejada seja alcançada. Para se obter 30% de APS, seguindo o metodologia de cálculo desenvolvida pelo fabricante, foram necessários 34 repasses.

## 2.4.2 Ensaio de fadiga

Para estudar o comportamento à fadiga dos tubos de aço super duplex, eles foram ensaiados em uma máquina cíclica de tração uniaxial (figura 4) com razão de tensão igual a 0,1, ou seja,  $R = \frac{S_{mín}}{S_{máx}} = 0,1$ . Isso porque, na sua aplicação em campo, os cabos umbilicais e, por consequência, os tubos de aço, estão sempre tensionados a tensões máximas e mínimas de valores positivos, nunca submetidos, assim, a forças de compressão.

Para realização do ensaio, foram utilizadas 15 amostras de 300 mm de comprimento, presas em suas extremidades por garras apropriadas. Com o intuito de simular a velocidade na qual o umbilical sofre esses carregamentos, foi utilizada uma frequência de 20 Hz para aplicar os níveis de carregamento nas amostras. Devido a esses parâmetros, cada amostra demandou um tempo médio de 5 dias de ensaio, totalizando 45 dias de tempo. A escolha das tensões exercidas foi feita mediante análises dinâmicas realizadas pela equipe de engenharia da Prysmian.



Figura 4. Máquina de ensaio de fadiga uniaxial.

## 2.4.3 Obtenção da Curva S-N da análise experimental

A apresentação dos dados experimentais do ensaio de fadiga é feita através da curva S-N, onde é traçada em gráfico a relação entre a tensão S e o número N de ciclos necessários para a fratura. No presente estudo, os dados estão apresentados em escala logarítmica. Toda a metodologia de cálculo é seguida de acordo com a norma ASTM E 739-91 2004.<sup>(4)</sup>

Para esse estudo, foram usadas 15 amostras dos tubos de aço com 30% de APS divididos em três níveis de tensão, para se obter dados suficientes para a construção da curva com considerável nível de confiança. Como há uma dispersão dos dados obtidos dos ensaios, a curva média não seria ideal para definir o real comportamento dos tubos de aço. Para serem alcançados resultados mais conservativos, foram plotadas, a partir da curva média, uma curva mínima e uma curva máxima com intervalo de confiança de 95%.

Para obter a curva média, usa-se a equação abaixo:

$$\log(N) = A + B \cdot \log(S) \quad (Eq. 16)$$

Para obter a curva mínima, usa-se a equação abaixo:

$$\log(N) = A + B \cdot \log(S) - \sqrt[2]{2F_p \cdot \sigma \cdot \left[ \frac{1}{k} + \frac{[\log(S) - \log(S)_m]^2}{\sum_{i=1}^k [\log(S)_i - \log(S)_m]^2} \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (\text{Eq. 17})$$

Para obter a curva máxima, usa-se a equação abaixo:

$$\log(N) = A + B \cdot \log(S) + \sqrt[2]{2F_p \cdot \sigma \cdot \left[ \frac{1}{k} + \frac{[\log(S) - \log(S)_m]^2}{\sum_{i=1}^k [\log(S)_i - \log(S)_m]^2} \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (\text{Eq. 18})$$

Onde,

$N$  = Número de ciclos

$S$  = amplitude de tensão

$A$  e  $B$  = Constantes para parametrização da curva

$F_p$  = Valor tabelado para definir intervalo de confiança

$\sigma$  = Desvio Padrão

sendo,

$$S = \frac{S_{\max} + S_{\min}}{2}$$

$$A = \log(N) - B \cdot \log(S)$$

$$B = \frac{\sum_{i=1}^k [\log(S)_i - \log(S)_m] \cdot [\log(N)_i - \log(N)_m]}{\sum_{i=1}^k [\log(S)_i - \log(S)_m]^2}$$

$$\sigma = \left[ \frac{\sum_{i=1}^k [\log(N)_i - \log(N)_{est}]^2}{k-2} \right]^{1/2}$$

Com

$$\log(N)_{est} = A + B \cdot \log(S)_i$$

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Método Literatura

Tabela 1. Resultados do método analítico baseado na literatura

Amplitude de Tensão [MPa]	Número de ciclos até a falha
495	12.475,26
368	134.835,39
97	1.667.302.424

#### 3.2 Método Norma DNV

Tabela 2. Resultados do método desenvolvido na norma DNV

Amplitude de Tensão S [MPa]	Número N de ciclos até a falha
495	33.502
368	94.564
97	10.085.565



### 3.3 Método Experimental

Tabela 3. Resultados obtidos pelo ensaio de fadiga experimental

Amostra Tubo de Aço	Tensão S [MPa]	Nº De Ciclos N
1	495	35.897
2	495	36.449
3	495	38.477
4	495	94.756
5	495	39.276
6	368	328.798
7	368	79.694
8	368	205.260
9	368	222.829
10	368	156.504
11	97	23.753.770
12	97	12.577.078
13	97	20.968.760
14	97	13.761.621
15	97	12.538.369

## 4 DISCUSSÃO

Quando plotamos todas as curvas S-N em um mesmo gráfico, conseguimos fazer a comparação dos resultados e chegar a observações bastante conclusivas.

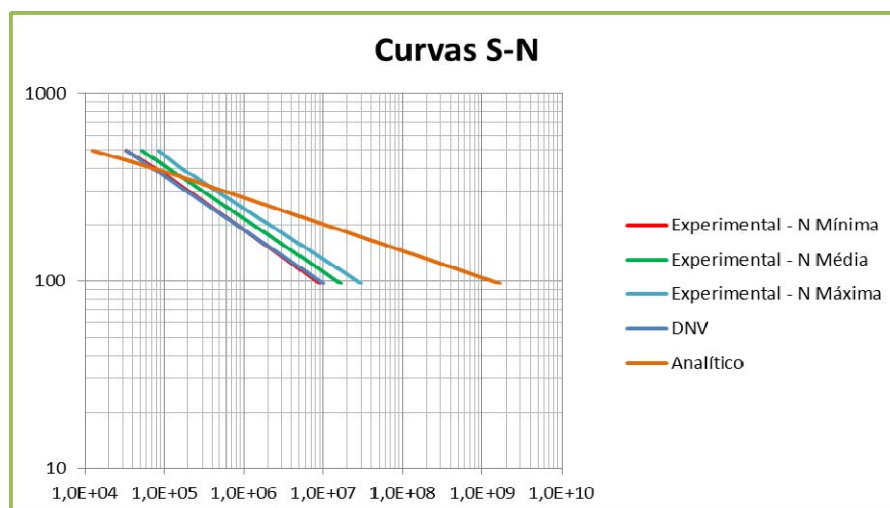


Figura 5. Comparação das curvas S-N geradas pelos 3 métodos.

### 4.1 Discussão e Validação do Método Analítico Baseado na Literatura

Como observado no gráfico da Figura 5, a curva S-N referente ao método analítico não se comporta de forma análoga às demais curvas. Isso se deve aos seguintes fatores:

- Para o primeiro nível de carregamento (495 MPa), se obteve um número pequeno de ciclos, próximo à região de vida de fadiga de baixo ciclo, região dentro da qual o método não se aplica.

- No terceiro nível de carregamento (97 MPa), se obteve um número de ciclos relativamente grande, na ordem de  $10^9$ . Isto se deve ao fato do valor da amplitude de tensão estar abaixo do limite de resistência à fadiga calculado (146,08 MPa), ou seja, obtivemos vida infinita de fadiga. A representação correta da curva S-N para o método analítico seria uma reta horizontal a partir do valor do limite de resistência à fadiga.
- O principal fator que justifica o comportamento anormal da curva S-N para o método analítico da literatura, como mencionado anteriormente, é o fato de que o método não abrange o material analisado, aços super duplex. Visto que na época do desenvolvimento do método, meados da década de 60, não foram feitos estudos específicos para esta liga especial. O próprio método cita as diferenças que cada microestrutura influencia na vida sob fadiga, ao fazer comparações com microestrutura ferrítica, perlítica e martensítica. Como a liga em análise (Super Duplex) é composta de dois tipos de microestrutura (austenita e ferrita), não pode exigir a mesma confiabilidade do método. Fato este que pode ser comprovado através do artigo científico de CHAI, G<sup>(5)</sup>: "Fatigue behavior of duplex stainless steels in the very high cycle regime. 2006". O artigo em questão apresenta resultados de vida em fadiga para aços super duplex com dois tipos de microestrutura (SAF 2205 e SAF 2507), e conclui que, mesmo que se varie somente o tipo de microestrutura, tem-se uma considerável mudança na vida em fadiga.

#### 4.2 Discussão e Comparação do Resultado Experimental com Norma DNV

Analisando a Figura 5, podemos destacar os seguintes pontos:

- As curvas têm mesma inclinação. Isso confirma que a norma DNV traduz com precisão o comportamento dos tubos de aço super duplex quando ensaiados.
- A curva mínima do ensaio experimental praticamente coincide com a curva da DNV. Isso significa que, mesmo com 30% de APS, o resultado experimental ficou compreendido dentro da faixa de 95% de intervalo de confiança.
- Somente a amostra 7 apresentou um valor de número de ciclos abaixo (79.694) do recomendado pela norma (94.564). Porém, em média, os valores de número de ciclos para esse nível de tensão obtiveram resultados bem acima da norma (198.617).

#### 5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que, mesmo com 30 % de APS, as amostras ensaiadas romperam com número de ciclos acima das amostras virgens ensaiadas pela norma. Como a norma DNV regulamenta e limita o critério de aceitação em relação ao número de ciclos, pode-se afirmar que, mesmo com acúmulo de deformação plástica, ainda é garantido um nível de segurança aceitável para a aplicação dos tubos de aço super duplex. Já para os resultados obtidos no método analítico, estão muito fora da faixa de aceitação prevista pela DNV, ou seja, do comportamento esperado dos tubos de aço quando solicitados às cargas descritas. O principal fator para essa discrepância nos resultados, seria a não abrangência do método presente na literatura para o tipo de microestrutura

específica do aço Super Duplex. Dessa forma, realizar ensaios de fadiga em aços Super Duplex em geral, a fim de estimar fatores de correção para o método analítico, é uma sugestão para trabalhos futuros. Bem como realizar procedimento experimental (ensaio de fadiga) em amostras virgens de tubos de aço Super Duplex (SAF 2507) a fim de avaliar a variação da vida sob fadiga, comparado com resultados a partir de ensaios com 30% de APS.

Assim, mesmo o método analítico sendo utilizado por engenheiros no mundo todo, este deve ser utilizado apenas como um guia inicial de cálculo de projeto, pois, a melhor maneira de se determinar a vida em fadiga sem superdimensionamentos, é realizar ensaios laboratoriais simulando as condições de operação do componente.

## REFERÊNCIAS

- 1 DNV-RP-C203 Fatigue Design Of Offshore Steel Structures. Recommended Practice Det Norske Veritas. 2008.
- 2 Shigley, J.E; Mishke, C.R. Projeto de Engenharia Mecânica, Bookman, 7ª edição, 2005. pg 319 a 328.
- 3 Sandvik Materials Technology. “Accumulated Strain During Coiling/Uncoiling of SAF 2507 Umbilical Steel Tubing.” Technical Report nº 20050609, 2003.
- 4 ASTM E 739 – 91. Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (e-N) Fatigue Data1.
- 5 CHAI, G. Fatigue behavior of duplex stainless steels in the very high cycle regime. 2006.