

# MÉTODOS DE PREVISÃO DA CURVA DEFORMAÇÃO-VIDA EM FADIGA PARA OS AÇOS INOXIDÁVEIS DÚPLEX UNS S31803 E UNS S32750 E AÇO INOXIDÁVEL MARTENSÍTICO UNS S42000 T/R 500°C<sup>1</sup>

Taylor Mac Intyer Fonseca Junior<sup>2</sup>

Rodrigo Magnabosco<sup>3</sup>

## Resumo

Este trabalho teve por objetivo analisar alguns métodos de estimativa das propriedades mecânicas cíclicas a partir das propriedades mecânicas monotônicas e comparar os valores estimados com os resultados experimentais obtidos em ensaios de fadiga de baixo ciclo, verificando a viabilidade do uso destes métodos nos aços inoxidáveis dúplex UNS S31803 e UNS S32750 e no aço inoxidável martensítico UNS S42000 temperado e revenido a 500°C por 1 h. Todos os métodos de estimativa utilizados neste trabalho não prevêm exatamente a vida em fadiga dos aços em estudo, apesar de apresentarem pequena dispersão ( $R^2$  mínimo de 0,96) se comparados aos resultados dos ensaios de fadiga. Para o aço inoxidável dúplex UNS S31803, o método das inclinações universais modificado apresenta estabilidade da variação da amplitude de deformação a favor da segurança em 20%. Para o aço inoxidável dúplex UNS S32750 e o aço inoxidável martensítico UNS S42000, o método dos quatro pontos apresenta estabilidade da variação da amplitude de deformação, também a favor da segurança, de 5% e 20% respectivamente. Mesmo encontrando estabilidade da variação da amplitude de deformação a favor da segurança de alguns métodos, verifica-se que não existe método que apresente coerência quando aplicado às três ligas estudadas.

**Palavras-chave:** Propriedades mecânicas; Fadiga de baixo ciclo; Métodos de previsão; Aço inoxidável dúplex; Aço inoxidável martensítico.

## FORECAST METHODS OF THE DEFORMATION-LIFE CURVES IN FATIGUE FOR THE DUPLEX STAINLESS STEELS UNS S31803 AND UNS S32750 AND MARTENSITIC STAINLESS STEEL UNS S42000

### Abstract

This work analyzed six methods of cyclic mechanical properties estimation from the monotonic mechanical properties, by comparison with the experimental results obtained in low cycle fatigue tests of duplex stainless steels UNS S31803 and UNS S32750 and martensitic UNS S42000 tempered 1 h at 500°C. None of the forecast methods gave accurate estimative of fatigue, besides of the small dispersion (minimum  $R^2$  of 0,96) if compared with the results of the fatigue tests. For the UNS S31803, the modified universal inclinations method presented stability of the variation of the amplitude of deformation in favor of the security in 20%. For UNS S32750 and UNS S42000, the four-point method presented stability of the variation of the amplitude of deformation, also in favor of the security, of 5% and 20% respectively. It is verified that none of the studied forecast methods can described the fatigue life for all stainless steels studied.

**Key words:** Mechanical properties; Low cycle fatigue; Forecast methods; Duplex stainless steel; Martensitic stainless steel.

<sup>1</sup> Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

<sup>2</sup> Prof. Ms. do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais do Centro Universitário da FEI [tmacintyer@fei.edu.br](mailto:tmacintyer@fei.edu.br).

<sup>3</sup> Prof. Dr. do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Universitário da FEI [rodrmag@fei.edu.br](mailto:rodrmag@fei.edu.br).

# 1 INTRODUÇÃO

As propriedades mecânicas refletem o comportamento de um material submetido à ação de esforços que podem ser expressos em função de tensões e/ou deformações. As propriedades mecânicas monotônicas são obtidas a partir do ensaio de tração, que consiste na aplicação de uma carga de tração uniaxial crescente em corpos-de-prova padronizados até a sua ruptura. É um ensaio amplamente utilizado na indústria, de fácil execução e reprodutibilidade de resultados. As principais propriedades mecânicas monotônicas são os limites de escoamento ( $\sigma_e$ ) e de resistência à tração ( $\sigma_t$ ), a redução de área (RA) e o módulo de elasticidade (E).

As propriedades mecânicas cíclicas ou de fadiga são obtidas por meio dos ensaios de fadiga, que consistem na aplicação de cargas cíclicas no material e que, por sua vez, diferentemente do ensaio de tração, podem apresentar uma maior dispersão dos resultados obtidos, fazendo-se necessário a utilização de técnicas estatísticas para a determinação das propriedades de fadiga. Contudo, as propriedades mecânicas cíclicas são determinadas a partir da equação (1) que define toda a extensão da vida em fadiga do material, dada por:

$$\frac{\Delta \varepsilon_T}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \varepsilon_f' (2N_f)^c \quad (1)$$

onde  $\frac{\Delta \varepsilon_T}{2}$  é a amplitude de deformação total aplicada ao material,  $\sigma_f'$  é o coeficiente de resistência à fadiga,  $b$  é o expoente de resistência à fadiga,  $\varepsilon_f'$  é o coeficiente de ductilidade à fadiga,  $c$  é o expoente de ductilidade à fadiga e  $N_f$  é o número de ciclos até a fratura.

A fadiga de baixo ciclo, ou fadiga controlada por deformações cíclicas, caracteriza-se pela aplicação de tensões acima do limite de escoamento do material, o que provoca um número reduzido de ciclos até a fratura. As propriedades cíclicas relacionadas a este tipo de fadiga podem ser obtidas experimentalmente pelo método dos múltiplos corpos-de-prova, utilizando-se a norma ASTM E 606 – 04.<sup>[1]</sup>

As propriedades de fadiga podem ser determinadas, por estimativa, a partir das propriedades monotônicas, utilizando-se vários modelos existentes na literatura especializada. Esses modelos são importantes para uma primeira aproximação das propriedades, ou quando os ensaios de fadiga não podem ser executados.<sup>[2]</sup> Os seis métodos de previsão da vida em fadiga, analisados e discutidos neste trabalho, foram escolhidos devido à facilidade de se obter as propriedades monotônicas requeridas através de ensaios de tração, e são apresentados a seguir.

Método de correlação dos quatro pontos (4P): este método foi introduzido por Manson<sup>[3]</sup> e recebe este nome porque são necessários dois pontos para a determinação da reta elástica e dois pontos para a reta plástica em função do número de ciclos até a fratura. A equação que descreve a curva deformação-vida para este método é definida por:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = A(2N_f)^b + B(2N_f)^c \quad (2)$$

onde:

$$b = \frac{\log \left[ \frac{2,5 \left[ 1 + \ln(1 - RA)^{-1} \right]}{0,9} \right]}{\log \left[ \left( 4 \times 10^5 \right)^{-1} \right]} \quad (3)$$

$$A = \frac{1}{2} \times 10^{b \log 2 + \log \left[ \frac{2,5 \sigma_t \left[ 1 + \ln(1 - RA)^{-1} \right]}{E} \right]} \quad (4)$$

$$\Delta \varepsilon_e^@ = 10^{b \log(4 \times 10^4) + \log \left[ \frac{2,5 \sigma_t \left[ 1 + \ln(1 - RA)^{-1} \right]}{E} \right]} \quad (5)$$

$$c = \frac{1}{3} \log \left[ \frac{0,0132 - \Delta \varepsilon_e^@}{1,91} \right] - \frac{1}{3} \log \left\{ \frac{1}{4} \left[ \ln(1 - RA)^{-1} \right]^{\frac{3}{4}} \right\} \quad (6)$$

$$B = \frac{1}{2} \times 10^{c \log \frac{1}{20} + \log \left[ \frac{1}{4} \left[ \ln(1 - RA)^{-1} \right]^{\frac{3}{4}} \right]} \quad (7)$$

Método das inclinações universais (IU): também proposto por Manson,<sup>[3]</sup> este método recebe o nome de inclinações universais por fixar, para todos os materiais, as inclinações das retas elástica e plástica dadas pelos expoentes de resistência à fadiga ( $b$ ) e de ductilidade à fadiga ( $c$ ) respectivamente, definindo assim a equação da amplitude de deformação total em função do número de cargas reversas como sendo:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = 1,9018 \frac{\sigma_t}{E} (2N_f)^{-0,12} + 0,7579 \left[ \ln \left( \frac{1}{1 - RA} \right) \right]^{0,6} (2N_f)^{-0,6} \quad (8)$$

Método de Mitchell ou Método proposto por Socie et al (Mit): mais adequado para aços com dureza abaixo de 500 BHN,<sup>[2]</sup> este método considera que o coeficiente de resistência à fadiga ( $\sigma_f$ ) é igual à tensão de fratura verdadeira ( $\bar{\sigma}_f$ ) e que o coeficiente de ductilidade à fadiga ( $\varepsilon_f$ ) é igual à deformação de fratura verdadeira ( $\tilde{\varepsilon}_f$ ). A equação da amplitude de deformação total em função do número de cargas reversas até a fratura para este método é dada por:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\bar{\sigma}_f}{E} (2N_f)^{-\frac{1}{6} \log \left( \frac{2\bar{\sigma}_f}{\sigma_t} \right) + \ln(\tilde{\varepsilon}_f)} \cdot (2N_f)^{-0,6} \quad (9)$$

Método proposto por Bäuml e Seeger (BS): a equação definida para aços sem elementos de liga ou de baixa liga neste método é dada por:<sup>[4]</sup>

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = 1,5 \frac{\sigma_t}{E} (2N_f)^{-0,087} + 0,59 \psi (2N_f)^{-0,58} \quad (10)$$

onde  $\psi = 1$  se  $\frac{\sigma_t}{E} \leq 0,003$  e,  $\psi = 1,375 - 125 \frac{\sigma_t}{E}$  se  $\frac{\sigma_t}{E} > 0,003$ . Nota-se que as inclinações dos trechos elástico e plástico são assumidas constantes.

Método de correlação dos quatro pontos modificado (4PM): para melhor adequar o método de correlação dos quatro pontos com os resultados experimentais que obteve com aços, Ong [5] propôs algumas alterações. A equação que define a curva amplitude de deformação total-vida para este método é definida como:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma_f}{E} (2N_f)^b + \tilde{\varepsilon}_f (2N_f)^c \quad (11)$$

onde:

$$b = \frac{1}{6} \left\{ \log \left[ 0,16 \left( \frac{\sigma_f}{E} \right)^{0,81} \right] - \log \left( \frac{\sigma_f}{E} \right) \right\} \quad (12)$$

$$c = \frac{1}{4} \left[ \log \left( \frac{0,00737 - 0,5 \Delta \varepsilon_e^\Phi}{2,074} \right) - \log(\tilde{\varepsilon}_f) \right] \quad (13)$$

$$\frac{\Delta \varepsilon_e^\Phi}{2} = \frac{\sigma_f}{E} \left[ 10^{\frac{2}{3} \left\{ \log \left[ 0,16 \left( \frac{\sigma_f}{E} \right)^{0,81} \right] - \log \left( \frac{\sigma_f}{E} \right) \right\}} \right] \quad (14)$$

Método das inclinações universais modificado (IUM): proposto por Muralidharan e Manson,<sup>[4]</sup> aperfeiçoa o Método das Inclinações Universais descrito na equação 8. A equação para a curva deformação-vida é dada por:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = 0,6227 \left( \frac{\sigma_t}{E} \right)^{0,832} (2N_f)^{-0,09} + 0,0196 \tilde{\varepsilon}_f^{-0,155} \left( \frac{\sigma_t}{E} \right)^{-0,53} (2N_f)^{-0,56} \quad (15)$$

Considerando estes fatos, este trabalho tem por objetivo analisar a aplicabilidade desses métodos de estimativa das propriedades mecânicas cíclicas a partir das propriedades mecânicas monotônicas nos aços inoxidáveis dúplex UNS S31803 e UNS S32750 e no aço inoxidável martensítico UNS S42000 temperado e revenido a 500°C por 1 h, comparando os valores estimados com os resultados experimentais obtidos em ensaios de fadiga de baixo ciclo através de análise estatística.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados neste trabalho apresentavam-se na forma de barras extrudadas com diâmetro de 19,05 mm. A Tabela 1 mostra as composições químicas em massa dos principais elementos de liga.

Ensaio de tração foram realizados segundo a norma ASTM E 8M – 04 [6] em equipamento MTS, servo-controlado e de 250 kN de capacidade máxima. Os ensaios de fadiga de baixo ciclo foram realizados no mesmo equipamento. O controle e a medida da deformação foram feitos através de um extensômetro com 25 mm de comprimento inicial. Todos os ensaios foram conduzidos com base na norma ASTM E 606 – 04,<sup>[1]</sup> tendo sido realizados à temperatura ambiente com controle da deformação total, R=-1 e realizados com uma frequência de 0,2 Hz, adotada com o propósito de que não houvesse variações consideráveis na temperatura dos corpos-de-prova durante os ensaios. Os dados foram obtidos e armazenados através do sistema *TestStar IIs*, acoplado ao computador que controla o equipamento.

**Tabela 1.** Composição química das ligas em estudo. Os valores mencionados indicam porcentagem em massa

Liga	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	N	C	Fe
UNS S31803	22,2	5,4	3,2	0,8	0,5	0,18	0,015	balanço
UNS S32750	25,0	6,9	3,8	0,4	0,3	0,26	0,015	
UNS S42000	12,3	<0,1	-	0,5	0,4	-	0,380	

### 3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os principais parâmetros de rigidez, resistência mecânica e ductilidade determinados nos ensaios de tração e os parâmetros obtidos experimentalmente a partir das curvas amplitude de deformação – vida são apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2.** Propriedades mecânicas monotônicas e cíclicas.

LIGA	UNS S31803	UNS S32750	UNS S42000
Módulo de elasticidade, $E$ [GPa]	179 ± 6	198 ± 1	209 ± 3
Limite de escoamento, $\sigma_e$ [MPa]	532 ± 10	613 ± 3	1406 ± 56
Limite de resistência, $\sigma_t$ [MPa]	767 ± 8	862 ± 3	1779 ± 33
Tensão real de fratura, $\sigma_f$ [MPa]	1943 ± 60	1633 ± 67	2048 ± 79
Alongamento total em 25 mm, $A_T^{25}$ [%]	58,5 ± 2,8	55,6 ± 1,5	13,33 ± 2,70
Redução de área, $RA$ [%]	84,1 ± 1,2	75,4 ± 1,1	21,4 ± 4,6
Deformação real de fratura, $\tilde{\epsilon}_f$ [mm/mm]	1,84 ± 0,01	1,40 ± 0,01	0,2419 ± 0,0585
Coef. de resistência à fadiga, $\sigma_f$ [MPa]	912	1162	2922
Expoente de resistência à fadiga, $b$	-0,057	-0,068	-0,094
Coef. de ductilidade à fadiga, $\epsilon_f$ [mm/mm]	0,254	0,531	0,551
Expoente de ductilidade à fadiga, $c$	-0,478	-0,567	-0,855

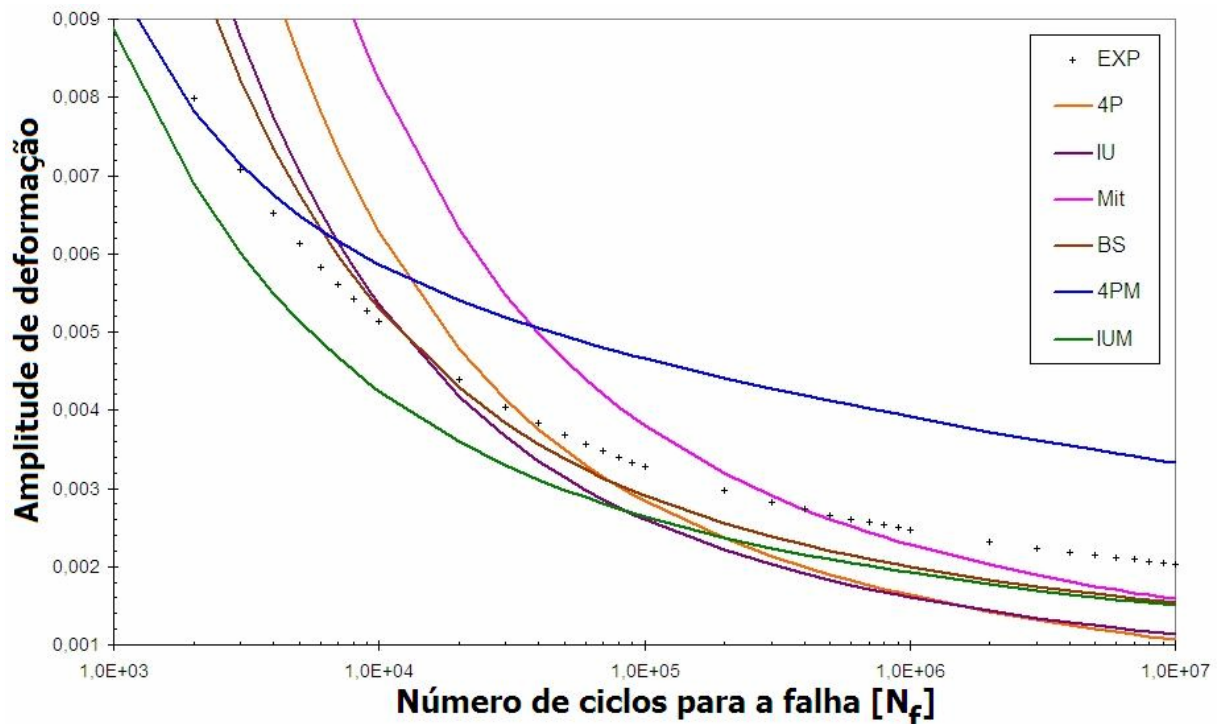
### 4 DISCUSSÃO

As Figuras 1, 2 e 3 mostram as curvas de amplitude de deformação total em função do número de ciclos até a falha, experimental e estimadas pelos seis métodos em estudo. As Figuras 4, 5 e 6 mostram a variação percentual da amplitude de deformação (VAD) obtida pelos seis métodos de previsão utilizados em relação à amplitude de deformação obtida experimentalmente em função do número de ciclos até a falha para as três ligas estudadas. A VAD foi definida como,

$$VAD = \frac{\Delta \epsilon_{EXP} - \Delta \epsilon_{CALC}}{\Delta \epsilon_{EXP}} \quad (16)$$

onde  $\Delta\epsilon_{EXP}$  e  $\Delta\epsilon_{CALC}$  são as amplitudes de deformação obtidas experimentalmente e calculadas pelos métodos de previsão utilizados, respectivamente.

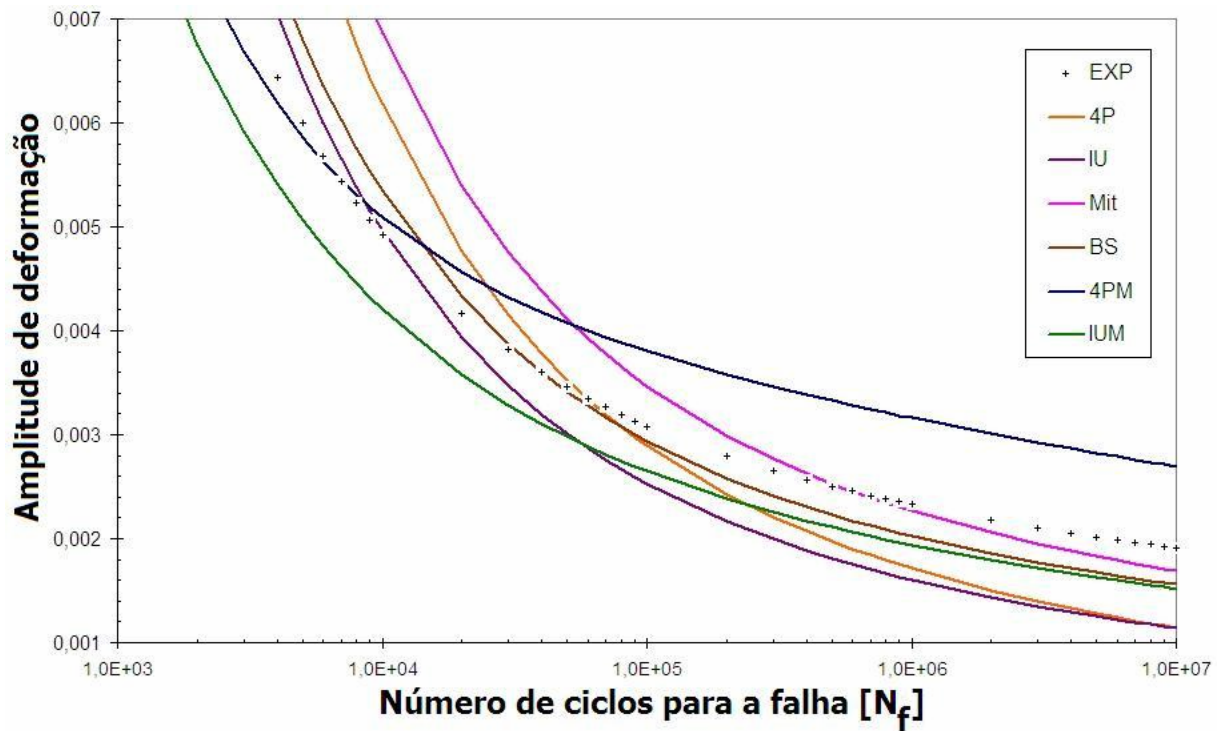
Nota-se que para aços inoxidáveis dúplex, Figuras 1 e 2, o método das inclinações universais modificado (IUM) sempre obtém resultados a favor da segurança. No entanto, para o aço UNS S31803, este método apresenta estabilidade dos resultados em torno de 20% (Figura 4) e para o aço UNS S32750 o método é instável, apresentando variação decrescente da amplitude de deformação e não a favor da segurança como indica a Figura 5. Comportamento oposto é apresentado pelo método dos quatro pontos (4P) que além de superestimar a vida em fadiga a partir de  $\sim 10^5$  ciclos para ambas as ligas (Figuras 1 e 2), tem variação instável da amplitude de deformação para o aço UNS S31803 (Figura 4) e estabilidade dos resultados em torno de 5% para o aço UNS S32750 (Figura 5).



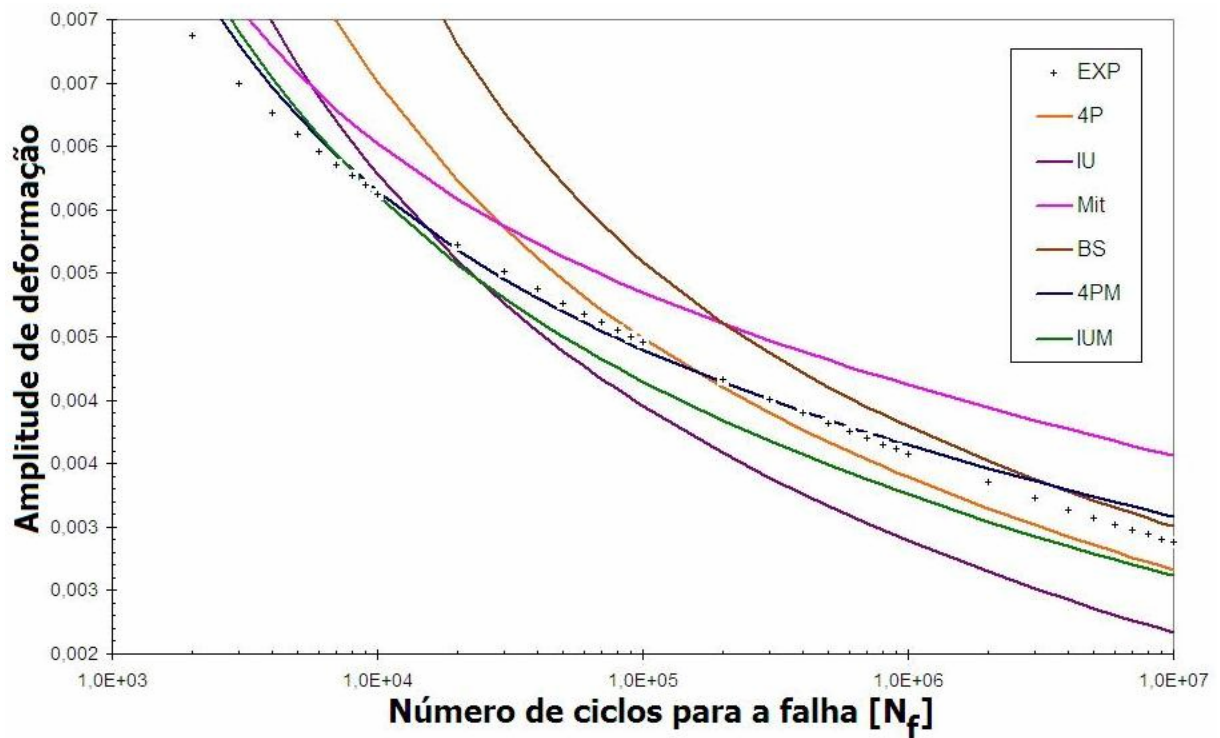
**Figura 1.** Curvas amplitude de deformação total – vida em fadiga estimadas e experimental para o aço inoxidável dúplex UNS S31803.

Para o aço inoxidável martensítico UNS S42000, Figura 3, o método de Mitchell (Mit) superestima a vida em fadiga enquanto que o método das inclinações universais modificado (IUM) sugere segurança a partir de  $\sim 10^4$  ciclos, no entanto, o método que apresenta estabilidade da variação da amplitude de deformação a favor da segurança é o método dos quatro pontos (4P) com resultados em torno de 20% (Figura 6).

Os coeficientes de correlação ( $R^2$ ) entre os valores experimentais e os estimados pelos seis métodos em estudo para as três ligas analisadas foram de 0,99, com exceção dos  $R^2$  obtidos para o aço UNS S31803 em relação ao método 4PM (0,97) e para o aço UNS S42000 em relação aos métodos 4P (0,98) e BS (0,96). Estes valores de  $R^2$  foram obtidos no intervalo de  $10^4$  a  $10^7$  ciclos.

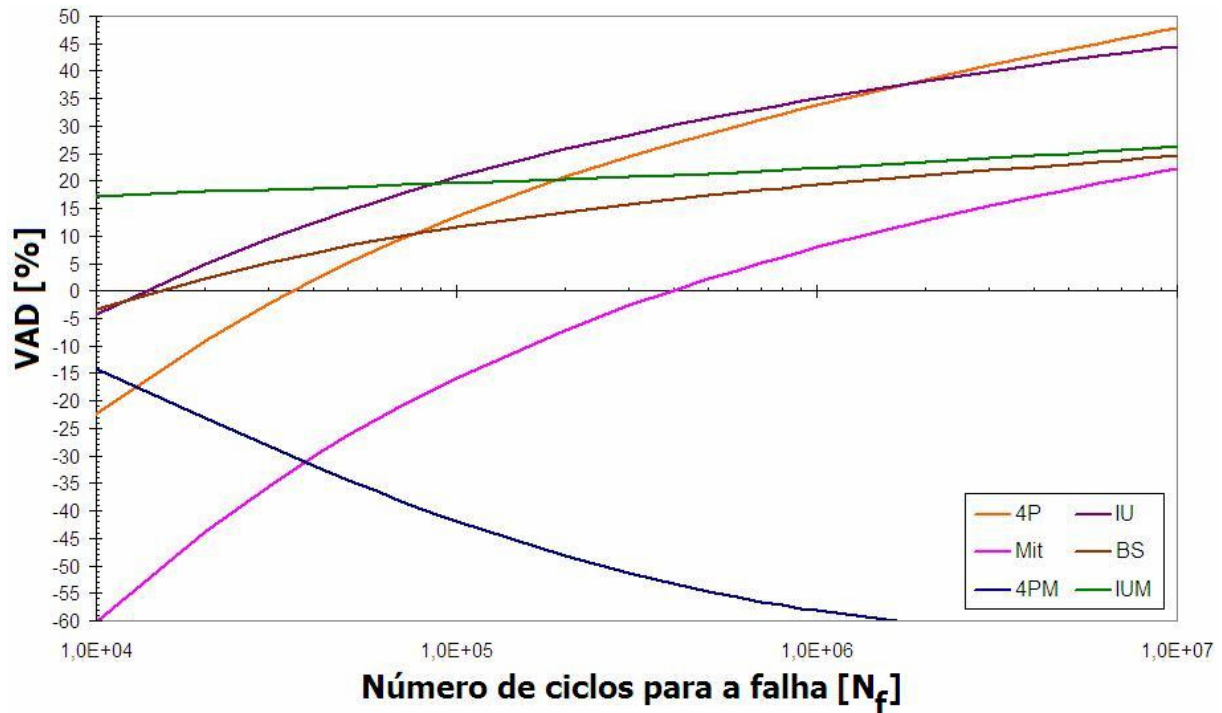


**Figura 2.** Curvas amplitude de deformação total – vida em fadiga estimadas e experimental para o aço inoxidável dúplex UNS S32750.

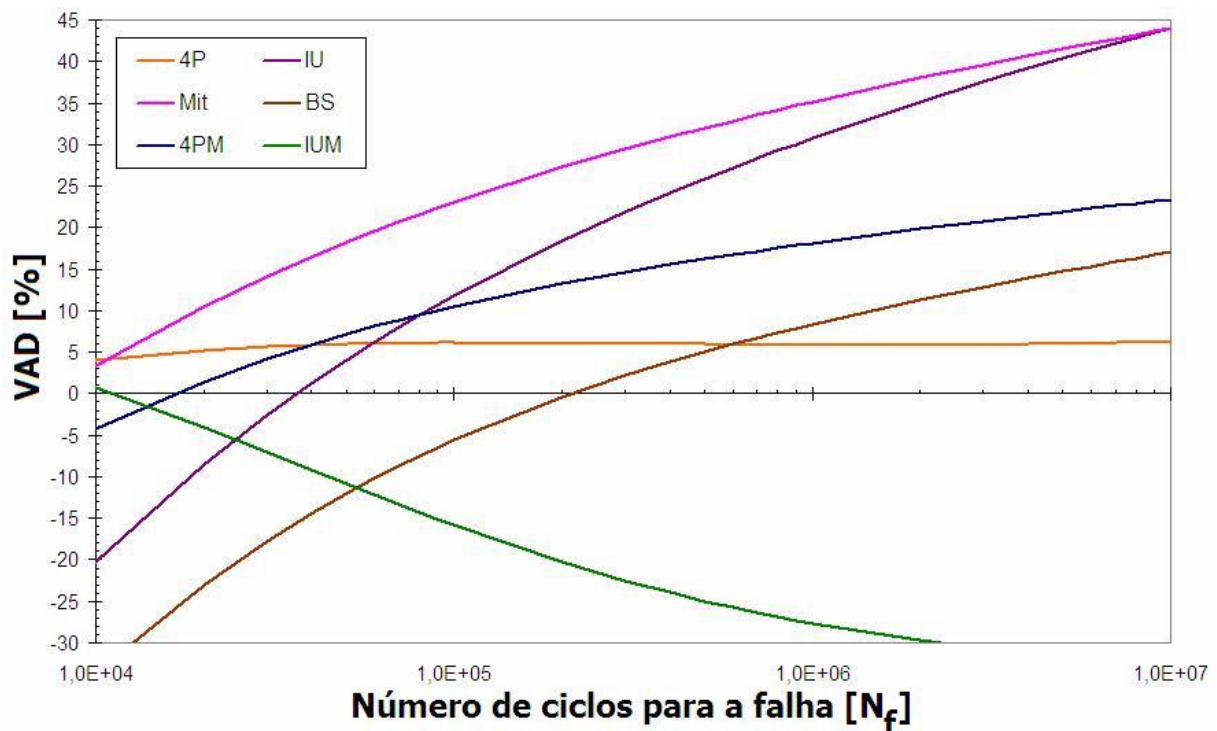


**Figura 3.** Curvas amplitude de deformação total – vida em fadiga estimadas e experimental para o aço inoxidável martensítico UNS S42000.



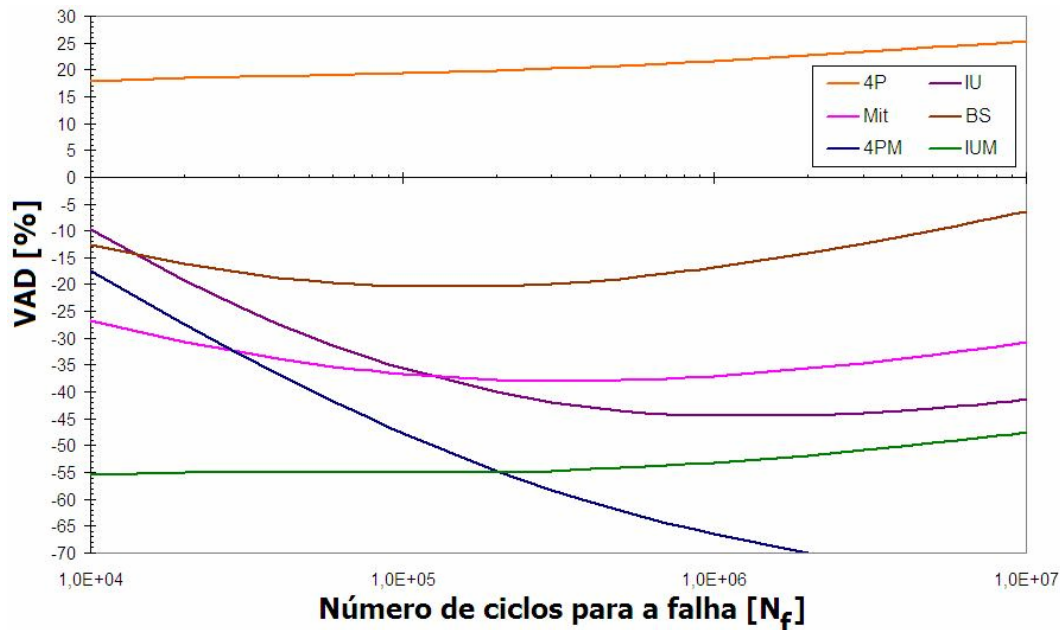


**Figura 4.** Variação percentual da amplitude de deformação (VAD) obtida pelos seis métodos de previsão utilizados em relação à amplitude de deformação obtida experimentalmente em função do número de ciclos até a falha para o aço inoxidável duplex UNS S31803.



**Figura 5.** Variação percentual da amplitude de deformação (VAD) obtida pelos seis métodos de previsão utilizados em relação à amplitude de deformação obtida experimentalmente em função do número de ciclos até a falha para o aço inoxidável duplex UNS S32750.





**Figura 6.** Variação percentual da amplitude de deformação (VAD) obtida pelos seis métodos de previsão utilizados em relação á amplitude de deformação obtida experimentalmente em função do número de ciclos até a falha para o aço inoxidável martensítico UNS S42000.

## 5 CONCLUSÕES

- Todos os métodos utilizados neste trabalho não prevêm exatamente a vida em fadiga dos aços em estudo apesar de apresentarem pequena dispersão ( $R^2$  mínimo de 0,96) se comparados aos resultados dos ensaios de fadiga.
- Para o aço inoxidável dúplex UNS S31803, o método das inclinações universais modificado apresenta estabilidade da variação da amplitude de deformação a favor da segurança em 20%. Para o aço inoxidável dúplex UNS S32750 e o aço inoxidável martensítico UNS S42000, o método dos quatro pontos apresenta estabilidade da variação da amplitude de deformação, também a favor da segurança, de 5% e 20% respectivamente;
- Mesmo encontrando estabilidade da variação da amplitude de deformação a favor da segurança de alguns métodos, verifica-se que não existe método que apresente coerência quando aplicado às três ligas estudadas.

## REFERÊNCIAS

- 1 American Society for Testing and Materials, E 606 – 04, Strain-Controlled Fatigue Testing, 2004.
- 2 Mac Intyer, T. “Métodos de previsão da curva deformação – vida em fadiga para as ligas de alumínio AA6261-T6 e AA6351-T6”, 2003. FEM, UNICAMP. Dissertação de Mestrado.
- 3 Ong, J.H. An improved technique for the prediction of axial fatigue life from tensile data. International journal of Fatigue, v15, n.3, p.213-219, may 1993.
- 4 Park, J.H., Song, J.H. Detailed evaluation of methods for estimation of fatigue properties. International Journal of Fatigue, v.17, n.5, p.365-372, 1995.
- 5 Ong, J.H. An evaluation of existing methods for the prediction of axial fatigue life from tensile data. International Journal of Fatigue, v15, n.1, p.13-19, 1993.
- 6 American Society for Testing and Materials, E 8M – 04, Tension Testing of Metallic Materials. 2004.