

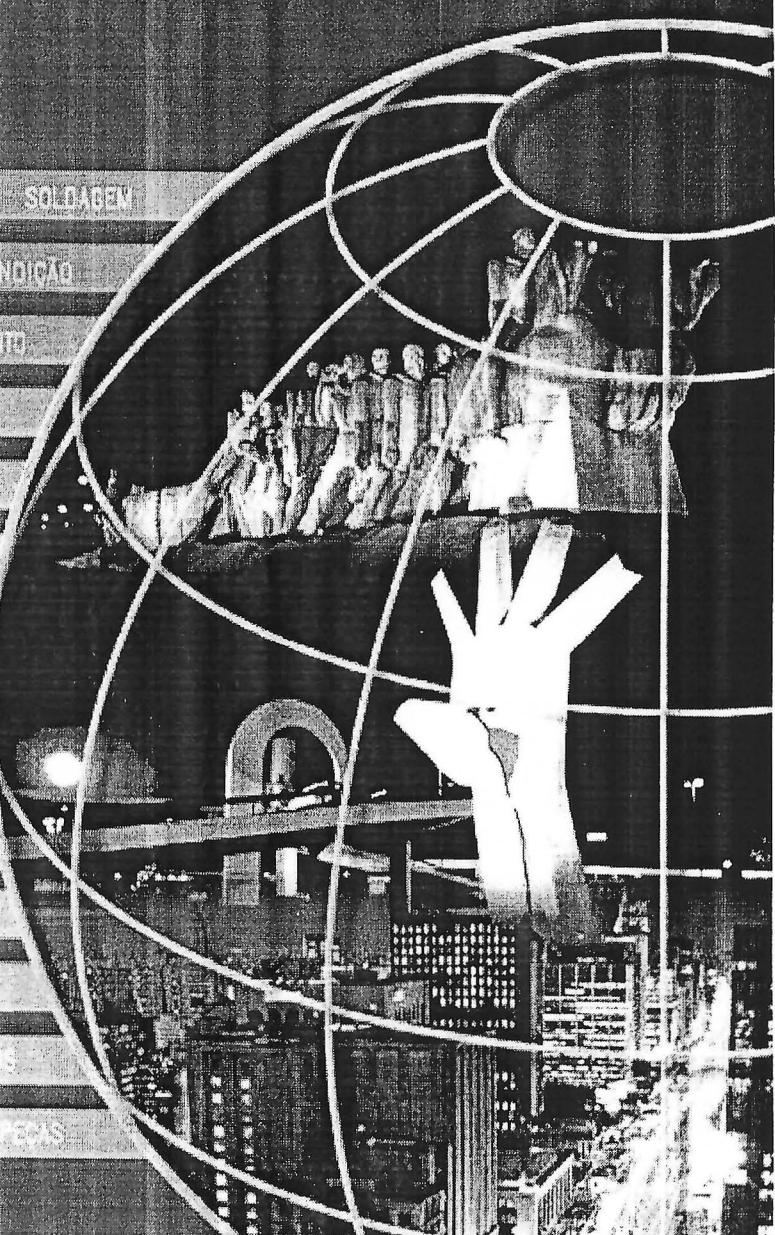


57º

CONGRESSO ANUAL DA ABM - INTERNACIONAL

FREI CANECA SHOPPING E CONVENTION CENTER - 22 a 25 de Julho de 2002 - São Paulo - SP - Brasil

SOLDAGEM
FUNDIÇÃO
FORJAMENTO
AÇO INOXIDÁVEL
METALURGIA DO FOGO
CONSTRUÇÃO CIVIL
METALURGIA FÍSICA
DIAGRAMA DE FASES
TECNOLOGIA MINERAL
EMBALAGEM METALÍGICA
MECANIZADA DA FRADE
MATERIAIS ELÉTRICOS E ELETRO-ÓTICOS
MEIO AMBIENTE / GESTÃO DE RESÍDUOS
INDÚSTRIA AUTOMOTIVA



Ficha Catalográfica / Cataloguing Card

Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais
(57.º: 2002: São Paulo, SP)

Anais do 57º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia
e Materiais. [CDROM]. / Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais --
São Paulo : Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2002.

Publicado até o ano de 1996 [51º] em forma impressa.
ISSN1516-392X

1. Metalurgia - Congressos 2. Materiais - Congressos I. Título

CDD 669.06

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NAS PROPRIEDADES MONOTÔNICAS E DE FADIGA DE BAIXO CICLO DE UM AÇO Cr-Mn-N¹

Ana Cláudia Costa²
Luiz Vicente Vareda³
Waldek Wladimir Bose Filho⁴
Dirceu Spinelli⁵

C 837i

RESUMO

Foi investigada a influência da temperatura nas propriedades monotônicas e de fadiga de baixo ciclo de um aço inoxidável austenítico do sistema Cr-Mn-N, utilizado na confecção de colares para perfurações de poços de petróleo. As propriedades monotônicas foram determinadas no intervalo entre a temperatura ambiente e 400°C, cujos resultados mostraram um decréscimo significativo dos valores dos parâmetros de resistência e do alongamento total com o aumento da temperatura. Os ensaios de fadiga foram realizados nas temperaturas ambiente e 300°C, esta última, correspondente à temperatura aproximada de trabalho dos colares. Foi observada uma diminuição significativa na vida em fadiga na temperatura de 300°C. Este comportamento foi explicado como sendo uma consequência da diminuição nos valores dos limites de resistência e de escoamento, e do alongamento total, com o aumento da temperatura. Também foi investigada a eficiência de alguns métodos analíticos, que utilizam somente as propriedades monotônicas, para estimativas das propriedades de fadiga de baixo ciclo nas temperaturas estudadas. Para a temperatura ambiente, os métodos correlação 4 pontos e inclinação universal forneceram uma boa estimativa das curvas deformação-vida, enquanto que, para a temperatura de 300°C, o método da inclinação universal modificado foi o mais eficiente em estimar estas curvas.

Palavras-chave: aço inoxidável austenítico, fadiga de baixo ciclo, propriedades monotônicas

¹ Contribuição técnica apresentada no 57º Congresso Anual da ABM – Internacional, São Paulo-SP – Julho de 2002

² Mestre em Engenharia de Materiais pelo programa Interunidade de Ciência e Engenharia de Materiais – USP-São Carlos (e-mail: Ana.Claudia@cgh.rsl.com.br)

³ Doutor em Eng. Metalúrgica – Depto. de Eng. de Estruturas da EESC-USP (e-mail: lvareda@sc.usp.br)

⁴ Prof. do Depto. de Eng. de Materiais, Aeronáutica e Automobilística da EESC-USP (e-mail: waldek@sc.usp.br)

⁵ Prof. do Depto. de Eng. de Materiais, Aeronáutica e Automobilística da EESC-USP (e-mail: dspinell@sc.usp.br)

INTRODUÇÃO

O material em estudo pertence ao grupo dos aços inoxidáveis austeníticos baseados no sistema Cr-Mn-N. Este tipo de aço é utilizado em aplicações especiais pela indústria de exploração de petróleo, como colares para perfurações de poços de petróleo, anéis de retenção, fios resistentes à corrosão, etc [1, 2]. Os principais mecanismos de aumento de resistência destes aços são o endurecimento por solução sólida, devido à presença dos elementos Cr, Mn e N, e o endurecimento por deformação, devido ao aumento da densidade de discordâncias geradas durante o processo de fabricação. Em serviço, os colares estão sujeitos a esforços tanto estáticos, como dinâmicos [3]. Com o aumento da profundidade de perfuração, a temperatura do colar aumenta, podendo atingir temperaturas ao redor de 300°C, agravando ainda mais as condições de carregamento mecânico [4]. Para estas condições, o material utilizado na confecção destes colares deve apresentar boas propriedades de tração, fadiga e tenacidade à fratura, tanto à temperatura ambiente, como nas temperaturas de trabalho.

O comportamento em fadiga é um fator importante no projeto de componentes e estruturas sujeitos a carregamento cíclico. Entretanto, devido à longa duração e complexidade dos ensaios, muita atenção é dada no sentido de se estimar as propriedades de fadiga a partir de propriedades monotônicas obtidas em ensaios de tração. Neste sentido, vários métodos, baseados em resultados experimentais para uma grande quantidade de metais, foram propostos, com o objetivo de estimar a curva deformação-vida, utilizando somente as propriedades monotônicas, tais como limite de resistência, redução de área e módulo de elasticidade [5, 6, 7]. Os primeiros métodos surgiram há aproximadamente 35 anos e ainda são bastante utilizados para se obter resultados preliminares das propriedades de fadiga [8].

Neste trabalho, foi investigada a influência da temperatura nas propriedades monotônicas e de fadiga de baixo ciclo de um aço do sistema Cr-Mn-N, utilizado na confecção de colares para perfurações de poços de petróleo. As propriedades monotônicas foram determinadas no intervalo entre a temperatura ambiente e 400°C. Os ensaios de fadiga foram realizados nas temperaturas ambiente e 300°C, esta última, correspondente à temperatura aproximada de trabalho dos colares. Também, foi analisada a eficiência de alguns métodos analíticos, que utilizam somente as propriedades monotônicas para estimar as propriedades de fadiga de baixo ciclo, tanto para a temperatura ambiente como para a temperatura de 300°C.

MATERIAL E MÉTODOS

O material investigado foi um aço inoxidável austenítico do sistema Cr-Mn-N, cuja composição química está apresentada na Tabela 1. O tratamento final do aço foi o de forjamento a morno na temperatura de 700°C, seguido de resfriamento em água. As barras foram então conformadas a frio com redução de 15% no diâmetro, perfuradas e usinadas mecanicamente para se obter as dimensões nominais de 9mm de comprimento, 170mm de diâmetro externo e 70 mm de diâmetro interno.

Os ensaios de tração foram realizados segundo as normas ASTM E8M-97 [9] e ASTM E21-92 [10] em uma máquina Instron de 100 kN de capacidade, em temperaturas variando entre a temperatura ambiente e 400°C, utilizando corpos de prova cilíndricos retirados na direção longitudinal do tubo. Os ensaios de fadiga de baixo ciclo foram realizados segundo a norma ASTM E606-92 [11], sob controle de

deformação total, nas temperaturas ambiente e 300°C, utilizando uma onda senoidal, com $R = -1$ e freqüência de 0,5 Hz, em uma máquina servo-hidráulica MTS de 250 kN de capacidade. Corpos de prova cilíndricos com diâmetro e comprimento útil de 6,35 mm e 15 mm, respectivamente, foram usinados a partir da parede do componente tubular, na direção longitudinal. A deformação do corpo de prova foi medida e controlada através de um software específico para este método, com a utilização de um extensômetro resistivo. O critério de início de formação da cúspide na porção compressiva da histerese tensão-deformação foi o adotado para a obtenção do número de reversos para falhar ($2N_f$).

Tabela 1 – Composição química do aço (% em peso).

C	N	Mn	Cr	Ni	Nb	Si	P	S	Mo
0,040	0,22	16,74	13,22	2,24	0,21	0,35	0,034	0,002	0,50

Para o aquecimento dos corpos de prova, nos ensaios de fadiga à 300°C, foi utilizado um forno de indução INDUCTOHEAT, monitorado por um controlador programável. O corpo de prova foi aquecido por uma bobina indutora até 300°C. O tempo médio para estabilização da temperatura antes do início do ensaio foi de 15 minutos. O monitoramento da temperatura foi realizado por um termopar Chromel-Alumel de 0,5 mm de diâmetro, fixado no corpo de prova. O esquema do ensaio de fadiga isotérmico na temperatura de 300°C pode ser visto na Figura 1.

Também, foi investigada a eficiência de alguns métodos analíticos, que utilizam os parâmetros de resistência e ductilidade obtidos em ensaios monotônicos, descritos por Ong [5, 6] e Park & Song [7], na estimativa das propriedades de fadiga de baixo ciclo para o aço em estudo, tanto à temperatura ambiente como à 300°C. As curvas deformação-vida obtidas por estes métodos foram comparadas com as obtidas experimentalmente.

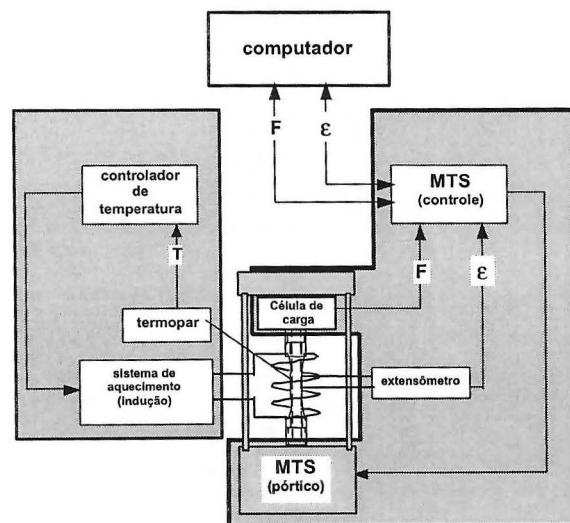


Figura 1 – Esquema do ensaio de fadiga isotérmico (300°C).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A influência da temperatura nas propriedades monotônicas do aço, na direção longitudinal, pode ser observada nas Figuras 2 e 3 e na Tabela 2. Nota-se claramente que os limites de resistência e de escoamento, e o alongamento total diminuiram significativamente com o aumento da temperatura. Entretanto, a redução de área teve um pequeno aumento a 100°C, em relação à temperatura ambiente, e para temperaturas maiores, seu valor teve uma pequena diminuição.

A grande diminuição nos valores dos limites de escoamento e de resistência com o aumento da temperatura é uma característica dos aços inoxidáveis austeníticos contendo nitrogênio [12]. A eficiência do endurecimento por solução sólida intersticial devido à presença de nitrogênio, responsável pela elevada resistência do aço na temperatura ambiente, diminui com o aumento da temperatura [13]. Uma vez que o aço é forjado a morno, a diminuição da resistência com a temperatura também pode ser associada com o processo de recuperação.

A diminuição do valor do alongamento com o aumento da temperatura é uma característica dos metais com estruturas cúbica de face centrada [14]. Como pode ser observado na figura 2, a diminuição no valor do limite de escoamento com o aumento da temperatura é menos acentuada do que a diminuição do limite de resistência. Como consequência disto, a taxa de encruamento diminui com o aumento da temperatura, fazendo com que o início da estrição ocorra para níveis de deformações menores, diminuindo, assim, o alongamento.

O comportamento mostrado na figura 3, para o valor de redução de área, indica que, para o aço em estudo, este parâmetro foi pouco influenciado pela variação de temperatura. A redução de área é uma medida mais adequada para se avaliar a deformação necessária para produzir a fratura, sendo uma consequência do processo de estrição do corpo de prova. Na temperatura ambiente a estrição dos corpos de prova foram difusas, o que resultou no maior valor do alongamento, enquanto que, com o aumento da temperatura esta se tornou mais concentrada, alterando pouco o valor da área final de fratura.

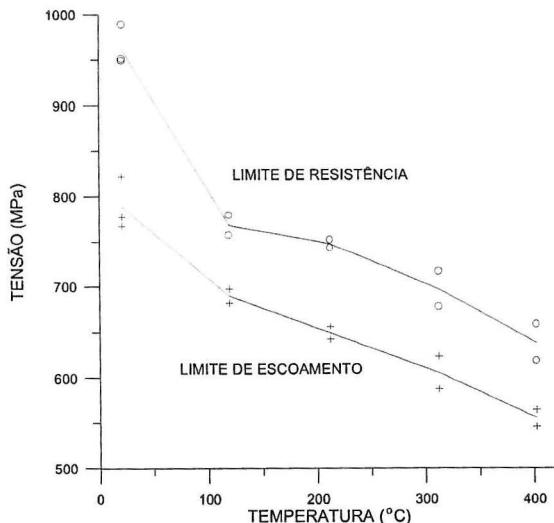


Figura 2 – Limites de escoamento e de resistência em função da temperatura.

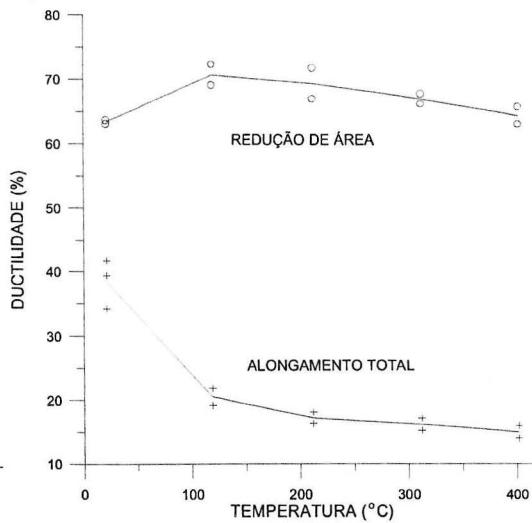


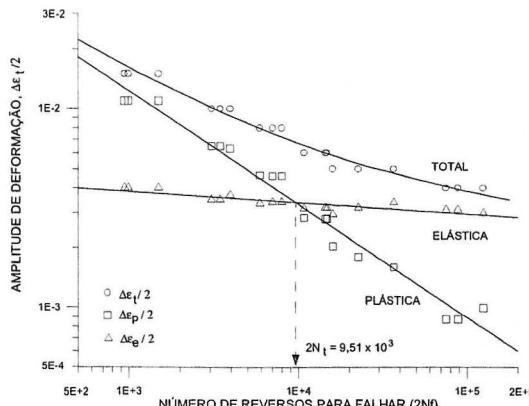
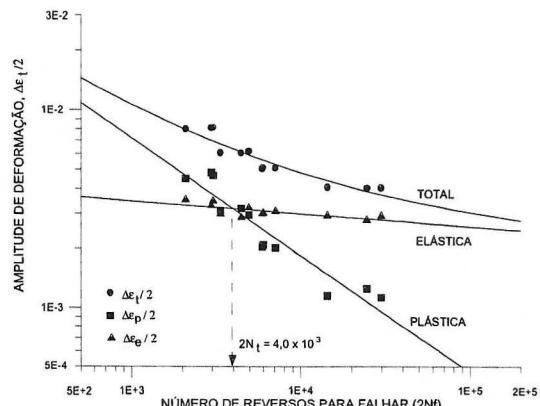
Figura 3 – Redução de área e alongamento em função da temperatura.

Tabela 2 – Propriedades monotônicas nas temperaturas ambiente e 300°C.

Temperatura (°C)	$\sigma_E (0,2\%)^1$ (MPa)	σ_R^2 (MPa)	σ_f^3 (MPa)	RA ⁴ (%)	Alongamento total ⁵ (%)	E ⁶ (MPa)
Ambiente	790	963	1956	63	38	190.564
300°C	606	698	1403	67	16	180.000

¹ Limite de escoamento⁴ Redução de área² Limite de resistência à tração⁵ Alongamento total medido em 25 mm³ Tensão verdadeira na fratura⁶ Módulo de elasticidade

As curvas deformação total-vida obtidas, para as temperaturas ambiente e 300°C, estão apresentadas nas Figuras 4 e 5, respectivamente. O número de reversos correspondente à transição da região de vida curta para a região de vida longa ($2N_t$) diminuiu de $9,5 \times 10^3$, à temperatura ambiente, para $4,0 \times 10^3$, à 300°C. As relações deformação total-vida determinadas para as duas temperaturas estão apresentadas na Tabela 3. A Figura 6 apresenta uma comparação entre as curvas deformação total - vida obtidas nas temperaturas ambiente e 300°C. Observa-se que à 300°C ocorre um decréscimo significativo na vida em fadiga do material.

**Figura 4 – Curvas deformação-vida obtidas experimentalmente à temperatura ambiente.****Figura 5 - Curvas deformação-vida obtidas experimentalmente à 300°C.****TABELA 3 - Relações deformação total-vida obtidas experimentalmente.**

Temperatura	Relação
Ambiente	$\frac{\Delta\epsilon_t}{2} = \frac{\Delta\epsilon_e}{2} + \frac{\Delta\epsilon_p}{2} = 0,0057(2N_f)^{-0,056} + 0,632(2N_f)^{-0,570}$
300°C	$\frac{\Delta\epsilon_t}{2} = \frac{\Delta\epsilon_e}{2} + \frac{\Delta\epsilon_p}{2} = 0,0054(2N_f)^{-0,064} + 0,438(2N_f)^{-0,595}$

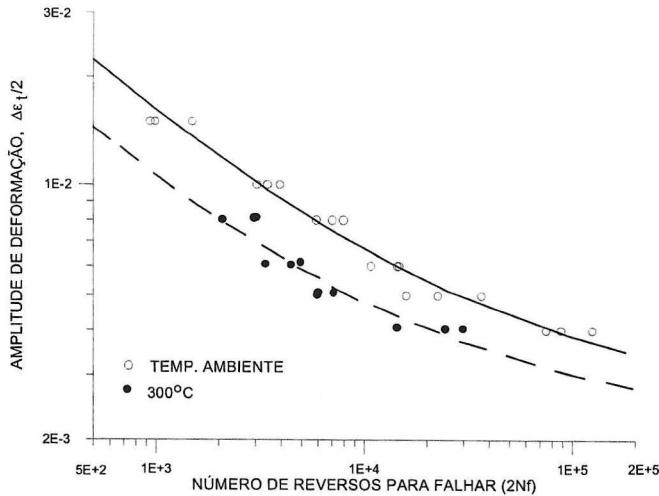


Figura 6 – Curvas defomação-vida obtidas nas temperaturas ambiente e 300°C.

O comportamento em fadiga na região de vida curta é controlado pela ductilidade do material, representada pelos parâmetros de redução de área e alongamento. O decréscimo na vida com o aumento da temperatura indica que, para o aço em estudo, o alongamento é o parâmetro que controla melhor este comportamento, nesta região. Como pode ser observado na Tabela 2, enquanto o valor do alongamento sofre um decréscimo significativo à 300°C, o valor da redução de área varia pouco. Na região de vida longa, o decréscimo na vida em fadiga com o aumento da temperatura pode ser atribuído à diminuição dos valores dos limites de resistência e de escoamento, uma vez que, nesta região, este comportamento é controlado pelos parâmetros de resistência do material.

A Figura 7 mostra uma comparação entre as curvas obtidas experimentalmente e as estimadas, nas temperaturas ambiente e 300°C, utilizando-se os métodos descritos por Ong [5, 6] e Park & Song [7], e as propriedades monotônicas dadas na Tabela 2. Na Figura 8 estão apresentados os valores da vida estimada utilizando os vários métodos, juntamente com os valores da vida obtidos experimentalmente para a duas temperaturas em estudo. Nestas figuras, as linhas descontínuas correspondem a uma relação perfeita ($2N_{exp} = 2N_{est}$) e a região compreendida entre as duas linhas cheias corresponde a uma banda de espalhamento com um fator de 1,5 ($(2N_{exp} = 1,5 \times 2N_{est})$ e $(2N_{exp} = 2N_{est} / 1,5)$).

À temperatura ambiente, os métodos de correlação 4 pontos e inclinação universal forneceram resultados aproximadamente iguais e mais próximos dos experimentais do que os demais métodos. As curvas defomação-vida obtidas por estes métodos são próximas das obtidas experimentalmente, Figura 7(a), e a maioria dos pontos estimados caem dentro da banda de espalhamento, Figuras 8(a) e 8(b). Entretanto, à 300°C, o método da inclinação universal modificado mostrou-se mais apropriado na estimativa da vida em fadiga, seguido dos métodos de Bäumel e Seeger, e correlação 4 pontos modificado [5, 6, 7]. Deve ser notado que a maioria dos métodos levam em consideração os valores da redução de área na estimativa da curva defomação plástica-vida. Entretanto, como visto anteriormente, este parâmetro não é o melhor para caracterizar o comportamento em fadiga nesta região, mas sim o alongamento.

O estudo do comportamento e a previsão da vida em fadiga são muito mais complicados de serem determinados em altas temperaturas do que na temperatura

ambiente. Em altas temperaturas existe uma interação complexa entre os processos que são dependentes do tempo e ativados termicamente, como relaxação/fluência e modificações microestruturais, em ação conjunta com os mecanismos da fadiga. Fatores como freqüência, forma da onda, relaxação/fluência, que exercem pouca influência na vida em fadiga à temperatura ambiente, podem vir a ocorrer em altas temperaturas. Entretanto, para a freqüência utilizada neste trabalho, os ensaios de fadiga tiveram uma duração relativamente curta. Também, a temperatura envolvida, 300°C, não é muito alta para este tipo de liga e, portanto, pode ser considerado que, para estas condições, os fenômenos ativados termicamente exerçam uma influência muito pequena na vida em fadiga, de modo que possa ser razoavelmente estimada, utilizando-se os parâmetros de resistência e de ductilidade obtidos nos ensaios de tração.

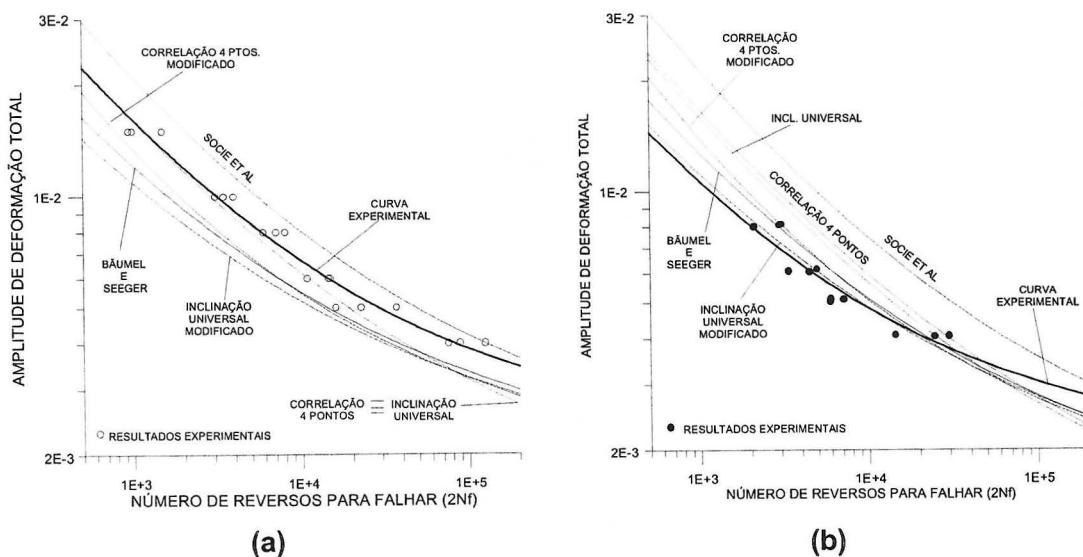


Figura 7 – Curvas deformação total-vida obtidas experimentalmente e utilizando os métodos estimativos: (a) temperatura ambiente; (b) 300°C.

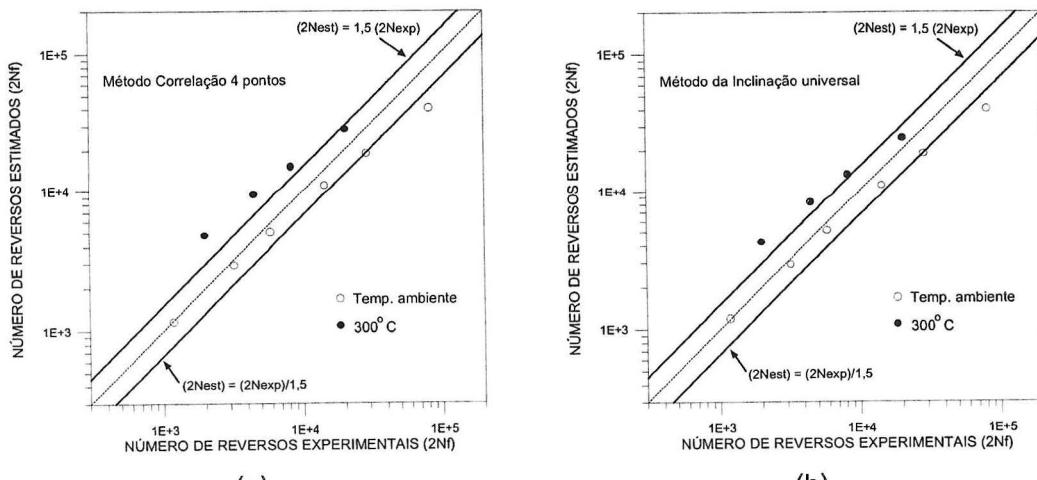


Figura 8 – Vida estimada em função da vida experimental para as temperaturas ambiente e 300°C (continua).

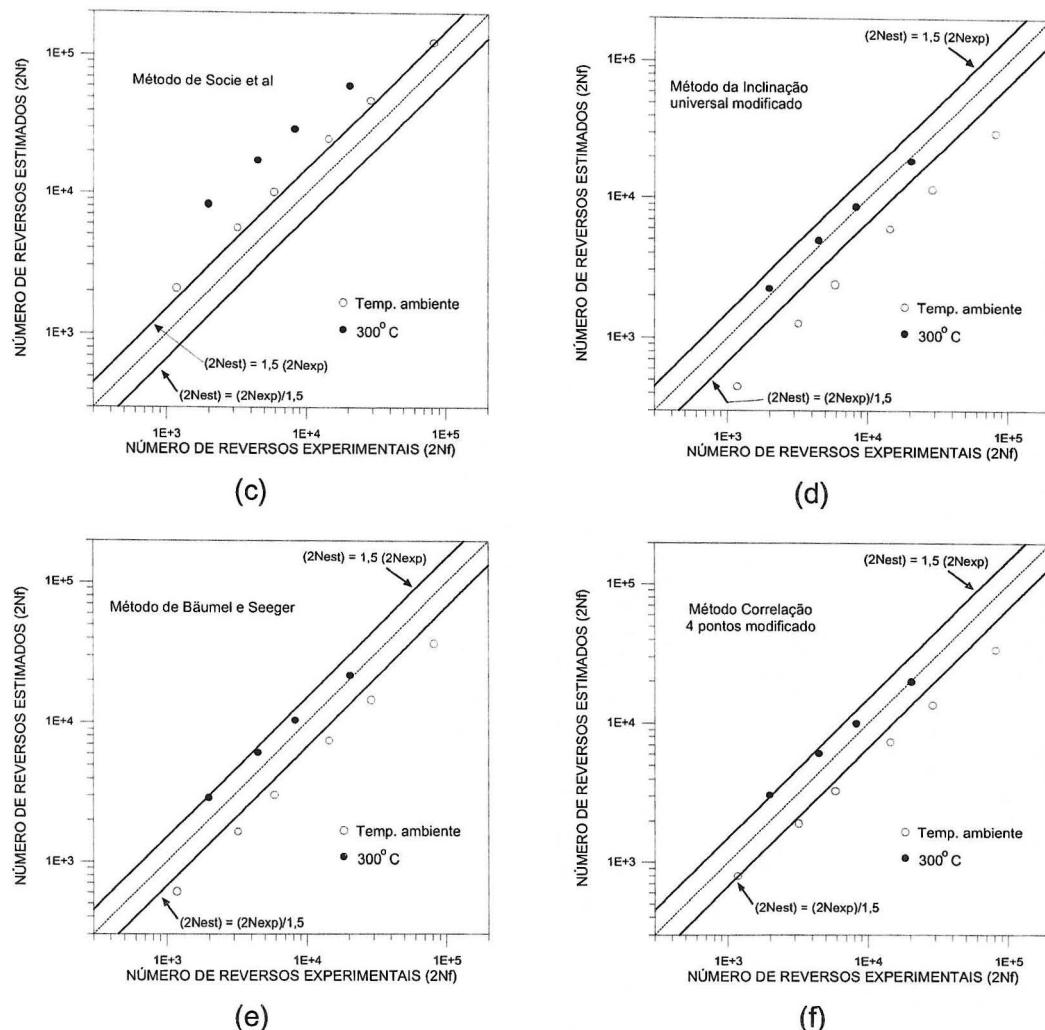


Figura 8 – Vida estimada em função da vida experimental para as temperaturas ambiente e 300°C (continuação).

CONCLUSÕES

- 1- Os valores dos limites de escoamento e de resistência, e do alongamento total do aço em estudo sofreram um decréscimo significativo com o aumento da temperatura, enquanto que o valor da redução de área variou pouco.
- 2- Para a temperatura de 300°C ocorreu um decréscimo significativo na vida em fadiga. Este comportamento é uma consequência do decréscimo dos parâmetros de resistência e de ductilidade do aço, na temperatura de ensaio.
- 3- Na temperatura ambiente, os métodos correlação 4 pontos e inclinação universal forneceram resultados de vida em fadiga aproximadamente iguais e mais próximos dos experimentais do que os demais métodos.

- 4- Para a temperatura de 300°C, o método da inclinação universal modificado foi o melhor em estimar a vida em fadiga, seguido dos métodos de Bäumel e Seeger e correlação 4 pontos modificado.
- 5- A capacidade de alguns métodos estimativos, baseados nas propriedades monotônicas, em fornecer uma boa estimativa da curva de formaçao-vida à 300°C, indica que os fenômenos ativados termicamente devem exercer uma influência muito pequena na vida em fadiga do material, nesta temperatura.

REFERÊNCIAS

- [1] PANZEMBÖCK, M et al. Fatigue behaviour of austenitic Cr-Mn-N steels. *Fatigue & Fracture Engineering Materials and Structures*, v.13, n.6, p.563-78, 1990.
- [2] MACDONALD, K.A., AIGNER, H. Some case studies of failed austenitic drillcollars. *Engineering Failure Analysis*, v.3, n.4, p.281-97, 1996.
- [3] GNYP, I.P. et al. Optimizing the service life of drill-collar joints on the basis of fracture mechanics criteria. *Soviet Materials Science*, v.26, n.6, p.706-10, 1990.
- [4] NAKAZAWA, T. et al. Development of nonmagnetic drill collar steel with high stress corrosion cracking resistance. *Nippon Steel Technical Report N. 39*, v.40, p.1-7, 1989.
- [5] ONG, J.H. An evaluation of existing methods for the prediction of axial fatigue life from tensile data. *International Journal of Fatigue*, v.15, n.1, p.13-9, 1993.
- [6] ONG, J.H. An improved technique for the prediction of axial fatigue life from tensile data. *International Journal of Fatigue*, v.15, n.3, p.213-19, 1993.
- [7] PARK, J.H.; SONG, J.H. Detailed evaluation of methods for estimation of fatigue properties. *International Journal of Fatigue*, v.17, n.5, p.365-73, 1995.
- [8] BRENNAN, F.P. The use of approximate strain-life fatigue crack initiation predictions. *International Journal of Fatigue*, v.16, n.5, p.351-6, 1994.
- [9] ASTM E8M-97, Standard test methods of tension testing of metallic materials. *Annual book of ASTM standards [CD-ROM]*. West Conshohocken, 1998.
- [10] ASTM E21-92, Standard test methods for elevated temperature tension tests of metallic materials. *Annual book of ASTM standards [CD-ROM]*. West Conshohocken, 1997.
- [11] ASTM E606-92, Standard practice for strain-controlled fatigue testing. *Annual Book of ASTM Standards [CD-ROM]*. Philadelphia, 1997.
- [12] SIMMONS, J.W. Overview: high-nitrogen alloying of stainless steels. *Material Science and Engineering*, v.A207, p.159-69, 1996.
- [13] GRUJICIC, M. et al. Basic deformation mechanisms in nitrogen strengthened stable austenitic stainless steels. In: Conference on High Nitrogen Steels "HNS88", London, France, 1989. *Proceedings*. p.151-8.
- [14] Reed-Hill, R.E. *Physical metallurgy principles*, 3.ed., Boston: PWS Publishing, 1994, p.840-2.

TEMPERATURE INFLUENCE ON THE MONOTONIC AND LOW-CYCLE FATIGUE PROPERTIES OF A Cr-Mn-N AUSTENITIC STAINLESS STEEL¹

Ana Cláudia Costa ²
Luiz Vicente Vareda ³
Waldek Wladimir Bosse Filho ⁴
Dirceu Spinelli ⁵

ABSTRACT

The temperature influence on the monotonic and low-cycle fatigue properties of a Cr-Mn-N austenitic stainless steel, employed in the manufacture of drillcollar connections was investigated. The temperature dependence of tensile properties was determined and it was found that the yield strength, ultimate strength and total elongation values decreased significantly in the range between room temperature and 400°C. The low cycle fatigue testing were carried out at room temperature and 300°C. The results showed great influence of temperature at 300°C in the short and long fatigue lives range. This behaviour was consequence of the reduction with temperature of the monotonic parameters. The efficiency of some analytical methods using only monotonic parameters for low cycle fatigue curves estimation, at room temperature and 300°C was investigated. It was concluded that at room temperature the best fit was obtained by the four points correlation and the universal inclination methodologies and at 300°C the modified universal inclination method was the most efficient one.

Key words: austenitic stainless steel, low cycle fatigue, monotonic properties

¹ Technical contribution in the 57th Annual International Congress of ABM. São Paulo July 2002.

² M.Sc. in Materials Engineering – University of São Paulo – São Carlos (e-mail: Ana.Claudia@cgh.rsl.com.br)

³ D.Sc.in Metallurgical Engineering – Department of Structural Engineering, University of São Paulo – São Carlos (e-mail: lvvareda@sc.usp.br)

⁴ Associate Professor of the Department of Materials, Aeronautic and Automotive Engineering, University of São Paulo – São Carlos (e-mail: waldek@sc.usp.br)

⁵ Full Professor of the Department of Materials, Aeronautic and Automotive Engineering, University of São Paulo – São Carlos (e-mail: dspinell@sc.usp.br)