

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E MICROESTRUTURAL DE UM AÇO INOXIDÁVEL AISI 304 COM ADIÇÃO DE CÁLCIO ¹

Carlos Eduardo Cancellier da Fonseca²

Carlos Antonio Reis Pereira Baptista²

Sérgio Schneider²

Davi Neves³

Antonio Jorge Abdalla³

Resumo

O presente trabalho compara as propriedades mecânicas em tração e fadiga do aço inoxidável austenítico AISI 304 e do mesmo aço com pequena adição de cálcio (0,03% em peso). Observou-se que este último possui maiores valores de limite de escoamento e resistência à tração que o aço convencional. A equação de Ramberg-Osgood modificada modelou adequadamente o comportamento não linear na região elástica de ambos os aços, evidenciando que a adição de cálcio propicia maior rigidez elástica medida pelo módulo tangente. Além disso, resulta em significativa melhora na vida em fadiga. Os resultados sugerem que, ao controlar a forma e tamanho das inclusões, a adição de cálcio promove uma redução dos concentradores locais de tensão, contribuindo para o aumento do tempo de nucleação da trinca.

Palavras-chave: Aço inoxidável; Microestrutura; Propriedades mecânicas; Fadiga.

MECHANICAL BEHAVIOR OF AISI 304 AUSTENITIC STAINLESS STEEL MODIFIED WITH CALCIUM

Abstract

The aim of the present work is investigate the effect of the addition of small amounts of calcium (0.03 wt. pct.) on the mechanical behavior of AISI 304 austenitic stainless steel. It was observed that the calcium-modified steel shows higher yield stress and tensile strength than the conventional AISI 304 steel. Moreover, it presents higher stiffness aspect, as determined by the tangent modulus. The non linear stress-strain behavior of both steels in the conventional elastic region was modeled by the modified Ramberg-Osgood equation. The calcium addition also resulted in a significant improvement of the fatigue resistance of the steel. The results suggest that, by controlling the shape and size of inclusions, the calcium addition lead to a higher strength and fatigue life of this new material.

Key-words: Stainless steel; Microstructure; Mechanical properties; Fatigue.

¹ *Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Escola de Engenharia de Lorena - EEL/USP, Lorena-SP.*

³ *Instituto de Estudos Avançados – IEAv/ CTA, São José dos Campos-SP.*

1 INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis, por associarem propriedades mecânicas adequadas, elevada resistência à corrosão e excelente aspecto visual, apresentam uma vasta gama de aplicações, desde a fabricação de peças críticas para reatores e tubulações em indústrias químicas, aplicações em indústrias alimentícias, até aplicações como biomateriais, além do emprego em artigos decorativos.^[1,2]

Os aços inoxidáveis austeníticos ocupam posição de destaque em relação às outras classes de aços inoxidáveis, visto que possuem boa ductilidade e tenacidade e podem ser endurecidos significativamente por deformação a frio, dependendo do teor de liga. Em geral, possuem elevados teores de níquel ou de manganês, o que confere melhores propriedades de resistência à corrosão e oxidação, mas compromete a usinabilidade. A adição de enxofre tem sido o método mais utilizado na busca pela melhoria da usinabilidade desses aços. A formação de sulfetos (principalmente o MnS), com baixo ponto de fusão e alta deformabilidade, proporciona bons resultados sobre a usinabilidade. Porém, acarreta simultaneamente algumas desvantagens como a queda da resistência à corrosão, da resistência mecânica e da soldabilidade.^[3]

Uma alternativa à ressulfuração é a aplicação do tratamento ao cálcio, que proporciona a redução e o controle da morfologia e distribuição das inclusões não-metálicas existentes no metal.^[4-6] Verificou-se que a durabilidade da ferramenta de corte no processo de usinagem do aço AISI 304 tratado com cálcio (teor de 0,03% em peso) é cerca de seis vezes maior que o aço inoxidável austenítico AISI 304 convencional.^[4] O cálcio pode ser adicionado ao aço fundido pela técnica de fio recheado o qual contém em seu interior Ca-Si ou Ca-Fe(Ni). Durante o tratamento com cálcio, as inclusões de alumina e a sílica são convertidas para aluminatos de cálcio e silicatos fundidos, os quais têm a forma globular por causa do efeito de tensão superficial. Os aluminatos de cálcio retidos no aço líquido impedem a formação das inclusões alongadas de MnS durante a solidificação do aço. Outra técnica de adição de cálcio é a injeção profunda, na qual o cálcio também na forma de CaSi ou CaC e em pó é injetado no banho dentro da panela por meio de uma lança refratária usando argônio como gás portador. O cálcio vaporiza formando bolhas que se combinam com o enxofre e oxigênio presentes no aço fundido. Neste caso, os produtos das reações são carregados e formam a escória. O magnésio é também muito efetivo como agente dessulfurante; entretanto, o cálcio é geralmente preferido porque é mais barato e mais controlável.^[5-7]

É importante verificar se essa melhoria na usinabilidade não é acompanhada por um comprometimento das propriedades mecânicas. O presente trabalho teve como objetivo realizar um estudo comparativo do comportamento mecânico em tração e fadiga de um aço AISI 304 convencional e outro tratado com adição de cálcio por injeção profunda, o qual foi designado por 304 UF. As propriedades em tração obtidas foram as seguintes: limite de escoamento convencional, limite de resistência à tração e alongamento percentual. Além disso, a curva tensão-deformação na região elástica convencional foi avaliada por meio da equação de Ramberg-Osgood modificada, que permite uma boa descrição do comportamento não linear comumente apresentado pelos aços inoxidáveis.^[8-10] Essa mesma metodologia já foi empregada com sucesso em um trabalho anterior envolvendo ligas à base de titânio para aplicação como biomateriais.^[11] O comportamento em fadiga foi avaliado por meio de curvas tensão-vida (S/N) na região entre 10^4 e 10^6 ciclos. Os resultados foram associados à caracterização microestrutural por

microscopia óptica (MO) e análise de superfícies de fratura por fadiga via microscopia eletrônica de varredura (MEV).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados neste trabalho foram produzidos pela Villares Metais S.A., e têm composição química apresentada na Tabela 1. As letras “UF” significam “usinagem fácil” (aço modificado com cálcio). O aço 304 UF apresenta, maiores teores de C, Si e Ca que o aço 304 convencional, ressaltando-se que ambos atendem aos requisitos da especificação AISI para aço inoxidável 304.

Tabela 1. Composição química dos aços inoxidáveis austeníticos (% peso).

Aço	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	P	S	N	Ca
304	0,027	0,29	1,80	18,30	8,75	0,46	0,007	0,42	0,034	0,003	0,049	0,0011
304UF	0,058	0,38	1,90	18,30	8,57	0,42	0,005	0,46	0,031	0,026	0,037	0,0036

Fonte: Aços Villares.

Os corpos-de-prova para ensaio de tração (três peças para cada aço estudado) foram confeccionados segundo a norma ASTM E 8M. Os ensaios foram realizados em uma máquina servohidráulica MTS, modelo 810.23M, à temperatura ambiente, com controle de deslocamento e taxa de 1,0 mm/min.

Foram determinados o limite de escoamento convencional, o limite de resistência à tração e alongamento percentual dos materiais. Além disso, tendo em vista que os aços inoxidáveis apresentam baixos limites de proporcionalidade, o comportamento em tração na região elástica convencional foi descrito pelo modelo modificado de Ramberg-Osgood,^[10,11] dado pela equação (1), onde ε é a deformação total, E_0 é o módulo elástico inicial obtido na região de proporcionalidade, $\sigma_{0,2}$ é o limite de escoamento convencional e n é o parâmetro de Ramberg-Osgood, que define o grau de não linearidade no regime elástico, ou seja, quanto mais alto o valor de n menor é o grau de não linearidade. Assim, o primeiro termo da equação (1) representa o comportamento linear e o segundo, o comportamento não linear.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} + 0,002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0,2}} \right)^n \quad (1)$$

O parâmetro n foi calculado empregando-se a equação (2), que por sua vez é obtida a partir dos valores de tensão correspondentes às deformações de 0,01% e 0,2%. Teoricamente, este parâmetro pode variar entre 1 (material elástico ideal) e ∞ (comportamento elasto-plástico).

$$n = \frac{\ln(20)}{\ln(\sigma_{0,2}/\sigma_{0,01})} \quad (2)$$

Considerando que, para os aços inoxidáveis, a componente não linear da deformação é significativa na região elástica, foram calculados também os valores do módulo tangente, E_t , dado pela equação (3). O módulo tangente é definido como a inclinação da curva tensão-deformação em cada valor da tensão [8].

$$E_t = \frac{E_0 \sigma_{0,2}}{\sigma_{0,2} + 0,002 n E_0 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0,2}} \right)^{n-1}} \quad (3)$$

Os corpos-de-prova para ensaios de fadiga axial foram confeccionados segundo a norma ASTM E 466. Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente na mesma máquina utilizada para os ensaios de tração. Os ensaios foram realizados com razão de carga $R = 0,1$ e freqüência de 25 Hz. Os níveis de tensão máximos adotados nos ensaios foram determinados em função dos resultados dos testes de tração, bem como de forma a ajustar a curva de fadiga na faixa de vidas variando entre 10^4 e 10^6 ciclos de carregamento. Foram adotados quatro níveis de tensão máxima, com no mínimo três ensaios válidos em cada nível. Antes da realização dos testes, os corpos-de-prova foram lixados até a lixa # 2400 e em seguida tiveram sua seção útil polida com o uso de suspensão de sílica coloidal (OPS). Com os resultados dos ensaios, foram levantadas as curvas relacionando a tensão máxima do ciclo de carregamento e o número de ciclos até a ruptura (S/N), a partir das quais o desempenho em fadiga dos materiais pôde ser comparado.

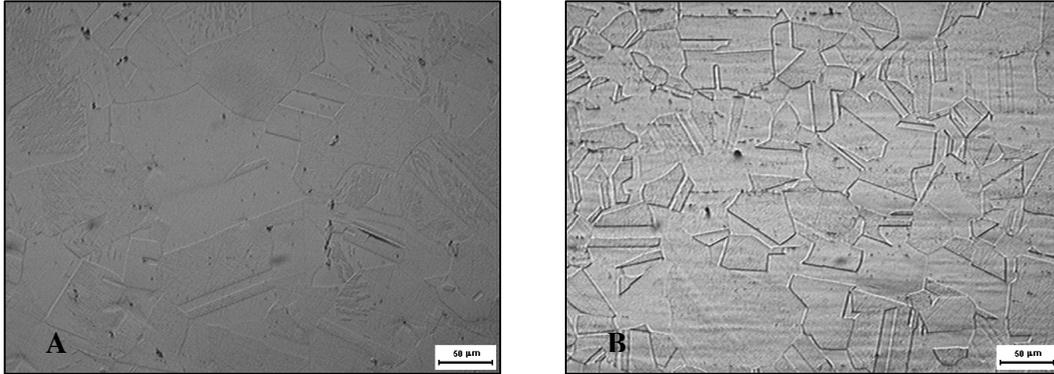
Foram realizadas análises microestruturais por meio de microscopia óptica (MO) para caracterização microestrutural. Para tanto, amostras de cada tipo de aço foram embutidas em baquelite, lixadas seguindo uma seqüência de lixas com granulações de 100 a 800 e polidas com solução de OPS. Para a realização do ataque eletroquímico foram empregadas uma solução de ácido oxálico e uma fonte de tensão com eletrodos, de modo a se obter a necessária diferença de potencial. O ataque procedeu colocando-se as amostras dentro de um recipiente contendo a solução de ácido oxálico e ajustando-se a tensão para 4V.

As superfícies de fratura de alguns dos corpos-de-prova ensaiados em fadiga foram protegidas com esmalte para posterior análise de fratura via MEV. Nesta análise foi empregado o equipamento LEO 1450VP, operando no modo de elétrons secundários. Foram observados os micromecanismos de fratura e detalhes microestruturais como as inclusões e seu papel na iniciação de trincas.

3 RESULTADOS

3.1 Microestrutura

A Figura 1 apresenta fotomicrografias obtidas por MO representativas da microestrutura dos aços avaliados neste trabalho. Verifica-se a presença, em ambos os materiais, de maclas características de um aço inoxidável austenítico. Pode-se observar também que o aço 304 UF apresenta uma estrutura de grãos mais grosseiros quando comparado ao aço AISI 304 convencional.

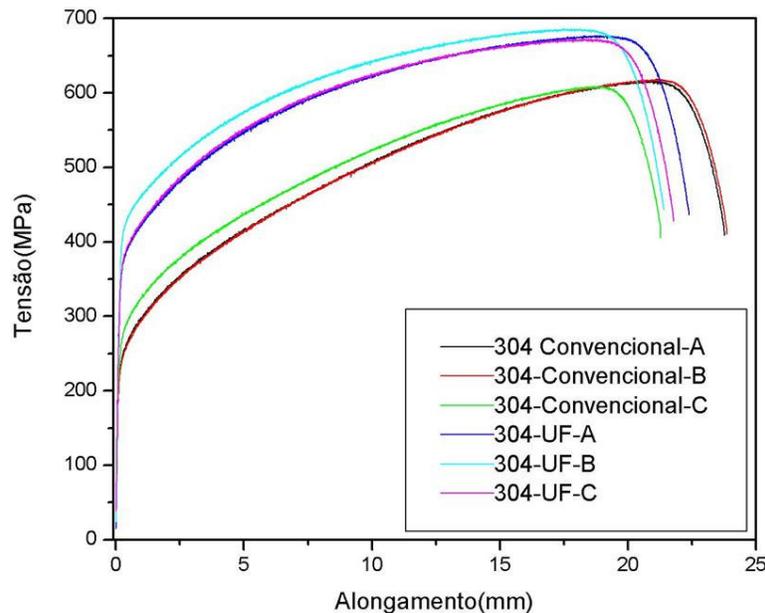


Fonte: Laboratório de Metalografia da AMR/IAE/CTA.

Figura 1. Microestrutura dos aços (a) AISI 304 convencional e (b) 304 UF.

3.2 Propriedades em Tração

A Figura 2 apresenta as curvas obtidas nos ensaios de tração (três ensaios para cada material). Devido à limitação do extensômetro empregado nas medidas de deformação (máximo de 50%) e à alta ductilidade dos materiais, este era retirado dos corpos-de-prova antes do final dos ensaios. Assim, as curvas mostradas na Figura 4 apresentam a tensão de engenharia contra o alongamento medido por meio de um LVDT acoplado ao atuador da máquina MTS, para permitir a visualização dos ensaios completos, desde o início até a ruptura de cada corpo-de-prova. A Tabela 2 apresenta os valores médios das propriedades mecânicas obtidas no ensaio de tração: limite de escoamento σ_e (offset a 0,2%), limite de resistência σ_t , ductilidade medida pelo alongamento em 30 mm, ΔL , e expoente de encruamento n_1 referente ao comportamento tensão-deformação verdadeira.



Fonte: Laboratório de Ensaios Mecânicos da EEL/USP.

Figura 4. Curvas obtidas nos ensaios de tração.

Tabela 2. Propriedades em tração dos materiais estudados.

Aço	σ_e (MPa)	σ_t (MPa)	ΔL (%)	n_1
AISI 304	235	615	70	0,65
304 UF	376	679	68	0,48

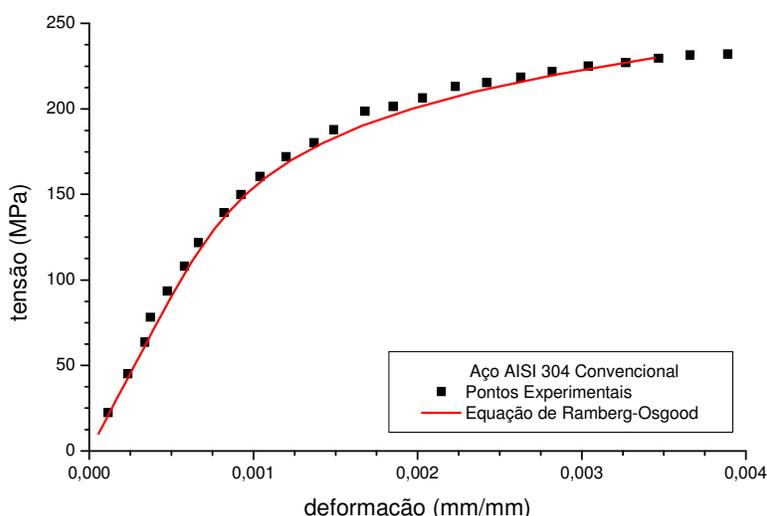
Fonte: Laboratório de Ensaios Mecânicos da EEL/USP.

A partir de um ensaio representativo de cada um dos aços estudados, foram calculados os parâmetros que definem a relação de Ramberg-Osgood modificada, dada pela equação (1). Os resultados são mostrados na Tabela 3. Com esses parâmetros foi possível modelar com precisão o comportamento tensão-deformação de ambos os aços na região elástica convencional (limitada por deformação plástica da ordem de 0,2%), conforme mostram as Figuras 3 e 4.

Tabela 3. Parâmetros do comportamento tensão-deformação na região elástica.

Aço	E_o (GPa)	$\sigma_{0,01}$ (MPa)	$\sigma_{0,2}$ (MPa)	n
AISI 304	182	145	227	6,63
304 UF	177	230	348	7,23

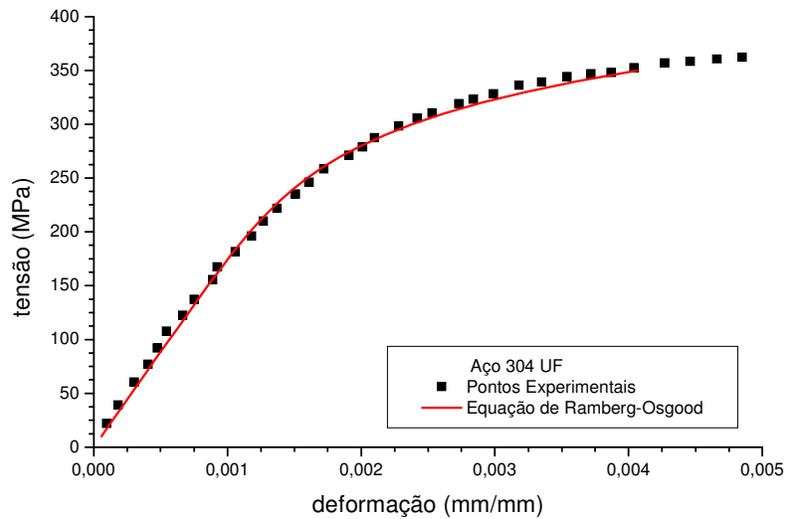
Fonte: Laboratório de Ensaios Mecânicos da EEL/USP.



Fonte: Laboratório de Ensaios Mecânicos da EEL/USP.

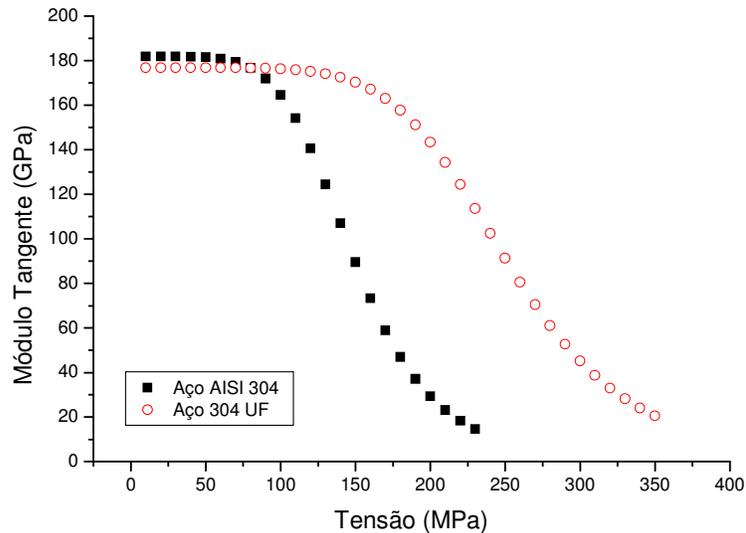
Figura 3. Curva tensão-deformação na região elástica convencional, aço AISI 304.

A variação do módulo tangente E_t com a tensão, correspondente à região elástica convencional de ambos os aços, é mostrada na Figura 5. Observa-se que os valores de E_t para o aço 304 convencional apresentam forte queda a partir de 100 MPa, enquanto que para o aço 304 UF uma queda significativa ocorre somente a partir de 170 MPa.



Fonte: Laboratório de Ensaios Mecânicos da EEL/USP.

Figura 4. Curva tensão-deformação na região elástica convencional, aço 304 UF.

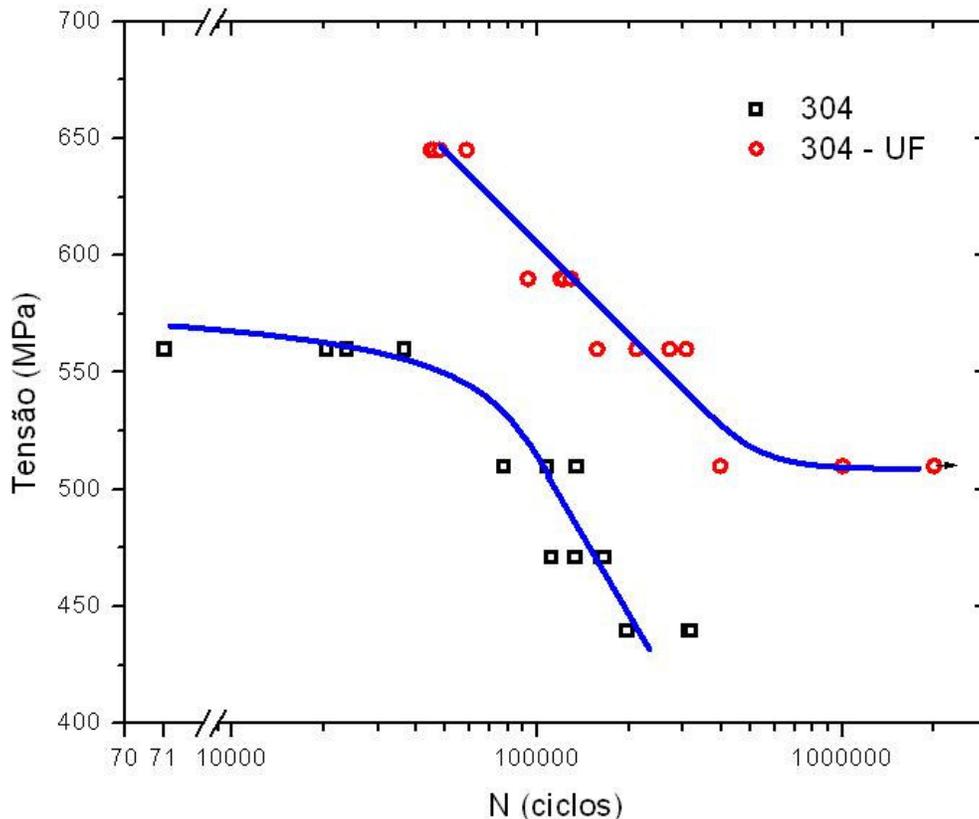


Fonte: Laboratório de Ensaios Mecânicos da EEL/USP.

Figura 5. Variação do módulo tangente com a tensão.

3.3 Comportamento em Fadiga

Os resultados de fadiga estão representados graficamente na Figura 6, juntamente com uma representação da tendência de seu comportamento, mostrando que o aço 304 UF apresenta resistência cerca de 15% maior que o aço convencional para vida de 10^5 ciclos. Além disso, apresenta vida em fadiga da ordem de 10^6 ciclos no mesmo nível de tensão (510 MPa) em que o aço convencional chega a 10^5 ciclos.



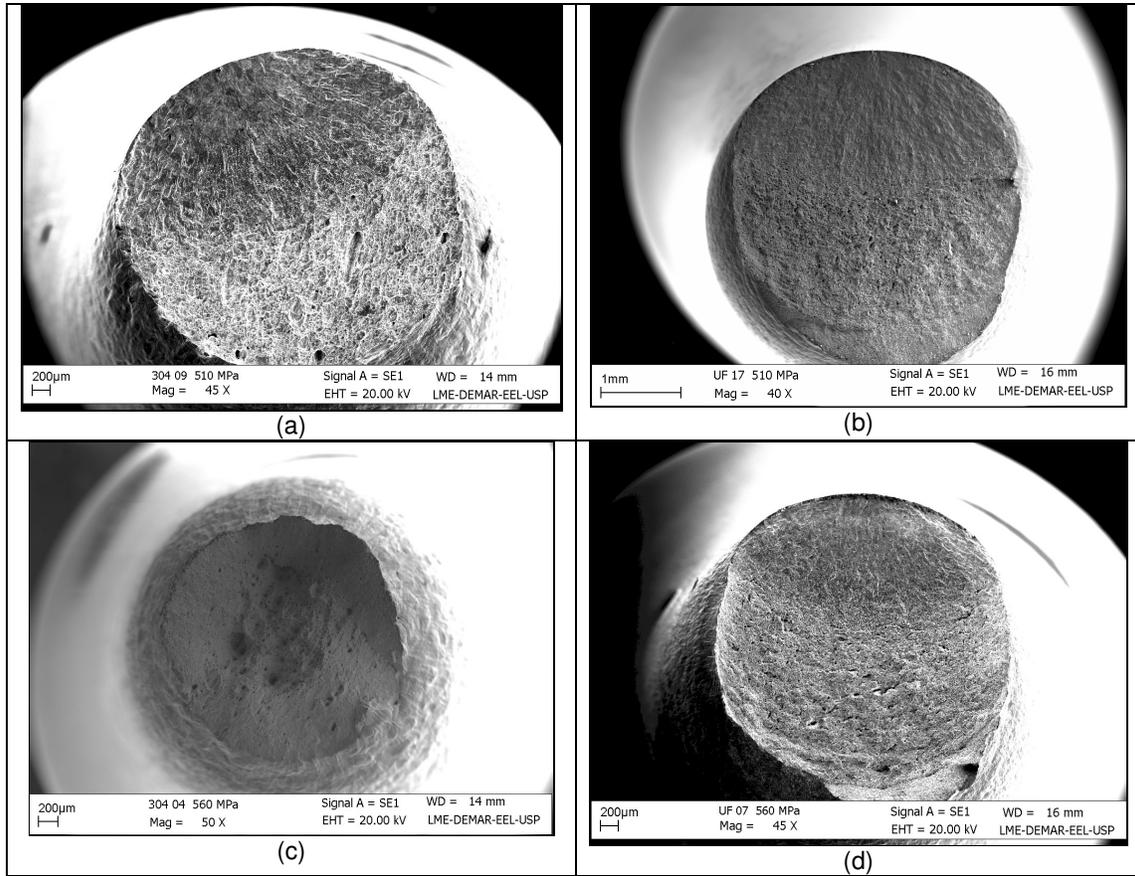
Fonte: Laboratório de Ensaios Mecânicos da EEL/USP.

Figura 6. Resultados dos ensaios de fadiga axial.

3.4 Análise Fractográfica

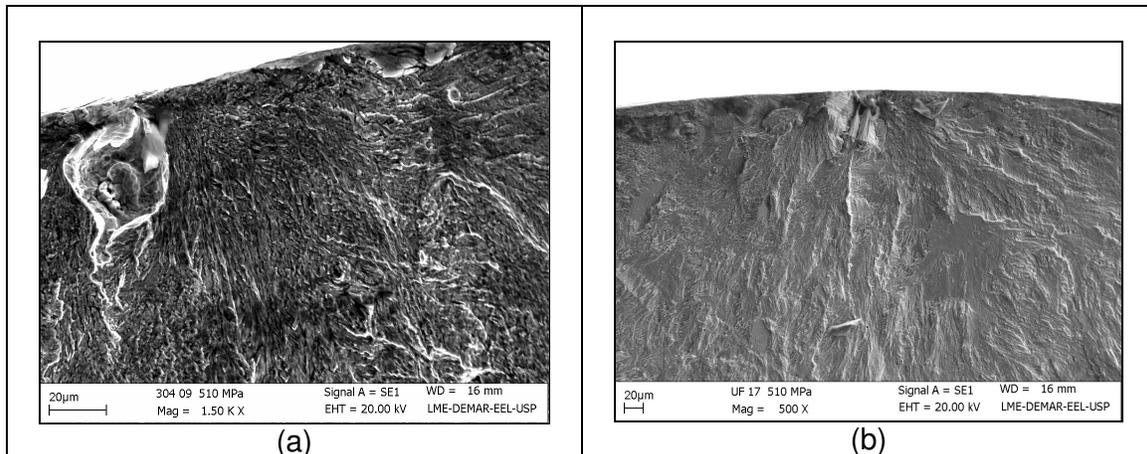
Fractografias de corpos-de-prova de fadiga de ambos os materiais estudados estão mostradas nas Figuras 7 e 8, para dois níveis de tensão máxima: 510 MPa e 560 MPa. Como pode ser observado, no nível de tensão de 510 MPa, o aço 304 convencional, na região de propagação da trinca, apresenta mais evidências de deformação plástica que a mesma região no aço 304 UF (Figuras 7(a) e 7(b)). Os dois aços apresentaram trincas que se originaram em inclusões presentes próximas à superfície dos corpos-de-prova, conforme mostra a Figura 10. Para um nível de tensão de 560 MPa, o aço 304 convencional (Figura 7(c)) sofre uma fratura por sobrecarga e uma alta deformação ao redor da seção fraturada. No mesmo nível de tensão, 560 MPa, o aço 304 UF tem vida em fadiga da ordem de 10^5 ciclos.

Esses resultados sugerem que, ao controlar a forma e tamanho das inclusões, a adição de cálcio promove uma redução dos concentradores locais de tensão, contribuindo para o aumento do tempo de nucleação da trinca. Além disso, a microestrutura mais refinada e com distribuição mais uniforme de partículas duras do aço 304 UF contribui para uma propagação mais lenta da trinca, hipótese que está em conformidade com as alterações observadas nos micromecanismos de fratura.



Fonte: Laboratório de análise de imagens da EEL/USP

Figura 7 – Superfícies de fratura por fadiga dos aços inoxidáveis 304 convencional (a, c) e 304 UF (b, d), ensaiados a 510 MPa (a, b) e 560 MPa (c, d).



Fonte: Laboratório de análise de imagens da EEL/USP

Figura 8 – Sítios de início da trinca nos aços 304 convencional (a) e 304 UF (b).

4 DISCUSSÃO

4.1 Microestrutura

Além de evidenciar sua microestrutura mais refinada, as micrografias obtidas por microscopia óptica revelam também que as inclusões presentes no aço 304 UF são menores e mais esféricas do que aquelas encontradas no aço convencional 304, conforme descrito na literatura.^[12] Isso indica que provavelmente o efeito concentrador de tensões das inclusões presentes no aço tratado com cálcio é menor que no aço AISI 304 convencional, o que pode se constituir em uma vantagem no que diz respeito à resposta mecânica do primeiro em relação ao segundo.

4.2 Propriedades em Tração

As curvas tensão-deformação mostradas na Figura 4 têm formato similar para os dois materiais estudados, apresentando região elástica bem definida, forte encruamento seguido de pronunciada queda na tensão de engenharia devida à estricção. As curvas também mostram claramente que o aço 304 UF apresenta maior resistência mecânica que o aço 304 convencional. As propriedades mecânicas apresentadas na Tabela 2 comprovam que o aço 304 UF apresenta maiores valores do limite de escoamento e limite de resistência, acompanhados de queda insignificante na ductilidade. O comportamento em tensão-deformação verdadeira, para ambos os aços, seguiu o modelo de Ludwigsen [13], típico de um aço inoxidável austenítico, sendo que o aço 304 convencional apresentou maior valor do expoente de encruamento n_1 , indicando que o mesmo tem maior capacidade de encruamento que o aço 304 UF.

Analisando-se os dados da Tabela 3, que define os parâmetros que definem a equação de Ramberg-Osgood modificada, observa-se que, apesar de possuir um valor ligeiramente inferior para o módulo elástico inicial E_0 , o aço 304 UF apresenta maiores valores de $\sigma_{0,01}$ e $\sigma_{0,2}$. Além disso, maior valor de n apresentado pelo aço 304 UF em relação ao aço 304 convencional indica uma menor influência do componente não linear da deformação no comportamento elástico do material, bem como uma transição mais abrupta para o regime plástico. Os valores de n são compatíveis com aqueles encontrados em aços inoxidáveis [10], e confirmam a condição de não linearidade dessas ligas. Além disso, a superposição das curvas teóricas aos pontos experimentais, mostrada nas Figuras 5 e 6, comprova que o comportamento em tração desses materiais segue a equação de Ramberg-Osgood modificada.

O módulo tangente, cuja variação com a tensão é mostrada na Figura 7, é um importante parâmetro para descrever a rigidez elástica dos materiais que apresentam uma não linearidade do comportamento tensão-deformação, como é o caso dos aços inoxidáveis. Para esses materiais, a previsão de deformações pelo método convencional, considerando o módulo de Young, pode tornar-se imprecisa. Tanto o módulo elástico inicial quanto o módulo tangente são parâmetros que podem definir um módulo efetivo, representativo da rigidez do material. A definição de um módulo efetivo é muito comum em expressões analíticas que representam melhor o comportamento mecânico de um material numa solicitação específica. Os resultados mostrados na Figura 8 comprovam que o aço 304 UF apresenta maior rigidez elástica que o aço AISI 304 convencional.

4.3 Comportamento em Fadiga

Analisando-se a Figura 8, verifica-se que para um nível de tensão de 510 MPa, o aço 304 UF apresentou uma tendência que pode ser caracterizada como “vida infinita”, ou seja, o aço resistiu a um número de ciclos $> 10^6$, com um dos ensaios tendo sido interrompido (*runout*) com aproximadamente 2×10^6 ciclos, enquanto para o mesmo nível de tensão o aço 304 convencional apresentou uma vida em fadiga de 10^5 ciclos. O aço 304 convencional em um nível de tensão de 560 MPa tem uma tendência que pode ser explicada pela alta tensão aplicada, muito próxima do limite de resistência do material (91% do limite de resistência que é 615 MPa), o que gerou uma fratura por sobrecarga, sem características de fadiga.

5 CONCLUSÃO

O tratamento com cálcio que permitiu a produção do aço 304 UF, além de melhorar a usinabilidade do aço 304 convencional, resultou também em melhores propriedades mecânicas. O aço 304 UF apresentou microestrutura mais refinada, inclusões com tamanhos menores e melhor distribuídas. Apresentou também maiores limites de escoamento (ganho de 58 %) e de resistência à tração (ganho de 10 %), que o aço 304 convencional, sem comprometimento da ductilidade. A equação de Ramberg-Osgood modificada modelou adequadamente a não linearidade do comportamento tensão-deformação na região elástica convencional de ambos os aços. A variação dos valores do módulo tangente E_t demonstra que o aço 304 UF apresenta maior rigidez elástica que o aço 304 convencional. Já a análise do expoente de encruamento n_1 mostra que o aço 304 convencional é o que apresenta maior capacidade de encruamento. Os aços estudados apresentaram curvas de fadiga bem distintas, com o aço 304 convencional apresentando uma tendência de patamar de fadiga de baixo ciclo à tensão máxima 560 MPa e o aço 304 UF apresentando tendência de vida infinita a 510 MPa, além de uma menor inclinação da curva S/N quando comparada ao aço convencional. As superfícies de fratura por fadiga de ambos os aços apresentaram trincas nucleando próximo à superfície e regiões distintas e bem delimitadas de propagação.

Agradecimentos

Os autores agradecem a AMR/IAE/CTA pela realização dos ataques eletrolíticos nas amostras metalográficas, ao IEAv/CTA e a EEL- USP, pelo material recebido e pelo apoio técnico.

REFERÊNCIAS

- 1 CALLISTER Jr, **Ciência e Engenharia de Materiais**, ed.5, LTC, Rio Janeiro, 2002, 589p.
- 2 HIGO, Y and TOMITA, Y, Evaluation of Mechanical Properties of Metallic Biomaterials, in **Biomaterials' Mechanical Properties**, ASTM STP 1173, Eds. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1992, p.148-155.
- 3 POULACHON, G., DESSOLY, M., LE CALVEZ C., LEBRUN J.L., PRUNET V., JAWAHIR, I.S., An investigation of the influence of sulphide inclusions on tool-wear in high speed milling of tool steels, **Wear** n.250, 2001, p.334–343.
- 4 O Mundo da Usinagem: As Atividades de Pesquisa e Desenvolvimento na Villares Metals, ed. Villares & Sandvik Coromant do Brasil, 2003, p.34-35.

- [5] MANÇO, H.G.A., MACHADO, A.R., GENNARI Jr., W., **Usinabilidade de Aços Inoxidáveis em Processo de Fresamento**, publ. Universidade Federal de Uberlândia Faculdade de Engenharia Mecânica – LEPU, Uberlândia MG, 14p. 2007.
- [6] AKASAWA, T., SAKURAI H., Nakamura, M., Tanaka T., Takano K., Effects of free-cutting additives on the machinability of austenitic stainless steels, **Journal of Materials Processing Technology** 143–144, 2003, p.66–71.
- [7] JUVONEN, Pekko. Effects of Non-metallic Inclusions on Fatigue Properties of Calcium Treated Steels. In: Espoo 2004, Helsinki University of Technology. 2004.
- [8] BERG, van den, G.J. The effect of non-linear stress-strain behavior of stainless steels on member capacity. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 54, p.135-160, 2000.
- [9] CHRYSANTHOPOULOS, M.K. A method for predicting the flexural response of tubular members with non-linear stress-strain characteristics. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 57, p.1197-1216, 2001.
- [10] RASMUSSEN, K.J.R. Full-range stress-strain curves for stainless steels alloys. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 59, p.47-61, 2003.
- [11] SCHNEIDER, S., SCHNEIDER, S.G., SILVA, H.M., MOURA NETO, C. Study of the non-linear stress-strain behavior in Ti-Nb-Zr alloys. **Materials Research**, v.8, p.435-438, 2005.
- [12] ENGH T. A, **Principles of Metal Refining**, 1ed; 1992; Oxford University Press.
- [13] LUDWIGSON D. C., Modified Stress-Strain Relation for FCC Metals and Alloys, **Metall. Trans.** 2, 2825-29, October 1971.