

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE FLUÊNCIA DE UM AÇO INOX 304 COM ADIÇÃO DE CÁLCIO ¹

*Isabela Reis Carrer²
Miguel Justino Ribeiro Barboza²
Antonio Jorge Abdalla³
Carlos de Moura Neto⁴
Francisco Piorino Neto⁴
Danieli Aparecida Pereira Reis⁴*

Resumo

Os aços inoxidáveis têm a elevada resistência à corrosão como uma de suas mais importantes propriedades. Entretanto, uma das principais características destes aços é a sua baixa usinabilidade. A busca da melhoria da usinabilidade destes aços inclui a adição de cálcio para o controle da morfologia e distribuição das inclusões. Neste trabalho foram utilizados dois tipos de aços inoxidáveis, o AISI 304 e o AISI 304 UF com adição de cálcio. Neste contexto, a adição de cerca de 0,03% em peso de cálcio melhora a usinabilidade deste aço. O objetivo principal deste trabalho é analisar as conseqüências que esta modificação química acarreta nas propriedades mecânicas. Desta forma, foram realizados ensaios de fluência em amostras dos aços inoxidáveis 304 com e sem adição de cálcio a 650 e 730°C e posterior análise de sua microestrutura. Os resultados demonstraram que o aço AISI 304 UF apresentou menor taxa de deformação estacionária e maior tempo de vida em fluência.

Palavras-chave: Aço austenítico; Propriedades mecânicas; Fluência.

CREEP BEHAVIOR ANALYSIS OF THE 304 AUSTENITIC STAINLESS STEEL WITH CALCIUM ADDITION

Abstract

Stainless steel has high strength corrosion as one of these important properties. However one of these difficulties is low machining. The search for better machining of this steel comprehends in calcium addition to control the morphology and the distribution of present inclusions. Were utilized in this study two types of stainless steel, AISI 304 and AISI 304 UF, with calcium addition. In this context, the calcium addition of approximately 0.03% weight makes a remarkable better machining of this steel. The objective of this work is to analyze the consequences that this chemical modification carts in some mechanical properties. Creep behavior of stainless steels 304 with and without addition of calcium has been investigated at 650 and 730°C. The results demonstrated that the steel AISI 304 UF presented larger lifetime and lower creep strain rate than those of the steel 304.

Key words: Austenitic stainless steel; Mechanical properties; Creep.

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.*

⁴ *Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA/ CTA, São José dos Campos – SP.*

1 INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis têm um espaço destacado no mercado de materiais, associando propriedades mecânicas adequadas a uma série de aplicações que exijam elevada resistência à corrosão. Tem uma vasta gama de aplicações, desde a fabricação de peças críticas para reatores e tubulações em indústrias químicas, aplicações em indústrias alimentícias devido a seu aspecto asséptico, biomateriais, até seu emprego como artigo decorativo por possuir excelente aspecto visual.^(1,2) Entretanto, a composição química requerida para permitir tais propriedades aos aços inoxidáveis, resulta em uma baixa usinabilidade quando comparados aos aços carbonos. Este fato ocorre, principalmente, pelos seguintes fatores: alta taxa de encruamento do material, elevadas ductilidade e tenacidade além de baixa condutividade térmica.⁽³⁾

A introdução do cálcio proporciona a redução, o controle da morfologia e a distribuição das inclusões não-metálicas existentes no metal. Estas inclusões, duras e abrasivas, são prejudiciais à vida das ferramentas de corte. A técnica consiste na adição de cálcio por injeção profunda, com gás portador, levando a uma desoxidação que modifica as inclusões de alumínio para uma fase de aluminato de cálcio, com ponto de fusão e temperatura de amolecimento inferiores aos da alumina. Esta tecnologia consiste, basicamente, em converter as inclusões de silicatos e aluminas em inclusões com menor ponto de fusão.⁽⁴⁾

Como observado por outros autores,⁽⁵⁾ a durabilidade da ferramenta de corte no processo de usinagem do aço 304 USIFAC (com adição de cálcio) é cerca de seis vezes maior que o aço inoxidável austenítico 304 tradicional.

Em função de diversas aplicações em temperaturas elevadas, a resistência à fluência corresponde a um dos principais critérios para a seleção adequada desta classe de materiais. De uma forma geral, o comportamento dos metais em alta temperatura está intimamente relacionado com a presença de imperfeições cristalinas, devido à maior mobilidade atômica, e conseqüentemente aos processos que envolvem o fenômeno da difusão. Temperaturas elevadas aumentam a capacidade de movimentação de discordâncias e podem ativar outros mecanismos responsáveis pelo processo de deformação, como a possibilidade de operação de novos sistemas de deslizamento e a deformação localizada ao longo dos contornos granulares. As condições ambientais, a exemplo dos meios agressivos, exercem uma forte influência na grande maioria dos metais e ligas, principalmente quando conjugadas com os processos que envolvem instabilidades metalúrgicas, conduzindo um componente estrutural a uma possível falha de forma prematura.

A formação de configurações estáveis ao longo do processo de fluência conduz a um segmento estacionário onde a taxa de encruamento é equilibrada dinamicamente pela taxa de recuperação levando a um conceito fundamental para muitas teorias que, na maioria dos estudos em fluência, possui uma grande importância tecnológica. Sob esse aspecto, observou-se ao longo dos anos, um forte estímulo ao desenvolvimento de equações empíricas simples que pudessem descrever de forma genérica os efeitos da temperatura e tensão aplicados sobre a taxa de deformação relativa ao estágio secundário.

Dentre as várias relações propostas na literatura, a de maior aplicabilidade prática relaciona a dependência da taxa de fluência estacionária com a tensão e a temperatura, sendo representada pela Equação (A), onde B_0 é um fator dependente

da tensão e da estrutura do material, σ a tensão aplicada, R a constante dos gases e T a temperatura absoluta.

$$\dot{\epsilon}_s = B_0 \sigma^n \exp\left(\frac{-Q_c}{RT}\right) \quad (A)$$

O conceito de um mecanismo responsável pelo fenômeno pode ser caracterizado por diferentes valores do expoente de tensão n combinados com a energia de ativação Q_c , indicando a dependência para diferentes regimes de tensão e temperatura.⁽⁶⁾

O objetivo deste trabalho constitui-se na determinação de parâmetros experimentais que permitam avaliar as propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis AISI 304 e 304 UF sob condições de fluência em temperaturas elevadas. Para tanto, foram realizados um conjunto de ensaios sob carga constante, com as tensões inicialmente aplicadas abrangendo a faixa de 150 Mpa a 250 MPa nas temperaturas de 650 e 730°C. O trabalho será complementado pela determinação dos principais micromecanismos responsáveis pelo processo de fratura.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho, foram utilizados dois tipos de aço inoxidáveis: 304 (aço tradicional produzido pela Villares) e 304 UF (com adição de cálcio para facilitar a usinabilidade, linha USIFAC da Vilares). A composição química, dos principais elementos presentes no material, é apresentada na Tabela 1. Na mesma tabela, encontram-se os requisitos de norma para a composição do aço AISI 304.

Tabela 1. Composição química dos aços inoxidáveis austeníticos 304 (% em peso).

| Aços | C | Si | Mn | Cr | Ni | Mo | Al | Cu | P | S | N | Ca |
|------------|-------|-------|-------|-------------|--------------|------|--------|------|--------|--------|-------|--------|
| V304 | 0,027 | 0,29 | 1,80 | 18,30 | 8,75 | 0,46 | 0,007 | 0,42 | 0,034 | 0,003 | 0,049 | 0,0011 |
| 304 UF | 0,058 | 0,38 | 1,90 | 18,30 | 8,57 | 0,42 | <0,005 | 0,46 | 0,031 | 0,026 | 0,037 | 0,0036 |
| Norma AISI | <0,08 | <1,00 | <2,00 | 18,00-20,00 | 8,00 - 10,50 | - | - | - | <0,045 | <0,030 | <0,10 | - |

2.1 Ensaios de Fluência

Um conjunto de oito ensaios na modalidade carga constante abrangendo as temperaturas de 650°C e 730°C e tensões iniciais de 150 MPa, 200 MPa e 250 MPa, foi realizado no Laboratório de Ensaios do Instituto Tecnológico de Aeronáutica-ITA, segundo a norma ASTM E 139/83. Os corpos-de-prova foram usinados com 18,50 mm de comprimento útil e 3,0 mm de diâmetro. Para o registro das medidas de alongamento, utilizou-se um registrador gráfico modelo RB101 série1000 da ECB – Equipamentos Científicos do Brasil Ltda., conectado a um transdutor do tipo LVDT Schlumberger modelo D 6,50 com especificação de 53,18 mV/V/mm.

2.2 Análise Metalográfica e Fractográfica

Amostras foram preparadas visando a caracterização microestrutural nos dois tipos de materiais, com e sem adição de cálcio. As análises através de microscópio óptico (MO) foram realizadas no material lixado, polido e submetido a um ataque químico eletrolítico em solução de ácido oxálico sob tensões de 4 V. Análises por EDS foram realizadas para a identificação dos elementos presentes nas inclusões.

Os processos de embutimento e lixamento foram realizados na EEL/USP; o polimento e ataque, bem como a observação ao microscópio, no IAE/CTA em São José dos Campos.

Análises da superfície de fratura das amostras de inox 304 e 304 UF, submetidas a ensaios de fluência a 730^o C e tensão de 150 MPa, foram realizadas por MEV na EEL/USP.

3 RESULTADOS

3.1 Caracterização Microestrutural

As Figuras 1 e 2 mostram imagens dos aços inoxidáveis 304 e 304 UF atacados eletroliticamente.

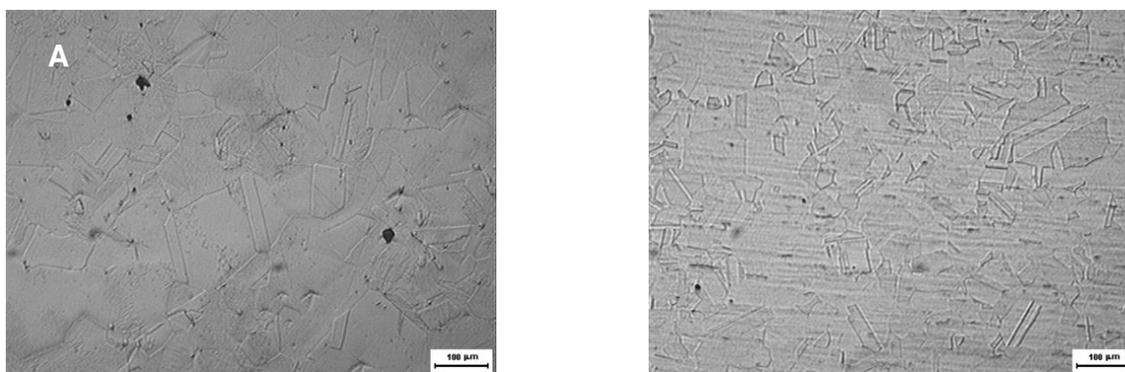


Figura 1. Microscopia óptica com aumento de 100X.: A) aços 304 e B) 304 UF.

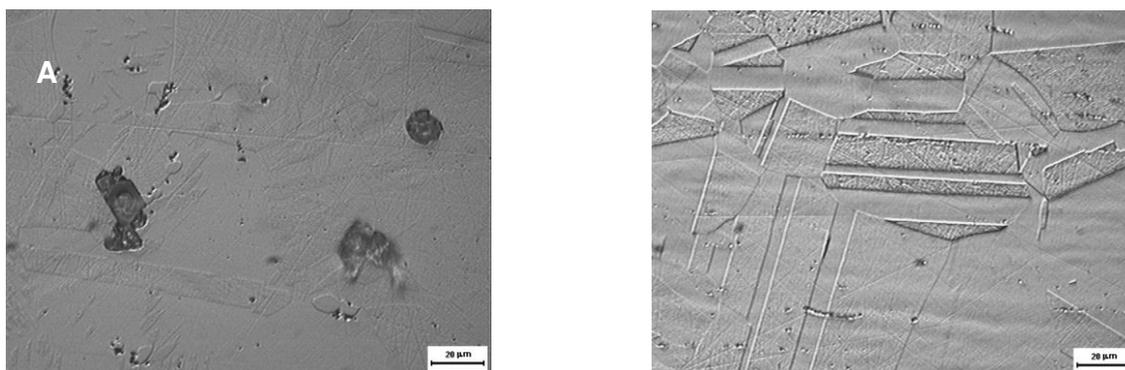


Figura 2. Microscopia óptica com aumento de 500X: A) aços 304 e B) 304 UF.

3.2 Propriedades em Fluência

Foram obtidas oito curvas correspondentes à deformação ϵ como função do tempo t nas temperaturas de 730°C e 650°C. A Figura 3 apresenta as curvas características obtidas nas condições de 730°C e 200 MPa para os aços 304 e 304 UF, respectivamente.

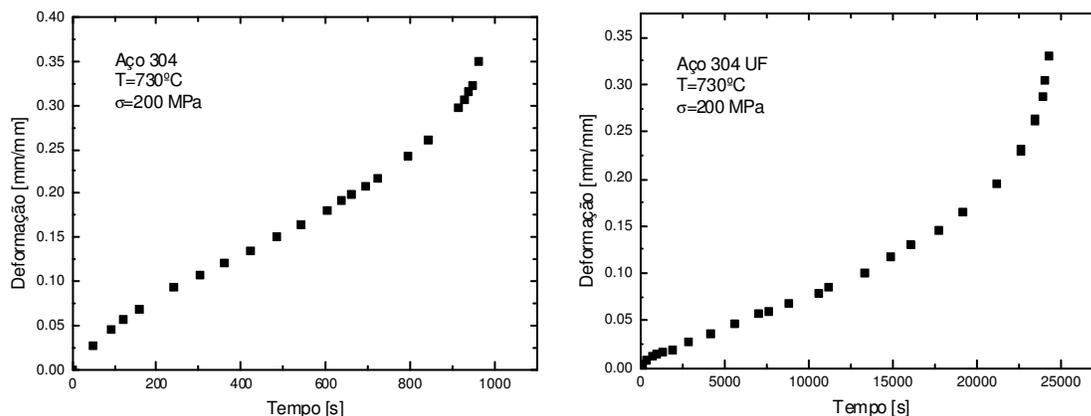


Figura 3. Curvas típicas para o aços 304 e 304 UF a 730°C e 200 MPa.

A relação dos principais parâmetros obtidos a 730°C e 650°C, a partir das curvas experimentais pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros dos ensaios de fluência.

| MATERIAL | T [°C] | σ [MPa] | $\dot{\epsilon}_s$ [1/s] | t_f [s] | ϵ_f [mm/mm] |
|----------|--------|----------------|--------------------------|-----------|----------------------|
| 304 UF | 730 | 150 | $4,515 \times 10^{-7}$ | 172800 | 0,352 |
| | | 200 | $6,798 \times 10^{-6}$ | 24230 | 0,331 |
| | | 250 | $6,991 \times 10^{-5}$ | 3600 | 0,405 |
| 304 | 730 | 150 | $1,099 \times 10^{-5}$ | 20460 | 0,456 |
| | | 200 | $2,392 \times 10^{-4}$ | 960 | 0,351 |
| | 650 | 250 | $1,093 \times 10^{-6}$ | — | — |
| | | 250 | $2,765 \times 10^{-6}$ | — | — |

Com base nos dados das Tabelas 2, através da linearização da equação (A), foram obtidas as Figuras 4 e 5 em escala logarítmica.

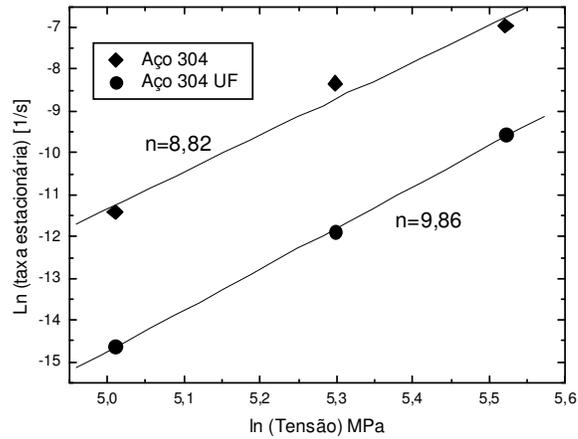


Figura 4. Dependência da taxa estacionária com a tensão a 730°C para os dois tipos de aço.

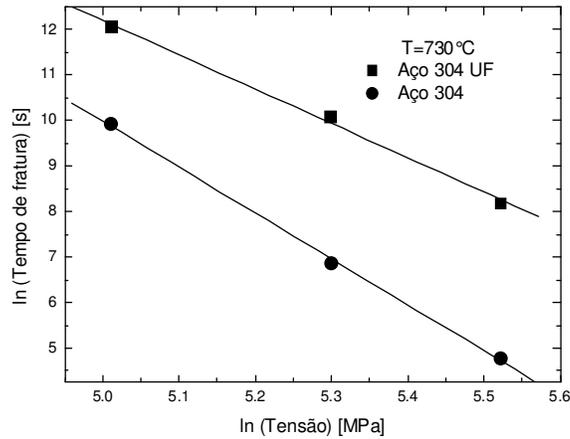


Figura 5. Dependência do tempo de fratura com a tensão a 730°C para os dois tipos de aço.

3.3 Análise Fractográfica e EDS

A Figura 6 mostra a ocorrência do fenômeno da estrição obtidas por em corpos-de-prova dos aços 304 e 304 UF ensaiados a 730°C sob tensão de 150 MPa. As fractografias das Figuras 7 e 8 mostram os mecanismos associados à fratura dúctil, evidenciando a formação e o coalescimento de estruturas alveolares.

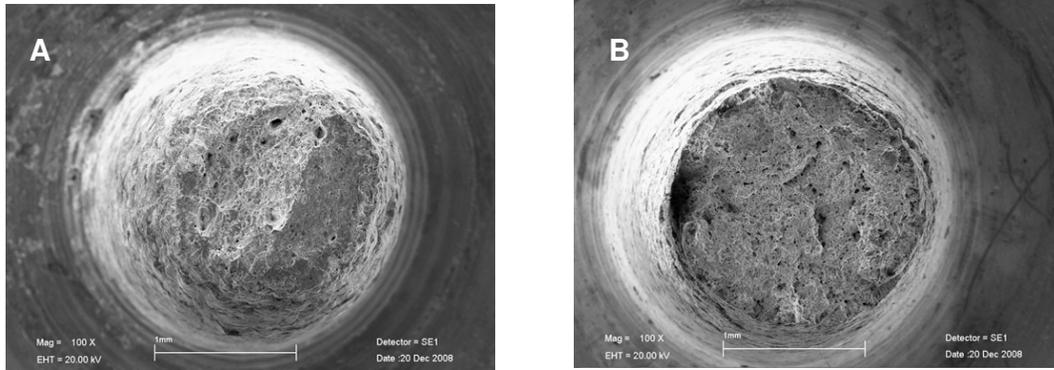


Figura 6. Fractografias obtidas através de MEV na região central da amostra fraturada por fluência sob a temperatura de 730° C e tensão de 150MPa: A) 304 e B) 304 UF.

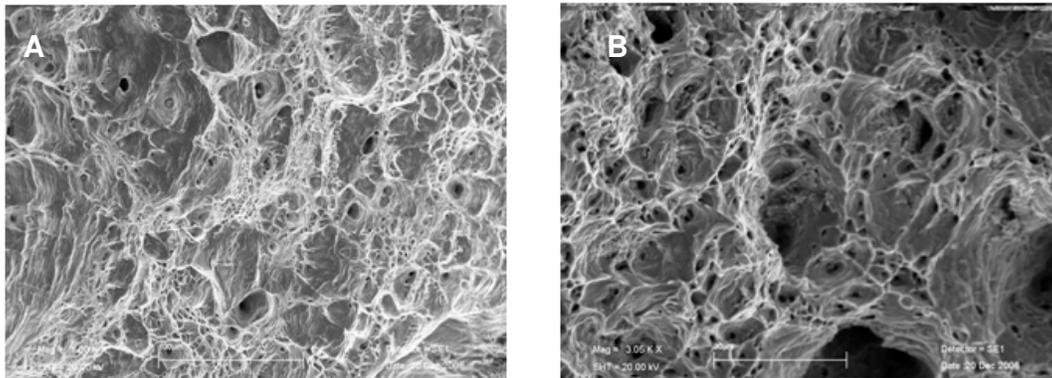


Figura 7. Fractografias obtidas através de MEV na região central da amostra fraturada por fluência sob a temperatura de 730° C e tensão de 150MPa: A) aço 304 e B) 304 UF.

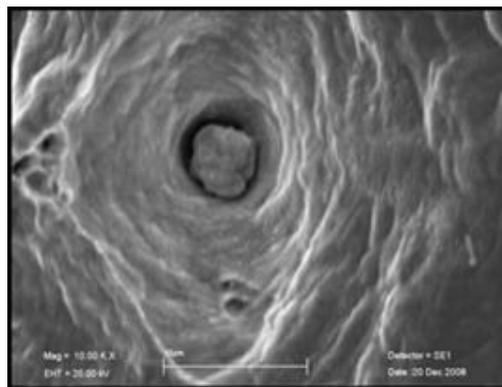


Figura 8. Fractografia do inox 304 sem adição de cálcio fraturado por fluência sob temperatura de 730° C e tensão de 150 MPa. Presença de precipitado no interior de um alvéolo.

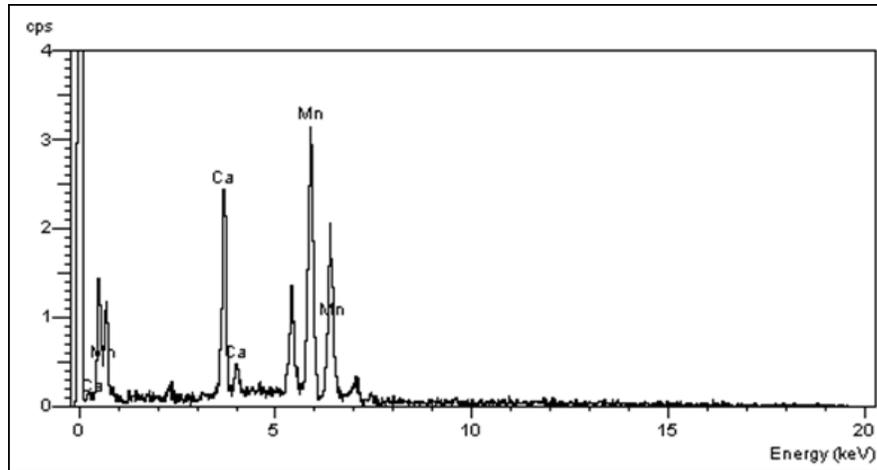


Figura 9. Espectrograma de energia dispersiva (EDS) dos precipitados caracterizados como “compostos à base de cálcio e manganês”.

4 DISCUSSÃO

As microestruturas de ambos os aços apresentam maclas de deformação devido ao processo de conformação plástica e grãos isentos deste tipo de defeito. A introdução do cálcio proporciona a redução e o controle da morfologia e distribuição das inclusões não-metálicas existentes no metal. Estas inclusões, duras e abrasivas, são prejudiciais à vida das ferramentas de corte. Os óxidos, mais duros que o aço, são os responsáveis pelo desgaste abrasivo, uma vez que o atrito entre estas partículas e a superfície da saída da ferramenta produz um desgaste acelerado da mesma.

As curvas correspondentes a Figura 3, obtidas através dos ensaios de fluência, apresentam os três estágios (primário, secundário e terciário) bem definidos. Em princípio, após a aplicação da carga em determinado nível de temperatura, o material geralmente apresenta uma deformação instantânea dando origem ao estágio primário ou transiente, no qual a taxa de fluência decresce com o tempo, e posteriormente atingindo um período de estado estacionário, em que a taxa permanece aproximadamente constante. A continuidade do processo induz a um estágio terciário, com o aumento da velocidade de fluência conduzindo o material a um processo de fratura. O terceiro estágio pode ser visto como produto de acoplamento entre a taxa de fluência e a taxa de dano resultante de mecanismos que promovam o aumento da tensão atuante em testes realizados a carga constante, como decorrência do decréscimo da área efetiva do material. Este fenômeno pode ocorrer pela ação conjunta ou independente de fatores como a agressividade do meio, a estrição e, principalmente, pelo desenvolvimento de microcavidades intragranulares ou ao longo de contorno de grão.

Por meio das curvas obtidas pela linearização da equação (A), Figuras 4 e 5, observa-se que a taxa estacionária tem um comportamento crescente com a tensão inicialmente aplicada a 730°C para ambos os aços e que, o tempo de fratura em ambas as condições de teste, diminui com o aumento da tensão. Com base nestes dados, concluímos que o aço 304 UF apresenta maior resistência em função da menor taxa estacionária e do maior tempo de vida. A maior resistência do aço 304 UF pode estar associada ao maior teor de

carbono e ao controle da morfologia e distribuição das inclusões não-metálicas induzida pela adição de cálcio.

Os valores do expoente de tensão n , 8,82 para o 304 e 9,86 para o aço 304 UF, encontram-se adequados aos valores de 8,83 e 9,5 encontrados por Murty e McDonald⁽⁷⁾ e Šustek, Pahutová e Čadek.⁽⁸⁾ Os valores das energias de ativação determinados a 250 MPa utilizando-se os dados da taxa estacionária a 730°C e 650°C, correspondem a 400 kJ/mol e 561 kJ/mol para o 304 UF e 304, respectivamente. Estes valores encontram-se na faixa determinada por Šustek, Pahutová e Čadek.⁽⁸⁾ Com base nestas informações, o mecanismo dominante de fluência em ambos os aços, pode estar associado à difusão e ao movimento não conservativo de discordâncias.

As Figuras 6, 7 e 8, demonstram que os mecanismos predominantes em ambos os aços correspondem a nucleação e coalescimento de microcavidades. A análise por EDS apresentada na Fig.9, indica a ação do cálcio na formação de partículas contendo cálcio e manganês. Desta forma, a morfologia destas partículas na microestrutura do aço 304 UF pode ter contribuído de forma positiva no comportamento em fluência.

5 CONCLUSÃO

Os resultados demonstraram que a maior resistência do aço 304 UF observada nos testes de fluência a 650°C e 730°C pode estar vinculada ao maior teor de carbono e ao controle da morfologia e distribuição das inclusões não-metálicas induzido pela adição de cálcio. Com base nos valores do expoente de tensão e da energia de ativação, os mecanismos de fluência nos aços 304 e 304 UF podem estar associados à difusão e a movimentos não conservativos de discordâncias. Os mecanismos de fratura estão associados à nucleação e ao coalescimento de microcavidades.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e ao IEAv pela bolsa de iniciação científica; ao ITA, ao DEMAR/EEL/USP e ao IAE/CTA pelo apoio nas atividades experimentais.

REFERÊNCIAS

- 1 Callister Jr, Ciência e Engenharia de Materiais, ed.LTC, Rio de Janeiro-RJ, 2002, 589p.
- 2 HIGO, Y.; 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 Metals Handbook, Machining of Stainless Steel, Metals Handbook (16) Machining, 9th ed, 681-707, 1989
- 4 T.Akasawa, H.Sakurai, M.Nakamura, T.Tanaka and K.Takano, Effects of free-cutting additives on the machinability of austenitic stainless steels, Journal Mat. Processing Technology, v.143-144, p.66-71, 2003.
- 5 As Atividades de Pesquisa e Desenvolvimento na Villares Metals, O Mundo da Usinagem, ed.Villares & Sandvik Coromant do Brasil, 2003, p.34,35.
- 6 BROWN, A. M., ASHBY, M. F. On the power law creep equation. *Scripta Metallurgica*, v.14, p.1297 – 1302, 1980.

- 7 MURTY, K.L.; McDONALD, S.G. Effect of prior creep on steady state creep behavior of stainless steel type 304. *Materials Science and Engineering*, v.55, p.105-109, 1982.
- 8 ŠUSTEK, V.; PAHUTOVÁ, M.; ČADEK, J. An investigation of creep behaviour of a low carbon 18Cr-12Ni (304L type) stainless steel at 873-1173K. *Materials Science and Engineering A*, v.177, p.75-81, 1994.