

COMPORTAMENTO À FADIGA EM CONTROLE POR TENSÃO DE AÇO INOXIDÁVEL FERRÍTICO*

Felipe Buongiorno¹
Gigliola Salerno²

Resumo

O trabalho tem como objetivo de analisar comportamento à fadiga de uma liga de aço inoxidável ferrítico por controle de tensão e caracterizar as fraturas. Para tanto, foram realizados ensaios de fadiga nos corpos de prova em controle por tensão em tração-tração quando $R = 0,5$ e frequência de 10 Hz sendo estes realizados no equipamento MTS 810 Material Test System de acordo com a norma ASTM E468. O ensaio de fadiga mostrou grande dispersão de valores de ciclos de vida, sobretudo para maiores tensões de amplitudes, nos quais ocorreram maiores deformações. Por último, o ensaio de fractografia teve como objetivo a análise da superfície de fratura pela técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Pelo ensaio de fractografia observou-se que quanto maior o número de amplitude de tensão, menores os ciclos de vida, maior a característica de uma fratura de tração, com grande presença de alvéolos e poucas estrias. A medida que se diminuía a tensão de amplitude imposta, mais a superfície da fratura se caracterizava com poucos alvéolos e maior quantidade de estrias.

Palavras-chave: Fadiga; Aço inoxidável ferrítico; Controle por tensão.

STRESS CONTROL FATIGUE BEHAVIOR OF FERRITIC STAINLESS STEEL

Abstract

The main purpose was analyze the fatigue behavior of ferritic stainless steel under stress control and characterize fractures occurred. In that way, fatigue tests in tension-tension mode under stress control was performed considering $R=0.5$ and 10Hz of frequency in MTS 810 Material Test System machine, according ASTM E468 procedure. As the results, S-N curve was obtained, however high dispersion occurred in fatigue life when amplitude stress was increased and plastic deformation was substantial. Fractured specimens were analyzed in scanning electron microscopy (SEM) in order to identify striations and voids. Increasing amplitude stress, the fatigue life decreased and more voids were identified, characterizing ductile fracture, instead of fatigue fracture. Lowering amplitude stress generated striations along the fracture.

Keywords: Fatigue; Ferritic stainless steel; Stress control.

¹ Engenharia de Materiais, Graduando, Estudante, Engenharia de Materiais, Centro universitário da FEI, São Bernardo do Campo, São Paulo e Brasil.

² Engenharia mecânica, Doutora, Professora, Engenharia de Materiais, Centro universitário da FEI, São Bernardo do Campo, São Paulo e Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Aço inoxidável é o nome especificado aos aços resistentes a corrosão com um teor mínimo de 10,5% de cromo. Há diversos aços inoxidáveis, dentre eles são: ferrítico, martensítico, austenítico, dúplex e endurecíveis por precipitação. O aço inoxidável ferrítico, possui um custo menor se comparado aos outros aços inoxidáveis, possuindo uma resistência maior à corrosão do que o aço carbono e também possuindo uma boa ductilidade e formabilidade. Seu uso vem sendo cada vez maior devido a essas e outras propriedades, sendo utilizado na fabricação de utensílios de cozinha, estampagens em geral, refinarias de petróleo e diversas outras aplicações [1].

Ainda deve-se lembrar que os materiais muitas vezes estão submetidos a tensões cíclicas e ao decorrer do tempo estas podem levar a falha ou até o rompimento do material, mesmo que seja uma tensão menor que a carga máxima atingida na tração, ou seja, fadiga. Estes materiais, dependendo da carga no qual forem submetidos, possuem um número de ciclos de vida útil até que ocorra a falha ou ruptura dos mesmos. Para aços de baixo carbono, existe uma tensão de amplitude (limite de resistência à fadiga) em que abaixo desta a falha nunca ocorrerá. Este ponto ocorre, em um gráfico S – N, por volta de 10^6 ciclos. Estes materiais possuem um limite de resistência à fadiga, cujos valores de tensão variam normalmente de 35% a 60% do limite de escoamento do material. Porém, muitos materiais não possuem um limite de fadiga. A amplitude de tensão para a falha continua a diminuir, mesmo em altos números de ciclos. Neste caso, deve-se fixar um número de ciclos e com isso chegar a um valor de tensão no qual ocorrerá a falha, podendo, assim, caracterizá-lo como resistência à fadiga [2]. A figura 1 mostra uma curva S – N para um aço inoxidável martensítico Custom 465 com e sem o tratamento superficial de jateamento por granalha (shot peening). Para o material sem tratamento superficial o intervalo entre o comportamento de fadiga de baixo ciclo e a resistência à fadiga em 10^6 ciclos é da ordem de 405 MPa, sendo a tensão de baixo ciclo de 1055 MPa (23121 ciclos) e a resistência à fadiga é 650 MPa para 10^6 ciclos. O material com o tratamento superficial apresenta um intervalo de 370 MPa, no qual a tensão de baixo ciclo é de 1200 MPa (23 921 ciclos) e a resistência à fadiga é 830 MPa para 10^6 ciclos [3]. A figura 2 indica uma curva S – N para o aço inoxidável austenítico X6CrNiTi18-10, apresentando um limite de fadiga de 434MPa [4]. Reddy at all, 2016 estudou fadiga em controle por tensão para aço inoxidável austenítico AISI321 e obteve 23000 ciclos de vida para a amplitude de tensão de 195 MPa [5].

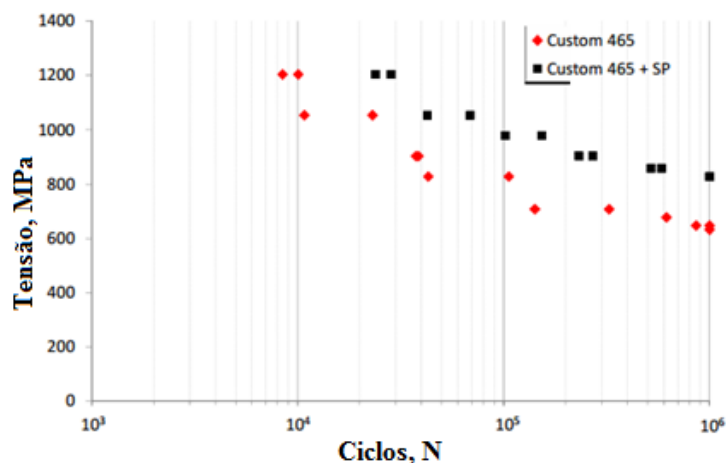


Figura 1. Curva S – N para um aço inoxidável Custom 465: R = -1; f = 10Hz [3].

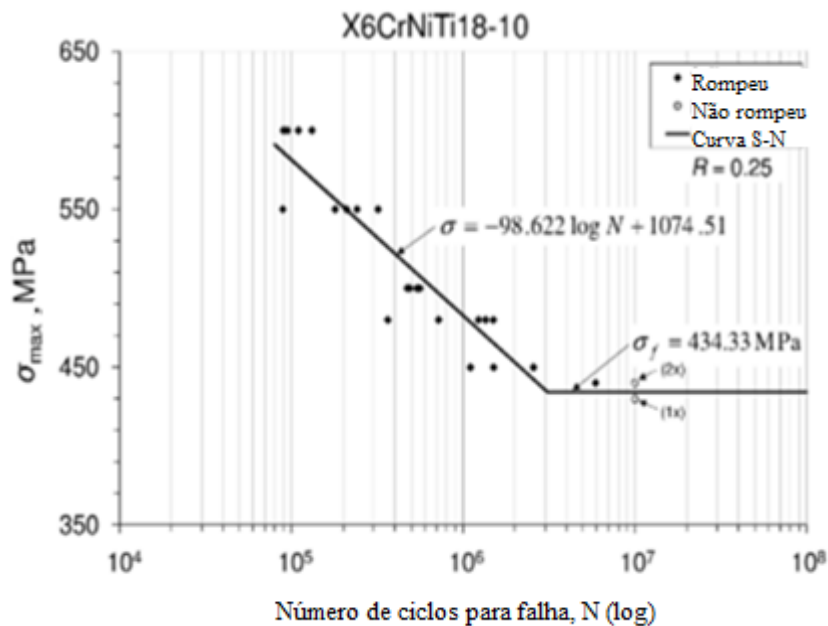


Figura 2. Curva S – N para o aço inoxidável austenítico X6CrNiTi18-10 [4].

A análise macroscópica de fratura em carregamentos cíclicos pode indicar diversas marcas de fratura na superfície. A superfície da fratura geralmente possui ausência de grande quantidade de deformação plástica durante o tempo de vida. Em muitos casos as superfícies da fratura contêm linhas referidas na literatura como marcas de praia que são formadas por várias estrias. Em cada ciclo de esforço aplicado, as trincas formadas na superfície se propagam e geram estrias, que crescem e seus tamanhos são proporcionais ao tempo de intervalo entre os ciclos. Apesar da importância das marcas de praia quanto a análise macroscópica de uma fratura por fadiga, sua presença em uma fratura por fadiga nem sempre ocorre. Em falhas que ocorrem em curto período de tempo, as marcas não ocorrem, pois estas são um indício da deformação plástica e propagação da trinca de forma estável, portanto característica de fraturas dúcteis, o que não ocorre em fraturas frágeis [6].

Este trabalho possui como objetivo identificar o comportamento à fadiga de um aço inoxidável ferrítico comercial em controle por tensão. Em seguida, caracterizar as fraturas quando este é submetido ao processo de fadiga, para tanto os corpos de prova serão ensaiados nos testes de fadiga em controle por tensão em tração-tração que identificam o comportamento à fadiga quando $R = 0,5$ e frequência 10 Hz. Em seguida, verificar a modificação da microestrutura, identificada por metalografia e dureza. A fractografia após os ensaios caracterizará as fraturas e os mecanismos de por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado neste projeto é uma liga do aço inoxidável ferrítico estudado, com a composição indicada na tabela 1. A figura 3 indica micrografias da liga, em amostra transversal e longitudinal, nota-se a equiaxialidade da estrutura granular (isotropia).

Tabela 1. Composição da liga estudada [7].

%C	%Si	%Mn	%P	%V	%Cr	%Ni	%Mo	%Cu
0,018	0,170	0,160	0,024	0,029	15,400	0,230	0,011	0,001

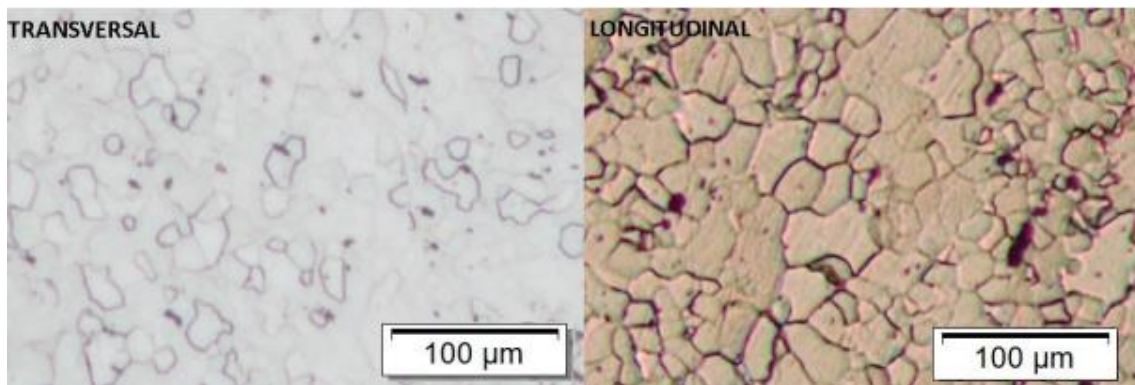


Figura 3. Fotomicrografia da liga, em amostra transversal e longitudinal da liga, ampliadas em 50x [8].

3.1 Ensaio de fadiga

O corpo de prova utilizado para a realização do ensaio de fadiga pode ser observado na figura 4, assim como suas dimensões de acordo com as indicações da norma ASTM E468 [9]. O corpo de prova possui 1 mm de espessura.

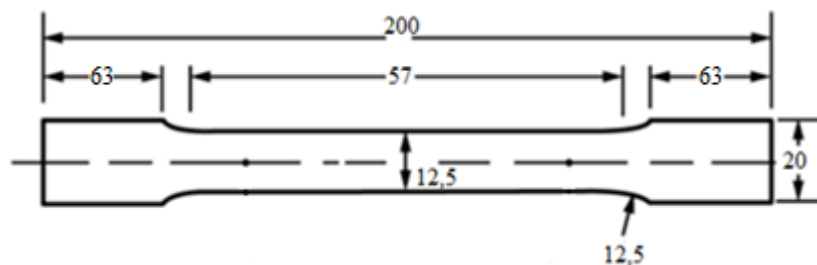


Figura 4. Dimensões do corpo de prova utilizado para os ensaios de fadiga. Fonte: Autor.

Para a realização dos ensaios de fadiga controlados por tensão tração-tração, os corpos de prova foram lixados com granulações de lixa de #400 e #600, de forma a eliminar defeitos nas superfícies dos corpos de prova. Foram utilizados seis diferentes valores de amplitude de tensão (tabela 2) com o intuito de identificar o comportamento do material em estudo. O equipamento utilizado para o ensaio de fadiga foi a máquina universal de ensaios MTS 810 com capacidade de 250kN (figura 5). A caracterização dos ensaios quanto ao comportamento à fadiga foi feita segundo a norma ASTM E468 [9] para ensaios controlados por tensão em tração-tração com frequência de 10 Hz e $R = 0,5$. As fraturas de ensaio foram estudadas, de modo a obter uma caracterização da superfície fraturada e dos mecanismos de dano quando o material é submetido a cargas cíclicas.

Tabela 2. Amplitudes de tensão (σ_a) para os ensaios de fadiga

σ_a (MPa)	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\sigma_{m\acute{i}n}$ (MPa)
112,5	450	225
115,0	460	230
117,5	470	235
120,0	480	240
122,5	490	245
125,0	500	250



Figura 5. Máquina universal de ensaios MTS810, capacidade 25 kN. Laboratório de Materiais, FEI.

3.2 Microestrutura

Para analisar a microestrutura das amostras após o ensaio de fadiga, foram feitos cortes longitudinais e transversais dos corpos de prova fraturados e embutidos em baquelite (figura 6). As amostras foram lixadas e polidas de acordo com a seguinte sequência de granulações de lixa: #320 e #600, seguidas de um polimento em pasta de diamante com granulação de 1 μm .



Figura 6. Corpos de prova fraturados e cortes longitudinal e transversal embutidos em baquelite.

Após o processo de lixamento e polimento, a amostra foi atacada com uma solução aquosa de ácido nítrico com 65% de HNO_3 utilizando uma corrente externa de forma a ser possível analisar a microestrutura das amostras e a realização da medição do tamanho de grão. As amostras foram emergidas em uma solução de ácido oxálico e foi aplicada uma corrente elétrica durante 250 segundos para a amostra longitudinal e 200 segundos para a amostra transversal, com uma tensão de 1,5V, o tempo diferente é devido a diferença de área superficial que foram atacadas, quanto maior a área superficial, maior será o tempo necessário para a realização do ataque. Após o ataque as amostras foram lavadas em água, limpas com álcool e secas.

3.2.1 Tamanho de grão

Este procedimento teve como objetivo a medição do tamanho de grão das amostras fraturadas pelo ensaio de fadiga e analisar como se comporta o tamanho de acordo

com a diferente amplitude utilizada na amostra. O software utilizado para o cálculo do tamanho de grão foi o Stream Essentials, Olympus, de acordo com a norma ASTM E112 [10]. A medição consiste na geração de círculos concêntricos no qual são feitos pontos de interceptação dos contornos de grão e assim medido o tamanho médio dos grãos. Quanto mais próximo do zero, de acordo com a escala ASTM, maior é o tamanho do grão.

3.3 Microdureza

O ensaio de dureza foi feito no equipamento HMV – 2 Shimizu, em escala Vickers, de acordo com a norma ASTM E384 [11]. Foram feitas três medições na região transversal e longitudinal. A carga utilizada para este ensaio foi de 0,5 kg. A medição consiste na deformação plástica causada pelo indentador de diamante, a partir das diagonais da impressão feita pelo indentador, e assim calculada a dureza.

3.4 Fractografia

O ensaio de fractografia possui como objetivo a análise da superfície de fratura pela técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV), figura 7, de modo a identificar os mecanismos de dano durante o processo de fadiga. Foram avaliados dois corpos de prova, sendo um com baixo número de ciclo de vida até sua fratura e outro com médio ciclo de vida até a ruptura do material, avaliando-se assim os mecanismos de dano em cada corpo de prova e suas diferenças.



Figura 7. Microscópio eletrônico de varredura (MEV). Laboratório de Materiais, FEI.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Antes do ensaio de fadiga, foram medidas a rugosidade média (R_a) dos corpos de prova. A tabela 5 indica os valores medidos para as regiões transversal ($0,54 \pm 0,05 \mu\text{m}$) e longitudinal ($0,23 \pm 0,06 \mu\text{m}$), após o lixamento dos corpos de prova.

4.1 Ensaio de fadiga

A figura 8 mostra o diagrama $\sigma_a - N_f$ da relação entre a amplitude (MPa) usada durante o ensaio e o número de ciclos até a fratura do corpo de prova.

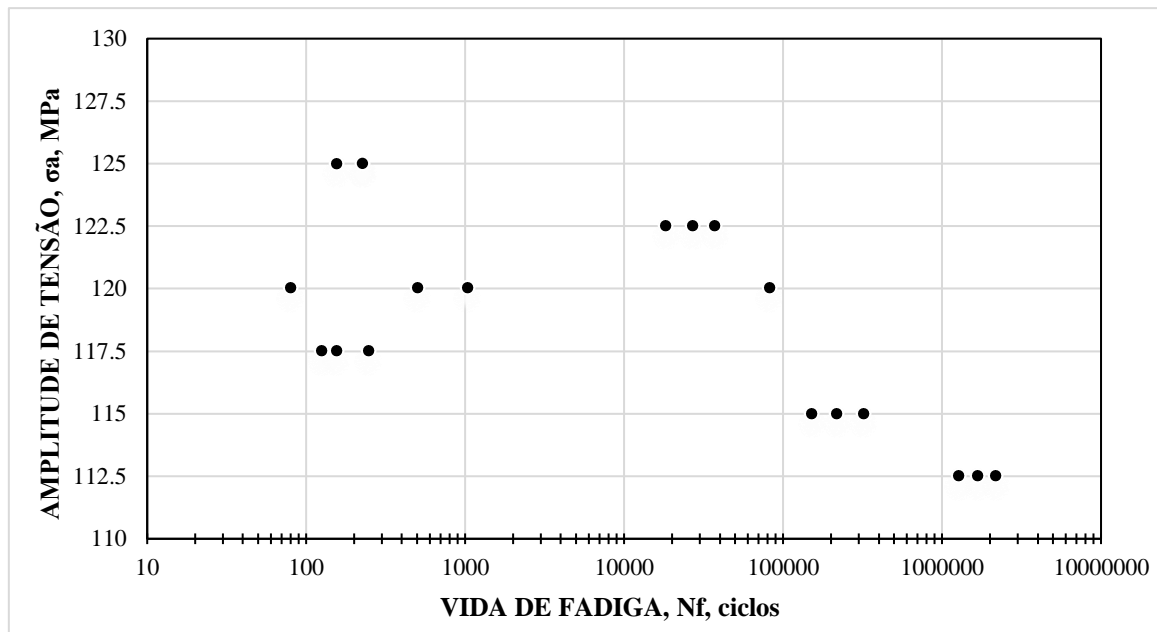


Figura 8. Curva $\sigma_a - N_f$.

Nota-se pela figura 8 que a distribuição da vida de fadiga apresenta grande dispersão. Uma das justificativas para tal acontecimento pode ser quanto a possíveis defeitos, que agiriam como concentradores de tensão e assim influenciando diretamente no tempo de fadiga do material. Porém, pelo fato de haver uma dispersão em diversos corpos de prova é possível que o defeito tenha sido de origem da chapa do aço inox estudado da qual foi feita os corpos de prova para este ensaio, esta possível justificativa pode ser esclarecida na análise por fractografia da fratura de alguns corpos de prova. Além disso, deve-se ressaltar o pequeno tamanho da espessura do corpo de prova, que levou a dificuldades quanto ao controle da máquina para amplitudes baixas de tensão, também se resalta que os pontos nos quais ocorreram maiores dispersões de resultados são aqueles nos quais foram aplicadas tensões de amplitude de alto valor e que obtiveram significativa deformação plástica nos corpos de prova.

4.2 Microestrutura

Para analisar as microestruturas foi utilizado o ataque eletrolítico. Foi notada a presença de pites nas microestruturas nos quais estão localizados próximos aos contornos de grão, regiões que são mais favoráveis à corrosão. É possível analisar pelas fotomicrografias de ambas as regiões, assim como na figura 3, a fase ferrita, os carbonetos e pites de corrosão. Também é possível notar que os grãos da região longitudinal são levemente alongados e maiores do que os grãos da região transversal, isso ocorreu em todos os corpos de prova fraturados e analisados. As figuras 9 e 10 mostram as microestruturas dos corpos de prova 2 (menor amplitude de tensão) e 17 (maior amplitude de tensão), respectivamente, mostrando a região longitudinal e transversal para os corpos de prova. Todos corpos de prova tiveram comportamento semelhante.

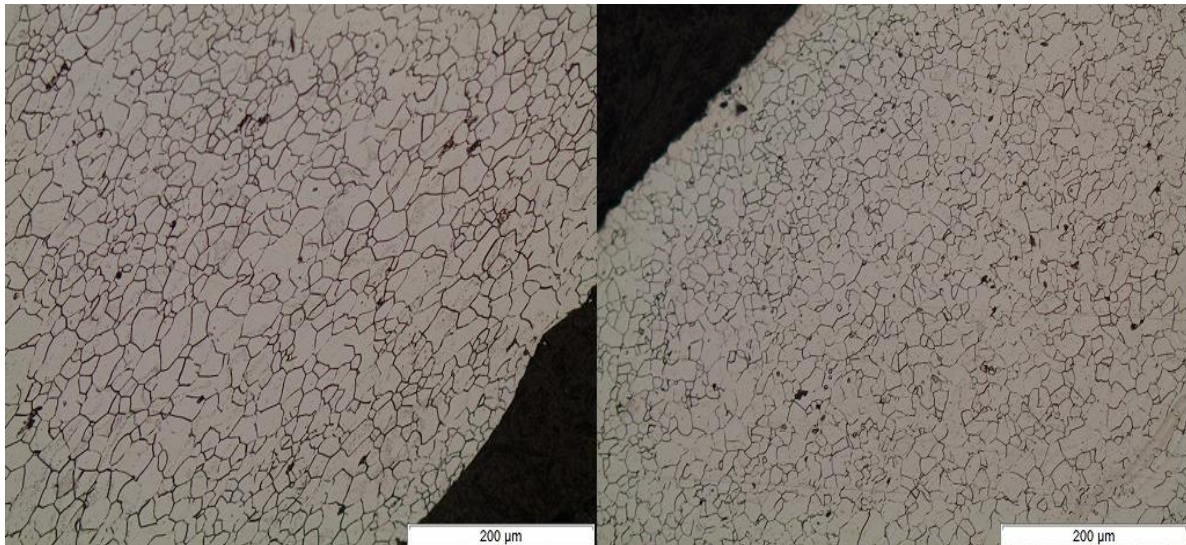


Figura 9. Fotomicrografias das regiões longitudinal e transversal, respectivamente, do corpo de prova 2, ampliadas em 200X e reagidas com ácido nítrico 65%.

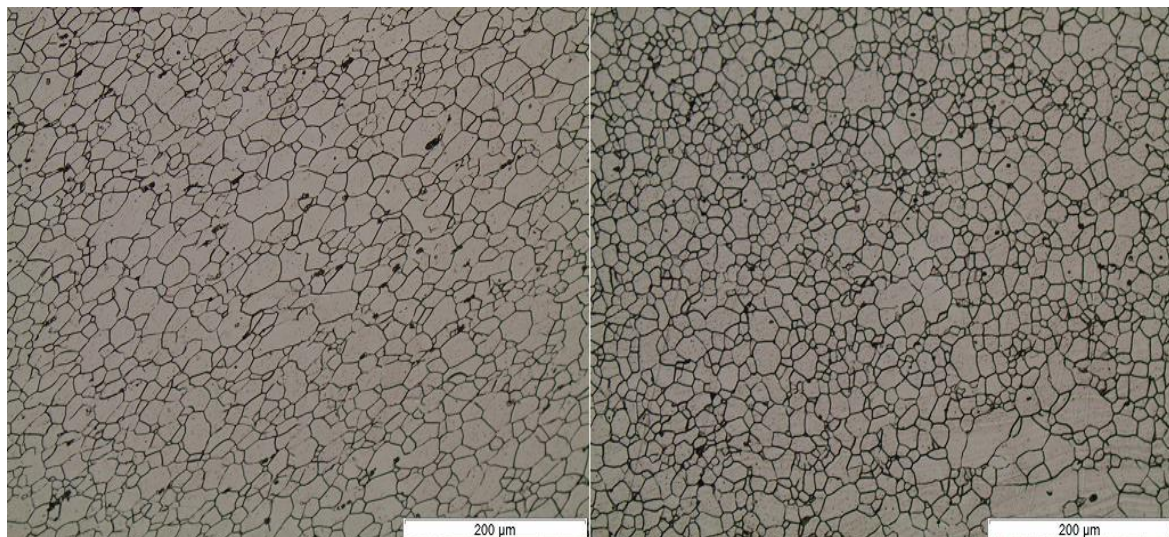


Figura 10. Fotomicrografias das regiões longitudinal e transversal, respectivamente, do corpo de prova 17, ampliadas em 200X e reagidas com ácido nítrico 65%.

Observa-se, em todas as fotomicrografias das regiões transversais, que há a presença de linhas distorcidas, isso ocorre devido a fratura do material, pois a região transversal é a que está mais próxima da fratura, se comparado com a região longitudinal onde ocorreu deformação plástica significativa. Como dito anteriormente, é possível notar que os grãos das regiões transversais são sempre menores que os grãos das regiões longitudinais, que indica o tamanho de grão de todos os corpos de prova ensaiados. Também pode-se notar que os grãos longitudinais, estão alongados em uma determinada direção, isto indica que os grãos estão orientados na direção do carregamento de tração imposto sobre o corpo de prova durante o ensaio. Porém a partir das fotomicrografias, não foi possível notar nenhuma inclusão ou algum defeito na microestrutura que poderia justificar a grande dispersão apresentada na figura 8. Desta forma, somente uma análise de fractografia poderia indicar inclusões ou defeitos nos corpos de prova que seriam uma razão da dispersão encontrada nos resultados de tempo de vida de fadiga do material ensaiado.

De acordo com a nomenclatura da norma ASTM E112 [10] é 8,5 ($16,66 \pm 1,65 \mu\text{m}$) para a região longitudinal, em média, e para a região transversal equivale a 9,0 (14,51

$\pm 1,23 \mu\text{m}$), em média. Todas as medidas foram feitas com um aumento de 200X, sendo utilizado o software Stream Essentials, Olympus.

4.3 Microdureza

Foi realizado o ensaio de microdureza em todos os corpos de prova, tanto nas regiões longitudinais como nas regiões transversais. A carga utilizada foi de 0,5 kg. O ensaio de dureza foi feito no equipamento HMV – 2 Shimizu, em escala Vickers, de acordo com a norma ASTM E384 [11]. A tabela 3 indica os valores médios da dureza para cada amplitude de tensão e os respectivos desvios padrão, para as regiões longitudinais e transversais. Analisando-se a tabela, nota-se que há uma diferença entre as duas regiões, transversais e longitudinais. A região transversal, tende a possuir um tamanho de grão menor do que a região longitudinal, desta forma, a dureza da região com menor tamanho de grão será maior. Comparando-se os valores da tabela 3 com o valor da dureza inicial desta liga como 167 HV 0,5 kg, nota-se que para ambas as regiões os valores são maiores do que o valor de dureza do material em sua condição inicial, antes de ser submetido ao ensaio de fadiga, isto indica que a fadiga proporcionou um aumento da dureza do material. Uma justificativa que pode ser considerada é o aumento de discordâncias ocasionado pela aplicação da tensão durante o teste, a interação entre as discordâncias leva a um aumento da dureza do material.

Tabela 3. Tabela de microdureza Vickers para as regiões longitudinais e transversais.

Amplitude de tensão	Longitudinal (HV 0,5 kg)	Transversal (HV 0,5 kg)
125,0	232 \pm 7	228 \pm 9
122,5	226 \pm 14	243 \pm 9
120,0	233 \pm 12	235 \pm 6
117,5	232 \pm 11	235 \pm 8
115,0	231 \pm 11	237 \pm 5
112,5	231 \pm 7	235 \pm 8

O ensaio de fractografia avaliou dois corpos de prova 4 e 15, sendo estes com números de ciclos de vida de 37465 e 321320, respectivamente. Desta forma, foi possível analisar a superfície da fratura e identificar os mecanismos de dano com diferentes valores de ciclos de vida até a ruptura do material durante o teste de fadiga. O primeiro corpo de prova analisado foi o corpo de prova 4, no qual obteve 37465 ciclos até a sua ruptura e sua tensão de amplitude era de 122,5 MPa. A figura 11 apresenta a superfície da fratura deste corpo de prova contendo alvéolos e aspecto de estrição, como uma fratura dúctil. O segundo corpo de prova analisado foi o corpo de prova 15, no qual obteve 321320 ciclos até a sua ruptura e sua tensão de amplitude era de 115,0 MPa. A figura 12 mostra superfície da fratura deste corpo de prova, contendo estrias e menor quantidade de alvéolos. Portanto, a medida que se aumenta a amplitude de tensão, maior a característica da superfície de uma fratura dúctil.

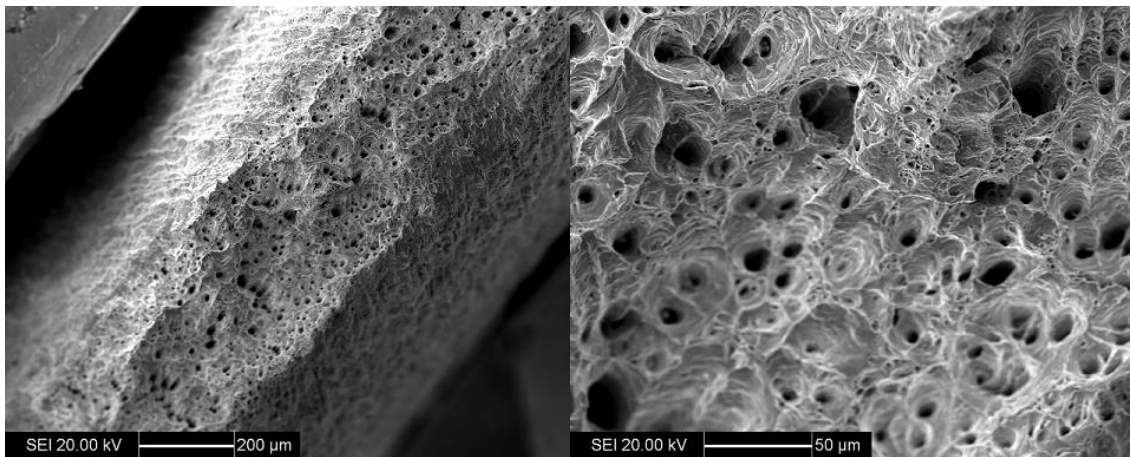


Figura 11. Superfície da fratura do corpo de prova 4.

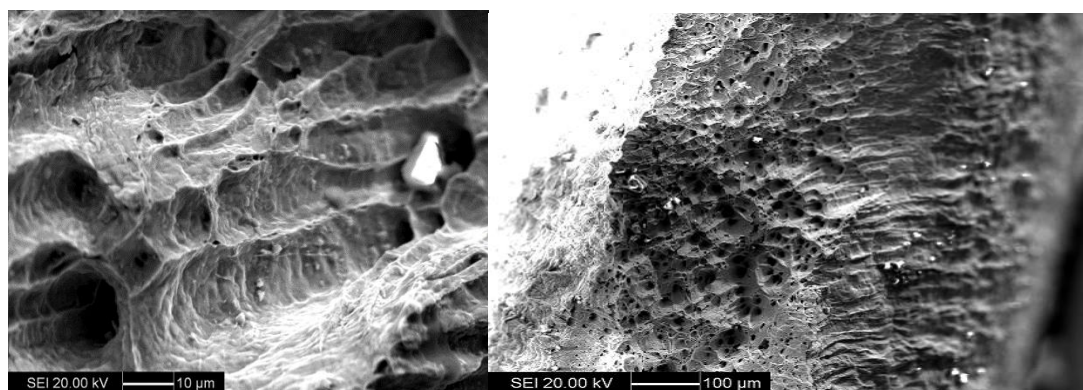


Figura 12. Superfície da fratura do corpo de prova 15. Estrias podem ser observadas.

4 CONCLUSÃO

O ensaio de dureza não demonstrou grandes dispersões. Todas as amostras tiveram um valor de dureza próximo ao se comparar as mesmas regiões (longitudinal ou transversal) independente das tensões de amplitudes utilizadas, obtendo-se um valor de desvio de padrão baixo. Notou-se que as durezas das regiões transversais obtiveram valores pouco maiores se comparado as regiões longitudinais, isso se deve pelas regiões transversais estarem mais próximas a região onde houve a fratura, o que fez com que houvesse maior tensão aplicada nesta região e seu tamanho de grão menor. As durezas de ambas as regiões foram maiores que o valor inicial fornecido, isto provavelmente deve ser resultado do aumento de discordâncias causada pela aplicação de tensão de tração durante o ensaio de fadiga.

As microestruturas não demonstraram nenhum defeito ou presença de inclusões, apenas a presença de alguns pites nos contornos de grão, ocasionados pelo ataque eletrolítico para revelar a microestrutura do aço inoxidável ferrítico estudado. Foi possível analisar o tamanho dos grãos nas duas regiões (longitudinal e transversal). Notou-se também o alongamento dos grãos no sentido longitudinal, indicando o sentido da tração imposta pelos corpos de prova durante o ensaio de fadiga.

A partir da tensão de amplitude de 112,5 MPa os resultados do ensaio de fadiga obtiveram valores na escala de 10^6 ciclos de vida, portanto, caso este material fosse ensaiado em um ensaio de fadiga utilizando uma tensão de amplitude próxima ao seu limite de escoamento, sendo esta de 75 MPa, seria bem provável que os ciclos de vida dos corpos de prova fossem extremamente alto até sua fratura ou até mesmo não fraturassem por terem atingido o limite de fadiga. Desta forma, este material seria

de grande utilização para aplicações em tensões cíclicas, devido principalmente a sua alta resistência a fadiga e por ser um aço inoxidável de baixo custo se comparado aos outros aços inoxidáveis (austenítico e martensítico).

Foi possível observar que quanto maior o número de amplitude de tensão utilizada, conseqüentemente menores os ciclos de vida, maior a característica de uma fratura de tração, com grande presença de alvéolos e poucas estrias. A medida que se diminuía a tensão de amplitude imposta, mais a superfície da fratura se caracterizava por ser uma fratura frágil, com poucas ou nenhuma presença de alvéolos, maior quantidade de estrias e crateras. Porém, não foi possível identificar nenhum tipo de defeito ou inclusão que possa justificar a dispersão de dados obtidas após o ensaio de fadiga.

REFERÊNCIAS

- 1 SILVA e MEI, André Luiz V. da Costa e Paulo Roberto. Aços e Ligas Especiais. 3ª ed. Blucher, 2010. C. 1, 5 e 7, p. 1 – 417.
- 2 HOSFORD, F. W. Mechanical behavior of materials. Cambridge University Press, 2005.
- 3 BONORA, Rafael Gustavo. Fadiga e corrosão de aço inoxidável Custom 465 de aplicação aeronáutica. 2011. 100 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/94438>>.
- 4 BRNIC, J.; TURKALJ, G.; CANADIJA, M.; LANC, D.; KRSCANSKI, S.; BRCIC, M.; LI, Q.; NIU, J. Mechanical Properties, Short Time Creep, and Fatigue of an Austenitic Steel. Materials, 2016; 9, 298.
- 5 REDDY, G. V. P. et al. Behavior of 321 stainless steel under engineering stress and strain controlled fatigue, International Journal of Fatigue, 2016; 92, 272–280.
- 6 DOWLING, N. E. Mechanical Behavior of Materials. 3ª ed. Pearson Prentice Hall, Inc. 2007.
- 7 HUBMANN, T. B. Obtenção de diferentes distribuições de tamanhos de grão por intermédio de deformação plástica e recristalização e/ou crescimento de grão em um aço inoxidável ferrítico UNS S43932. Fundação Educacional Inaciana. 2016.
- 8 VIEIRA, G. F. F. Comportamento à fadiga em controle por deformação de aço inoxidável ferrítico. FEI. 2014.
- 9 American Society for Testing and Materials (ASTM). E468, Standard Practice for Presentation of Constant Amplitude Fatigue Test Results for Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004.
- 10 American Society for Testing and Materials (ASTM). Adjunct to E112 Methods for Determining the Average Grain Size. E112, 2012.
- 11 American Society for Testing and Materials (ASTM). E384, Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials, 2016.