

COMPORTAMENTO EM FADIGA DE PINOS FUSÍVEIS MECÂNICOS DE Ti-6Al-4V ATRAVÉS DA CURVA DE WÖHELER¹

Jefferson Haag²
Bill Paiva dos Santos²
Vagner Machado Costa²
Cíntia Gabriely Zimmer³
Guilherme Vieira Braga Lemos³
Telmo Roberto Strohaecker⁴

Resumo

Pinos fusíveis mecânicos, para uso em sistemas *Breakaway*, são utilizados como dispositivos de segurança em válvulas acopladas entre mangotes transportadores de petróleo. Os pinos devem romper caso haja sobrecarga trativa, favorecendo o fechamento da válvula e o impedimento do fluxo de petróleo. Mesmo que o pino tenha a função de agir sob ação de tensões estáticas, ele pode sofrer falha por fadiga, gerando paradas prematuras de manutenção. Este trabalho investiga o comportamento em fadiga de pinos fusíveis fabricados a partir da liga Ti-6Al-4V, com raio de concordância de 3,0 mm comparado a resultados de estudos já realizados com pinos de 0,6 mm e 4,0 mm. A análise foi realizada através da comparação de curvas S-N dos diferentes raios utilizados nos pinos. Para tanto, foram realizados ensaios de fadiga uniaxial com razão de carregamento de 0,1 e frequência de 20 Hz. Os resultados obtidos comprovam que maiores raios de concordância aumentam a vida em fadiga e, assim, diminuem a possibilidade de falha prematura por fadiga do pino.

Palavras-chave: Pinos fusíveis mecânicos; Fadiga; Ti-6Al-4V; Curva S-N.

FATIGUE BEHAVIOUR OF Ti-6Al-4V BREAK BOLTS THROUGH THE WÖHLER CURVE

Abstract

Break bolts are used in the Double Closure Breakaway Coupling as safety devices in valves coupled hoses between transporters of oil. The break bolts must break due to tractive overloading. It makes to close the valve and prevent the flow of oil. Even if the break bolt has the function of working through the action of static stresses, it can suffer fatigue failure that can result in premature stops. This work investigates the fatigue behavior of break bolts manufactured from Ti-6Al-4V alloy, with radius of 3.0 mm compared to the results of previous studies with break bolts 0.6 mm and 4.0 mm. The analysis was performed by comparing S-N curves of different radius used to break bolts. Fatigue tests were carried out with uniaxial loading ratio of 0.1 and 20 Hz frequency. The results show that larger radius of concordance increase fatigue life and thus reduce the possibility of fatigue failure of the pin.

Key words: Break bolts; Fatigue; Ti-6Al-4V; S-N curves.

¹ Contribuição técnica ao 68^o Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Engenheiro Metalúrgico, PPGE3M, UFRGS, RS, Brasil.

³ Engenheiro Metalúrgico, MSc, PPGE3M, UFRGS, RS, Brasil.

⁴ Engenheiro Metalúrgico, Professor Doutor, PPGE3M, UFRGS, RS, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O estudo sobre pinos fusíveis mecânicos para aplicação em sistemas de segurança no transporte de petróleo, *Double Closure Marine Breakaway Coupling* (duplo fechamento do acoplamento marinho), pelo Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF), iniciou em 2002.⁽¹⁾

O sistema *Breakaway* é conectado entre as seções dos mangotes transportadores de petróleo. Os pinos fusíveis são fixados na junção dos acoplamentos, de forma que, após sua ruptura (caso solicitado) aciona o fechamento da válvula impedindo o fluxo de petróleo pelos mangotes.

Desta forma, os pinos são projetados para romperem (pelo esforço trativo) em caso de sobrecarga e/ou quando a pressão interna da tubulação alcançar um valor crítico determinado. Sendo assim, a ruptura dos pinos é importante para prevenir que os mangotes rompam primeiro, causando o derramamento de petróleo em águas marítimas, gerando impactos ambientais.^(2,3)

A Figura 1 mostra um mangote transportador de petróleo. Em destaque vemos a válvula *Breakaway*, onde as setas indicam as posições dos pinos fusíveis e as pétalas que se fecham após a ruptura dos pinos bloqueando o fluxo de petróleo.

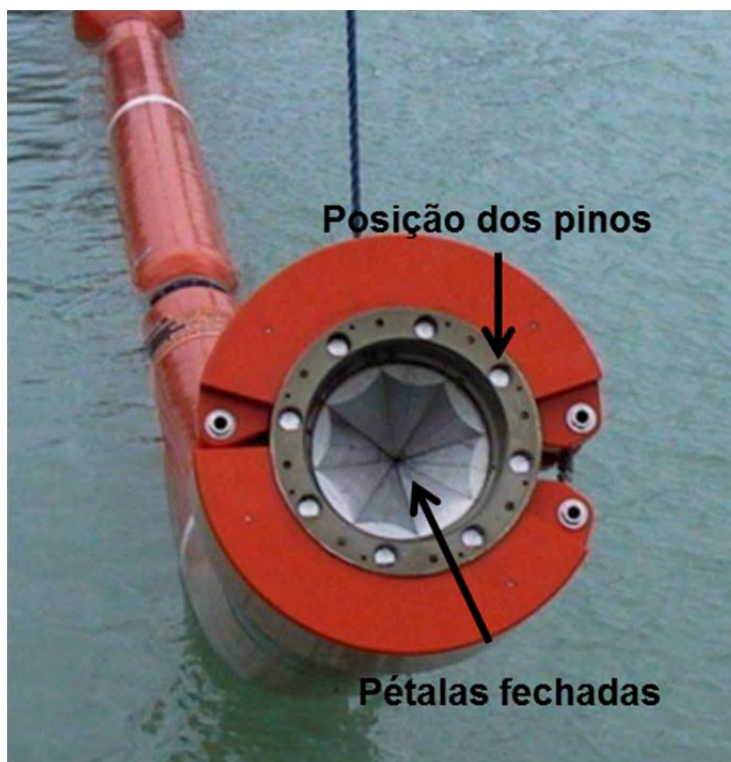


Figura 1. *Double Closure Marine Breakaway Coupling*.⁽³⁾

Geralmente, os pinos são fabricados a partir da liga de titânio Ti-6Al-4V, justamente pelo fato do ambiente de trabalho dos pinos serem águas marítimas, onde o meio é mais agressivo devido à presença de cloretos e outros fluidos, e também por ter uma tensão de ruptura bastante definida.⁽²⁾

Em uma análise realizada pelo LAMEF, verificou-se que os pinos fusíveis estavam fraturando prematuramente por fadiga e não por sobrecarga, em virtude do raio de concordância que atuava com concentrador de tensões. Foi sugerida a alteração da geometria dos pinos, visando o aumento do limite de resistência à fadiga sem que houvesse aumento significativo da resistência à ruptura, ou seja, aumento superior

ao limite de ruptura que age como fator de segurança do sistema. Basicamente foi modificado o raio de concordância, que primordialmente era de 0,6mm e foi comparado a um pino confeccionado com um raio de 4 mm. Obtiveram-se resultados consideráveis na vida útil desses pinos.⁽¹⁾ A influência da microestrutura também foi avaliada e também apresentou influência no limite de resistência à fadiga.⁽²⁾

O objetivo desse trabalho é investigar o comportamento em fadiga de pinos fusíveis fabricados a partir da liga Ti-6Al-4V, com raio de concordância de 3,0 mm, comparando-os com os pinos de raios de 0,6 mm e 4,0 mm em trabalho realizado por Senna.⁽¹⁾

2 MATERIAL E MÉTODOS

A partir de barras da liga Ti-6Al-4V com 19,0 mm de diâmetro (Figura 2a), foram usinados corpos de provas com raio de concordância de 3,0 mm (Figura 2b).

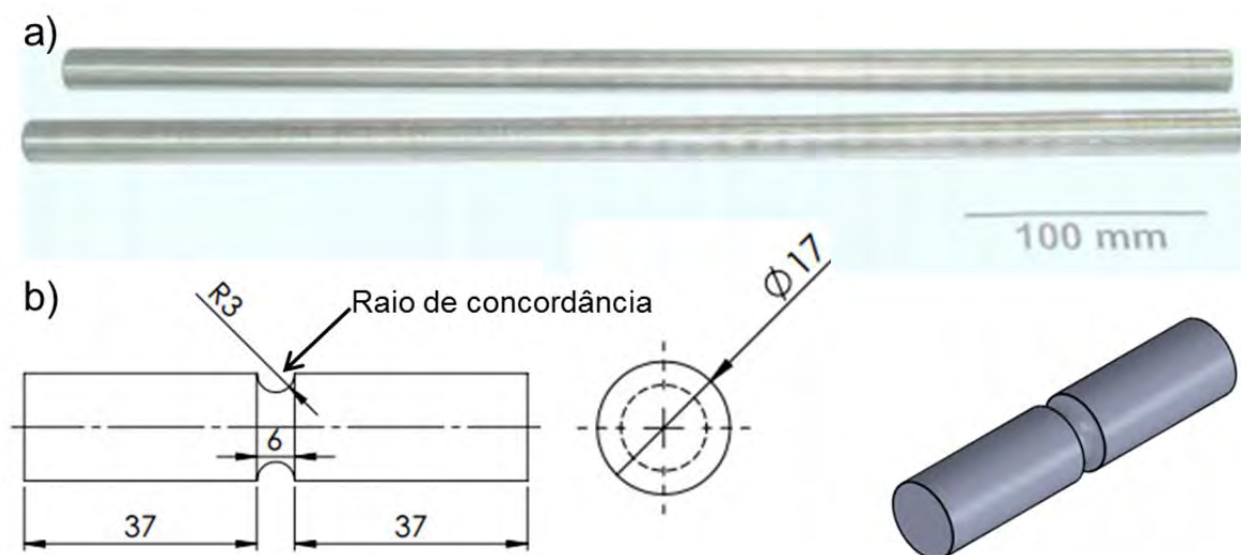


Figura 2. (a) Barras da liga Ti-6Al-4V. (b) Geometria do corpo de prova.

Uma análise química foi realizada nas barras com o objetivo de comparar os valores obtidos com os dados fornecidos pelo fabricante e verificar se os valores se encontram de acordo com a norma ASTM B 381-09.⁽⁴⁾ O ensaio de tração foi realizado em uma máquina eletromecânica da marca Instron modelo 5585H, sob temperatura ambiente (25°C) e taxa de carregamento de 0,05 mm/min.

Também foi retirada uma amostra na seção transversal da barra para caracterização metalográfica. A amostra foi preparada e atacada, conforme rota típica de preparação metalográfica,⁽⁵⁾ onde se utilizou uma solução chamada Kroll, com 3 mL de ácido fluorídrico, 6 mL de ácido nítrico e 91 mL de água. A técnica utilizada foi de imersão da amostra, acompanhando a revelação da microestrutura (cerca de 10 segundos).

Para determinar o limite de resistência à fadiga e avaliação do comportamento dos pinos foram realizados ensaios de fadiga, seguindo a norma ASTM E466.⁽⁶⁾ Foram ensaiadas 12 amostras conforme os dados da Tabela 1. Os ensaios foram realizados em uma máquina servo-hidráulica, marca MTS, modelo 810, com razão de fadiga (R) de 0,1, frequência de 20Hz e utilizado um runout de 1.000.000 de ciclos, sendo este o número de ciclos em que se considera o material com vida

infinita. A banda superior e banda inferior (Figura 6), são as representações gráficas das incertezas calculadas com uma confiabilidade de 95%, conforme a norma XIII-Wg1-114-03.⁽⁷⁾

Tabela 1. Valores das tensões utilizadas no ensaio de fadiga para cada amostra e a porcentagem correspondente a tensão de ruptura

| Amostra | $\sigma_{\text{máx}}$ (MPa) | $\sigma_{\text{máx}}/\sigma_{\text{ruptura}}$ (%) |
|---------|--------------------------------|--|
| 1 | 550 | 44 |
| 2 | 550 | 44 |
| 3 | 500 | 40 |
| 4 | 500 | 40 |
| 5 | 500 | 40 |
| 6 | 400 | 32 |
| 7 | 400 | 32 |
| 8 | 400 | 32 |
| 9 | 400 | 32 |
| 10 | 375 | 30 |
| 11 | 350 | 28 |
| 12 | 350 | 28 |

3 RESULTADOS

3.1 Análise Química

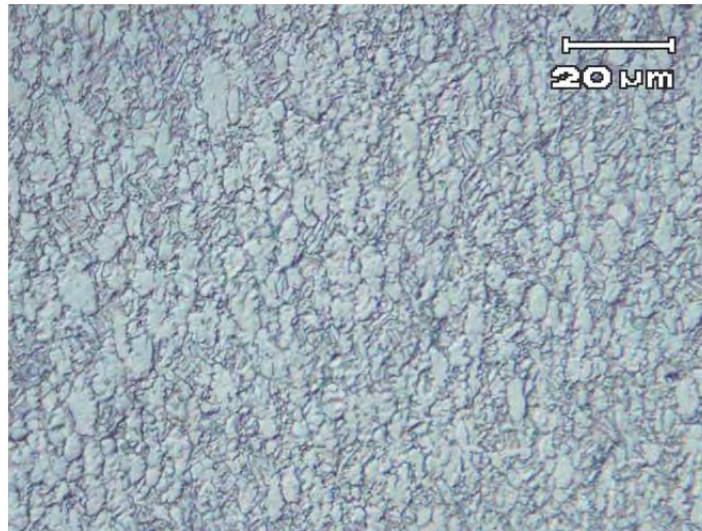
A Tabela 2 mostra a composição química da liga Ti-6Al-4V, utilizada para fabricação do pino com raio de 3,0 mm, realizada através da análise por espectrometria de emissão ótica (equipamento Espectrômetro de emissão ótica marca Quantron/Magellan modelo QM/V/L).

Tabela 2. Composição química da liga de Titânio (porcentagem em massa) para o pino de r=3,0mm. Comparação entre o resultado da análise feito no laboratório, a norma ASTM B381-09 e o laudo emitido pelo fornecedor das barras

| Elementos | N | C | Fe | O | Al | V | Ti |
|--|------------------|---------------|--------------|--------------|----------------|---------------|-------------|
| Faixa Ti-6Al-4V (ASTM B 381-09) | Máx. 0,005 | Máx. 0,010 | Máx. 0,40 | Máx. 0,20 | 5,50- 6,675 | 3,50- 4,50 | Bal. |
| Laudo do Fornecedor | 0,002 | 0,010 | 0,180 | 0,102 | 5,960 | 4,000 | Bal. |
| Análise Química realizada | <0,005 | 0,010 | 0,2 | 0,063 | 6,071 | 3,956 | Bal. |

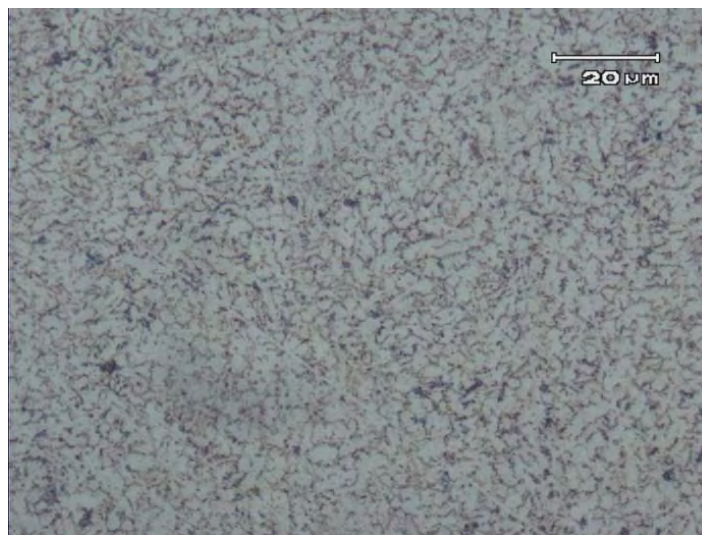
3.2 Micrografia

As micrografias das Figuras 3, 4 e 5 apresentam as microestruturas dos três diferentes tipos de pinos comparados neste trabalho. As microestruturas encontradas são características da liga Ti-6Al-4V.



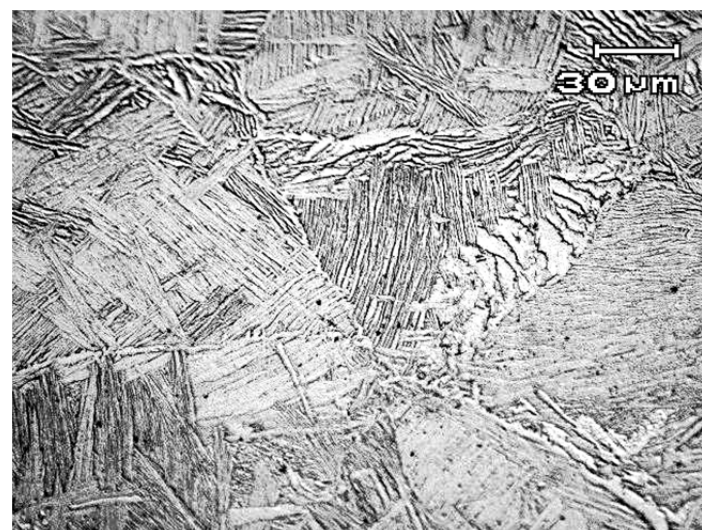
1000X

Figura 3. Microestrutura do pino com raio de 0,6mm composta pelas fases alfa e beta globular.⁽¹⁾



1000X

Figura 4. Microestrutura do pino com raio de 3,0mm composta pelas fases alfa e beta globular.⁽¹⁾



500X.

Figura 5. Microestrutura do pino com raio de 4,0mm composta pelas fases alfa e beta acicular.⁽¹⁾

3.3 Ensaio de Tração

A Tabela 3 apresenta o valor da tensão de ruptura obtida para o ensaio de tração do pino com raio de concordância de 3,0 mm. Os resultados da tensão de ruptura dos pinos com raio de concordância de 0,6 mm e 4,0 mm, encontrados por Senna,⁽¹⁾ estão apresentados na tabela de modo comparativo

Tabela 3. Resultados dos ensaios de tração dos pinos de Ti-6Al-4V com diferentes raios

| Raio de concordância do pino | Tensão Ruptura (MPa) |
|------------------------------|----------------------|
| 3,0mm | 1274 |
| 4,0mm | 1162 |
| 0,6mm | 1050 |

3.4 Ensaio de Fadiga

A Figura 6 apresenta a curva S-N para os pinos ensaiados com raio de 3,0 mm. As setas representam que as amostras não romperam. A partir desses resultados foi realizada a comparação com os pinos de raios 0,6 mm e 4,0 mm.

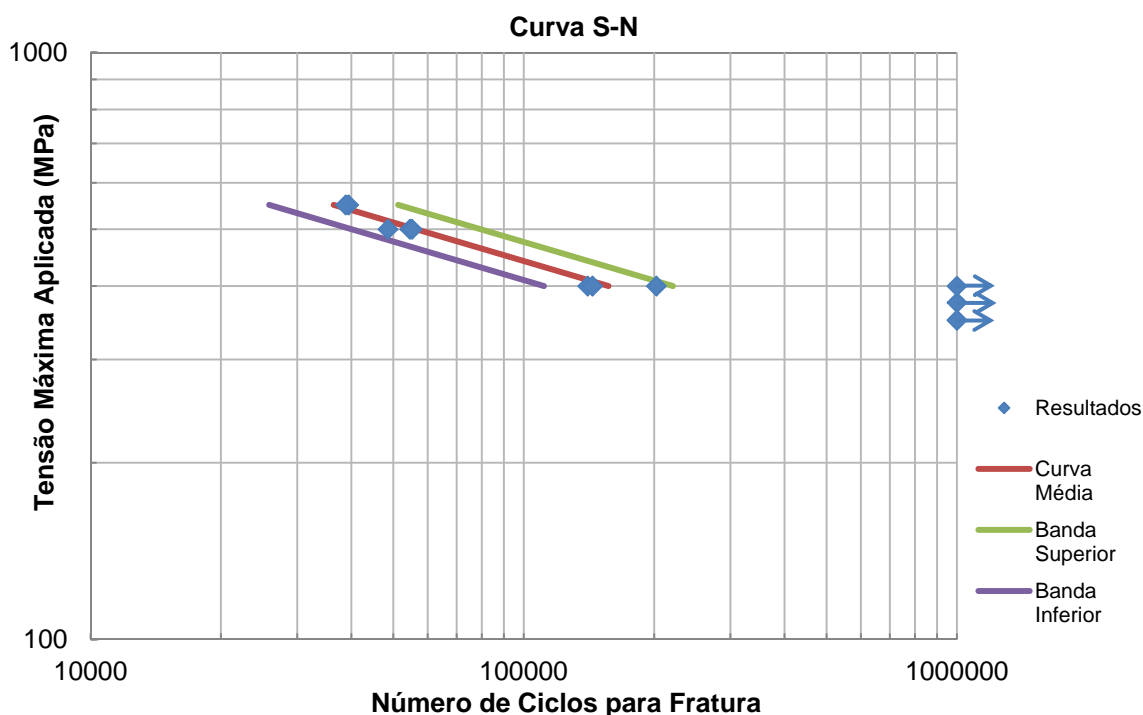


Figura 6. Curva S-N do pino com raio de concordância de 3,0 mm.

Os valores de limite de fadiga são apresentados na Tabela 4. A Figura 7 apresenta as curvas S-N obtidas através de ensaios de fadiga para os pinos com os diferentes raios de concordância. A Figura 7a mostra os resultados obtidos para o pino com raio de 3,0 mm sem a representação das linhas de banda superior e banda inferior. A Figura 7b apresenta os resultados obtidos por Senna⁽¹⁾ em trabalho similar onde utilizou pinos com raio de concordância de 0,6 mm e 4,0 mm.

Tabela 4. Limite de fadiga para os pinos de raio $r = 0,6$ mm, $r = 3,0$ mm e $r = 4,0$ mm

| Raio de concordância do pino (mm) | Limite de Fadiga (MPa) |
|-----------------------------------|------------------------|
| 0,6 | 210 |
| 3,0 | 375 |
| 4,0 | 450 |

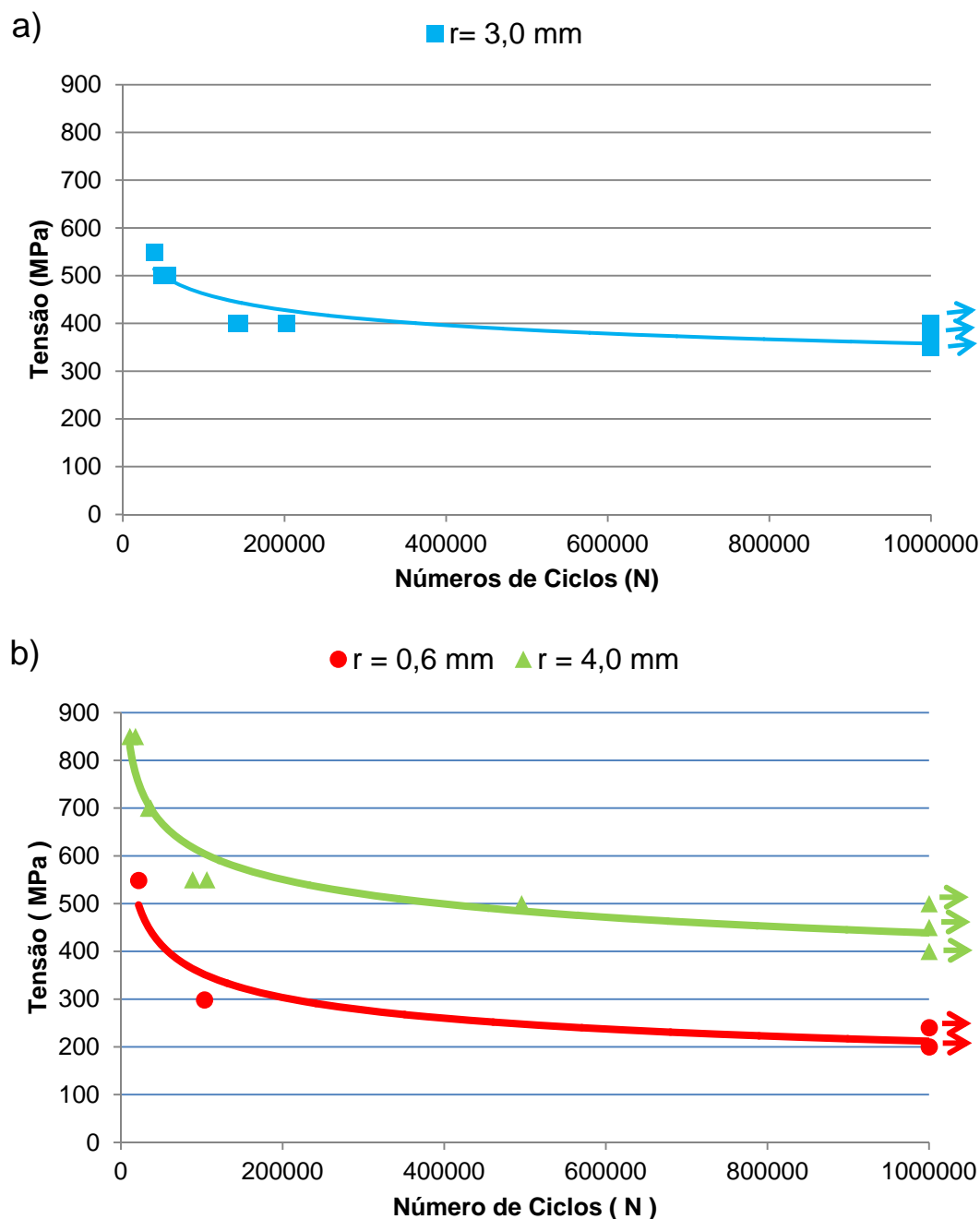


Figura 7. Curva S-N para o pino de raio igual a 3,0 mm (a) e para os pinos de raio igual a 0,6 mm e 4,0 mm obtidos por Senna.⁽¹⁾

Para fim de comparação dos diferentes raios de concordância dos pinos, foram plotadas as três curvas S-N no mesmo gráfico (Figura 8).

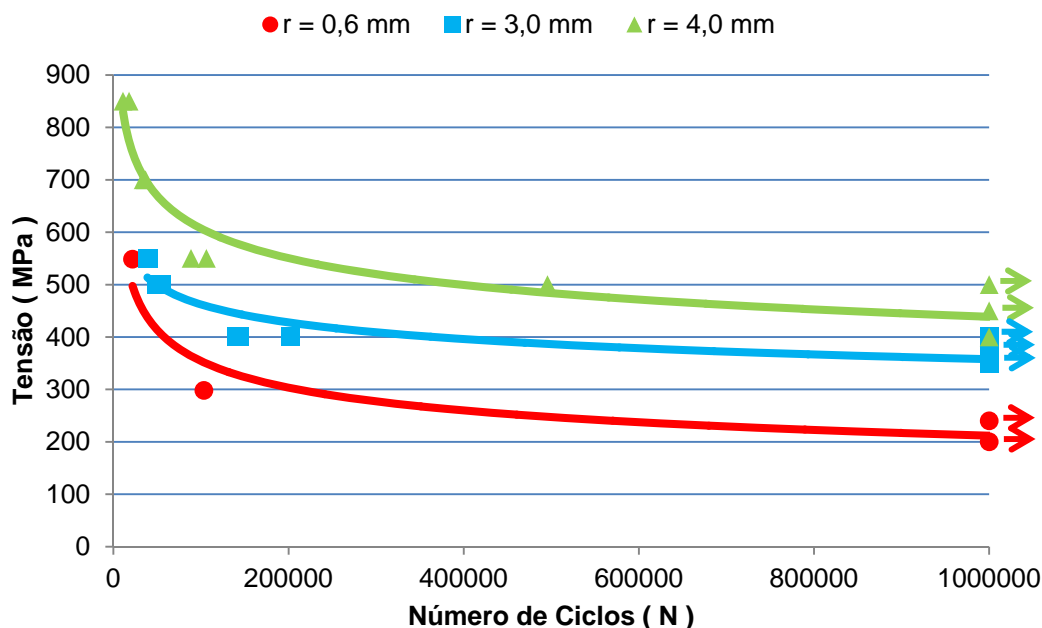


Figura 8. Curva S-N comparando os resultados obtidos para os pinos com raio de concordância igual a: 0,6 mm, 3,0 mm e 4,0 mm.

4 DISCUSSÃO

O pino fusível mecânico com raio de 3,0 mm (componente avaliado neste trabalho) apresentou maior resistência à fadiga do que o pino com 0,6 mm e menor resistência do que o pino com 4,0 mm de raio de concordância (componentes avaliados por Senna).⁽¹⁾

Estes dados mostram que o aumento do raio de concordância causou um acréscimo na vida em fadiga do pino, sem afetar o sistema de segurança do sistema pelo limite máximo de ruptura. Este fator está relacionado com o Kt (concentrador de tensão) da geometria do pino^(1,8) que é mais acentuado em condições de fadiga do que em tensões puramente tratativas e/ou com a condição superficial do componente (ka).⁽¹⁾ Na análise química do material, nenhum elemento apresentou desvio em relação à composição química determinada por norma. A composição química fornecida pelo fornecedor também se encontra dentro do estabelecido.

As microestruturas dos três tipos de pinos apresentaram morfologias diferentes, pois cada trabalho foi realizado em um período distinto, logo os pinos não foram obtidos das mesmas barras produzidas em uma única corrida. Apesar de serem fabricados com o mesmo material (Ti-6Al-4V), diferentes processamentos ocasionaram essa diferença. Zimmer⁽⁹⁾ verificou a influência do tratamento térmico no desempenho em fadiga de pinos da liga Ti-6Al-4V e demonstrou que a microestrutura modificada através do tratamento térmico pode contribuir de maneira benéfica para a vida em fadiga dos componentes desta liga. Porém, pelos resultados obtidos, o fator governante para vida em fadiga dos pinos é o raio de curvatura. Conforme estudos de Zimmer,⁽⁹⁾ se o pino de raio de curvatura igual a 4,0 mm apresentasse uma microestrutura equiaxial, este pino apresentaria um desempenho em fadiga ainda melhor.

5 CONCLUSÕES

Através dos resultados obtidos, torna-se evidente a importância do raio de concordância na vida em fadiga dos pinos fusíveis mecânicos, para aplicação em válvula *Breakaway*.

O pino fusível com raio de concordância de 3,0 mm apresentou melhor desempenho em fadiga do que o pino de raio 0,6 mm, porém, pior desempenho quando comparado com o pino com raio de 4,0 mm.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio.

REFERÊNCIAS

- 1 SENNA, P. J. Estudo de falha e vida em fadiga de pinos de titânio de uma liga Ti-6Al-4V Trabalho de Conclusão de curso, UFRGS, Porto Alegre, RS- 2003.
- 2 ZIMMER, C. G. Influência da oxidação térmica sobre as propriedades de fadiga da liga Ti-6Al-4V. Trabalho de dissertação, UFRGS, Porto Alegre, RS-2011.
- 3 OCIMF. Marine breakaway couplings. Information paper. Oil Companies International Marine Forum, London, 2008.
- 4 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS ASTM B 381: Standard Specification for Titanium and Titanium Alloy Forgings, Pennsylvania, USA, 2009
- 5 METALS HANDBOOK, Metallographic and Microstructure, book 9, 6^o edition, 1995.
- 6 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E466: Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials. West Conshohocken, PA, 2009.
- 7 XIII-WG1-114-03: Best Estat. Analysis of Fad Data, Cambridge, UK, 2003.
- 8 STROHAECKER, T.R. Mecânica da Fratura. Notas de Aula-2011.
- 9 ZIMMER, C. G. Avaliação de comportamento em fadiga de uma liga Ti-6Al-4V tratada termicamente. Trabalho de diplomação, UFRGS, Porto Alegre, RS-2009.