



# TENACIDADE À FRATURA E RESISTÊNCIA AO CRESCIMENTO DE TRINCA POR FADIGA DE DOIS AÇOS USADOS EM EIXOS DE CARROS-TORPEDO<sup>1</sup>

Wagner Duarte Flores<sup>2</sup>  
Ricardo Tadeu Meneses Sodré<sup>3</sup>  
Leonardo Barbosa Godefroid<sup>4</sup>

## Resumo

Uma análise de falha realizada recentemente em um eixo de carro-torpedo de uma siderúrgica constatou a sua degradação por fadiga, principalmente devido a concentração de tensões e à exposição em elevadas temperaturas de trabalho. O presente trabalho propõe a substituição do material empregado no referido eixo por um aço de resistência mecânica superior. Os dois aços estruturais são avaliados, em termos de sua tenacidade à fratura (CTOD de carga máxima) e resistência à propagação de trinca por fadiga (curvas  $da/dN \times \Delta K$ ).

**Palavras-chave:** Tenacidade à fratura; Crescimento de trinca por fadiga; Eixo de carro-torpedo.

## FRACTURE TOUGHNESS AND FATIGUE CRACK GROWTH OF TWO STRUCTURAL STEELS USED IN A HOT-METAL TRANSFER CAR

### Abstract

Failure analysis of a steel axle used in a hot-metal transfer car from a steel industry has detected a mechanism of fatigue degradation, mainly due to stress concentration and to high temperature exposition. This research suggests the substitution of the steel by a more resistant steel. The two steels are studied, in terms of their fracture toughness (CTOD) and fatigue crack growth resistance ( $da/dN \times \Delta K$  curves).

**Keywords:** Fracture toughness; Fatigue crack growth; Hot-metal transfer car.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>2</sup> Aluno de Eng. Metalúrgica, UFOP, Ouro Preto – MG.

<sup>3</sup> Eng. Mecânico, M.Sc., ARCELORMITTAL TUBARÃO, Vitória, ES.

<sup>4</sup> Professor, M.Sc., D.Sc., REDEMAT, UFOP, Ouro Preto – MG.

## 1 INTRODUÇÃO

Carros-torpedo são utilizados para o transporte de gusa líquido do alto forno para a aciaria em uma usina siderúrgica. Esses carros têm capacidade de transportar cerca de 450 t de gusa líquido, e possuem 400 t de peso próprio que são sustentados por 24 rodeiros (conjunto do eixo com as duas rodas ferroviárias) distribuídos ao longo do seu comprimento. A Figura 1 ilustra um destes rodeiros. Os eixos geralmente são confeccionados com o aço ASTM A21H (aço médio carbono, similar ao AISI/SAE 1050), forjado, temperado e revenido. Durante o seu funcionamento, os eixos estão sujeitos ao fenômeno de degradação por fadiga.

Nos últimos anos foi constatada a fratura por fadiga de diversos eixos de carros-torpedo em região de concentração de tensão. A Figura 2 apresenta a superfície de fratura de um desses eixos. Após iniciado o processo de nucleação de trinca em vários pontos do eixo, ocorre a propagação de trinca por aproximadamente 60% da seção, e então ocorre ruptura da seção remanescente. Alguns fatores como temperatura elevada, ambiente de operação corrosivo, flutuações bruscas de tensões e concentradores de tensão no eixo abreviam sua vida a fadiga. O controle desses fatores muitas vezes é inviável. Como exemplo, durante o basculamento do ferro gusa na aciaria ocorre aquecimento do eixo por radiação, visto que nesse momento o ferro gusa se encontra a aproximadamente 1.100°C. Nesse momento o eixo atinge a temperatura de aproximadamente 200°C.



**Figura 1:** Eixo de carro-torpedo, com respingos de gusa e escória em sua superfície.



**Figura 2:** Superfície de fratura por fadiga de um eixo de carro-torpedo.

A fratura dos eixos em operação traz perda de produção e grande dificuldade para substituição dos mesmos, visto que normalmente o carro-torpedo se encontra

carregado de gusa em local de difícil acesso durante a falha. Normalmente a substituição dura em torno de 08 horas e acarreta perda de produção. Neste contexto, o presente trabalho procurou comparar o desempenho do aço ASTM A21H com uma alternativa, que é a utilização do aço AISI/SAE 4130 (aço ultra alta resistência), ambos forjados, temperados e revenidos, em termos de tenacidade à fratura (*CTOD* de carga máxima) e de resistência ao crescimento de trinca por fadiga (curvas  $da/dN \times \Delta K$ ).

## 2 MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

A composição química dos aços utilizados neste trabalho está apresentada na Tabela 1. Trata-se de dois aços do tipo ASTM A21H e AISI/SAE 4130.<sup>(1)</sup>

**Tabela 1:** Composição química dos aços estudados (% em peso)

AMOSTRA	C	Si	Mn	P	S	Al	Cu
ASTM A21H	0,492	0,304	0,710	0,019	0,020	0,017	0,080
AISI 4130	0,279	0,222	0,739	0,015	0,013	0,030	0,063
AMOSTRA	Ni	Cr	Mo	V	Nb	Ti	B
ASTM A21H	0,120	0,214	0,038	0,002	0,001	0,025	0,0001
AISI 4130	0,218	1,100	0,239	0,006	0,000	0,003	0,0002

Os dois aços estudados foram tratados termicamente por têmpera e revenido, para atender as especificações de microestrutura e dureza de eixos empregados nos carros-torpedo. A Tabela 2 mostra alguns itens importantes relacionados com o tratamento térmico realizado nos dois aços, assim como a resistência mecânica por tração (tensão limite de resistência) esperada para estes materiais. A idéia é a obtenção para os dois aços de uma microestrutura de martensita revenida, com resistência relativamente elevada.

**Tabela 2.** Dados do tratamento térmico e resistência mecânica esperada

Aço	Temperatura de austenitização (°C)	Têmpera	Temperatura de revenido (°C)	$\sigma_{LR}$ (MPa) mínimo
ASTM A21H	845	Óleo	595	725
AISI/SAE 4130	875	Água	550	750

Amostras para metalografia foram preparadas e observadas em um microscópio ótico (MO) LEICA com analisador de imagens, usando o reativo químico de Nital 2%. Ensaios de tração, de tenacidade à fratura e de fadiga foram realizados numa máquina servo-hidráulica MTS de 10 t, com aquisição de dados por computador, na temperatura ambiente. As superfícies de fratura foram analisadas num microscópio eletrônico de varredura (MEV) JEOL.

Os ensaios de tração foram realizados de acordo com a Norma ASTM E-8M,<sup>(2)</sup> com controle de deformação, numa velocidade de 5 mm/min, na temperatura ambiente. Os corpos de prova utilizados tinham comprimento útil de 50 mm e seção transversal circular, com diâmetro de 12,5 mm. Foram preparados três corpos de prova para cada aço, sempre na direção longitudinal.

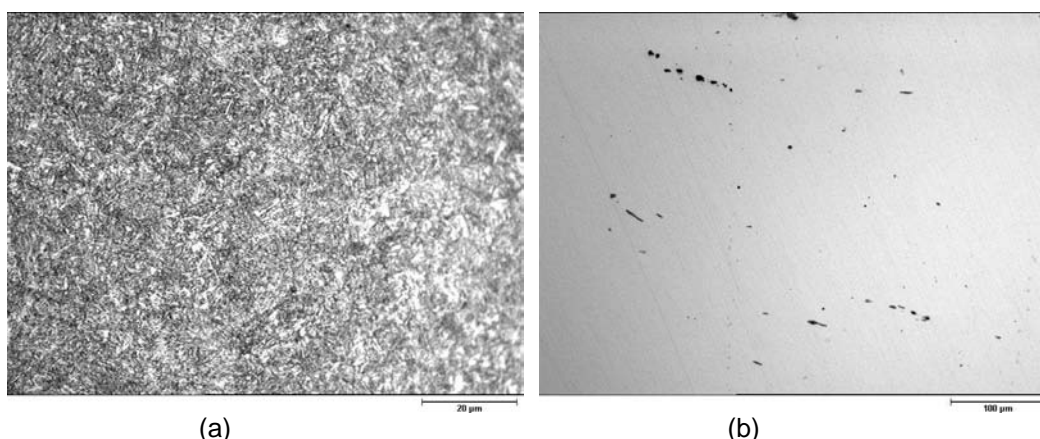
Os ensaios de tenacidade à fratura foram realizados de acordo com a Norma ASTM E-1820,<sup>(3)</sup> na temperatura ambiente. Os corpos de prova foram do tipo C(T), com espessura igual a 12,5 mm, entalhe lateral de 20% da espessura, largura de 50 mm, relação tamanho de trinca pela largura de 0,5 e diâmetro dos pinos de 12,5 mm. Curvas de carga aplicada versus abertura da “boca” do entalhe foram

obtidas, e calculados os valores de CTOD de carga máxima. Foram utilizados cinco corpos de prova para cada aço, orientação LR.

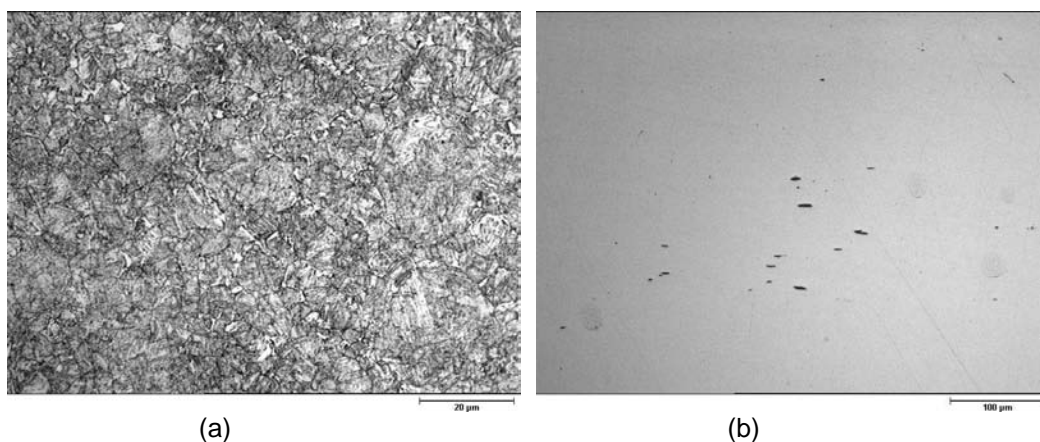
Os ensaios de fadiga foram realizados de acordo com a Norma ASTM E-647,<sup>(4)</sup> na frequência de 30 Hz, razão R entre tensões de 0,1, na temperatura ambiente. Os corpos de prova foram do tipo C(T), com mesmas dimensões dos corpos de prova de tenacidade à fatura. Curvas de tamanho de trinca versus número de ciclos de fadiga foram obtidas pelo método da flexibilidade elástica, e transformadas em curvas de taxa de crescimento de trinca em função do fator cíclico de intensidade de tensões, com determinação do fechamento de trinca. Foram utilizados dois corpos de prova para cada aço, orientação LR.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 3(a,b) e 4(a,b) mostram as microestruturas da seção longitudinal dos eixos, respectivamente para o aço ASTM A21H e AISI/SAE 4130. Em ambos aços pode-se observar martensita revenida, característica do tratamento de têmpera e revenido realizado nas amostras. A estrutura refinada indica uma temperatura de revenido relativamente elevada.<sup>(5)</sup> Observa-se também a presença de inclusões de sulfeto de manganês, série fina de intensidade 2 e 1,5, respectivamente.<sup>(6)</sup>



**Figura 3:** Microestrutura do aço ASTM A21H. Seção longitudinal. (a) Reativo Nital 2%, MO 500X. (b) Sem ataque, MO 100X.

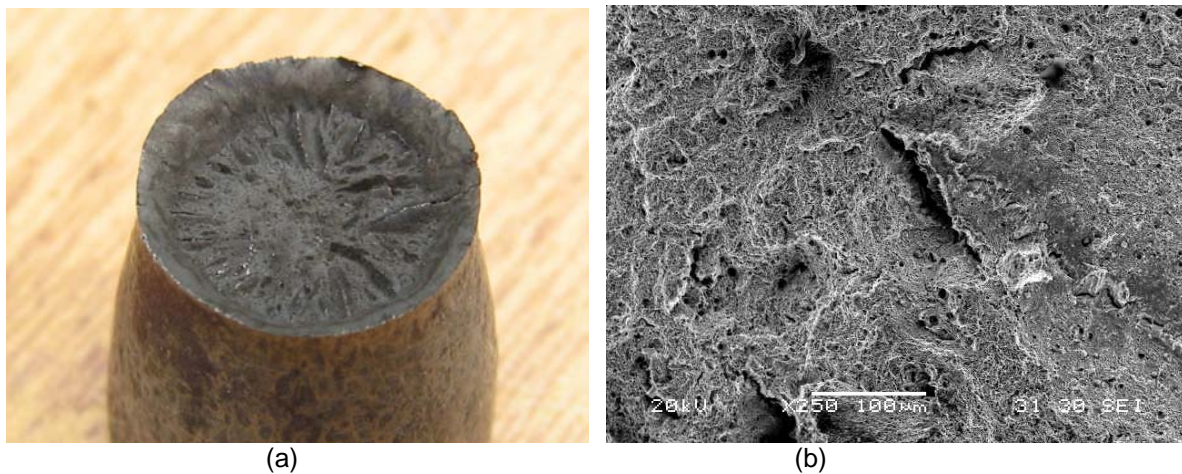


**Figura 4:** Microestrutura do aço AISI/SAE 4130. Seção longitudinal. (a) Reativo Nital 2%, MO 500X. (b) Sem ataque, MO 100X.

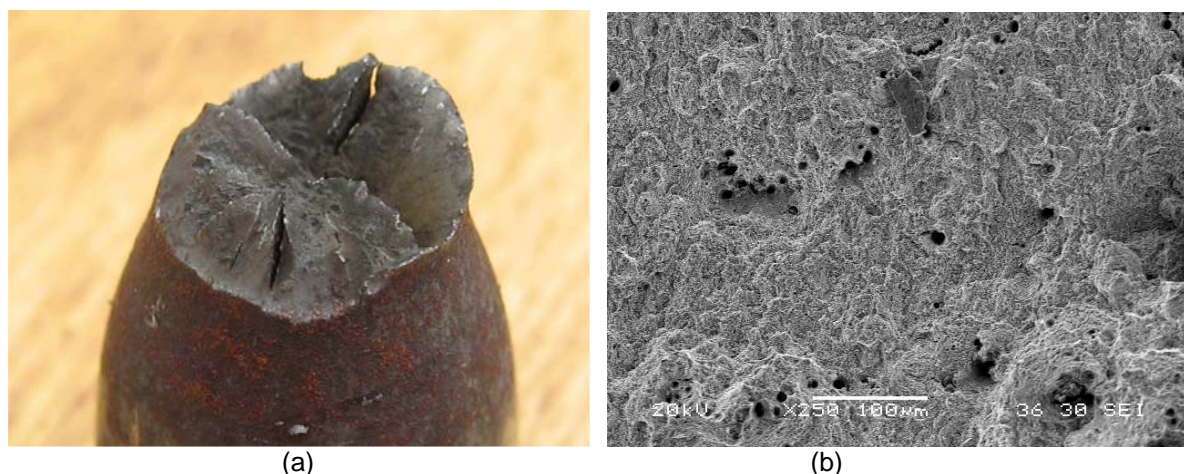
Propriedades mecânicas típicas dos ensaios de tração são apresentadas na Tabela 3. Comparando-se a Tabela 3 com a Tabela 2, percebe-se que os aços atenderam às especificações. O aço AISI/SAE4130 é mais resistente e mais dúctil do que o aço ASTM A21H, implicando numa tenacidade superior. Uma vez que os aços possuem uma microestrutura semelhante, os resultados obtidos nos ensaios de tração mostram a influência da composição química no comportamento mecânico.<sup>(7)</sup> É pertinente comentar também que a maior resistência mecânica por tração do aço AISI/SAE 4130 deve conferir a este aço uma maior resistência à iniciação de trinca por fadiga (relação direta entre o limite de fadiga e o limite de resistência por tração).<sup>(8)</sup> Independentemente dos resultados distintos, o mecanismo de fratura foi idêntico para os dois aços, fratura semi-frágil,<sup>(8)</sup> Figuras 5(a,b) e 6(a,b).

**Tabela 3:** Resultados de propriedades mecânicas de tração

Aço	LR (MPa)	LE (MPa)	ALO (%) 50mm	RA (%)
ASTM A21H	886 ± 14	586 ± 14	15,8 ± 1,6	49,4 ± 0,7
AISI/SAE 4130	921 ± 21	707 ± 10	17,1 ± 0,8	61,7 ± 1,5



**Figura 5:** Superfície de fratura do aço ASTM A21H. Ensaio de tração. (a) Macrofratografia. (b) Microfratografia MEV 250X.



**Figura 6:** Superfície de fratura do aço AISI/SAE 4130. Ensaio de tração. (a) Macrofratografia. (b) Microfratografia MEV 250X.

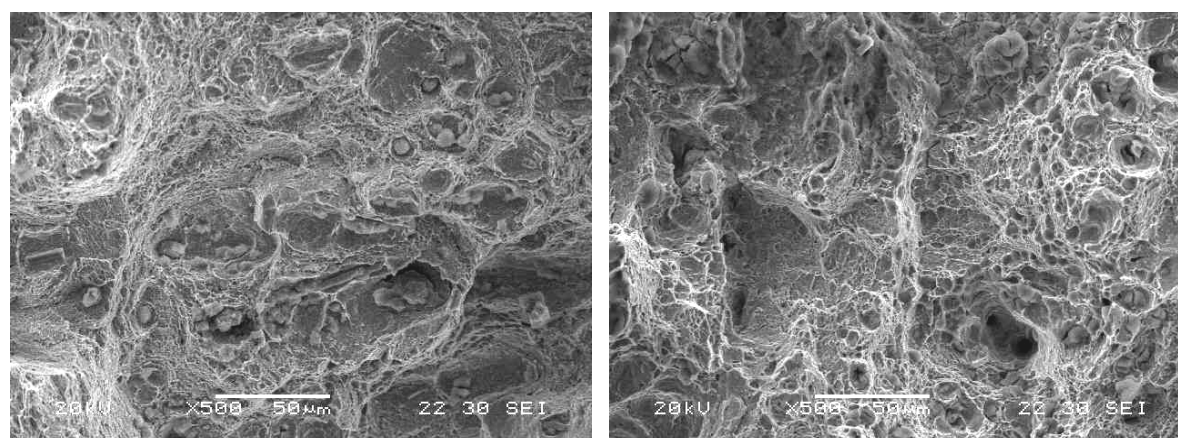
A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos com os ensaios de tenacidade à fratura, através da determinação do valor de CTOD de carga máxima ( $\delta_{max}$ ). Nesta Tabela



são mostrados também os valores de crescimento de trinca ( $\Delta a$ ) correspondentes ao valor da carga máxima, e repetido o valor do limite de escoamento por tração de cada aço. Inicialmente, pode-se observar que existe crescimento de trinca até a carga máxima, justificando a determinação de  $\delta_{max}$ .<sup>(9)</sup> Os valores encontrados para  $\delta_{max}$  são típicos da microestrutura de martensita revenida.<sup>(10)</sup> Conforme já previsto pelos resultados de tração, o aço AISI/SAE 4130 apresentou uma maior tenacidade à fratura do que o aço ASTM A21H. Observa-se também que este valor superior de tenacidade à fratura é conseguido juntamente com uma resistência mecânica por tração também superior. Estes resultados são interessantes para o projeto do eixo de carros-torpedo. Um comportamento semelhante foi observado recentemente por Oliveira e Guimarães,<sup>(11)</sup> comparando-se a tenacidade à fratura ( $K_C$ ) de aços AISI/SAE 1050 e 4130 em função de tratamentos térmicos. Independentemente dos resultados distintos para  $\delta_{max}$ , o mecanismo de fratura foi idêntico para os dois aços, fratura semi-frágil,<sup>(8)</sup> Figura 7(a,b), da mesma forma que os ensaios de tração.

**Tabela 4:** Resultados dos ensaios de tenacidade à fratura

Aço	LE (MPa)	$\Delta a$ (mm)	$\delta_{max}$ (mm)
ASTM A21H	586 ± 14	1,9 ± 0,6	0,17 ± 0,08
AISI/SAE 4130	707 ± 10	2,4 ± 0,5	0,24 ± 0,01



(a) ASTM A21H

(b) AISI/SAE 4130

**Figura 7:** Superfície de fratura, ensaio de tenacidade à fratura, posição correspondente ao valor de  $\delta_{max}$ , MEV 500X.

A Figura 8 mostra o comportamento em fadiga para os dois aços, em termos de curva taxa de crescimento de trinca  $da/dN$  em função do fator cíclico de intensidade de tensões  $\Delta K$ . Pode-se observar um comportamento muito semelhante para os dois aços, nas três regiões das curvas sigmoidais de fadiga. Uma diferença muito pequena existe para o limiar  $\Delta K_{TH}$ , conforme apresentado na Tabela V e explicado pelo desenvolvimento de fechamento de trinca (Figura 9). Em outras palavras, existe uma diferença para a carga de fechamento de trinca  $P_{cl}$  (ou  $K_{cl}$ ), fato que proporciona a diferença de comportamento entre os dois aços na região do limiar  $\Delta K_{TH}$ . Neste caso, o aço AISI/SAE 4130 teve um desempenho inferior ao aço ASTM A21H, de acordo com a relação inversa entre  $\Delta K_{TH}$  e a resistência mecânica por tração.<sup>(12-16)</sup> De qualquer forma, este resultado não deve inviabilizar o emprego do aço AISI/SAE 4130 nos eixos de carros-torpedo, pois a diferença de comportamento é mínima. Deve-se lembrar também, conforme mencionado por ocasião da análise dos resultados de tração, que a resistência à iniciação de trinca por fadiga deve ser

superior para o aço AISI/SAE 4130. A Tabela V apresenta também as constantes C e m da equação de Paris [9] para a região II das curvas sigmoidais, com respectivos coeficientes de correlação. Conclusões similares foram obtidas por Oliveira e Guimarães.<sup>(11)</sup> A análise fractográfica dos corpos de prova ensaiados por fadiga mostrou para os dois aços o comportamento tradicional:<sup>(8)</sup> regiões de cisalhamento na região próxima ao  $\Delta K_{TH}$  - região I das curvas sigmoidais e estrias de fadiga - região II das curvas sigmoidais. As Figuras 10(a,b) e 11(a,b) ilustram estes mecanismos.

Tabela 5: Resultados dos ensaios de fadiga.

Aço	LE (MPa)	$\Delta K_{TH}$ (MPa.m <sup>1/2</sup> )	C	m	r <sup>2</sup>
ASTM A21H	586 ± 14	7,09	4 x 10 <sup>-9</sup>	2,988	0,98782
AISI/SAE 4130	707 ± 10	6,71	17 x 10 <sup>-9</sup>	2,623	0,98254

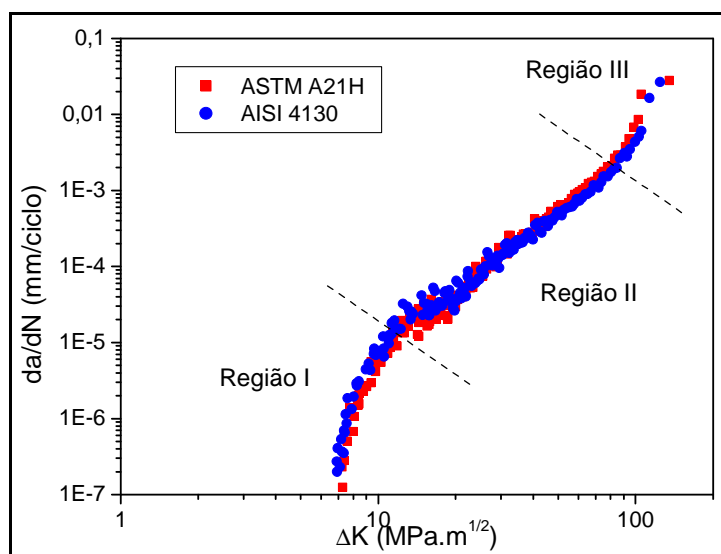


Figura 8: Curva da/dN em função de  $\Delta K$  para os aços estudados. As retas tracejadas delimitam as três regiões da curva sigmoidal.

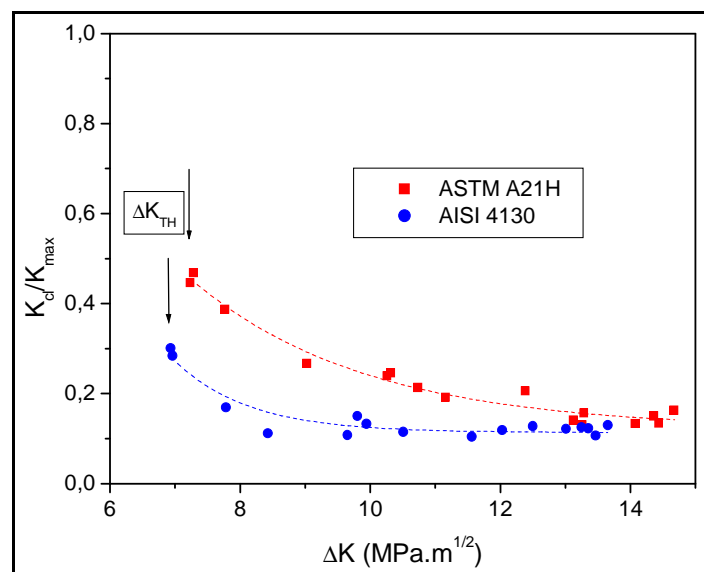
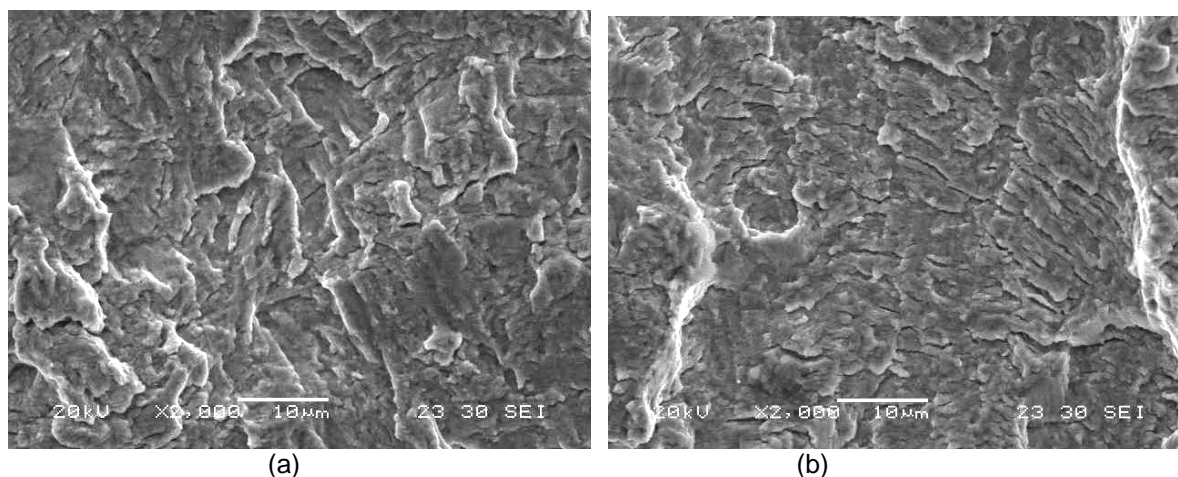
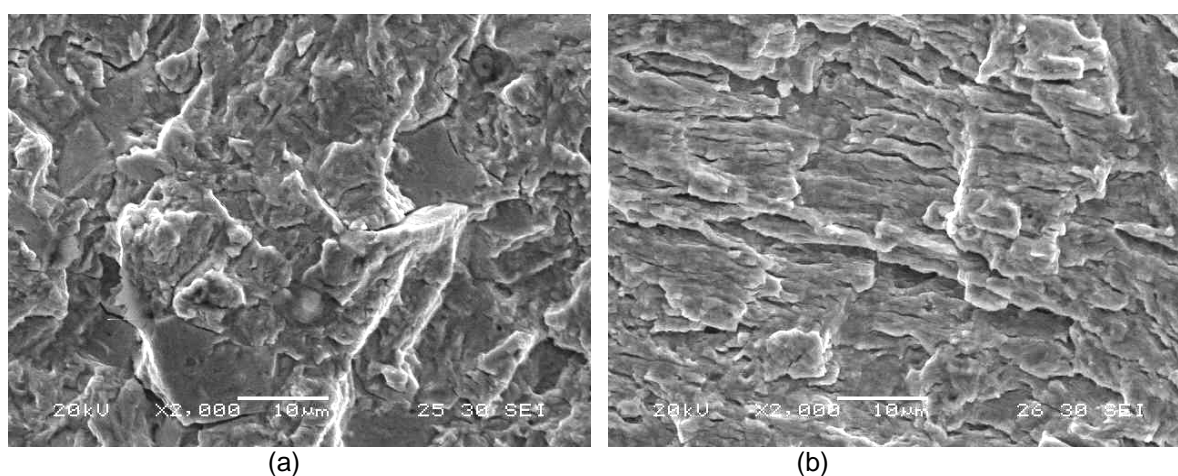


Figura 9: Fechamento de trinca para os aços estudados.



**Figura 10:** Superfície de fratura do aço ASTM A21H. Ensaio de fadiga. MEV 2000X. (a) Região I. (b) Região II.



**Figura 11:** Superfície de fratura do aço AISI/SAE 4130. Ensaio de fadiga. MEV 250X. (a) Região I. (b) Região II.

#### 4 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos e da discussão realizada, as seguintes conclusões podem ser consideradas:

- 1) Os dois aços estudados apresentaram uma microestrutura semelhante, consistindo de martensita revenida, proveniente do tratamento térmico de têmpera e de revenido.
- 2) O aço AISI/SAE 4130 apresentou valores de resistência mecânica e de ductilidade em tração superiores ao aço ASTM A21H, ambos com comportamento semi-frágil.
- 3) O aço AISI/SAE 4130 apresentou uma tenacidade à fratura (CTOD de carga máxima) superior ao aço ASTM A21H, ambos com comportamento semi-frágil.
- 4) Os dois aços estudados apresentaram um comportamento semelhante, no que diz respeito à resistência ao crescimento de trinca por fadiga, com diferença desprezível a favor do aço ASTM A21H na região do limiar de crescimento de trinca.
- 5) A resistência à iniciação de trinca por fadiga não foi considerada neste trabalho. Porém, a partir da relação direta entre o trincamento por fadiga e a resistência mecânica por tração, pode-se prever um melhor desempenho do aço AISI/SAE 4130.



Posto isto, é possível considerar o aço AISI/SAE 4130 como substituto ao aço ASTM A21H para utilização em eixos de carros-torpedo.

## REFERÊNCIAS

- 1 *Metals Handbook Vol. 1: Properties and Selection – Iron, Steels and High Performance Alloys*. ASM International, 1990.
- 2 *ASTM E 8M-08: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. ASTM, 2008.
- 3 *ASTM E 1820-01: Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness*. ASTM, 2004.
- 4 *ASTM E 647-00: Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates*. ASTM, 2004.
- 5 Colpaert, H.: *Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns*. 4<sup>a</sup> Edição revista e atualizada. Editora Edgard Blücher, 2008.
- 6 *ASTM E 45-05: Standard Test Method for Determining the Inclusion Content of Steels*. ASTM, 2005.
- 7 *Metals Handbook Vol. 4: Heat Treating*. ASM International, 1991.
- 8 Godefroid, L.B., Cândido, L.C. e Morais, W.A.: *Análise de Falhas*. ABM, 2009.
- 9 Anderson, T.L.: *Fracture Mechanics – Fundamentals and Applications*. CRC Press, 2005.
- 10 Horta, W.S., Cândido, L.C., Godefroid, L.B., Quites, V.R. e Morais, W.A.: Influência da microestrutura na tenacidade à fratura e na resistência à fadiga de um aço AISI/SAE-4140. *Anais do SULMAT-2004*, Joinville-SC, 2004.
- 11 Oliveira, L.G. e Guimarães, V.A.: *Comportamento em fadiga de aços utilizados em eixos ferroviários*. Universidade de São Paulo, 2007.
- 12 Liaw, P.K, Leax, T.R. and Logsdon, W.A., Near-threshold fatigue crack growth behavior in metals, *Acta Metallurgica*, Vol. 31, 1983, pp.1581-1587.
- 13 Dutta, V.B., Suresh, S. and Ritchie, R.O., Fatigue crack propagation in dual-phase steels, *Metallurgical Transactions*, Vol. 15A, 1984, pp. 1193-1207.
- 14 Tzou, J.L. and Ritchie, R.O., Fatigue crack propagation in a dual-phase plain-carbon steel, *Scripta Metallurgica*, Vol. 19, 1985, pp. 751-755.
- 15 Shang, J.K., Tzou, J.L. and Ritchie, R.O., Role of crack tip shielding in the initiation and growth of long and small fatigue cracks in composite microstructures, *Metallurgical Transactions*, Vol. 18A, 1987, pp. 1613-1627.
- 16 Gritti, J.A., Melo, T.M.F., Machado, F.A., Silva, A.P.F.S., Cândido, L.C. e Godefroid, L.B.: Efeito de pré-deformação e de tratamento térmico de bake hardening na propagação de trinca por fadiga de dois aços bifásicos de emprego automotivo. *Anais do 42<sup>o</sup> Congresso de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos*, Santos - SP, 2005.