



# EFEITO DA TENSÃO MÉDIA E DA CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES NA RESISTÊNCIA À FADIGA DE DOIS AÇOS ESTRUTURAIS<sup>1</sup>

Vinicius Rizzuti Fonseca<sup>2</sup>  
Eduardo Zanotti<sup>2</sup>  
Leonardo Barbosa Godefroid<sup>3</sup>

## Resumo

Uma análise de falha realizada recentemente em um eixo de carro para transporte de materiais na aciaria de uma siderúrgica constatou a sua degradação por fadiga, principalmente devido à concentração de tensões. O presente trabalho estuda a possibilidade de substituição do material empregado no referido eixo por um aço de resistência mecânica superior. Dois aços estruturais são avaliados, em termos de resistência à iniciação de trincas por fadiga (curvas S-N ou de Wöhler), com história de carregamento variável (razão R entre tensões, tensão média e faixa de tensões) e com efeito de concentração de tensões (entalhe superficial).

**Palavras-chave:** Iniciação de trinca por fadiga; Concentração de tensões; Tensão média.

## EFFECT OF MEAN STRESS AND STRESS CONCENTRATION ON THE FATIGUE CRACK INITIATION OF TWO STRUCTURAL STEELS

### Abstract

Failure analysis of a steel rod used in a transport car from a steel industry has detected a mechanism of fatigue degradation, mainly due to stress concentration. This research suggests the substitution of the steel by a more resistant steel. Two structural steels are studied, in terms of their fatigue crack initiation resistance (S-N curves or Wöhler curves), with variable load history (R-ratio, mean stress and amplitude of stresses) and with the effect of stress concentration (notch effect).

**Keywords:** Fatigue crack initiation; Mean stress; Stress concentration.

<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 Engenharia Metalúrgica, UFOP, Ouro Preto – MG.

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

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

## 1 INTRODUÇÃO

O chamado “carro tripper” da aciaria é responsável pelo abastecimento de material em todos os seus silos. Recentemente ocorreu falha do eixo motriz de um desses carros em uma usina siderúrgica, gerando, além da parada de emergência para troca do eixo motriz, paradas operacionais com perda de produtividade nos convertedores da aciaria.

Uma análise de falha realizada no referido eixo mostrou que a fratura ocorreu na mudança de seção entre mancal e roda do lado oposto ao acionamento. A seção que falhou foi embuchada, possivelmente decorrente de alguma falha anterior.

A observação macroscópica da fratura caracteriza a degradação por fadiga de alto ciclo, com carga predominantemente por flexão rotativa. A degradação ocorreu com baixa tensão nominal, uma vez que a seção remanescente ocupa uma área cerca de 20% da seção total. A propagação da trinca se deu de forma uniforme de fora para dentro em toda a seção de fratura, caracterizando um severo concentrador de tensão. Este aspecto de fratura descaracteriza sub-dimensionamento do eixo. As Figuras 1 e 2 ilustram estas características. A fratura ocorreu na dimensão exata da bucha (177 mm), que é a seção rebaixada em 5 mm. O raio não sofreu adoçamento na mudança de seção para o diâmetro de 120 mm. Esta constatação é evidenciada, pois a bucha não possui chanfro interno para o raio adoçado e, sim canto vivo, o que acentua ainda mais o concentrador.



**Figura 1:** Vista da seção de fratura, mostrando o embuchamento.



**Figura 2:** Vista da seção de fratura, com detalhe da bucha e raio de adoçamento interno.



Análise química e ensaio de dureza realizados no material do eixo indicaram que o aço empregado é compatível com um aço carbono do tipo AISI/SAE 1045, temperado e revenido, conforme especificação do projeto. Com o objetivo de propor alternativas de materiais para essa aplicação, dois aços estruturais do tipo AISI/SAE 1080 e 4140 ambos temperados e revenidos, foram avaliados com relação à sua resistência ao trincamento por fadiga. Para acentuar o efeito da concentração de tensões, corpos de prova foram preparados com um entalhe superficial. O efeito da história de carregamento também foi avaliado, através de variação da razão R entre tensões, da tensão média e da faixa de tensões.

## 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 AISI/SAE 1080 e 4140.<sup>(1)</sup>

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

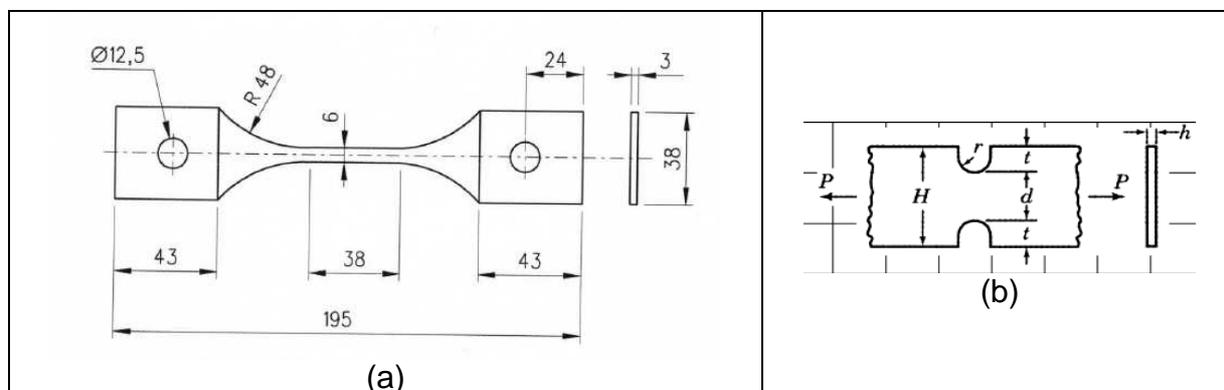
AMOSTRA	C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr	Mo
1080	0,796	0,181	0,009	0,019	0,650	0,023	0,338	0,000
4140	0,358	0,243	0,026	0,015	0,933	0,119	0,932	0,165

AMOSTRA	V	Cu	W	Ti	Sn	Co	Al	Nb	Fe
1080	0,003	0,014	0,002	0,001	0,001	0,003	0,003	0,001	97,956
4140	0,009	0,123	0,004	0,001	0,009	0,007	0,025	0,002	97,028

Amostras para metalografia foram preparadas nas três seções ortogonais, e observadas em um microscópio ótico (MO) LEICA com analisador de imagens, usando o reativo químico de Nital 2%.

Os ensaios de tração e de fadiga foram realizados numa máquina servo-hidráulica MTS de 10 ton, com aquisição de dados por computador, na temperatura ambiente. As superfícies de fratura foram analisadas num microscópio eletrônico de varredura (MEV) JEOL.

A Figura 3(a) apresenta um croqui dos corpos de prova, com suas principais dimensões. Todos os corpos de prova foram retirados no sentido da laminação, preparados com a espessura de 3,0mm. A Figura 3(b) mostra detalhes do entalhe confeccionado para estudo do efeito da concentração de tensões.



**Figura 3:** (a) Croqui dos corpos de prova utilizados para os ensaios mecânicos; (b) Detalhe do entalhe em U: H = 6mm; h = 3mm; d = 4,3mm; r = 0,85mm.

Os ensaios de tração foram realizados (três corpos de prova) com controle de deformação, numa velocidade de 5 mm/min, na temperatura ambiente.

Os ensaios de fadiga foram realizados na frequência de 30 Hz, na temperatura ambiente, de acordo com a Norma ASTM E-466.<sup>(2)</sup> Curvas tensão máxima versus número de ciclos para fratura foram obtidas, desde uma tensão aplicada próxima ao limite de resistência por tração dos aços até uma tensão próxima do seu limite de fadiga. Foram utilizados três corpos de prova para cada nível de tensão aplicado.

A Tabela 2 apresenta a programação criada neste trabalho para se avaliar o desempenho por fadiga dos dois aços.

**Tabela 2:** Variáveis envolvidas nos ensaios de fadiga

TIPO DE ENSAIO	ESPECIFICAÇÃO
Comparação entre materiais	Razão R constante e igual a 0,1 Faixa $\Delta P$ e tensão média variáveis
Efeito da concentração de tensões	Razão R constante e igual a 0,1 Corpos de prova sem e com entalhe
Ensaio com tensão média constante	Razão R variável Faixa $\Delta P$ variável
Ensaio com faixa de tensões constante	Razão R variável Tensão média variável

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Uma típica microestrutura do aço AISI/SAE 1080 na direção longitudinal é mostrada na Figura 4. Trata-se de martensita revenida, característica do tratamento de têmpera e revenimento realizado na amostra. A Figura 5 apresenta uma típica microestrutura do aço AISI/SAE 4140 na direção longitudinal. Trata-se novamente de martensita revenida, também proveniente do tratamento de têmpera e revenimento realizado na amostra. Os dois aços apresentaram microestruturas semelhantes nas outras duas direções.

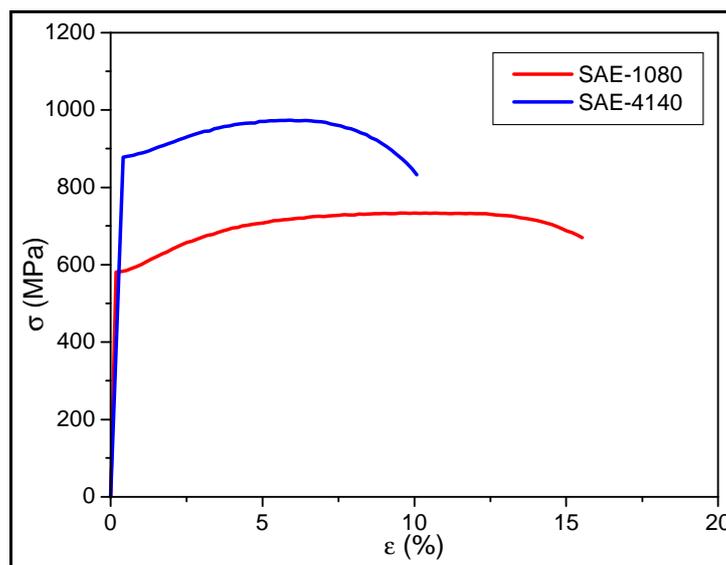


**Figura 4:** Microestrutura do aço AISI/SAE 1080. Direção longitudinal. Reativo Nital. MO 1.000X.



**Figura 5:** Microestrutura do aço AISI/SAE 4140. Direção longitudinal. Reativo Nital. MO 1.000X.

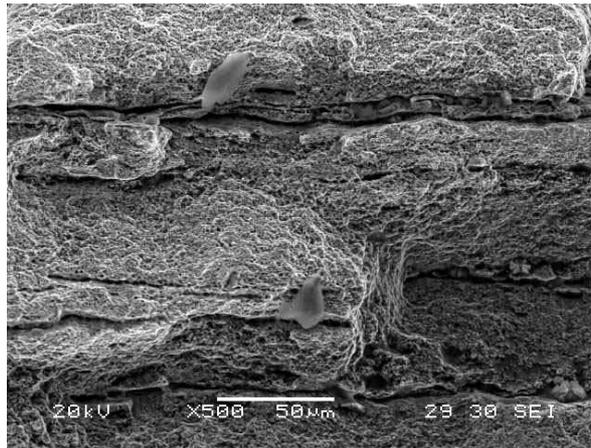
A Figura 6 ilustra os resultados encontrados a partir dos ensaios de tração. Propriedades mecânicas típicas são apresentadas na Tabela 3. Observa-se que os dois aços apresentaram escoamento descontínuo, com baixa taxa de encruamento. O aço 4140 é mais resistente e menos dúctil do que o aço 1080. A análise fractográfica mostrou uma fratura transgranular e dúctil para os dois aços, com um mecanismo de nucleação, crescimento e coalescimento de microcavidades (Figuras 7 e 8).



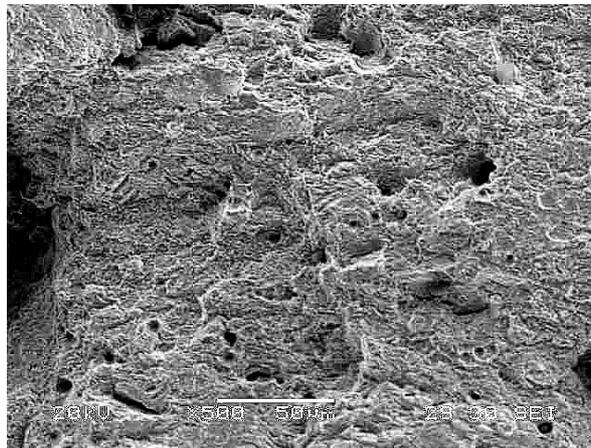
**Figura 6:** Curvas de tração (média) para os dois aços estudados.

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

Aço	LE (MPa)	LR (MPa)	ALO (%)
1080	580 ± 9,5	735 ± 9,7	16,3 ± 1,5
4140	879 ± 19,0	974 ± 16,0	10,5 ± 1,0

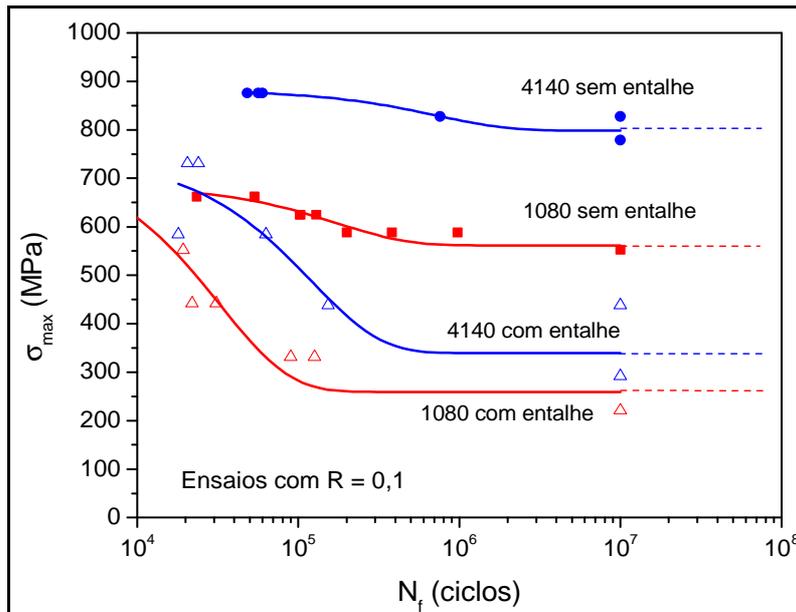


**Figura 7:** Fratografia de tração do aço AISI/SAE 1080. MEV 500X.



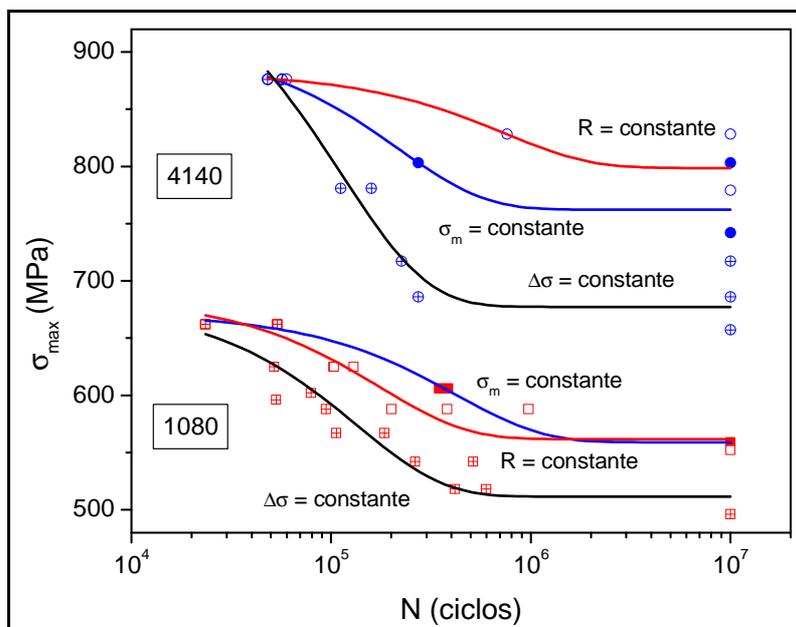
**Figura 8:** Fratografia de tração do aço AISI/SAE 4140. MEV 500X.

O comportamento em fadiga dos dois aços está apresentado na Figura 9, em termos de curva tensão máxima da ciclagem versus número de ciclos para fratura. Esta Figura também apresenta o efeito da concentração de tensões. Conforme pode ser verificado, o aço AISI/SAE 4140 apresenta um desempenho em fadiga superior ao aço AISI/SAE 1080. Este efeito está relacionado com a dependência da nucleação de trinca por fadiga com a resistência mecânica do material, através dos mecanismos de extrusão/intrusão.<sup>(3,4)</sup> Por outro lado, a presença de um entalhe nos corpos de prova reduz de forma significativa a resistência à fadiga de ambos os materiais. Estes efeitos foram verificados também em outros sistemas.<sup>(5-7)</sup>



**Figura 9:** Curvas de fadiga para os dois aços estudados. Comparação ente materiais e efeito da concentração de tensões.

O efeito da história de carregamento no comportamento dos dois aços está apresentado na Figura 10, novamente em termos de curva tensão máxima da ciclagem versus número de ciclos para fratura. Observa-se novamente que, qualquer que seja o parâmetro mecânico adotado para comparação, o aço AISI/SAE 4140 apresentou um desempenho superior ao aço AISI/SAE 1080. Para cada aço, verificou-se que os danos por fadiga são mais intensos quando se programam os ensaios com a faixa de tensões constante. Este resultado está relacionado com o maior desenvolvimento de intrusões/extrusões, fontes para iniciação do trincamento por fadiga.<sup>(3,4)</sup>



**Figura 10:** Curvas de fadiga para os dois aços estudados. Efeito da história de carregamento.

Na análise de fratura, as amostras ensaiadas por fadiga foram escolhidas de tal forma a permitir uma comparação entre os dois aços e também entre os parâmetros

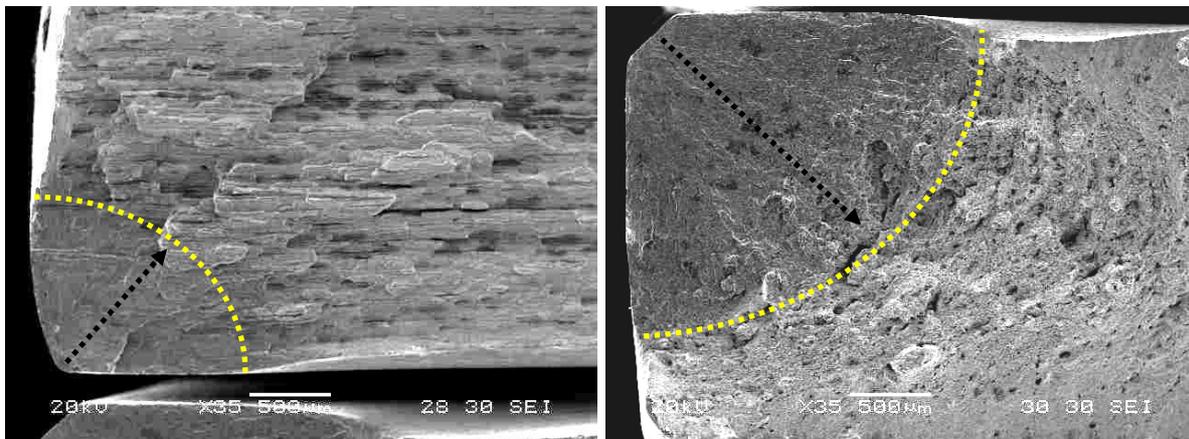
considerados. A Tabela 4 mostra como foi feita esta escolha. É importante salientar que a comparação entre os aços e também entre as variáveis adotadas sempre foi realizada para um mesmo valor de carregamento. Em todas as amostras, o processo de iniciação de trinca se deu em um dos cantos do corpo de prova, e o crescimento de trinca avançou para o outro lado. A iniciação de trinca sempre se caracterizou pela presença de marcas radiais, “irradiando” para o interior do corpo de prova. A região característica do trincamento por fadiga variou de área ocupada no corpo de prova em função da história de carregamento adotada e da vida resultante. A região característica do rasgamento final por tração apresentou um mecanismo de fratura idêntico ao verificado nos ensaios de tração. As Figuras 11-14 ilustram estas constatações e confirmam os resultados obtidos em termos de vida por fadiga para os dois aços, conforme apresentado na Tabela 4.

**Tabela 4:** Escolha de corpos de prova de fadiga para análise no MEV.

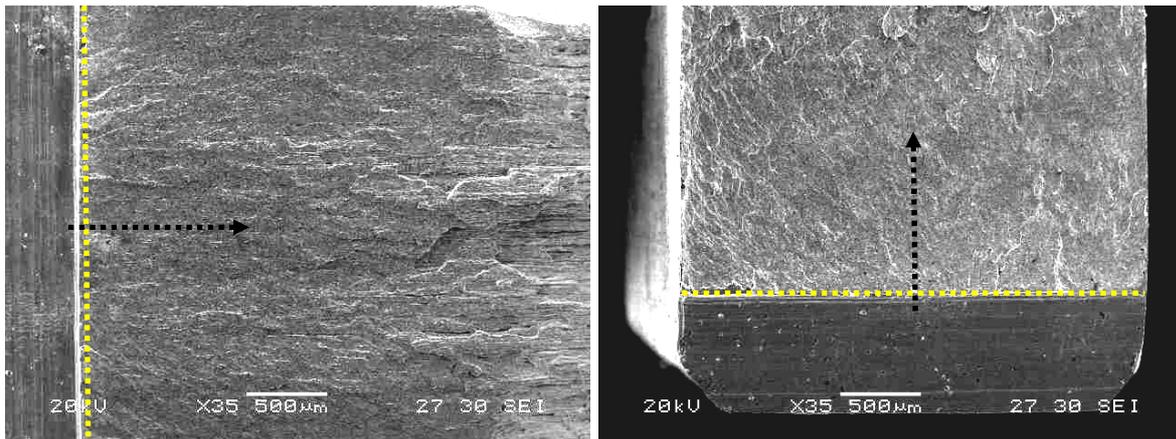
1080	Razão R = 0,1	Razão R = 0,1 com entalhe	Tensão média	Faixa
Carga máxima	85% P <sub>LR</sub>	30% P <sub>LR</sub>	85% P <sub>LR</sub>	85% P <sub>LR</sub>
Vida (ciclos)	100.000	126.000	390.000	79.000

4140	Razão R = 0,1	Razão R = 0,1 com entalhe	Tensão média	Faixa
Carga máxima	85% P <sub>LR</sub>	30% P <sub>LR</sub>	85% P <sub>LR</sub>	85% P <sub>LR</sub>
Vida (ciclos)	760.000	154.000	274.000	436.000

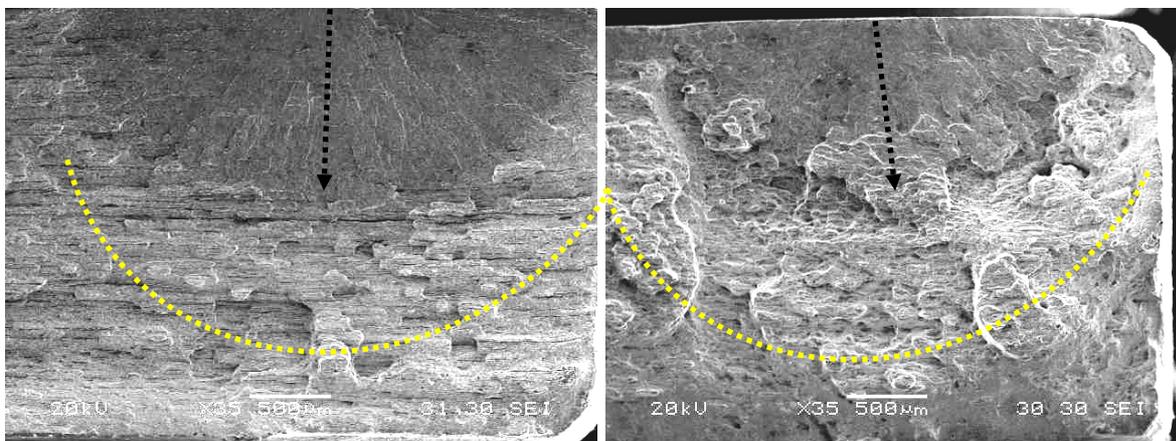
*P<sub>LR</sub> = carga correspondente ao limite de resistência por tração*



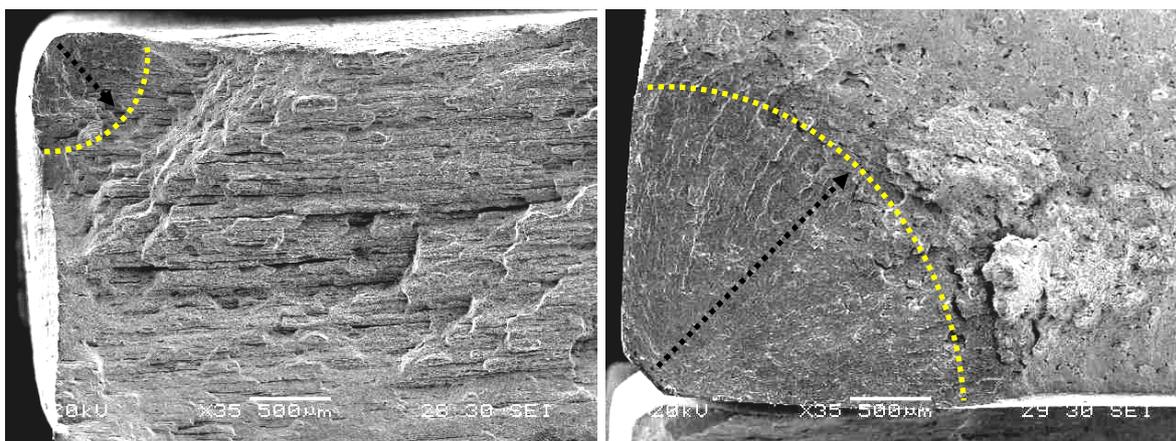
**Figura 11:** Fratografias obtidas no MEV para o aço 1080 (esquerda) e o aço 4140 (direita), ensaios com razão R constante. A seta indica o sentido do trincamento. O arco indica a transição fadiga-tração no ensaio. Pode-se observar que o aço 4140 apresentou uma maior área correspondente ao processo de fadiga, em relação ao aço 1080, confirmando sua maior resistência à fadiga.



**Figura 12:** Fratografias obtidas no MEV para o aço 1080 (esquerda) e o aço 4140 (direita), ensaios com entalhe. A seta indica o sentido do trincamento. O segmento indica a transição entalhe-fadiga. Neste caso, a análise de fratura não indicou diferença de mecanismo de trincamento entre os dois aços.



**Figura 13:** Fratografias obtidas no MEV para o aço 1080 (esquerda) e o aço 4140 (direita), ensaios com tensão média constante. A seta indica o sentido do trincamento. O arco indica a transição fadiga-tração no ensaio. Neste caso, a análise de fratura não indicou diferença de mecanismo de trincamento entre os dois aços. Por outro lado, ao comparar a Figura 13 com a Figura 11, pode-se perceber uma diferença de áreas, mostrando o efeito da história de carregamento.



**Figura 14:** Fratografias obtidas no MEV para o aço 1080 (esquerda) e o aço 4140 (direita), ensaios com faixa de tensões constante. A seta indica o sentido do trincamento. O arco indica a transição fadiga-tração no ensaio. Neste caso, observa-se novamente a maior área de fadiga correspondendo ao aço 4140. Comparando-se a Figura 14 com a Figura 11, pode-se perceber uma diferença de áreas, principalmente para o aço 1080, mostrando o efeito da história de carregamento, e o pior comportamento quando se mantém constante a faixa entre tensões.

## 4 CONCLUSÕES

O presente estudo mostrou a diferença de desempenho por fadiga de dois aços estruturais candidatos para aplicação como eixos de carro de transporte de material em uma aciaria. Foi também observada a dependência da vida por fadiga, em função da presença de concentração de tensões e da história de carregamento aplicada. As principais conclusões são enumeradas a seguir.

1. Os dois aços estudados apresentaram uma microestrutura de martensita revenida, típica de tratamento térmico de têmpera e revenido.
2. Com relação ao desempenho por tração, o aço 4140 apresentou uma resistência mecânica superior e uma ductilidade inferior ao aço 1080.
3. Com relação ao desempenho por fadiga, ambos os aços mostraram sensibilidade à presença de entalhe.
4. A variável mecânica relacionada com o ciclo de fadiga que mais influenciou (diminuiu) a resistência dos dois aços foi a faixa de tensões.
5. Independentemente da história de carregamento por fadiga e da presença de concentração de tensões, o aço 4140 mostrou um desempenho superior ao aço 1080, sendo em princípio o candidato ideal para a substituição pretendida.

## REFERÊNCIAS

- 1 *Metals Handbook Vol. 1: Properties and Selection – Iron, Steels and High Performance Alloys*. ASM International, 1990.
- 2 *ASTM E 466-07: Standard Practice for conducting Force controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials*. ASTM, 2007.
- 3 Hertzberg, R.W.: *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*, Wiley, 1989, pp. 476-482.
- 4 Schijve, J.: *Fatigue of Structures and Materials*, Kluwer Academic Publishers, 2001, pp. 122-124.
- 5 Gutz, A.E., Santana, V.G., Cândido, L.C. e Godefroid, L.B.: Avaliação do desempenho em fadiga de um aço bainítico de aplicação em rodas de automóvel. *63<sup>o</sup> Congresso Anual da ABM*, Santos, SP, 21-25/07/2008.
- 6 Peres, L.O.R., Godefroid, L.B e Reis, L.C.: Uso do método dos elementos finitos no estudo da influência do entalhe na vida em fadiga de spindle de laminador de chapas grossas. *63<sup>o</sup> Congresso Anual da ABM*, Santos, SP, 21-25/07/2008.
- 7 Godefroid, L.B., Cândido, L.C. e Lima, J.B.V.: Effect of stress concentration on the fatigue resistance of two dual-phase steels. *COBEM-2009*, ABCM, Gramado, RS, 15-20/11/2009.