

ESTUDO DE TENACIDADE À FRATURA DE CINCO AÇOS PARA APLICAÇÃO EM TRILHO FERROVIÁRIO*

Luiza Pessoa Moreira¹
Thiago Gomes Viana¹
Leonardo Barbosa Godefroid²
Geraldo Lúcio Faria³
Luiz Cláudio Cândido²

Resumo

Dois tipos diferentes de aços eutetóides são usados atualmente na construção das estradas de ferro no Brasil. Os trilhos são classificados como *Premium* ou *Standard* de acordo com a presença de certos elementos de liga e da realização de tratamento térmico no boleto do trilho. Este trabalho caracteriza a microestrutura, e determina a tenacidade à fratura de cinco desses aços (quatro *Premium* e um *Standard*), provenientes de diferentes países. A microestrutura foi avaliada por microscopia ótica (MO) e eletrônica de varredura (MEV). Tamanho de grão e espaçamento interlamelar da perlita foram medidos. Além disso, foram realizados ensaios de tração e de tenacidade à fratura via mecânica de fratura elástica linear (K_{Ic}). A metalografia mostrou a presença de perlita fina em todos os aços, com uma distribuição normal de inclusões. Por outro lado, os ensaios mecânicos demonstraram que existe uma diferença significativa de comportamento entre os aços. Os aspectos da microestrutura avaliados foram correlacionados com os resultados de tenacidade à fratura, a fim de mostrar o efeito da microestrutura no comportamento mecânico do aço e tornar possível uma seleção adequada do aço para aplicação na via permanente.

Palavras-chave: Trilho ferroviário; Tenacidade à fratura; Microestrutura.

STUDY OF FRACTURE TOUGHNESS OF FIVE DIFFERENT STEELS FOR RAILROAD APPLICATIONS

Abstract

Two different types of eutectoid steels are used nowadays in the Brazilian construction of railroads. Premium and Standard types of rails are classified depending on the presence of certain alloying elements and the heat treatment done on the rail heads. This work characterizes the microstructure and determines the fracture toughness of five of those steels (four Premium and one Standard), coming from different countries. The microstructure was evaluated by light optical and scanning electron microscopy. Grain size and pearlite interlamellar spacing were measured. In addition, tensile and fracture toughness tests by linear elastic fracture mechanics (K_{Ic}) were performed. Metallographic examination showed the presence of fine pearlite in all steels, with a normal distribution of inclusions. On the other hand, mechanical tests showed that there exists a significant difference among the steels. The microstructural aspects were correlated with the results of fracture mechanics in order to show the effect of the microstructure on the mechanical behavior of the steels and provide relevant information for an adequate selection of steel for railroad applications.

Keywords: Railroad steel; Fracture toughness; Microstructure.

¹ Engenheiro(a) Metalúrgico(a), Mestrando(a) em Engenharia de Materiais, REDEMAT-UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.

² Engenheiro Metalúrgico. Dr. Professor. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (DEMET), EM, UFOP, MG, Brasil.

³ Físico. Dr. Professor. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (DEMET), EM, UFOP, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Em países continentais, questões de logística relacionadas principalmente com o transporte de grandes volumes em longas distâncias devem ser tratadas com precisão. A ferrovia, de acordo com Schneider [1], é uma das formas de transporte mais eficientes e econômicas para atender a essa demanda. O transporte ferroviário é uma forma eficiente de transporte, principalmente se as ferrovias têm sua integridade preservada durante a sua vida de serviço. Falhas catastróficas em trilhos ferroviários durante a passagem do trem, podendo causar o seu descarrilamento, resultam em acidentes com perdas de vidas humanas e bens materiais [2-5].

A Empresa Valor Logística Integrada (VLI) trabalha no Brasil em cinco grandes corredores logísticos que cobrem diversas regiões do país, interligando ferrovias, terminais e portos. Porém, hoje não existem empresas brasileiras fornecedoras de trilhos ferroviários, o que leva a um desconhecimento do comportamento mecânico dos aços importados, principalmente do Japão, China e Estados Unidos, pela VLI. Torna-se então necessário realizar uma análise das características microestruturais, das propriedades mecânicas básicas e do comportamento desse componente na presença de defeitos internos, para melhor seleção, utilização, inspeção e manutenção dos trilhos.

Os aços com microestrutura predominantemente perlítica tem sido largamente utilizados em componentes ferroviários devido às suas características mecânicas. Nos aços para trilhos, tratando-se de aços perlíticos, o espaçamento interlamelar e a disposição da microestrutura em colônias perlíticas influenciam diretamente nas propriedades mecânicas do mesmo. Diversos trabalhos tem sido publicados sobre os efeitos de características microestruturais nas propriedades mecânicas básicas de aços perlíticos. Gladman *et al.* [6], Hyzak e Bernstein [7] e Dollar *et al.* [8] são contribuições clássicas que comprovam a influencia principalmente do espaçamento interlamelar da perlita sobre o limite de escoamento dos aços, resultado também obtido por Moreira *et al.* [9], que avaliaram que trilhos de aços perlíticos com espaçamento lamelar diferente apresentam comportamento mecânico também diferente.

É objetivo deste trabalho caracterizar e avaliar o comportamento de trilhos ferroviários *Standard* e *Premium*, pela caracterização metalúrgica e mecânica dos aços, por intermédio do estudo de microestrutura, de resistência à tração e de tenacidade à fratura, a fim de conhecer o comportamento destes aços na presença de descontinuidades, desenvolver estudo comparativo do desempenho entre os aços e relacionar suas características estruturais com suas propriedades mecânicas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Os materiais avaliados nesse trabalho são segmentos de trilhos produzidos por dois diferentes fabricantes de procedência chinesa e japonesa. Os trilhos foram identificados como *S*, *P1*, *P2*, *P3* e *P4*. De acordo com os fabricantes, o trilho *S* se enquadra na especificação de trilho do tipo *Standard* e os trilhos *P1*, *P2*, *P3* e *P4* são classificados como trilhos do tipo *Premium*.

Tabela 1 – Composição química dos trilhos (% em massa).

Trilho	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V
S	0,722	1,24	0,539	0,01510	0,0047	0,218	0,0259	0,0166	0,0032
P1	0,792	0,88	0,304	0,01730	0,0043	0,209	0,0227	0,0166	0,0016
P2	0,863	0,91	0,261	0,01900	0,0091	0,218	0,0130	-	0,0010
P3	0,763	1,02	0,223	0,01600	0,0098	0,211	0,018	-	0,001
P4	0,754	0,807	0,687	0,01600	0,0068	0,319	0,038	0,0010	0,087

2.2 Procedimentos Experimentais

2.2.1 Análise microestrutural

A extração dos corpos de prova para as análises microestruturais se deu a partir da seção transversal em relação à direção de laminação do trilho.

2.2.1.1. Metalografia

As amostras foram cortadas, lixadas, polidas e atacadas de acordo com os procedimentos usuais de preparação de amostras. As amostras foram analisadas em microscópio óptico com analisador de imagens LEICA DMRX. Utilizou-se também MEV em um microscópio modelo TESCAN VEGA3.

2.2.1.2 Determinação do tamanho de grão

A determinação do tamanho de grão foi efetuada utilizando uma técnica de ataque térmico em um forno à resistência com atmosfera controlada. Essa técnica se baseia no fato de que essa atmosfera oxida preferencialmente os contornos das colônias de perlita, revelando claramente os grãos da estrutura. As amostras foram então analisadas em microscópio óptico, e os tamanhos médios de grão foram medidos segundo o método dos interceptos de acordo com a norma ASTM E112 [10].

2.2.1.3 Determinação do espaçamento interlamelar

Silva [11], Gomes *et al.* [12] e Limberger [13] afirmam que observando-se uma amostra plana atacada metalograficamente em um microscópio eletrônico de varredura (MEV) é possível medir o espaçamento interlamelar em verdadeira grandeza procurando-se aquelas regiões de menores espaçamentos e desprezando-se as demais para a obtenção da amostragem. Sobre as áreas de medição foi feita a avaliação do espaçamento interlamelar com auxílio de régua virtual, segundo a Equação 1.

$$\lambda = \frac{VB \times ML}{MB \times NL} \quad (1)$$

Onde VB é a medida da barra de controle em μm , MB é a medida da barra medida em mm na imagem, ML é a medida da linha traçada perpendicularmente às lamelas na colônia de perlita em mm e NL é o número de lamelas de cementita contadas ao longo da linha traçada.

2.2.2 Ensaio de tração

Os corpos de prova de tração foram retirados do centro do boleto dos trilhos e foram confeccionados e ensaiados de acordo com a Norma ASTM E8M [14]. As dimensões dos corpos de prova de seção circular para tração longitudinal encontram-se na Figura 1.

2.2.4 Fractografia

Foram realizadas análise das superfícies de fraturas nos corpos de prova dos ensaios de tenacidade à fratura, via MEV. Esta análise foi realizada para a identificação e confirmação dos micromecanismos de fratura presentes nos aços.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise Microestrutural

Exemplos de micrografias obtidas na região central dos boletos dos trilhos, após ataque químico, são apresentada na Figuras 4, para os aços *S* (*Standard*) e *P1* (*Premium*). Observa-se que a microestrutura do aço, para todos os trilhos analisados, é constituída por perlita fina em sua maioria, com presença de algumas colônias de perlita grosseira, sem presença de ferrita pró-eutetóide em contorno de grãos. Tal microestrutura era esperada, uma vez que a composição química avaliada indica aços eutetóides. Outra característica observada na análise metalográfica foi a homogeneidade da microestrutura.



Figura 4 - Micrografias dos aços (a) *S* e (b) *P1*, 500X, ataque Nital 2%.

A microestrutura também foi avaliada via MEV, confirmando a presença de uma estrutura perlítica, como mostrado na Figura 5.

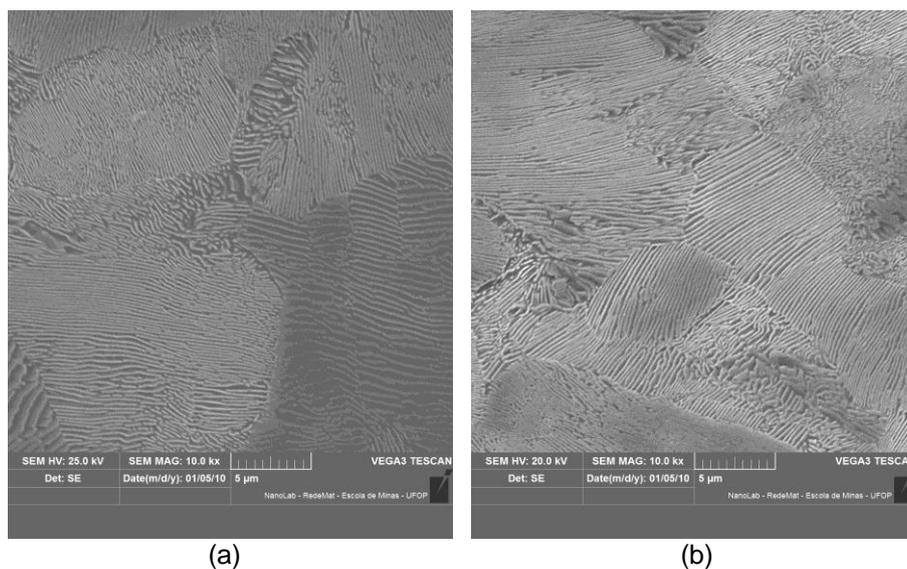


Figura 5 - Micrografia dos aços (a) *S* e (b) *P1* via MEV, 10000X, ataque Nital 2%.

Através do procedimento dos interceptos (ASTM E112 [10]) foi possível estimar o tamanho médio dos grãos de ambos os aços, cujos resultados são apresentados na Tabela 2. O aço do trilho tipo *Standard*, que tem o menor teor de carbono entre os aços, apresenta maior tamanho de grão, os demais aços *Premium* apresentam tamanho de grão bastante próximo.

Tabela 2 - Tamanho médio de grão.

Trilho	S	P1	P2	P3	P4
d (μm)	43,03 \pm 3,10	32,15 \pm 3,59	34,83 \pm 3,96	38,26 \pm 4,40	28,45 \pm 2,71

O espaçamento interlamelar da perlita foi determinado a partir de fotomicrografias reveladas via MEV. Os resultados são mostrados na Tabela 3. Nesse caso, também o trilho tipo *Standard* foi o que apresentou maior espaçamento lamelar, confirmando o efeito do teor de carbono sobre a microestrutura.

Tabela 3 - Espaçamento interlamelar da perlita.

Trilho	S	P1	P2	P3	P4
λ (μm)	0,18 \pm 0,03	0,09 \pm 0,01	0,11 \pm 0,01	0,15 \pm 0,03	0,10 \pm 0,1

3.2 Ensaio de Tração

Os resultados das médias para os ensaios de tração realizados em três corpos de prova para cada trilho estudado são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados dos ensaios de tração.

Trilho	σ_{LE} (MPa)	σ_{LR} (MPa)	ϵt (%)	RA (%)
S	924 \pm 11	1056 \pm 4	9 \pm 3	18 \pm 2
P1	1180 \pm 72	1339 \pm 48	7 \pm 1	20 \pm 3
P2	1158 \pm 103	1277 \pm 62	7 \pm 2	20 \pm 3
P3	991 \pm 114	1249 \pm 40	10 \pm 1	27 \pm 3
P4	1225 \pm 65	1342 \pm 83	8	31

Onde: σ_{LE} é a tensão limite de escoamento por tração, σ_{LR} a tensão limite de resistência por tração, ϵt é a deformação total por tração, RA a redução de área transversal por tração.

Percebe-se que o trilho P4 é o que possui maior resistência mecânica se comparado aos demais, e o trilho S é o menos resistente. Uma estrutura mais refinada e um maior teor de carbono, segundo a literatura (Gladman et al. [6], Hyzak e Bernstein [7] e Dollar et al. [8]) e confirmado pelos resultados obtidos nesse trabalho, Figura 6, são características que conferem maior resistência mecânica ao aço.

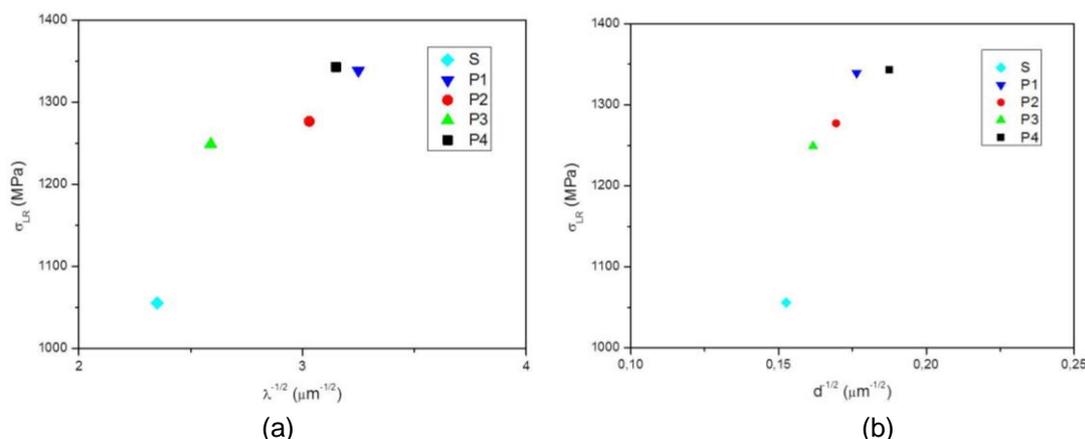


Figura 6 - Dependência entre a resistência mecânica por tração e (a) espaçamento interlamelar e (b) tamanho de grão.

3.3 Ensaio de Tenacidade à Fratura

A Tabela 5 mostra os resultados dos ensaios de tenacidade à fratura. Os ensaios apresentaram valores para P_Q , P_{MAX} e K_Q que validam o ensaio para obtenção de K_{IC} calculados pela mecânica de fratura linear elástica segundo a norma ASTM E399.

Tabela 5 - Resultados dos ensaios de tenacidade à fratura (K_{IC}) para os aços.

Aço	Tenacidade ($MPa \cdot m^{1/2}$) K_{IC}	DP	$B \geq 2,5(K_{IC}/\sigma_{LE})^2$ (mm)	$a \geq 2,5(K_{IC}/\sigma_{LE})^2$ (mm)	$P_{max}/P_Q \leq 1,10$
S	39,1	0,5	$15 \geq 4,5$	$16,5 \geq 4,5$	$1,07 \leq 1,10$
P1	37,6	0,5	$15 \geq 2,5$	$16,5 \geq 2,5$	$1,07 \leq 1,10$
P2	41,9	2,3	$15 \geq 4,5$	$16,5 \geq 4,5$	$1,08 \leq 1,10$
P3	41,4	1,3	$15 \geq 3,2$	$16,5 \geq 3,2$	$1,05 \leq 1,10$
P4	38,7	2,6	$15 \geq 2,5$	$16,5 \geq 2,5$	$1,05 \leq 1,10$

Onde K_{IC} é o valor médio da tenacidade à fratura; DP é o desvio padrão de tenacidade à fratura; B é a espessura do corpo de prova; a é o tamanho de trinca; σ_{LE} é a tensão limite de escoamento; P_{MAX} é o valor de carga máxima no ensaio e P_Q é o valor de carga utilizada para determinação da tenacidade à fratura.

Observando a relação entre P_{MAX} e P_Q e os resultados do ensaio de tração, é possível avaliar que os aços, apesar de apresentarem alta resistência mecânica, possuem um mínimo de ductilidade. Os valores de K_{IC} obtidos para os aços estão de acordo com os valores encontrados na literatura para aços eutetóides (Kavishe e Baker [16], Silva [11], Limberger [13], Schneider [1] e Ravaee e Hassani [17]) e estão acima do limite inferior apresentado pela Norma Europeia EN13574-1 [18]. Porém, é importante comentar que os valores de tenacidade à fratura para estes aços são relativamente baixos, em comparação com aços mais nobres, do tipo ARBL, tornando estes aços susceptíveis à fratura frágil e a crescimento rápido de trincas por fadiga. É possível analisar que, apesar de haver uma pequena diferença entre os valores medidos de K_{IC} , o aço do trilho P3 foi o que apresentou o maior valor de tenacidade à fratura, e dentre os trilhos da classe Premium é o que apresenta maiores valores de tamanho de grão e espaçamento interlamelar e é o aço com resistência mecânica mais baixa. Estes resultados estão de acordo com a tendência verificada para diversas famílias de materiais metálicos (Godefroid [19]). O pequeno desvio padrão obtido para todos os aços indica que a dispersão de resultados é inexpressiva, mostrando a homogeneidade das microestruturas.

Os valores de tamanho de grão e de espaçamento interlamelar foram confrontados com os valores de tenacidade à fratura para verificação da influência das primeiras sobre a segunda, Figura 7.

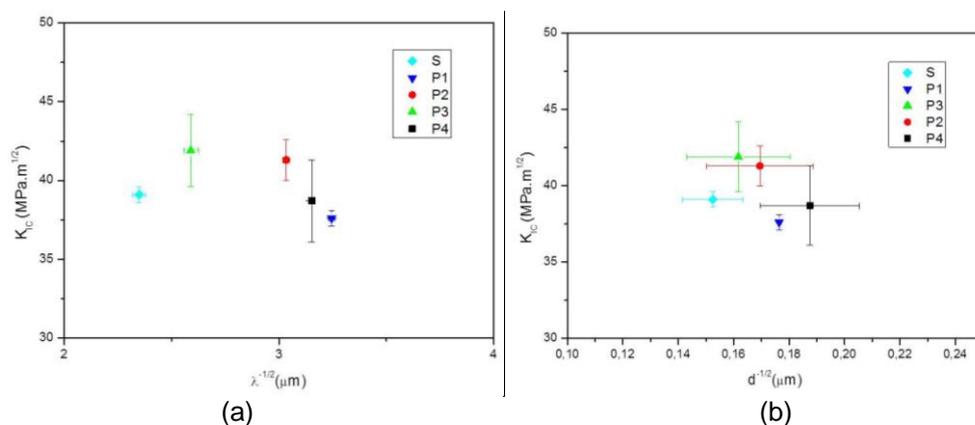


Figura 7 – Relação entre os valores de (a) espaçamento interlamelar, (b) tamanho de grão e tenacidade à fratura.

Os resultados de resistência mecânica e tenacidade à fratura também foram confrontados e são apresentados na Figura 8. A tendência de variação inversa entre estas duas grandezas (Godefroid [19]) é verificada para diversas famílias de materiais metálicos.

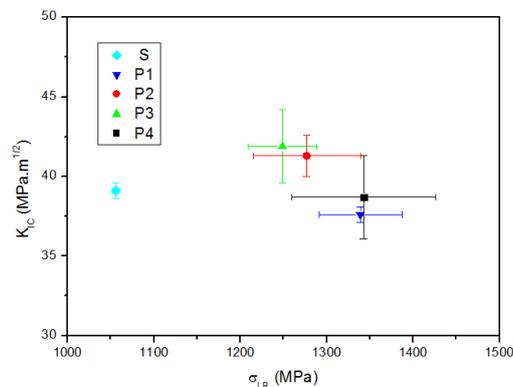


Figura 8 - Relação entre os valores de tensão limite de resistência e tenacidade à fratura.

3.4 Fractografia

As imagens, via MEV, obtidas das fraturas dos corpos de prova do ensaio de tenacidade são exemplificadas pelo resultado dos aços S e P1, os demais aços apresentaram o mesmo comportamento, Figura 9.

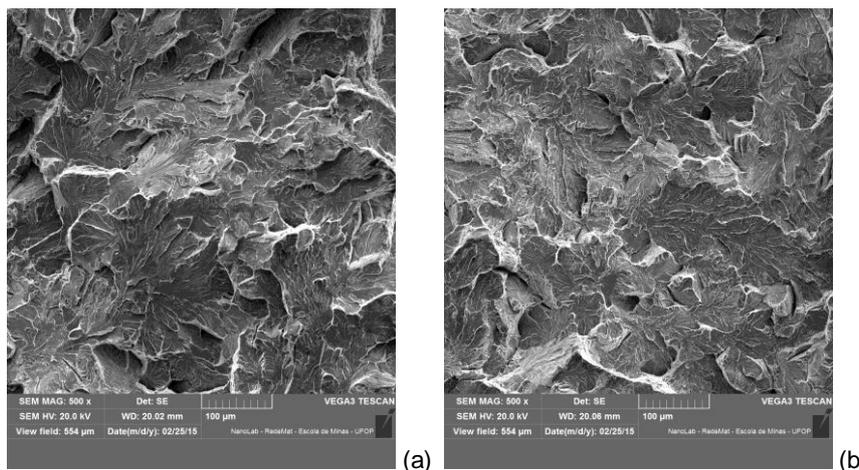


Figura 9 – Fractografias, via MEV, das superfícies de fratura corpos de prova empregados em ensaio de tenacidade à fratura. (a) S, (b) P1. Região de início de propagação, aumento de 500X.

A análise da superfície de fratura mostra comportamento frágil para todos os trilhos, evidenciado pela presença de micromecanismo de clivagem em toda a extensão da fratura.

4 CONCLUSÕES

Pelas análises químicas e microestruturais realizadas nos aços constatou-se que todos os aços estudados apresentam estrutura perlítica e composições químicas que atendem as especificações da norma AREMA [20] para os trilhos das classes *Standard* e *Premium*.

Existe diferença no tamanho das colônias de perlita e no espaçamento interlamelar dos aços estudados. O trilho P4, que apresenta maior teor de carbono, tem estrutura mais refinada, com menor tamanho de grão e baixo espaçamento interlamelar.

As variações microestruturais induziram variações na resistência mecânica por tração e na tenacidade à fratura.

Qualquer que seja o aço, o mecanismo de fratura é frágil, indicando que os aços são susceptíveis a trincamento, seja estático ou cíclico.

REFERÊNCIAS

- 1 Schneider, E.L. Análise da vida remanescente de trilhos com defeitos transversais desgastados em serviço. UFRGS / PPGEM, Porto Alegre, 2005.
- 2 Aglan, H.A. Fatigue Crack Growth and Fracture Behavior of Bainitic Rail Steels. U.S. Department of Transportation (FRA). 2011.
- 3 Esveld, C. (2001) *apud* Zerbst, U; Lundén, R; Edel, K. -O; Smith R. A. Introduction to the Damage Tolerance Behavior of Railway Rails – A Review. Engineering Fracture Mechanics, v. 76, 2009, p. 2563-2601.
- 4 Zerbst, U.; Lundén, R.; Edel, K.O.; Smith, R.A. Introduction to the Damage Tolerance Behavior of Railway Rails – A Review. Engineering Fracture Mechanics, v. 76, p. 2563–2601. 2009.
- 5 Rice, R. C. Shell and detail fracture formation in railroad rails. In: Stephens. R. I. (Ed). Case Studies for Fatigue Education, ASTM STP 1250, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1994. p. 109-138.
- 6 Gladman, T.; McIvor, I.D.; Pickering, F.B. Some Aspects of the Structure – Property Relationship in High-Carbon Ferrite-Pearlite Steels, JISI, v. 210, p. 916 – 930. 1972.
- 7 Hyzak, J.M.; Bernstein, I.M. The Role of Microstructure on the Strength and Toughness of Fully Pearlitic Steels. Metallurgical Transactions A, v. 7A, p. 1217 – 1224. 1976.
- 8 Dollar, M.; Bernstein, I. M.; Thompson, A. W. Influence of Deformation Substructure on Flow and Fracture of Fully Pearlitic Steel. Acta Metall, v. 36, p. 311 – 320. 1988.
- 9 Moreira, L. P.; Viana, T. G.; Godefroid, L.B.; Faria, G. L.; Cândido, L. C. Microstructure and Mechanical Properties of Five Different Steels for Railroad Application. XIII SBPMat, João Pessoa, PB, 2014.
- 10 ASTM E112. Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. 2014.
- 11 Silva, P. R. T. Caracterização de trilhos ferroviários quanto a tenacidade à fratura e comportamento em fadiga, 93p. Dissertação, Mestrado – PPGEMM Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 1995.
- 12 Gomes, M.G.M.F.; Almeida, L.H.; Gomes, L.C.F.C.; May, I.L. Effects of Microstructural Parameters on the Mechanical Properties of Eutectoid Rail Steels. Materials Characterization, v. 39, p. 1 – 14. 1997.
- 13 Limberger, I. F. Estudo da Propagação de Trincas Transversais por Fadiga em Trilhos Ferroviários. 126p. Tese de Doutorado - PPGEMM Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2000.
- 14 ASTM E8M. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. 2008.
- 15 ASTM E399. Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{Ic} of Metallic Materials. 2012.
- 16 Kavishe, F. P. L. E Baker, T. J. Effect of Prior Austenite Grain Size and Pearlite Interlamellar Spacing on Strength and Fracture Toughness of a Eutectoid Rail Steel. Materials Science and Technology, v. 02, p. 816 – 822. 1985.
- 17 Ravaee, R.; Hassani, A. Fracture Mechanics Determinations of Allowable Crack Size in Railroad Rails. Journal of Failure Analysis and Prevention, v. 7, p. 305 – 310. 2007.
- 18 EN 13674-1. Railway Applications – Track – Rail – Part 1: Vignole railway rails 46kg/m and above. 2003.
- 19 Godefroid, L.B.; Fundamentos de Mecânica de Fratura. 2ª Edição. Ouro Preto: Imprensa Universitária da UFOP, 1995.
- 20 AREMA. Manual for Railway Engineering, v. 1. 2013.