

ANÁLISE DE FALHA DO TRILHO RETO DE UM FORNO DE PELOTIZAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO ¹

Marcelo Tadeu Milan ²
Omar Maluf ³
José Ricardo Tarpani ⁴
Jair Valfre ⁵
Cristiano Pereira ⁶

Resumo

O trilho reto de um forno de pelletização de minério de ferro apresentou forte desgaste na região do boleado. Determinou-se que o mecanismo básico de dano é a fadiga por contato por rolamento puro entre o componente e as rodas do carro de pelletização. Trincas sub-superficiais, paralelas ao plano de desgaste do trilho, nucleiam quase que invariavelmente junto às bandas de ferrita da microestrutura hipoeutetoide, levando a descamação da superfície. Apesar do relativamente baixo teor de enxofre do aço utilizado, ficou evidenciado que as trincas se iniciam preferencialmente junto a partículas alongadas de sulfeto de manganês imersas na ferrita pro-eutetóide. Recomendou-se o uso de um aço com maior teor de carbono e menor de enxofre, e sugerido o aumento da área de contato entre roda e trilho de modo a reduzir a pressão de contato entre as partes.

Palavras-chave: Aço de construção mecânica; Análise de falha; Desgaste; Fadiga por contato; Trilho estrutural.

FAILURE ANALYSIS OF A CRANE RAIL EMPLOYED IN A IRON ORE PELLETIZING FURNACE

Abstract

A crane rail employed in iron ore pelletizing furnace presented severe wear on the rail head surface. It was found that the basic mechanism of damage is pure rolling contact fatigue between the rail and the pallet car wheels. Subsurface cracks, parallel to the wear surface of the rail, nucleate almost invariably alongside ferrite bands of the hypoeutectoid microstructure, resulting in surface flaking. Despite the low sulfur level of the steel, it was evident that cracks nucleate preferably along deformed manganese sulfide particles embedded in the pro-eutectoid ferrite. It was recommended a higher carbon steel with lower sulfur content and to increase the contact area between the crane rail and the wheel in order to reduce the Hertzian pressure developed in the component.

Key words: Crane rail; Failure analysis; Rolling contact fatigue; Structural steel; Wear.

¹ Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.

² PhD em Engenharia, Diretor Superintendente MIB - Materials Institute of Brazil, milan@mib.eng.br

³ Doutor em Engenharia, Diretor Executivo MIB - Materials Institute of Brazil

⁴ Professor do Depto de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (SMM-EESC-USP), Brasil

⁵ Engenheiro Mecânico do Depto de Engenharia de Materiais da CVRD em Vitória-ES

⁶ Engenheiro Mecânico do Depto de Engenharia de Manutenção Mecânica da CVRD em Vitória-ES

1 INTRODUÇÃO

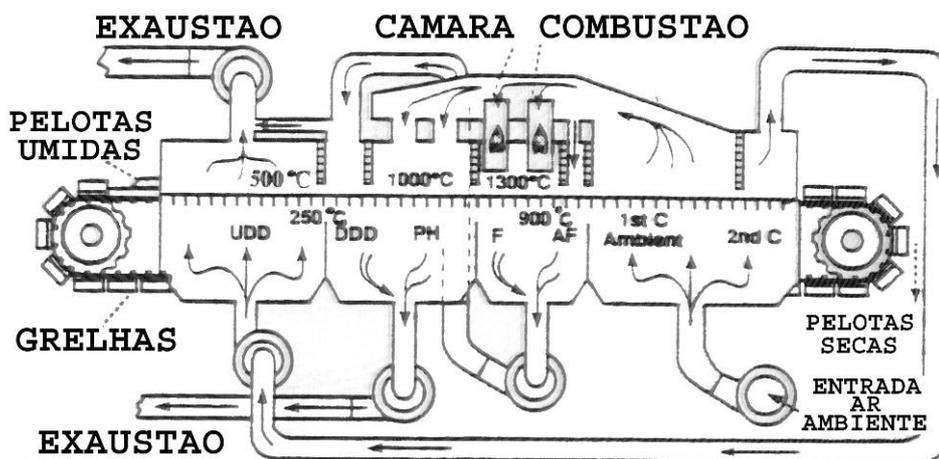
Um esquemático de parte de um forno de pelotização de minério de ferro e ilustrado na Figura 1a. Basicamente, uma correia sem fim, composta por vários carros, conduz pelotas através do forno. No fundo de cada carro há um arranjo de barras de grelha confeccionadas com aço inoxidável que suportam as pelotas e ao mesmo tempo permitem que gases circulem no leito de pelotas. Enquanto as cargas de pelotas atravessam o forno elas são sujeitas a um ciclo completo composto pelas etapas de secagem, aquecimento, queima e resfriamento, quando temperaturas tão altas quanto 1200°C podem ser alcançadas em determinadas partes do sistema. Um típico carro de grelha do tipo vagonete e ilustrado na Figura 1b, o qual circula ininterruptamente sobre trilhos (destaque no círculo vermelho).

No presente trabalho, objetiva-se determinar os mecanismos de falha do trilho reto de um forno de pelotização.

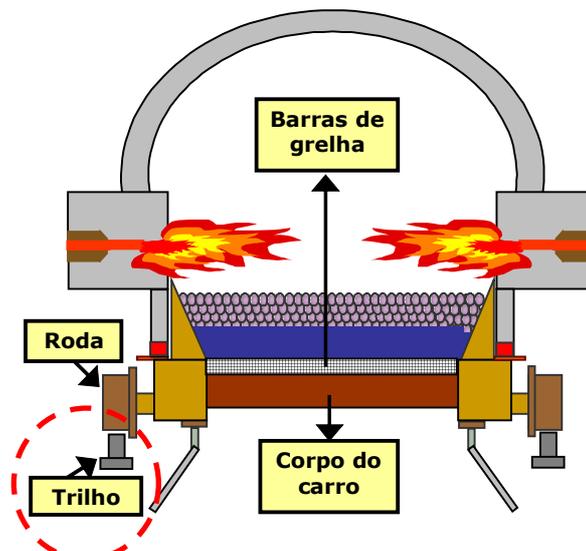
O trilho, mostrado na Figura 2, é fabricado por laminação a quente, e o aço que o constitui deve apresentar uma resistência mínima a tração da ordem de 690 MPa.

As temperaturas de serviço do componente variam entre 60°C e 80°C.

O trilho sofre maior desgaste na região do boleado (face superior). Quando ocorre desnivelamento, a aba da roda pode provocar desgaste na face interna do trilho.



(a)



(b)

Figura 1 - (a) Esquemática simples de forno de pelotização; (b) Carro de grelha.



Figura 2 - Detalhe do contato roda-trilho no forno de pelotização.

2 EXPERIMENTAL

Foram realizados os seguintes procedimentos:

- Análise química (espectrometria de emissão óptica e microsonda EDX);
- Análise visual;
- Análise por microscopias óptica e eletrônica de varredura (MEV);
- Micro- e macro-durezas Vickers e Brinell, respectivamente;
- Ensaio mecânico de tração;
- Estimativa da pressão de contato.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise Química

Os resultados da Tabela 1 confirmam que o material obedece a composição especificada pela norma DIN 536-1 padrão A65-70.^[1]

Tabela 1: Análise química por espectrométrica de emissão óptica.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
Amostra	0,48	0,26	1,00	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01
DIN 536-1 A65	0,40- 0,60	0,35	0,80- 1,20	0,05	0,05	-	-	-

3.2 Análise Visual

A Figura 3 mostra a seção transversal do trilho, em que se observa uma “orelha” na lateral externa (à direita), causada pela deformação plástica induzida pela pressão de contato das rodas dos carros que sobre eles se deslocam. No lado interno do trilho (à esquerda), o material deformado foi removido pelo desgaste gerado pelo contato com a aba da roda. Exceto pela altura, as demais dimensões encontram-se dentro do especificado pela norma DIN 536-1 padrão A65 para o componente em questão.

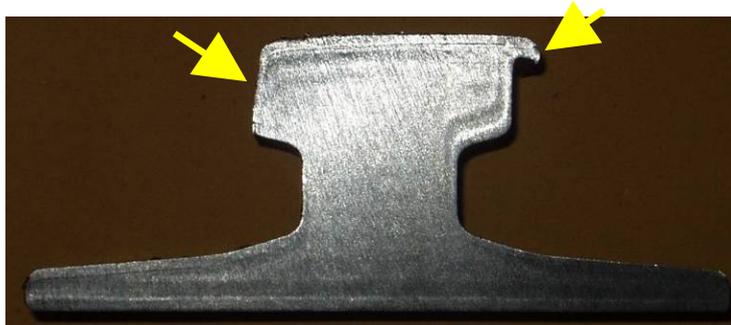


Figura 3 - Seção transversal do trilho avaliado.

Uma análise mais apurada da superfície dos (Figura 4) mostra nitidamente a presença de escamas superficiais, resultantes de um processo de fadiga por contato.^[2,3] As bordas das escamas se estendem na direção do movimento da roda do carro de pelotização. Além desses, não foram encontrados outros tipos de defeitos significativos que pudessem comprometer o desempenho dos trilhos.



Figura 4: (a) Vista geral da superfície de rolagem do trilho; (b) Ampliação destacando as escamas produzidas pelo rolamento.

A Figura 5 revela mais adequadamente a morfologia das escamas vistas na Figura 4.



Figura 5 - Escamas reveladas e destacadas por líquido penetrante.

3.3 Microscopia Óptica

A Figura 6, relativa ao plano de observação metalográfica LT, correspondente ao de desgaste do trilho, mostra uma microestrutura de grãos perlíticos grosseiros (até 150 μm de diâmetro) de formato aproximadamente equiaxial, cercados por ferrita pró-eutetóide.

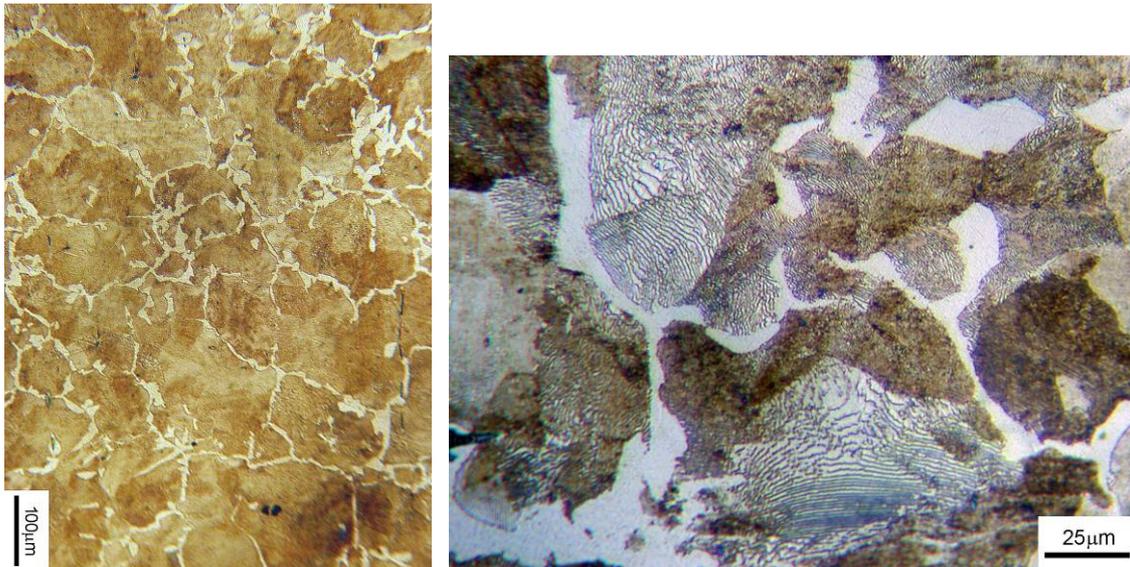


Figura 6 - Microestrutura típica do plano de desgaste do trilho. Plano LT, ataque Nital 1%.

Trincas sub-superficiais, paralelas ao plano de desgaste LT, são claramente evidenciadas na Figura 7. Verifica-se que as mesmas nucleiam predominantemente junto às bandas de ferrita, fase mais mole do aço, e, portanto, apresenta menor limite de resistência à fadiga. Entretanto, apesar do baixo teor de enxofre do aço em questão (Tabela 1), a possibilidade de nucleação de trincas junto a sulfetos deformados pelo rolamento também não pode ser descartada.

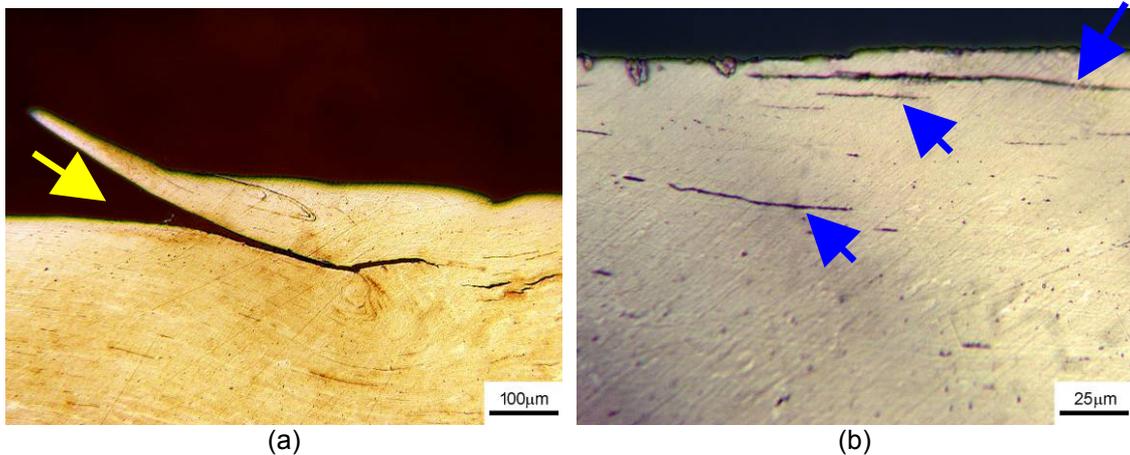


Figura 7 - (a) Típica microtrinca paralela à superfície de desgaste do trilho; (b) Trincas sub-superficiais que ainda não afloraram a superfície de desgaste. Plano TS, sem ataque.

Conclui-se que o descamamento devido ao processo cíclico de rolamento e o mecanismo básico de perda de massa do trilho. Essencialmente, a pressão de contato da roda reduz progressivamente a espessura da extremidade das escamas (Figura 7a) resultando em fraturas seqüenciais que reduzem seu comprimento. Este processo expõe o material abaixo ao contato direto com a roda e assim sucessivamente. Adicionalmente, a presença de partículas de minério, muito mais duras que o metal do componente, no contato roda-trilho auxilia na perda de massa das escamas por meio de desgaste abrasivo.

3.4 Dureza

Medidas de dureza Brinell com carga de 187,5 kg e esfera de 2,5 mm foram realizadas no plano TS da amostra da Figura 7 e os resultados estão na Tabela 2.

Tabela 2: Dureza Brinell efetuada no plano TS do trilho avaliado.

Dureza HB						Média	
285	278	285	278	285	278	292	283

A Figura 8 plota o perfil de microdureza Vickers com massa de 100 g, próximo a superfície de desgaste, ao longo do plano metalográfico TS. Observa-se que a dureza diminui à medida que se afasta da superfície de desgaste, indicando que o material se apresenta encruado nas proximidades da superfície de contato com a roda do carro. A camada efetivamente encruada possui cerca de 1 mm de espessura.

Vale mencionar que os valores máximos de dureza obtidos nas proximidades da superfície do componente são equivalentes ao da hematita, a partícula menos dura dentre as que constituem o minério de ferro.

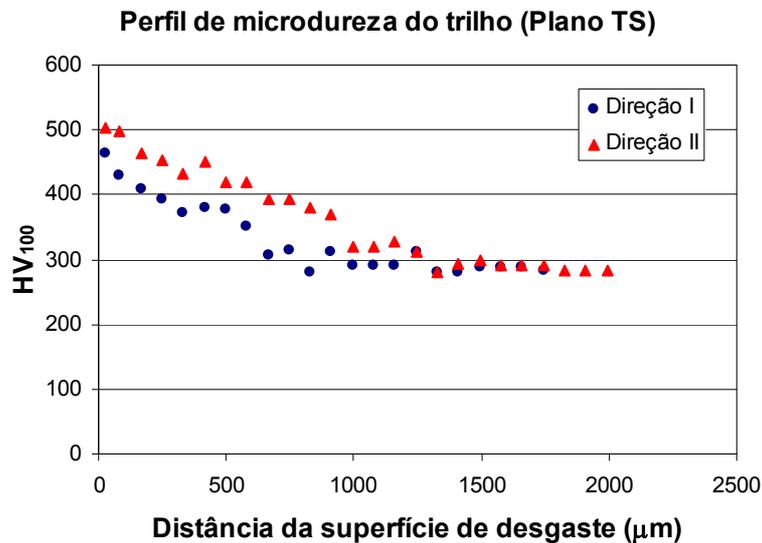


Figura 8: Perfil de microdureza Vickers obtido no plano TS do trilho investigado.

3.5 Tração Monotônica

A Tabela 3 lista os resultados de ensaios de tração a temperatura ambiente de espécimes retirados na direção longitudinal da região do boleado, abaixo da superfície deformada. Os valores satisfazem plenamente a norma DIN 536-1 para o padrão A65-70.

Tabela 3: Propriedades mecânicas de tração do trilho à temperatura ambiente.

Corpo de Prova	E (GPa)	Se (MPa)	Sr (MPa)	A (%)	RA (%)
CP1	182	466	758	21	6
CP2	178	451	754	18	8
CP3	194	446	756	16	9
Média	185	454	756	18	8
Especificado DIN 536 A65-70	-	355 min	690 mín.	12 min	-

Onde:

E = módulo de elasticidade

S_e = limite de escoamento (0,2%)

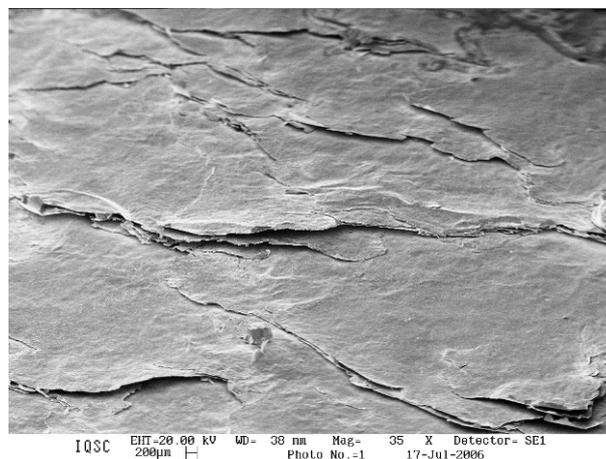
S_r = limite de resistência à tração

A = alongamento na fratura ($L_0 = 25$ mm).

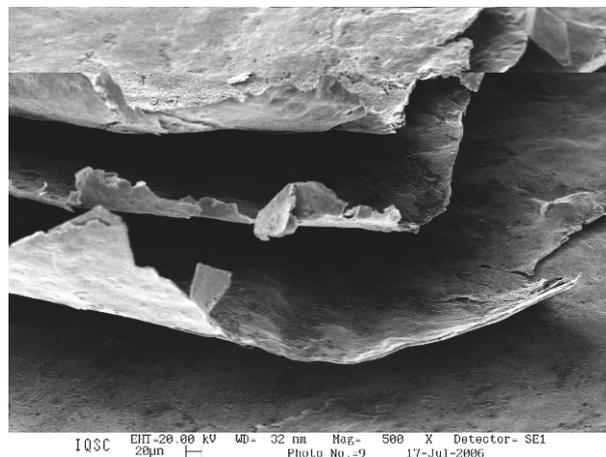
RA é a redução de área na fratura

3.6 MEV e EDX

A Figura 9 mostra nitidamente a formação das escamas superficiais sucessivas e fragmentação das suas extremidades que causam a perda progressiva de massa do trilho. Medições indicam que a espessura das camadas na borda é da ordem de 10 μm .



(a)



(b)

Figura 9 - (a) Imagem obtida por MEV da superfície de desgaste do trilho (boleado); (b) Ampliação.

A Figura 10 confirma, em micro-análise por EDX realizada a longo do plano TS, a suspeita inicial, via microscopia óptica, de que sulfetos de manganês, MnS, deformados pelo processo de rolamento, poderiam originar as trincas sub-superficiais paralelas ao plano de rolamento. Em geral, o MnS, um composto intermetálico, possui um formato globular que sob condições de carregamento não é capaz de concentrar altos níveis de tensão. Entretanto, uma estrutura acicular, tal como a apresentada pelos sulfetos deformados da Figura 9a, apresenta, quando sob

a imposição de um carregamento mecânico externo, a habilidade de concentrar e intensificar localmente os níveis de tensão trativa (cisalhante internas), favorecendo assim a nucleação e a propagação de microtrincas, em especial sob carregamento cíclico (fadiga).

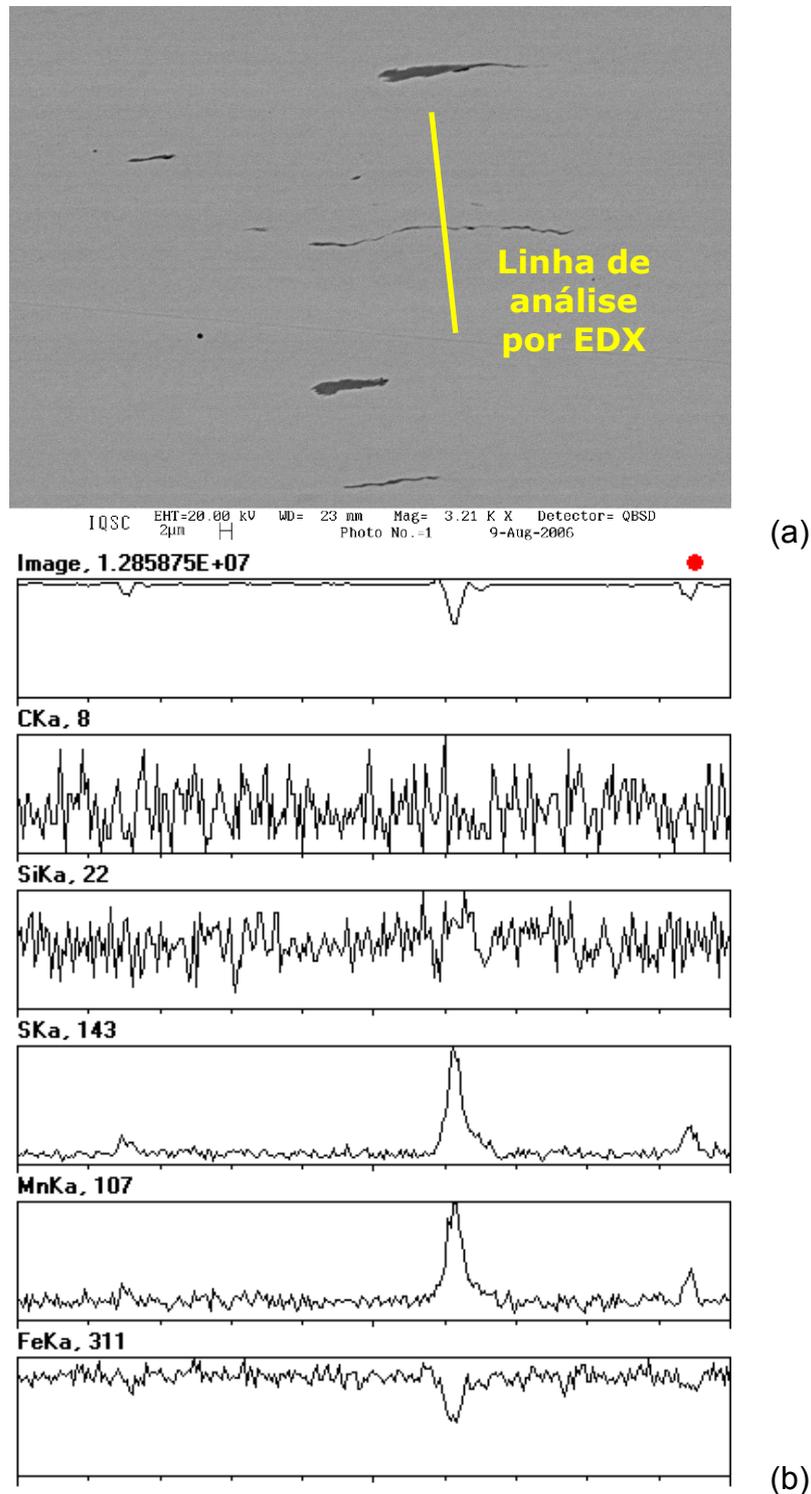


Figura 10: Análise por EDX linear de uma amostra metalográfica do trilho segundo o plano TS. (a) Vista dos sulfetos; (b) Picos de absorção destacados dos elementos S e Mn.

3.7 Estimativa da Pressão Hertziana no Trilho

A baixa velocidade do carro, assumida como constante, ou seja, sem acelerações e desacelerações significativas, sugere pouco ou nenhum escorregamento entre a roda e o trilho. Este fato, aliado à presença de trincas subsuperficiais paralelas à superfície do boleado do trilho caracterizam o processo de desgaste conhecido como fadiga por contato por rolamento puro. Em condições em que há rolamento associado a deslizamento, tal como em engrenagens, a tensão cisalhante máxima ocorre exatamente na superfície de contato, nucleando trincas que se propagam em direção ao interior da peça e que depois afloram novamente à superfície provocando, ao final do processo, a perda de fragmentos volumosos de material. O aspecto final da superfície desgastada apresenta crateras em formato de ponta de flecha.

Sob condições de rolamento puro, tal como o caso em questão, o contato da roda sobre a superfície do trilho gera uma pressão hertziana e tensões cisalhantes máximas abaixo da superfície, as quais são responsáveis pela nucleação de trincas subsuperficiais que se propagam subsequentemente pelo mecanismo de fadiga devido à natureza cíclica do carregamento.

A pressão de contato é dada pela equação abaixo:^[4]

$$p_0 = 0,418 \sqrt{\frac{PE}{B} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)} \quad (1)$$

onde p_0 é a pressão de contato desenvolvida em MPa, P é a carga normal em N, B é largura transversal de contato em mm, E é o módulo de Young em MPa e R_1 e R_2 são os raios dos elementos em contato em mm. Para o sistema trilho-roda, o raio do trilho é considerado infinito e a equação se simplifica a:

$$p_0 = 0,418 \sqrt{\frac{PE}{BR_{roda}}} \quad (2)$$

onde R_{roda} é o raio da roda. Considerando que o peso do carro somado a carga de pelotas é algo superior a 10 ton, e que o peso é igualmente distribuído pelas 4 rodas, cada roda está sujeita a uma carga da ordem de 30 kN.

Assumindo o módulo de elasticidade do aço e as dimensões típicas da roda do vagão, tem-se que a pressão de contato é:

$$p_0 = 0,418 \sqrt{\frac{PE}{BR_{roda}}} = 0,418 \sqrt{\frac{30625 \times 200000}{65 \times 150}} = 331,4 \text{ MPa} \quad (3)$$

O valor da pressão hertziana calculada acima é bastante elevado, considerando-se o aço de construção utilizado. Este valor pode ser empregado, por exemplo, para a condução de ensaios de desgaste visando a seleção de materiais mais apropriados a aplicação estrutural em questão.

4 PRINCIPAIS CONCLUSÕES

- O material do trilho encontra-se dentro das especificações de composição química e de limite de resistência à tração de acordo com a norma DIN 536 – 1 padrão A65-70;
- O trilho sofre desgaste em três faces (2 laterais e topo-boleado), sendo esta última a que exibe mais extensivo dano por desgaste;
- O material sofre um processo de desgaste por meio de fadiga por contato por rolamento puro, em que sucessivas camadas de material, na forma de escamas, são continuamente removidas da superfície;
- A presença do minério de ferro, fase dura se comparada ao aço, favorece o desgaste por abrasão do componente avaliado;
- A pressão de contato da roda sobre o trilho gera tensões cisalhantes que, devido à sua natureza cíclica, nucleiam trincas por fadiga. As trincas nucleiam preferencialmente junto às bandas de ferrita e/ou a sulfetos de manganês deformados, os quais são fases relativamente moles.

5 RECOMENDAÇÕES

- Utilizar um material de maior dureza, com maior teor de carbono, e maior pureza, com menor teor de enxofre;
- Aumentar a área de contato entre roda e trilho, adotando-se trilhos de maior bitola e/ou aumentar o raio da roda, para reduzir a elevada pressão de contato estimada analiticamente.

REFERÊNCIAS

- 1 DIN 536 – Part 1 (1991) Crane rails – Hot rolled flat bottom crane rails (type A), Dimensions, section parameters and steel grades.
- 2 Beynon, J.H.; Garnham, J.E.; Sawley, K.J. (1996) Rolling contact fatigue of three pearlitic rail steels. *Wear*, v.192, p.94 -111.
- 3 Perez-Unzueta, A.J.; Beynon, J.H. (1993) Microstructure and wear resistance of pearlitic rail steels. *Wear*, v.162-164, p.173-183.
- 4 Timoshenko, S.P.; Goodier, J.N. (1970) *Theory of elasticity*. 3rd Ed., Mc Graw-Hill, Chap.1-3.