

# ANÁLISE DE FALHA DE CORPOS DE CARROS DE PELOTIZAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO<sup>1</sup>

Marcelo Tadeu Milan<sup>2</sup>

Omar Maluf<sup>3</sup>

José Ricardo Tarpani<sup>4</sup>

Claudio Finamore Ferraz<sup>5</sup>

Tenório Freitas<sup>6</sup>

## Resumo

Carros de pelotização de minério de ferro sofreram acentuados encurtamento longitudinal e perda de massa, além de trincamento, empenamentos, flechas excessivas e forte desgaste. Determinou-se que o excesso de teor de enxofre da liga segregou nos contornos de grão na forma de sulfetos, facilitando a nucleação de cavidades e reduzindo a ductilidade do aço. Desta forma, fadiga termo-mecânica e fluência atuaram sinergicamente levando ao trincamento, empenamento e encurtamento dos carros. Em adição, oxidação, desgaste erosivo e abrasivo contribuíram para a expressiva perda de massa dos componentes. Recomendou-se um aço com menor teor de enxofre e com elementos de liga que estabilizem este elemento, visando inibir o crescimento de cavidades e incrementar a resistência à oxidação da liga. Sugeriu-se também o emprego de aço com menor coeficiente de expansão térmica, para minimizar os efeitos de fadiga térmica e mecânica.

**Palavras-chave:** Aço de construção mecânica; Análise de falha; Fadiga termo-mecânica; Fluência; Oxidação.

## FAILURE ANALYSIS OF PALLET CAR CENTER CASTING EMPLOYED IN IRON ORE PELLETIZING PROCESS

### Abstract

Pallet car center casting employed in iron ore pelletizing process presented severe longitudinal shortening, mass loss, cracking, warping, excessive sagging and wear. It was found that in excess sulfur content segregated at grain boundaries as sulfide, which facilitated the nucleation of cavities and reducing the ductility of the steel. This way, thermo-mechanical fatigue and creep interacted synergistically leading to cracking, warping and shortening of the cars. Additionally, oxidation, erosive and abrasive wear contributed to the expressive weight loss of the pallet car center castings. It was recommended a lower sulfur steel with alloy elements that inhibit cavity growth and simultaneously increase the oxidation resistance. It was also suggested a lower thermal expansion coefficient steel in order to minimize thermal and mechanical fatigue effects.

**Key words:** Creep; Failure analysis; Oxidation; Structural steel; Thermo-mechanical fatigue.

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

<sup>2</sup> *PhD em Engenharia, Diretor Superintendente MIB - Materials Institute of Brazil, \*milan@mib.eng.br*

<sup>3</sup> *Doutor em Engenharia, Diretor Executivo MIB - Materials Institute of Brazil*

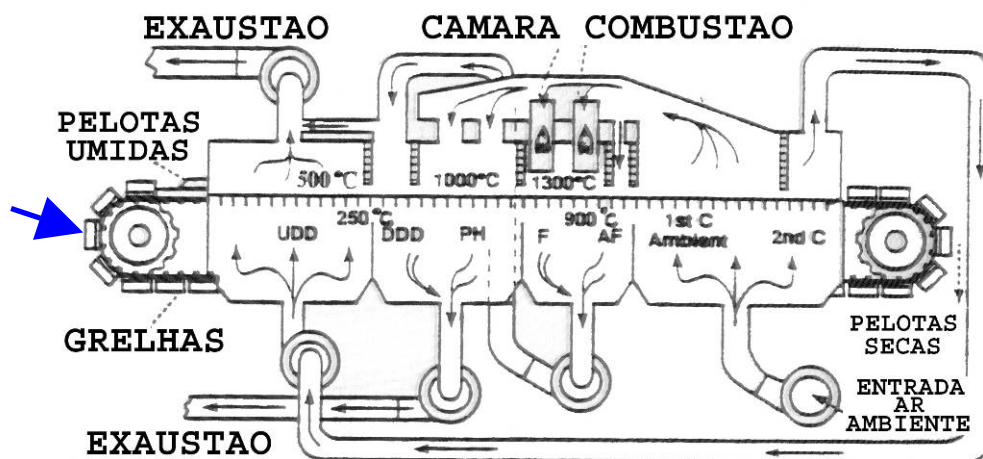
<sup>4</sup> *Professor do Depto de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (SMM-EESC-USP), Brasil*

<sup>5</sup> *Engenheiro Mecânico Especialista em Materiais do Depto de Engenharia de Materiais da CVRD em Vitória-ES*

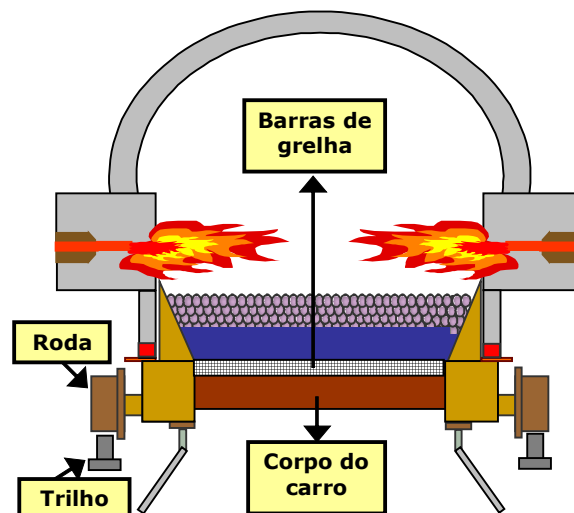
<sup>6</sup> *Supervisor Técnico de Manutenção do Depto de Pelotização da CVRD em Vitória-ES*

## 1 INTRODUÇÃO

Um esquemático de parte de um forno de pelotização de minério de ferro é ilustrado na Figura 1a. Basicamente, uma correia sem fim, composta por vários carros (seta azul), 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 é ilustrado na Figura 1b, o qual circula ininterruptamente sobre trilhos.



(a)



(b)

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

Neste trabalho, objetiva-se determinar os mecanismos de falha do corpo de carros de pelotização de minério de ferro que apresentaram diversos problemas em serviço. Ao todo, o corpo do carro recebido para análise, similar ao mostrado na Figura 2, sofreu 3 inversões de posição para compensação de flecha negativa desenvolvida. Os carros sofrem “encurtamento” (da ordem de dezenas de mm) no sentido das vigas longitudinais com o decorrer do tempo, além de perda de massa (ordem de centena de kg).

Um aço típico para a aplicação em questão é o ASTM A217 - WC6 modificado quanto aos teores de P e S.

A temperatura máxima atingida em serviço pelo componente é da ordem de 450°C na superfície próxima à carga de pelotas, durante a etapa de queima. No entanto, durante paradas curtas para a troca de carros, temperaturas de até 660°C podem ser momentaneamente atingidas.

Os principais tipos de danos reportados incluem trincas, empenamentos, flechas excessivas, desgaste e encurtamento.

Frequentemente recuperações do carro são realizadas por meio de soldagem a arco com eletrodos revestidos.



**Figura 2** - Carro de grelha.

## **2 EXPERIMENTAL**

Foram realizados os seguintes procedimentos:

- Análise química (espectrometria de emissão óptica e microsonda EDX);
- Análise visual;
- Análise por microscopias óptica.

## **3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **3.1 Análise Química**

Conforme mostra a Tabela 1, exceto pelo teor de enxofre em excesso, os elementos analisados encontram-se dentro dos limites especificados para o aço ASTM A217 - WC6 modificado.

**Tabela 1** - Análise química por espectrométrica de emissão óptica.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
Amostra	0,14	0,40	0,76	0,03	0,03	1,43	0,51
A217 - WC6 mod.	0,18 <i>max</i>	0,60 <i>max</i>	0,50- 0,80	0,03 <i>max</i>	0,01 <i>max</i>	1,0-1,5	0,45- 0,65

O enxofre possui um papel decisivo no comportamento mecânico de ligas ferrosas submetidas a altas temperaturas. Durante longos tempos de exposição, o enxofre tende a segregar para os contornos de grão, diminuindo sua energia interfacial e facilitando a nucleação de cavidades. As quantidades necessárias do elemento para que este fenômeno ocorra são da ordem de ppm; por exemplo, a presença de apenas 200 ppm de enxofre (0,02%) é capaz de reduzir a ductilidade do ferro puro pela metade.<sup>[1]</sup> Por outro lado, a presença do fósforo pode ser benéfica, aumentando o teor de enxofre que pode ser tolerado sem perda significativa de ductilidade. O fósforo tem a propriedade de retardar a segregação de enxofre para os contornos de grão.<sup>[2]</sup>

### 3.2 Análise Visual

A Figura 3 mostra que grandes trincas transversais se desenvolvem nas vigas longitudinais do carro, em especial nas regiões próximas a de seu travamento por vigas transversais. Pode-se inferir que a força motriz para nucleação e propagação das trincas nas vigas longitudinais reside tanto nos gradientes térmicos quanto nos ciclos de aquecimento e resfriamento impostos ao componente em serviço.

A face superior da viga está mais próxima do forno e, portanto, as temperaturas média e máxima alcançadas durante a queima das pelotas de minério transportadas são muito superiores à da face inferior. Portanto, existe um gradiente térmico ao longo da espessura da viga, responsável pela introdução de tensões no componente.

Durante o aquecimento, a dilatação térmica da face superior da viga tende a ser restringida pela sua parte inferior, que está a uma temperatura mais baixa. Como resultado, surgem tensões compressivas na região superior e tensões trativas na região inferior da viga. Este perfil de tensões, representado esquematicamente na Figura 4, tende a ser acentuado pelo próprio peso do carro e da carga de pelotas.

As tensões compressivas desenvolvidas na região superior da viga podem ser elevadas o suficiente para provocar deformação plástica, ou seja, deformação permanente, provocando assim um encurtamento da região. Desta forma, durante o resfriamento da viga, a região superior da viga, deformada plasticamente por compressão, será solicitada em tração, possibilitando a nucleação e propagação de trincas.

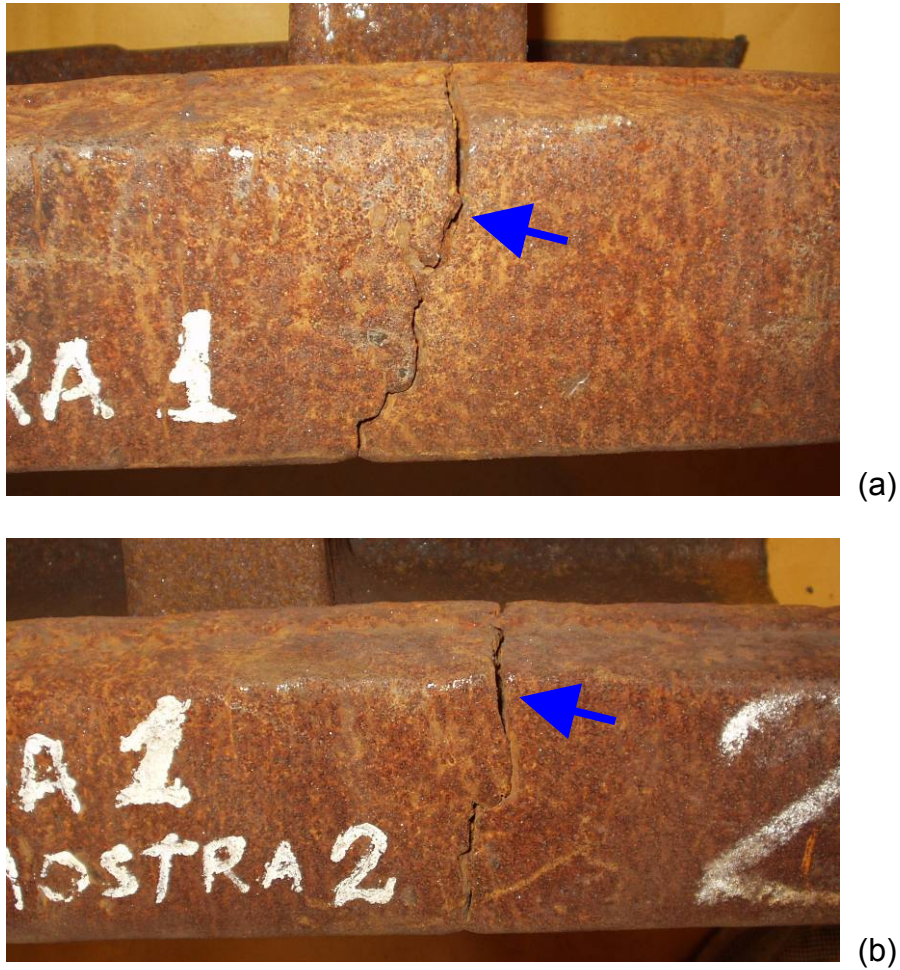


Figura 3 - Trincamentos transversais em vigas longitudinais dos carros de pelotização.

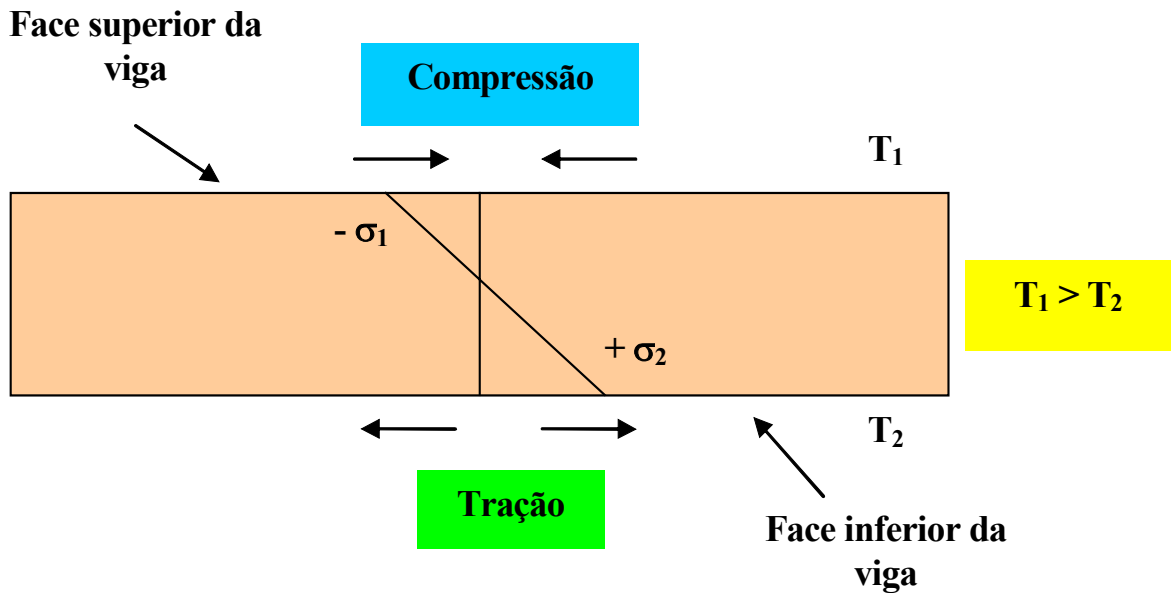
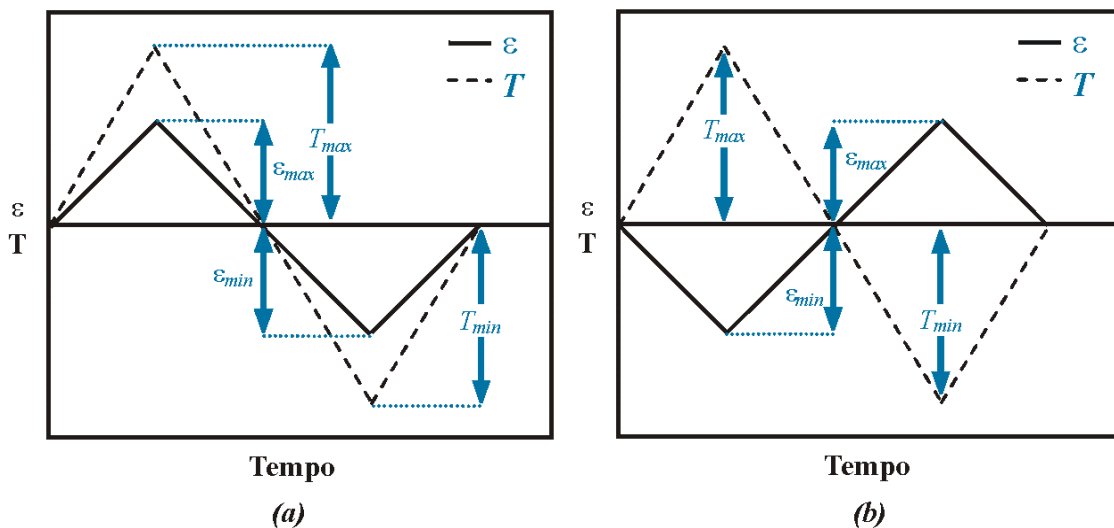


Figura 4 - Representação esquemática do gradiente de tensões na viga do corpo do carro devido ao gradiente térmico imposto em serviço.

Deve-se enfatizar que a grande espessura das vigas introduz gradientes térmicos locais entre a superfície e o centro do material, e que se superpõem ao gradiente macroscópico descrito anteriormente, dado que, naturalmente, a superfície do material se aquece e resfria mais rapidamente do que o centro.

Portanto, o material da viga está sujeito a condições de fadiga termo-mecânica, onde ocorre a aplicação simultânea de ciclos de deformação (de origem térmica e externa) e temperatura. No caso da região superior da viga, a máxima temperatura do ciclo (no aquecimento) coincide com a máxima deformação compressiva, e, por outro lado, a mínima temperatura (no resfriamento) coincide com a máxima deformação trativa, caracterizando o que se chama de fadiga termo-mecânica fora-de-fase. Por outro lado, na região inferior da viga, a máxima temperatura do ciclo (no aquecimento) coincide com a máxima deformação trativa, e, inversamente, a mínima temperatura (no resfriamento) coincide com a máxima deformação compressiva, caracterizando o que se chama de fadiga termo-mecânica em-fase. A Figura 5 apresenta esquematicamente os dois tipos de condições acima descritos.



**Figura 5** - (a) Fadiga termo-mecânica em fase; (b) Fadiga termo-mecânica fora-de-fase.

Além do fenômeno de fadiga termo-mecânica, o carro está sujeito ao fenômeno de fluência, uma vez que permanece exposto a carregamentos em temperaturas relativamente elevadas por longos períodos de tempo (embora de modo intermitente). Os mecanismos de dano por fluência, tais como deformação plástica, formação de cavidades/trincas e/ou escorregamento de contornos de grão, contribuem sinergicamente para os efeitos observados de trincamento, empenamento e encurtamento do carro. A fluência ocorre de maneira mais incisiva quando  $T > 0,4T_f$ , onde  $T_f$  é a temperatura de fusão do material na escala absoluta (Kelvin). Para efeito de comparação, para o aço SAE 1020, o valor de  $0,4T_f$  corresponde aproximadamente à temperatura de 450°C. Portanto, no caso do corpo do carro, as temperaturas de operação estão, na maior parte do tempo, abaixo de 40% da temperatura de fusão do material.

As paradas curtas tem um efeito decisivo na introdução de danos no corpo do carro, em virtude do aumento excessivo da temperatura, e conseqüentemente, na introdução de tensões mais elevadas, que podem levar a severas distorções no corpo do carro, como ilustrado na Figura 6a, ou mesmo trincamento generalizado das vigas, na Figura 6b.



(a)

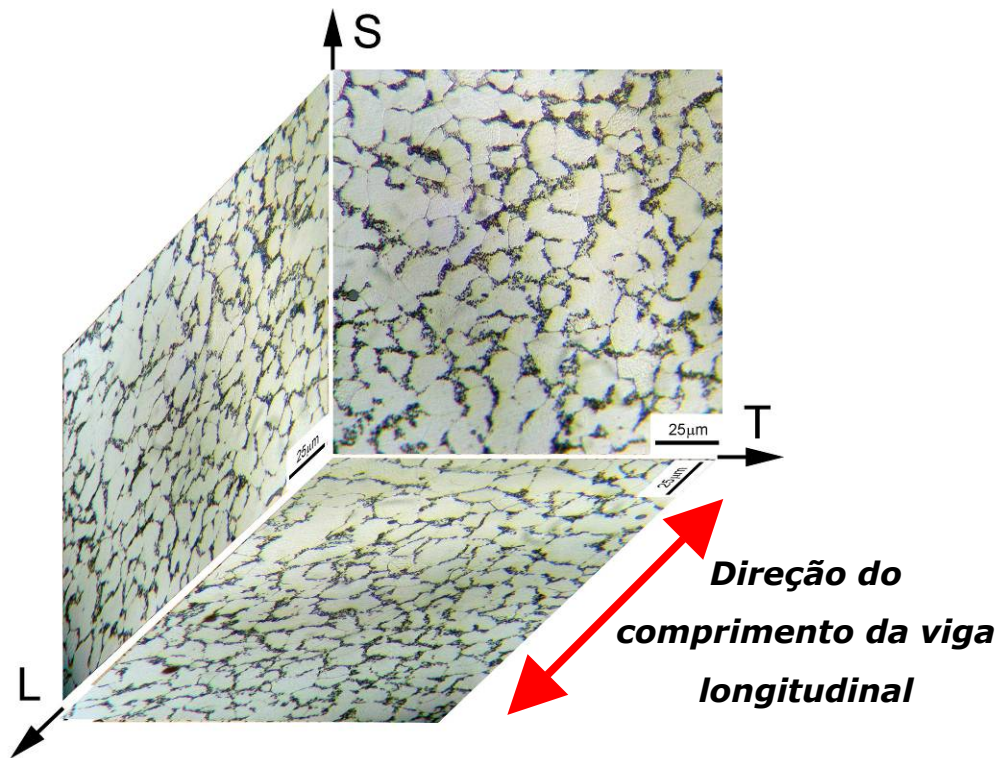


(b)

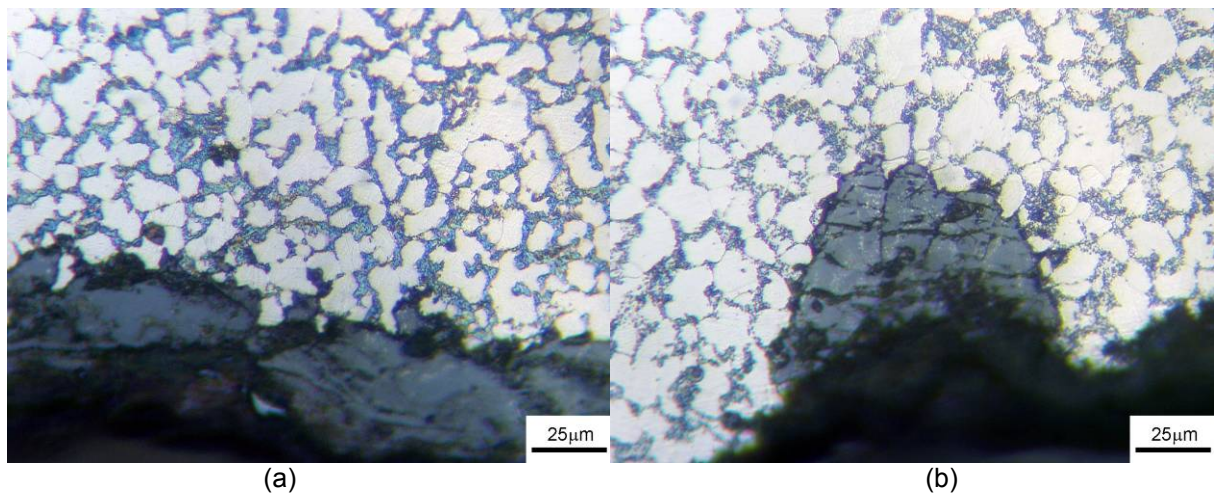
**Figura 6** - (a) Empenamento devido a gradientes térmicos na estrutura fortemente vinculada, e (b) "Queima" localizada do carro devido ao fluxo preferencial de gases próximo à sua lateral.

### 3.3 Análise por Microscopia Óptica e EDX

A microestrutura da viga longitudinal é composta de ferrita e carbonetos esferoidizados em contornos de grão (Figura 7). Não foram observadas cavidades que pudessem caracterizar o mecanismo de fluência nesta região do corpo do carro. Na superfície do corpo do carro (Figura 8) foi detectada presença massiva de óxidos aderidos. O processo de oxidação forma pites na superfície, que atuam como concentradores de tensão, facilitando a nucleação de trincas.



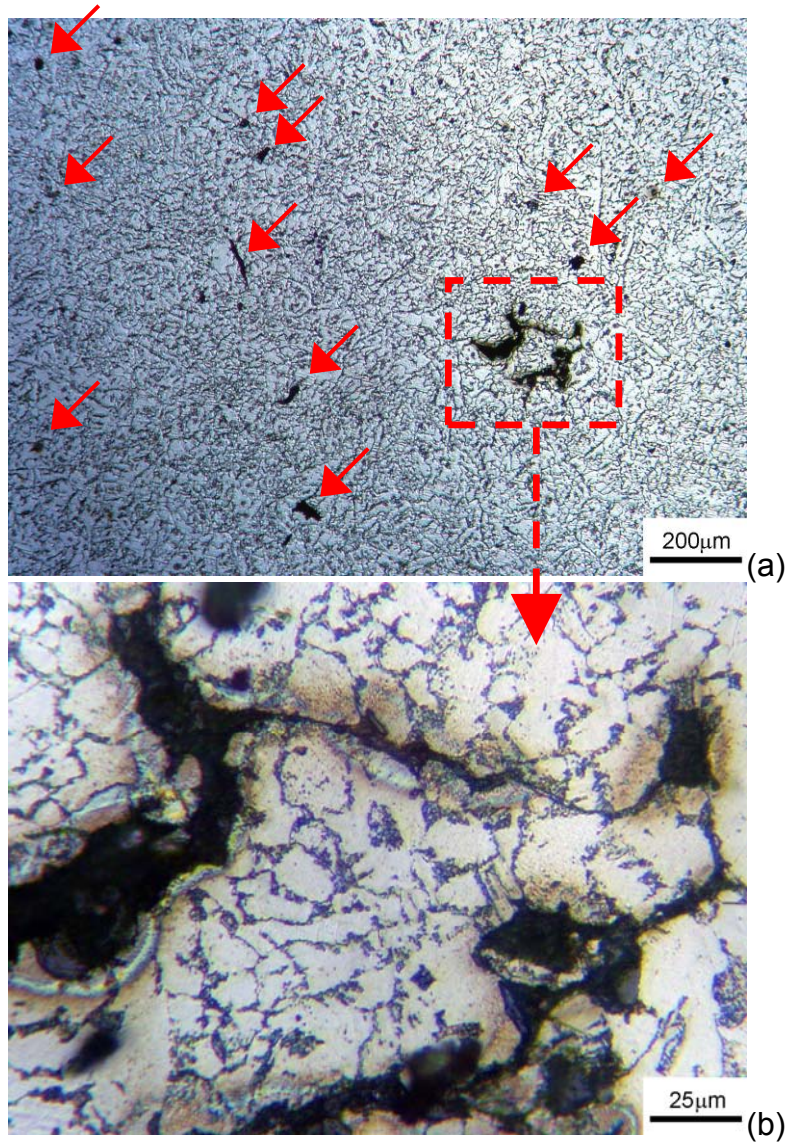
**Figura 7** - Microestrutura típica do corpo do carro.



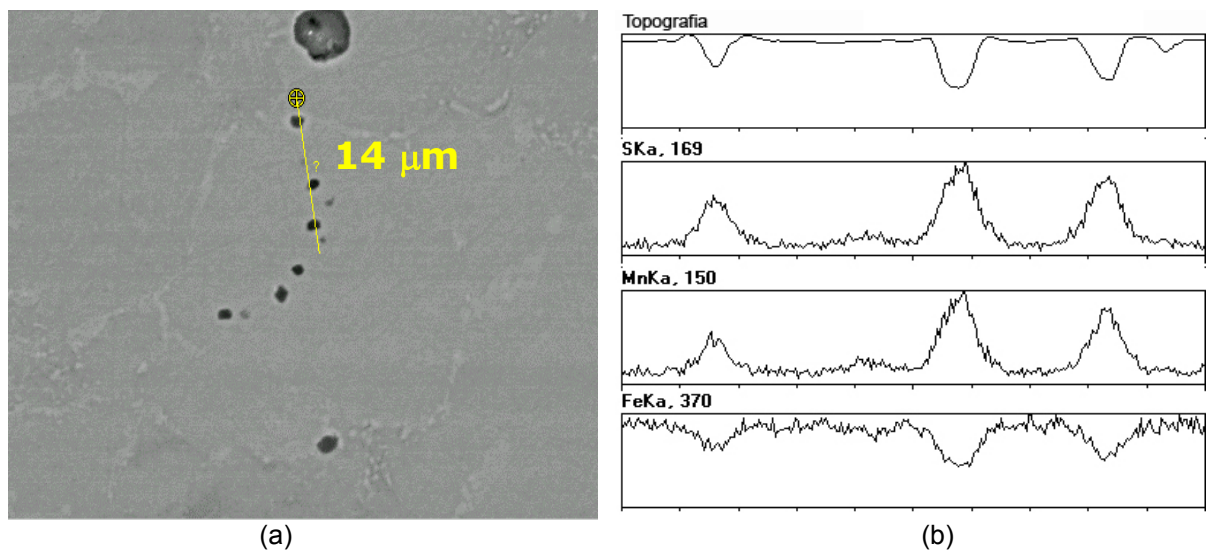
**Figura 8** - Oxidação superficial desenvolvida na face superior da viga.

A análise de uma amostra coletada da face inferior da viga (posição em que se desenvolvem tensões trativas durante a fase de aquecimento do carro, i.e., fadiga termo-mecânica em-fase) mostra, além da microestrutura de grãos ferríticos e carbonetos, uma quantidade significativa de cavidades, conforme vistas na Figura 9. Diversos fatores podem explicar a presença destas cavidades, tais como, defeitos de fundição, porosidade introduzida por processos de recuperação por soldagem anteriormente executados, cavidades originadas por fluência. Neste último caso, a presença de sulfeto de manganês (MnS), detectada por microsonda EDX junto as pequenas cavidades (Figura 10), pode facilitar substancialmente a ocorrência do processo, a despeito das temperaturas não tão elevadas na região durante o serviço. Vale ressaltar que o crescimento destas cavidades por fluência, aliado à natureza cíclica do carregamento, favorece a nucleação de trincas.





**Figura 9** - (a) Análise de amostra retirada nas proximidades da superfície na face inferior da viga (cavidades indicadas pelas setas); (b) Detalhe ampliado da cavidade.



**Figura 10** - (a) Análise linear, e (b) mapeamento por EDX de amostra de viga longitudinal próxima à superfície, mostrando a presença de MnS junto às cavidades.

Note-se que as amostras analisadas da parte superior do carro não apresentaram cavidades na microestrutura que pudessem ser associadas a danos por fluência. Uma das possíveis explicações seria, por exemplo, a de que a região está sujeita a cargas compressivas no pico de temperatura do ciclo térmico, e a nucleação de cavidades requer tensões trativas.

#### **4 PRINCIPAIS CONCLUSÕES**

- O corpo do carro de pelotização falhou predominantemente por sinergia entre os processos de fluência e de fadiga termo-mecânica, devido aos ciclos térmicos impostos e às conseqüentes restrições à dilatação térmica do material. Os danos observados são principalmente trincas e deformação plástica, que se revelam macroscopicamente na forma de empenamentos e encurtamento do carro;
- Mecanismos de oxidação, desgaste erosivo e abrasivo contribuem para a perda de massa do corpo do carro. Em particular, pites de oxidação favorecem a nucleação de trincas por fadiga;
- A formação de cavidades é favorecida pela presença de partículas de sulfetos de manganês, as quais apresentam baixa energia interfacial com a matriz. Os posteriores crescimento e coalescimento destas cavidades resultam em trincas macroscópicas.

#### **5 RECOMENDAÇÕES**

- Reduzir ao mínimo possível o teor de enxofre da liga;
- Empregar microadições de elementos de liga estabilizadores do enxofre e que inibam o crescimento de cavidades;
- Aumentar a resistência à oxidação da liga de modo a evitar perda de massa e a formação de pites favoráveis à nucleação de trincas.
- Empregar uma liga com menor coeficiente de expansão térmica.

#### **BIBLIOGRAFIA**

1. Chen, S.-H.; Takasugi, T.; Pope, D.P. (1983) The effects of trace impurities on the ductility of a Cr-Mo-V steel at elevated temperatures, Metallurgical Transactions A, v.14, n.4, p.571-580.
2. George, E.P.; Kennedy, R.L.; Pope, D.P. (1993) Review of trace element effects on high-temperature fracture of Fe- and Ni-base alloys, Physica status solidi (a), v.167, n.2 , p.313-333.