

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Departamento de Metalurgia

ANÁLISE DE FALHA E CARACTERIZAÇÃO METALÚRGICA DE TRILHOS  
PERLÍTICOS

**Juliano Todeschini de Quadros**

Trabalho de Diplomação

Orientador: Professor Dr. Afonso Reguly

Porto Alegre  
2009

Dedico esta dissertação aos grandes amigos de infância Natan, Felipe e Rafael, que deixam um imenso vazio, tornando os momentos de convívio ainda mais especiais, além da vontade incompreensível de retornar àqueles tempos.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Cleomar e Maria, pelos conselhos e ensinamentos, muitas vezes erroneamente interpretados como sermão.

Ao professor Afonso Reguly, exemplo de professor, um modelo a ser seguido.

À Micromazza PMP Ltda, pelas oportunidades que despertaram em mim um grande interesse pela área metalúrgica.

À todo Grupo de Análise de Falha do LAMEF, por viabilizar a realização deste trabalho, e em especial ao Antônio Stadtländer, pelo suporte sempre que necessitei.

À minha família, na qual estão incluídos os bons e velhos amigos.

Aos professores Antônio Vilela e Telmo Strohaecker, pelo estímulo nesse final de curso, e principalmente pelo otimismo em relação ao futuro.

À minha namorada Cristine, por ter o dom de me fazer feliz.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	VI
LISTA DE TABELAS .....	VIII
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS .....	IX
RESUMO .....	X
ABSTRACT .....	XI
1.0 INTRODUÇÃO .....	1
2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
2.1 Generalidades dos Trilhos.....	3
2.2 Processo de Fabricação .....	4
2.2.1 Marcas de Classificação.....	5
2.3 Trilhos Perlíticos.....	6
2.4 Soldagem dos Trilhos .....	6
2.4.1 Soldagem Elétrica de Topo .....	6
2.4.2 Soldagem Aluminotérmica – in situ.....	7
2.4.3 Comparação entre os dois processos.....	7
2.5 Defeitos em Trilhos.....	8
2.6 Tensões Residuais.....	9
2.7 Considerações sobre Fratura em Trilhos.....	10
3.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	12
3.1 Análise de Falha.....	12
3.1.1 Análise Visual .....	13
3.1.2 Análise Micrográfica.....	13
3.1.3 Microdureza Vickers.....	13
3.1.4 Análise Fractográfica .....	13
3.2 Caracterização do Material .....	14
3.2.1 Análise Química.....	14
3.2.2 Análise Macrográfica.....	14

3.2.3	Impressão de Baumann .....	14
3.2.4	Análise Microestrutural.....	14
3.2.5	Análise de Inclusões.....	15
3.2.6	Tamanho de Grão.....	15
3.2.7	Ensaio de Dureza.....	15
3.2.8	Ensaio de Tração .....	16
4.0	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	17
4.1	Análise de Falha.....	17
4.1.1	Análise Visual .....	17
4.1.2	Microestrutura .....	18
4.1.3	Fractografia .....	21
4.2	Caracterização do Material .....	22
4.2.1	Análise Química.....	22
4.2.2	Avaliação Metalográfica .....	22
4.2.2.1	Análise Macrográfica.....	23
4.2.2.2	Impressão de Baumann .....	23
4.2.2.3	Análise Micrográfica.....	24
4.2.2.4	Análise de Inclusões.....	27
4.2.2.5	Tamanho de Grão.....	28
4.2.3	Propriedades Mecânicas.....	28
4.2.3.1	Dureza Brinell .....	28
4.2.3.2	Resistência a Tração.....	30
5.0	CONCLUSÕES .....	31
6.0	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	32
7.0	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	33

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Trilho Vignole. ....	3
Figura 2.2	Perfil de tensões residuais para um trilho novo e depois de usado (ZERBST, 2005). ....	9
Figura 2.3	Locais mais vulneráveis à nucleação de falhas em trilhos soldados pelo processo aluminotérmico (LAWRENCE, 2004). ....	10
Figura 3.1	Fragmentos de trilho utilizados para análise e caracterização. ....	12
Figura 3.2	Vista superior do segmento 1, apresentando a superfície A. ....	12
Figura 3.3	Região do boleto destinada à análise de inclusões. ....	15
Figura 3.4	Demonstração do local das identações, segundo a norma AREMA 2006. ....	16
Figura 4.1	Desenho esquemático da ruptura no trilho. Dimensões aproximadas dos segmentos em cm. ....	17
Figura 4.2	Fotografia das superfícies de fratura A (esquerda) e B (direita). Presença de marcas de sargento na superfície B. ....	18
Figura 4.3	Imagem em lupa da superfície de fratura B. As marcas de sargento convergem para o ponto de início da trinca ....	18
Figura 4.4	Micrografia da zona de início, apresentando perlita e martensita (faixa clara). À esquerda aumento de 100X e à direita aumento de 200X. ....	19
Figura 4.5	Micrografia mostrando as identações nas duas fases. (a) O resultado da faixa clara é coerente com a dureza Vickers da martensita. Aumento 200X (b) Perfil de dureza, aumento 100X. Os resultados apresentados referem-se às identações da linha central ....	20
Figura 4.6	Perfil de Dureza Vickers, a partir da extremidade do patim, obtido das identações da linha central da Figura 4.5(b) ara o ponto de início da trinca..	20
Figura 4.7	Fractografia caracterizando uma região frágil no material, com aspectos de clivagem, indicando pouca deformação antes da ruptura. ....	21
Figura 4.8	(a) Inclusão em meio a uma superfície apresentando (b) EDS revelando presença de inclusão complexa na zona de início ....	21
Figura 4.9	Macroestrutura da seção transversal indicando um trilho homogêneo. ....	23
Figura 4.10	Resultado da Impressão de Baumann do trilho. ....	24

Figura 4.11	Micrografia da alma, sob aumento de 100X (a) Seção transversal (b) longitudinal.....	25
Figura 4.12	Micrografia do patim, sob aumento de 100X (a) Seção transversal (b) longitudinal.....	25
Figura 4.13	Micrografia da seção transversal do núcleo do boleto. À esquerda com aumento de 500X, à direita com aumento de 100X. ....	25
Figura 4.14	Micrografia da seção longitudinal do núcleo do boleto. À esquerda com aumento de 500X, à direita com aumento de 100X. ....	26
Figura 4.15	Presença de head checks (fissuras) partindo do boleto. Aumento de 100X...	26
Figura 4.16	Demonstrativo das inclusões visualizadas À esquerda, sulfetos de tamanho pequeno. À direita, óxidos com menor ocorrência. Aumento 100X.....	27
Figura 4.17	Seção transversal do boleto, mostrando o tamanho de grão austenítico prévio.....	28
Figura 4.18	Perfil de dureza da região do boleto.....	29

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1	Composição química do material .....	22
Tabela 4.2	Resultado da análise de inclusões .....	27
Tabela 4.3	Medidas das posições determinadas. Resultados não mostraram alterações bruscas na dureza .....	29
Tabela 4.4	Valores do mapeamento de dureza realizado numa seção transversal do trilho.....	30
Tabela 4.5	Valores da resistência à tração do boleto .....	31

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A	ampére
°C	grau Celsius
cm <sup>2</sup>	centímetro quadrado
grf	grama-força
HB	unidade de dureza Brinell
HCl	ácido clorídrico
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	ácido sulfúrico
Hh	homem hora
HRC	escala Rockwell de dureza
km	quilômetro
kg	quilograma
µm	mícron-metro
mm	milímetro
MPa	mega pascal
σ max	limite de resistência à tração
σ esc	tensão de escoamento

## RESUMO

A análise de falha é uma ferramenta empregada para determinação das causas de fratura em serviço dos diversos componentes mecânicos. O objetivo deste trabalho foi estudar os fatores que iniciaram e propagaram uma trinca presente em um trilho ferroviário perlítico, de modo a determinar o mecanismo de fratura do mesmo, correlacionando-o com as propriedades mecânicas e metalúrgicas obtidas de amostras do material no qual o trilho foi confeccionado. Para tanto, se fez necessária a realização de uma série de testes de modo a dispor do maior número de informações que viessem a enriquecer esta análise e caracterização da falha nos trilhos.

Ao final do estudo, foi verificada uma alteração microestrutural resultante do processo de soldagem em estaleiro, responsável por uma fragilização localizada no trilho. Foram também observadas profundas fissuras partindo da superfície de contato com a roda, que assinalam um desgaste excessivo do componente. No núcleo do material foi constatada uma microestrutura uniforme, composição química adequada e propriedades mecânicas conforme a exigência da norma AREMA, não permitindo, desse modo, atribuir a falha à heterogeneidades internas do componente.

**PALAVRAS-CHAVE:** trilho, fratura, fragilização, alteração microestrutural, análise de falha, fissuras, desgaste.

## **ABSTRACT**

Failure analysis is a tool used to determine the causes of fracture in the various mechanic components at its work system. The aim of this work was to study the reasons that started a crack found in rail in order to determine the fracture mechanism of it, correlating with the metallurgical and mechanic properties obtained from samples in which material was the rail manufactured. Thus, was necessary making many tests due to increase informations about this failure analysis and characterization of steel rails.

At the end of study, was checked a microstructural transition resulting from welding process, responsible for local brittleness in the rail. It was also observed deep head checks from the outside wheel surface, assigning high wear of component. In the core of material was checked out an uniform microstructure, appropriate chemical composition and mechanic properties according to AREMA Standard. Thereby, it is not possible to fault the failure to internal heterogeneities of railroad components.

**KEYWORDS:** rail, fracture, brittleness, microstructural transition, failure analysis, head checks, wear.

## 1.0 INTRODUÇÃO

O primeiro registro de transporte com tração a vapor em estrada de ferro data dos primeiros anos do século XIX. Nesse período a Inglaterra vinha sofrendo transformações que revolucionariam drasticamente a história da humanidade, as quais resultaram na alteração total dos meios de produção e do modo como as sociedades viviam. Entre os fatores que justificaram essas transformações, o surgimento de novas tecnologias é apontado como o mais relevante. Uma delas foi a criação de locomotivas a vapor que, por sua vez, viabilizaram a distribuição de mercadorias e o transporte de pessoas em meio terrestre.

No ano de 1825 foi realizada uma viagem – considerada pioneira – de locomotiva a vapor que percorreu 25 km em uma hora. Já em meados do século XIX a malha ferroviária inglesa é consolidada, transportando cargas pesadas a longas distâncias e por fretes reduzidos. As ferrovias caracterizaram o início de uma nova era, e tiveram um papel importante na consagração da Inglaterra como potência hegemônica da Idade Moderna.

Estimulado pela Inglaterra, o Brasil construiu suas linhas em função do café, principal produto de exportação do nosso império. Nos idos de 1950, o sistema ferroviário brasileiro começava a se mostrar deficiente, culminando com sua privatização em 1996. O controle dos 30 mil km de vias férreas foi então concedido para sete grandes empresas.

Os produtos típicos transportados são: minérios, grãos, metais e, em menor grau, combustíveis, carnes, enlatados, produtos químicos, etc. Quando comparado ao transporte rodoviário, temos uma redução de 7% do preço final do produto para o consumidor.

Prognósticos mostram que para um futuro próximo deverá haver uma triplicação no volume de cargas transportadas. Isso significaria a adição de R\$ 15 bilhões por ano no Produto Interno Bruto do país e ainda, haveria diminuição de caminhões, propiciando assim uma maior conservação das rodovias, que, por sua vez, acarretaria na menor emissão de gases poluentes na atmosfera (ANTF, 2009).

O presente trabalho tem por objetivo avaliar a causa da fratura de um componente ferroviário. A falha em serviço gera prejuízos enormes no transporte de cargas e danos irreparáveis no transporte de passageiros. Para que esta avaliação pudesse ser feita, foram realizadas uma série de análises, tanto na região de origem da falha quanto nas demais regiões do trilho.

Desse modo, os dados apresentados neste estudo contribuem para o esclarecimento dos fatores metalúrgicos que envolveram o descarrilamento, visando dispor de informações suficientes para determinar as prováveis razões da ruptura do trilho.

## 2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Generalidades dos Trilhos

Os trilhos são componentes de 12 ou 18 metros de comprimento, responsáveis por guiar as rodas do trem e por sustentá-lo. São vigas em aço assentadas sobre os dormentes e transferem para estes o carregamento da locomotiva. O perfil mais encontrado é o tipo Vignole, mostrado na Figura 2.1. Compreende três regiões distintas: patim, boleto e alma.

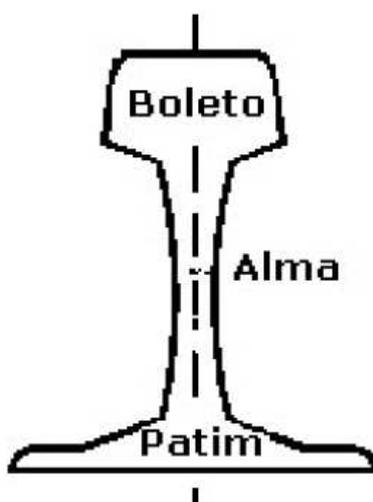


Figura 2.1 Perfil Vignole (LEAL, 2006)

A alma é a parte fina entre o boleto e o patim. É de sua altura e espessura que depende a resistência a flexão. É evidente que se deve ter uma espessura mínima para assegurar rigidez transversal. Já o patim, região inferior do trilho, deve possuir uma espessura tal que mantenha a alma perpendicular ao dormente. É no patim que ocorre a transferência de esforços para os dormentes.

A grande massa concentrada no boleto é justificada pelo desgaste e atrito que o mesmo sofre devido ao contato com a roda do trem. Essa configuração favorece a resistência à flexão, pois há maior concentração de massa nos pontos onde atuam mais tensões normais, permitindo o uso otimizado de material (PORTO, 2004).

Um trilho é confeccionado em aço porque este material é o que oferece as propriedades mecânicas e metalúrgicas mais adequadas para sua aplicação. Em sua vida em serviço, um trilho é submetido a diferentes solicitações, que requerem as seguintes características no material (ROLDO, 1998):

- elevado limite de resistência a tração combinado com tenacidade;
- alta dureza e resistência ao desgaste;
- baixa susceptibilidade à fragilização por hidrogênio;
- resistência a fadiga de contato.

## 2.2 Processo de Fabricação

O processo de fabricação de um trilho envolve as etapas convencionais de fusão da carga, refino do aço e lingotamento, este último já com a composição química ajustada. O nascimento do trilho propriamente dito se dá na laminação: o formato do vão existente entre os rolos laminadores determina a forma da seção do trilho. A etapa de tratamento térmico visa dar à superfície de rolamento dos trilhos uma estrutura martensítica revenida. Para tanto, sobre a mesa do laminador, um ventilador insulfa ar comprimido misturado com água pulverizada. Em um curto intervalo de tempo, o bolete sofre rápido resfriamento e o calor residual contido no restante do trilho reaquece o bolete, deixando-o então esfriar lentamente (LEAL, 2006).

Quanto ao tipo de tratamento térmico realizado, os trilhos são classificados em três, conforme a norma ASTM A1-00:

- Boleto Endurecido: com 30 mm de profundidade da região endurecida. Também conhecido por HH (Head Hardened);
- Boleto Profundamente Endurecido: até 45 mm de profundidade. Também chamado de Deep Head Hardened (DHH);
- Trilho completamente tratado: toda seção transversal é submetida a tratamento térmico, isto é Full Heat Treated (FHT);

### 2.2.1 Marcas de Classificação

Com o objetivo de permitir uma identificação dos e comparação das avarias que venham a ter com as qualidades relevantes nos ensaios, cada tipo de trilho contém marcas características, que podem ser de dois tipos:

a) Na alma dos trilhos

Essas marcas vêm da laminação e são reproduzidas pelo giro dos cilindros. De um lado da alma são estampados a marca da usina, país, a indicação de que o resfriamento foi controlado (RC), o tipo de forno referente à fabricação do aço (T = *Thomas*; B = *Bessemer*; M = *Martin*; E = *Elétrico*; SM = *Siemens-Martin*), o tipo de trilho (quanto ao peso), o ano e o mês de fabricação.

Ex: Arcelor Mittal – Brasil – RC – E - TR-45 – 1995 – IIII(Abril)

Do outro lado da alma é identificado o número da corrida, a letra indicativa da posição do trilho no lingote e o número de ordem do lingote.

Ex: 380195 – C – 15 (C – significa terceiro trilho do lingote).

b) De acordo com a classificação do trilho, a norma ASTM A1-00 estabelece as seguintes

- Trilho 1 – com comprimento padrão encomendado, pertencente a uma corrida cujo teor de carbono se encontra nos cinco pontos superiores da porcentagem de carbono da faixa especificada; tem ambas as pontas pintadas de azul, devendo ser empregado preferencialmente em curvas;
- Trilho 1 – em comprimentos menores que o padrão encomendado (trilhos curtos); tem ambas as extremidades pintadas de verde. Pode ser empregado em qualquer linha;
- Trilho 2 – tem as extremidades pintadas de branco e leva o algarismo “2” estampado em ambas as faces extremas. Só deve ser empregado em linhas para trens de baixa velocidade ou em desvios;
- Trilho X – tem as extremidades pintadas de marrom e leva a letra X estampada em ambas as faces extremas, devendo ser empregado em linhas secundárias;
- Trilho “A” (primeiro trilho de cada lingote) – tem ambas as extremidades pintadas de amarelo.

### 2.3 Trilhos Perlíticos

No estágio atual de desenvolvimento da siderurgia do aço, sabe-se que os principais elementos que respondem pelo aumento da sua resistência são: carbono, manganês e cromo. Portanto, têm-se observado nas usinas um número cada vez maior de trilhos com percentual de carbono entre 0,6 e 0,9%, e teores consideráveis de manganês e cromo, denominados trilhos perlíticos, com maior resistência mecânica e principalmente ao desgaste. São materiais cuja microestrutura é 100% perlítica, sem ferrita livre. Apresenta dureza entre 260 e 290 HB e resistência a tração de 900 a 1200 MPa na condição de como fabricado (ROLD, 1998). A perlita fina com pequeno espaço interlamelar assegura a resistência ao desgaste que o trilho necessita, constituindo um componente de maior vida útil e que permite altas cargas e grande intensidade de tráfego (LEAL, 2004).

### 2.4 Soldagem dos Trilhos

Uma ferrovia pode ser construída com trilhos longos ou curtos, sendo o processo de soldagem imprescindível para as duas configurações. Os dois processos mais usados são descritos a seguir.

#### 2.4.1 Soldagem Elétrica de Topo (Flash Butt Weld)

Consiste em elevar a temperatura da ponta do trilho a cerca de 1000°C, e exercer uma pressão de 500 kg/cm<sup>2</sup>. Um dos trilhos fica fixo, enquanto que o outro é aproximado e afastado, de modo a abrir o arco elétrico entre as duas pontas. Emprega-se por isso, uma corrente de baixa tensão, e de muito forte intensidade – 12.000 A no pré-aquecimento e 60.000 A no *push-top*, produzida por um transformador especial. Quando se consome cerca de 10 mm de metal, a solda propriamente dita é efetuada por pressão. Posteriormente, é feito o tratamento térmico e o acabamento da solda.

#### 2.4.2 Soldagem Aluminotérmica – In Situ

Este processo baseia-se na afinidade do alumínio pelo oxigênio dos óxidos metálicos, liberando o metal e formando alumina. A reação é fortemente exotérmica, gerando o calor necessário para fundir o metal, que se separa da alumina por diferença de densidade. Na junta dos trilhos é feito um molde onde são entornados os reagentes. A folga deixada entre os topos é preenchida com a liga fundida que funciona como metal de adição. Na soldagem aluminotérmica, tem-se as seguintes operações (MUTTON, 2004):

- a) preparo das pontas dos trilhos;
- b) nivelamento e moldagem;
- c) colocação do cadinho;
- d) pré-aquecimento;
- e) reação e sangramento;
- f) acabamento.

A execução de uma solda pode ser feita em 26 minutos e o consumo de mão-de-obra é de aproximadamente 4 Hh/solda em um serviço otimizado.

#### 2.4.3 Comparação entre os dois processos

A soldagem aluminotérmica consagrou-se como o processo mais empregado na soldagem de trilhos na via férrea, devido à sua relativa simplicidade. Já a soldagem elétrica (solda por caldeamento) é um processo automático, independente de habilidade do operador, sendo executada em estaleiro. Este processo produz a melhor solda, mantendo praticamente as mesmas condições de resistência e dureza do material laminado.

No entanto, o transporte de trilhos longos soldados por caldeamento é um fator limitante, enquanto o outro método permite transportá-los, assentá-los, e só então executar a solda.

As juntas normalmente são os pontos iniciais dos defeitos da linha, e que ocasionam os acidentes de tráfego. A prática tem mostrado que a conservação das juntas pode atingir cerca de 40% da mão-de-obra gasta na via permanente, o que justifica a

utilização de trilhos longos soldados. Uma ferrovia assim construída permite uma passagem mais suave do trem, uma vez que dispensa as folgas destinadas à compensar a dilatação térmica dos trilhos (ZERBST, 2005).

Zerbst considera que, se o trilho não se dilata, então é plausível que tensões internas sejam produzidas, o que naturalmente ocorre nos trilhos longos soldados. Já nos curtos, os trilhos adjacentes não exercem, entre si, pressões através de seus topos.

## 2.5 Defeitos em Trilhos

Telmo Porto (2004) classifica as avarias em trilhos quanto à sua fabricação e à sua vida em serviço. Entre os defeitos de fabricação estão os vazios, segregações, inclusões e fissuras oriundas de tensões trativas internas no resfriamento. Dos defeitos que levam às grandes avarias em serviço, os mais comuns são:

- autotêmpera superficial
- escoamento de metal no boleto
- corrosão atmosférica da alma e do patim
- desgaste devido ao contato com a roda
- trincas decorrentes de esforços de fadiga

Todos esses fatores podem ser causas de fraturas em trilhos, sendo o desgaste o fator limitante que ocorre primeiro. Isso se justifica quando se invoca o fato de o valor da dureza da roda ser aproximado ao da dureza do trilho, criando assim uma região de forte atrito. A rapidez com que surge o desgaste é função da carga transportada pelo vagão. Porto (2004) define ainda a variável Desgaste Específico, como sendo a razão entre a área do boleto consumida e a massa bruta circulada sobre o mesmo, sendo o desgaste limitado a 25% da seção transversal do boleto.

## 2.6 Tensões Residuais

São aquelas que permanecem no metal, sem aplicação de solicitações externas, podendo existir nas direções transversal, longitudinal e vertical. As tensões residuais têm

influência na taxa de crescimento dos defeitos. A etapa de laminação provoca essas tensões, por causa da deformação plástica imposta ao material, distribuída irregularmente na seção do perfil (ROLDO, 1998). Na condição de como fabricado, as tensões residuais longitudinais são trativas no boleto, em uma profundidade de até 10 mm a partir da superfície. Em serviço, o contato com a roda do vagão causa deformações plásticas e conseqüente encruamento da superfície do boleto, transformando as tensões residuais em compressivas, como esquematizado na Figura 2.2.

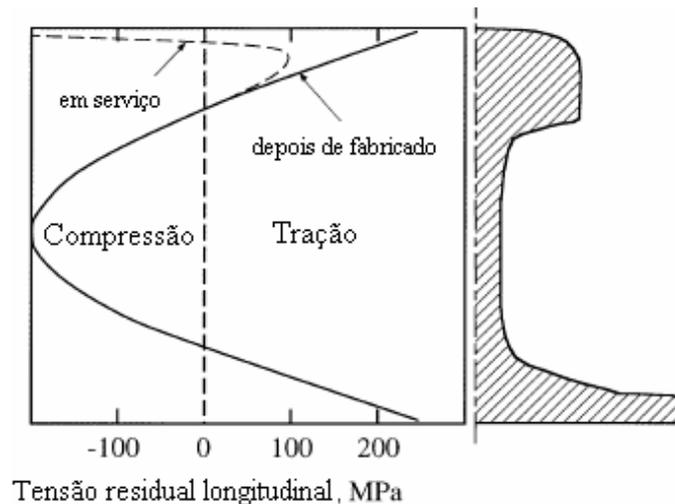


Figura 2.2 Perfil de tensões residuais para um trilho novo e depois de usado (ZERBST, 2005).

Quando submetido à esforço de fadiga, as tensões residuais compressivas não causam fratura, pois atuam no sentido oposto ao de propagação da trinca. Por outro lado, o patim sempre apresenta tensões residuais trativas, facilitando a nucleação de trincas de fadiga. Tanto na alma como no patim a ocorrência dessas trincas é menos freqüente a há maior dificuldade de detecção. Quando se originam do processo de soldagem aluminotérmica, Lawrence (2004) avalia que, se elas incidem no boleto, são facilmente detectadas por ultra-som. Isso justifica a maior incidência de fraturas iniciadas na alma e no patim, conforme apresenta a Figura 2.3.

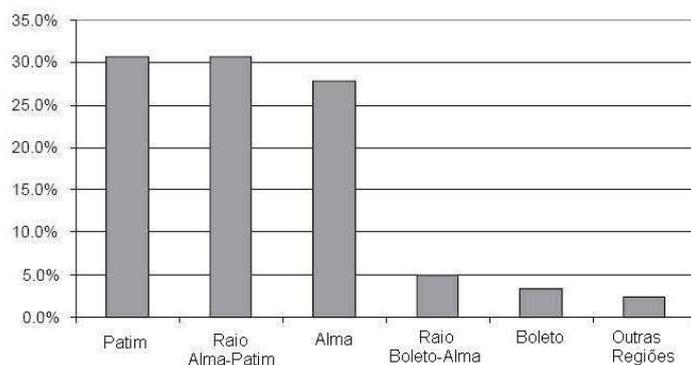


Figura 2.3 Locais mais vulneráveis à nucleação de falhas, em trilhos unidos por solda aluminotérmica (LAWRENCE, 2004).

## 2.7 Considerações Sobre Fratura em Trilhos

Qualquer componente imaginável é projetado para sofrer tensões bem menores do que sua tensão de escoamento, desde que se faça uso do fator de segurança. A tensão de projeto é a tensão de ruptura do componente dividido por esse coeficiente. Desse modo, o componente em serviço é submetido a carregamentos muito abaixo do seu limite de resistência, tornando raros os casos de fratura devido à sobrecarga.

No entanto, se houver um mínimo defeito no componente, o mesmo pode vir a falhar sob tensões abaixo daquela de projeto. Para Broek (1988), uma trinca pode ser considerada uma falha parcial. Um mínimo defeito é desenvolvido em serviço, originando trincas que se propagam, de modo que a peça é levada ao seu colapso final. Broek ainda define o termo fratura por sobrecarga, que não deve ser interpretada como fratura devido a uma carga maior do que a carga máxima de serviço. A vasta maioria das fraturas se dá nos valores próximos aos das cargas de serviço, mas que não são “sobrecargas” do ponto de vista do projeto, e sim falhas que ocorreram por não ter sido detectada a trinca.

Skyttebol (2005) afirma que, uma verdadeira fratura por sobrecarga pode ocorrer devido a dois fatores: se a carga máxima de serviço for muito maior do que a prevista para a estrutura, ou se a peça tinha cantos vivos, ângulos bruscos, etc.

De acordo com Zerbst (2005), danos em trilhos como fissuras, head checks, lascamentos se desenvolvem formando trincas transversais, que ao se propagarem causam a fratura completa do trilho. Sua origem normalmente se dá no boleto e se estendem até a

alma. Estes tipos já foram observado em todas seções da via reta, mas aparecem preferencialmente em trilhos velhos. Uma mínima rachadura na sub-superfície desenvolve uma marca escura acompanhada pelo crescimento da trinca. Se continuar sendo solicitada, a trinca atinge tamanho crítico e rompe o trilho. Investigações detalhadas sobre os head checks mostraram que elas penetram a sub-superfície em, no máximo, 20 mm de profundidade.

### 3.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para este trabalho foi utilizada a classe de trilho 136RE, norma AREMA, de peso 68 kg/m e altura 18,5 cm. Para a realização dos experimentos, foram utilizados os fragmentos de trilho originários do descarrilamento do trem na ferrovia, que aparecem na Figura 3.1. O procedimento está dividido em duas etapas: análise da falha do componente e caracterização do material no qual foi confeccionado.



Figura 3.1 Fragmentos de trilho utilizados para análise e caracterização.

#### 3.1 Análise de Falha

Foi empregada na análise de falha a região onde se iniciou a trinca e suas imediações. A Figura 3.2 mostra a vista superior do segmento 1, utilizado nestas análises.



Figura 3.2. Vista superior do segmento 1, apresentando a superfície de fratura A.

### 3.1.1 Análise Visual

Consistiu apenas na limpeza da superfície a ser inspecionada. A região examinada foi a seção transversal de ambas as superfícies fraturadas, com auxílio de lupa de baixo aumento.

### 3.1.2 Análise Micrográfica

As amostras obtidas para a micrografia foram originadas de um corte perpendicular à superfície de fratura. A preparação metalográfica constituiu de embutimento em resina termofixa, lixamento (seqüência de lixas: 120, 220, 320, 400, 600, 1200 mesh) e polimento com pasta de diamante de 4 e 1µm. Após, efetuou-se limpeza das amostras em ultra-som e secagem por ar soprado e algodão com álcool. O reagente Nital 2% foi utilizado no ataque químico (ASM METALS HANDBOOK) para revelação da microestrutura e posterior observação em microscópio óptico marca Olympus modelo BX 51M.

### 3.1.3 Microdureza Vickers

Foram realizadas medidas de microdureza em amostras obtidas do corte perpendicular à superfície de fratura. O procedimento de preparação das mesmas foi idêntico ao descrito no subitem 3.1.2. Usou-se microdurômetro marca Struers, aplicando uma carga de 200 grf.

### 3.1.5 Análise Fractográfica

De posse de amostras contendo uma porção representativa da superfície de fratura, foi realizada a fractografia das mesmas através de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Foi também realizada Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) em inclusões encontradas na superfície.

## 3.2 Caracterização do Material

As análises e ensaios descritos nesta seção destinaram-se à caracterização do aço usado na confecção do trilho em estudo. Os mesmos foram realizados nos corpos-de-prova seccionados de outras regiões do trilho que não a de início da falha.

### 3.2.1 Análise Química

Com o objetivo de classificar o material em estudo, foi realizada uma análise química via espectrometria de emissão óptica. Para tanto, foram retiradas três amostras de cada parte que compõe o trilho: boleto, alma e patim. Salienta-se que os resultados apresentados no item 4.2.1 representam a média aritmética das três análises.

### 3.2.2 Análise Macrográfica

Para realização da macrografia foi retirada uma amostra através de um corte transversal. Após o corte, a amostra foi preparada com lixamento (seqüência de lixas #60, 100, 200, 320, 400, 600). O ataque químico foi efetuado com HCl 50% a quente.

### 3.2.3 Impressão de Baumann

De posse de uma face transversal planificada, foi efetuada a impressão de Baumann utilizando uma solução de ácido sulfúrico H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 5% papel fotográfico, para revelação da macroestrutura.

### 3.2.4 Análise Microestrutural

Foram realizadas análises micrográficas de amostras da seção transversal e longitudinal extraídas do boleto, patim e alma. A preparação das mesmas seguiu o procedimento descrito no subitem 3.1.2.

### 3.2.5 Análise de Inclusões

As inclusões do material foram examinadas com base na norma ASTM E 45 – 97 Método D, em uma área de 160 mm<sup>2</sup>. A amostra utilizada foi removida do local indicado pela norma AREMA 2006, ilustrado na Figura 3.3. A preparação metalográfica constituiu o procedimento descrito no subitem 3.1.2, com exceção do ataque químico.

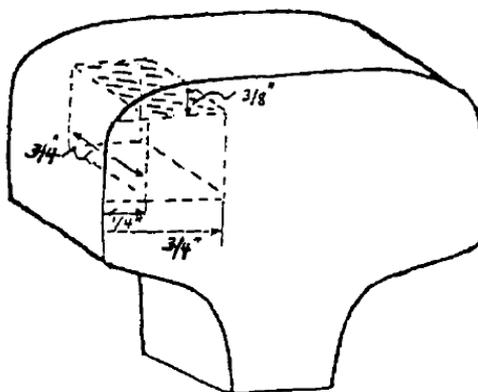


Figura 3.3 Região do boleto destinada à análise de inclusões.

### 3.2.6 Tamanho de grão

Para avaliação do tamanho do grão austenítico prévio foi retirada uma amostra contida na seção transversal do boleto. A preparação deu-se conforme procedimento descrito no item 3.1.2, à exceção do ataque químico. Nesta análise foi utilizado como reagente ácido pícrico a quente. A medida do grão foi executada conforme a norma ASTM E-112.

### 3.2.7 Ensaio de Dureza

Realizaram-se medições de dureza Brinell (HB) com esfera de 2,5 mm e carga de 187,5 kg. O local das identações na região do boleto foi baseado na norma AREMA 2006, como é mostrado na Figura 3.4. Em outra amostra, foram efetuadas identações em toda a seção transversal do trilho, na forma de uma grade de 5 x 5 mm.

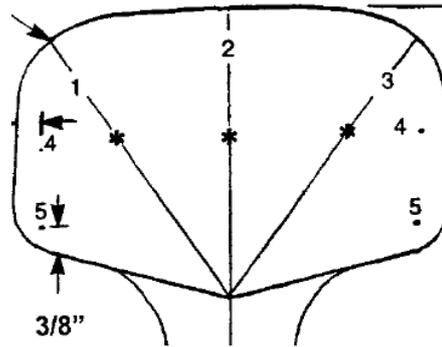


Figura 3.4 Demonstração do local das identificações, segundo a norma AREMA 2006.

### 3.2.8 Ensaio de Tração

O ensaio de tração foi realizado em três corpos-de-prova provenientes do boieto. Foi utilizada uma máquina universal de ensaios modelo 5585H. O ensaio atendeu às especificações da norma ASTM 8M.

## 4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos na análise de falha e na caracterização do material são neste capítulo apresentados e interpretados.

### 4.1 Análise de Falha

A Figura 4.1 apresenta o croqui da fratura exibida na Figura 3.1, com o provável local de início da trinca (circulado em vermelho) e sua direção de propagação (setas azuis). Supõe-se que a trinca teve início no patim e propagou-se no sentido oposto ao movimento do trem na ferrovia.

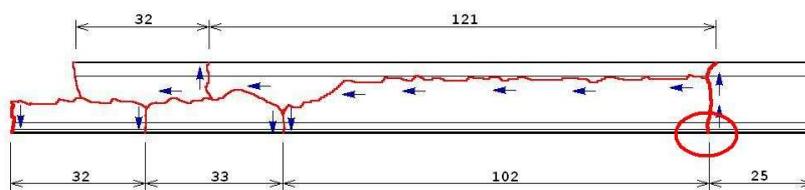


Figura 4.1 Desenho esquemático da ruptura no trilho. Dimensões aproximadas dos segmentos em cm.

#### 4.1.1 Análise Visual

Na Figura 4.2 são mostradas as superfícies de fratura A (contida no segmento 1, exibida na Figura 3.2) e B na zona de início da fratura. Notam-se grande oxidação e amassamento em ambas, indícios de que elas ficaram expostas ao ambiente antes da ruptura final do trecho da ferrovia, sofrendo impactos e desgaste das cargas circulantes. A seta azul da Figura 4.2(b) indica uma marca semicircular de onde se originam as marcas de sargento, forte indício de que a iniciação da trinca ocorreu na parte central do patim.



Figura 4.2. Fotografia das superfícies de fratura A (esquerda) e B (direita). Presença de marcas de sargento na superfície de fratura B.

Na análise através de lupa, ilustrada na Figura 4.3 é possível observar detalhadamente as marcas que indicam o ponto de início da trinca.

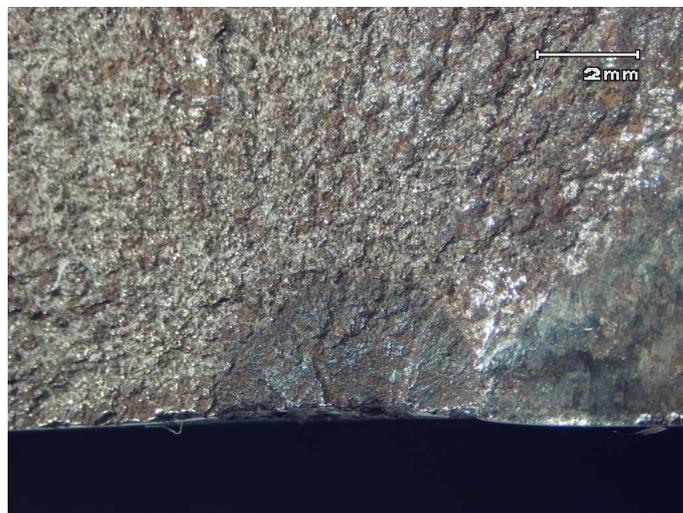


Figura 4.3 Imagem em lupa da superfície de fratura B. As marcas de sargento convergem para o ponto de início da trinca.

#### 4.1.2 Microestrutura

Na Figura 4.4 é apresentada a microestrutura da região em questão. Identifica-se, além da grande área de perlita, uma faixa clara que representa martensita não-revenida, com cerca de 40  $\mu\text{m}$  de espessura. Essa faixa clara é a extremidade inferior do patim, local que sofre aquecimento e resfriamento imediato devido ao processo de soldagem elétrica (Flash Butt Weld). Sendo o restante formado por perlita, admite-se uma variação microestrutural no componente.

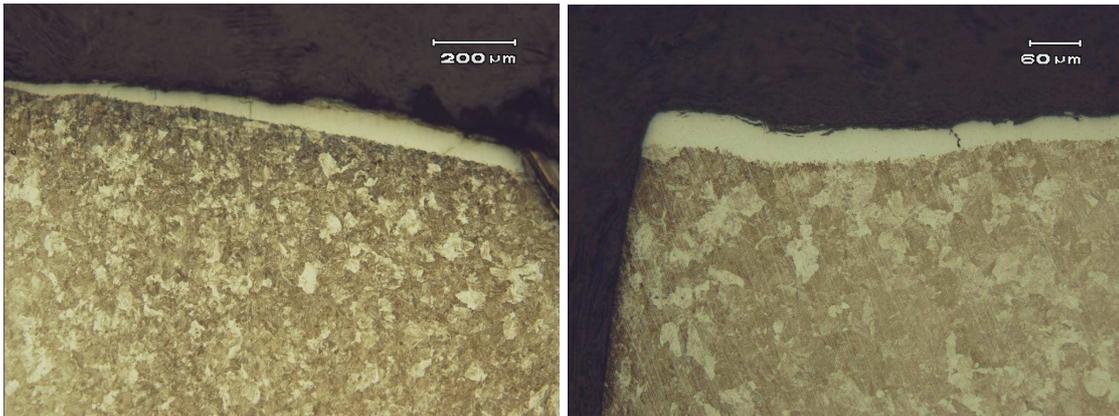


Figura 4.4 Micrografia da zona de início, apresentando perlita e martensita (faixa clara). À esquerda aumento de 100X e à direita 200X.

A Figura 4.5(a) apresenta uma micrografia com identificações nas duas fases presentes. O resultado mostra que a dureza Vickers da faixa clara é quase o dobro da região perlítica. A Figura 4.5(b) apresenta uma micrografia, também da região do patim, na qual foi realizada um perfil de dureza. O resultado é apresentado no gráfico da Figura 4.6.

Foi avaliado que, ao longo de uma distância de aproximadamente 0,18mm, há uma considerável diminuição da dureza do metal. Há uma queda de cerca de 950HV para 450HV devido à transição microestrutural. Nas zonas adjacentes a dureza se mantém praticamente constante. Esses dados ratificam que a faixa clara é constituída de uma martensita não-revenida.

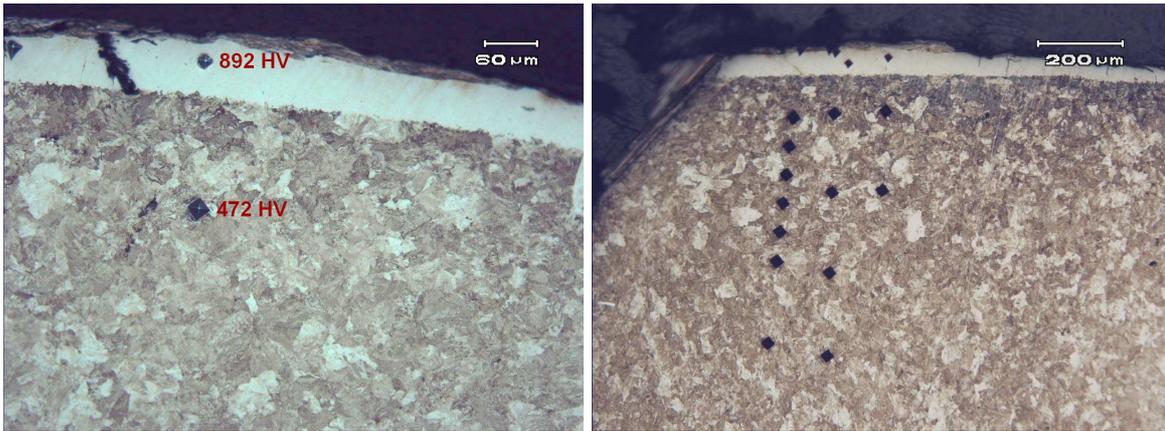


Figura 4.5 Micrografias mostrando as identações nas duas fases. (a) O resultado da faixa clara é coerente com dureza Vickers da martensita. Aumento 200X. (b) Perfil de dureza, aumento de 100X. Os resultados apresentados referem-se às identações da linha central.

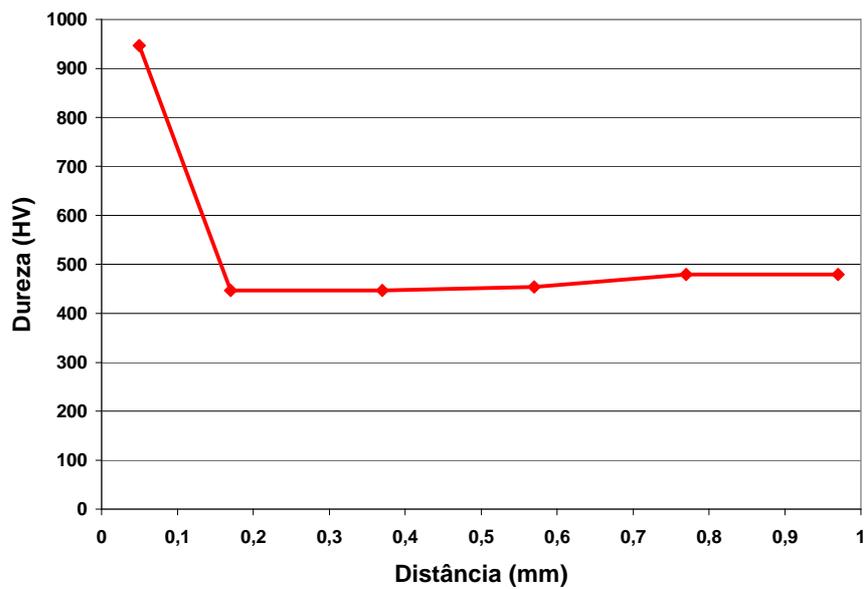


Figura 4.6 Perfil de Dureza Vickers, a partir da extremidade do patim, obtido das identações da linha central da Figura 4.5(b).

### 4.1.3 Fractografia

A análise fractográfica apresentou uma superfície tipicamente frágil, contendo pouca deformação plástica. Na Figura 4.7 é mostrado o aspecto de clivagem encontrado na superfície de fratura da região de início da falha.

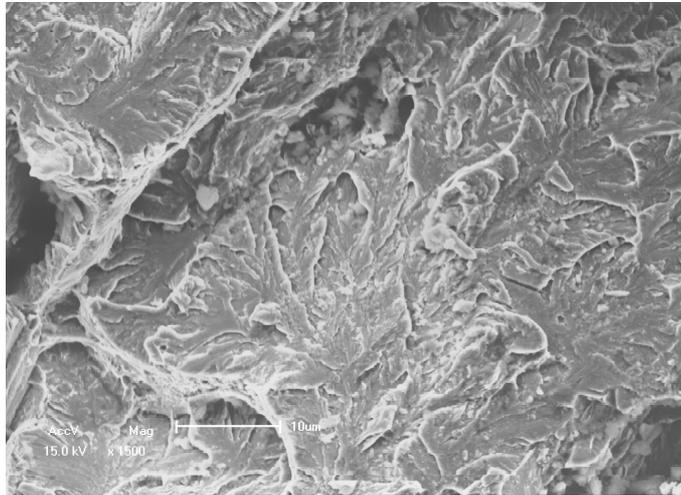


Figura 4.7 Fractografia caracterizando uma região frágil no material, com aspectos de clivagem, indicando pouca deformação antes da ruptura.

Na Figura 4.8(a) fica evidente o aspecto frágil da superfície de fratura, apresentando clivagem. Observam-se claramente as facetas que apontam para o sentido de propagação da fratura. Foi realizada uma Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) no local assinalado com X. O resultado mostra grande concentração de silício, oxigênio e cálcio, conforme o gráfico da Figura 4.8(b). A adição de cálcio no aço é justificada pela sua propriedade de modificação de inclusões. Constata-se a presença de inclusão de óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) na superfície de fratura, que pode ter atuado como facilitador da falha, levando, desse modo, o componente a uma ruptura prematura.

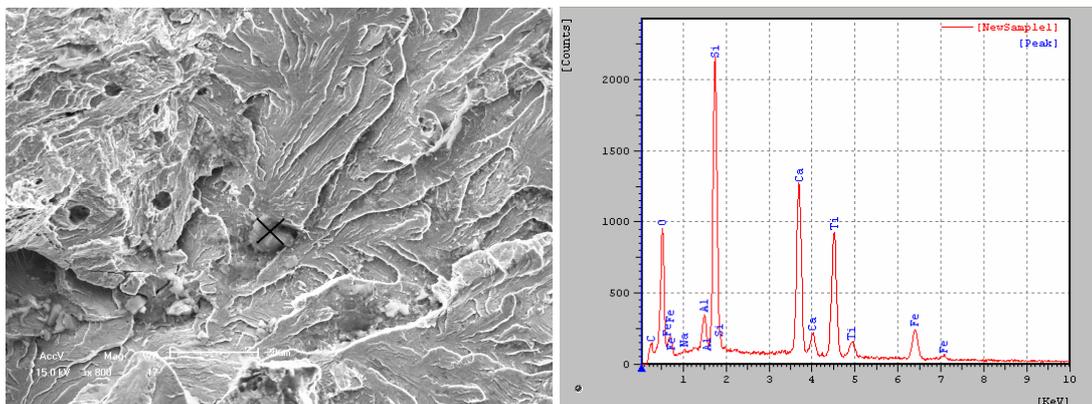


Figura 4.8 (a) Inclusão em meio a uma superfície apresentando clivagem. (b) EDS revelando presença de inclusão complexa na zona de início.

## **4.2 Caracterização do Material**

### **4.2.1 Análise Química**

O resultado desta análise é mostrado na tabela 4.1. Merece menção o baixo teor de enxofre, cujo máximo admissível pela norma AREMA 2006 para trilhos é 0,025%.

Tabela 4.1 Composição Química do material

<b>Elemento</b> \ <b>Região</b>	Boleto	Alma	Patim
C	0,88	0,87	0,87
Si	0,28	0,29	0,29
Mn	0,95	0,95	0,94
P	0,016	0,014	0,016
S	0,008	0,005	0,006
Cr	0,21	0,21	0,21
Mo	<0,005	<0,005	<0,005
Ni	<0,005	<0,005	<0,005
Al	0,001	<0,001	0,003
Co	<0,01	<0,01	<0,01
Cu	0,01	0,01	0,01
Nb	<0,001	<0,001	<0,001
Ti	0,001	0,001	0,001
V	<0,001	<0,001	<0,001
W	<0,01	<0,01	<0,01
Pb	<0,001	<0,002	<0,002
Sn	0,003	0,002	0,003
B	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Fe	97,63	97,64	97,64

### **4.2.2 Avaliação Metalográfica**

Os resultados da avaliação metalográfica são apresentados e discutidos separadamente em cada subitem.

#### 4.2.2.1 Análise Macrográfica

Como verificado na Figura 4.9, a macrografia não deixou vestígios de defeitos internos tais como trincas, bolhas, vazios ou segregação no trilho.



Figura 4.9 Macroestrutura da seção transversal indicando um trilho homogêneo.

#### 4.2.2.2 Impressão de Baumann

Como representa a Figura 4.10, não há acúmulo de impurezas no trilho analisado. A ausência de inclusões de sulfetos é coerente com o baixo teor de enxofre, como mostrado na Tabela 4.1.

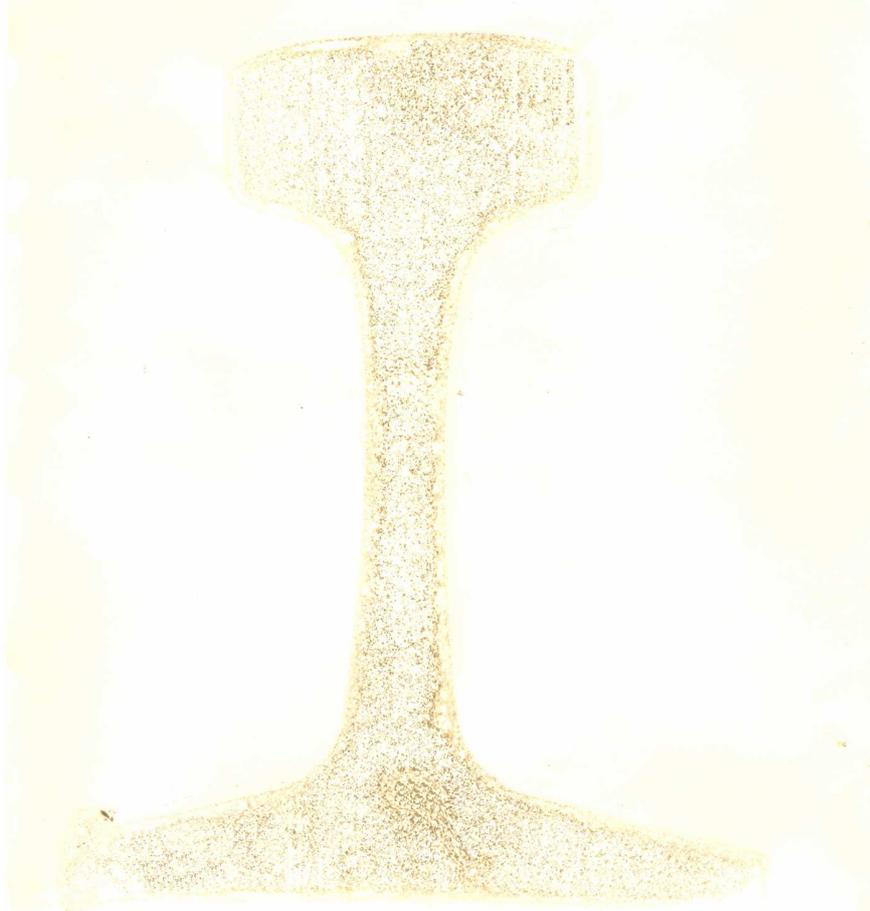


Figura 4.10 Resultado da Impressão de Baumann do trilho.

#### 4.2.2.3 Análise Micrográfica

Nas Figuras 4.11 e 4.12 estão representadas as microestruturas das seções da alma e do patim, respectivamente. Observa-se pouca diferença microestrutural entre elas, constituindo, portanto, um aço perlítico bastante uniforme. Pode-se afirmar, através da comparação entre a seção longitudinal e transversal, que no processo de laminação a quente houve recristalização no material (COLPAERT, 1974).

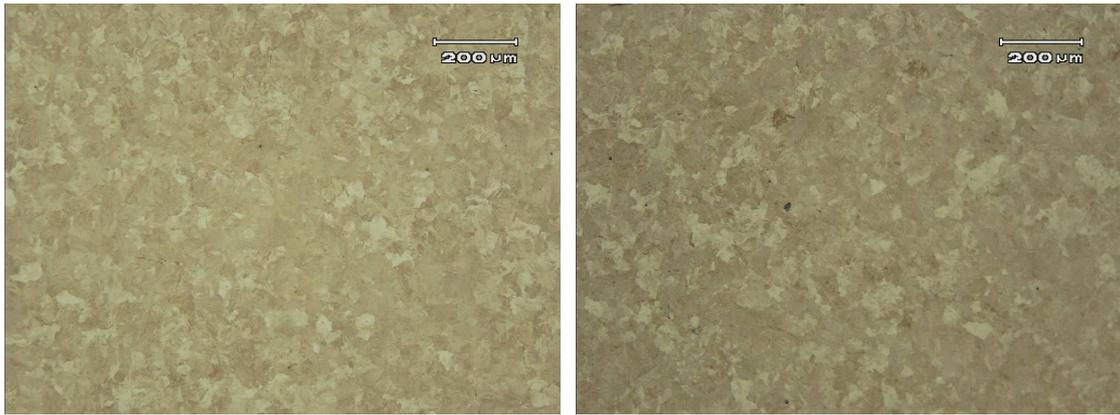


Figura 4.11 Micrografia da alma, sob aumento de 100X. (a) Seção transversal (b) longitudinal

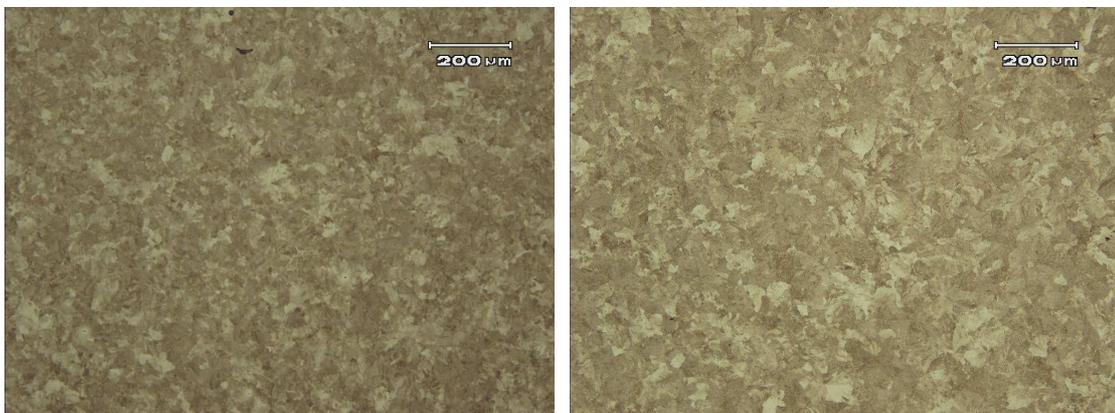


Figura 4.12 Micrografia do patim, sob aumento de 100X. (a) Seção transversal (b) longitudinal

As Figuras 4.13 e 4.14 trazem a micrografia obtida do núcleo do boleto, em uma seção transversal e longitudinal, sob diferentes aumentos. Novamente, observa-se um núcleo recristalizado, pois não foram verificadas heterogeneidades entre ambas as seções. Isto se justifica pela laminação ter sido efetuado em uma temperatura acima da zona crítica (COLPAERT, 1974).

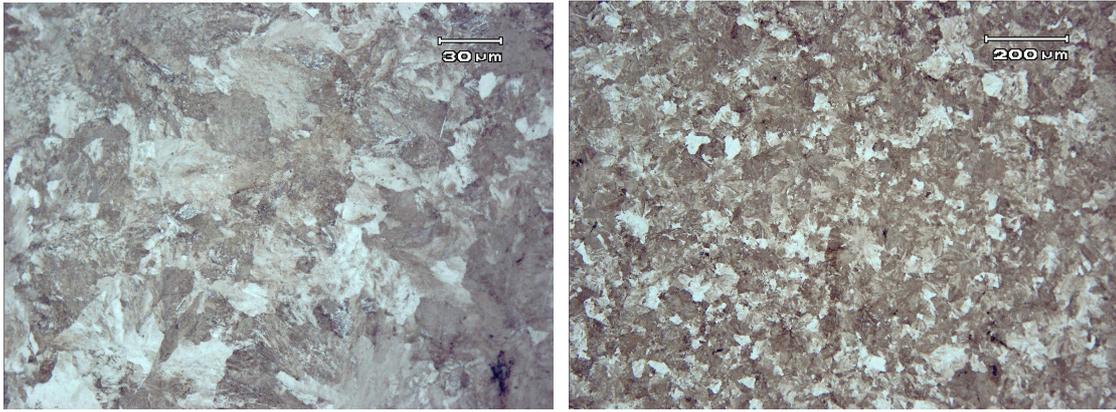


Figura 4.13 Micrografia da seção transversal do núcleo do boleto. À esquerda com aumento de 500X, à direita aumento de 100X.

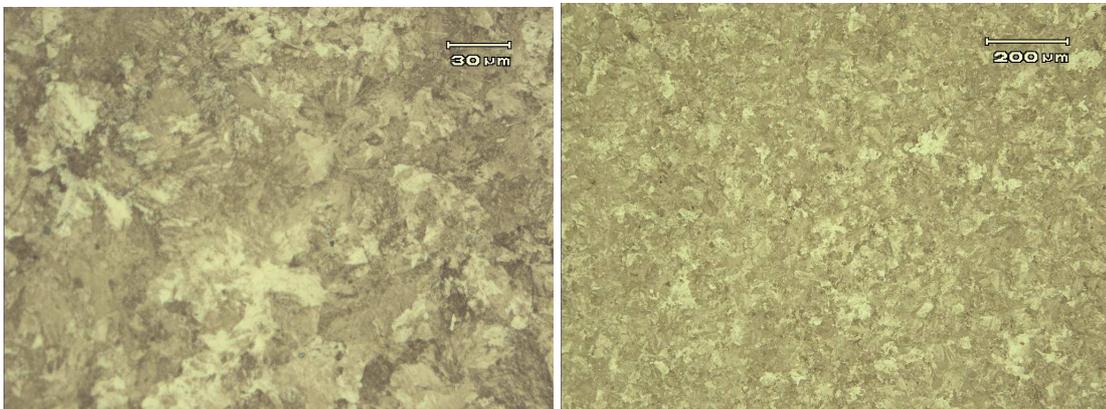


Figura 4.14 Micrografia de seção longitudinal do núcleo do boleto. À esquerda com aumento de 500X, à direita aumento de 100X.

A Figura 4.15 apresenta as características superficiais encontrada na micrografia de uma amostra transversal. O resultado não demonstra haver uma descarbonetação significativa na superfície do boleto. No entanto, é possível enxergar uma camada com aspecto diferenciado, vestígios de deformação plástica, cuja profundidade média é 280 µm. Trincas partindo da superfície (*head checks*) também foram observadas, atingindo uma profundidade de aproximadamente 680 µm. A literatura relata o aparecimento de *head checks* como causa fundamental do acidente Hatfield, ocorrido em 2000 na Inglaterra. Na ocasião, estas fissuras coalesceram e levaram o trilho a fratura (ZERBST).



Figura 4.15 Presença de *head checks* (fissuras) partindo do boleto. Aumento 100X.

#### 4.2.2.4 Análise de Inclusões

Constatou-se a presença de inclusões de sulfeto de manganês (tipo A) e de óxidos, globulares (tipo D), estas últimas com menor incidência. As inclusões de pequeno tamanho tiveram maior incidência na área analisada de 160 mm<sup>2</sup>. A Tabela 4.2 e a Figura 4.16 trazem resultados da análise quantitativa e qualitativa das inclusões encontradas no segmento de trilho.

Tabela 4.2 Resultado da análise de inclusões

Tipo e tamanho	Série	
	fina	grossa
A	12	13
A 1	7	6
A1,5	3	1
A2	0	0
A	0	0
D	4	8
D 1	13	9
D	3	0
D 2	0	0
D	0	0

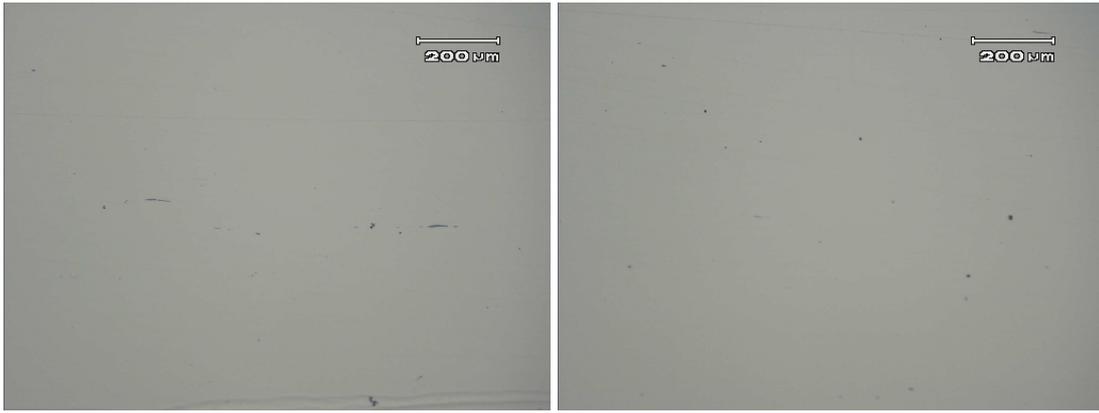


Figura 4.16 Demonstrativo das inclusões visualizadas. À esquerda, sulfetos de tamanho pequeno. À direita, óxidos com menor ocorrência. Aumento 100X.

#### 4.2.2.5 Tamanho do Grão

O trilho analisado apresenta tamanho de grão austenítico prévio ASTM 8. O resultado baseia-se na norma ASTM E 112 e é mostrado na Figura 4.17.

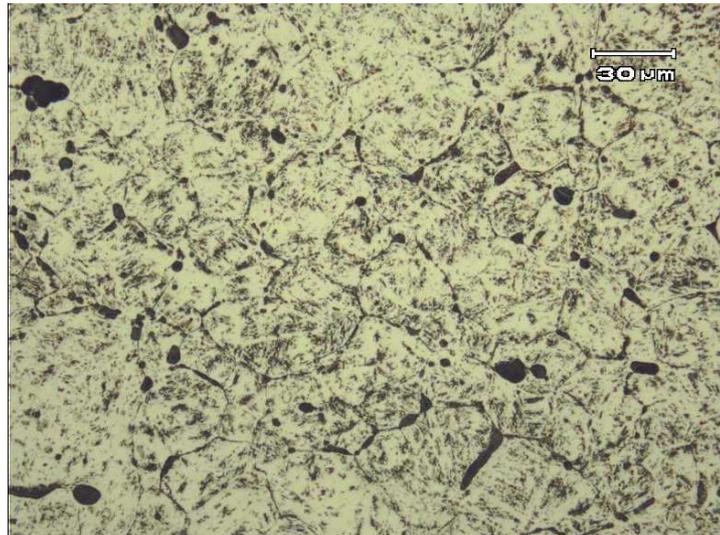


Figura 4.17 Seção transversal do boleto mostrando o tamanho de grão austenítico prévio.

#### 4.2.3 Propriedades Mecânicas

##### 4.2.3.1 Dureza Brinell

Os resultados do ensaio de dureza descrito no item 3.2.7 encontram-se na Tabela 4.3 e na Figura 4.18. A Figura 4.18 mostra um perfil de dureza das três linhas de indentações, cujos valores são razoavelmente uniformes. A Tabela 4.3 traz os valores das posições determinadas pela norma AREMA 2006 (Pontos 4 e 5), completando o procedimento de Dureza Brinell. Não foi obtido nenhum valor fora do especificado pela norma, caracterizando um material com dureza adequada.

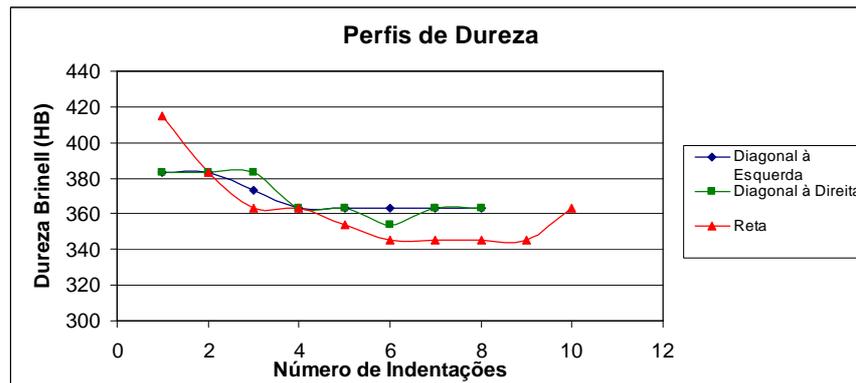


Figura 4.18 Perfil de dureza da região do boleto.

Tabela 4.3 Medidas das posições determinadas. Resultados não mostraram alterações bruscas na dureza do boleto.

<b>Posição</b>	<b>Valor (HB)</b>
Ponto 4, Direita	363
Ponto 4, Esquerda	363
Ponto 5, Direita	345
Ponto 5, Esquerda	363

O resultado do mapeamento de dureza da seção transversal do trilho encontra-se na Tabela 4.4. Destaca-se a medida de 451 HB na extremidade superior do boleto, equivalente a 48 HRC. Esse valor é compatível com a dureza da martensita revenida, formada devido ao rápido resfriamento ao qual o boleto é submetido no processo de tratamento térmico. A transformação martensítica é viabilizada pelo relativo alto teor de carbono desse trilho.

Tabela 4.4 Valores do mapeamento de dureza realizado em amostra oriunda de um corte transversal no trilho de trem.

Região	Dureza (HB)		
	média	mínima	Máxima
<b>Boleto</b>	378	345	451
<b>Alma</b>	352	329	393
<b>Patim</b>	358	321	404

#### 4.2.3.2 Resistência à Tração

O resultado deste ensaio encontra-se na Tabela 4.5. As medições mostram-se de acordo com o esperado e dentro dos valores admitidos pela AREMA.

Tabela 4.5 Valores da Resistência à Tração do boleto

Corpo-de-prova	$\sigma$ máx (MPa)	$\sigma$ esc (MPa)	Alongamento (%)
<b>1</b>	1353	907	9,9
<b>2</b>	1305	870	7,8
<b>3</b>	1321	795	11

## 5.0 CONCLUSÕES

Através dos resultados obtidos neste trabalho estudo, pode-se concluir que a fratura do trilho iniciou com uma trinca na base do patim, devido a uma transição microestrutural abrupta. Esta transição ocorreu a partir de um forte aquecimento localizado, provavelmente resultado do processo Flash Butt Weld. A observação de mecanismos de clivagem na superfície de fratura, assim como elevados valores de microdureza permitem afirmar que o material ficou fragilizado na zona de início da falha.

Da caracterização do material, concluiu-se que as propriedades mecânicas estavam adequadas para o trilho, pois os resultados mostraram valores dentro do especificado pela norma. A microestrutura verificada foi bastante homogênea e uniforme, com baixo teor de impurezas e inclusões não prejudiciais, sendo considerada apropriada para o componente. No entanto, a presença dos *head checks* evidenciaram um desgaste excessivo da superfície do trilho.

## **6.0 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS**

É sugerido um trabalho que estude o tamanho máximo de uma trinca existente, de modo que o trilho possa operar em serviço, e não o conduza à falha. Cabe ainda, uma avaliação qualitativa sobre o tipo de inclusão que atua como facilitador de falha.

## 7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANTF, **Associação Nacional de Transporte Ferroviário** <<http://www.antf.org.br>>. Acesso em 21/09/2009.
- ASM INTERNATIONAL, Metals Handbook Vol 9. **Metallography and Microstructure**. Materials Park, OH, 1991.
- ASM INTERNATIONAL, Metals Handbook Vol 11. **Failure Analysis and Prevent**. Materials Park, OH, 1991.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A1-00 Standard Specification for Carbon Steel Tee Rails**, V01. Philadelphia, USA 2009.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM 8M-98: Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of steel Products**, V 1.01, Philadelphia, USA 2009.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 45-97 Standard Test Methods for Determinating the Inclusion Content of Steel**. Philadelphia, USA 2009.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 112 Standard Test Methods for Determinating Average Grain Size**. Philadelphia, USA 2009.
- AMERICAN RAILWAY ENGINEERING AND MAINTENANCE OF WAY ASSOCIATION. **AREMA** Lanham, USA 2006.
- BROEK, D. **The Practical Use of Fracture Mechanics**, 2<sup>a</sup> ed. Galena, USA: Kluwer Academic Publishers, 1988.
- COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos comuns**, 3<sup>a</sup> Ed. São Paulo: Edgar Blucher, 1974.
- LAWRENCE, F. V. **Improving the Fatigue Resistance of Thermite Railroad Rail Weldments**.  
<http://www.mechse.uiuc.edu/media/pdfs/about/research/fcp/Lawrence%20presentation.pdf> - Acessado em 19/11/2009.

- LEAL, V.S., FIGUEIREDO, K.M. **Soldagem Aluminotérmica**. Centro Federal de Educação Tecnológica do Maranhão, 2006.
- MUTTON, P.J., ALVAREZ, E.F. **Failure Modes in Aluminothermic Rail Welds Under High Axle Load Conditions**. Engineering Failure Analysis 11. pp. 151-166, 2004.
- PORTO, T.G. **PTR2501 – Ferrovias**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004.
- ROLDÓ, L. **Análise de Tensões Residuais em Trilhos Ferroviários**. Dissertação, PPGEM, UFRGS, 1998.
- SKYTTEBOL, A. JOSEFSON, B.L. RINGSBERGER, J.W. **Fatigue Crack Growth in a Welded Rail Under the Influence of Residual Stresses**. Engineering Fracture Mechanics pp 271-285, 2005
- STROHAECKER, T. R. **Mecânica da Fratura** UFRGS.
- ZERBST, U. MÄDLER, K. HINTZE, H. **Fracture Mechanics in Railway Applications - An overview**. Engineering Fracture Mechanics 72, pp 163-194, 2005.