

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia

Departamento de Metalurgia

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E METALÚRGICA DE SOLDAS  
ALUMINOTÉRMICAS EM TRILHOS FERROVIÁRIOS.

**Marcelo Sartori**

Trabalho de Diplomação

Orientador: Professor Dr. Telmo Roberto Strohaecker

Porto Alegre  
Dezembro-2010

Dedico este trabalho a meus pais Jadyr e Noelsi por destinarem cada momento de suas vidas à realização dos meus sonhos.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus que me deu força, saúde e perseverança para enfrentar os desafios durante esta etapa.

À minha família, por ter me apoiado em todos os momentos de minha vida.

Ao meu amor Luciane, pelo apoio e incentivo nesta importante etapa.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), por proporcionar um ensino de qualidade e um engrandecimento pessoal e profissional inigualável.

Ao meu orientador e coordenador do Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF-UFRGS), Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker pela oportunidade de participar do LAMEF e obter preciosos conhecimentos técnicos e pelos importantes esclarecimentos durante a realização deste trabalho.

Aos professores e colegas do Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF-UFRGS) pela experiência obtida no aperfeiçoamento prático, amizade e companheirismo.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	VI
LISTA DE TABELAS .....	IX
RESUMO .....	XII
ABSTRACT .....	XIII
1.0 INTRODUÇÃO.....	1
2.0 REVISÃO DA LITERATURA.....	4
2.1 Ferrovias .....	4
2.1.1 Histórico.....	4
2.1.2 Trilhos .....	5
2.1.3 Composição Química Para Trilhos Ferroviários.....	8
2.1.4 Aços para Trilhos Ferroviários.....	9
2.2 Soldagem de Trilhos .....	9
2.3 Soldagem Aluminotérmica .....	10
2.3.1 Conceitos e Aplicações .....	10
2.3.2 Equipamentos de Soldagem .....	12
2.3.3 Soldagem Aluminotérmica: Vantagens e Desvantagens.....	12
2.3.4 Métodos de Soldagem Aluminotérmica.....	13
2.3.5 Propriedades da Soldagem Aluminotérmica.....	16
2.3.6 Controle de Qualidade de Soldas Aluminotérmicas .....	17
2.3.7 Defeitos de Soldagem.....	18
2.3.8 Surgimento de Falhas em Soldas Aluminotérmicas.....	23
2.3.9 Melhorias no Desempenho de Soldas Aluminotérmicas.....	26
3.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	27
3.1 Materiais Analisados.....	27
3.2 Características dos Corpos de Prova.....	29
3.3 Ensaio de Fadiga .....	30
3.3.1 Apresentação do Equipamento de Ensaio .....	30

3.3.2	Parâmetros do Ensaio de Fadiga .....	31
3.4	Análise da Superfície de Fratura.....	31
3.5	Análise Química .....	31
3.6	Análise Metalográfica.....	32
3.7	Ensaio de Dureza.....	32
4.0	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	34
4.1	Ensaio de Fadiga .....	34
4.2	Análise da Superfície de Fratura.....	35
4.3	Análise Química .....	41
4.4	Análise Metalográfica.....	42
4.5	Ensaio de Dureza.....	49
5.0	CONCLUSÕES .....	51
6.0	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	53
7.0	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	54
	ANEXO A: Imagens da variação microestrutural da amostra A.....	56

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Mapa Ferroviário Brasileiro (ANTT 2010).....	2
Figura 2.1	Desenho esquemático de um perfil de trilho ferroviário “Perfil Vignole” com as partes que o compõe (SKYTTEBOL 2005).....	6
Figura 2.2	Elementos básicos dos trilhos.....	8
Figura 2.3	Detalhamento da reação aluminotérmica (BRACARENCE 2000).....	11
Figura 2.4	Equipamentos da soldagem aluminotérmica (ROSA 2008).....	12
Figura 2.5	Representação esquemática do processo SmW-F (THERMIT AUSTRÁLIA 2010).....	14
Figura 2.6	Representação esquemática do processo SoWos (THERMIT AUSTRÁLIA 2010).....	15
Figura 2.7	(A) Representação esquemática do processo SKv-F (THERMIT AUSTRÁLIA 2010) e (B) sistema com cadinho para soldagem de trilhos em campo (BRACARENCE 2000).....	16
Figura 2.8	Tipos de defeitos encontrados em soldas aluminotérmicas (LAWRENCE 2004).....	19
Figura 2.9	Solda com falta de fusão no patim do trilho (WTIA 2010).....	20
Figura 2.10	Soldas com forte porosidade (WTIA 2010). ....	20
Figura 2.11	Black hole no patim do trilho (WTIA 2010). ....	21
Figura 2.12	Exemplo de inclusão de areia (WTIA 2010). ....	22
Figura 2.13	Desenho esquemático do trilho apresentando o colar de solda e suas características geométricas (ROSA 2008). ....	23
Figura 2.14	Exemplo de solda com defeito de bordamento. É observado, também, incrustação de material cerâmico no colar de solda (ROSA 2008). ....	23
Figura 2.15	Imagem mostrando em (A) presença de “cold lap” e em (B) e a ausência de “cold lap” (LAWRENCE 2004).....	24
Figura 2.16	Gráfico apresentando as regiões da solda mais suscetíveis à falhas (LAWRENCE 2004). ....	25
Figura 2.17	Imagem da seção transversal do trilho apresentando as regiões da solda mais suscetíveis à falhas (LAWRENCE 2004).....	25

Figura 3.1	Corpo de prova identificado por amostra A. ....	28
Figura 3.2	Corpo de prova identificado por amostra B.....	28
Figura 3.3	Corpo de prova identificado por amostra C.....	28
Figura 3.4	Corpo de prova identificado por amostra D. ....	28
Figura 3.5	Dimensões do trilho TR-45 e suas características geométricas.....	29
Figura 3.6	Apresentação do equipamento utilizado nos ensaios de fadiga.....	30
Figura 3.7	A imagem apresenta um esquema da configuração do trilho para o ensaio de fadiga. ....	31
Figura 4.1	Relação entre carga X número de ciclos de fadiga.....	35
Figura 4.2	Em (1) Imagem da superfície de fratura da amostra A e (2) imagem da região em destaque em (1) em maior aumento. A região indicada pela elipse indica a provável região de início da falha.....	37
Figura 4.3	Imagem mostrando o aspecto da fratura da amostra B após o ensaio de fadiga. A seta inferior indica a região de início da fratura, junto a ZAC. ....	38
Figura 4.4	Em (1) Imagem da superfície de fratura da amostra B e em (2) imagens em maior aumento das regiões em destaque em (1) evidenciando as regiões de início da falha e o limite máximo de propagação da trinca de fadiga. ....	38
Figura 4.5	Imagem mostrando o aspecto da fratura da amostra C após o ensaio de fadiga. A seta inferior indica a região de início da fratura, junto a ZAC. ....	39
Figura 4.6	Em (1) Imagem da superfície de fratura da amostra C e em (2) imagem em maior aumento da região em destaque em (1), mostrando a presença de marcas de sargento.....	40
Figura 4.7	Imagem da amostra “A” em MO mostrando a microestrutura perlítica do MS próximo à região de início da falha. Constatou-se, a presença de porosidades e pequena quantidade de ferrita pró-eutetóide em contornos de grão. ....	43
Figura 4.8	Imagem da amostra A em MO mostrando microestrutura perlítica do MS com grande quantidade de microrechupes.....	43
Figura 4.9	Imagem da amostra “A” em MO mostrando a microestrutura perlítica no MS. Observa-se a presença de microrechupes (à esquerda) e inclusões de óxidos globulares (à direita).....	44
Figura 4.10	Imagem da amostra “A” em MO mostrando microestrutura perlítica refinada com presença de porosidades, na região da ZAC.....	44
Figura 4.11	Imagem da amostra “B” em MO mostrando a microestrutura perlítica na região de início da falha. Observa-se a presença de ferrita pró-eutetóide em contorno de grão. ....	45
Figura 4.12	Imagem da amostra “B” em MO mostrando a microestrutura perlítica no MS. Observam-se porosidades, inclusão de óxidos e microrechupes. ....	45

Figura 4.13	Imagem da amostra "B" em MO mostrando microestrutura perlítica na região da ZAC. Observou-se porosidades, inclusões de óxidos globulares e microrechupes.....	46
Figura 4.14	Imagem da amostra "C" em MO mostrando a microestrutura perlítica na região de início da falha. Observou-se ferrita pró-eutetóide no contorno de grão. ....	46
Figura 4.15	Imagens da amostra "C" em MO mostrando a microestrutura perlítica próximo à região de início da falha. Observou-se porosidades, inclusões de óxidos globulares e ferrita pró-eutetóide em contornos de grão. ....	47
Figura 4.16	Imagens da amostra "C" em MO mostrando a microestrutura perlítica com porosidades e inclusões de óxidos e pouca quantidade de ferrita pró-eutetóide em contorno de grão. ....	47
Figura 4.17	Imagens da amostra "C" em MO mostrando microestrutura perlítica na região da ZAC. ....	48
Figura 4.18	Imagem da amostra "D" em MO mostrando a microestrutura perlítica do MS. Observa-se também a presença de inclusão de óxidos globulares e microrechupes (imagem à direita). ....	48
Figura 4.19	Imagem da amostra "D" em MO mostrando microestrutura perlítica na região da ZAC com pequena quantidade de porosidades e inclusões de óxidos globulares. ....	49

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Especificações dos trilhos Vignole (FERREIRA 2010).....	7
Tabela 3.1	Especificações da composição química do material.....	27
Tabela 3.2	Características mecânicas do material. ....	27
Tabela 3.3	Características do trilho TR-45.....	29
Tabela 3.4	Composição química e propriedades mecânicas para o aço grau 260 (prEN13674-1 2003 - Dados Parciais). ....	33
Tabela 4.1	Resultados dos ensaios de fadiga.....	35
Tabela 4.2	Resultados da análise química da amostra A. ....	41
Tabela 4.3	Resultados da análise química da amostra B.....	41
Tabela 4.4	Resultados da análise química da amostra C.....	42
Tabela 4.5	Resultados da análise química da amostra D .....	42
Tabela 4.6	Resultados dos ensaios de dureza Brinell.....	50

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABIFER	Associação Brasileira da Indústria Ferroviária;
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
Al	Elemento Químico Alumínio;
ANTF	Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários;
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres;
B	Elemento Químico Boro;
CWR	Continuous Welded Rails;
C	Elemento Químico Carbono;
°C	Unidade de Medida de Temperatura (Graus Celsius);
Co	Elemento Químico Cobalto;
Cr	Elemento Químico Cromo;
Cu	Elemento Químico Cobre;
Fe	Elemento Químico Ferro;
HB	Hardness Brinell;
IWT	International Institute of Welding;
Kcal	Unidade de Medida de Energia;
kN	Unidade de Medida de Carga (Quilonewton);
LAMEF	Laboratório de Metalurgia Física - UFRGS
LOF	Lack of Fusion
Mn	Elemento Químico Manganês;
MO	Microscópio Óptico;
Mo	Elemento Químico Molibdênio;
MS	Metal de Solda
MPa	Unidade de Medida de Tensão;
MTS	Materials Test System;
m	Unidade de Medida de Comprimento
Nb	Elemento Químico Níbio;
Ni	Elemento Químico Níquel;
O	Elemento Químico Oxigênio;

P	Elemento Químico Fósforo;
Pb	Elemento Químico Chumbo;
PF	Perlita Fina;
S	Elemento Químico Enxofre;
Sn	Elemento Químico Estanho;
Si	Elemento Químico Silício;
kgf	Unidade de medida de Força;
TBT	Tonelagem Bruta Trafegada;
TAV	Trem de Alta Velocidade;
Ti	Elemento Químico Titânio;
TLS	Trilhos Longos Soldados;
TR	Trilho;
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
V	Elemento Químico Vanádio;
W	Elemento Químico Tungstênio;
WTIA	Welding Technology Institute of Austrália;
ZAC	Zona Afetada pelo Calor.

## RESUMO

Este trabalho visa avaliar as características metalúrgicas e mecânicas de juntas soldadas pelo processo aluminotérmico, também conhecido por "Thermit®". Foram utilizados como materiais alvo deste estudo, quatro segmentos de trilhos utilizados em ferrovias brasileiras, do tipo "Vignole" com perfil TR-45. A avaliação das soldas foi realizada seguindo as recomendações de normas nacionais ABNT NBR 11449 – Trilho "Vignole" – Solda – Determinação da resistência à fadiga – Método de ensaio e ABNT NBR 7590 – Trilho "Vignole" – Classificação. Para atingir estes objetivos foram realizados ensaios de qualificação com o intuito de identificar as características de cada amostra e suas respectivas influências no desempenho dos materiais. A análise das soldas compreendeu ensaio de fadiga por flexão em quatro pontos, análise da superfície de fratura, análise química, análise metalográfica e ensaio de dureza. Dentre os fatores que apresentaram maior influência no desempenho das juntas soldadas, destaca-se a presença de porosidades, inclusões de óxidos globulares e microrechupes. A avaliação destes fatores permite prever a qualidade da soldagem de segmentos de trilho a ser utilizado, dessa forma algumas modificações nos procedimentos de soldagem devem ser realizadas a fim de aumentar a vida em fadiga das soldas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Trilho Vignole, Resistência a Fadiga, Soldagem Aluminotérmica.

## ABSTRACT

This study aims to assess the metallurgical and mechanical characteristics of welded joints by the aluminothermic process, also known as "Thermite®". Were used as target materials in this study, four sections of rails used in Brazilian railroads, such as "Vignole" TR-45 profile. The welding evaluation was performed according to recommendations from national standards ABNT NBR 11449 - Rail "Vignole - Welding - Determination of Fatigue Resistance - Test method and ABNT NBR 7590 – Rail “Vignole” – Classification. To achieve these objectives were achieved qualification tests in order to identify the characteristics of each sample and their influences on the performance of materials. The welding analysis included: four points bending fatigue tests, fracture surface analysis, chemical analysis, metallographical analysis e hardness test. Among the factors that had the greatest influence on the performance of welded joints, there is the presence of porosity, inclusions of globular oxides and micro shrinkage porosity. The assessment of these factors can predict the quality of welding of rail segments to be used, thus some changes in welding procedures must be performed in order to increase the fatigue life of welds.

**KEY-WORDS:** Vignole Rail, Fatigue Resistance, Aluminothermic Welding.

## 1.0 INTRODUÇÃO

O transporte ferroviário possui vastas vantagens em relação a outros meios de transporte por ser o que permite a maior capacidade de transporte de carga e de passageiros. Em muitos países em desenvolvimento, principalmente na África e América Latina, foi escolhido o uso predominante das rodovias ao invés das ferrovias. As ferrovias estão situadas em sua maior parte, em locais industrializados, como a Europa, parte da Ásia e em regiões com grande população, como a China e a Índia (FERROVIAS 2010).

No Brasil, a malha ferroviária é utilizada predominantemente para o transporte cargas e representam uma boa opção para o escoamento da produção com rapidez e economia. Como grande produtor de minérios, possui três das maiores ferrovias do mundo e cerca de 28 mil quilômetros de ferrovias que interligam as várias regiões do país.

Além de minérios, os principais produtos transportados pela malha ferroviária são produtos siderúrgicos, grãos, cimento e cal, adubos e fertilizantes, derivados do petróleo, entre outros (ANTT 2010).

Segundo (ROSA, 2008), para fins de comparação, os custos referentes ao frete do transporte ferroviário de cargas são cerca de 40 a 50% mais baixos em relação ao transporte rodoviário provocando uma redução de 7% no preço final do produto para o consumidor.

(MACEDO, B.F 2009) e demais autores destacam que, dentre as ferrovias brasileiras de grande porte se pode citar a Estrada de Ferro Carajás (EFC) da Companhia Vale do Rio Doce (Vale) que faz a ligação entre a Serra do Carajás e o Terminal Ferroviário da Ponta da Madeira, totalizando 900 quilômetros de via contínua. É considerada uma das maiores vias em extensão e tonelagem bruta trafegada (TBT) do mundo. A figura 1.1 apresenta o mapa ferroviário brasileiro.

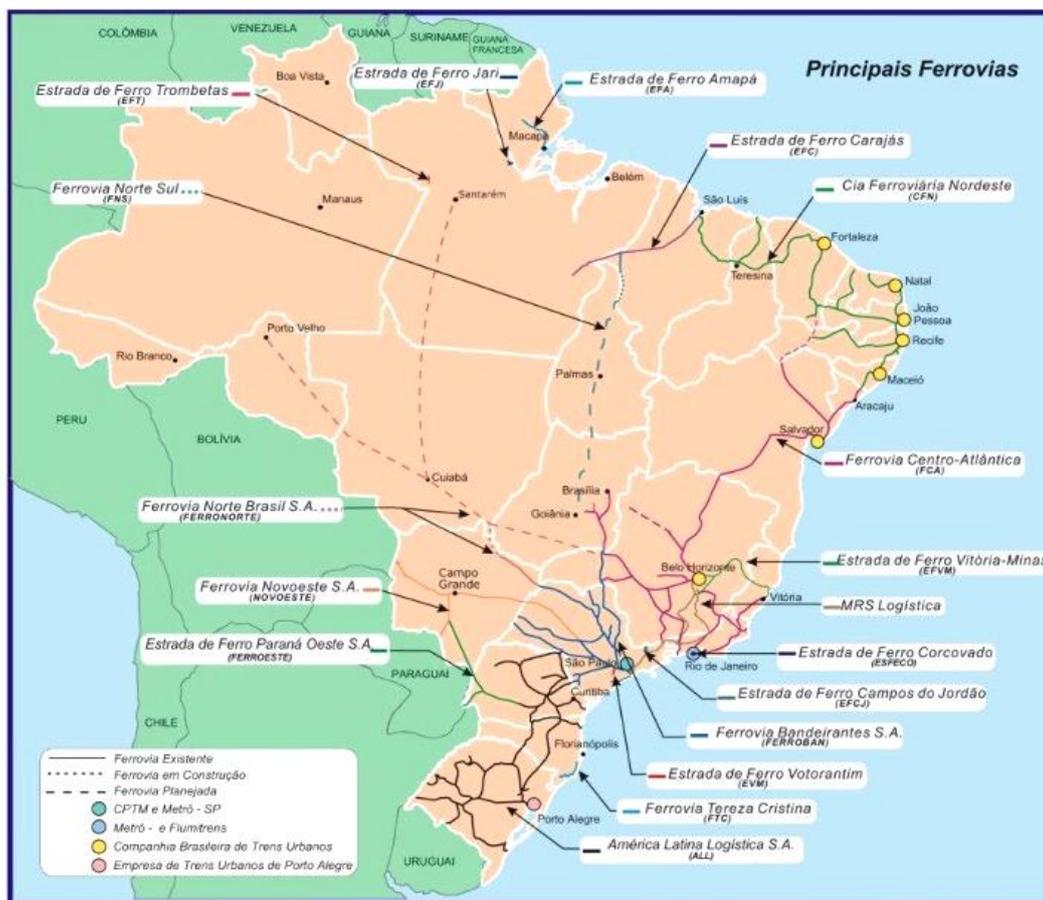


Figura 1.1 Mapa Ferroviário Brasileiro (ANTT 2010).

Prognósticos apresentam que para um futuro próximo deverá haver uma triplicação no volume de cargas transportadas pelo sistema ferroviário. Isso significaria uma adição de R\$ 15 bilhões por ano no produto interno bruto do país e, ainda, haveria diminuição de caminhões, fato que proporcionaria uma maior conservação das rodovias e, por sua vez, menor emissão de gases poluentes para a atmosfera (ANTT 2010).

O transporte ferroviário de passageiros, embora ainda não muito desenvolvido no Brasil, é de suma importância, principalmente nos grandes centros urbanos, pois além de facilitar a mobilidade de pessoas, contribuindo para a melhoria da qualidade de vida, auxilia na redução dos congestionamentos do tráfego rodoviário. Segundo a Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários (ANTF 2010), para 2011 o montante previsto para investimento em ferrovias é de R\$ 4,6 bilhões. Somado a isso, o governo deverá liberar recursos que somam mais de R\$ 100 bilhões ao longo dos próximos dez anos para o investimento em Trens de Alta Velocidade (TAV) (JORNAL DO COMÉRCIO 2010).

Com o propósito de garantir a circulação segura dos veículos ferroviários, este trabalho tem como objetivo apresentar um estudo das características mecânicas e metalúrgicas de soldas aluminotérmicas em trilhos, processo de soldagem que possui grande aplicação no sistema ferroviário para unir os segmentos dos trilhos, constituindo as chamadas linhas contínuas soldadas (Continuous Welded Rails – CWR) ou trilhos longos soldados (TLS).

O estudo compreendeu as seguintes análises:

- Ensaio de fadiga por flexão a quatro pontos;
- Analisar a superfície de fratura das soldas rompidas nos ensaios de fadiga;
- Analisar a composição química do metal de solda;
- Analisar a microestrutura presente nas juntas soldadas;
- Analisar a dureza da solda.

## 2.0 REVISÃO DA LITERATURA

Com a finalidade de servir de fundamentação teórica para a realização deste trabalho será abordado nesta seção uma revisão de alguns tópicos importantes.

### 2.1 Ferrovias

#### 2.1.1 Histórico

Com a revolução industrial, no início da década de 40 do século XIX, na Inglaterra, houve uma explosiva expansão na construção ferroviária, fundamental para o crescimento tecnológico que consolidou esse país como potência econômica mundial. Já nessa época, há registros (Anais do Instituto de Engenharia Civil desse país) sobre preocupações em aumentar a vida útil dos trilhos (PORTO 2004).

No início do transporte sobre trilhos, os vagões eram tracionados por cavalos e os trilhos eram feitos de madeira. Após evoluíram para trilhos fundidos, posteriormente para trilhos forjados, em seguida para trilhos laminados a partir de lingotes, chegando, atualmente, a trilhos laminados a partir de tarugos obtidos por lingotamento contínuo.

As ferrovias justificavam tal nome, pois, ao utilizarem trilhos de ferro fundido, eram mesmo estradas de ferro. Os trilhos apresentavam como inconveniente a presença do desgaste, o que encarecia a conservação das vias permanentes. A contribuição de Henry Bessemer em 1856 constituiu-se na fabricação dos trilhos de aço que, praticamente, não se desgastavam ao serem comparados aos trilhos de ferro fundido (BESSEMER 2010). Já Andrew Carnegie deu uma importante contribuição na fabricação de trilhos na América.

Entre as duas grandes guerras mundiais ocorreu o desenvolvimento da tração a diesel, renunciando-se a substituição da locomotiva a vapor.

No final do século passado ocorreram muitas tentativas para aplicação da energia elétrica na tração dos trens. Dentre elas pode-se destacar a de Von Siemens, na Alemanha. Alguns dos motivos que levaram a essas tentativas foram o incômodo que a fumaça das

linhas que atravessavam as cidades causava para a população e a redução dos gastos operacionais que tornavam os serviços mais atraentes (SCHNEIDER 2005).

Surgida no tempo de Dom Pedro II a ferrovia brasileira atingiu o auge de seu crescimento durante o ciclo do café, quando quase toda a rede era estatal. A partir de 1960 entrou em decadência e agora, privatizada, tem voltado com força renovada. Segundo a Associação Brasileira da Indústria Ferroviária (ABIFER 2010), entre 1996 e 2000 a indústria brasileira de equipamentos ferroviários ainda vivia maus momentos (reflexo da crise de 60 que ainda persistia). A partir de 2000, a situação se alterou para melhor e o pessimismo deu lugar à euforia, alimentado pelo programa do Governo Federal de revitalização das vias férreas e pelo agronegócio que se expandia rapidamente.

Atualmente, em todo o mundo, as indústrias siderúrgicas e de mineração passam por um ciclo de prosperidade sem precedentes, ostentando recordes na produção, aumento de demanda e grandes investimentos. No Brasil os investimentos anunciados pela siderurgia e mineração são da ordem de US\$ 90 bilhões para ampliação da capacidade instalada até 2012. Aliado ao grande crescimento na siderurgia e mineração e ao acréscimo nos setores de grãos e de fertilizantes estima-se também uma forte tendência de crescimento no sistema ferroviário nos próximos anos.

### 2.1.2 Trilhos

Trilhos são vigas longas de aço, resistentes ao desgaste, choques e ações mecânicas, com forma ou perfil especial sobre a qual trafegam e são guiadas as rodas do equipamento de tração (locomotivas) e do material rodante rebocado (carros e vagões) (LEAL 2006).

Os trilhos são posicionados sobre os dormentes os quais transferem para estes as solicitações do material rodante da via. Possuem, ainda, como uma de suas funções sustentar e conduzir os trens, apresentando características estruturais de uma viga extensa e contínua.

O perfil utilizado atualmente em trilhos ferroviários é do tipo Vignole, idealizado pelo engenheiro inglês “Vignole”, composto por boleto, alma e patim, definido pela ABNT NBR 7590 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS 1991) conforme apresentado na figura 2.1.

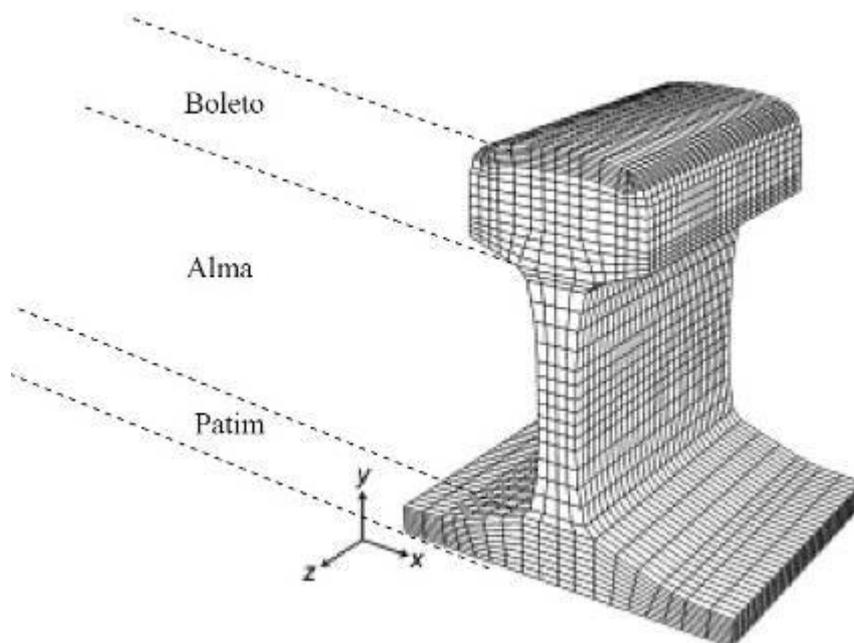


Figura 2.1 Desenho esquemático de um perfil de trilho ferroviário “Perfil Vignole” com as partes que o compõe (SKYTTEBOL 2005).

O boletto corresponde à parte do trilho destinada ao apoio e deslocamento da roda ferroviária. A grande massa concentrada no boletto é justificada pelo desgaste e atrito que o mesmo sofre no contato com as rodas do trem. Essa configuração favorece a resistência a flexão, pois há maior concentração de massa onde atuam mais tensões normais, permitindo otimizar o uso deste material (PORTO 2004).

A alma é definida como a parte do trilho compreendida entre o boletto e o patim. A resistência a flexão depende da espessura e da altura da alma e, evidentemente, deve-se ter uma espessura mínima para assegurar rigidez transversal. Caso a espessura da alma não seja adequada aos níveis de solicitações transversais, podem ocorrer o acúmulo de deformações permanentes ao longo da vida útil e provocar acidentes.

O patim é a base inferior do trilho, através do qual o trilho é apoiado e fixado nos dormentes que recebem e transmitem os esforços produzidos pelas cargas ao lastro que são geralmente de pedra britada e cascalho. O patim não pode ser muito fino para garantir que a alma continue perpendicular ao dormente durante as solicitações transversais como, por exemplo, em curvas, onde essas são mais pronunciadas.

Geralmente os trilhos são fabricados nos comprimentos padrão de 12, 18 ou 24m. No tocante a secção, os tipos mais comuns de trilho são 32, 37, 45, 50, 57. Assim, para o

trilho tipo 45 cada metro desse trilho pesa 44,64 kgf. Utiliza-se como designação para a palavra trilho a identificação “TR”, por esse motivo é chamado de trilho tipo TR-45. A tabela 2.1 apresenta as especificações dos trilhos denominados “vignole”.

Tabela 2.1 Especificações dos trilhos Vignole (FERREIRA 2010).

<b>Tipo</b>	<b>Peso (kgf/m)</b>
TR-68	67,56
TR-57	56,9
TR-50	50,35
TR-45	44,65
TR-37	37,11
TR-32	32,05
TR-25	24,65

As estruturas dos trilhos são perfis de aço laminado, responsáveis por guiar as rodas dos trens na estrada de ferro, sendo sujeitos a desgastes, surgimento de defeitos e falhas, devido às severas condições de carregamento impostas no contato da roda-trilho. Esses problemas estão relacionados às características mecânicas e metalúrgicas dos trilhos, além de dependerem das condições operacionais e de manutenção de cada rodovia (ROSA 2008).

Para a produção das vias férreas os segmentos de trilhos necessitam ser soldados e a partir desse fato surge a denominação de linhas contínuas soldadas (Continuous Welded Rails – CWR) ou trilhos longos soldados (TLS). Um dos processos mais utilizados para unir os segmentos é a soldagem aluminotérmica, processo executado na via, ou seja, “in loco”, com equipamentos e materiais de fácil manuseio e transporte. A imagem da figura 2.2 apresenta as linhas contínuas soldadas com seus respectivos elementos.



Figura 2.2 Elementos básicos dos trilhos.

Os segmentos de trilho são os componentes ferroviários que mais são suscetíveis à falha devido a diversos fatores, entre eles pode-se citar: alta pressão de contato das rodas em regime de carregamento cíclico e existência de tensões residuais causadas pela deformação plástica superficial, pelo processo de soldagem, pela variação térmica na linha e pela tensão de projeto (tensão necessária para manter os trilhos alinhados) (SILVA 1997).

### 2.1.3 Composição Química Para Trilhos Ferroviários

Para que possa exercer a sua função de superfície de rolamento e para suporte das cargas transportadas pelos veículos, é necessário que o trilho possua propriedades adequadas para essa aplicação, como dureza, tenacidade, elasticidade e resistência à flexão. Entre todos os materiais é o aço o que oferece as melhores vantagens no emprego na fabricação dos trilhos.

A composição química do aço tem forte influência sobre as propriedades metalúrgicas e físicas, afetando o desempenho e vida útil por fadiga.

Um elemento que pode causar problemas é o hidrogênio. As bolhas características da sua presença no aço, em maiores proporções, podem originar microtrincas potencialmente perigosas pelo risco de nucleação de trincas transversais. Por esta razão, o teor de hidrogênio deve ser reduzido ao mínimo, não devendo ultrapassar 1,5 ppm na aciaria.

Elementos residuais como o fósforo e o enxofre, presentes no aço, exercem um efeito nocivo e prejudicial às propriedades mecânicas desejadas e, dessa forma, devem ser mantidos em níveis muito baixos. Segundo a norma ABNT NBR 7590, os níveis de S e P devem ser no máximo 0,05% (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS 1991). O fósforo confere fragilidade ao aço, diminuindo a sua tenacidade à fratura, enquanto o enxofre aparece formando inclusões de sulfeto de manganês, que diminuem a tenacidade à fratura e resistência à fadiga.

#### 2.1.4 Aços para Trilhos Ferroviários

##### Trilhos Perlíticos

No estágio atual do desenvolvimento da siderurgia do aço, sabe-se que os principais elementos responsáveis para o aumento da sua resistência são o carbono, manganês e cromo.

Dessa forma, observa-se 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 de trilhos perlíticos. Esses se caracterizam por apresentar em sua microestrutura lamelas intercaladas de ferrita e cementita e por possuir colônias destas lamelas em várias orientações e espaçamentos, proporcionando grande resistência mecânica e ao desgaste.

São materiais que apresentam microestrutura 100% perlítica e não possuem ferrita livre. A dureza deste tipo de material está entre 260 e 400 HB e resistência a tração de 900 a 1200 MPa na condição de como fabricado (ROLDO 1998).

Os aços com microestrutura perlítica têm sido amplamente utilizados em componentes ferroviários. O acréscimo da quantidade de perlita (relação ferrita/perlita) atua positivamente sobre a resistência mecânica conferindo uma melhor resistência ao desgaste, porém ocasionando um efeito prejudicial na tenacidade e na ductilidade (SILVA 1995).

#### 2.2 Soldagem de Trilhos

Uma ferrovia pode ser constituída por trilhos longos ou curtos, sendo que o processo de soldagem é imprescindível para as duas configurações.

O emprego de trilhos longos oferece vantagens de ordem técnica e econômica, pois as juntas normalmente são os pontos iniciais de defeitos da linha e que ocasionam maior número de acidentes no 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. A utilização deste tipo de trilho contribuirá para a economia dos materiais das juntas e na redução com gastos na conservação das vias.

## 2.3 Soldagem Aluminotérmica

### 2.3.1 Conceitos e Aplicações

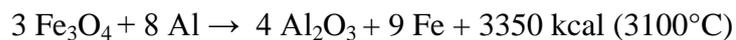
Seu surgimento deu-se em 1896, pelo professor Hans Goldschmidt, em um congresso da Sociedade Eletroquímica Alemã com a denominação patenteada "Thermit®" pela empresa Goldschmidt AG (West Germany) (Orgotheus Inc. USA) (BRACARENCE 2000).

O processo aluminotérmico tem sido bastante utilizado em aplicações específicas na qual outro processo conhecido de soldagem não apresentaria a flexibilidade e condições adequadas para a realização no campo. É um processo que não possui relação com outros métodos de soldagem, pois se baseia em reações químicas entre materiais ferrosos ou não ferrosos e o alumínio, desta forma, produzindo a coalescência dos metais, pelo aquecimento dos mesmos.

A reação aluminotérmica tem como base o fato de o alumínio extrair oxigênio de óxidos de outros metais para formar óxido de alumínio e liberar grande quantidade de calor, que poderá então ser aproveitada na soldagem de peças de ferro e aço.

Uma mistura adequadamente preparada de alumínio e um óxido, após a ignição inicial da reação, por ser altamente exotérmica, esta pode ser auto sustentada, propagando-se violentamente por um curto prazo de tempo e tomando conta de toda a mistura. A reação exotérmica requer cerca de 20 a 30 segundos para se efetivar, independente da quantidade de produtos químicos envolvidos. Dessa forma obtemos como resultado desta reação um metal liquefeito na base do cadinho com uma escória de óxido de alumínio sobrenadando este metal. A equação que descreve esta reação aluminotérmica é a seguinte:

Óxido Metálico + Alumínio = Metal + Alumina + Calor



Essa reação é uma das mais utilizadas, e a relação em peso é de três partes de óxido de ferro para uma parte de alumínio. A temperatura teórica atingida por essa reação de 3100°C é reduzida por perdas de calor no cadinho e por radiação, além do auxílio de componentes não reagentes normalmente adicionados à mistura, para que se consiga temperatura em torno de 2480 °C. Isso é importante, pois o alumínio vaporiza a 2500 °C. Por outro lado, esta temperatura não poderia ser muito baixa, pois a escória de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) se solidifica a temperatura de 2040 °C (BRACARENCE 2000).

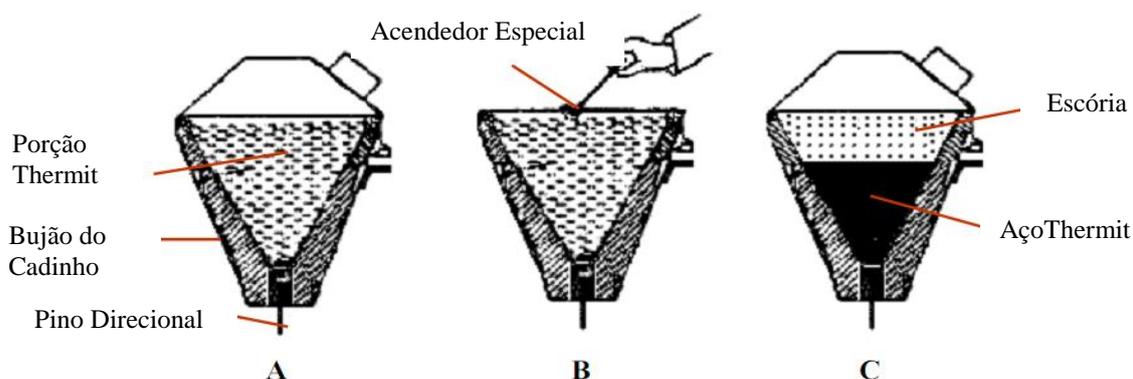


Figura 2.3 Detalhamento da reação aluminotérmica (BRACARENCE 2000).

A quantidade de mistura, chamada de porção Thermit, é calculada com base na quantidade de metal que se deseja para a soldagem, sendo aproximadamente três vezes esta última (em volume), e duas vezes (em peso). Essa mistura, constituída de óxido metálico, alumínio, elementos de liga e aço baixo carbono, é colocada em um cadinho especial que possui abertura em sua parte inferior, figura 2.3-A. Após efetuada a ignição da reação com um acendedor especial, esta se torna auto-sustentável tomando conta de toda a mistura, figura 2.3-B. Ao término da reação, devido à diferença de densidade entre o óxido de alumínio e o metal produzido, ocorre a separação gravimétrica entre ambos, com o metal liquefeito na base do cadinho e a escória de óxido de alumínio sobrenadando este metal, figura 2.3-C.

Assim, a reação aluminotérmica não é espontânea, pois requer uma ignição inicial, em que é utilizado um acendedor especial. Dessa forma, a soldagem aluminotérmica é um

processo governado por fusão em que os trilhos são unidos após serem aquecidos por um banho de metal fundido pelo calor da reação aluminotérmica. A mistura liquefeita age como o metal de adição da junta.

Devido a sua relativa simplicidade e independência de fontes externas de energia a aluminotermia se consagrou como um dos métodos mais empregados na soldagem de trilhos ferroviários na via férrea.

### 2.3.2 Equipamentos de Soldagem

Basicamente são utilizados 3 equipamentos de soldagem que são: cadinho, moldes e sistema de pré-aquecimento. A figura 2.4 apresenta o conjunto molde-cadinho, utilizados na soldagem de trilhos.

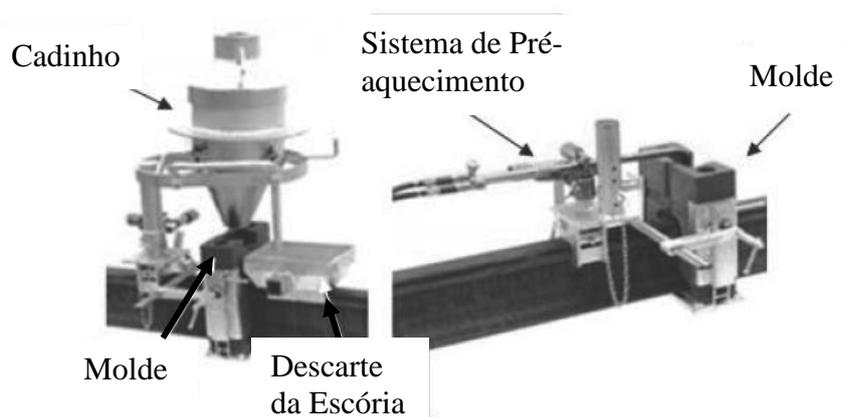


Figura 2.4 Equipamentos da soldagem aluminotérmica (ROSA 2008).

### 2.3.3 Soldagem Aluminotérmica: Vantagens e Desvantagens

Como vantagens da soldagem aluminotérmica podem ser considerados os seguintes aspectos:

- Solda de boa qualidade;
- Flexibilidade para soldagem no campo;
- Tempo de execução pequeno;
- Dispensa uso de energia elétrica;
- Dispensa uso de complexos aparatos e equipamentos;

- As soldas podem ser feitas com as peças praticamente em qualquer posição, desde que a cavidade do cadinho tenha paredes suficientemente verticais para o metal escorrer rapidamente.

Entre os aspectos negativos para a soldagem utilizando-se o processo aluminotérmico, quando comparado com outros processos de soldagem podem ser mencionados:

- A necessidade de cuidados especiais quanto à segurança do operador e do local;
- A necessidade de moldes específicos para cada aplicação;
- Para peças grandes, é necessário um pré-aquecimento, além de ser necessário muito “Thermit”, ou seja, muito metal de adição para o preenchimento do espaço entre as partes, aumentando o custo da operação.

#### 2.3.4 Métodos de Soldagem Aluminotérmica

Entre os métodos de soldagem aluminotérmica, considerando o tipo de componente principal a ser combinado com o alumínio, podem ser destacados dois grupos mais usuais que são o método Thermit® (em obediência ao nome comercial patenteado) pela consagrada aplicação em soldas de aços e metais ferrosos e o método cujo nome comercial mais conhecido é chamado de “cadweld” tem como base o uso de metais não ferrosos como o cobre, principalmente na indústria elétrica. Essa é uma variação do processo Thermit®, para soldagem de materiais não ferrosos, como em condutores elétricos. Este processo é utilizado também para soldagem de cabos de terra de trilhos ferroviários.

Dentro do processo Thermit® para soldagem de trilhos são empregados atualmente três métodos tecnologicamente equivalentes com variantes nos procedimentos de pré-aquecimento e forma de vazamento, cuja diferença principal consiste no modo de conduzir o calor às extremidades dos trilhos. Esses são conhecidos por: SmW-F, SoWoS e SkV-F (BRACARENCE 2000) (SILVA1998).

##### Método Thermit SmW-F

O processo de soldagem Thermit® pelo método SmW-F, também conhecido como processo de soldagem com curva chata, é caracterizado por seu tempo de pré-aquecimento onde as pontas dos trilhos são envolvidas com moldes pré-fabricados e pré-aquecidos por uma fonte de calor até uma temperatura de aproximadamente 1000 °C posicionada acima

desses. Dependendo do perfil do trilho a ser soldado o tempo de pré-aquecimento pode variar de quatro a oito minutos.

O emprego deste processo é notadamente econômico quando se dispõe de intervalos maiores de vinte minutos entre os trens.

Devido a geometria do molde SmW-F o aço é conduzido indiretamente às seções que serão soldadas, sendo despejado inicialmente no copo de vazamento e preenchendo o molde, com o primeiro contato aos trilhos pelo Patim. O representação esquemática do processo SmW-F está mostrada na figura 2.5.

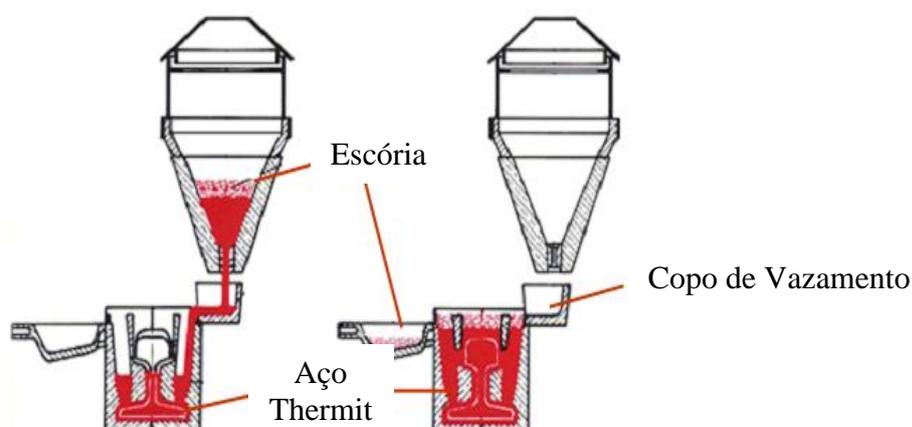


Figura 2.5 Representação esquemática do processo SmW-F (THERMIT AUSTRÁLIA 2010).

### Método Thermit SoWoS

O processo de soldagem Thermit® pelo método SoWoS é muito parecido com o método descrito anteriormente, apresentando a diferença apenas no modo como é efetuado o vazamento. Esses métodos foram desenvolvidos diferentemente por razões históricas, e atualmente o método SoWos é o mais utilizado dentre os três. Nesse método as pontas dos trilhos também são envolvidas pelo molde e faz-se o pré-aquecimento até a temperatura aproximada de 1000 °C utilizando uma fonte de calor apropriada posicionada acima do molde.

O tempo de pré-aquecimento, também está entre quatro e oito minutos e este requer um espaçamento entre os trilhos de vinte a vinte seis milímetros, dependendo do perfil do trilho a ser soldado. Este processo está representado em detalhes na figura 2.6.

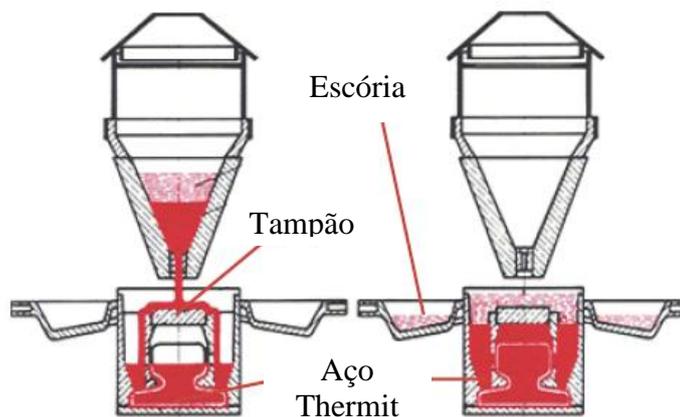


Figura 2.6 Representação esquemática do processo SoWos (THERMIT AUSTRÁLIA 2010).

### Método Thermit SKv-F

Com a modernização, cada vez mais intensa, transformou-se a utilização de rodovias e pontes rolantes, e assim surgia a necessidade de métodos de soldagem que requeressem intervalos de tempo cada vez menores para a execução de reparos nos trilhos.

Na Alemanha, entre 1963 e 1964 foram efetuadas séries experimentais de 1000 soldagens utilizando-se um novo método que não possuía pré-aquecimento com a finalidade de otimizar o tempo. Constataram, em laboratório, que este novo método, apresentava ótimos resultados, correspondendo plenamente às expectativas, porém, em clima úmido os resultados eram adversos. Foram observados que os melhores resultados eram alcançados, sem a dependência do clima, quando uma rápida secagem do topo dos trilhos era efetuada.

Utilizando-se neste processo um pré-aquecimento durante um intervalo de um minuto, através de um maçarico especial, consegue-se impedir a ocorrência de oscilações nos resultados da execução das soldas.

Dessa forma criou-se um novo método denominado por processo de soldagem rápida com pré-aquecimento curto ou SKv-F.

O principal objetivo do pré-aquecimento é eliminar a umidade do molde e das faces dos trilhos a serem soldados. Para compensar o curto tempo de pré-aquecimento foi necessário um acréscimo de 50% do volume da porção de “Thermit” para o mesmo trabalho pela geometria do molde deste método o aço liquefeito é conduzido ao longo do

topo dos trilhos a serem soldados, de forma a transferir maior quantidade de calor possível para essa região. Entre as inúmeras vantagens de soldagem com curto tempo de pré-aquecimento, pode-se destacar a diminuição das tensões longitudinais oriundas tanto da contração do trilho como na solda e a redução dos defeitos provocados por pré-aquecimento deficientes. A figura 2.7-A apresenta a representação esquemática do processo SKv-F e a figura 2.7-B o sistema com cadinho para soldagem de trilhos em campo.

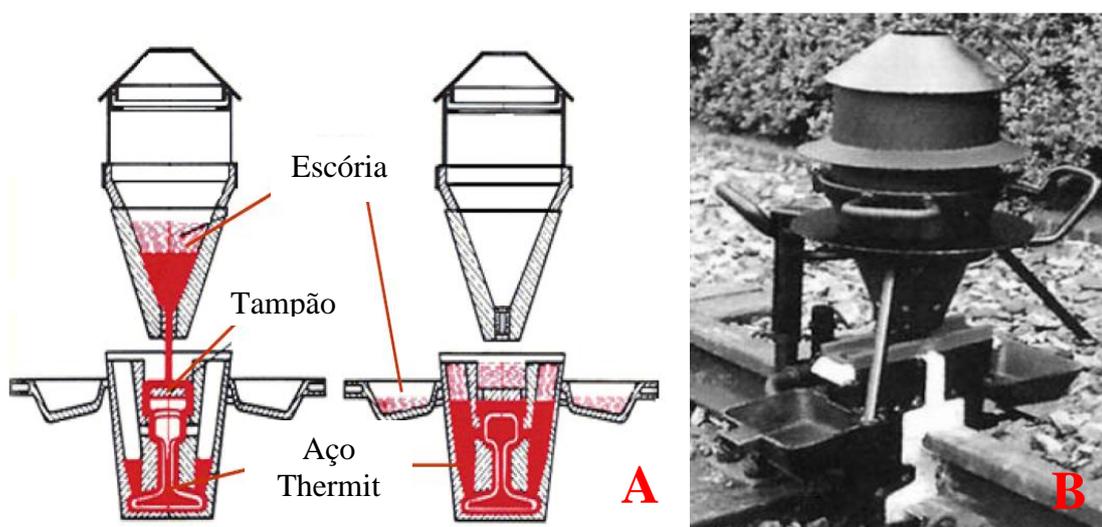


Figura 2.7 (A) Representação esquemática do processo SKv-F (THERMIT AUSTRÁLIA 2010) e (B) sistema com cadinho para soldagem de trilhos em campo (BRACARENCE 2000).

### 2.3.5 Propriedades da Soldagem Aluminotérmica

A solda aluminotérmica por apresentar uma estrutura de metal fundido possui, invariavelmente, propriedades mecânicas inferiores às do trilho. Estas propriedades são determinadas pelos parâmetros de soldagem em conjunto com a mistura aluminotérmica.

As propriedades ideais para a solda dependem das condições de carregamento da via. Conforme mencionado por (MUTTON 2004) em seus estudos, para as ferrovias com carga por eixo maior que 35 toneladas, uma mistura aluminotérmica adequada conjugada a um curto pré-aquecimento (4-5 min), pode ser utilizada para se obter uma solda com a zona afetada pelo calor (ZAC) medindo entre 18-25 mm e dureza entre 340-360 HB, sendo 340 HB a dureza mínima para se controlar deformações na soldas em níveis aceitáveis.

A estrutura metalúrgica presente na solda aluminotérmica depende de alguns fatores como, composição química da mistura, da composição dos trilhos e das taxas de resfriamento impostas ao processo. A microestrutura indicada para a solda é a perlita, embora sejam permitidas mínimas percentagens de ferrita. Morfologias aciculares dessa fase, como Widmanstatten são indesejadas por possuírem baixa ductilidade, fases martensíticas, bainíticas e estruturas dendríticas também não são recomendadas, pois conferem baixa tenacidade a junta soldada (ROSA 2008).

### 2.3.6 Controle de Qualidade de Soldas Aluminotérmicas

Para a soldagem de trilhos, os fabricantes especializados fornecem as porções aluminotérmicas próprias para a soldagem de cada tipo de trilho e de acordo com a respectiva resistência à tração dos mesmos. A quantidade de aço, produzida pela reação, é suficiente para a execução de soldas perfeitas, desde que observados os seguintes aspectos:

- As porções de solda não podem ser alteradas, ou seja, somente deverão ser usadas nos volumes fornecidos;
- As formas devem ser fabricadas com uso de modelos de alumínio originais, próprios para os respectivos perfis de trilho e processo de soldagem;
- Os espaços entre os topos dos trilhos deverão obedecer às instruções prescritas e os cortes devem ser feitos de modo que a face do topo do trilho constitua uma seção rigorosamente perpendicular à seção longitudinal do trilho;
- Os topos dos trilhos a soldar não podem conter ferrugem ou substâncias oleosas;
- A execução da soldagem deverá seguir rigorosamente as instruções de serviço.

Erros grosseiros de execução das soldas aluminotérmicas resultam em falhas que às vezes são imperceptíveis exteriormente. Algumas situações prejudiciais a qualidade da solda são mencionadas a seguir com suas respectivas conseqüências.

- Redução da folga entre trilhos e do tempo de pré-aquecimento resulta em poros e locais com falta de ligação;
- Colocação da forma descentrada em relação à folga entre trilhos impossibilita o correto pré-aquecimento das extremidades destes, prejudicando bastante a diluição durante o escoamento do metal de adição;
- Negligência na vedação provoca penetração de areia no interior da forma ocasionando inclusões de areia no patim;

- Soldagem de trilhos novos a trilhos velhos pode ocasionar penetração de areia na cavidade da forma devido ao desgaste do trilho usado;
- Umidade no cadinho a porção não reage devidamente, provocando forte porosidade;
- Umidade na porção desenvolve uma reação irregular causando porosidade e inclusão de escória.

A seguir serão mencionados alguns dos principais defeitos de soldagem ocorridos juntas soldadas por aluminotermia.

### 2.3.7 Defeitos de Soldagem

A união dos segmentos de trilhos por aluminotermia invariavelmente gera juntas soldadas com propriedades mecânicas inferiores às do trilho. Devido a essas características elas são consideradas como uma fonte freqüente de falhas em serviço, por estarem sujeitas a uma série de defeitos oriundos do processo de soldagem, provocando assim, impactos sobre a confiabilidade e a segurança do serviço ferroviário. Os defeitos de soldagem são classificados, segundo o International Institute of Welding (IWT), em função da sua natureza, forma e dimensões.

O processo de soldagem aluminotérmica tipicamente produz soldas de boa qualidade, no entanto, há possibilidade de ocorrência de defeitos. A natureza metalúrgica da solda aluminotérmica contribui para o surgimento de defeitos na Junta soldada. A figura 2.8 apresenta os tipos de defeitos responsáveis por falhas em um estudo citado por (LAWRENCE 2004).

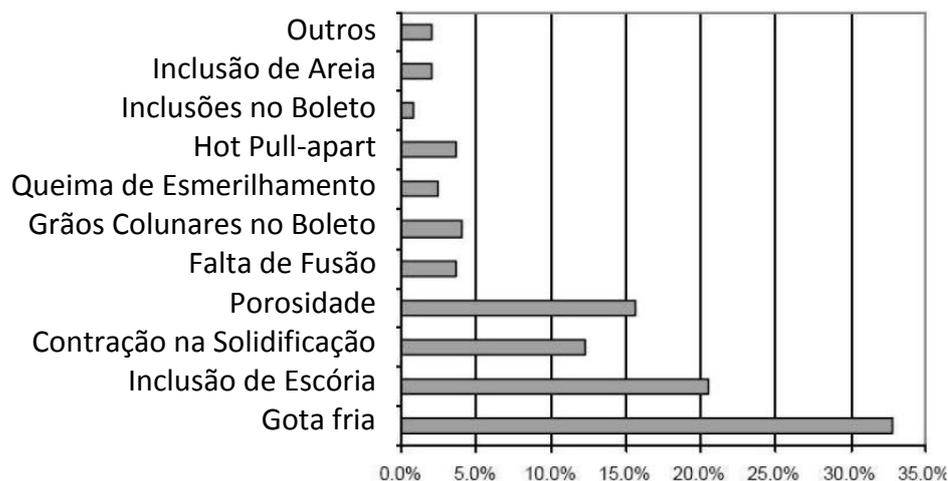


Figura 2.8 Tipos de defeitos encontrados em soldas aluminotérmicas (LAWRENCE 2004).

Alguns defeitos são gerados por procedimentos de soldagem ou materiais de consumo inadequados, como “Black-hole”, inclusões de escória ou areia e bordamento da solda. Outros são causados por procedimentos de soldagem incorretos como; rechupes, solda-fria e segregações. Há também casos em que ocorrem variações no perfil da solda causadas por severas condições de serviço que também são interpretadas como defeitos.

Visando auxiliar no entendimento deste estudo são apresentados, a seguir, alguns conceitos dos principais casos de falhas observados em soldas aluminotérmicas de acordo com o documento do Welding Technology Institute of Austrália (WTIA 2010).

#### Falta de Fusão (Lack of Fusion – LOF)

A falta de fusão ocorre quando o metal líquido do material de adição não provoca soldagem completa em alguma região do trilho. A falta de fusão também pode ser provocada por parâmetros de soldagem inadequados como pré-aquecimento, com a pressão dos gases, baixa temperatura ou porção de consumível insuficiente.



Figura 2.9 Solda com falta de fusão no patim do trilho (WTIA 2010).

### Porosidades

A porosidade em solda aluminotérmica é um defeito interno de natureza grave, pois, quando em grande quantidade pode reduzir de maneira significativa a resistência da solda. O principal fator para o surgimento deste problema é a umidade, pois esta dificulta a correta reação da mistura aluminotérmica.

A porosidade pode ainda ser devido ao material de vedação, insuficiente pré-aquecimento, molde contaminado e das condições do tempo prejudiciais durante o processo de soldagem, como exemplo, a soldagem aluminotérmica realizada em dias chuvosos, que gera grande quantidade de umidade para as soldas. A figura 2.10 apresenta um segmento de trilho soldado por aluminotermia evidenciando a forte presença de porosidade na solda.



Figura 2.10 Soldas com forte porosidade (WTIA 2010).

### Black-hole

Black-holes são poros isolados que aparecem junto ao canal de alimentação da solda. Estes defeitos são umas das maiores causas de rejeições de soldas por serem de fácil visualização em inspeções visuais. Os defeitos são causados por gases que, originados pelo material de vedação próximo ao patim, entram em contato com a solda durante a solidificação. Soldas que apresentam “gaps” estreitos também são sujeitas a este tipo de defeito.



Figura 2.11 Black hole no patim do trilho (WTIA 2010).

### Inclusões de Escória

As inclusões de escória são defeitos extremamente prejudiciais a integridade da solda, pois podem nuclear trincas de fadiga. Estes defeitos, na maioria das vezes são introduzidos por procedimentos de corte incorretos, “gaps” mal dimensionados, limpeza inadequada do cadinho (quando utilizado diversas vezes), umidade na porção e falhas no pré-aquecimento da junta.

### Contração da Solda

A contração da solda ocorre geralmente na última etapa de solidificação e está associada ao pré-aquecimento insuficiente, “gaps” reduzidos e ao movimento relativo da junta antes da solidificação total da solda.

### Inclusão de Areia

Ocorrem quando o material de vedação entra em contato com a chama durante o pré-aquecimento ou com o metal líquido durante o vazamento. A maior incidência deste

defeito ocorre na soldagem de um trilho novo com um trilho já desgastado, uma vez que pode haver penetração de areia devido ao desnível do trilho usado.

A areia de vedação pode alcançar temperatura de vitrificação e se incrustar na superfície do trilho. Este defeito pode ser removido por esmerilhamento, no entanto, ainda podem permanecer após este processo o que exigirá reparos na solda.



Figura 2.12 Exemplo de inclusão de areia (WTIA 2010).

#### Bordamento da Solda (Flashing/Finning)

O defeito tipo “finning” surge devido a um fluxo de metal fundido entre o trilho e o molde o que forma uma borda com potencial para concentrações de tensões. O defeito ocorre na alma e no patim do trilho junto ao colar de solda podendo ser ocasionado por variações na dimensão do molde, vazamento de escória na solda ou fusão da areia de vedação a qual é colocada entre o molde e o trilho. A figura 2.13 apresenta um desenho esquemático do colar de solda e suas características geométricas e a figura 2.14 mostra um caso de um trilho que apresenta este tipo de defeito.

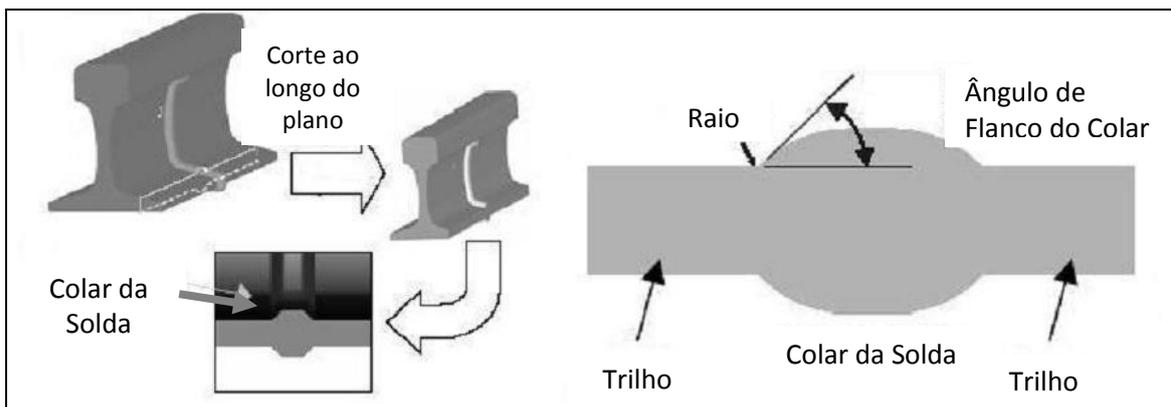


Figura 2.13 Desenho esquemático do trilho apresentando o colar de solda e suas características geométricas (ROSA 2008).

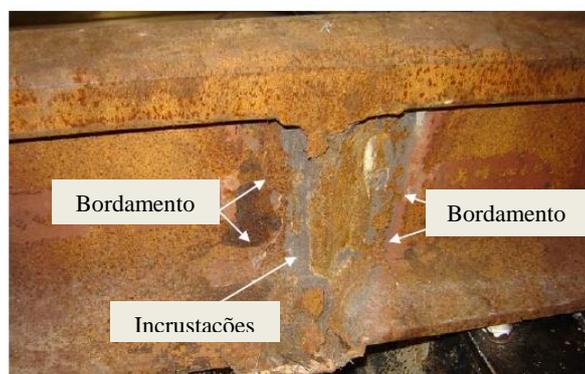


Figura 2.14 Exemplo de solda com defeito de bordamento. É observado, também, incrustação de material cerâmico no colar de solda (ROSA 2008).

### 2.3.8 Surgimento de Falhas em Soldas Aluminotérmicas

A maior ocorrência de falhas em soldas aluminotérmicas depende de fatores como manutenção das vias e das condições de tráfego. As fraturas são incentivadas pelos altos carregamentos, principalmente nas vias de cargas pesadas, e estão associadas com a presença de defeitos de soldagem.

As falhas ocorrem principalmente por fadiga ou sobrecarga. Segundo (LAWRENCE 2004), 40% das falhas em serviço são devido às soldas, sendo que 10 % dos casos de acidentes com ocorrência de descarrilamentos por ele observados ocorrem por fratura nas soldas.

As trincas de fadiga ocorrem com maior frequência na região do boleto, porém podem ser detectadas através de ensaios de ultrassom. Estas trincas, na sua etapa de iniciação, podem ser removidas pelo processo de esmerilhamento ou pelo desgaste do

trilho. No boleto as trincas surgem a partir de concentradores de tensões internos, como inclusões e porosidades. Na alma e no patim as trincas de fadiga ocorrem com menor frequência e são mais difíceis de serem detectadas, no entanto estas regiões são mais suscetíveis a defeitos superficiais e tensões residuais trativas conferindo maior risco à integridade da junta soldada (SKYTTEBOL 2005). A justificativa para a grande incidência de fraturas iniciadas na alma e no patim do trilho é devido à presença de gotas frias (“cold laps”) que atuam como concentradores de tensão, conforme mostrado no esquema da figura 2.16.

A gota fria ou “Cold lap” é um defeito comum em soldas aluminotérmicas que surge quando os moldes de areia não se encaixam perfeitamente ao perfil do trilho. A abertura resultante entre o molde e o trilho permite que o metal de solda entre neste “gap” e se solidifique formando regiões fundidas conforme mostrado na figura 2.15 (LAWRENCE 2004).

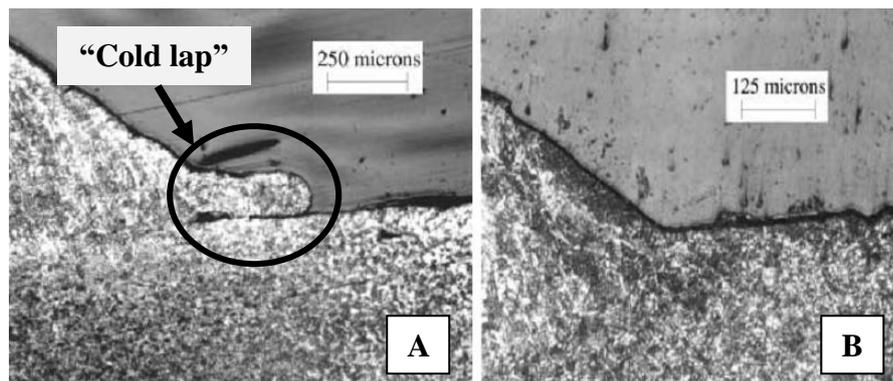


Figura 2.15 Imagem mostrando em (A) presença de “cold lap” e em (B) e a ausência de “cold lap” (LAWRENCE 2004).

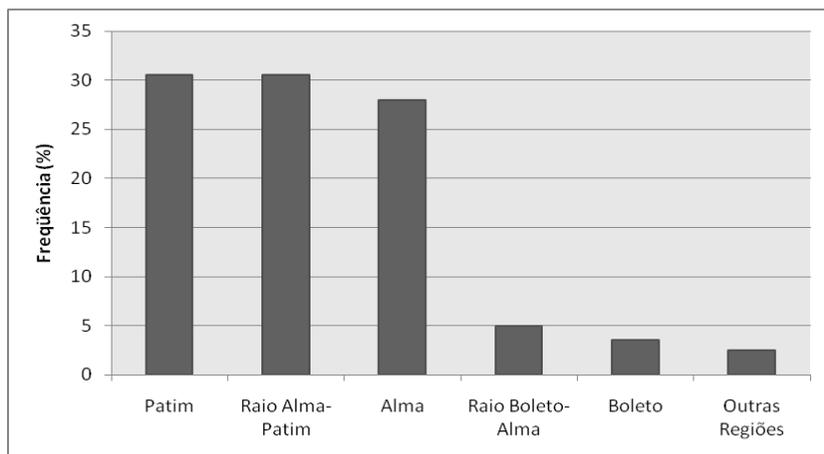


Figura 2.16 Gráfico apresentando as regiões da solda mais suscetíveis à falhas (LAWRENCE 2004).

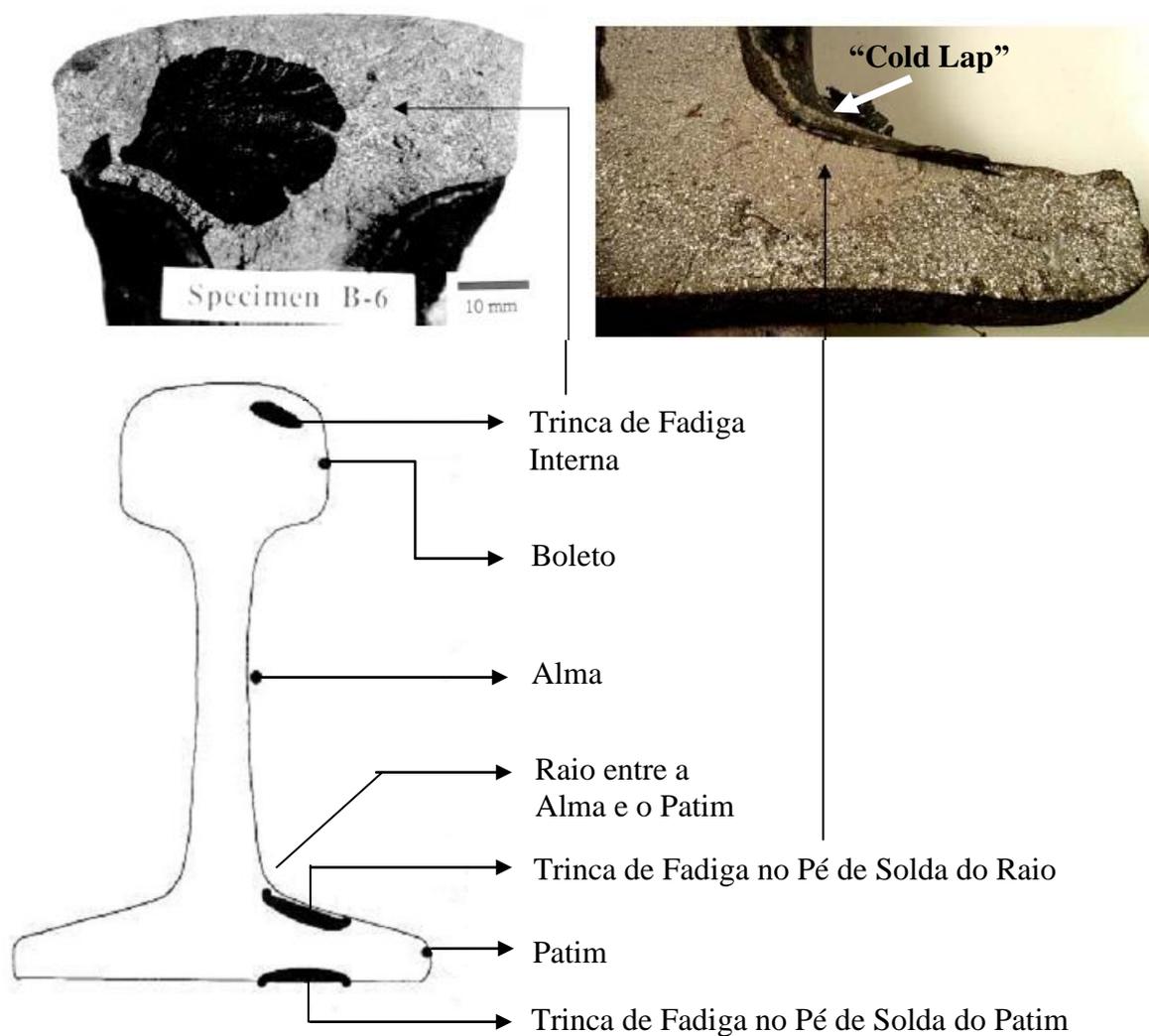


Figura 2.17 Imagem da seção transversal do trilho apresentando as regiões da solda mais suscetíveis à falhas (LAWRENCE 2004).

### 2.3.9 Melhorias no Desempenho de Soldas Aluminotérmicas

Segundo (SKYTTEBOL 2005) três importantes fatores, a densidade de tráfego, a carga por eixo e a velocidade dos trens, para o estudo da manutenção e integridade das vias contribuem para aumentar as projeções de demanda para o tráfego ferroviário.

E importante salientar que as juntas soldadas pelo processo aluminotérmico podem apresentar defeitos de soldagem mesmo que sejam seguidos rigorosamente os procedimentos de soldagem recomendados pelo fornecedor. Segundo (MUTTON 2004) um dos principais limitadores para que no transporte ferroviário os trilhos suportem uma capacidade de carga por eixo de até 40 toneladas são as junções soldadas. Devido a esse fato, vários são os estudos realizados sobre soldagem de trilhos visando propor melhorias na qualidade da solda, de modo a permitir uma maior quantidade de carga transportada por eixo e maior velocidade dos trens mantendo-se os níveis de segurança aceitáveis para as linhas transportadoras de carga, como é o caso das linhas que transportam grandes quantidades de minério de ferro.

Várias são as técnicas de soldagem, os consumíveis, simulações numéricas, ensaios de fadiga além de outras tecnologias que visam aperfeiçoar as soldas e proporcionar uma redução nos custos de manutenção, que são fundamentais para a indústria ferroviária. As principais áreas que exercem maior influência no desempenho das juntas soldadas são: a preparação das juntas, moldes, mistura aluminotérmica e o pré-aquecimento.

### 3.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental tem por objetivo apresentar os materiais e os métodos utilizados na realização do estudo das características mecânicas e metalúrgicas nas junções de solda aluminotérmica.

Os experimentos a serem realizados nas junções soldadas são ensaios de fadiga, análise da superfície de fratura, caso ocorra à ruptura na região soldada durante os ensaios de fadiga, análise química, análise microestrutural e ensaios de dureza. Todos estes ensaios foram realizados no Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF– UFRGS).

#### 3.1 Materiais Analisados

Os materiais alvo do estudo realizado neste trabalho são quatro segmentos de trilhos ferroviários, com 1200 milímetros de comprimento. Os trilhos são do tipo “vignole” com perfil TR-45, qualidade 5A, de acordo com norma brasileira ABNT NBR 7590 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS 1991). As especificações do material das soldas estão apresentadas na tabela 3.1 e 3.2 com base na norma da ABNT acima mencionada.

Tabela 3.1 Especificações da composição química do material.

Composição Química (%)				
C	Mn	Si	P (Max)	S (Máx)
0,60 - 0,80	0,80 - 1,30	0,10 - 0,50	0,05	0,05

Tabela 3.2 Características mecânicas do material.

Características Mecânicas	
Resistência a Tração (MPa) (mín)	Alongamento (%) (mín)
880	8

As imagens das figuras 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4 apresentam os segmentos de trilhos (corpos de prova) analisados os quais foram identificados por amostras A, B, C e D.



Figura 3.1 Corpo de prova identificado por amostra A.



Figura 3.2 Corpo de prova identificado por amostra B.



Figura 3.3 Corpo de prova identificado por amostra C



Figura 3.4 Corpo de prova identificado por amostra D.



### 3.3 Ensaio de Fadiga

Para execução do ensaio o segmento de trilho é assentado com o patim sobre dois apoios inferiores distanciados de 1000 mm, de forma que outros dois apoios na parte superior, distanciados de 150 mm, pressionem sobre o boleto do trilho. Este ensaio é denominado de ensaio de fadiga por flexão a quatro pontos em compressão e o critério utilizado para aprovação do material é que este suporte dois milhões de ciclos sem fraturar.

#### 3.3.1 Apresentação do Equipamento de Ensaio

Os ensaios de fadiga foram realizados em um equipamento conhecido por atuador hidráulico. O atuador hidráulico, modelo ATU 500 possui uma célula de carga CC 500I e quadro de reação que possibilitam a aplicação de até 500 kN de carga. O sistema utilizado para o controle do ensaio é o FlexTest (Materials Test System-MTS), conectado a um computador. Essa versão possibilita o monitoramento on-line, ou seja, parâmetros como tempo de resposta e auto-ajuste permitem melhor confiabilidade. A figura 3.6 apresenta o equipamento utilizado nos ensaios de fadiga e a imagem da figura 3.7 apresenta um esquema da configuração do trilho para a execução do ensaio.



Figura 3.6 Apresentação do equipamento utilizado nos ensaios de fadiga.

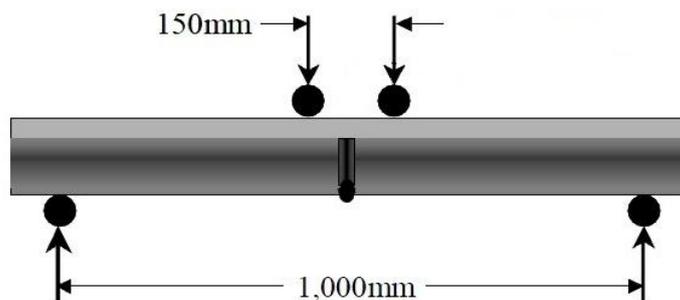


Figura 3.7 A imagem apresenta um esquema da configuração do trilho para o ensaio de fadiga.

### 3.3.2 Parâmetros do Ensaio de Fadiga

Utilizaram-se como parâmetros para os ensaios de fadiga por flexão a quatro pontos dos trilhos TR-45, a carga mínima de compressão de 55 kN e a carga máxima de compressão de 244 kN e com frequência variando de 5 a 8 Hz.

### 3.4 Análise da Superfície de Fratura

A análise da superfície de fratura consistiu, além da limpeza da superfície a ser inspecionada, na análise da fratura através de máquina digital. O exame da fratura teve como finalidade investigar as possíveis regiões de início da falha e a presença de defeitos que possam comprometer a integridade das soldas e prejudicar as suas propriedades mecânicas. As imagens apresentadas no item 4.2 mostram os resultados das análises das superfícies de fratura dos trilhos.

### 3.5 Análise Química

Com o objetivo de estudar o material foi realizada a análise química do metal de solda das amostras A, B, C e D. A análise foi efetuada através de Espectrometria de Emissão Ótica, utilizando-se um espectrômetro marca Spectro, modelo Spectrolab. As análises químicas foram realizadas em três locais distintos no metal de solda em cada uma das quatro amostras. Os resultados da análise química, apresentados no item 4.3, representam uma média aritmética de três análises.

### 3.6 Análise Metalográfica

Na análise micrográfica foi realizada uma avaliação da microestrutura, nas juntas soldadas com a finalidade de verificar a qualidade das soldas. Para a realização desta análise foram retirados corpos de prova dos segmentos de trilho que romperam nas juntas soldadas com os ensaios de fadiga, em uma região próxima a de início da falha, no metal de solda (MS) e na zona afetada pelo calor (ZAC), no sentido perpendicular a solda. No segmento de trilho que não houve ruptura após o ensaio de fadiga também foi realizada a análise da microestrutura com o intuito de evidenciar a qualidade da mesma.

A preparação das amostras para a análise microestrutural consistiu de embutimento, lixamento (sequência de lixas: 120, 220, 320, 400, 600 e 1200 mesh) e polimento (pasta de diamante de 4 e 1 um) de acordo com a norma brasileira ABNT NBR 13284 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS 1995). As amostras foram atacadas com reagente químico Nital 2% segundo a norma ABNT NBR 8108 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS 1983) e em seguida observadas ao microscópio óptico da marca Olympus BX 51M, com as micrografias obtidas através de câmera digital acoplada ao microscópio.

### 3.7 Ensaio de Dureza

Os ensaios de dureza foram realizados em um durômetro Wolpert na escala Brinell, com esfera de 2,5 mm e carga de 187,5 Kgf. A análise foi realizada em dois locais distintos em cada uma das amostras, na zona afetada pelo calor (ZAC) e no metal de solda (MS). A tabela 4.6 apresenta os resultados obtidos. Os ensaios de dureza foram realizados de acordo com a norma ABNT NBR NM ISO 6506-1: 2010. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS 2010). Para fins de comparação de resultados foi utilizada a faixa de dureza especificada para o aço grau 260, de acordo com a norma européia (prEN13674-1:2003), que apresenta composição química e características mecânicas semelhantes ao material analisado. A tabela 3.4 apresenta a composição química dos elementos de interesse do estudo e as propriedades mecânicas especificadas do referido aço, líquido e sólido.

Tabela 3.4 Composição química e propriedades mecânicas para o aço grau 260 (prEN13674-1 2003 - Dados Parciais).

Stell sample grade		% By mass				Rm (MPa)	min Elong A (%)	Hardness Centre line (HB)
		C	Si	Mn	P (máx)			
R260	Liquid	0,62/0,80	0,15/0,58	0,70/1,20	0,025	880	10	260/300
	Solid	0,60/0,82	0,13/0,60	0,65/1,25	0,030			

## 4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados os resultados de acordo com a sequência de realização dos experimentos realizados na junção soldada pelo processo aluminotérmico e a respectiva discussão. Serão expostos seguindo a ordem crescente de desempenho em fadiga, ou seja, do segmento de trilho que apresentou a pior até a melhor resistência à fadiga.

### 4.1 Ensaio de Fadiga

A resistência a fadiga por flexão de soldas aluminotérmicas é um importante parâmetro para avaliar a segurança das operações em uma ferrovia. Este ensaio é o mais indicado e importante para verificar a resistência das soldas, pois submete o componente a um carregamento que simula as piores condições de operação revelando eventuais problemas da solda que passariam despercebidas em um carregamento estático.

Através dos ensaios de fadiga de alto ciclo é possível simular de modo aproximado as condições de carregamento da via, de maneira que, o patim é submetido à flexão trativa, tal como ocorre quando da passagem do trem sobre o trilho.

A tabela 4.1 mostra os resultados obtidos nos ensaios de fadiga. Das quatro amostras analisadas três apresentaram fratura na região soldada antes de atingir o critério para aprovação do material, que é de suportar dois milhões de ciclos sem fraturar, segundo a norma ABNT NBR 11449 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS 1989).

Podemos observar na figura 4.1 que a amostra D está situada a direita do limite assinalado, ou seja, somente a solda desta amostra foi aprovada nos ensaios de fadiga, pois suportou este número mínimo de ciclos. Vale ressaltar que a norma ABNT NBR 11449 exige uma carga de compressão máxima de 230 MPa e mínima de 50 MPa e foram utilizados nestes ensaios, níveis de carga mais severos (Cargas de compressão entre 55 e 244 MPa).

Contudo, percebemos conforme a figura 4.1, que as amostras A, B e C encontram-se bem abaixo do limite mínimo de ciclos exigidos (representado pela linha pontilhada na figura 4.1). Dessa forma podemos inferir que, mesmo que fossem utilizados os limites especificados pela norma ABNT NBR 11449, essas amostras não atingiriam os dois milhões de ciclos esperados, pois se utilizássemos 230 MPa, como carga máxima de compressão, provavelmente obteríamos um maior número de ciclos de fadiga, já que a carga máxima seria menor do que a utilizada neste ensaio, porém abaixo do desejado.

Tabela 4.1 Resultados dos ensaios de fadiga.

Amostra	Nº de Ciclos	Tempo	Observações
A	42.700	00:02:22	Fratura na Solda-Fadiga
B	788.134	00:27:26	Fratura na Solda – Fadiga
C	898.258	00:31:11	Fratura na Solda – Fadiga
D	2.532.004	01:27:54	Sem Fratura

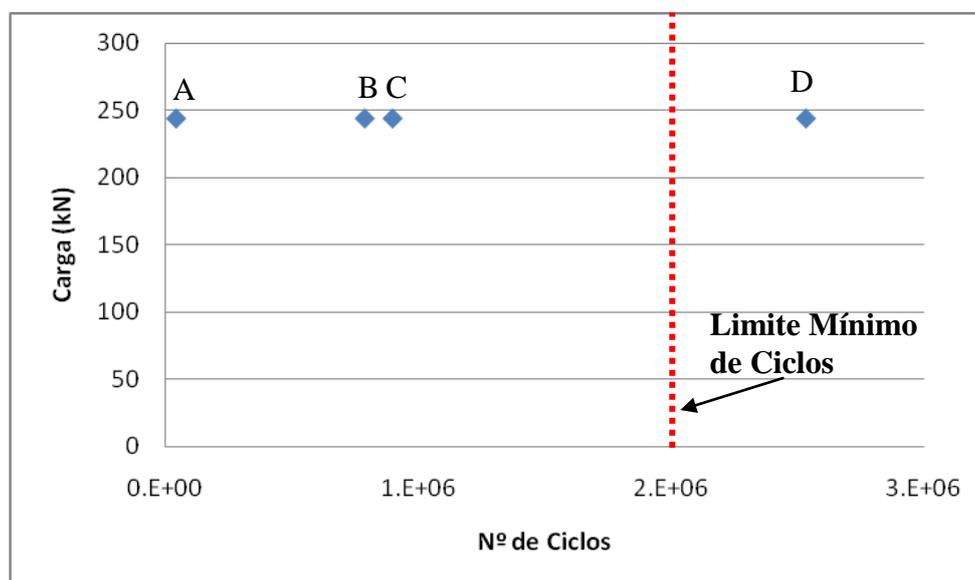


Figura 4.1 Relação entre carga X número de ciclos de fadiga.

#### 4.2 Análise da Superfície de Fratura

Após os ensaios de fadiga, as amostras que romperam na região soldada, que não atendem o critério de aprovação do material, foi realizada a análise da superfície de fratura com o objetivo de detectar as possíveis regiões do início da falha e verificar a presença de

problemas que comprometem a resistência mecânica do trilho. As imagens a seguir apresentam os resultados desta análise.

Através da análise da superfície de fratura da amostra A foi possível identificar a presença de porosidades na base e no ombro do patim, possivelmente em virtude da umidade dos moldes durante o processo de soldagem alumimotérmica. Além disso, também se constatou porosidades na região entre a alma e o patim, provavelmente devido ao alto nível de gases presentes no metal de solda. Por atuar como forte concentrador de tensões, a porosidade devido aos gases no MS, é um importante indício de que seja neste local, a região de início da falha por fadiga. Esse fato é evidenciado pelo aspecto da superfície de fratura que apresenta indícios de marcas que direcionam para essas regiões.

A presença de porosidades na solda é um defeito interno de natureza grave que pode reduzir significativamente a resistência da solda. As imagens na figura 4.2 mostram a superfície de fratura da amostra A, na qual se pode evidenciar a presença destes defeitos.

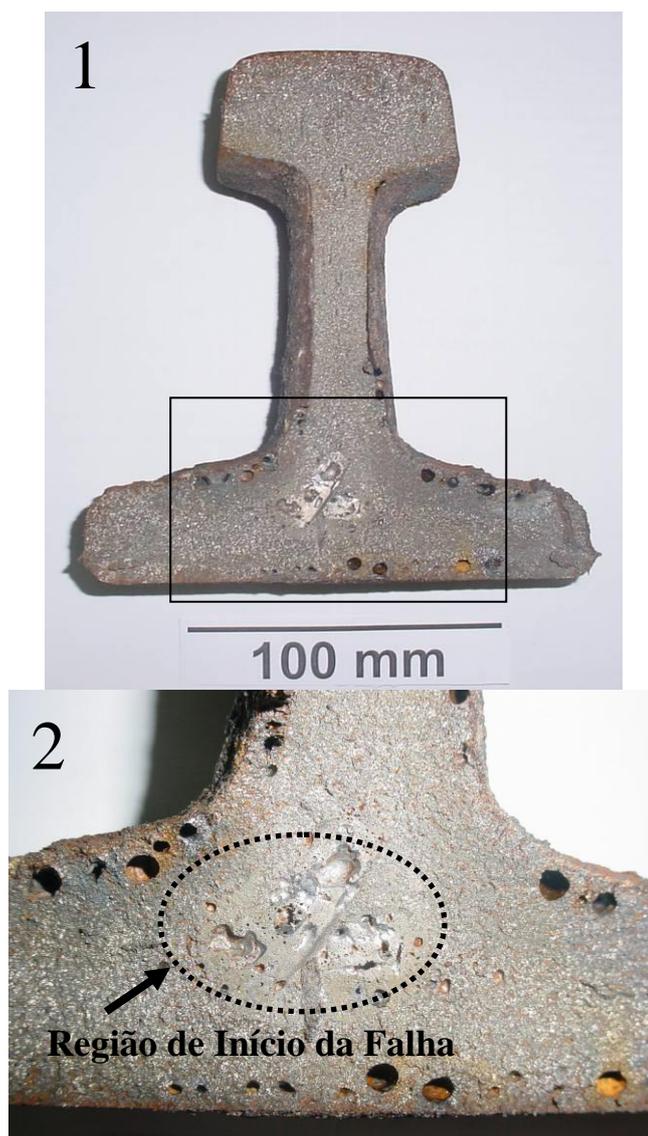


Figura 4.2 Em (1) Imagem da superfície de fratura da amostra A e (2) imagem da região em destaque em (1) em maior aumento. A região indicada pela elipse indica a provável região de início da falha.

Na análise Visual da amostra B se observou que a fratura por fadiga ocorreu na região da ZAC, e não no metal de solda (Figura 4.3). Constatou-se, através da análise da superfície de fratura, que a falha por fadiga teve início na região do ombro do patim em dois locais distintos, um a direita e outro a esquerda da alma, próximos ao raio. Verificou-se que a falha originou-se devido a um “Cold Lap”, localizado nessas regiões, por atuar como concentrador de tensões. As imagens da Figura 4.4 mostram com mais detalhes as duas regiões de início da falha e o limite máximo de propagação da trinca de fadiga, indicado pela linha tracejada nas imagens da figura 4.4-2.

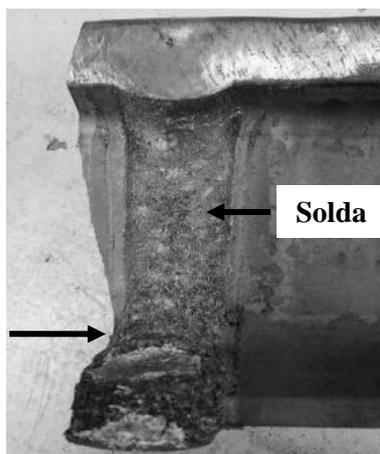


Figura 4.3 Imagem mostrando o aspecto da fratura da amostra B após o ensaio de fadiga. A seta inferior indica a região de início da fratura, junto a ZAC.

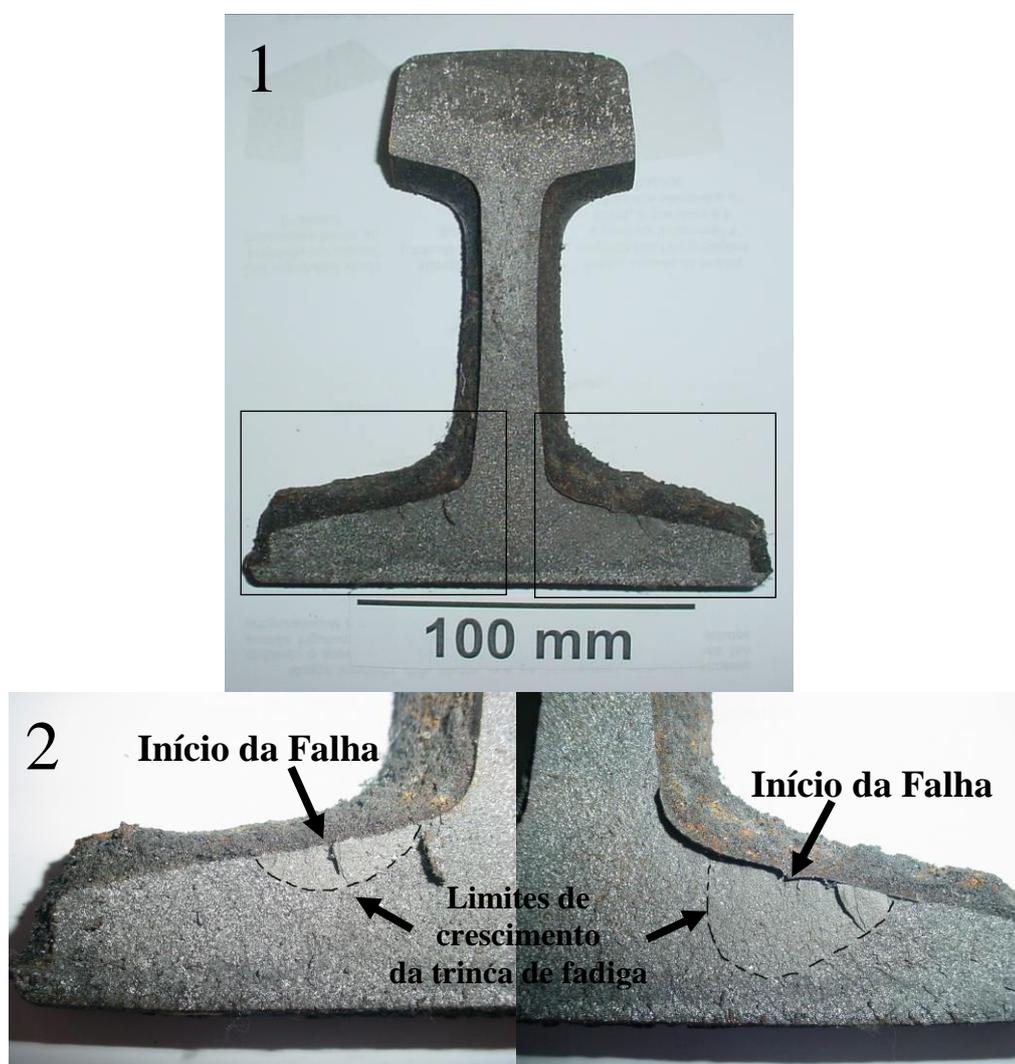


Figura 4.4 Em (1) Imagem da superfície de fratura da amostra B e em (2) imagens em maior aumento das regiões em destaque em (1) evidenciando as regiões de início da falha e o limite máximo de propagação da trinca de fadiga.

A amostra C também apresentou falha por fadiga a um número de ciclos abaixo do critério de aprovação do material. Observou-se, através de uma análise visual, que a fratura por fadiga ocorreu na região da ZAC, e não no metal de solda (Figura 4.5).

Também foi possível identificar com esta análise, que a falha teve início na parte central do patim e na base do mesmo. Na imagem ilustrada na figura 4.6-2 é possível observar detalhadamente a presença de marcas de sargento que indicam para a região de início da falha.

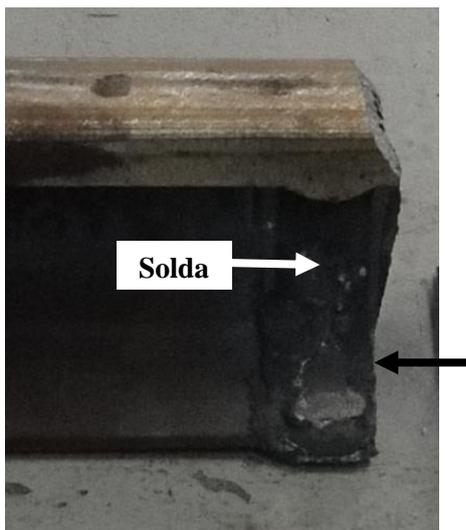


Figura 4.5 Imagem mostrando o aspecto da fratura da amostra C após o ensaio de fadiga. A seta inferior indica a região de início da fratura, junto a ZAC.

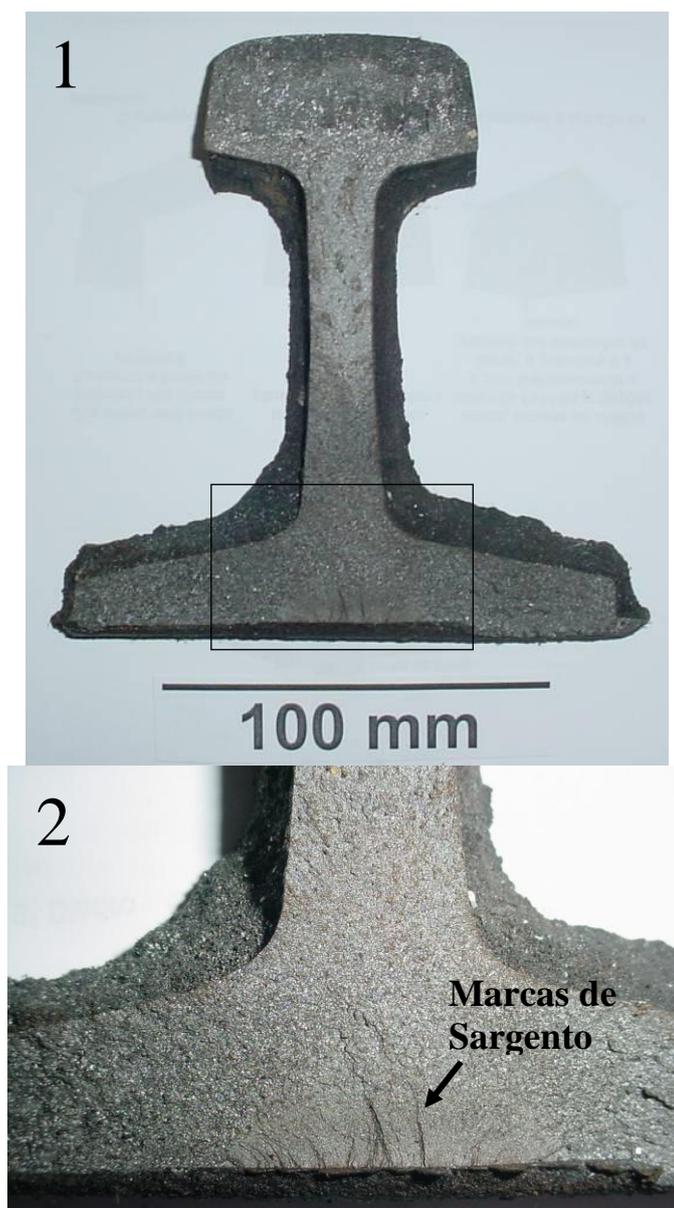


Figura 4.6 Em (1) Imagem da superfície de fratura da amostra C e em (2) imagem em maior aumento da região em destaque em (1), mostrando a presença de marcas de sargento.

A amostra D atingiu o critério para aprovação do material que é de suportar dois milhões de ciclos sem fraturar. Portanto, nesta amostra não foi realizado a análise da superfície da fratura. As análises posteriores a serem realizadas nesta amostra foram a análise química, análise metalográfica e ensaio de dureza, com a finalidade de se verificar a qualidade do metal de solda.

### 4.3 Análise Química

Os resultados desta análise são apresentados nas tabelas 4.2 a 4.5. Nota-se que em todas as amostras analisadas, dentre os principais elementos (C, Mn, Si, P, e S) todos estão dentro das especificações conforme a norma ABNT NBR 7590, (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS 1991) apresentadas na tabela 3.1, exceto o Si, o qual se encontra fora da faixa especificada, e acima desta, em todas as amostras analisadas.

O elemento químico silício (Si) no aço gera uma série de efeitos nas suas propriedades mecânicas. A adição de Si provoca um aumento da dureza, da resistência a tração e do limite de escoamento, porém, prejudica propriedades como o alongamento, a resistência ao impacto e a soldabilidade.

Tabela 4.2 Resultados da análise química da amostra A.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (% EM MASSA)								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
0,642	0,552	0,981	0,0256	0,0065	0,0239	<0,005	0,01	0,0697

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (% EM MASSA)									
Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	Sn	B	Fe
<0,01	<0,01	0,0033	0,0011	0,0056	<0,01	<0,002	0,0026	0,0002	97,7

Tabela 4.3 Resultados da análise química da amostra B.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (% EM MASSA)								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
0,678	0,618	0,985	0,0247	0,0051	0,0311	<0,005	0,0089	0,0917

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (% EM MASSA)									
Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	Sn	B	Fe
<0,01	<0,01	0,0076	0,001	0,17	<0,01	<0,002	0,0022	0,0002	97,4

Tabela 4.4 Resultados da análise química da amostra C.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (% EM MASSA)								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
0,657	0,599	1,05	0,0265	0,007	0,0311	<0,005	0,0078	0,0703

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (% EM MASSA)									
Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	Sn	B	Fe
<0,01	<0,01	0,0094	0,0012	0,17	<0,01	<0,002	0,0032	0,0006	97,3

Tabela 4.5 Resultados da análise química da amostra D

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (% EM MASSA)								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
0,73	0,747	1,09	0,026	0,0072	0,044	<0,005	0,0133	0,276

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (% EM MASSA)									
Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	Sn	B	Fe
<0,01	<0,01	0,006	0,0018	0,0019	<0,01	<0,002	0,0026	0,0003	97,0

#### 4.4 Análise Metalográfica

A análise metalúrgica realizada nas amostras A, B e C pode-se constatar que o metal de solda (MS) apresenta microestrutura perlítica. Também foi possível observar nestas amostras, a presença de porosidades, inclusões de óxidos globulares e microrechupes, decorrentes do processo de soldagem. Pequena quantidade de ferrita pró-eutetóide em contorno de grão pôde ser observada, nas regiões de início das falhas, podendo ter contribuído para diminuir a resistência mecânica do trilho. A amostra D, aprovada nos ensaios de fadiga por flexão, também apresentou uma pequena quantidade de inclusões de óxidos globulares e microrechupes, porém, não comprometeu o seu desempenho em fadiga.

Na análise metalúrgica realizada na zona afetada pelo calor (ZAC), em todas as amostras analisadas, a estrutura encontrada também é perlítica, apresentando porosidades e inclusões de óxidos globulares, além da presença de poucos microrechupes (amostra B). As imagens das figuras 4.7 a 4.15 mostram os resultados da análise microestrutural.

A microestrutura perlítica da amostra A se apresentou bastante refinada na região da ZAC, fato que provocou alterações nas propriedades mecânicas do material nesta região. A formação de perlita fina (PF) ocorre em virtude de um resfriamento mais

acelerado na região da ZAC do que no MS. O ANEXO A apresenta a variação microestrutural da amostra A.

A grande quantidade de porosidades no MS da amostra A, foi o fator decisivo para a ocorrência da falha por fadiga, por atuar como forte concentrador de tensões.

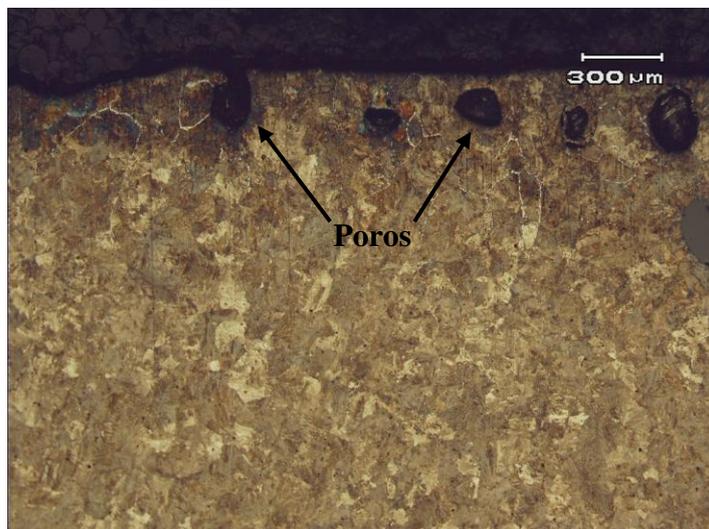


Figura 4.7 Imagem da amostra “A” em MO mostrando a microestrutura perlítica do MS próximo à região de início da falha. Constatou-se, a presença de porosidades e pequena quantidade de ferrita pró-eutetóide em contornos de grão.



Figura 4.8 Imagem da amostra A em MO mostrando microestrutura perlítica do MS com grande quantidade de microrechupes.

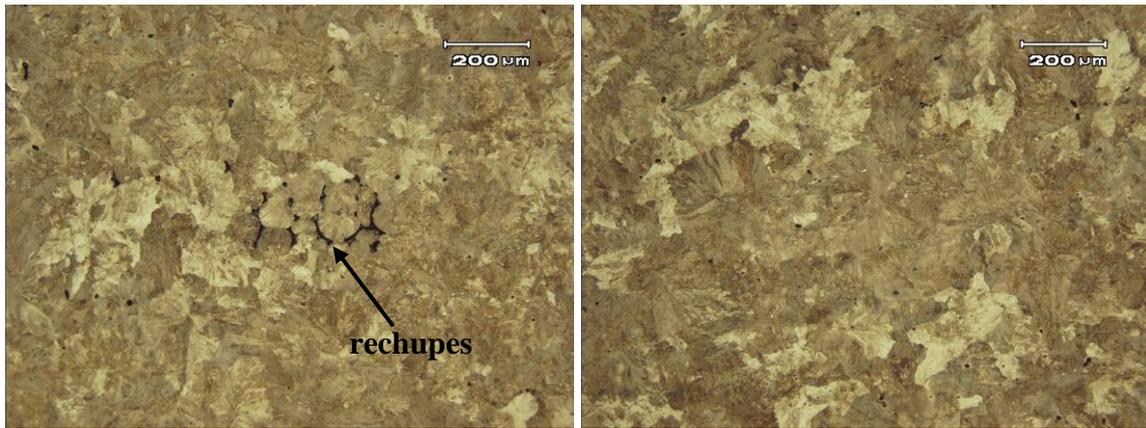


Figura 4.9 Imagem da amostra “A” em MO mostrando a microestrutura perlítica no MS. Observa-se a presença de microrechupes (à esquerda) e inclusões de óxidos globulares (à direita).

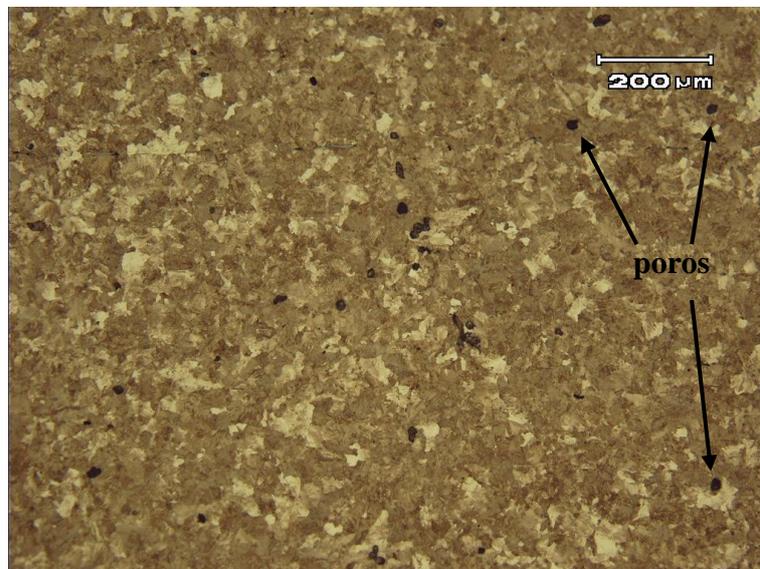


Figura 4.10 Imagem da amostra “A” em MO mostrando microestrutura perlítica refinada com presença de porosidades, na região da ZAC.

A amostra B apresentou microestrutura perlítica com grande quantidade de porosidades, inclusões de óxidos globulares e microrechupes na região da ZAC, fato que conduz a uma redução da resistência mecânica do trilho, prejudicando a vida em fadiga. A menor resistência mecânica na ZAC contribuiu para que a falha iniciasse nesta região (Figura 4.3).

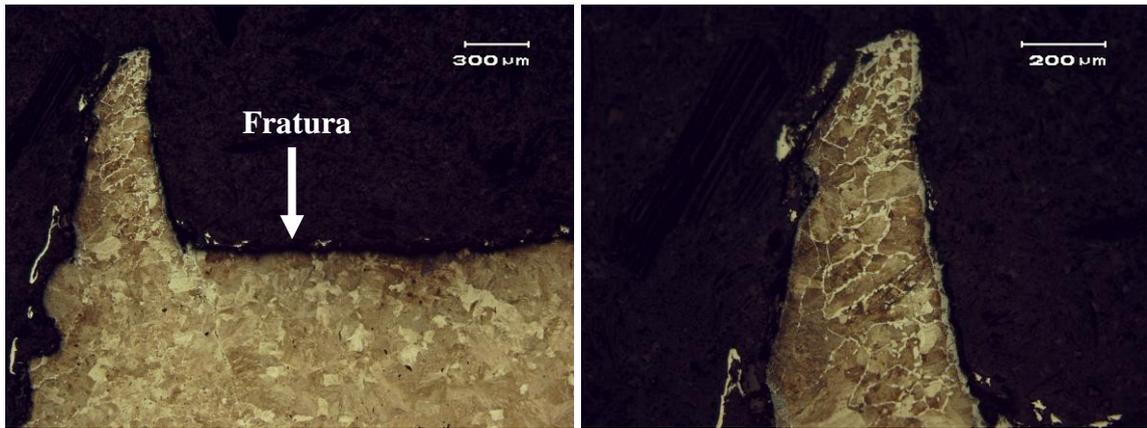


Figura 4.11 Imagem da amostra “B” em MO mostrando a microestrutura perlítica na região de início da falha. Observa-se a presença de ferrita pró-eutetóide em contorno de grão.

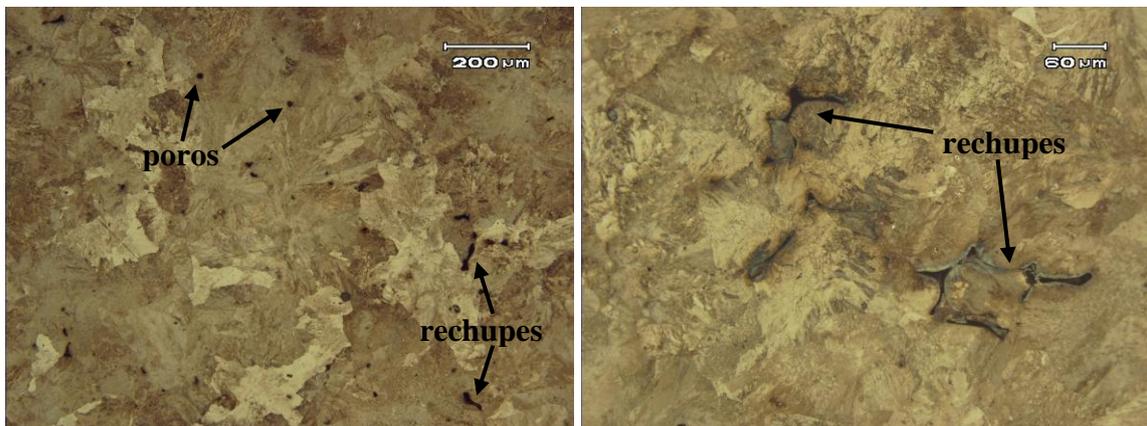


Figura 4.12 Imagem da amostra “B” em MO mostrando a microestrutura perlítica no MS. Observam-se porosidades, inclusão de óxidos e microrechupes.

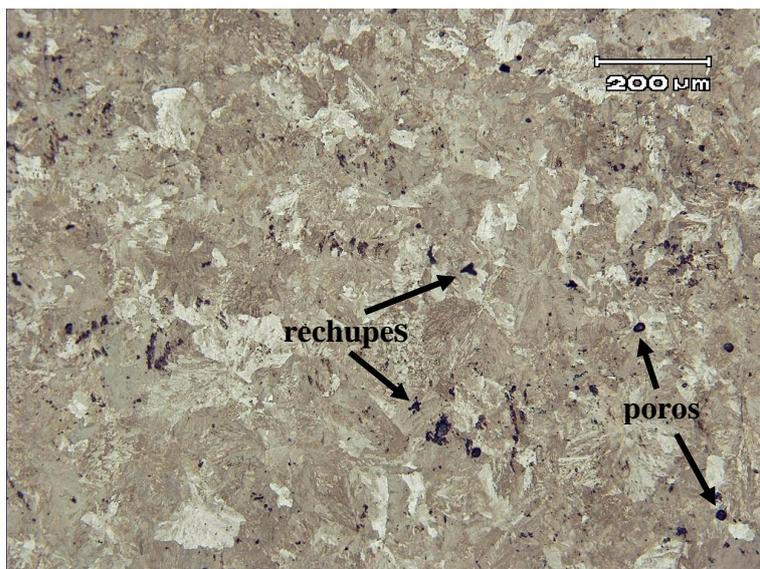


Figura 4.13 Imagem da amostra "B" em MO mostrando microestrutura perlítica na região da ZAC. Observou-se porosidades, inclusões de óxidos globulares e microrechupes.

Assim como as amostras A e B, a amostra C também apresentou microestrutura perlítica com presença de porosidades e inclusões de óxidos globulares, porém esta microestrutura se mostrou um pouco mais refinada na região da ZAC do que no MS.

Além disso, foi observada a presença de ferrita pró-eutetóide em contorno de grão na região de início da falha, o que confere uma menor resistência mecânica nesta região.

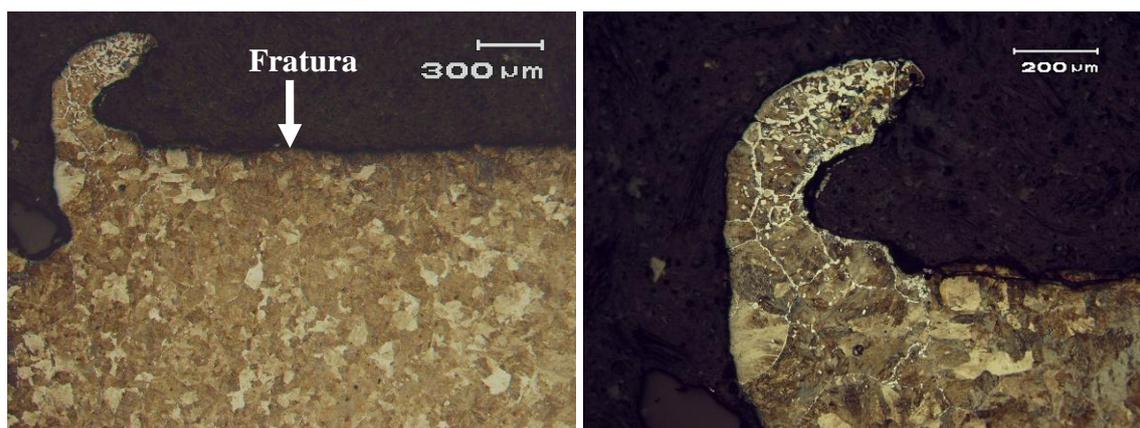


Figura 4.14 Imagem da amostra "C" em MO mostrando a microestrutura perlítica na região de início da falha. Observou-se ferrita pró-eutetóide no contorno de grão.

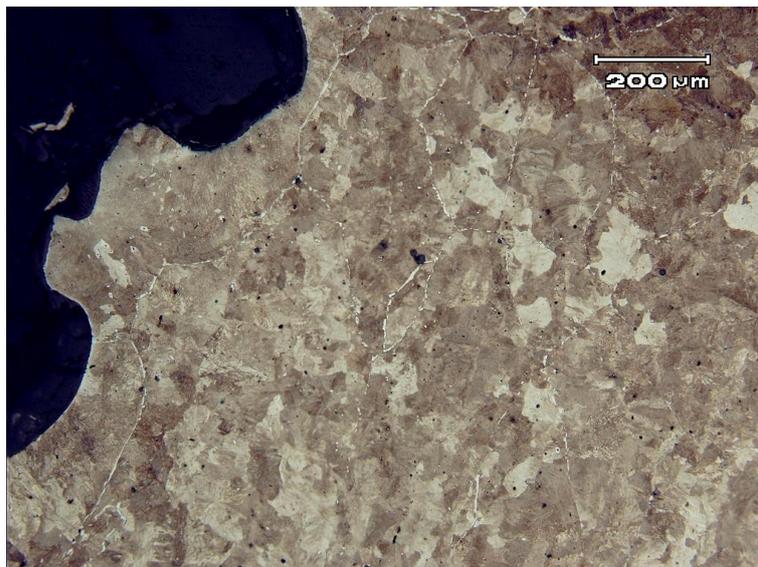


Figura 4.15 Imagens da amostra “C” em MO mostrando a microestrutura perlítica próximo à região de início da falha. Observou-se porosidades, inclusões de óxidos globulares e ferrita pró-eutetóide em contornos de grão.

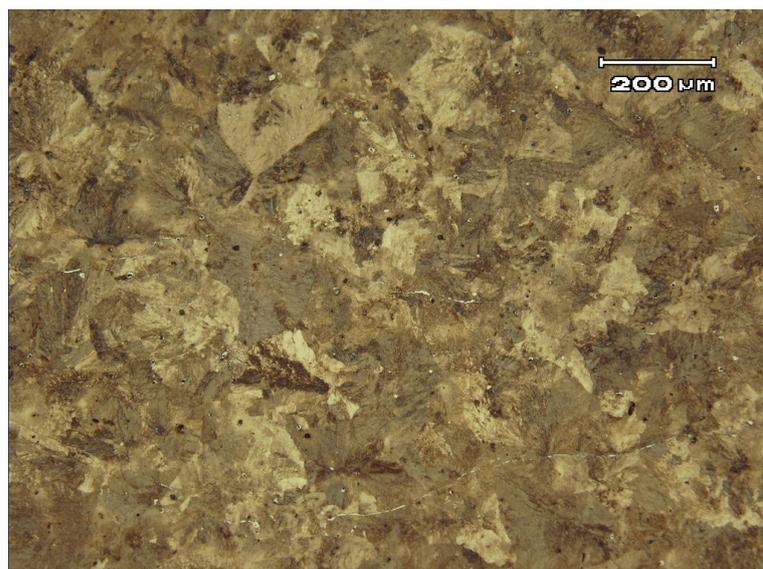


Figura 4.16 Imagens da amostra “C” em MO mostrando a microestrutura perlítica com porosidades e inclusões de óxidos e pouca quantidade de ferrita pró-eutetóide em contorno de grão.

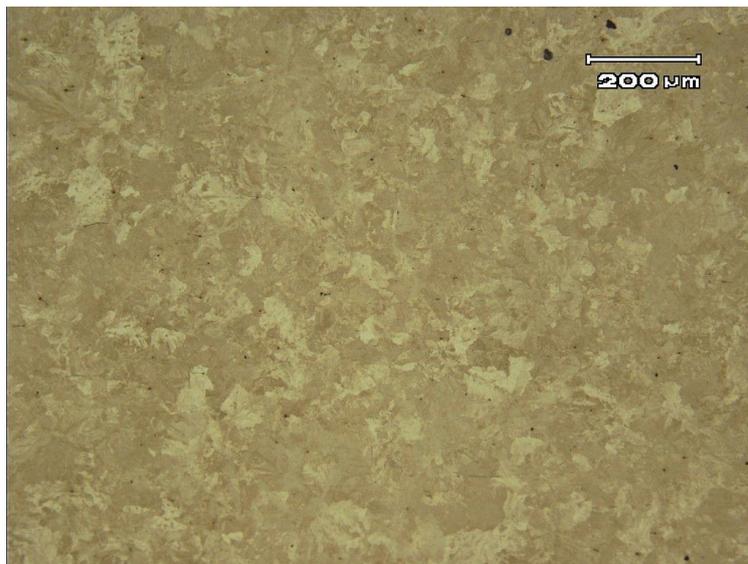


Figura 4.17 Imagens da amostra "C" em MO mostrando microestrutura perlítica na região da ZAC.

A amostra D, aprovada nos ensaios de fadiga por flexão, apresentou uma pequena quantidade de inclusões de óxidos globulares e poucos microrechupes, porém não comprometeu o seu desempenho em fadiga.

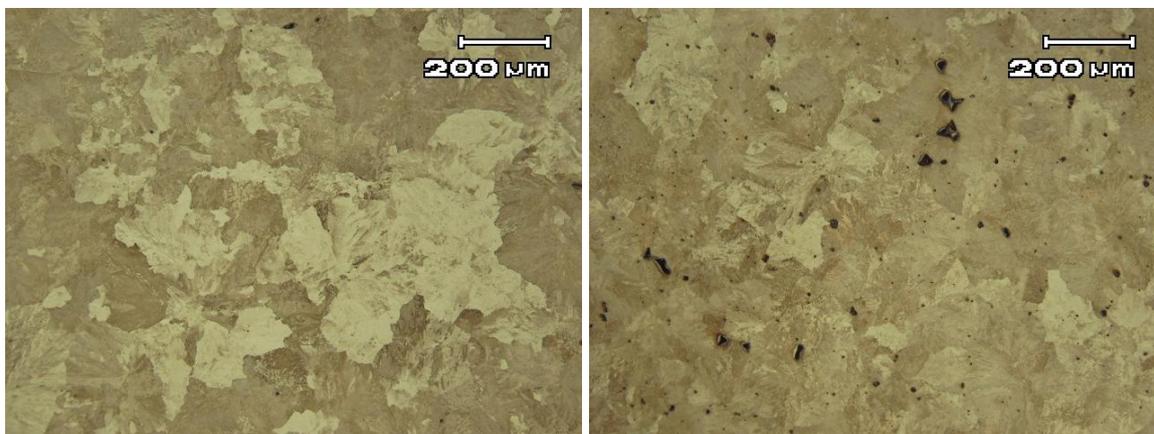


Figura 4.18 Imagem da amostra "D" em MO mostrando a microestrutura perlítica do MS. Observa-se também a presença de inclusão de óxidos globulares e microrechupes (imagem à direita).

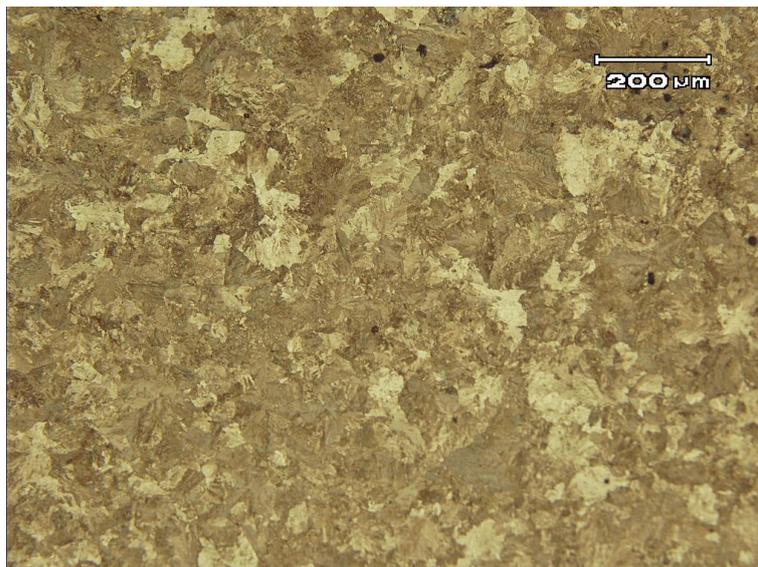


Figura 4.19 Imagem da amostra "D" em MO mostrando microestrutura perlítica na região da ZAC com pequena quantidade de porosidades e inclusões de óxidos globulares.

#### 4.5 Ensaio de Dureza

Os resultados dos ensaios de dureza estão mostrados na tabela 4.6. Para fins de comparação, a especificação de dureza utilizada neste ensaio, baseou-se na norma europeia prEN13674-1:2003, esta norma é aplicada para trilhos ferroviários com massa superior ou igual a 46 kg/m. Contudo, foi utilizada esta norma já que o trilho analisado (TR-45; 44,64 kg/m) apresenta composição química e características mecânicas semelhantes ao aço grau 260, o qual possui faixa de dureza brinell variando de 260-300 HB, segundo esta norma.

Observa-se que a diferença entre o valor médio de dureza entre o metal de solda (MS) e a zona afetada pelo calor (ZAC) é muito maior para a amostra A do que para as amostras B, C e D, sendo que a amplitude da diferença para a amostra A foi em torno de 70 HB, enquanto que nas demais amostras essa amplitude foi menor do que 10 HB.

Considerando-se a faixa de dureza especificada pela norma prEN13674-1:2003 (260-300 HB), constatou-se que a dureza média na região do MS para as amostras A, B e D atende as especificações desta norma. Apenas a amostra C apresentou dureza no MS fora desta especificação. Na região da ZAC, somente as amostras B e D apresentaram média de dureza conforme as especificações desta norma.

Vale ressaltar que a amostra A foi a que apresentou o pior desempenho no ensaio de fadiga por flexão. A elevada variação de dureza entre as regiões ZAC e MS aliada à forte porosidade comprometeram o desempenho em fadiga.

Tabela 4.6 Resultados dos ensaios de dureza Brinell.

<b>Amostra</b>	<b>Local</b>	<b>Ensaio 1</b>	<b>Ensaio 2</b>	<b>Ensaio 3</b>	<b>Ensaio 4</b>	<b>Ensaio 5</b>	<b>Média</b>
<b>A</b>	<b>MS</b>	255	285	272	260	260	266,4
	<b>ZAC</b>	321	345	337	345	329	335,4
<b>B</b>	<b>MS</b>	292	285	292	292	292	290,6
	<b>ZAC</b>	292	298	298	298	285	294,2
<b>C</b>	<b>MS</b>	313	321	298	313	298	308,6
	<b>ZAC</b>	313	321	313	321	321	317,8
<b>D</b>	<b>MS</b>	278	285	292	285	285	285,0
	<b>ZAC</b>	298	285	298	285	285	290,2

## 5.0 CONCLUSÕES

As análises realizadas para avaliar as características metalúrgicas e mecânicas de juntas soldadas pelo processo aluminotérmico, permitem as seguintes conclusões:

Os ensaios de fadiga comprovaram que três das quatro amostras analisadas apresentaram fratura antes de atingir o critério para aprovação do material (Suportar dois milhões de ciclos sem fraturar, segundo a norma ABNT NBR 11449).

Na análise da superfície de fratura observou-se na amostra A, a presença de porosidades provenientes da umidade da areia de vedação (moldes) e devido à incompleta eliminação dos gases durante o processo de soldagem. As porosidades reduzem significativamente a resistência mecânica das soldas por atuar como forte concentrador de tensões, comprometendo a resistência a fadiga.

Nas amostras B e C, observou-se que a fratura por fadiga teve início na Zona Afetada pelo calor, e não no Metal de solda, ambas pelo fenômeno de “Cold Laps”. Na amostra C notou-se a presença de marcas de sargento que indicam para a região de início da falha.

A análise química comprovou que apenas o silício, dentre os principais elementos (C, Mn, Si, P, e S), se apresenta fora das especificações segundo a norma NBR 7590. O silício no aço gera efeitos nas propriedades mecânicas como acréscimo de dureza, da resistência a tração, do limite de escoamento e prejudicando a resistência ao impacto e o alongamento.

Na análise micrográfica constatou-se microestrutura perlítica com porosidades, inclusões de óxidos globulares e microrechupes, decorrentes de parâmetros de soldagem inadequados. Observou-se, também, pequena quantidade de ferrita pró-eutetóide no contorno de grão próximo a região de início da falha por fadiga que, aliada a outros defeitos, pode ter contribuído para diminuir a resistência mecânica do trilho. Na amostra D, a presença de uma pequena quantidade de inclusões de óxidos globulares e microrechupes, não comprometeram o seu desempenho em fadiga.

Vale destacar, que a presença de microrechupes é prejudicial ao comportamento mecânico do trilho, pois atuam como potenciais concentradores de tensão e exerceram grande influência na vida em fadiga das soldas.

Considerando-se a faixa de dureza especificada pela norma européia prEN13674-1:2003 (260-300 HB), se constatou que a dureza média na região do metal de solda para as amostras A, B e D atende as especificações desta norma, apenas a amostra C apresentou dureza no metal de solda fora desta especificação. Na região da zona afetada pelo calor, apenas as amostras B e D apresentaram média de dureza conforme as especificações da norma.

## **6.0 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Estimar a vida em fadiga com base em parâmetros do material e do estado de tensões através da determinação da taxa de crescimento de defeitos e seus tamanhos críticos, a fim de prevenir a ocorrência de falhas;

Estudar outros tipos de defeitos associados às soldas aluminotérmicas;

Realizar análise de falha para estudar os micromecanismos de falha.

## 7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANTT - **Agência Nacional de Transportes Terrestres**. [www.antt.gov.br/carga/ferroviario/ferroviario.asp](http://www.antt.gov.br/carga/ferroviario/ferroviario.asp) - Acesso em 21 jul. 2010
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8108**: Ataque com Reativos Metalográficos em Ligas Ferrosas, 1983.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13284**: Preparação de Corpos-de-Prova para Análise Metalográfica, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 6506-1**: Materiais Metálicos – Ensaio de Dureza Brinell Parte 1: Método de Ensaio, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7590**: Trilhos “Vignole”, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11449**: Trilhos “Vignole”- Solda - Determinação da Resistência a Fadiga-Método de Ensaio, 1989.
- ABIFER - **Associação Brasileira da Indústria Ferroviária** -. <http://www.abifer.org.br/noticia.aspx>- Acesso em 27 ago. 2010.
- BESSEMER “**Fascinating facts about Henry Bessemer inventor of a process for the manufacture of steel**” <http://www.ideafinder.com/history/inventors/bessemer.htm> - Acesso em 27 de agosto de 2010
- BRACARENCE, A, Q. PHD. “**Disciplina: Processos de Soldagem: Aluminotermia**” UFMG, 2000
- DNIT - **Departamento Nacional de Infraestrutura dos Transportes**. [www.dnit.gov.br/ferrovias/historico](http://www.dnit.gov.br/ferrovias/historico) - Acesso em 26 jul 2010.
- FERREIRA, F. F; MICHEL, D. F. “**Disciplina: Infra Ferro-hidro-aero-dutoviária - Superestrutura Ferroviária: Trilhos**”. Departamento de Engenharia de Produção e Transportes – UFRGS. <[http://www.producao.ufrgs.br/arquivos/disciplinas/411\\_aula\\_6\\_trilhos.pdf](http://www.producao.ufrgs.br/arquivos/disciplinas/411_aula_6_trilhos.pdf)> - Acesso em 5 Set 2010.
- FERROVIAS – **Transportes** - <http://www.brasilecola.com/geografia/Ferrovias.htm>. Acesso em 12 Dez 2010.
- JORNAL DO COMÉRCIO - **Logística** - <http://jcrs.uol.com.br/site/noticia.php?codn=48069>. Acesso em 12 dez 2010.

LEAL, S.V., FIGUEIREDO, M.K., **Soldagem Aluminotérmica**. Centro Federal de Educação Tecnológica do Maranhão – CEFET - Departamento de Mecânica e Materiais São Luiz, 2006.

LAWRENCE, F. V. “**Improving the Fatigue Resistance of Thermite Railroad Rail Weldments, 2004**”. [http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/studies/idea/finalreports/highspeedrail/hsr-41final\\_report.pdf](http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/studies/idea/finalreports/highspeedrail/hsr-41final_report.pdf) - Acesso em 05 de Out. 2010.

MACEDO, B.F. **Estudo do Desgaste de Trilhos Ferroviários**. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2009.

MUTTON, P.J., ALVAREZ, E. F. **Failure Modes in Aluminothermic Rail Welds High Axle Load Conditions**. Engineering Failure Analysis 11. pp. 151-166, 2004.

PORTO, T. G. **PTR 2501 – Ferrovias**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004.

prEN13674-1:2003 “**Railway Applications - Track - Rail – Part 1 Vignole railway rails 46 Kg/m and above**”.

ROLDO, L. **Análise de Tensões Residuais em Trilhos Ferroviários**. Dissertação. PPGEM:UFRGS, 1998.

ROSA, J. S. C. **Avaliação de Solda Aluminotérmica em Ângulo**. Dissertação. DEMET:UFRGS, 2008

SCHNEIDER, E. L. **Análise da Vida Remanescente de Trilhos com Defeitos Transversais Desgastados em Serviço**”, Dissertação. PPGEM:UFRGS, 2005.

SILVA, A. A. M. **Caracterização Mecânica e Metalúrgica de Segmentos de Trilho Soldados pelo Processo THERMIT SOWOS**. Trabalho de Conclusão de Curso. DEMET:UFRGS, 1997.

SILVA, P. R. T. **Caracterização de Trilhos Ferroviários Quanto à Tenacidade à Fratura e Comportamento em Fadiga**. Dissertação. PPGEM :UFRGS, 1995.

SKYTTEBOL, A. et al. **Fatigue Crack growth in a Welded Rail Under the Influence of Residual Stresses**. Engineering Fracture Mechanics 72. pg 271-285, 2005.

THERMITH AUSTRÁLIA - **Welding Methods** - <http://www.thermit.com.au/brochures/weldingmethods.pdf> – Acesso em 12 Dez 2010.

WTIA - Welding Technology Institute of Austrália. “**Aluminothermic Welding Defects**”. <<http://www.wtia.com.au/pdf/TGN-R-04%20Aluminothermic%20weld%20defects.pdf>> Acesso em 19 ago. 2010.

ANEXO A: Imagens da variação microestrutural da amostra A.

