

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais  
PPGEM

AVALIAÇÃO DE SOLDA ALUMINOTÉRMICA EM ÂNGULO

**Julio César da Silva Rosa**

Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre, 2008

MINISTERIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais  
PPGEM

## AVALIAÇÃO DE SOLDA ALUMINOTÉRMICA EM ÂNGULO

JULIO CÉSAR DA SILVA ROSA  
Engenheiro Metalúrgico

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio grande do Sul (UFRGS), dentro do programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGEM), como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciências e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre, 2008

Esta dissertação (foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Ciências dos Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós Graduação).

Orientador: Prof. Dr. Afonso Reguly

Banca Examinadora:

Prof. Dr André Ronaldo Froelich (UNISINOS).

Prof. Dr. Inácio da Fontoura Limberger (UFSM).

Prof. Dr. José Antônio Esmerio Mazzaferro (UFRGS).

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann  
Coordenador do PPGEM

Dedicado à família Silva Rosa, em especial à Srta. Julia Rosa  
para quem este trabalho deve seguir como um exemplo  
em suas futuras aspirações acadêmicas.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus que me deu força, saúde e perseverança para enfrentar os desafios, as dificuldades inerentes à vida acadêmica e absorver conhecimentos nesta etapa.

À minha família Silva Rosa em especial às minhas avós, pela educação e cuidados a mim dispensados e a Srta. Julia Rosa por ser uma das forças motrizes deste trabalho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Afonso Reguly pelos esclarecimentos prestados durante a execução deste trabalho; ao coordenador do LAMEF-UFRGS Prof. Dr. Telmo Strohaecker pela oportunidade de fazer parte do LAMEF e adquirir valiosos conhecimentos técnicos.

Aos colegas do LAMEF que já trabalharam com trilhos e ao Grupo de Análise de Falhas (GAF-LAMEF) que me auxiliou nos procedimentos experimentais.

Ao Sr. Matthew Rehbein e sua esposa; à Sra. Taís Frankel pelo apoio durante a realização deste trabalho.

Ao Sr. Luiz Fernando Dambroz da empresa Dambroz pela ajuda prestada na confecção dos moldes.

Ao Eng. João Vitor Moka e ao Prof. Dr. André Froehlich que iniciaram os trabalhos de solda em ângulo nos trilhos.

Ao Sr. José Ribamar dos Santos Filho que foi o idealizador deste trabalho, o nosso reconhecimento.

## ÍNDICE ANÁLITICO

ÍNDICE ANÁLITICO .....	VI
<b>INDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>VII</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>XI</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>XII</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>6</b>
2.1 TRILHOS .....	6
2.1.1 Trilhos Perlíticos .....	9
2.1.2 Trilhos Bainíticos e Martensíticos.....	10
2.2 SOLICITAÇÃO EM TRILHOS.....	10
2.2.1 Esforços Primários.....	10
2.2.2 Esforços Secundários.....	11
2.2.3 Efeito do Carregamento Dinâmico nas Solicitações .....	15
2.3 SOLDAGEM ALUMINOTÉRMICA.....	15
2.3.1 Equipamentos de Soldagem .....	17
2.3.2 Procedimento de Soldagem .....	17
2.3.3 Propriedades da Solda Aluminotérmica .....	18
2.3.4 Propriedades de Fadiga das Soldas Aluminotérmicas.....	20
2.4 DEFEITOS DE SOLDAGEM.....	22
2.5 FALHAS EM SOLDAS ALUMINOTÉRMICAS .....	28
2.5.1 Fraturas Transversais.....	30
2.5.2 Fraturas Horizontais .....	30
2.6 MELHORIAS NO DESEMPENHO DE SOLDAS ALUMINOTÉRMICAS.....	31
<b>3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>34</b>
3.1 SOLDAGEM .....	35
3.2 ANÁLISE METALOGRÁFICA.....	38
3.2.1 Macrografia .....	38
3.2.2 Micrografia .....	38
3.3 ENSAIO DE DUREZA .....	38
3.4 ENSAIO DE FADIGA .....	39
3.5 ANÁLISE DE FALHA .....	40
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>42</b>
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>62</b>
<b>6. SUGESTAO PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>63</b>
<b>7. BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>64</b>

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Esquema mostrando exemplos da ocorrência do defeito canoamento em soldas aluminotérmicas ferroviárias. ....	3
Figura 1.2 – (a) Solda transversal. (b) Solda em ângulo. ....	4
Figura 1.3 – Exemplo da aplicação de solda em ângulo em tubulações petrolíferas (AFGHOU, 2004). ....	4
Figura 2.1 – Elementos básicos da via permanente. ....	6
Figura 2.2 – Desenho esquemático mostrando em perspectiva a geometria de um trilho Vignole. (SKYTTEBOL, 2005). ....	7
Figura 2.3 – Dimensões de um trilho ABNT TR-68 similar ao AREMA 136RE. Dimensões em mm. ....	7
Figura 2.4 – Variação da dureza na superfície do trilho em função do tempo devido ao encruamento. MGT é sigla em inglês para milhões de toneladas brutas. Adaptado de (MARICH, 1994). ....	9
Figura 2.5 - Variação no espaçamento lamelar da perlita de acordo com o tipo de aço. ((a): Microestrutura de aço – trilho ao carbono; b): Microestrutura de aço – trilho microligado; (c): Microestrutura de aço-trilho tratado termicamente (MARICH, 1994). ....	9
Figura 2.6 – Configuração das solicitações primárias impostas ao trilho. Adaptado de (ZERBST, 2005). ....	11
Figura 2.7 – Perfil de tensões residuais para um trilho submetido a tratamento térmico HH (JEONG, 1996). ....	13
Figura 2.8 – Perfil de tensões residuais para um trilho novo standard novo e depois de usado (ZERBST, 2005). ....	13
Figura 2.9 – Perfil de tensões residuais longitudinais em soldas aluminotérmicas. A) no centro da solda; B) na zona afetada pelo calor (ZAC) (WEBSTER, 1997). ....	14
Figura 2.10 - Perfil de tensões residuais verticais em soldas aluminotérmicas. A) no centro da solda; B) na zona afetada pelo calor (ZAC) (WEBSTER, 1997). ....	15
Figura 2.11 - Configuração típica do conjunto molde-cadinho para a soldagem aluminotérmica (DA SILVA, 1998). ....	17
Figura 2.12 – Equipamentos utilizados na soldagem aluminotérmica. (KLL) ....	17
Figura 2.13 – Perfis de dureza longitudinal ao longo da solda (MARICH, 2005). ....	19
Figura 2.14 – Caracterização metalográfica de uma solda aluminotérmica. (a) macroestrutura. (b) metal base. (c) linha de fusão (d) metal de solda. (e) zona afetada pelo calor (ASM METALS HANDBOOK, 1998). ....	20
Figura 2.15 – Comparação entre o desempenho de fadiga de soldas aluminotérmicas, soldas por centelhamento e trilhos. (SUN, 2002) ....	21
Figura 2.16 – Desempenho em fadiga para três diferentes geometrias do colar de solda (KRISTAN, 2005). ....	21
Figura 2.17 – Tipos de defeitos encontrados em soldas aluminotérmicas ....	22
Figura 2.18 – Black hole no patim (WTIA, 2006). ....	23
Figura 2.19 – Contração da solda na região entre a alma e o patim (WTIA, 2006). ....	24
Figura 2.20 – Exemplo de inclusão de areia (WTIA, 2006). ....	25

Figura 2.21 – Solda com falta de fusão no patim do trilho. À direita, ainda é possível observar as marcas do processo de corte durante a preparação da junta (WTIA, 2006).....	25
Figura 2.22 - Diagrama esquemático de um corte horizontal junto ao colar de solda na alma mostrando bordamento da solda e falta de fusão (KRISTAN, 2004).....	26
Figura 2.23 – Exemplo de solda com o defeito de bordamento Também é observada incrustação de material cerâmico no colar da solda. ....	26
Figura 2.24 – Soldas com forte porosidade (WTIA, 2006).....	27
Figura 2.25 – Aspecto visual do defeito canoa (DUVEL, 2005). ....	27
Figura 2.26 – Distribuição dos locais de falha em uma ferrovia de carga pesada (DUVEL, 2005).....	29
Figura 2.28 – Fratura Transversal (MUTTON, 2004) e (DUVEL, 2005).....	30
Figura 2.29 – Fratura Horizontal (DUVEL, 2005).....	31
Figura 2.30 - Diagramas mostrando a seção transversal do colar de solda com suas características geométricas (KRISTAN, 2004). ....	32
Figura 3.1 – Fluxograma experimental utilizado neste trabalho. ....	34
Figura 3.2 – Alinhamento e colocação do molde. ....	36
Figura 3.3 – Fotografias mostrando a instalação e a geometria do molde utilizado na solda em ângulo. ....	36
Figura 3.4 - Fotografias mostrando as etapas de selamento e pré-aquecimento. ....	36
Figura 3.5 – À esquerda, ignição da reação aluminotérmica. À direita, solidificação da solda. ....	37
Figura 3.6 – Fotografias mostrando o acabamento e perfil final da solda em ângulo.....	37
Figura 3.7 – Esquema de um corte longitudinal na solda mostrando as regiões de análise metalográfica no boleto (EN14730-1:2003).....	38
Figura 3.8 – Desenho esquemático mostrando a região de avaliação da dureza longitudinal da solda (EN14730-1:2003). ....	39
Figura 3.9 – Perfil de dureza genérico (EN14730-1:2003). ....	39
Figura 3.10 – Fotografias da máquina de ensaios MTS utilizada nos ensaios de fadiga. ....	40
Figura 3.11 – À esquerda, configuração da solda na máquina de ensaio. À direita, fotografia do trilho montado para o ensaio. ....	41
Figura 4.1 – Macrografia da Amostra T1. ....	42
Figura 4.2 – À esquerda, macrografia da amostra S1. À direita, macrografia da amostra S2... ..	42
Figura 4.3 – Macrografia da amostra S3. ....	43
Figura 4.4 - Macrografia da amostra S6. ....	43
Figura 4.5 – Microestrutura perlítica na região do boleto da amostra S1. (a) microestrutura do MS. (b) microestrutura na ZAC.....	44
Figura 4.6 – Microestrutura perlítica na região do boleto da amostra S2. (a) microestrutura do MS. (b) microestrutura na ZAC.....	44
Figura 4.7 – Microestrutura perlítica na região do boleto da amostra S3. (a) microestrutura do MS. (b) microestrutura na ZAC.....	44
Figura 4.8 - Microestrutura perlítica na região do boleto da amostra T1. (a) microestrutura do MS. (b) microestrutura na ZAC.....	45
Figura 4.9 - À esquerda, microestrutura perlítica na região da alma da amostra S1. À direita, microestrutura perlítica na região da alma da amostra S2. Nas duas micrografias é possível observar a presença de defeitos internos como microrechupes e porosidades. ....	45
Figura 4.10 - À esquerda, microestrutura perlítica na região da alma da amostra S3. À direita, microestrutura perlítica na região da alma da amostra T1. Nas duas micrografias é possível observar a presença de defeitos internos como microrrechupes e porosidades.....	46
Figura 4.11 – Variação do tamanho da ZAC visual e medida pela norma EN14730-1:2003 em relação a dureza média da ZAC.....	47
Figura 4.12 – Perfis de dureza das mostras S1 e S2. ....	47
Figura 4.13 - Perfis de dureza das amostras S3 e T1.....	48

Figura 4.14 – Perfis de dureza. Amostras grupo 1. ....	48
Figura 4.15 – Perfis de dureza das amostras S5 e S6. ....	48
Figura 4.16 – Perfis de dureza. Amostras do grupo 2. ....	49
Figura 4.17 - Variação do tamanho da ZAC visual e medida pela norma EN14730-1: 2003 em relação à dureza média da do MS. ....	49
Figura 4.18 – Resultados dos ensaios de fadiga. ....	51
Figura 4.19 – Curvas SxN dos ensaios de fadiga comparadas com a norma ABNT NBR 11449. ....	52
Figura 4.20 – Curvas S <sub>m</sub> xN comparando os resultados dos ensaios de fadiga das soldas em ângulo com a norma ABNT NBR 11449. ....	53
Figura 4.21 – Curvas ΔSxN comparando os resultados dos ensaios de fadiga das soldas em ângulo com a norma ABNT NBR 11449 e resultados de soldas transversais. ....	53
Figura 4.22 - Curvas SxN comparando os resultados dos ensaios de fadiga das soldas em ângulo com dados de soldas transversais. ....	54
Figura 4.23 – Comparação entre a curva SxN de projeto da norma BSI 7608 classe F2 (curva média) e os resultados das solda em ângulo de 30 e 45 graus. ....	54
Figura 4.24- Comparação entre a curva SxN de projeto da norma BSI 7608 classe F2 (curva média), requisitos da norma ABNT NBR 11449 e os resultados das solda em ângulo. ....	55
Figura 4.25 – Fotografias da superfície de fratura da amostra S1. À direita, detalhe da região de início da falha. ....	57
Figura 4.26 - Fractografias da amostra S1 obtidas em MEV. À esquerda, observa-se o micromecanismo de clivagem, a região da falta de fusão e material incrustado no colar da solda. À direita, além da clivagem observa-se a presença de dimples e inclusões de escória. ....	57
Figura 4.27 – Espectros de microsonda EDS. À esquerda, espectro obtido na incrustação mostrada na figura 47 revelando a presença de material cerâmico proveniente do molde. À direita, espectro das inclusões observadas na Figura 4.25 indicando a presença de inclusões de escória (alumina). ....	58
Figura 4.28 – Micrografia da região de início da falha da amostra S1. Observa-se a presença de uma linha de ferrita e ferrita nos contornos perlíticos. ....	58
Figura 4.29 - Fotografias da superfície de fratura da amostra S2. À direita, detalhe da região de início da falha e a presença do defeito tipo bordamento da solda. ....	58
Figura 4.30- À esquerda, fractografia obtida na região de início da falha da amostra S2 onde se observa, além do micromecanismo de clivagem, a presença de microporosidades e inclusões. À direita, espectro de inclusões de aluminossilicatos presentes na região de início da falha. ....	59
Figura 4.31 – Micrografias obtidas junto ao início da falha da amostra S2 onde se verifica a presença de ferrita em contornos perlíticos e ferrita livre. ....	59
Figura 4.32 - Fotografias da superfície de fratura da amostra S3. À direita, detalhe da região de início da falha e a presença do defeito tipo bordamento da solda. ....	60
Figura 4.33 – À esquerda, fractografia obtida em MEV da amostra S3 indicando a presença de clivagem e dimples. À esquerda, espectro de microsonda EDS indicando a presença de material cerâmico no início da falha. ....	60
Figura 4.34 – Micrografias obtidas na região de início da falha da amostra S3 onde se observa a presença de ferrita livre e ferrita nos contornos perlíticos. ....	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Situação do transporte ferroviário na matriz modal no Brasil e no estado de São Paulo (FIESP, 2007).....	2
Tabela 2 - Classificação de trilhos segundo IHHA (SCHNEIDER, 2005).....	10
Tabela 3 – Propriedades mecânicas da solda aluminotérmica. ....	19
Tabela 4 – Tipos de defeitos de soldagem.....	22
Tabela 5 – Sugestão de parâmetros de soldagem para evitar defeitos de natureza térmica (CHEN, 2006).....	23
Tabela 6 – Grupos de amostras utilizadas neste trabalho.....	34
Tabela 7 – Composição química dos trilhos utilizados. ....	35
Tabela 8 – Propriedades mecânicas dos trilhos utilizados. ....	35
Tabela 9 – Composição química das soldas analisadas neste trabalho. ....	37
Tabela 10 – Parâmetros do ensaio de Fadiga. ....	41
Tabela 11 – Resultados dos ensaios de dureza. ....	47
Tabela 12 – Resultado do ensaio de dureza em escala Brinell.....	50
Tabela 13 – Resultados dos ensaios de fadiga.....	50

## RESUMO

Este trabalho analisou o desempenho em fadiga de dois grupos de soldas aluminotérmicas. As soldas representam uma inovação ao processo por possuírem um ângulo de 30 e 45° em relação à seção transversal do trilho. A avaliação das soldas foi realizada seguindo recomendações de normas nacional e internacional de soldagem de trilhos e projeto para componentes submetidos a carregamentos cíclicos. As normas utilizadas foram: NBR 11449 standard - Trilho “Vignole” - Solda - Determinação da resistência à fadiga EN 14730-1:2003 Railway Applications – Track Welding of Rails - Part 2.1. Approval of Aluminothermic Welding Processes e BSI 7608:1993 - BSI 7608:1993 – “Code of Practice for Fatigue Design and Assessment of Steel Structures”. A análise das soldas compreendeu ensaio de fadiga em quatro pontos, análise metalográfica, ensaio de dureza e análise de falhas.

As soldas com ângulo de 45 graus apresentaram melhor desempenho do que as juntas com ângulo de 30 graus. Para os dois ângulos, os resultados dos ensaios de fadiga são iguais ou superiores em comparação com soldas transversais ensaiadas em condições similares. A nova geometria da solda atende as exigências da norma nacional, ainda que, defeitos superficiais do tipo falta de fusão e bordamento da solda (*flashing/finning*) tenham diminuído o desempenho das juntas aluminotérmica em ângulo. As soldas possuem microestrutura e geometria recomendadas. O processo produz soldas com ZAC estreitas, o que confirma a vantagem do processo no controle de defeitos do tipo canoamento nas condições de serviço das ferrovias de carga pesada.

O processo de solda aluminotérmica em ângulo possui grande potencial para se tornar um novo método de soldagem aplicável em ferrovias de carga pesada. Algumas modificações nos procedimentos de soldagem e material de consumo, contudo, devem ser realizadas para aumentar a vida em fadiga das soldas.

## ABSTRACT

This work analyzed the fatigue performance of two aluminothermic welds groups. The welds represent an innovation in process because they utilize a 30 and 45 degree angle joint. The welding evaluation was performed according to recommendations from NBR 11449 standard - Trilho “Vignole” - Solda - Determinação da resistência à fadiga (Fatigue resistance evaluation) and international standards EN 14730-1:2003 Railway Applications – Track Welding of Rails - Part 2.1. Approval of Aluminothermic Welding Processes and BSI7608:1993 - BSI 7608:1993 – “Code of Practice for Fatigue Design and Assessment of Steel Structures”. The welding analysis included: four points bending fatigue tests, metallographical analysis, hardness test and failure analysis.

The 45 degree angle joint shown better performance than 30 degree. For both geometries the fatigue tests results are similar or superior in comparison to conventional welding found in literature. The new joint design fit the brazilian fatigue requirements, although superficial welding defects of the flashing/finning and lack of fusion type have diminished the welds performance. The microstructure and weld profile are as recommended. This new approach to welding process produces a narrow HAZ, which is advantageous to controlling defects such as weld batter effect in the weld profile during service in heavy haul railroads.

Aluminothermic angle welding has great potential to be a new welding technique applicable to group maintenance of heavy haul railroads. However, some improvements in the welding procedure, mold materials and design should be made to increase the fatigue life of the angle welding technique.

## 1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento do transporte ferroviário tem dado importantes contribuições para os progressos tecnológico e econômico mundial. Impulsionada pela revolução industrial uma densa rede ferroviária foi espalhada pela Europa e pelos Estados Unidos a partir de 1840. Dentro de poucas décadas as ferrovias se tornaram um sistema de transporte bastante vantajoso apresentando contínuos aumentos no frete de mercadorias e no deslocamento de passageiros.

No Brasil, o sistema ferroviário foi introduzido na metade final do século XIX incentivado pela indústria do café durante o império. Praticamente todo o sistema era estatal. No entanto, a falta de estratégias para o setor culminou com a sua decadência a partir de 1960, o que incentivou a privatização da rede ferroviária federal brasileira para o transporte de cargas em 1996.

No processo de privatização cerca de 26 mil quilômetros de ferrovias foram divididos em seis grandes malhas ferroviárias. Os direitos de exploração das vias foram concedidos por 30 anos para sete empresas. As concessionárias se especializaram no serviço de logística transportando, principalmente, minérios, grãos e produtos siderúrgicos, que juntos correspondem a mais da metade da carga transportada (SILVA, 2000). Além destes clientes tradicionais um novo conjunto de produtos tem tirado vantagens do transporte ferroviário, como: combustíveis, carnes, bebidas, enlatados e produtos químicos.

O transporte ferroviário constitui-se em um dos meios mais eficazes e econômicos no deslocamento de grandes volumes de carga. Em relação ao transporte rodoviário a utilização pode gerar uma economia entre 40 e 50% nos custos dos fretes (quando utilizado sistema bimodal trem e navio) e uma redução de até 7% no preço ao consumidor dos produtos transportados (BEER, 2006). A

Tabela 1 mostra a situação das ferrovias na matriz de transporte no Brasil e no estado de São Paulo (FIESP, 2007).

Como grande produtor de *commodities* minerais e agrícolas, o Brasil possui uma das três maiores ferrovias do mundo. Atualmente, são 29 mil quilômetros em ferrovias que interligam as diversas regiões do país. Destaca-se entre essas, a Estrada de Ferro Carajás (EFC) com uma extensão de 892 km de linha singela que liga o interior dos estados do Pará e Maranhão aos principais portos da região. Conecta-se à Companhia Ferroviária do Nordeste (CFN), à Ferrovia Norte-Sul, ao Terminal Marítimo de Ponta da Madeira (São Luís), ao Porto

de Itaqui (São Luís). Além de minério de ferro e manganês, extraídos da mina de Carajás, a ferrovia transporta diversos produtos como ferro gusa, fertilizantes, combustíveis, cimento, bebidas, veículos, produtos agrícolas, com destaque para a soja produzida no sul do Maranhão e nos estados do Piauí, Pará e Mato Grosso. A EFC é uma ferrovia moderna de alto desempenho, construída com padrões técnicos atualizados, sendo uma das ferrovias com melhores índices de produtividade do mundo. Nela também são registradas as maiores velocidades operacionais entre as ferrovias brasileiras (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE, 2007).

Tabela 1 – Situação do transporte ferroviário na matriz modal no Brasil e no estado de São Paulo (FIESP, 2007).

Modal	Brasil (%)	São Paulo (%)
Rodoviário	59,0	93,1
Ferrovário	24,0	5,3
Aquaviário	13,0	0,5
Aeroviário	0,3	0,3
Dutoviário	3,7	0,8

Tendências atuais apontam que o volume de cargas transportadas nos trens deve triplicar nos próximos anos, serão mais trens trafegando com uma quantidade cada vez maior de mercadorias. Isto significaria uma injeção de R\$ 15 bilhões/ano no PIB (Produto Interno Bruto) brasileiro e uma queda anual de R\$ 10 bilhões nos custos de transporte no país (BEER, 2006). Ainda haveria a diminuição de 36 mil caminhões/dia nas estradas brasileiras, propiciando maior conservação das rodovias e diminuição na quantidade de emissões gasosas, o que é justificável levando-se em conta as atuais discussões sobre questões ambientais. A utilização de transporte bimodal seriam alternativas interessantes para o mercado.

Os trilhos estão para a ferrovia tal como a estrada para o sistema rodoviário. Estas estruturas são perfis de aço laminado, responsáveis por guiar as rodas dos trens na estrada de ferro, e estão sujeitas ao desgaste, surgimento de defeitos e falhas, devido as severas condições de carregamento impostas no contato roda-trilho. As avarias estão relacionadas às características mecânicas e metalúrgicas dos trilhos, além de dependerem das condições operacionais e de manutenção de cada ferrovia.

Para serem assentados na via os trilhos precisam ser soldados, dando origem ao termo linhas continuamente soldadas (Continuous Welded Rails – CWR). Um dos processos utilizados na união destes elementos é a soldagem aluminotérmica. Este processo é realizado na via, sujeito à intempéries e contratempos das condições de campo, geralmente em regiões inóspitas e carentes de recursos técnicos.

Embora o processo produza soldas com desempenho aceitável, as juntas soldadas por aluminotermia constituem-se no ponto fraco da ferrovia (FRY, 1996). Isto se deve a sua natureza metalúrgica que lhe confere propriedades mecânicas inferiores às do trilho, e a suscetibilidade de defeitos de execução. As disparidades entre a resistência mecânica da junta soldada e os trilhos justificam que o projeto da estrutura ferroviária seja elaborado com base no comportamento da solda (DUART, 2005), visto que sua integridade constitui-se em um limitador para as ferrovias de carga pesada (*heavy haul*) quando a relação carga/eixo se aproxima de 40 toneladas (MUTTON, 2004).

Para prevenir falhas e acidentes devido a fratura da solda e diminuir os custos de manutenção, a análise do comportamento em fadiga deste processo de soldagem deve suscitar grande interesse da indústria ferroviária (SKYTTEBOL, 2005) uma vez que técnicas e procedimento que propiciem melhorias no desempenho das soldas aluminotérmicas podem contribuir de maneira significativa para a redução de defeitos e falhas, aumentando a confiabilidade e a produtividade da ferrovia.

Um defeito de grande preocupação nas ferrovias de carga pesada é a formação de uma depressão junto às soldas aluminotérmicas, o canoamento (conhecido como “*weld batter*”). O defeito surge devido as diferenças de dureza entre o metal de solda (MS) e a zona afetada pelo calor (ZAC). A pressão de contato da roda faz com que haja uma deformação (afundamento) na região do MS ou da ZAC, que possui menor dureza, criando a forma de uma canoa no perfil da solda, como mostra a Figura 1.1. A passagem da roda por este tipo de defeito acarreta em um violento impacto na estrutura, gerando tensões adicionais, não previstas em projeto, que podem levar a fratura, tanto da solda, quanto da roda, além de eixos e vagões, ou seja, um “simples” defeito na solda é capaz de onerar todo o material rodante e permanente da ferrovia.

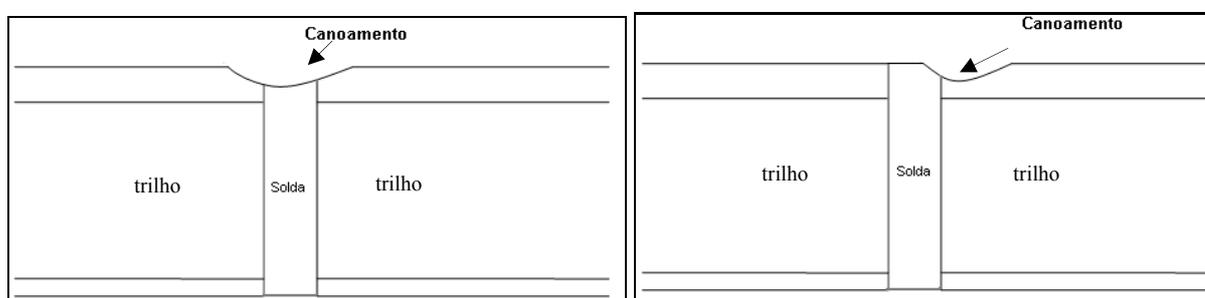


Figura 1.1 – Esquema mostrando exemplos da ocorrência do defeito canoamento em soldas aluminotérmicas ferroviárias.

Este trabalho avalia a substituição da solda aluminotérmica transversal por uma junta de solda em ângulo, como mostra a Figura 1.2. O incentivo para este estudo vem da indústria petrolífera, que durante anos presenciou fraturas em juntas a topo de tubulações utilizadas na

extração de petróleo em alto-mar. Na década de oitenta foi introduzido o processo conhecido como “bias welding” que consiste no corte em diagonal de chapas para a realização de soldas com um ângulo de 45°. Desta maneira se conseguiu uma distribuição da ZAC como uma espiral ao longo das tubulações, o que proporcionou um grande aumento no desempenho frente às solicitações de fadiga daquelas estruturas. (AFGHOU, 2004). A Figura 1.3 ilustra um exemplo da aplicação da solda em ângulo em tubulações.

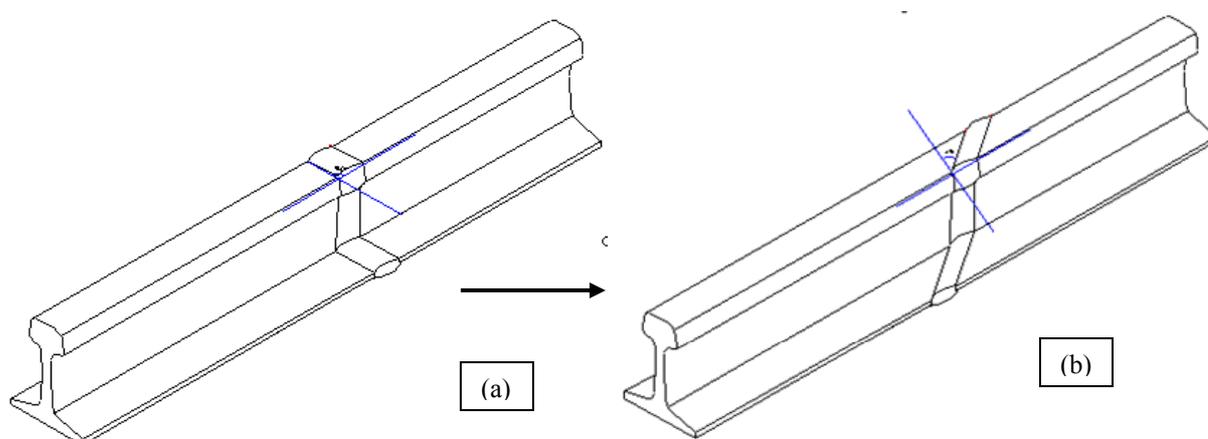


Figura 1.2 – (a) Solda transversal. (b) Solda em ângulo.

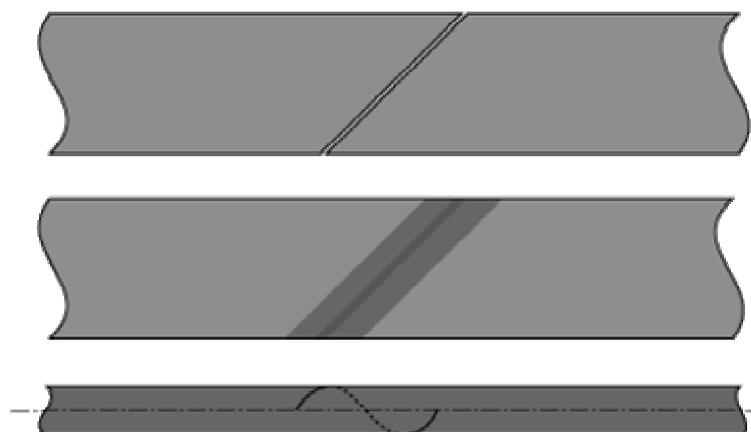


Figura 1.3 – Exemplo da aplicação de solda em ângulo em tubulações petrolíferas (AFGHOU, 2004).

Este trabalho analisa o comportamento em fadiga das juntas com ângulo de 30 e 45 graus, em trilhos tratados e trilhos do tipo “standard”. As características mecânico-metalúrgicas da solda são avaliadas segundo recomendações da norma brasileira ABNT NBR 11449 – “Trilho Vignole - Solda - Determinação da resistência à fadiga” e das normas internacionais EN

14730-1:2003 “Railway Applications Track Welding of Rails - Part 2.1 Approval of Aluminothermic Welding Processes” e BSI 7608:1993 – “Code of Practice for Fatigue Design and Assessment of Steel Structures”.

Inicialmente é feita uma revisão bibliográfica que aborda tópicos relevantes à temática deste trabalho e para o desenvolvimento do mesmo. A seguir são apresentados o procedimento experimental, resultados, discussões e as conclusões deste estudo.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Trilhos

Os trilhos são elementos da via permanente, fabricados em aço com comprimentos de 12 a 36m, sobre os quais trafegam e são guiadas as rodas dos trens - locomotivas, carros e vagões. Os trilhos são assentados sobre os dormentes e transferem para estes as solicitações do material rodante da via. Possuem ainda a função de sustentação e condução dos trens, apresentando características estruturais de uma viga extensa e contínua. A Figura 2.1 mostra alguns elementos básicos da via permanente.

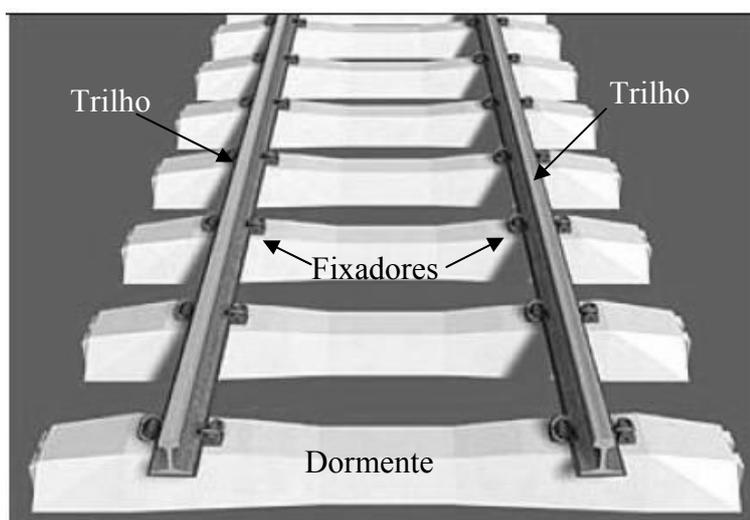


Figura 2.1 – Elementos básicos da via permanente.

Atualmente, o perfil mais utilizado é o do tipo *Vignole*, cuja geometria proporciona maior resistência à flexão, pois há maior concentração de massa em regiões onde as solicitações são maiores, o que permite também a economia de material.

O perfil do trilho *Vignole* mostrado na Figura 2.2 possui três regiões distintas: boleto, patim e a alma. O boleto corresponde à parte superior do trilho, sendo sujeito ao atrito e desgaste, deve ter quantidade considerável de massa concentrada a fim de se minimizar os efeitos contato roda-trilho. O patim é a região inferior do trilho, sendo responsável pela estabilidade do componente e transferência dos esforços para os dormentes. A alma é a parte mais fina do trilho localizada entre o boleto e o patim. A altura e espessura da alma influenciam o momento de inércia, resistência e rigidez transversal da seção. A Figura 2.3 mostra as dimensões de um trilho ABNT -TR-68 (similar ao AREMA 136RE).



Devido as suas condições de serviço os trilhos devem possuir propriedades mecânicas e metalúrgicas que reúnam as seguintes características (ROLDO, 1998):

- Elevados limites de resistência mecânica aliada a boa tenacidade.
- Alta dureza e resistência ao desgaste.
- Resistência à fadiga de contato e a propagação de trincas pré-existentes.
- Boa tenacidade à fratura
- Baixa suscetibilidade à fragilização por hidrogênio e adequada soldabilidade.

Os progressos da indústria metalúrgica têm proporcionado constantes melhorias na produção de trilhos com variadas composições químicas, cujas propriedades mecânicas variam de acordo com os tratamentos térmicos empregados e a microestrutura deles resultante. Entre os tratamentos térmicos empregados para trilhos destacam-se:

- Boleto Endurecido (Head Hardned – HH)
- Boleto Profundamente Endurecido (Deep Head Hardened – DHH)
- Trilho completamente tratado (Full Heat Treated – FHT)

Como indicado, a diferença nos tratamentos térmicos dos trilhos esta relacionado com a profundidade do endurecimento do boleto. Para os trilhos HH a profundidade da região endurecida é de aproximadamente 30 mm. No trilho DHH a dureza máxima ocorre a uma profundidade de até 45 mm, enquanto no trilho FHT toda a seção transversal é tratada termicamente. Os trilhos DHH e FHT possuem um perfil mais gradual para a diminuição de dureza superficial do que os trilhos HH, no entanto os tratamentos térmicos proporcionam valores de dureza similares em profundidades entre 5-10 mm (MARICH, 1994) A dureza superficial do trilho pode variar de maneira significativa ao longo da vida útil deste componente devido ao encruamento promovido pelo contato roda trilho, como mostra a Figura 2.4. Quanto à natureza metalúrgica os trilhos podem ser perlíticos, bainíticos ou martensíticos.

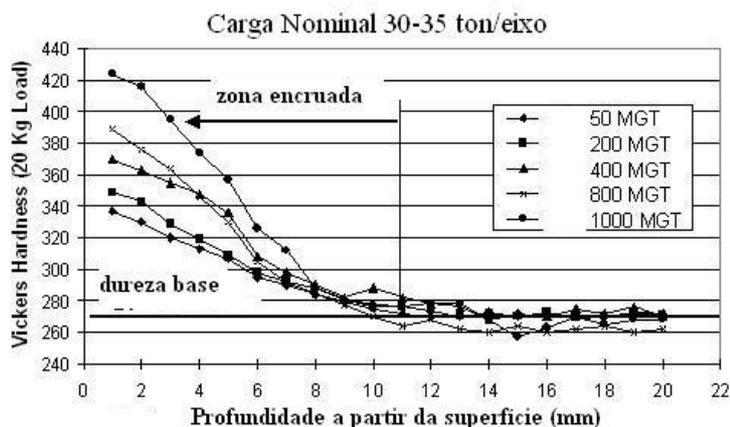


Figura 2.4 – Variação da dureza na superfície do trilho em função do tempo devido ao encruamento. MGT é sigla em inglês para milhões de toneladas brutas. Adaptado de (MARICH, 1994).

### 2.1.1 Trilhos Perlíticos

O material dos trilhos perlíticos são aços com teor de carbono entre 0,6 e 0,9% e adições de Mn e Cr. Estes aços apresentam microestrutura totalmente perlítica sem ferrita livre, alcançando resistência de 900-1200MPa e dureza entre 260 e 290HB na condição de como produzidos. A perlita fina confere maior resistência mecânica e ao desgaste para os trilhos quando possui pequenos espaçamentos interlamelares, além disso, a microestrutura é submetida a um alto grau de encruamento devido ao contato roda-trilho. A Figura 2.5 mostra a variação dos espaços interlamelares da perlita de acordo com o tipo e condição do material. Estes trilhos são bastante utilizados em seções retas da via, onde a vida útil do trilho é governada principalmente por desgaste. Adições de Nb, V e Mo criam uma nova classe de trilhos perlíticos, os microligados, com resistência de aproximadamente 1300MPa e dureza de até 400HB, no entanto tratamentos térmicos com resfriamento acelerado proporcionam maior refinamento na estrutura da perlita, dando maior ductibilidade a esses aços (SCHNEIDER, 2005).

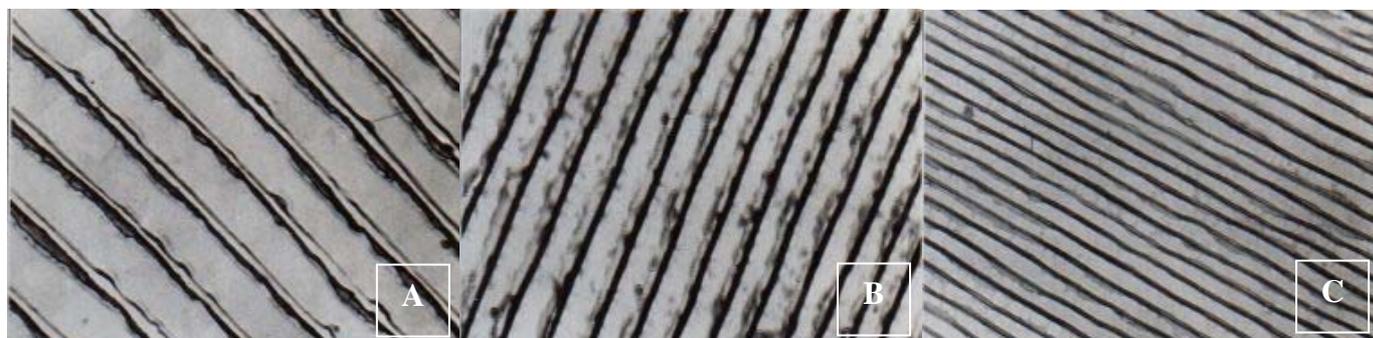


Figura 2.5 - Variação no espaçamento lamelar da perlita de acordo com o tipo de aço. ((a): Microestrutura de aço – trilho ao carbono; b): Microestrutura de aço – trilho microligado; (c): Microestrutura de aço-trilho tratado termicamente (MARICH, 1994).

### 2.1.2 Trilhos Bainíticos e Martensíticos

Os trilhos bainíticos possuem baixo teor de carbono (0,02-0,4%) com significativas adições de Mn e Si, além de Cr, Mo, Ni e B. A resistência mecânica dos trilhos bainíticos está entre 820-1400 MPa, com superior tenacidade a fratura e resistência a propagação de defeitos. Estes trilhos são utilizados, preferencialmente, em vias de alta velocidade ou em curvas de ferrovias para o transporte de cargas pesadas. Os trilhos martensíticos exibem boa resistência ao impacto e maior capacidade de encruamento com satisfatória resistência à fadiga. Entretanto, os trilhos bainíticos e martensíticos geralmente possuem menor ductilidade do que os trilhos perlíticos e a utilização destes materiais em ferrovias de cargas pesadas ainda esta em estudo (AGLAN, 2004).

A International Heavy Haul Association (IHHA) classifica os trilhos de acordo com a dureza e condição metalúrgica, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação de trilhos segundo IHHA (SCHNEIDER, 2005)

Trilhos	Tratamento Térmico	Dureza (HB)
Standard	Não	Até 340
Premium	Sim	341-388
Super Premium	Sim	Acima de 388

### 2.2 Solicitação em Trilhos

A análise das solicitações que incidem sobre os trilhos é considerada bastante complexa. A abordagem deve levar em conta o processo de fabricação dos trilhos, parâmetros de operação da via (carga, velocidade, sentido de tráfego), localização do trilho (reta ou curva) e, inclusive, as variações climáticas no local da via – férrea. Os trilhos são submetidos a esforços primários e secundários (ZERBST, 2005).

#### 2.2.1 Esforços Primários

Os esforços primários são avaliados com base na teoria das vigas, trabalho clássico desenvolvidos por Timoshenko e Langer (TIMOSHENKO, 1932) que considera trilho como uma viga contínua em uma fundação elástica. Assim, o carregamento da roda é aplicado no trilho como um momento fletor  $M_b$ , tensão normal  $\sigma_n$  e uma pressão Hertziana,  $p$ . O momento fletor surge devido à carga estática do eixo ferroviário, sendo dinamicamente

multiplicada pelo movimento do trem e flutuações na superfície de contato roda-trilho. A tensão normal é produto de irregularidades na via e das etapas de aceleração e frenagem do trem (ZERBST, 2005). A Figura 2.6 mostra esquematicamente a configuração das solicitações primárias nos trilhos.

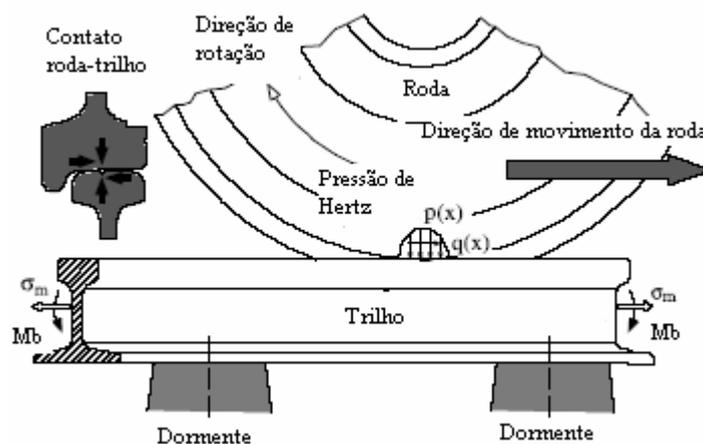


Figura 2.6 – Configuração das solicitações primárias impostas ao trilho. Adaptado de (ZERBST, 2005).

Ainda considerando trabalho de Timoshenko, Orringer (ORRINGER, 1995) sugere que uma carga vertical  $P$  cria uma força cortante e um momento fletor estimado por:

$$V = \frac{-P}{2} \exp(-\beta x) \cos \beta x \quad \text{Eq. 1}$$

$$M_b = \frac{P}{4\beta} \exp(-\beta x) (\cos \beta x - \text{sen} \beta x) \quad \text{Eq. 2}$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}} \quad \text{Eq. 3}$$

onde  $x$  é a distância do ponto de contato roda-trilho até o ponto de interesse para o cálculo,  $k$  é o módulo elástico da fundação e  $EI$  é a rigidez flexional.

### 2.2.2 Esforços Secundários

Aos esforços primários são adicionados os esforços secundários. As tensões residuais e térmicas constituem-se em solicitações secundárias impostas ao trilho e devem ser consideradas nos cálculos para a avaliação da integridade estruturas dos trilhos continuamente soldados (Continuos Welded Rails - CWR).

### Tensões Térmicas

As variações de temperatura e condições climáticas sazonais na via podem estar entre -5 e 40, nas condições brasileiras e -40 e 40°C no continente europeu (SKYTTEBOL, 2005) essas mudanças induzem deformações no material do trilho, o que devido à incapacidade de contração e alongação na via resultam em tensões térmicas que podem ser estimadas pela equação 4.

$$\sigma_{th} = E\alpha (T_n - T) \quad \text{Eq. 4}$$

Onde E é o módulo de elasticidade,  $\alpha$  é o coeficiente de dilatação, T é a temperatura de serviço do trilho e  $T_n$  é temperatura neutra livre de tensões, contudo Kish, 1987 citado por (JEONG, 1996) mostra que o valor de  $T_n$  não é uma constante, pois varia ciclicamente, com tendência de queda, de acordo com as variações climáticas do local. As tensões térmicas são compressivas em temperaturas acima de  $T_n$  e tornam-se trativas em climas frios, quando a temperatura cai abaixo de  $T_n$ , o que é mais determinante no estudo do comportamento de trincas de fadiga (JEONG, 1996). A maioria das falhas em trilhos nas vias européias ocorre em temperaturas próximas a 0° C, nesta faixa altas tensões trativas são combinadas à baixa tenacidade do material dos trilhos (ZERBST, 2005). A frenagem também induz tensões térmicas devido aos ciclos térmicos gerados pelo atrito da roda com o trilho.

### Tensões Residuais

As tensões residuais são aquelas que permanecem no material mesmo na ausência de carregamento externo e são introduzidas em trilhos através de diferentes mecanismos e etapas de sua vida útil, devendo ser consideradas nos cálculos de integridade estrutural da via. As tensões residuais podem ser de natureza trativa ou compressiva, atuando nas direções longitudinal, transversal e vertical. Essas tensões exercem forte influência nas solicitações impostas aos trilhos e, conseqüentemente, na taxa de crescimento de defeitos.

As etapas de fabricação, tratamento térmico, soldagem e o carregamento em uso induzem tensões residuais significativas nos trilhos, podendo alcançar magnitudes iguais a tensão de escoamento do material (JEONG, 1996). Os processos de conformação mecânica utilizados na manufatura dos trilhos dão origem a tensões residuais devido à distribuição irregular de deformações plásticas na seção do material. Nestas condições, o trilho acumula tensões a medida que aumenta o grau de deformação imposto (ROLDO, 1998).

Os tratamentos térmicos para endurecimento dos trilhos também induzem tensões residuais, uma vez que não há resfriamento uniforme devido à complexidade geométrica do

componente. A Figura 2.7 mostra um perfil de tensões residuais longitudinais de um trilho submetido a tratamento térmico para endurecimento do boleto

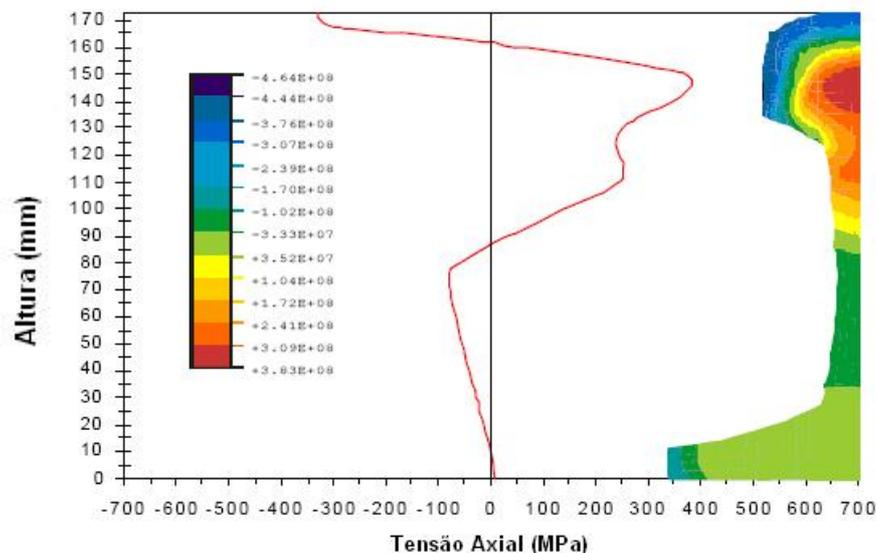


Figura 2.7 – Perfil de tensões residuais para um trilho submetido a tratamento térmico HH (JEONG, 1996).

Na condição de como fabricado, as tensões residuais longitudinais são trativas no boleto (até 10 mm da superfície) e no patim e compressivas na alma. Em serviço, o contato roda-trilho provoca deformações plásticas pontuais na superfície do boleto e, com o conseqüente encruamento do material, incentiva uma redistribuição das tensões residuais a uma profundidade de até 7,5-10 mm (ROLDO, 1998). Nestas condições as tensões residuais trativas do boleto, decorrentes do processo de fabricação, passam a ser compressivas, como mostra a Figura 2.8.

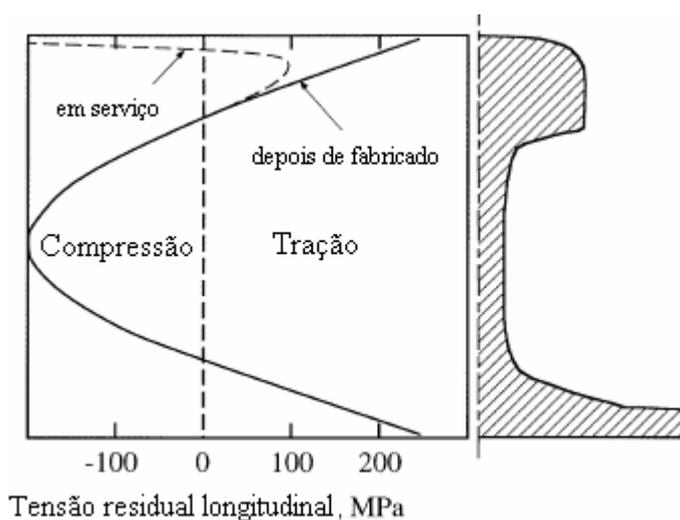


Figura 2.8 – Perfil de tensões residuais para um trilho novo standard novo e depois de usado (ZERBST, 2005).

As tensões residuais são benéficas quando compressivas, pois dificultam a nucleação e propagação de trincas de fadiga que podem conduzir o trilha à ruptura.

### Tensões Residuais na Soldagem de Trilhos

O ciclo térmico gerado pela soldagem altera o campo de tensões residuais na região de união de trilhos. Webster (WEBSTER, 1997) investigou as tensões residuais de uma junta soldada por processo aluminotérmico utilizando a técnica de difração por nêutrons, o trabalho indica a ocorrência de tensões residuais compressivas no boleto e no patim e trativas na alma, ou seja, o inverso do que ocorre em regiões não soldadas.

A intensidade das tensões é maior na região central da solda para as tensões longitudinais e maior na zona afetada pelo calor (ZAC) para as tensões verticais, como mostram as Figura 2.9 e Figura 2.10. O autor, ainda, sugere que o tamanho da junta, natureza metalúrgica do trilho e a configuração dos moldes podem alterar o campo de tensões residuais da solda. Em outro artigo, Skyttebol (SKYTTEBOL, 2005) verificou que as distribuições de tensões residuais são similares para os processos de soldagem por aluminotermia e por centelhamento (flash butt welding).

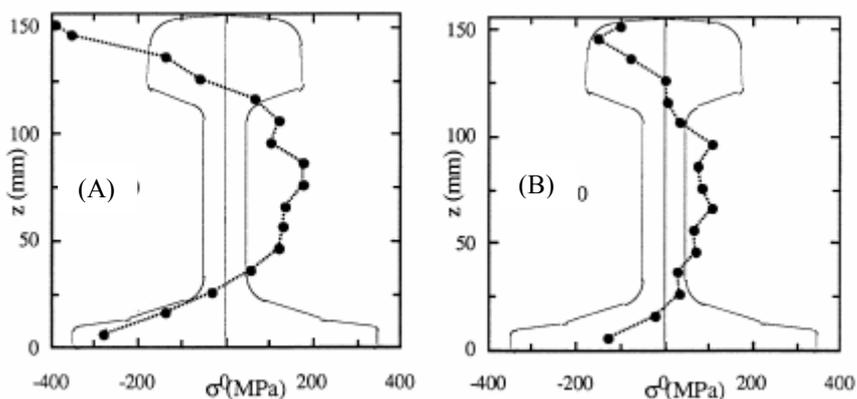


Figura 2.9 – Perfil de tensões residuais longitudinais em soldas aluminotérmicas. A) no centro da solda; B) na zona afetada pelo calor (ZAC) (WEBSTER, 1997).

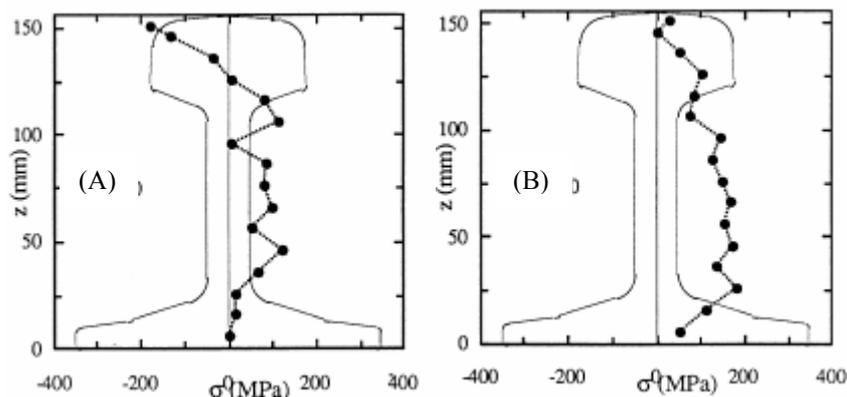


Figura 2.10 - Perfil de tensões residuais verticais em soldas aluminotérmicas. A) no centro da solda; B) na zona afetada pelo calor (ZAC) (WEBSTER, 1997).

### 2.2.3 Efeito do Carregamento Dinâmico nas Solicitações

As tensões que agem nos trilhos são aumentadas por irregularidades ou discontinuidades nos trilhos e nas rodas. Estas irregularidades aliadas a movimentos dinâmicos dos truques e vagões causam uma variação na magnitude do carregamento e maior impacto da roda no trilho, especialmente em altas velocidades. As forças dinâmicas reduzem consideravelmente o tamanho crítico das trincas de fadiga e podem aumentar a taxa de propagação destas trincas (SCHNEIDER, 2005). A Associação Ferroviária de Engenharia da América (AREA) recomenda a utilização uma fórmula simples que leva em consideração as dimensões da roda na amplificação do carregamento estático através do fator DLF (dynamic load factor)

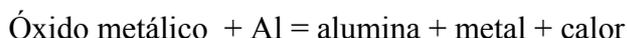
$$DLF = 1 + 33 * \left( \frac{v}{100d} \right), \quad \text{Eq. 5}$$

onde  $v$  é a velocidade do trem, em milhas por hora, e  $d$  é o diâmetro da roda em polegadas. De acordo com a equação um trem com rodas de 0,8m de diâmetro viajando a 50km/h possui um DLF de 1,3.

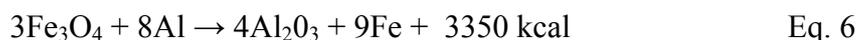
### 2.3 Soldagem Aluminotérmica

A soldagem aluminotérmica possui aplicação específica onde outros processos não apresentam necessária flexibilidade para a sua realização em campo. Devido à 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. O processo baseia-se nas propriedades termodinâmicas da formação do óxido de alumínio e foi

desenvolvido, em 1898, pelo químico alemão Dr. Hans Goldschmidt, originalmente para emprego na redução de metais como cobalto, tungstênio e cromo, a descoberta foi patenteada como "Thermit®" pela empresa Goldschmidt AG (West Germany). A reação aluminotérmica apresenta a seguinte fórmula geral:



A formação da alumina é extremamente exotérmica, liberando grande quantidade de calor, a reação típica que ocorre em procedimentos comerciais é:



A reação é bastante vigorosa e dura aproximadamente 20 segundos, alcançando facilmente temperaturas superiores a 3000°C, no entanto há redução neste valor devido a perdas de calor no cadinho e por radiação, pelotas de ferro-liga são adicionadas para resfriar a reação para temperaturas próximas a 2480°C e produzir a composição química desejada na solda.

Denomina-se mistura o conjunto de elementos, em forma de pó, responsáveis pela reação aluminotérmica. A mistura é composta de aproximadamente 25% de alumínio e o restante de magnetita e ferro-liga que produzirão, após a combustão, aproximadamente 70% de aço líquido. Este aço representa aproximadamente a metade da mistura original, em peso, e um terço em volume. A quantidade de ligas contidas na mistura determina a temperatura da reação, que deve ser menor que 2500°C para evitar sublimação do alumínio e, maior do que 2040°C para proporcionar uma separação adequada entre a escória e a mistura fundida. No entanto, a reação aluminotérmica não é espontânea, requerendo uma ignição inicial, para esta etapa se utiliza um acendedor especial.

Assim, 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.

A Figura 2.11 apresenta uma configuração típica do conjunto molde cadinho utilizado na soldagem de trilhos. Em (a) a mistura é colocado no cadinho que fica posicionado acima dos moldes, que por sua vez são colocados ao redor da junta. Após a ignição da carga ocorre a fusão da mistura e a separação entre o aço líquido e a escória de óxidos (figura 2.11b). O aço líquido é vazado no espaço entre os trilhos e o molde, realizando a união metálica (figura 2.11c). Por diferença de densidade a escória permanece acima da fase líquida, sendo descartada em um recipiente externo (Figura 2.12).

### 2.3.1 Equipamentos de Soldagem

Basicamente são utilizados três equipamentos (Figura 2.12): Cadinho, Moldes e Sistema de Pré-Aquecimento.

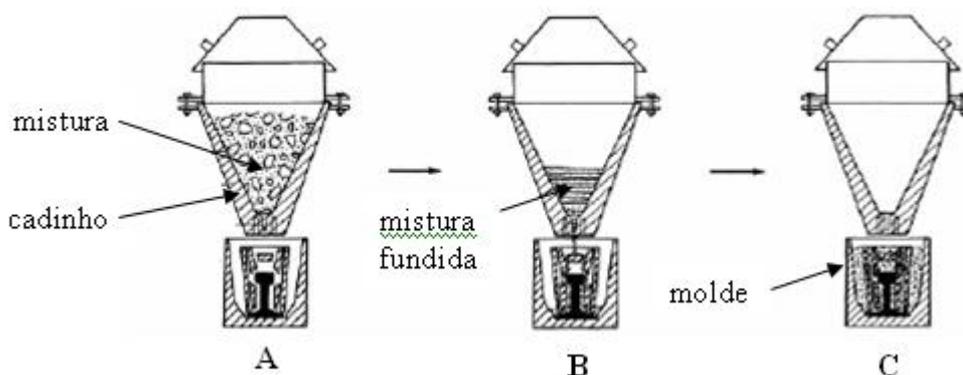


Figura 2.11 - Configuração típica do conjunto molde-cadinho para a soldagem aluminotérmica (DA SILVA, 1998).



Figura 2.12 – Equipamentos utilizados na soldagem aluminotérmica. (KLK)

### 2.3.2 Procedimento de Soldagem

O procedimento de soldagem depende da geometria do trilho, das condições de desgaste do trilho, da sua composição química e das especificações do fabricante da solda. É uma prática industrial seguir as recomendações do fabricante, no entanto, adaptações técnicas

são permitidas e, às vezes, recomendadas, de acordo com as particularidades das condições de soldagem (LEE, 2006). Detalhes sobre os procedimentos de soldagem utilizados por algumas marcas de soldas podem ser encontrados nos sites dos fabricantes KLK, RAILTECH, THERMIT entre outros.

### 2.3.3 Propriedades da Solda Aluminotérmica

Devido a sua estrutura de metal fundido, a solda possui, invariavelmente, propriedades mecânicas inferiores as do trilho. No entanto, são os parâmetros de soldagem em conjunto com a mistura aluminotérmica que determinam estas propriedades. O exame do procedimento de soldagem deve abordar a distribuição de dureza ao longo da solda, limpeza do metal de solda, propriedades mecânicas como resistência à tração e fadiga, além das características metalúrgicas da solda. De particular interesse são os níveis de dureza na zona de fusão e na ZAC, além do tamanho da ZAC (MUTTON, 2004).

Myers (MYERS, 1982) apurou a falta de simetria no perfil de dureza da solda. No boleto o metal de solda (MS) possui dureza mínima no centro. A dureza atinge um máximo na região da ZAC, partir de onde a dureza cai novamente até os níveis do metal base. Em alguns casos este segundo ponto de dureza mínima ocorre na fronteira entre a ZAC e a ZPF (zona parcialmente fundida). Para as medições realizadas no patim, a dureza mínima no MS é pouco pronunciada, nas demais regiões da solda os patamares de dureza são similares àquelas medidas no boleto. As variações de dureza ao longo da solda são observadas por vários autores (MYERS, 1982; OFFEREINS, 2004; DA SILVA, 1998), no entanto a literatura não fornece justificativa de natureza metalúrgica que explique a razão da diminuição de dureza no centro da solda. É importante salientar que a norma européia para avaliação de soldas aluminotérmicas determina ensaios de dureza na região boleto. Deve-se considerar, também, que o encruamento provocado pelo contato roda-trilho pode acarretar em um aumento de dureza de até 60HB na região da solda, dependendo das condições de serviço. A Figura 2.13 mostra o perfil de dureza no plano longitudinal para três soldas em trilhos tratados.

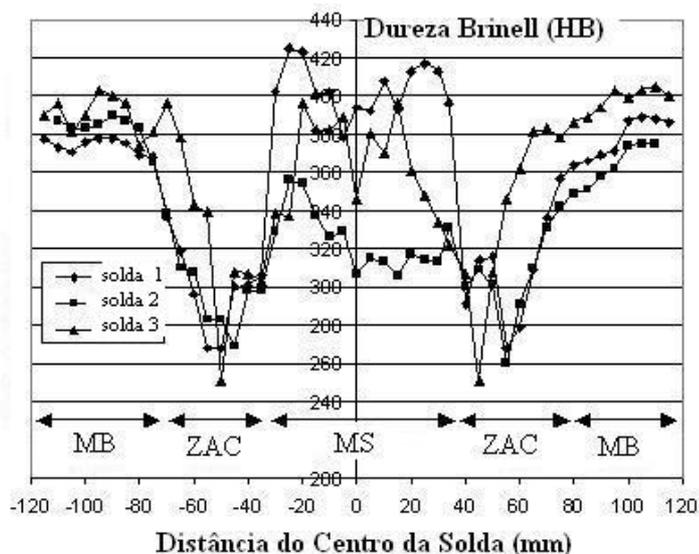


Figura 2.13 – Perfis de dureza longitudinal ao longo da solda (MARICH, 2005).

As propriedades ideais para a solda dependem das condições de carregamento na via. Para ferrovias com a 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 ZAC medindo entre 18-25 mm e dureza entre 340-360HB, sendo 340 HB a dureza mínima para se controlar deformações na solda em níveis aceitáveis (MUTTON, 2004).

A resistência à tração das soldas varia entre 700-900MPa, o material apresenta baixa ductilidade com alongamento entre 1 e 3%, raramente superiores a 4%. A fratura ocorre preferencialmente no MS, na região central, sendo que a maior deformação se dá na ZAC. Os valores de tenacidade a fratura também são baixos variando entre 25-35MPa m<sup>1/2</sup> (MUTTON, 2004). A tabela 4 mostra algumas propriedades mecânicas das soldas aluminotérmicas.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas da solda aluminotérmica.

Amostra	Tensão de Escoamento (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Elongamento (%)	Referência
1	668	-	1,5	(ENAD, 1999)
1	787	809	1	(OFFEREINS, 2004)
2	745	802	2	
1	-	774	1	(MYERS, 1982)
2	-	834	2,3	
1	-	650	-	(DA SILVA, 1998)
2	-	755	-	
3	-	626	-	

A estrutura metalúrgica presente na solda aluminotérmica depende da 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, que deve apresentar apenas variações granulométricas ao longo das suas diferentes zonas, embora sejam permitidas mínimas percentagens de ferrita. Morfologias aciculares desta fase, como Widmanstätten são indesejadas por possuírem baixa ductilidade, fases martensíticas ou bainíticas e estruturas dendríticas também são desaconselhadas por conferirem menor tenacidade à junta. A Figura 2.14 mostra uma macrografia e as micrografias das zonas de uma solda perlítica.

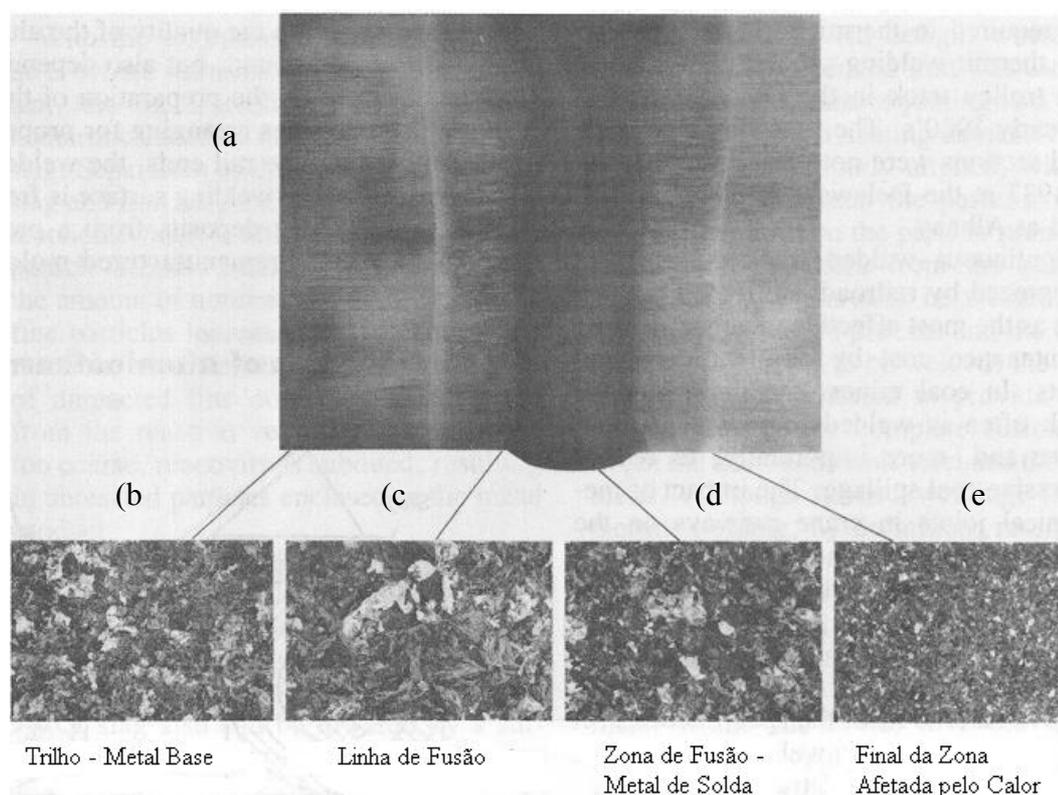


Figura 2.14 – Caracterização metalográfica de uma solda aluminotérmica. (a) macroestrutura. (b) metal base. (c) linha de fusão (d) metal de solda. (e) zona afetada pelo calor (ASM METALS HANDBOOK, 1998)

#### 2.3.4 Propriedades de Fadiga das Soldas Aluminotérmicas

A resistência a fadiga por flexão das soldas aluminotérmicas é um importante parâmetro para avaliar a segurança das operações em uma ferrovia. Através dos ensaios de alto ciclo é possível simular de maneira aproximada as condições de carregamento da via. Durante os ensaios o patim é submetido à flexão trativa, tal como ocorre quando da passagem do trem sobre trilho. Os resultados dos testes podem ser utilizados para avaliar ou programar estratégias de manutenção.

No TTCI (Transportation Technology Center, Inc.) nos Estados Unidos (SUN, 2002) foram realizados ensaios de fadiga em soldas de trilhos AREMA 136RE. A Figura 2.15 mostra os resultados obtidos e faz uma comparação entre as soldas aluminotérmicas, soldas por centelhamento (flash-butt weld) e um segmento de trilho sem solda. Como esperado, a solda aluminotérmica apresenta propriedades inferiores.

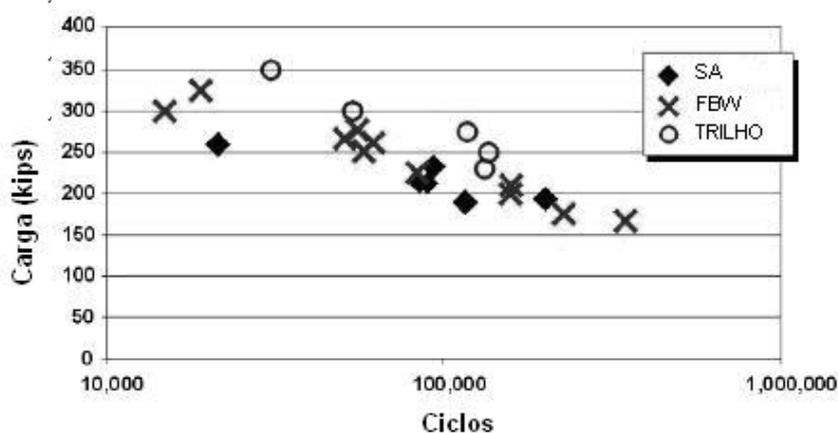


Figura 2.15 – Comparação entre o desempenho de fadiga de soldas aluminotérmicas, soldas por centelhamento e trilhos. (SUN, 2002)

Em outro trabalho realizado na mesma instituição Kristan (KRISTAN, 2005) avaliou o desempenho em fadiga para três novas geometrias do colar da solda. Os resultados são mostrados na Figura 2.16. Dentre os fatores intervenientes na vida em fadiga das soldas aluminotérmicas, destacam-se os defeitos de soldagem, inclusões, microestrutura e resistência mecânica.

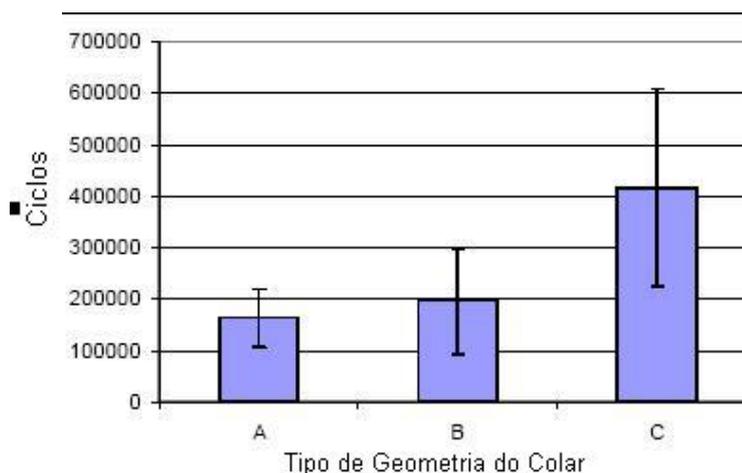


Figura 2.16 – Desempenho em fadiga para três diferentes geometrias do colar de solda (KRISTAN, 2005).

## 2.4 Defeitos de Soldagem

Os defeitos de soldagem são classificados pelo International Institute of Welding (IIW) em função de sua natureza, forma e dimensões (BRANCO, 1986). A classificação abrange dois grupos: Defeitos planares e defeitos não-planares, cujos tipos estão apresentados na tabela 5.

Tabela 4 – Tipos de defeitos de soldagem.

Defeitos Não-Planares	Porosidade
	Inclusões
Defeitos Planares	Trincas
	Defeitos de forma (sulcos, mordeduras, concavidades na raiz)
	Defeitos diversos não incluídos nos anteriores

O processo de soldagem aluminotérmica tipicamente produz soldas de boa qualidade, no entanto, há a possibilidade da ocorrência de defeitos. A natureza metalúrgica da solda aluminotérmica contribui para o surgimento de defeitos na junta soldada. A Figura 2.17 apresenta os tipos de defeitos responsáveis por falhas em um estudo citado por Lawrence (LAWRENCE, 2004).

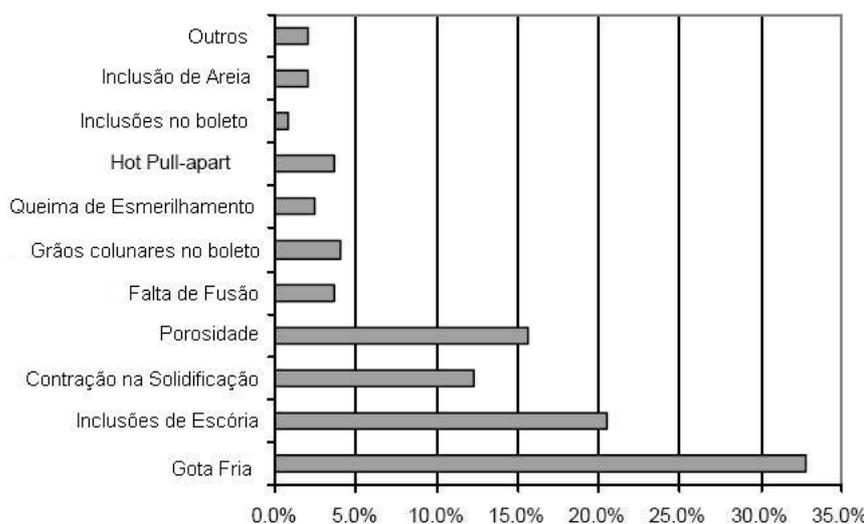


Figura 2.17 – Tipos de defeitos encontrados em soldas aluminotérmicas (LAWRENCE, 2004).

Embora todos os defeitos de soldagem aluminotérmica tenham efeito similar na vida em fadiga das juntas – aumento da tensão local e redução do desempenho frente a carregamento cíclico – as origens dos defeitos podem ser diferentes.

Alguns defeitos são causados por procedimentos de soldagem ou material de consumo inadequados, como *black-hole*, inclusões de escória ou areia e bordamento da solda. Outros são gerados por parâmetros de soldagem incorretos como: rechupes, solda-fria e segregação. Ocorrem, ainda, variações no perfil da solda, geradas por severas condições de serviço, que também são interpretadas como defeitos.

Chen (CHEN, 2006) pesquisou uma relação entre a formação de alguns defeitos e parâmetros de soldagem. Os parâmetros analisados foram a temperatura do metal líquido no momento do vazamento (T), o tempo de pré-aquecimento (t) e o tamanho da junta (gap). De acordo com o autor, as condições de soldagem para a obtenção de soldas livres de defeitos, embora ainda possa haver microporosidades são aquelas mostradas na tabela 6.

Tabela 5 – Sugestão de parâmetros de soldagem para evitar defeitos de natureza térmica (CHEN, 2006).

	T (C)	t (min)	gap (mm)
Padrão	2050	5	25
Modificação 1	2100	5	35
Modificação 2	2050	6, 25	38

A seguir são apresentados alguns dos principais tipos de defeitos observados em soldas aluminotérmicas de acordo com documento do Welding Technology Institute of Austrália (WTIA, 2006).

#### Black Holes

*Black holes* são poros isolados que surgem junto ao canal de alimentação da solda. Este tipo de defeito é uma das maiores causas de rejeições de solda por serem facilmente observados em inspeção visual. O defeito é causado por gases que, originados pelo material de vedação próximo ao patim, entram em contato com a solda durante a solidificação. Soldas com gaps estreitos também são suscetíveis a este tipo de defeito.



Figura 2.18 – Black hole no patim (WTIA, 2006).

### Inclusões de Escória

As inclusões de escória são defeitos bastante perigosos à integridade da solda, pois podem nuclear trincas de fadiga. Geralmente estes defeitos são introduzidos por procedimentos incorretos de corte do trilho, “gaps” mal dimensionados, limpeza inadequada do cadinho (quando multiuso), umidade na porção e falhas no pré-aquecimento da junta.

### Contração da Solda

A contração da solda ocorre geralmente na última região de solidificação, o patim ou o boleto, de acordo com o sistema de vazamento. A contração está associada a pré-aquecimento insuficiente, gaps reduzidos e ao movimento relativos da junta antes da solidificação total da solda. Assim, etapas de fixação devem ser revistas. São necessários aproximadamente 25 minutos até que a solda atinja temperatura de 350°C, onde terá desenvolvido 80% da sua resistência mecânica. Deve-se proibir o tráfego próximo aos locais de manutenção durante este intervalo (MUTTON, 2004).



Figura 2.19 – Contração da solda na região entre a alma e o patim (WTIA, 2006).

### Inclusão de Areia

Inclusões 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 do defeito ocorre na soldagem de um trilho novo com um trilho desgastado, uma vez que pode haver penetração de areia devido ao desnível do trilho usado. A areia de vedação pode alcançar temperaturas de vitrificação e se incrustar na superfície do trilho. O defeito pode ser removido por esmerilhamento, no entanto, podem permanecer após este processo o que exige reparos na solda.



Figura 2.20 – Exemplo de inclusão de areia (WTIA, 2006).

#### 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 parte do trilho. Parâmetros inadequados de pré-aquecimento, como pressão dos gases, baixa temperatura ou porção de consumível insuficiente também podem causar falta de fusão.

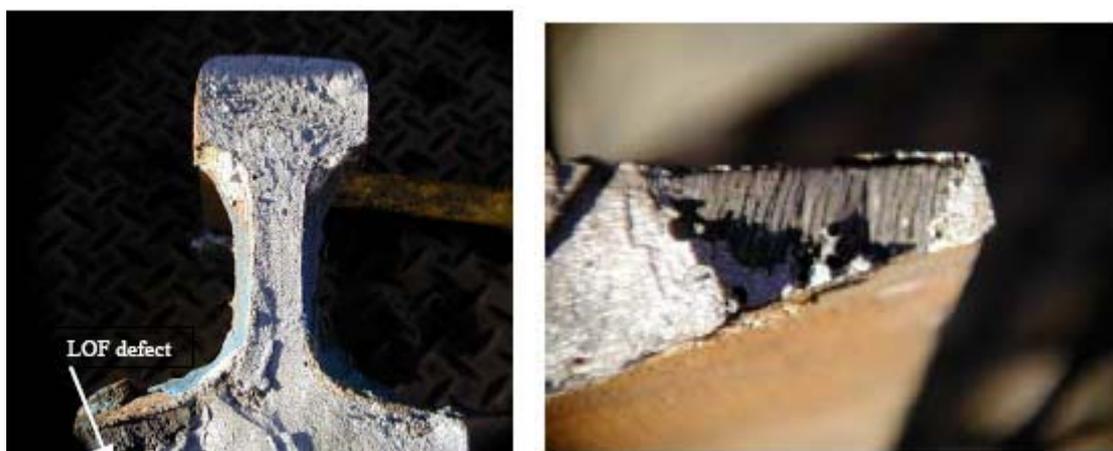


Figura 2.21 – Solda com falta de fusão no patim do trilho. À direita, ainda é possível observar as marcas do processo de corte durante a preparação da junta (WTIA, 2006).

### Bordamento da Solda (Flashing/Finning)

O defeito do tipo “*finning*” surge devido a um fluxo de metal fundido entre o trilho e o molde, o que forma uma borda com potencial para concentração de tensões. Este defeito tem sido associado com um grande número de falhas em soldas, principalmente em vias com altas cargas por eixo (KRISTAN, 2004). O defeito ocorre na alma e no patim junto ao colar da solda, podendo ser originado por variação no dimensional dos moldes, vazamento de escória na solda ou fusão da lama cerâmica que é colocada entre o molde e o trilho. A Figura 2.22 mostra esquematicamente o bordamento e a falta de fusão associada ao defeito, enquanto a Figura 2.23 mostra uma fotografia do defeito.

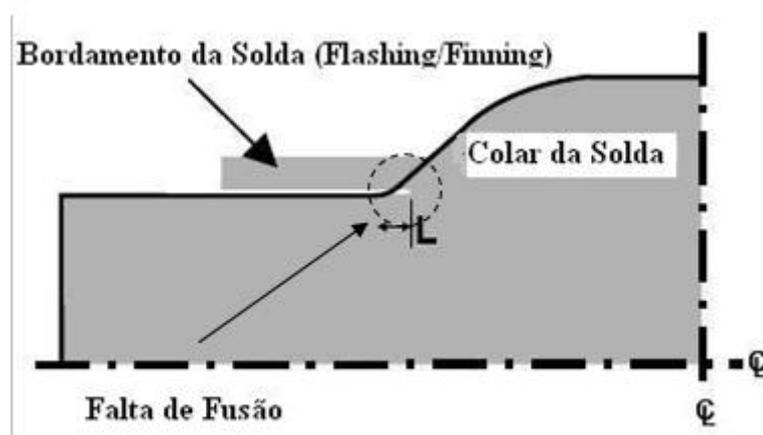


Figura 2.22 - Diagrama esquemático de um corte horizontal junto ao colar de solda na alma mostrando bordamento da solda e falta de fusão (KRISTAN, 2004).

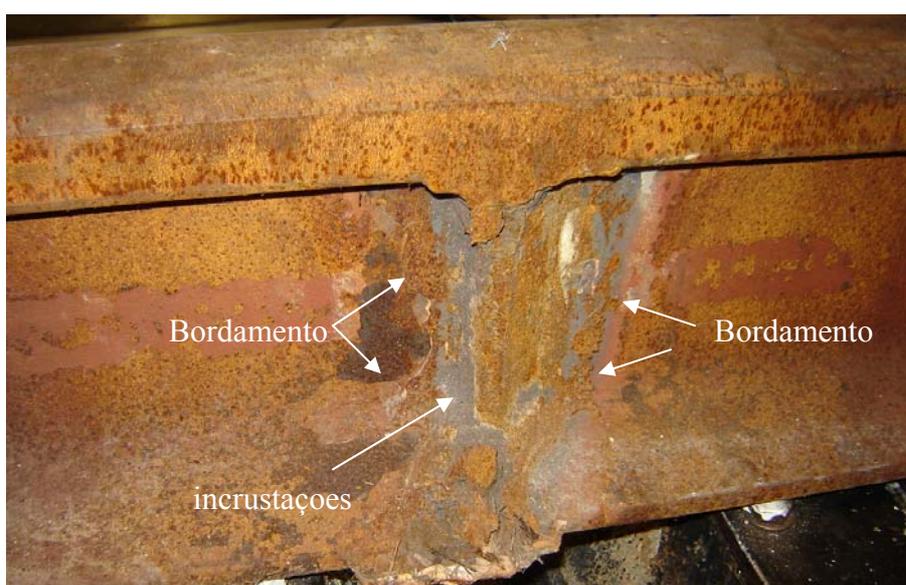


Figura 2.23 – Exemplo de solda com o defeito de bordamento Também é observada incrustação de material cerâmico no colar da solda.

## Porosidade

A porosidade é um defeito interno grave, pois quando em grande número pode diminuir de maneira significativa a resistência da solda. A umidade é a principal causa deste defeito, uma vez que impede a correta reação da mistura aluminotérmica. A porosidade pode ainda ser decorrente do material de vedação, pré-aquecimento insuficiente, molde contaminado e clima chuvoso durante a soldagem.



Figura 2.24 – Soldas com forte porosidade (WTIA, 2006).

## Deformação da Solda (Canoamento)

O canoamento (weld batter) é definido como a variação no perfil longitudinal ao longo da região da junta como resultante da diferença de desgaste e deformação plástica entre o trilho e a solda (MOLLER, 2001). O defeito é introduzido pelas altas pressões do contato roda-trilho em ferrovias de carga pesada e está associado a juntas com largas ZAC e com considerável variação de dureza em relação ao MS. A Figura 2.25 mostra o aspecto visual do defeito.



Figura 2.25 – Aspecto visual do defeito canoa (DUVEL, 2005).

O tamanho da ZAC é resultado dos procedimentos de soldagem, sendo maior para “gaps” estreitos e altas temperaturas de pré-aquecimento. A ZAC será maior na soldagem de trilhos usados, uma vez que, a perlita deformada amolece mais rapidamente durante a soldagem, o que pode resultar em uma ZAC de até 10 mm maior (MOLLER, 2001), quando comparada com um trilho novo. Além das características metalúrgicas do trilho a ser soldado, a largura da ZAC também é influenciada pelo tamanho da porção aluminotérmica.

A partir de análise por elementos finitos calcula-se que o pico de carregamento pode alcançar o dobro da carga vertical quando uma roda que apresenta irregularidades (flats) passa por uma “canao” na solda. Tensões de até 250 MPa podem ocorrer nas curvas para estas condições e a probabilidade aumenta com a carga por eixo (MUTTON, 2004). Este defeito constitui-se em uma grande preocupação em ferrovias de carga pesada, visto que além da possibilidade de falha na solda, o impacto da roda com esse desnível pode provocar fratura neste componente, bem como aumentar o efeito do carregamento dinâmico, onerando toda a estrutura da via.

Para os trilhos de alta resistência utilizados nas ferrovias de carga pesada uma mistura aluminotérmica com dureza entre 340 – 360HB é recomendada para minimizar o defeito. Além disso, a extensão do defeito de canoamento pode ser limitada pelo esmerilhamento, geralmente utilizado como estratégia de manutenção para controlar defeitos de fadiga por contato (RCF) e manter o perfil do trilho, embora não seja utilizado especificamente para evitar o defeito (MUTTON, 2004).

## 2.5 Falhas em Soldas Aluminotérmicas

A taxa de falhas em soldas aluminotérmicas depende das condições de tráfego e de manutenção da via. As fraturas ocorrem por fadiga ou sobrecarga e são incentivadas pelos altos carregamentos, principalmente nas vias de cargas pesadas, e estão diretamente relacionadas a ocorrência de defeitos de soldagem. Segundo Lawrence, (LAWRENCE, 2004) 40 % das falhas em serviço são devido às soldas, sendo que 10% dos acidentes com descarrilamento por ele observados ocorrem por fratura da solda.

Jeong (JEONG, 2001) apresenta um relatório elaborado pelo departamento de transporte dos Estados Unidos na década de 90 onde as falha em soldas (aluminotérmica e por centelhamento) eram responsáveis por aproximadamente 5% dos acidentes ferroviários. Recentemente, foram realizados dois estudos em ferrovias de carga pesada na Austrália. Duvel (DUVEL, 2005) aponta que a solda aluminotérmica é a maior contribuidora para as estatísticas

de falhas alcançando mais 75% das falhas relatadas na ferrovia analisada, como mostra a Figura 2.26. Mutton, (MUTTON, 2004) analisou a ocorrência de uma série de falhas nas soldas aluminotérmicas da via. Observou-se fraturas verticais (*straight-break*) e fraturas horizontais do tipo separação da alma (*split-web*). As fraturas nas soldas ocorrem, preferencialmente, durante o inverno quando a temperatura do trilho cai abaixo da temperatura neutra ( $T_n$ ) - livre de tensões.



Figura 2.26 – Distribuição dos locais de falha em uma ferrovia de carga pesada (DUVEL, 2005).

As trincas de fadiga são mais freqüentes na região do boleto, porém podem ser detectadas por ensaios de ultra-som. Na etapa de iniciação estas trincas são removidas pelo desgaste do trilho ou por esmerilhamento. No boleto as trincas surgem a partir de concentradores de tensões internos, como inclusões e porosidade. Na alma e no patim a ocorrência de trincas de fadiga é menos freqüente e há maiores dificuldades de detecção, no entanto estas regiões da solda são mais suscetíveis a defeitos superficiais e tensões residuais trativa que representam maior risco à integridade da junta (SKYTTEBOL, 2005). Estes detalhes justificam a maior incidência de fraturas iniciadas na alma e no patim como mostra a Figura 2.27

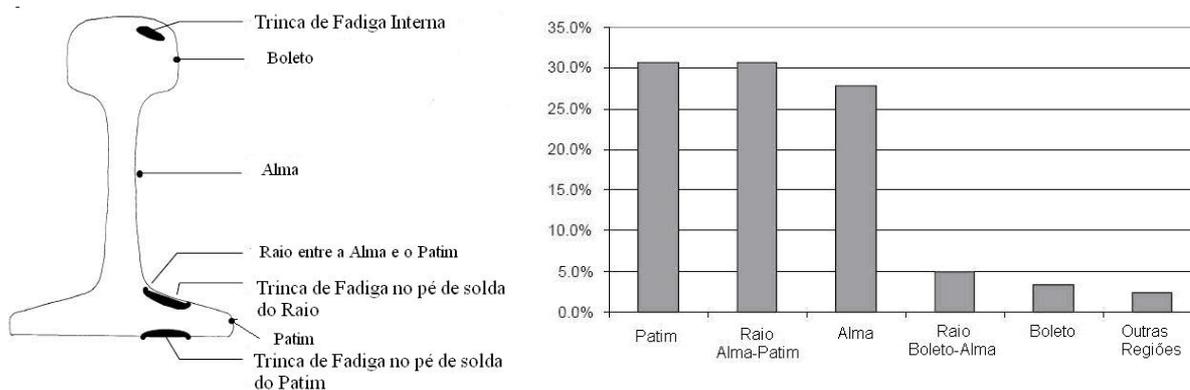


Figura 2.27 – Regiões da solda mais suscetíveis a nucleação de defeitos e falhas (LAWRENCE, 2004).

### 2.5.1 Fraturas Transversais

As fraturas transversais estão associadas a defeitos na linha central da solda, principalmente, devido à contração do aço solidificado quando o pré-aquecimento da junta é deficiente. A falha vertical, ainda, ocorre na alma, coincidindo com uma larga zona de fusão ou inclusões de escória. Outro ponto preferencial para a nucleação deste tipo de falha são os defeitos planares na região do patim. Silva (SILVA, 2000), analisou a falha de uma solda com fratura vertical onde foram detectados indícios de superaquecimento decorrentes de parâmetros de soldagem negligenciados, o que foi evidenciado pela existência de microestrutura frágil e pela granulometria grosseira do material junto ao início da falha. A

Figura 2.28 mostra um exemplo de uma fratura transversal.



Figura 2.28 – Fratura Transversal (MUTTON, 2004) e (DUVEL, 2005).

### 2.5.2 Fraturas Horizontais

Devido a possibilidade de deslocamento lateral as falhas horizontais representam maior risco de descarrilamento do que as falhas verticais, soma-se a este agravante a dificuldade de detecção da trinca antes da propagação instável, uma vez que a fratura não apresenta evidência de crescimento por fadiga, o que indica que a falha inicia junto a severos concentradores de tensões e se propaga rapidamente.

Este tipo de falha ocorre principalmente em seções curvas com raio entre 600-900m, devido a altas magnitudes de solicitações nesta região, embora também sejam registradas em seções retas.

A falha inicia na alma, geralmente em um canto do colar de solda e está associada a defeitos superficiais, trincas de contração e inclusões (não-metálicas, de areia ou escória).

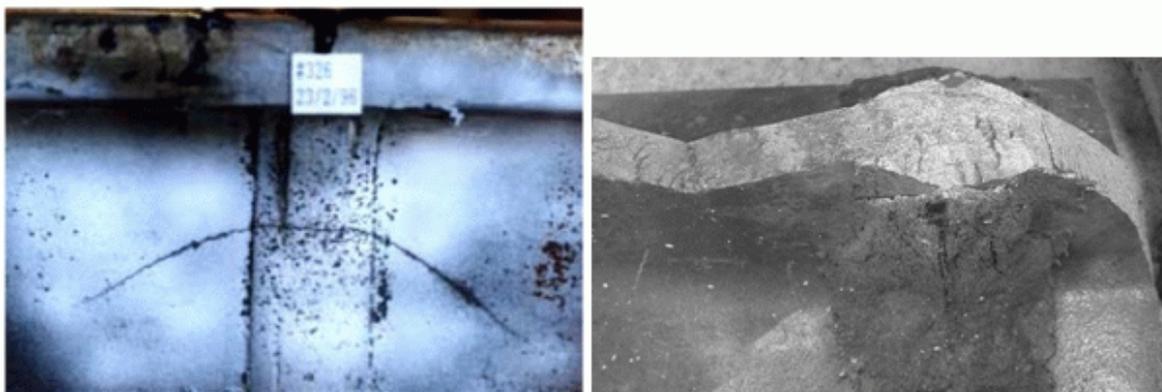


Figura 2.29 – Fratura Horizontal (DUVEL, 2005).

## 2.6 Melhorias no Desempenho de Soldas Aluminotérmicas

As projeções de demanda para o tráfego ferroviário indicam aumento em três fatores muito importantes para o estudo da manutenção e integridade da via (SKYTTEBOL, 2005).

- densidade de tráfego
- carga por eixo
- velocidade dos trens

É relevante observar que a junta soldada por aluminotermia pode apresentar defeitos de soldagem, mesmo que os procedimentos sejam seguidos rigorosamente como recomenda o fornecedor. Logo, as soldas dos trilhos representam um dos principais limitadores para que a carga por eixo alcance patamares de 40 toneladas (MUTTON, 2004). Estes entraves, no entanto, têm estimulado uma série de pesquisas que visam propor melhorias na qualidade da solda de maneira a permitir o aumento da carga transportada e maiores velocidades aos trens, mantendo-se níveis aceitáveis de segurança para tráfegos densos como as linhas transportadoras de minério de ferro.

Diferentes técnicas de soldagem, consumíveis, simulação numérica, ensaios de fadiga, além de outras tecnologias que busquem aprimorar as soldas e proporcionem redução nos custos de manutenção são de grande interesse para a indústria ferroviária. As propostas estão focadas em áreas que exercem maiores influência no desempenho das juntas soldadas:

- Preparação da Junta
- Moldes
- Mistura Aluminotérmica
- Pré-Aquecimento

Kristan (KRISTAN, 2004) sugere que manter o espaço entre os trilhos (gap) em uma distância de 32 mm durante a soldagem, proporcionaria um maior aporte de calor a junta por parte da porção aluminotérmica, minimizando os efeitos de um pré-aquecimento incorreto. Os trilhos devem estar devidamente alinhados pela altura do patim, mesmo em caso haver diferença na altura do boleto devido ao desgaste. Neste caso esmerilhamento adicional deverá ser empregado após a solda. Um desalinhamento de apenas 5 mm na base da solda pode triplicar a possibilidade de falha na junta. Em outra discussão o autor sugere-se que os moldes devam ser montados de modo a ficar mais próximo do trilho para evitar o bordamento no colar da solda. Recomenda-se a utilização de moldes fabricados com cerâmicas de superior qualidade que evitem a entrada de gases, fusão do refratário e proporcionem melhor acabamento superficial à solda.

Em outra abordagem (KRISTAN, 2004) relacionou a geometria do colar de solda com um concentrador de tensões. Através de análise por Elementos Finitos, propôs uma diminuição no ângulo do colar da solda e um aumento no raio do pé da junta (Figura 2.30). Soldas com ângulo de flanco de  $30^\circ$  e pé de solda com raio de 3 mm mostraram consideráveis melhorias em ensaios de fadiga, em relação a outras geometrias.

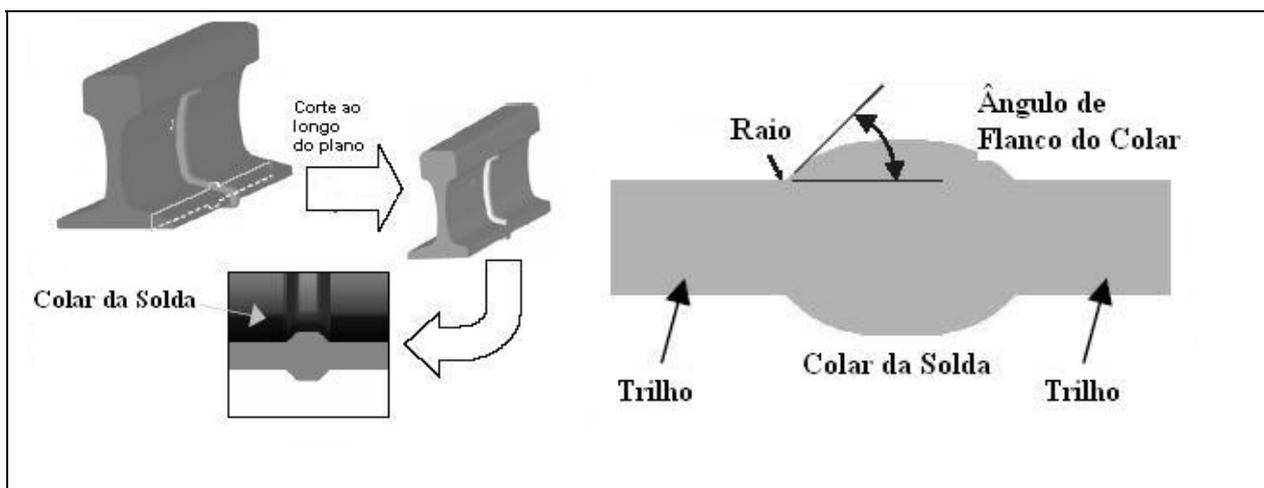


Figura 2.30 - Diagramas mostrando a seção transversal do colar de solda com suas características geométricas (KRISTAN, 2004).

Desde o início da década Moeller (MOLLER, 2001) tem estudado, em ferrovias australianas, uma nova tecnologia para aumentar a integridade da junta e diminuir a incidência de canoamento nas linhas de tráfego pesado. A proposta consiste em uma mistura aluminotérmica dupla com uma porção composta com adições de vanádio para o boleto e outra mistura convencional, de menor dureza, para o resto do trilho. O vanádio entre 0,1 e 0,25% confere uma dureza de 280 a 350HB ao boleto, enquanto as regiões da alma e do patim apresentam maior resistência com durezas média de 240HB. O processo, que confere maior tenacidade a fratura e resistência a fadiga da solda, também está sendo testado em várias ferrovias na Comunidade Européia.

No Leste da Europa, foram analisados os efeitos de um tratamento de pós-soldagem na solda (TPS). Um tratamento de 45 minutos a 820°C com resfriamento ao ar resulta em aumento significativo na resistência da junta. No entanto, a aplicação prática desta melhoria é limitada quando a equipe de manutenção tem pouco tempo para realizar soldas ou reparos na via. O custo adicional referente a etapa do TPS também é considerado um entrave, no entanto sua relação frente as prováveis reduções na manutenção das soldas são desconhecidos (NENAD, 1999).

### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste trabalho foram utilizadas soldas aluminotérmicas unindo trilhos perfil ABNT TR-68, cujas dimensões são mostradas na Figura 2.3. A Tabela 6 mostra os grupos de amostras com ângulo da junta de 30 e 45 graus. As tabelas 8 e 9 apresentam a composição química e algumas propriedades dos trilhos analisados, respectivamente.

Tabela 6 – Grupos de amostras utilizadas neste trabalho.

<b>Grupo 1</b>			<b>Grupo 2</b>		
Amostra	Trilho	Ângulo da junta	Amostra	Trilho	Ângulo da junta
S1	standard	30	S4	standard	45
S2	standard	30	S5	standard	45
S3	standard	30	S6	standard	45
T1	tratado	30			

O fluxograma mostrado na Figura 3.1 apresenta de maneira esquemática o planejamento experimental utilizado neste estudo. Com exceção da soldagem, os demais ensaios e análises foram realizados nas dependências do Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF-UFRGS).

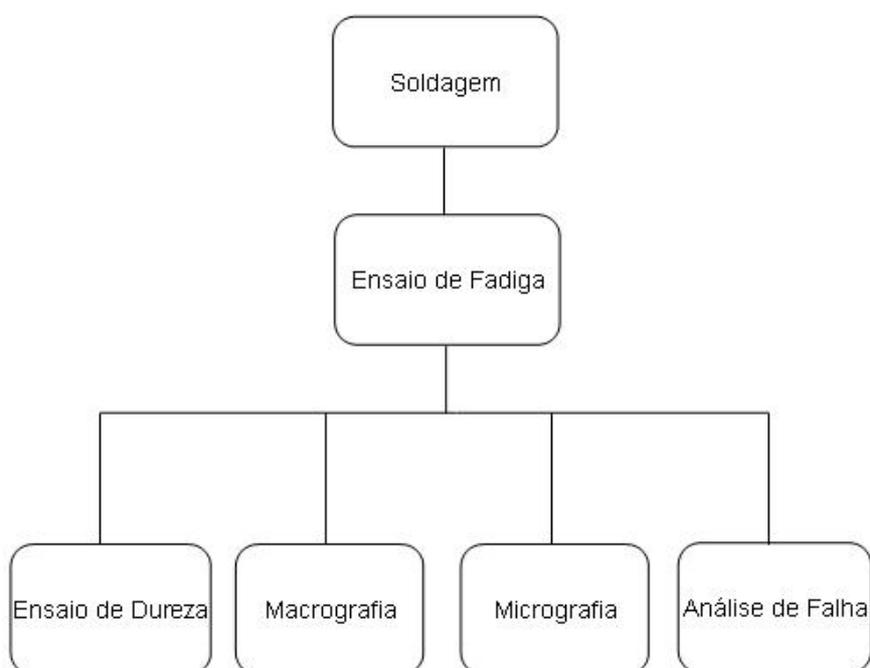


Figura 3.1 – Fluxograma experimental utilizado neste trabalho.

Tabela 7 – Composição química dos trilhos utilizados.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (% em massa)									
	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>	<b>Ni</b>	<b>Al</b>
Trilho Standard	0,80	0,49	1,23	0,01	<0,01	0,20	0,02	0,02	<0,01
Trilho Tratado	0,72	0,42	1,20	0,01	0,02	0,17	<0,01	0,02	<0,01
	<b>Co</b>	<b>Cu</b>	<b>Nb</b>	<b>Ti</b>	<b>V</b>	<b>W</b>	<b>Pb</b>	<b>Sn</b>	<b>B</b>
Trilho Standard	<0,01	0,07	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Trilho Tratado	<0,01	0,02							

Tabela 8 – Propriedades mecânicas dos trilhos utilizados.

<b>Trilho</b>	<b>Dureza Média (HB)</b>	<b>Resistência a Tração (MPa)</b>
Trilho Standard	347	1200
Trilho Tratado	370	1280

### 3.1 Soldagem

A elaboração dos procedimentos e a execução das soldas foram realizadas pelo grupo de manutenção de via - permanente da Estrada de Ferro Carajás da Companhia Vale do Rio Doce. Foram utilizados solda da marca Stanley, cadinho descartável e pré-aquecimento de 5 minutos. As

Figura 3.6 mostram algumas etapas da execução das soldas do grupo 2, enquanto a tabela 10 mostra a composição química das soldas.



Figura 3.2 – Alinhamento do trilho e colocação do molde.



Figura 3.2 – Alinhamento e colocação do molde.



Figura 3.3 – Fotografias mostrando a instalação e a geometria do molde utilizado na solda em ângulo.



Figura 3.4 - Fotografias mostrando as etapas de selamento e pré-aquecimento.



Figura 3.5 – À esquerda, ignição da reação aluminotérmica. À direita, solidificação da solda.



Figura 3.6 – Fotografias mostrando o acabamento e perfil final da solda em ângulo.

Tabela 9 – Composição química das soldas analisadas neste trabalho.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (% em massa)									
Amostras	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
Trilho standard	0,78	0,46	1,20	0,02	<0,01	0,19	0,02	0,04	0,10
Trilho tratado	0,76	0,49	1,12	0,02	0,01	0,23	0,02	0,05	0,05
	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	Sn	B
S1	0,01	0,1	<0,01	<0,01	0,06	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
T1	0,01	0,08	<0,01	<0,01	0,11	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01

## 3.2 Análise Metalográfica

### 3.2.1 Macrografia

Foram realizadas análises macrográficas no perfil longitudinal das soldas S1, S2, S3, T1 e S6, a fim de avaliar a forma e dimensões da junta, além do tamanho visual da ZAC junto à superfície do bolete. As amostras foram obtidas a partir de um corte longitudinal ao trilho na região da solda e foram preparadas através de lixamento (seqüência de lixas: 80,120 e 220mesh) e atacadas com reagente Fry, conforme procedimento descrito na norma EN 14730-1:2003.

### 3.2.2 Micrografia

Foram realizadas análises no bolete e na alma nas soldas do grupo 1. As amostras do bolete foram retiradas a partir de um corte longitudinal do trilho na região de interface entre o metal de solda e a zona afetada pelo calor, como mostra a Figura 3.7. Na alma as amostras foram retiradas a partir de um corte longitudinal-horizontal ao trilho na região da solda a uma distância de aproximadamente 100 mm da base do trilho. A preparação das amostras consistiu de embutimento, lixamento (seqüência de lixas: 120, 220, 320, 400, 600, 1200 mesh) e polimento (pasta de diamante de 4 e 1 $\mu$ m). As amostras foram atacadas com reagente Nital 2% e em seguida observadas em microscópio óptico.

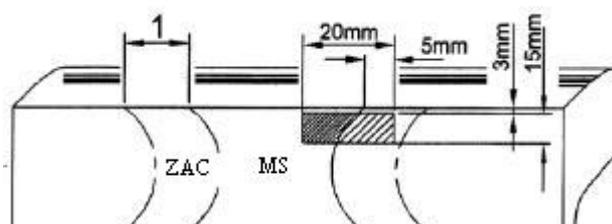


Figura 3.7 – Esquema de um corte longitudinal na solda mostrando as regiões de análise metalográfica no bolete (EN14730-1:2003).

## 3.3 Ensaio de Dureza

A variação de dureza foi medida através de um mapeamento ao longo da seção longitudinal-vertical da solda, como mostra a Figura 3.8. O perfil de dureza foi obtido em escala Vickers com carga de 30 kg em um durômetro Wolper. As indentações foram realizadas a uma distância entre 3-5 mm da superfície do bolete com espaçamento de 2 mm, como

recomenda a norma (EN14730-1:2003). O perfil iniciou no centro da solda para as amostras S1, S2 e S3. Para a amostra T1 o perfil abrangeu a totalidade da junta.

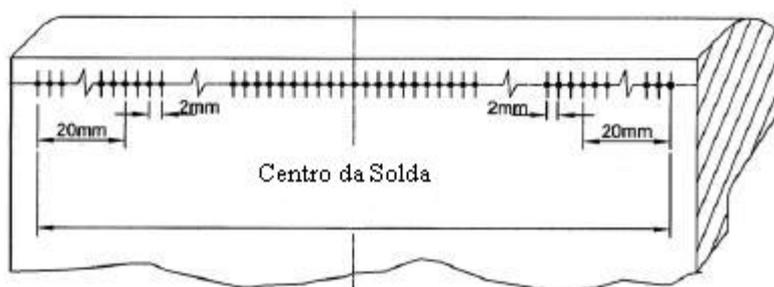


Figura 3.8 – Desenho esquemático mostrando a região de avaliação da dureza longitudinal da solda (EN14730-1:2003).

Para medição do tamanho da ZAC a norma recomenda que seja feita uma reta paralela ao valor médio da dureza do trilho (linha 1). Uma outra reta (linha 2) deve ser feita a uma distancia X da primeira. O valor de X é igual a 10 HV para trilhos standard e 25 para trilhos tratados. O tamanho da região de menor dureza na ZAC é a distância entre os pontos A e B da Figura 3.9 que mostra um perfil de dureza genérico.

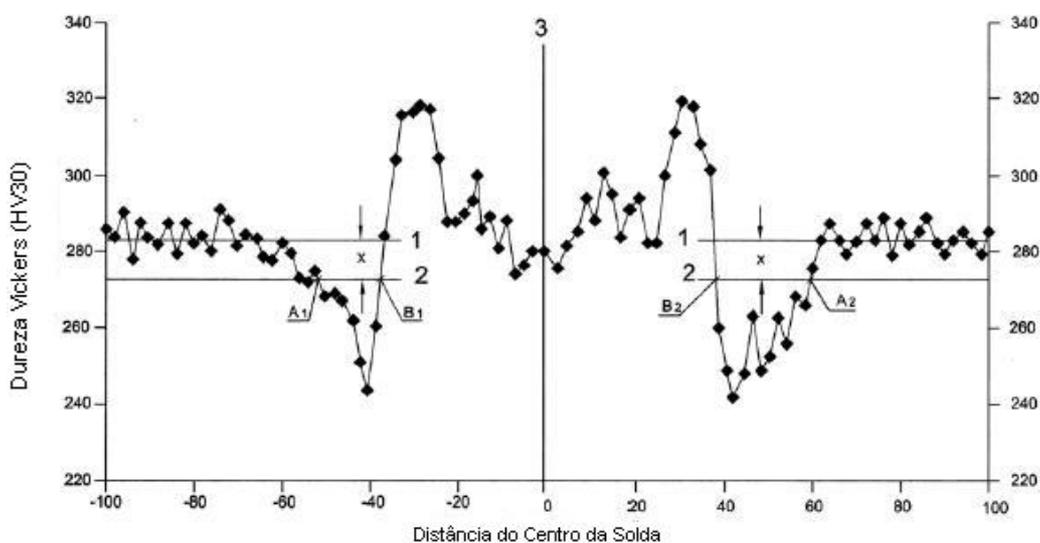


Figura 3.9 – Perfil de dureza genérico (EN14730-1:2003).

### 3.4 Ensaio de Fadiga

Os ensaios de fadiga foram realizados em uma maquina servo-hidráulica MTS com capacidade de 1000kN (Figura 3.10). Para controle da carga aplicada foi utilizado um equipamento MTS GT operado com o aplicativo FlexTest. Para aplicação da carga foi utilizado um quadro de reação desenvolvido no LAMEF. A configuração das amostras na maquina e o trilho montado para o ensaio é mostrado na figura 3.11. A tabela 11 mostra as cargas utilizadas

durante os ensaios. A frequência empregada nos ensaios variou entre 3 - 5Hz, com razão de carregamento  $R=0,1$  para todas as amostras.

### 3.5 Análise de Falha

As amostras do grupo 1 que apresentaram fratura durante o ensaio de fadiga foram submetidas a uma análise de falha, com o intuito de se identificar eventuais desvios do processo de soldagem que possam ter contribuído com a falha da junta. Nesta análise foram utilizadas algumas técnicas sugeridas por (CASSOU, 1998), como:

- Análise Visual
- Análise Fractográfica
- Metalografia
- Ensaio de Microdureza

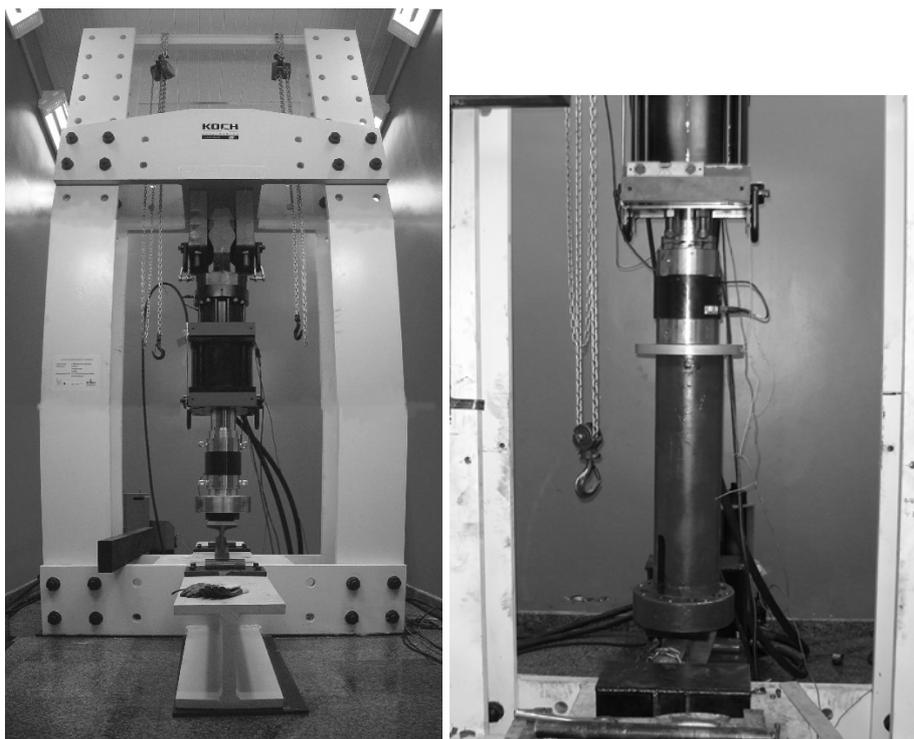


Figura 3.10 – Fotografias da máquina de ensaios MTS utilizada nos ensaios de fadiga.

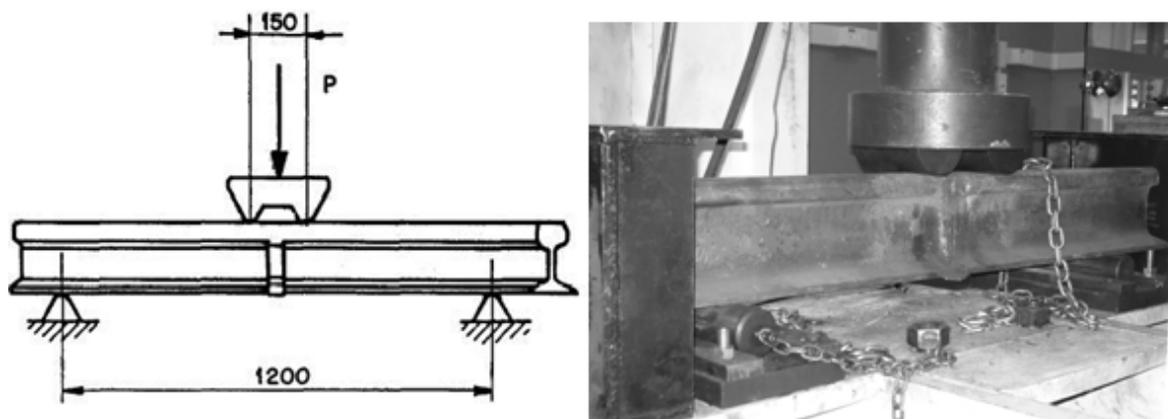


Figura 3.11 – À esquerda, configuração da solda na máquina de ensaio. À direita, fotografia do trilho montado para o ensaio.

Tabela 10 – Parâmetros do ensaio de Fadiga.

Amostra	Ângulo da Solda	Carga Mínima (kN)	Carga Máxima (kN)	Frequência (Hz)
S1	30°	60	600	3
S2		50	500	3,4
S3		45	450	4
T1		40	400	4,2
S4	45°	60	600	2,6
S5		50	500	4,6
S6		40	400	5,5

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

##### Macrografias

A partir das macrografias se verifica que as soldas possuem formato de “vaso”, como exigido pela norma EN14730-1:2003. O tamanho da ZAC visível junto à superfície do bolete variou entre 15-25 mm. As macrografias das amostras analisadas são mostradas nas Figura 4.1 - Figura 4.4.

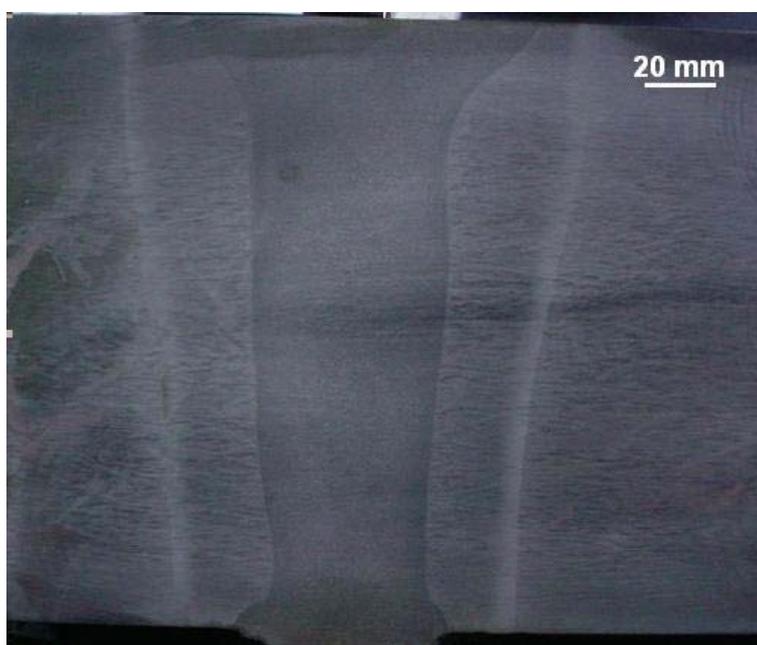


Figura 4.1 – Macrografia da Amostra T1.

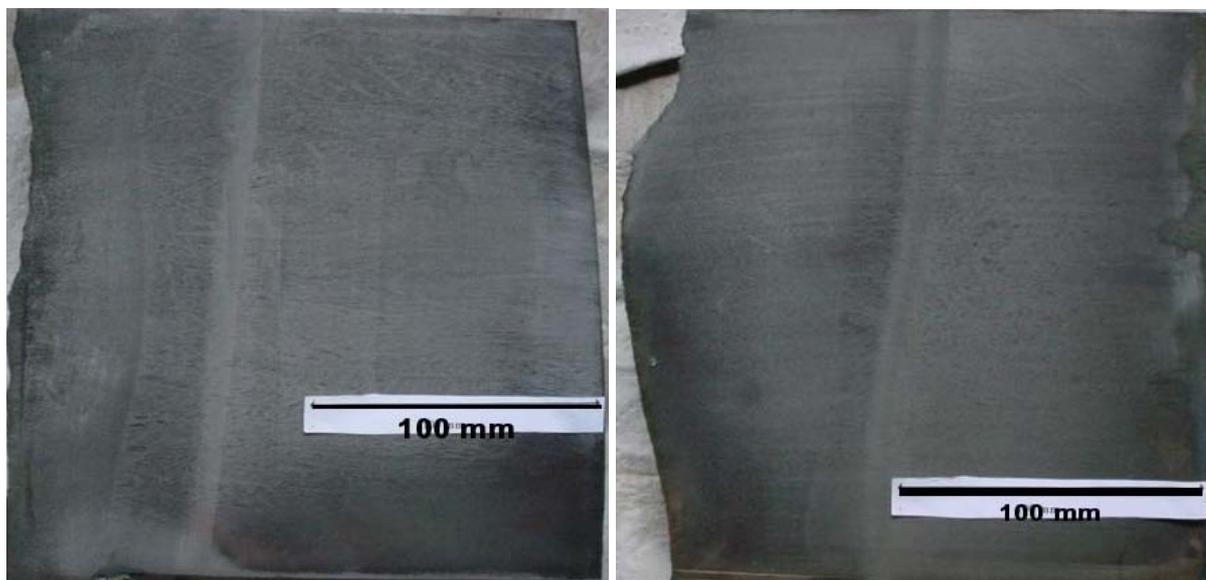


Figura 4.2 – À esquerda, macrografia da amostra S1. À direita, macrografia da amostra S2.

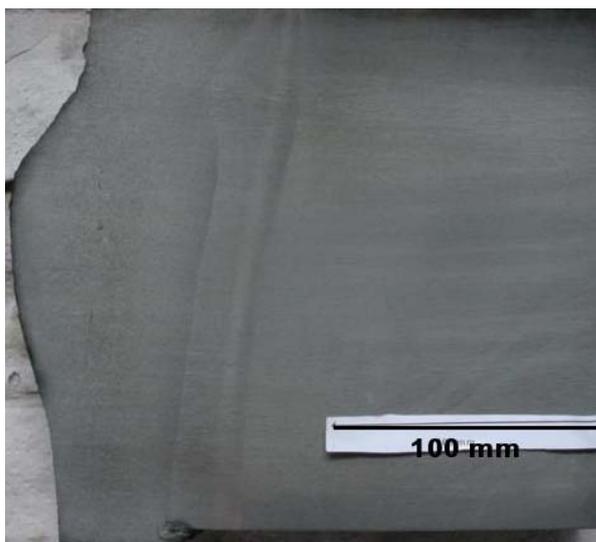


Figura 4.3 – Macrografia da amostra S3.



Figura 4.4 - Macrografia da amostra S6.

### Microestruturas

As amostras metalográficas do boleto apresentam microestrutura perlítica para todas as soldas analisadas, foram verificadas apenas variações no tamanho das colônias perlíticas, sendo a perlita mais refinada na ZAC do que no MS. Não foi verificada a presença de martensita ou bainita. De maneira geral, ainda são observados defeitos internos como inclusões, microrrechupes e porosidades. As Figura 4.5 - Figura **4.8** mostram as micrografias obtidas na região do boleto como indicado na Figura 3.7.

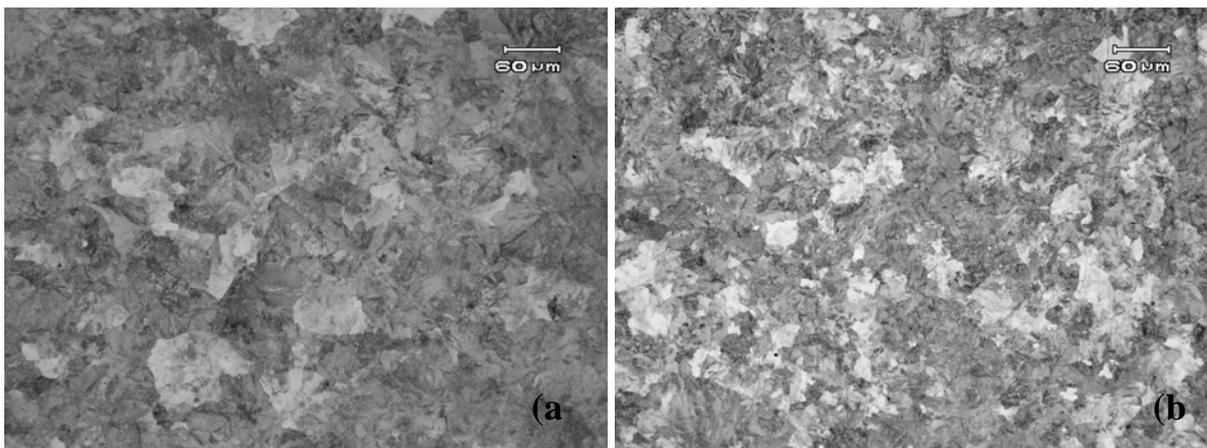


Figura 4.5 – Microestrutura perlítica na região do boleto da amostra S1. (a) microestrutura do MS. (b) microestrutura na ZAC.

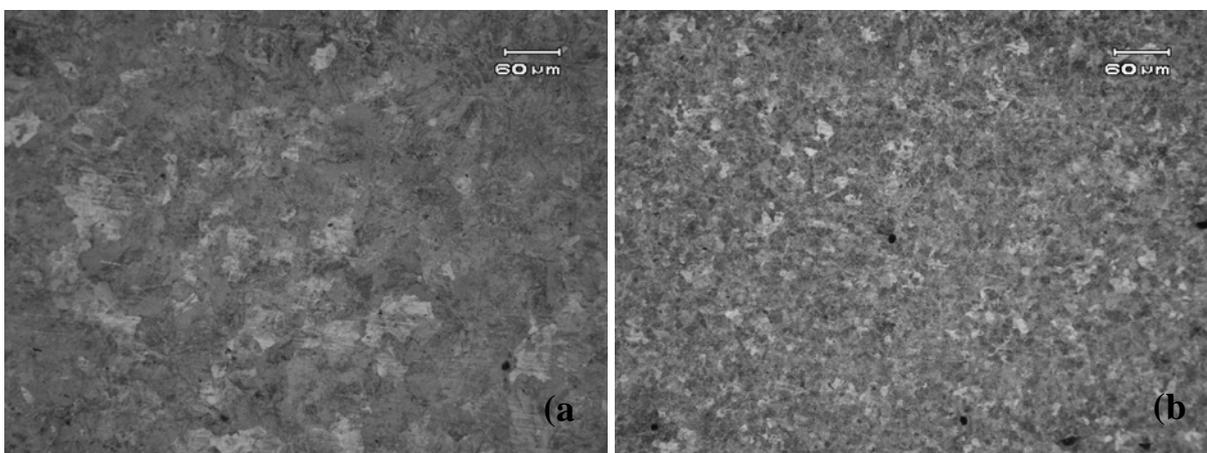


Figura 4.6 – Microestrutura perlítica na região do boleto da amostra S2. (a) microestrutura do MS. (b) microestrutura na ZAC.

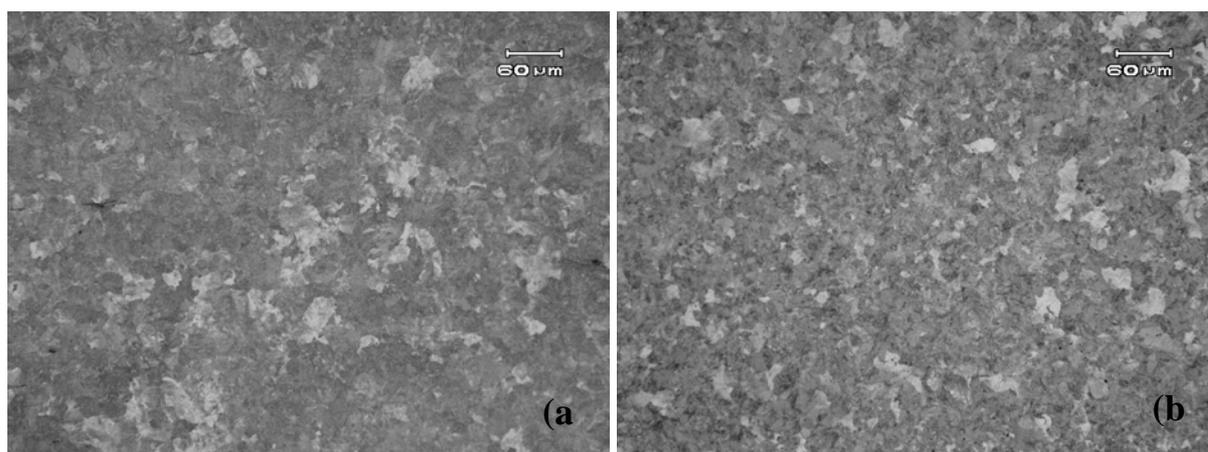


Figura 4.7 – Microestrutura perlítica na região do boleto da amostra S3. (a) microestrutura do MS. (b) microestrutura na ZAC.

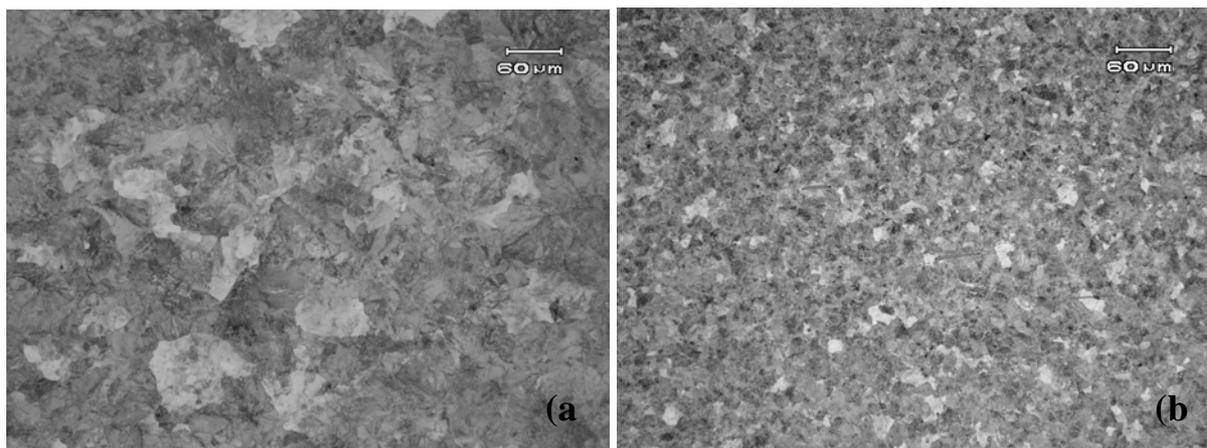


Figura 4.8 - Microestrutura perlítica na região do boleto da amostra T1. (a) microestrutura do MS. (b) microestrutura na ZAC.

As amostras retiradas da região da alma se destacam pela presença de defeitos internos como microrechupes, que na maioria das vezes se apresentam agrupados, e porosidades. A quantidade destes defeitos no colar de solda da alma é consideravelmente maior do que a verificada nas metalografias retiradas do boleto. As Figura 4.9 e Figura 4.10 mostram as micrografias obtidas na região da alma da solda, para todas as amostras as microestruturas são perlíticas sem presença de martensita ou bainita.

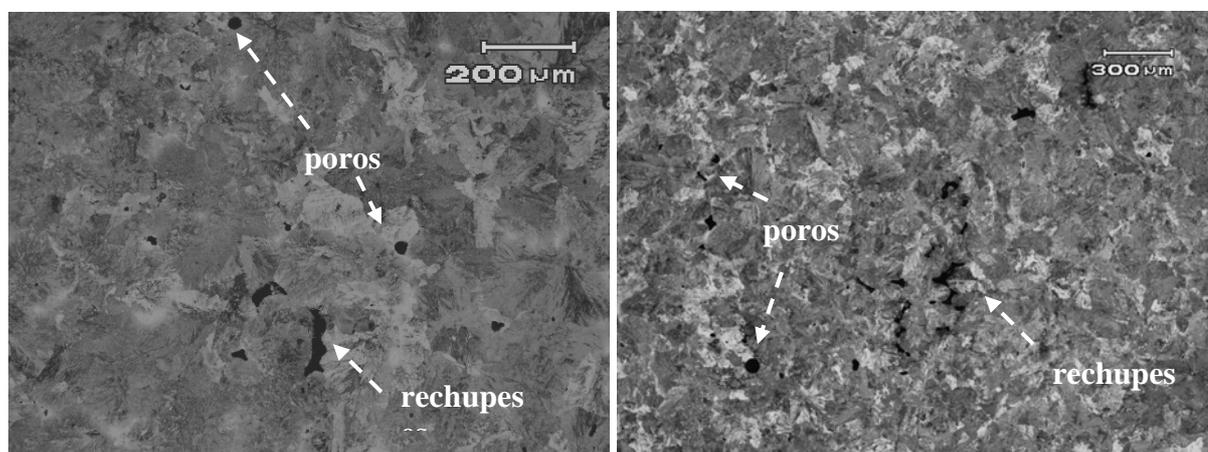


Figura 4.9 - À esquerda, microestrutura perlítica na região da alma da amostra S1. À direita, microestrutura perlítica na região da alma da amostra S2. Nas duas micrografias é possível observar a presença de defeitos internos como microrechupes e porosidades.

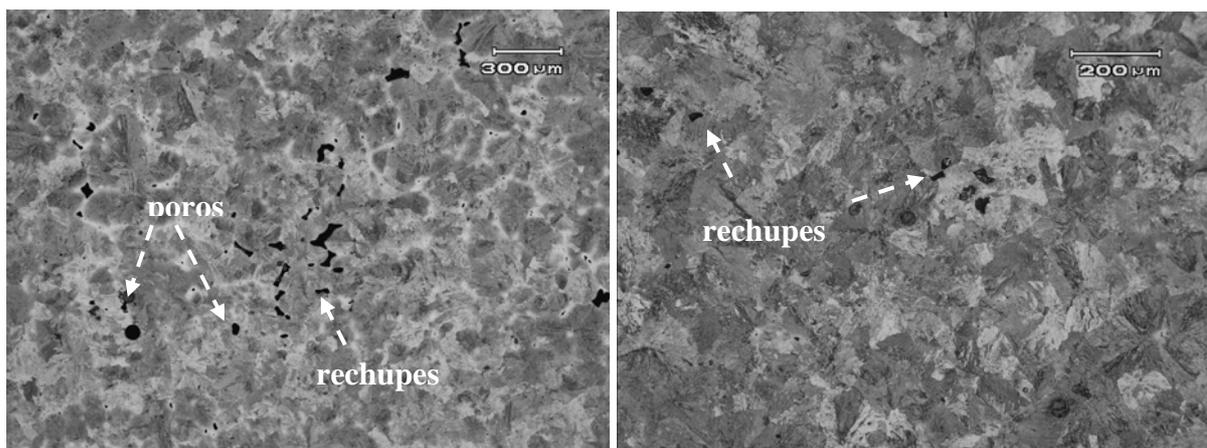


Figura 4.10 - À esquerda, microestrutura perlítica na região da alma da amostra S3. À direita, microestrutura perlítica na região da alma da amostra T1. Nas duas micrografias é possível observar a presença de defeitos internos como microrrechupes e porosidades.

### Ensaio de Dureza

A Tabela 11 apresenta os resultados dos ensaios de dureza em escala Vickers. Para as amostras do grupo 1 a dureza média da ZAC está na faixa de  $340 \pm 20 \text{HV}$  e  $310 \pm 15 \text{HV}$  para as amostras do grupo 2. O tamanho da ZAC segundo a norma EN14730-1:2003 é a região de menor dureza dentro desta zona, onde defeitos como “canoamento” possuem maior facilidade de se desenvolver (MOLLER, 2001). O tamanho da ZAC medido de acordo com a norma variou entre 10-20 mm atendendo os requisitos da mesma (menor ou igual a 20 mm) para ambos os grupos.

A Figura 4.11 mostra que para as amostras do grupo 1 quanto maior a dureza na ZAC menor é o tamanho desta região, quando medida pela norma. O inverso ocorre com o tamanho da ZAC visível que aumenta com a dureza média da ZAC. Para as amostras do grupo 2, aparentemente, os tamanhos das ZAC's visíveis e medida pela norma diminuem com o aumento da dureza média da região, no entanto, o número reduzido de amostras não permite que seja observada uma tendência.

Nos perfis de dureza mostrados nas Figura 4.12 - Figura 4.16 observa-se que a ZAC possui um máximo de dureza próximo ao metal de solda e o valor mínimo ocorre na fronteira com o metal base, no grupo 2 a amostra S6 foge a esta regra. Não foram encontradas relações entre a dureza dos trilhos e as dimensões da ZAC.

Tabela 11 – Resultados dos ensaios de dureza.

Amostra	Tamanho da ZAC (mm)		Dureza na ZAC (HV)			Dureza no MS (HV)		
	norma	visual	média	mínimo	máximo	média	mínimo	máximo
S1	12	22	340	278	389	345	295	370
S2	10	25	358	294	391	359	331	389
S3	18	15	323	245	364	363	331	391
T1	10 e 12	18 e 20	331	275	366	370	339	406
S5	16	21	324	263	351	334	309	348
S6	20 e 14	30 e 21	298	235	327	305	323	281

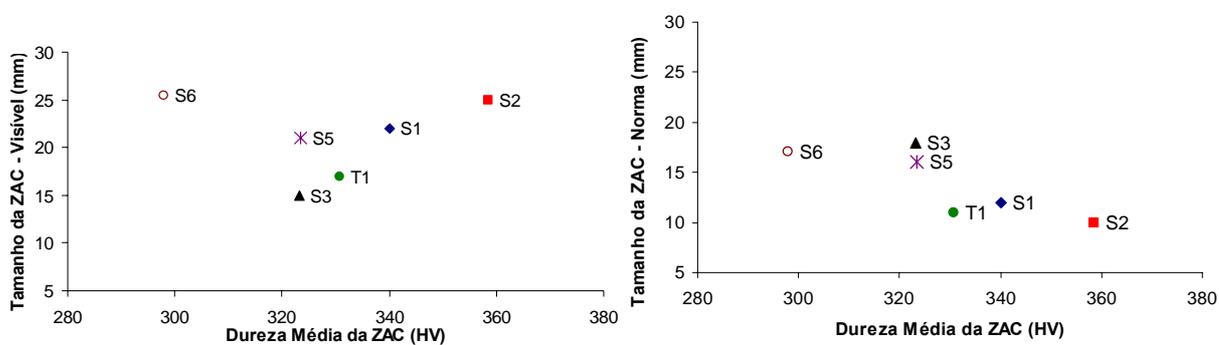


Figura 4.11 – Variação do tamanho da ZAC visual e medida pela norma EN14730-1:2003 em relação a dureza média da ZAC.

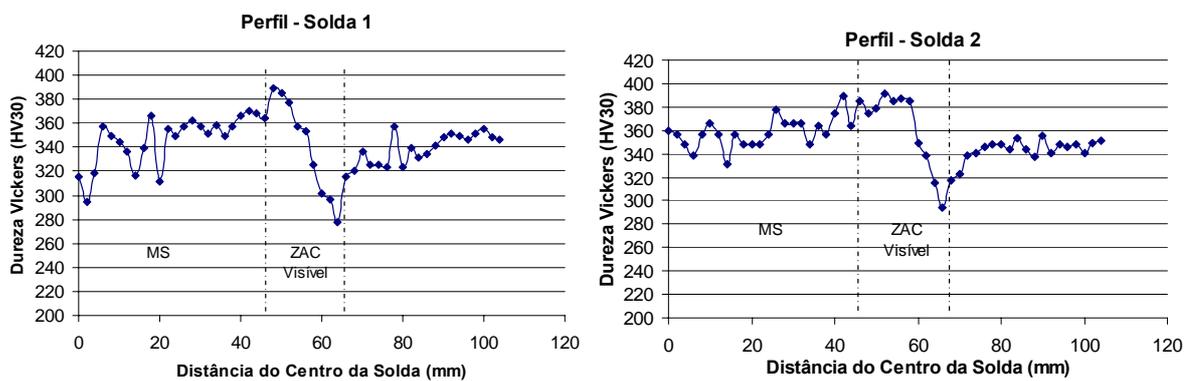


Figura 4.12 – Perfis de dureza das mostras S1 e S2.

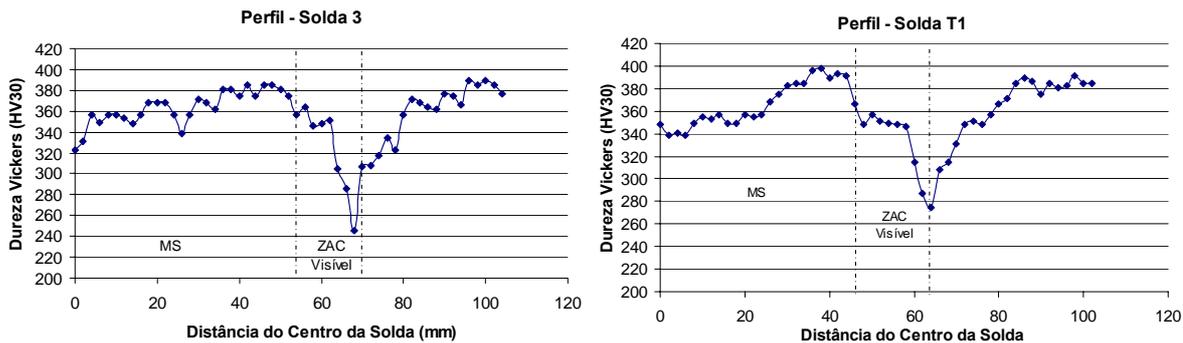


Figura 4.13 - Perfis de dureza das amostras S3 e T1.

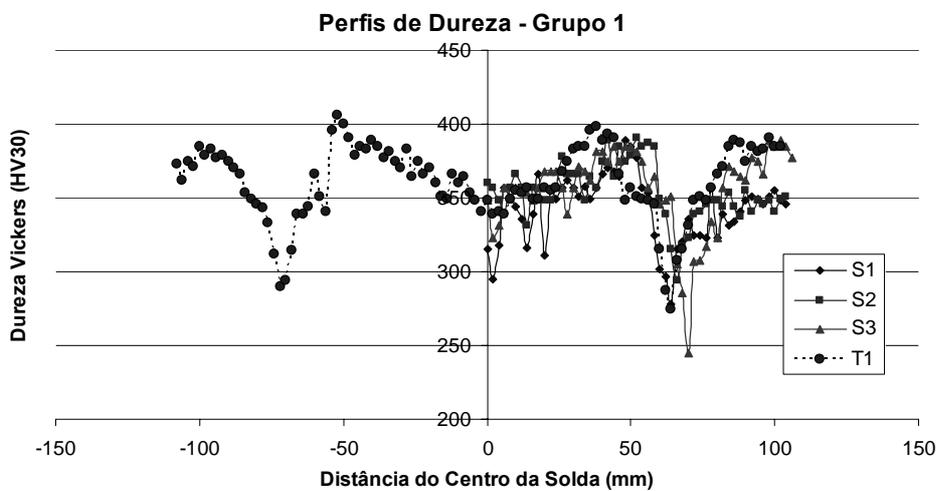


Figura 4.14 – Perfis de dureza. Amostras grupo 1.

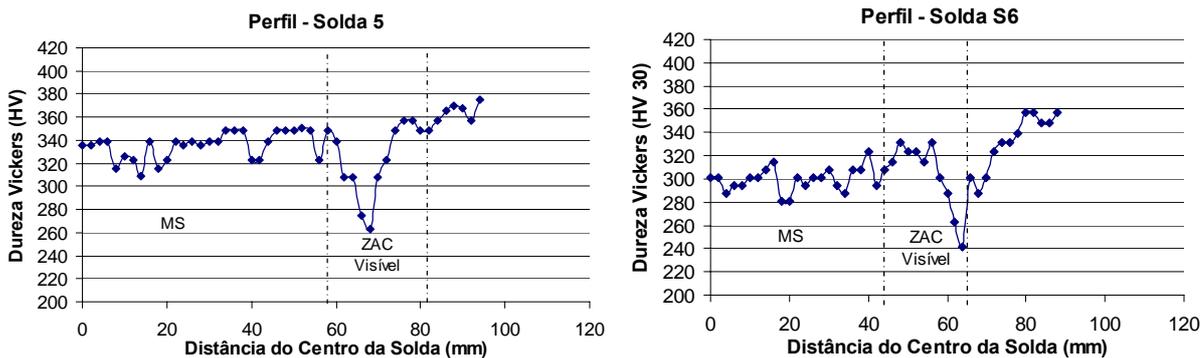


Figura 4.15 – Perfis de dureza das amostras S5 e S6.

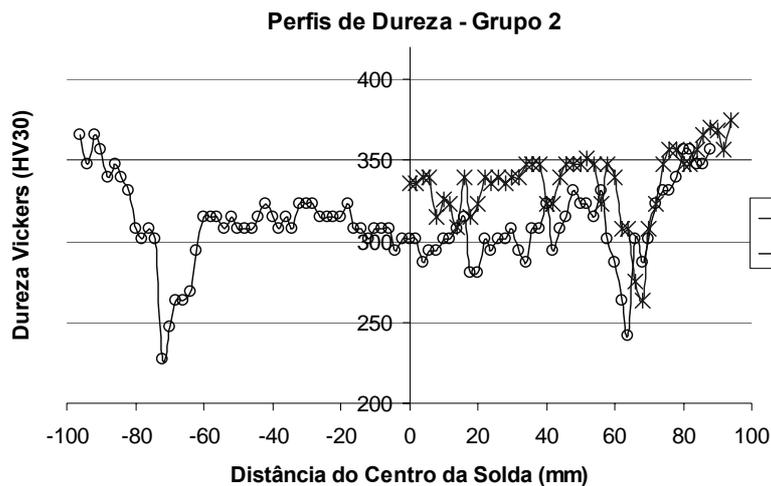


Figura 4.16 – Perfis de dureza. Amostras do grupo 2.

A dureza média na região do MS é maior do que na região ZAC, para ambos os grupos. A dureza varia entre  $355 \pm 15 \text{HV}$  para as amostras do grupo 1 e  $320 \pm 15$  para as amostras do grupo 2. Na maioria das amostras a dureza mínima ocorre no centro da solda. Aparentemente, não há relação entre a dureza do MS e tamanho da ZAC medida por norma, entretanto a Figura 4.17 sugere que um MS de maior dureza apresenta uma ZAC visível menor.

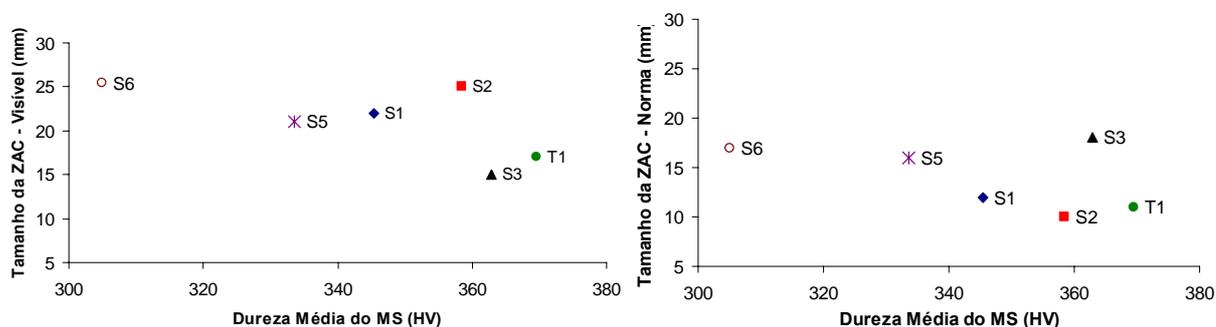


Figura 4.17 - Variação do tamanho da ZAC visual e medida pela norma EN14730-1: 2003 em relação à dureza média da do MS.

A Tabela 12 apresenta os dados de dureza convertidos para a escala Brinell onde se constata que as amostras S1, S5 e S6 não possuem dureza no MS entre 340-360HB, como sugerida pela literatura, para evitar a deformação da solda (MOLLER, 2001; OFFEREINS, 2001; MUTTON, 2003). Embora os valores de dureza obtidos na ZAC ainda não sejam os ideais, de maneira geral, as soldas do grupo 1 devem apresentar boa resistência ao defeito de “canoamento” por apresentarem ZAC estreitas e dureza recomendada no MS. De acordo com os artigos técnicos citados, as soldas analisadas do grupo 2 não possuem dureza suficiente para resistir ao “canoamento” em ferrovias de carga pesada. A dureza das soldas ainda deve sofrer

incrementos devido ao encruamento nas condições de serviço. Contudo, no caso da soldagem de trilhos desgastados pode haver aumento no tamanho da ZAC

Tabela 12 – Resultado do ensaio de dureza em escala Brinell.

Amostra	Dureza Média da ZAC	Dureza Média do MS
S1	323	328
S2	340	340
S3	306	344
T1	315	349
S5	311	321
S6	285	293

### Desempenho em Fadiga

A Tabela 13 mostra os resultados obtidos nos ensaios de fadiga. A maioria das amostras com trilhos “standard” apresentaram fratura antes de atingir  $2 \times 10^6$  ciclos solda. Somente as amostras S3, S6 e T1 ultrapassaram este patamar. A propagação das trincas de fadiga variou entre 10 e 17 mm.

Tabela 13 – Resultados dos ensaios de fadiga.

Amostra	Ângulo da Solda	Carga Máxima (kN)	Ciclos	Observações
S1	30	600	241700	Fratura na solda - Fadiga
S2	30	500	508136	Fratura na solda - Fadiga
S3	30	450	2722695	Fratura na Solda - Fadiga
T1	30	400	4774954	Sem fratura
S4	45	600	860564	Fratura na Solda - Fadiga
S5	45	500	853762	Fratura na Solda - Fadiga
S6	45	400	3253557	Sem fratura

A Figura 4.18 mostra a relação carga x números de ciclos para amostras submetidas ao ensaio de fadiga. Observa-se o limite de fadiga do processo de soldagem fica entre 400-450 kN quando os resultados são comparados sem que sejam considerados o material base e o ângulo da solda. De maneira geral, as soldas com ângulo de 45 graus apresentaram melhor desempenho nos ensaios.

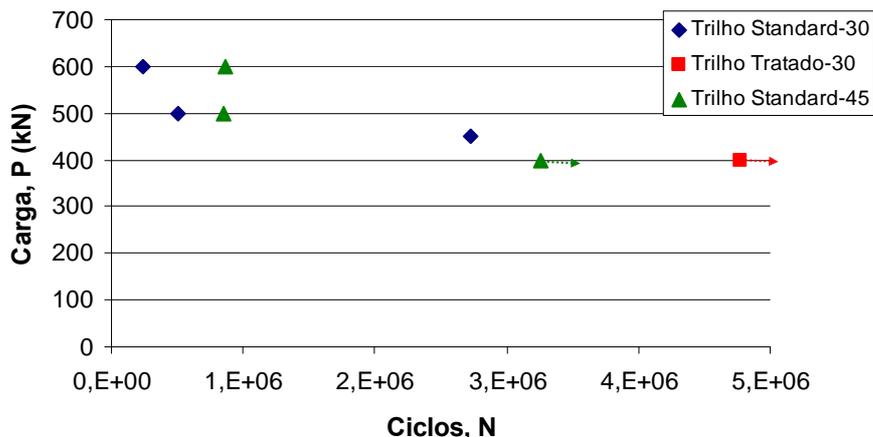


Figura 4.18 – Resultados dos ensaios de fadiga.

Os valores das cargas utilizadas durante o ensaio podem ser convertidos para tensão a partir da fórmula de Navier (DUART, 2005), também sugerida na norma ABNT NBR 11449 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1989) e mostrada na equação 6

$$P = \frac{4WS}{L - L_o} \quad , \quad \text{Eq. 6}$$

onde P é a carga em N (Newton), S a tensão em MPa, W é o módulo de resistência do trilho em mm<sup>3</sup> e L-L<sub>o</sub> é a diferença entre as distâncias dos apoios inferiores e superiores utilizados na máquina de ensaios e mostrados na Figura 3.11. A norma ABNT TB 06.100.02.2002:2002 fornece valores de W para o boleto e para o patim do perfil TR-68. Neste trabalho foi utilizado o módulo do patim (463800mm<sup>3</sup>), uma vez que na configuração do ensaio os maiores esforços ocorrem nesta região do trilho.

A Figura 4.19 mostra os resultados do ensaio de fadiga na forma de um gráfico SxN. O limite de fadiga das soldas está entre 226-255 MPa. É possível comparar o desempenho das soldas com as especificações da norma ABNT NBR 11449. A norma brasileira exige que a solda suporte 2x10<sup>6</sup> ciclos sob carregamento máximo de 230 MPa e mínimo de 50MPa.

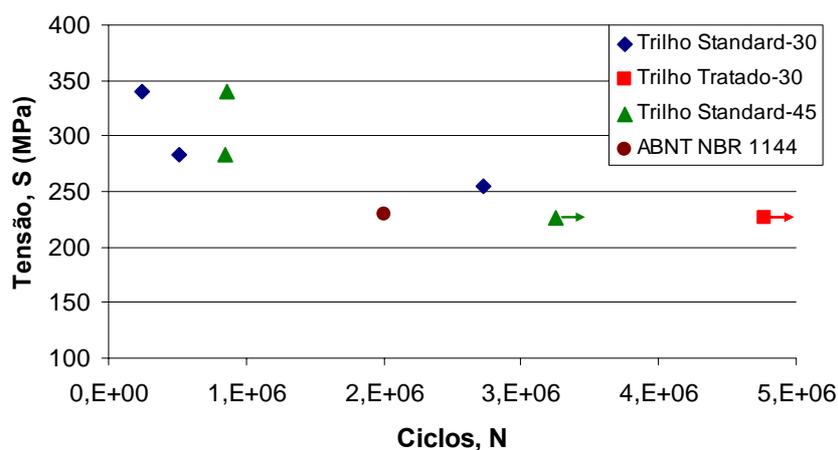


Figura 4.19 – Curvas SxN dos ensaios de fadiga comparadas com a norma ABNT NBR 11449.

O processo de solda em ângulo, seja de 30 ou 45 graus, atende a norma nacional com a amostra S3 que atinge o número de ciclos mínimo com carga máxima igual a 255 MPa, enquanto as amostras S6 e T1, apesar de ultrapassarem  $2 \times 10^6$  ciclos, foram ensaiadas com tensão de 226 MPa o que é inferior às exigências da norma, no entanto é provável que estas amostras atenderiam a norma caso a carga seja aumentada para o nível exigido, pois não apresentaram fratura com os parâmetros utilizados nos ensaios.

Os resultados dos ensaios de fadiga das soldas em ângulo foram confrontados com dados de soldas transversais encontrados na literatura. O desempenho de soldas transversais ensaiadas no LAMEF, cujos resultados não foram publicados, também é utilizado na comparação. Com os resultados dos ensaios de fadiga foram plotados gráficos considerando a tensão média ( $S_m$ ) e a amplitude de tensões ( $\Delta S$ ) utilizadas. Estes parâmetros exercem considerável influência na iniciação e propagação de defeitos de fadiga nos estágios I e III do crescimento da trinca. A Figura 4.20 mostra um gráfico  $S_m$ XN comparando a tensão média aplicada dos ensaios de fadiga com as exigências da norma ABNT e resultados de soldas transversais. Para a tensão média a norma é atendida pela amostra S3 com  $S_m$  igual a 140 MPa.

Contudo, é provável que as amostras S6 e T1 atendam as especificações caso sejam submetidos ao carregamento exigido na norma. A Figura 4.21 apresenta os dados na forma de uma curva  $\Delta S$ xN é possível observar que os resultados das soldas em ângulo são superiores às exigências da norma para amplitudes de tensões entre 204 e 229 MPa, o gráfico também mostra que os resultados das soldas em ângulos são melhores do que aqueles obtidos por Kristan (KRISTAN, 2004) que ensaiou soldas transversais com modificações no ângulo do colar da solda e soldas transversais ensaiadas no LAMEF (dados não-publicados).

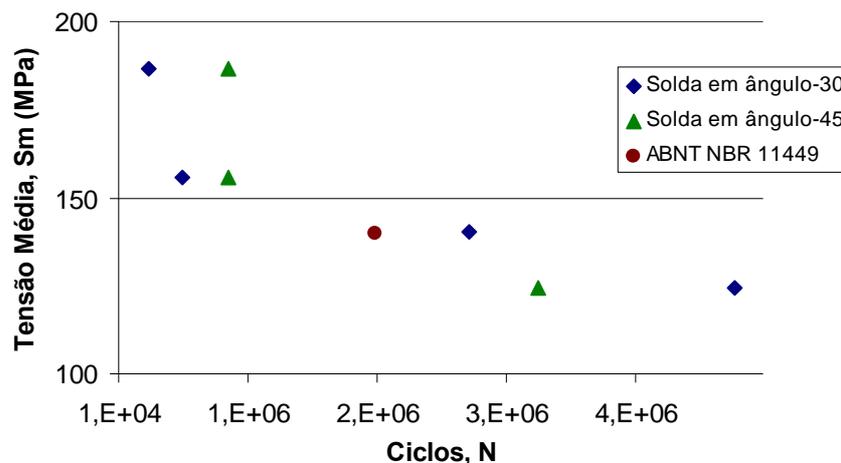


Figura 4.20 – Curvas  $S_m \times N$  comparando os resultados dos ensaios de fadiga das soldas em ângulo com a norma ABNT NBR 11449.

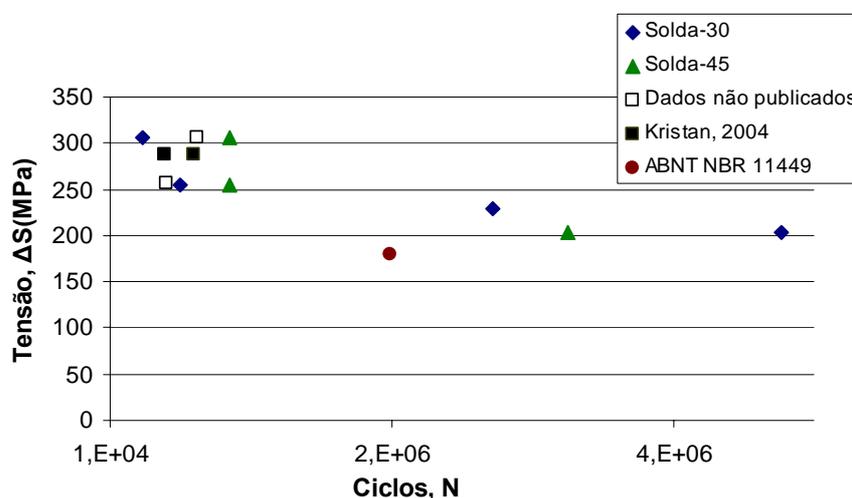


Figura 4.21 – Curvas  $\Delta S \times N$  comparando os resultados dos ensaios de fadiga das soldas em ângulo com a norma ABNT NBR 11449 e resultados de soldas transversais.

A Figura 4.22 mostra que a solda em ângulo possui desempenho igual ou superior às soldas transversais ensaiadas em condições de carregamento semelhantes, como os dados levantados por Duarte (DUART, 2005) e as soldas testadas no LAMEF.

Sun, (SUN, 2002) utilizou altas cargas durante o ensaio para assegurar o término dos ensaios até  $2 \times 10^6$  ciclos. De acordo com o autor, ainda assim, os resultados podem ser comparados com o comportamento da solda em condições de serviço, desde que não ocorra fratura no regime de fadiga de baixo ciclo ( $10^4$  ciclos). As soldas analisadas no TTCI apresentam resistência à fadiga levemente superior às soldas em ângulo analisadas.

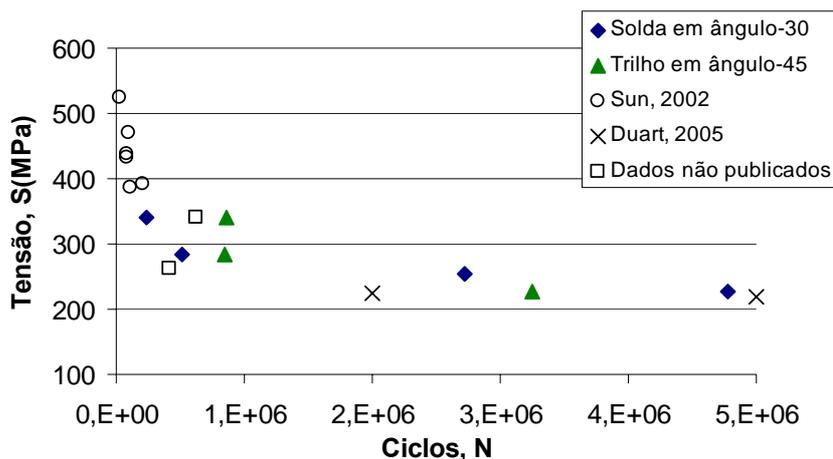


Figura 4.22 - Curvas SxN comparando os resultados dos ensaios de fadiga das soldas em ângulo com dados de soldas transversais.

Na Figura 4.23 as soldas em ângulo são comparadas com a curva de fadiga da norma BSI 7608: 1993 classe F2. Observa-se que os resultados são superiores a curva média mínima apresentada pela norma, independente do ângulo e do material base, a superioridade da solda em ângulo é maior no regime de alto ciclo. A figura 4.21 mostra uma comparação entre o processo de solda em ângulo analisado e as normas BSI e ABNT.

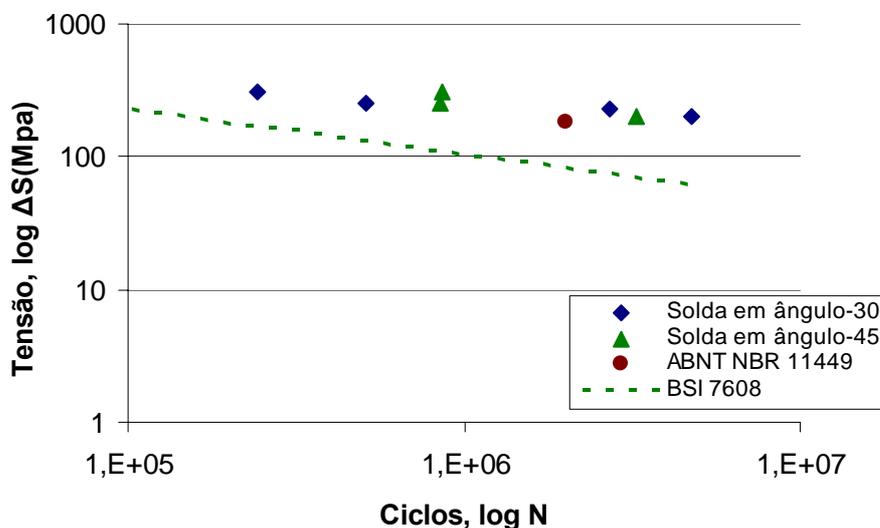


Figura 4.23 – Comparação entre a curva SxN de projeto da norma BSI 7608 classe F2 (curva média) e os resultados das solda em ângulo de 30 e 45 graus.

A norma EN 14730-1:2003 não especifica o nível de carregamento utilizado nos ensaios, no entanto o processo deve ser rejeitado caso haja falha com menos de  $5 \times 10^6$  ciclos em qualquer amostra. Além disso, um dos métodos de avaliação da resistência à fadiga sugeridos pela norma requer dez amostras para obtenção da curva S-N. Assim, o processo de solda em ângulo não conseguiu atender as exigências da referida norma com as amostras analisadas.

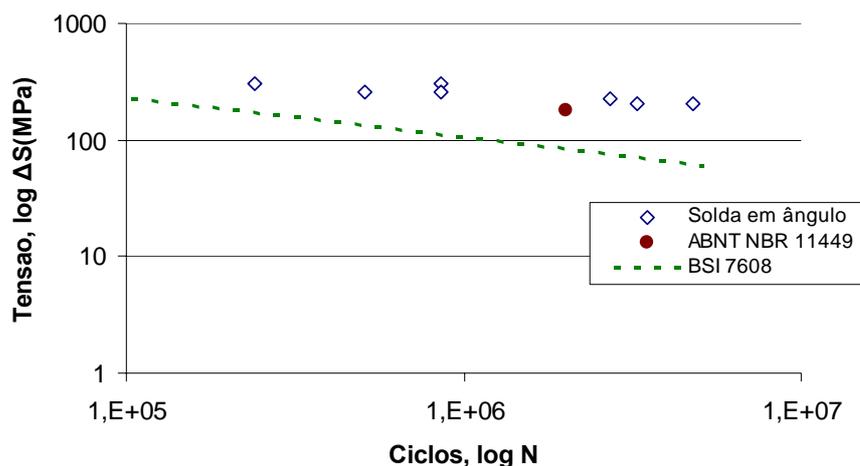


Figura 4.24- Comparação entre a curva SxN de projeto da norma BSI 7608 classe F2 (curva média), requisitos da norma ABNT NBR 11449 e os resultados das solda em ângulo.

As soldas em ângulo apresentaram limite de fadiga de 226 MPa para a solda de trilho standard com junta em ângulo de 45 graus e para a solda do trilho tratado com junta em ângulo de 30 graus. A solda em trilho standard com junta em ângulo de 30 graus atingiu um limite de 255MPa. Genericamente, as soldas em ângulo apresentam bons desempenhos em fadiga e para certas faixas de carregamento são superiores às soldas transversais, os resultados dos ensaios de fadiga são aprovados pelas normas ABNT NBR 11449 e BSI 7608:1993, contudo os limites de fadiga supracitado devem ser considerados como aproximações, considerando a dispersão inerente a este tipo de ensaio e a ausência de uma análise estatística dos dados em virtude do número reduzido de amostras. Além disso, como será visto na próxima seção, algumas melhorias no processo de soldagem precisam ser realizadas para que a solda aluminotérmica em ângulo possa ser aprovada pela norma EN14730-1:2003.

### Causas das Falhas

Todas as amostras que romperam apresentaram fraturas verticais. As falhas iniciaram a partir de concentradores de tensões gerados por defeitos de soldagem como a falta de fusão no pé do colar ou no patim (amostra S1), ou bordamento de solda (flashing/finning), na interface alma-patim (amostras S2 e S3). Em todas as amostras foram encontradas inclusão de escória e fragmentos de material proveniente da lama cerâmica (ou do molde) utilizados no processo de soldagem junto à região de início da falha. As figuras da execução das soldas de 45 graus apresentadas na seção 3.1 mostram a ocorrência de incrustação de material cerâmico no colar da solda, o que também pode ter diminuído o desempenho em fadiga destas amostras.

Na análise de uma nova geometria para o colar da solda, Kristan (KRISTAN, 2005) creditou a um erro no acabamento dimensional dos moldes a origem de defeitos, semelhantes aos encontradas nas amostras da solda em ângulo, o fraco desempenho da nova concepção. De acordo com o autor a falta de experiência na fabricação do novo molde incentivou as falhas prematuras. Outros autores também (TERASHITA, 2003 e SKYTTEBOL, 2005) afirmam que estes defeitos superficiais incentivam a ocorrência de falhas transversais, principalmente em regimes de alta carga e baixo ciclo.

A norma EN14730-1:2003 sugere a rejeição do processo de soldagem no caso de ocorrência de falha a partir de uma falta de fusão.

O processo precisa receber modificações no projeto/fabricação dos moldes, de maneira que estes possam permanecer próximos ou encostados aos trilhos durante a soldagem para evitar o bordamento da solda e a incrustação da lama cerâmica. Além disso, a utilização de materiais cerâmicos de melhor qualidade, com maior estabilidade química em altas temperaturas, contendo adições de zirconita evitaria a incrustação de material no colar da solda (LEE, 2006), melhorando os resultados dos ensaios de fadiga, que poderiam ser melhores sem a incidência dos defeitos superficiais. Os defeitos internos verificados na caracterização metalográfica também podem ser atenuados com a utilização dos parâmetros de soldagem sugeridos por Chen (CHEN, 2006), embora não tenham sido a causa na falha das amostras analisadas.

As análises em microscópio eletrônico de varredura (MEV) revelam que a clivagem é o micromecanismo de fratura predominante, no entanto, também foi verificada a presença de coalescimento de microcavidades (dimples) no ponto de início da falha (amostra S1 e S2) ou entre as clivagens (amostra S3).

As características metalográficas nas regiões de início da falha são semelhantes para todas as amostras analisadas. As microestruturas são compostas por matriz perlítica, contudo observa-se a existência de ferrita nos contornos das colônias perlíticas ou ferrita livre localizada no ponto de início. A presença da ferrita pode justificar a formação de dimples observados nas análises fractográficas em MEV. As Figura 4.25 -Figura 4.34 mostram as características da fratura, a análise fractográfica, análises em microsonda EDS e a microestrutura no início da falha das amostras analisadas.

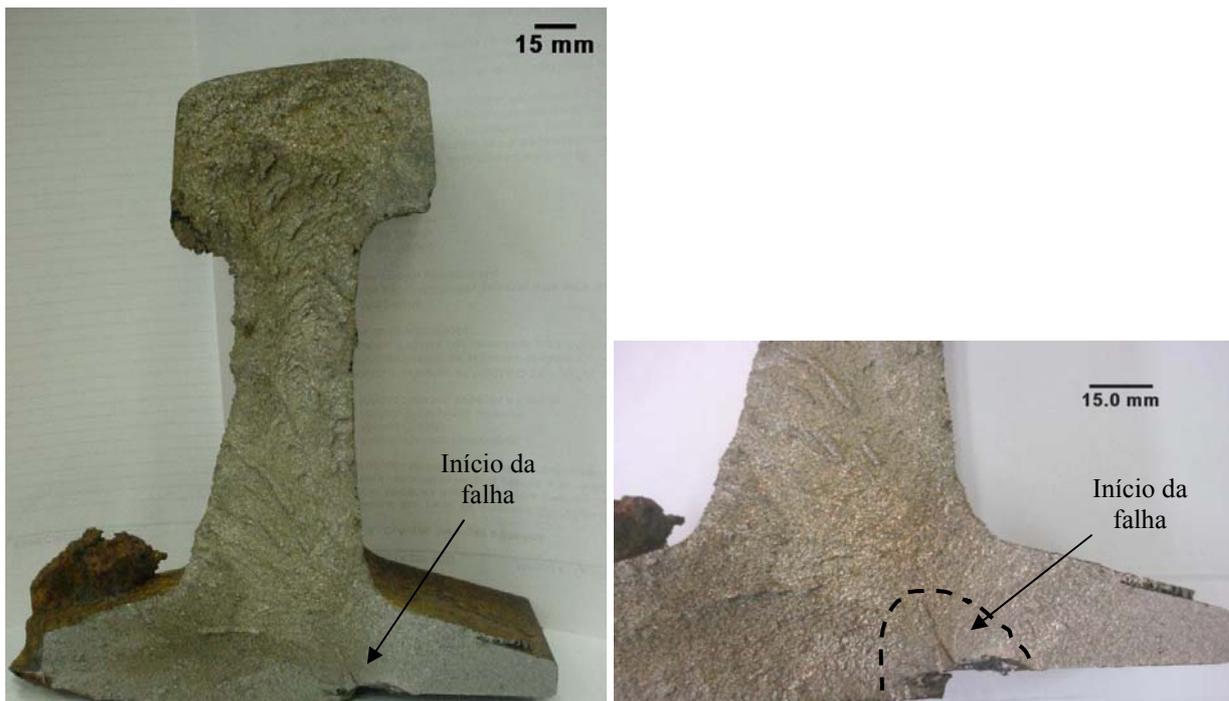


Figura 4.25 – Fotografias da superfície de fratura da amostra S1. À direita, detalhe da região de início da falha.

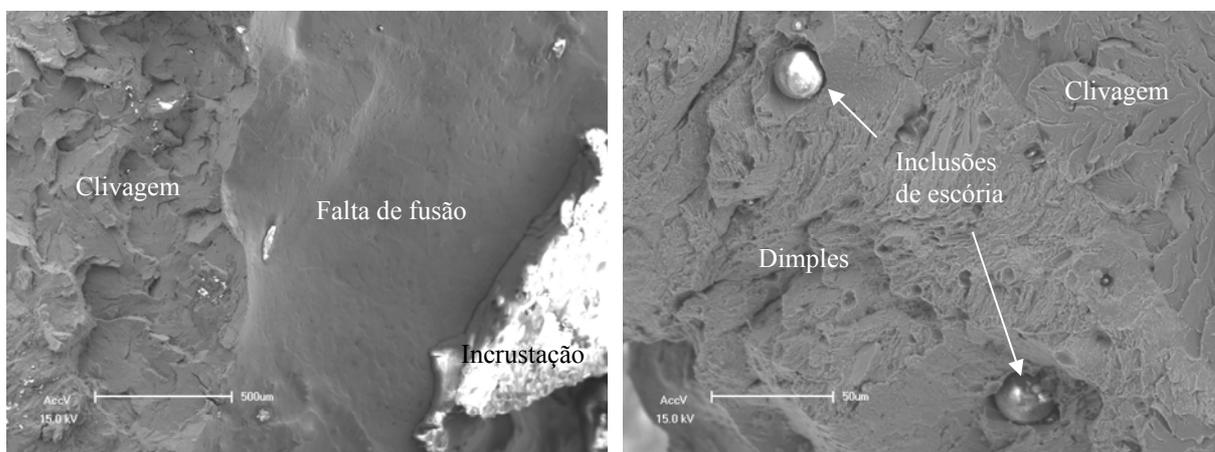


Figura 4.26 - Fractografias da amostra S1 obtidas em MEV. À esquerda, observa-se o micromecanismo de clivagem, a região da falta de fusão e material incrustado no colar da solda. À direita, além da clivagem observa-se a presença de dimples e inclusões de escória.

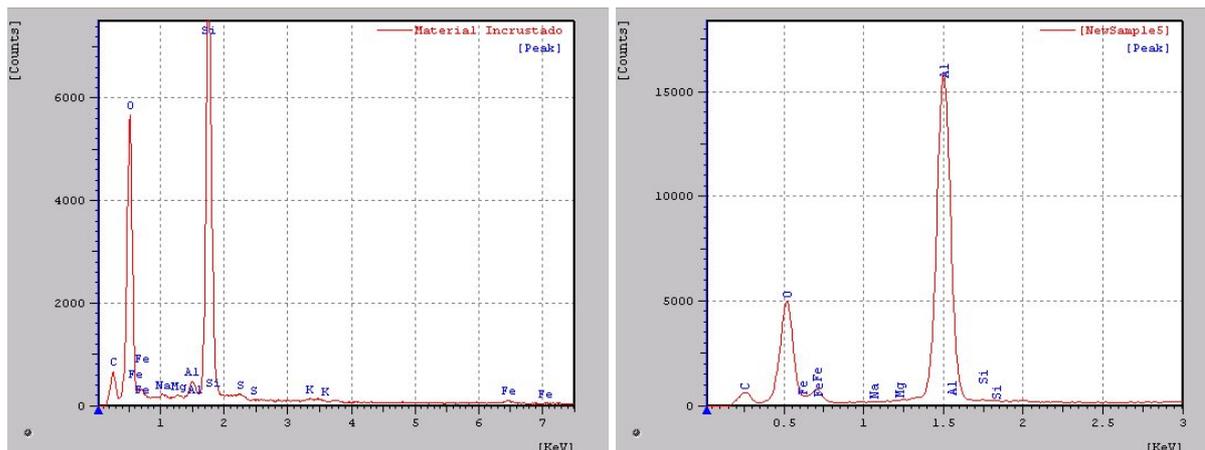


Figura 4.27 – Espectros de microsonda EDS. À esquerda, espectro obtido na incrustação mostrada na figura 47 revelando a presença de material cerâmico proveniente do molde. À direita, espectro das inclusões observadas na Figura 4.26 indicando a presença de inclusões de escória (alumina).

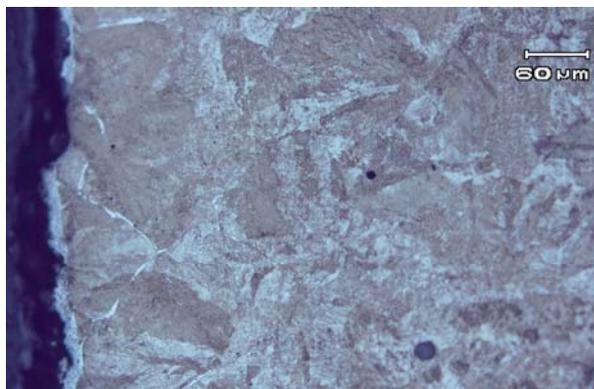


Figura 4.28 – Micrografia da região de início da falha da amostra S1. Observa-se a presença de uma linha de ferrita e ferrita nos contornos perlíticos.

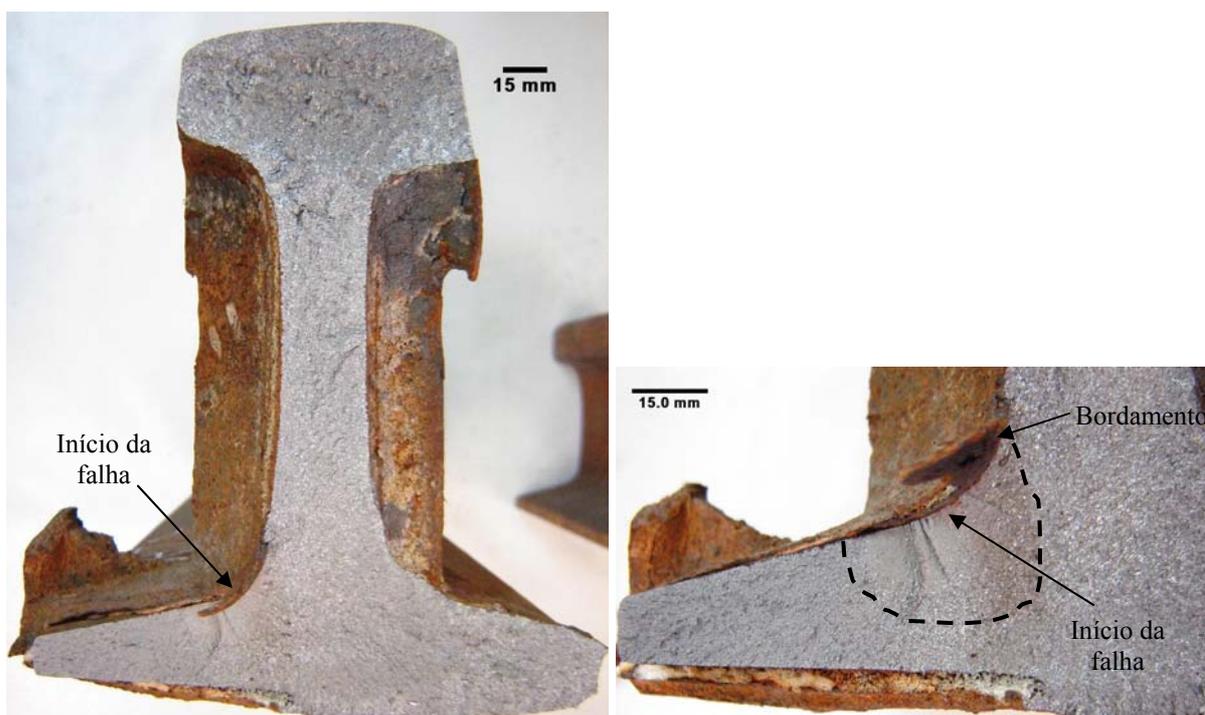


Figura 4.29 - Fotografias da superfície de fratura da amostra S2. À direita, detalhe da região de início da falha e a presença do defeito tipo bordamento da solda.

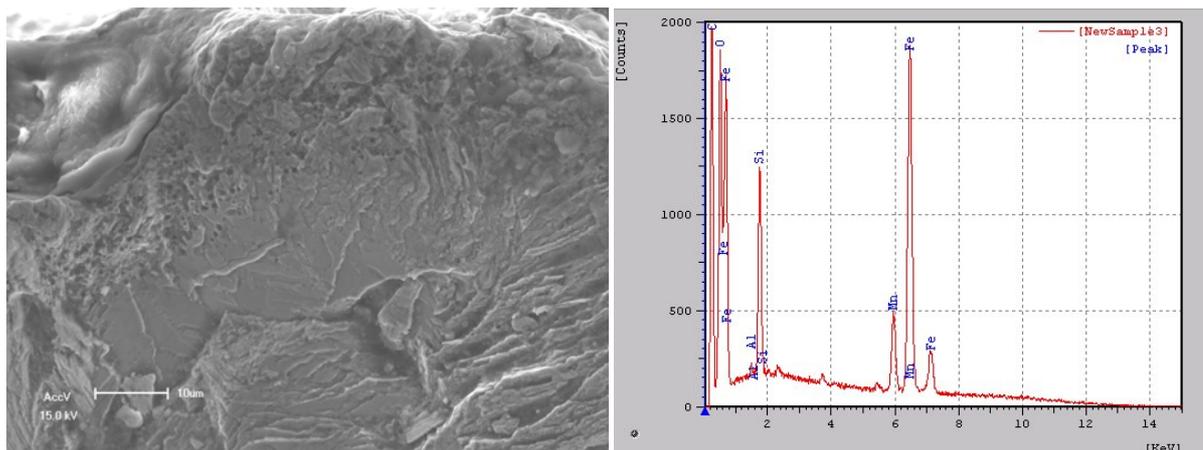


Figura 4.30- À esquerda, fractografia obtida na região de início da falha da amostra S2 onde se observa, além do micromecanismo de clivagem, a presença de microporosidades e inclusões . À direita, espectro de inclusões de aluminossilicatos presentes na região de início da falha.

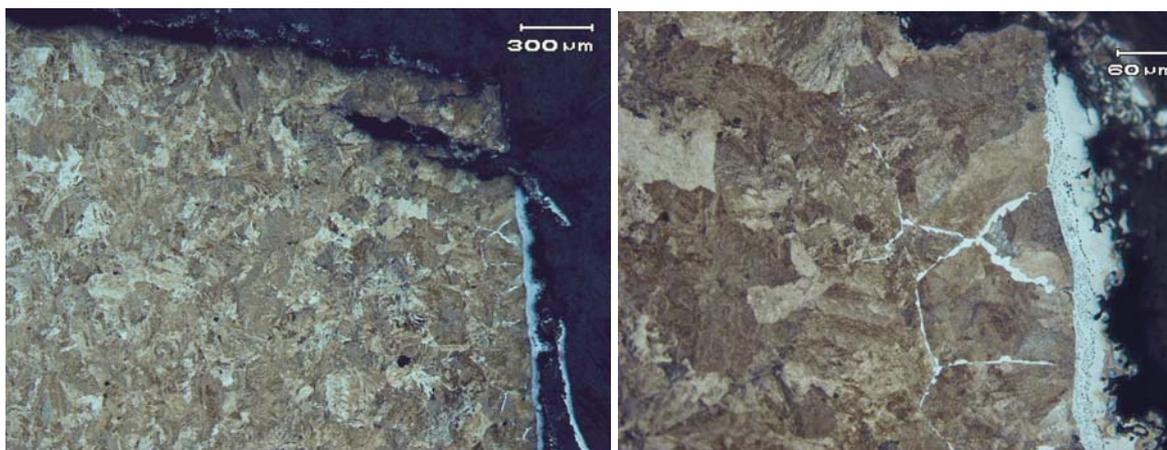


Figura 4.31 – Micrografias obtidas junto ao início da falha da amostra S2 onde se verifica a presença de ferrita em contornos perlíticos e ferrita livre.

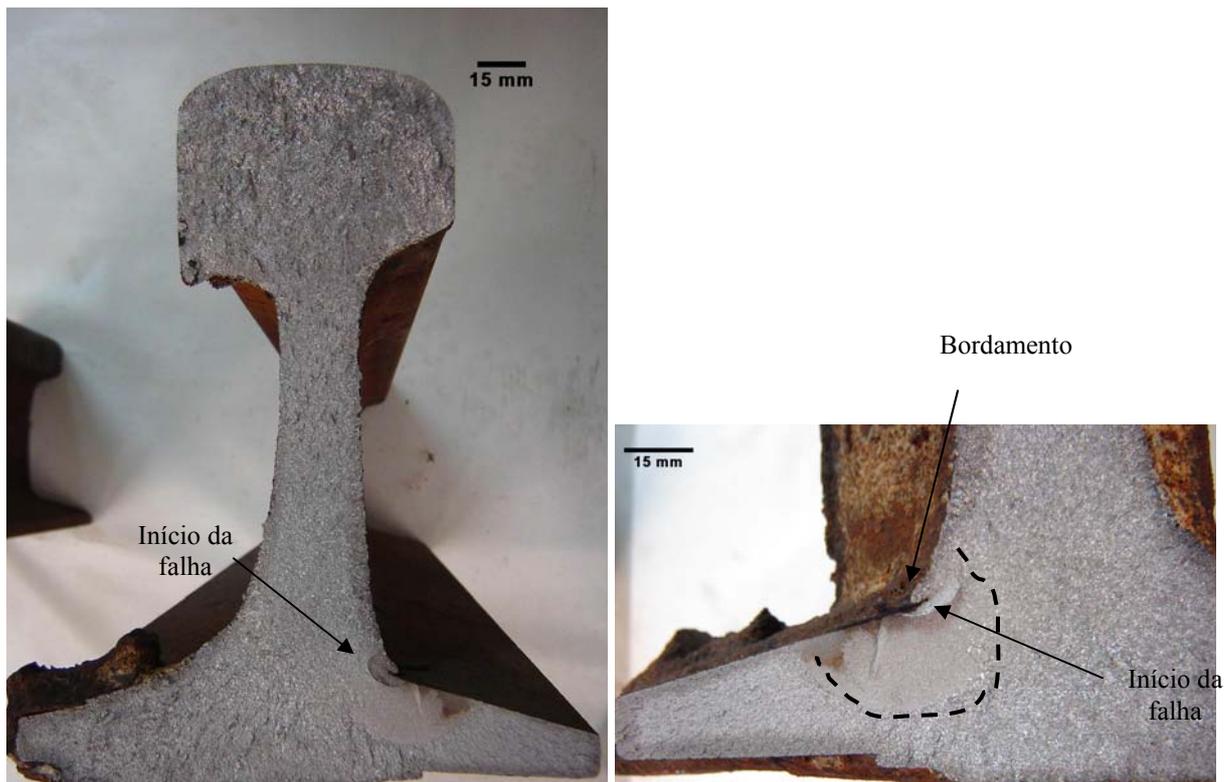


Figura 4.32 - Fotografias da superfície de fratura da amostra S3. À direita, detalhe da região de início da falha e a presença do defeito tipo bordamento da solda.

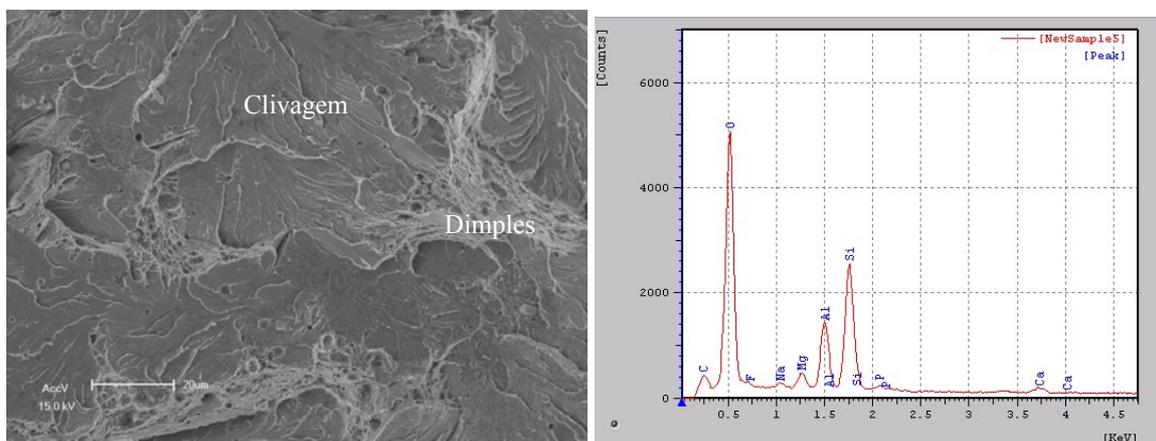


Figura 4.33 – À esquerda, fractografia obtida em MEV da amostra S3 indicando a presença de clivagem e dimples. À esquerda, espectro de microsonda EDS indicando a presença de material cerâmico no início da falha.

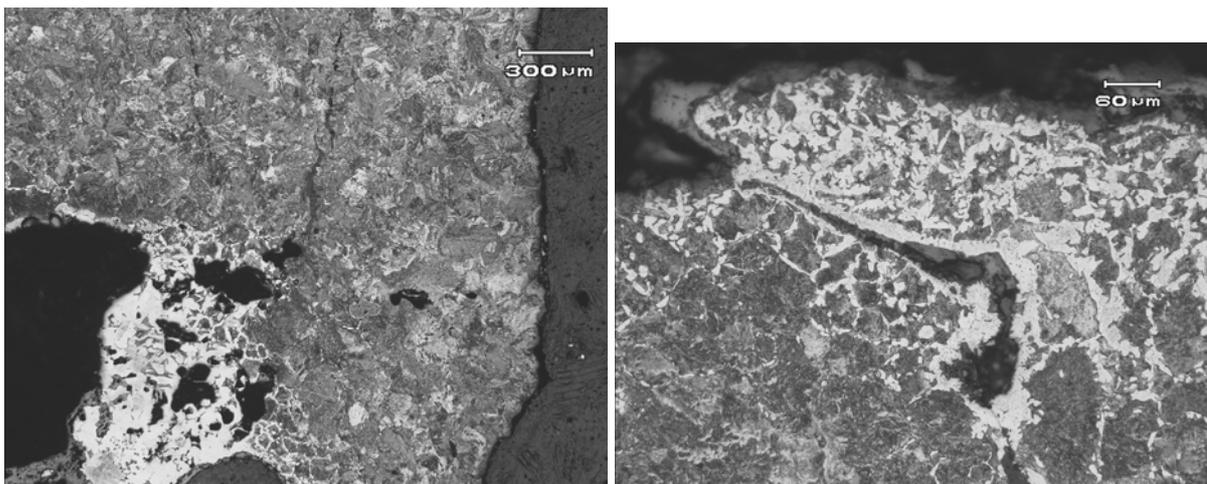


Figura 4.34 – Micrografias obtidas na região de início da falha da amostra S3 onde se observa a presença de ferrita livre e ferrita nos contornos perlíticos.

## 5. CONCLUSÕES

As análises realizadas para avaliar características metalúrgicas e mecânicas do processo de solda aluminotérmica com ângulo de 30 e 45°, permitem as seguintes conclusões:

- As soldas em ângulo 45 graus em trilhos standard e 30 graus trilho tratado apresentaram limite de fadiga de aproximadamente 226 MPa. A solda em trilho standard com junta em ângulo de 30 graus atingiu um limite de aproximadamente 255MPa. Para o mesmo nível de carregamento as juntas de 45 graus apresentam melhores resultados.

- A resistência à fadiga das soldas aluminotérmicas em ângulo avaliadas neste trabalho atende às exigências da norma NBR 11449 e BSI 7608:1993.

- A resistência em fadiga das soldas foi diminuída, de maneira significativa pela presença de defeitos superficiais de soldagem do tipo falta de fusão e bordamento da solda (flashing/finning) na região do patim e na alma. Esses defeitos são potenciais concentradores de tensões e exerceram grande influência na vida em fadiga das soldas

- A microestrutura da solda é perlítica com variações no tamanho da colônia perlítica entre a zona fundida e zona afetada pelo calor. Nas regiões de falha há presença de ferrita livre e ferrita nos contornos das colônias de perlita. As soldas apresentam defeitos internos como porosidade e rechupes, estes defeitos apresentam-se mais concentrados na região da alma do que no boleto.

- O processo de solda em ângulo de 30 graus produz uma zona afetada pelo calor estreita, variando entre 10 e 18 mm, no entanto, os valores médios de dureza nesta região estão levemente abaixo do ideal para que o defeito tipo canoamento seja erradicado, considerando-se as condições de tráfego de uma ferrovia de carga pesada.

- A soldagem aluminotérmica em ângulo possui grande potencial para ser utilizada como uma nova técnica na soldagem de trilhos. Uma mistura aluminotérmica de maior dureza, em conjunto com a ZAC reduzida obtida no processo, deve tornar a junta mais resistente ao canoamento. Melhorias no procedimento de soldagem, na qualidade e dimensional do molde devem proporcionar aumentos significativos no desempenho em fadiga da solda em ângulo, possibilitando que o processo seja aprovado por outras normas internacionais de engenharia.

## 6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

O potencial da solda aluminotérmica em ângulo pode ser avaliado através de outras abordagens sugeridas a seguir:

- Avaliação das soldas em ângulo em ferrovias de circuito fechado.
- Agregar à solda em ângulo as modificações na geometria do colar da solda sugeridas por Kristan (KRISTAN, 2004).
- Relacionar o desempenho em fadiga das soldas com as durezas da ZAC e do MS para amostras ensaiadas sob o mesmo carregamento.
- Modelar o desempenho das soldas em ângulo através de análises por elementos finitos.
- Avaliar a solda em ângulo em trilhos com perfis diferentes do TR-68.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- AFGHOUL, A.C. **Coiled Tubing: The Next Generation**. Oilfield Review Magazine. [www.slb.com/media/services/resources/oilfieldreview/ors04/spr04/04\\_coiled\\_tubing.pdf](http://www.slb.com/media/services/resources/oilfieldreview/ors04/spr04/04_coiled_tubing.pdf)  
Acessado em 5/09/2007.
- AGLAN, H.A. et al. **Mechanical and fracture behavior of bainitic rail steel**. Journal of Materials Processing Technology, Volume 151, Issues 1-3, 1 September 2004, pp. 268-274.
- ANTF, **Associação Nacional de Transporte Ferroviário** <http://www.antf.org.br>. Acesso em 16/07/2007.
- ASM METALS HANDBOOK VOL 6. Welding, Soldering and Brazing. ASM International.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11449**: Trilho “Vignole” - Solda - Determinação da resistência a fadiga, Rio de Janeiro, 1989.
- BEER, A. Série de reportagens “**O Brasil nos trilhos**”. Rádio BandNews FM. Rede Bandeirantes, 2006.
- BRANCO, C.M. **Fadiga em Estruturas Soldadas**. Fundação Calouste Gulbekian, Lisboa. 1986.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE, Pesquisa Ferroviária CNT 2006. Brasília, 2007.
- CHEN, Y et al. **Weld Defect Formation in Rail Thermite Welds**. JRRT44 IMechE 2006 Proc. IMechE Vol. 220 Part F: J. Rail and Rapid Transit
- DA SILVA, A.A.M. **Caracterização Mecânica e Metalúrgica de Segmentos de Trilhos Soldados pelo Processo Thermit SOWOS**. Trabalho de Diplomação, DEMET, UFRGS, 1998.
- DA SILVA, A.A.M et al. **Análise de Falha e Caracterização Metalúrgica de um Segmento de Trilho Soldado por Aluminotermia**. Jornadas SAM 2000 - IV Colóquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga, pp. 799-806, agosto de 2000.
- DUART, J.M et al. **Carriles para Alta Velocidad. Comportamiento en Fatiga**. Revista de Metalurgia de Madri 41. pp 66-72, 2005.
- DUVEL, J. e MUTTON, P. **Rail Requirements for 40 tonne Axle Loads**. 8ª Conferencia Internacional de Ferrovias de Carga Pesada, Rio de Janeiro, Brasil, 2005.
- EN 14730-1:2003. **Welding of Rails – Approval of Aluminothermic Welding Processes**. CEN/TC256/SCI/WG4
- FIESP - **Federação das Indústrias do Estado de São Paulo** <http://www.fiesp.com.br/infra-estrutura/distribuicao.aspx> - Acessado em 15/10/2007.

FRY, G.T, LAWRENCE, F.V., ROBINSON, A.R. **A Model for Fatigue Defect Nucleation in Thermite Rail Welds**. Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures, 6. Vol 19, pp. 655-668, 1996.

**Introduction to Coiled Tubing Drilling** . www.lealttd.com. Acessado em 5/06/2007.

JEONG, D.Y. **Progress in Rail Integrity Research**. DOT/FRA/ORD-01/18, 2001.

KLK - [http://www.klk.es/home/ing/soldar\\_hierro/principio.htm](http://www.klk.es/home/ing/soldar_hierro/principio.htm) - Acessado em 8/10/2007.

KRISTAN, J. **Thermite Weld Progress**. Technology Digest Magazine (TD-04-015). Outubro de 2004.

KRISTAN, J. **Evaluation of Advanced Rail Steels and Improved Weldin Techniques under 39 ton Axle Loads at the Facility for Accelerated Service Testing (FAST), Transportation Technology Center**. 8ª Conferencia Internacional de Ferrovias de Carga Pesada, Rio de Janeiro, Brasil, 2005.

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 19/06/2007.

LEE, F.T. **Managing Thermit Quality for Railroads**. Welding Journal, 85. Janeiro de 2006.

MARICH, S. **Major Advances in Rail Technologies Achieved in the Past 10-20 Years**. Pp. 485-497, 1994.

MOLLER, R. et al **Improving the Performance of Aluminothermic Rail Welding Technology, through Selective Alloying of the Rail Head** Presented at the 7th International Heavy Haul Conference, Brisbane 2001.

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.

MYERS, J et al. **Structure and Properties of Thermite Welds in Rails**. Welding Journal, 61 (Research Supplement). pp 258s-268s, 1982.

NENAD, I et al. **Microstructural and Mechanical Characterization of Postweld Heat Treated Thermite Weld in Rails**. Materials Characterization 43:243–250 (1999).

SILVA, M. J. Artigo “Cortando Caminhos“. Revista Metalurgia e Materiais nº 505. Vol. 56. pp 742-750, 2000.

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

SKYTTEBOL, A. JOSEFSON, B.L. RINGSBERGER, J.W. **Fatigue Crack Growth in a Welded Rail Under the Influence of Residual Stresses**. Engineering Facture Mechanics 72. pp 271-285, 2005

- SUN, J. **Bending Fatigue Properties of Rails Welds**. Tecnology Digest – TD02-026. Novembro, 2002.
- OFFEREINS, G.A. MUTTON, P.J. **Recent Experiences with the Performance of Aluminothermic Rail Welds under High Axle Loads**. 13<sup>o</sup> International Rail Track Conference, Canberra, Austrália, 2001.
- ORRINGER, O. MORRIS, J.M. **Applied Research on Rail Fatigue in the United States**. Theoretical and Applied Fracture Mechanics 1, pp 23-49, 1984.
- ROLDÓ, L. **Análise de Tensões Residuais em Trilhos Ferroviários**. Dissertação, PPGEM, UFRGS, 1998.
- TERASHITA, Y. TATSUMI, M. **Analysis of Damaged Rail Weld**. QR-RTI, Vol. 44, 2003.
- TIMOSHENKO, A. LANGER, B.F. **Stress in Railroad Track**. ASME Trans. 54, 1932.
- ZERBST, U. MÄDLER, K. HINTZE, H. **Fracture Mechanics in Railway Applications – An overview**. Engineering Fracture Mechanics 72, pp 163-194, 2005.
- WEBSTER, P.J. et al. **Residual stresses in Aluminothermic Welded Rails**. Journal of Strain Analysis, 6. Vol. 32, pp 389-400, 1997.
- WTIA. **Aluminothermic Weld Defects**. <http://www.wtia.com.au/pdf/TGN-R-04%20Aluminothermic%20weld%20defects.pdf>. Acessado em 23/11/2007.