

JULIANO FERNANDES FRIGINI

**ESTUDO DA SOLDAGEM DE MANUTENÇÃO EM
TRILHOS APLICADOS EM CAMINHO DE
ROLAMENTO DE EMPILHADEIRAS E
RECUPERADORAS DE MINÉRIO COM O
PROCESSO DE SOLDAGEM ARAME TUBULAR
AUTOPROTEGIDO.**

Monografia apresentada ao Programa de
Educação Continuada em Engenharia da Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
conclusão de curso de Especialização.

São Paulo

Março/2016

JULIANO FERNANDES FRIGINI

(Engenheiro mecânico, UFES, 2004)

**ESTUDO DA SOLDAGEM DE MANUTENÇÃO EM
TRILHOS APLICADOS EM CAMINHO DE
ROLAMENTO DE EMPILHADEIRAS E
RECUPERADORAS DE MINÉRIO COM O
PROCESSO DE SOLDAGEM ARAME TUBULAR
AUTOPROTEGIDO.**

Monografia apresentada ao Programa de
Educação Continuada em Engenharia da Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
conclusão de curso de Especialização.

Área de Concentração:
Engenharia da Soldagem

Orientador:
Dr. Sergio Duarte Brandi

São Paulo
Março/2016

*"Quanto mais aumenta nosso conhecimento, mais evidente fica
nossa ignorância".*

John F. Kennedy.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha esposa Priscila de Andrade Frigini, a minha mãe Cirley, meu pai Luiz Carlos e minhas irmãs Gabrieli e Micheli.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me fortalecer a cada dia de dificuldade encontrada.

Ao meu orientador, prof. Dr. Sergio Duarte Brandi, pela compreensão e sabedoria compartilhada.

Ao Jaime Casanova, pela ajuda e pelo compartilhamento de ideias.

A minha esposa Priscila, que me compreendeu nos momentos em que mais precisei.

A minha mãe e meu pai pela sabedoria de vida, pelos conselhos, pelo caráter e pela herança educacional.

As minhas irmãs, Gabrieli e Micheli.

Agradeço as empresas RID Metalmecânica e Plumont Engenharia, em especial ao Oscar Wruck e Pedro Diniz, pelo total apoio a mim e a este projeto.

Agradeço ao amigo Warley Soares Santos pelo conhecimento compartilhado e boa vontade em me apoiar.

Agradeço ao amigo Victor Machado Souza pela amizade e pelas discussões técnicas que agregaram muito durante todo o período do curso.

Agradeço a todos os grandes colegas que conheci nestes anos, Mateus Dezan, Tiago Gomes, André Ferreira, Vazil, Guttemberg Souza, Clarice Ribeiro, Marizandro Garcia, Fabio Mol, Rogerio Rosetti, Raphael Amorim, Celso e Omar.

CURRICULUM VITAE

Formação

Escolaridade

- Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo. (Julho de 2005)
- Especialização em Engenharia de Soldagem, Universidade de São Paulo - USP. (Março de 2016) - Cursando

Cursos Complementares

- Inspetor de Solda Nível 1, IWC Cursos. (Março de 2004) - Concluído
- Inspetor de Líquido Penetrante Nível 2, Abende - Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos. (Setembro de 2004) - Concluído
- Advanced English Course, Intrax International School. (Setembro de 2009) – Concluído

Histórico profissional

- Vale - Empresa atual

Engenheiro Sênior desde Agosto/2008

Inspeção estrutural, de fabricação e comissionamento de equipamentos portuários, tais como: Recuperadoras, Empilhadeiras, Transportadores de Correia, Carregador de Navios e Viradores de Vagões. Análises de Falhas em equipamentos portuários. Elaboração de procedimentos de soldagem para área de Mineração. Elaboração de especificações técnicas para recuperação estrutural em máquinas de pátio e transportadores. Coordenação de contratos de performance de manutenção.

- Flexibrás - Grupo Technip Brasil

Engenheiro de Industrialização - de Junho/2007 a Julho/2008

Junho(2007) – Agosto(2008)- Engenheiro de Industrialização e Desenvolvimento de novos materiais e produtos na empresa Flexibrás – Industrialização e desenvolvimento de novos produtos, novos processos e novos fornecedores, atuando em todo o processo de fabricação dos fornecedores.

- Mariner Serviços Subaquáticos

Engenheiro de Operações - de Dezembro/2005 a Maio/2007

Engenheiro de operações de mergulho. Gerenciamento de contratos em manutenção de monobóias, manifolds, amarração e desamarração de navios.

RESUMO

Na indústria de mineração os trilhos das vias contínuas são utilizados como caminho de rolamento de equipamentos de recuperar e empilhar minério, além destes, outros equipamentos de elevação de cargas utilizados para movimentar grãos, carvão e fertilizantes também utilizam trilhos como caminho de rolamento. O principal tipo de aço utilizado na fabricação destes trilhos são os aços com elevado teor de carbono e alta resistência mecânica que devido a boa relação entre elevada resistência a tração e limite de escoamento geram um bom custo benefício na utilização e na montagem dos caminhos de rolamento de máquinas. Neste trabalho é apresentado um estudo sobre a soldagem de manutenção do trilho CR135 fabricado em aço alto carbono com elevada resistência mecânica. Os corpos de prova utilizados foram segmentos de trilho com 200 mm de comprimento, espessura do boleto com 87,31 mm e 146,05 mm de altura. A soldagem foi executada com o processo arame tubular autoprotegido, nos passes de raiz, enchimento e acabamento. Os resultados apresentados demonstram que a soldagem de manutenção para os trilhos CR135 pode ser utilizada atendendo os requisitos de solicitação mecânica simulados por software com as condições de contorno reais, da relação de contato do carregamento entre roda de translação do equipamento e o trilho do caminho de rolamento. Caso seja utilizado os critérios de aceitação da norma AWS D1.1 nenhuma amostra estará aprovada.

ABSTRACT

In the mining industry the continuous pathways rails are used as a way of rolling equipment to recover and pile ore, besides others load lifting equipment used to move grain, coal and fertilizer also use pathways rails. The main type of steel used in the manufacture of these rails are the steels with high carbon content and high mechanical resistance, that due to the good relationship between high tensile strength and yield strength, generate good money in the use and installation of rolling paths machines. In this work it is presented a study about the maintenance by welding on the rail CR135, manufactured in high carbon steel with high mechanical strength. The specimens used were rail segments with length 200 mm, billet thickness with 87,31 mm and 146,05 mm height. The welding was performed with flux cored wire process on the root, filling and finishing passes. The results show that the maintenance welding for CR135 rails can be used, meeting the mechanical stress requirements simulated by real boundary conditions software for the contact relationship between the load between the machine translation wheel and the rail wheel rolling path. If the acceptance criteria of AWS D1.1 standard is used, no sample will be approved.

LISTA DE FIGURAS

<u>Figura 2.1</u> – Perfil do trilho CR135 para ponte rolante e guindaste – perfil americano, utilizado no caminho de rolamento das máquinas de pátio [9].....	18
<u>Figura 2.2</u> – Configurações das tensões primárias e secundárias impostas ao trilho [11].....	20
<u>Figura 2.3</u> – Efeito da fatia da espessura analisada com a tensão residual em um ponto no boleto do trilho [11].....	21
<u>Figura 2.4</u> – Detalhamento do processo de soldagem aluminotérmica [9].....	24
<u>Figura 2.5</u> – Equipamentos utilizados na soldagem aluminotérmica [16].....	26
<u>Figura 2.6</u> – Perfis de dureza longitudinal ao longo da solda [21].....	27
<u>Figura 2.7</u> – Processo de soldagem arame tubular com proteção gasosa [9].....	28
<u>Figura 2.8</u> – Processo de soldagem arame tubular autoprotegido [22].....	32
<u>Figura 2.9</u> – Equipamento básico para soldagem com arames tubulares [22].....	32
<u>Figura 2.10</u> – FCAW autoprotegido e com proteção gasosa externa – Eletrodos [25].....	33
<u>Figura 2.11</u> – Efeito do comprimento do arco na poça de fusão [25].....	35
<u>Figura 2.12</u> – Configurações de eletrodos tubulares autoprotegido (FCAW-S) para melhoria da proteção: Fita trançada (A), Dobra dupla (B), Encravado no centro (C) e Tubo de topo (D) [26].....	36
<u>Figura 2.13</u> – Processo de fabricação de eletrodos tubulares com alma fundente. [9].....	36
<u>Figura 2.14</u> – Sistema de classificação para arames tubulares para aço carbono [9].....	37
<u>Figura 4.1</u> – Figura ilustrativa com as dimensões da seção do trilho CR135 utilizado para realizar a soldagem.....	41
<u>Figura 4.2</u> – Detalhe da junta soldada utilizando duas seções do trilho CR135 com backing.....	44
<u>Figura 4.3</u> – Desenho esquemático com a indicação do local onde serão extraídos os corpos de prova da junta soldada.....	46
<u>Figura 4.4</u> – Junta soldada em todos os experimentos, mostrando a quantidade de camadas, espessura aproximada de cada camada e o sentido do enchimento.....	47
<u>Figura 4.5</u> – Dimensões dos corpos de prova seção reduzida do ensaio de tração da junta soldada [28].....	49
<u>Figura 4.6</u> – Esquemático da região do trilho (boleto) onde foram extraídos os corpos de prova de tração no metal de base sem solda.....	49
<u>Figura 4.7</u> – Condições de contornos para o cálculo da solicitação mecânica do carregamento entre a roda e o trilho do caminho de rolamento: aplicação de uma carga concentrada de 3,5 toneladas; fixação das extremidades do trilho.....	51
<u>Figura 4.8</u> – Malha utilizada no cálculo por elementos finitos.....	51

Figura 4.9 – Dimensões dos corpos de prova do ensaio de dobramento lateral [28].....	52
Figura 4.10 – Desenho esquemático da região do trilho (patim) onde foram extraídos os corpos de prova para o ensaio de dureza.....	53
Figura 4.11 – Região do patim onde foram obtidos os pontos de dureza na junta soldada.....	54
Figura 5.1 – Macrografia da amostra 1 soldada com o processo arame tubular autoprotegido localizado no patim do trilho. Círculo vermelho indica falta de fusão com 0,3mm. Nital 10%.....	55
Figura 5.2 – Macrografia da amostra 2 soldada com o processo arame tubular autoprotegido localizado no patim do trilho. Círculos vermelhos indicam inclusão com 0,7mm(1) e falta de fusão com 1,9mm (2). Nital 10%.....	55
Figura 5.3 – Macrografia da amostra 3 soldada com o processo arame tubular autoprotegido localizado no patim do trilho. Círculo vermelho indica falta de fusão com 10mm. Nital 10%.....	56
Figura 5.4 – Macrografia da amostra 4 soldada com o processo arame tubular autoprotegido localizado no patim do trilho. Círculo vermelho indica inclusão entre 1 e 2mm no metal de solda. Nital 10%.....	57
Figura 5.5 – Resultado do ensaio de tração para todas as amostras, comparado com o metal de base e o valor da solicitação mecânica no trilho CR135.....	57
Figura 5.6 – Medidas de dureza da amostra 01, com as localizações indicadas entre parênteses. Corpo de prova único.....	61
Figura 5.7 – Medidas de dureza da amostra 02, com as localizações indicadas entre parênteses. Corpo de prova único.....	61
Figura 5.8 – Medidas de dureza da amostra 04, com as localizações indicadas entre parênteses. Corpo de prova único.....	61
Figura 5.9 – Medidas de dureza da amostra 04, com as localizações indicadas entre parênteses. Corpo de prova único.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Requisitos de composição química para trilhos utilizados em caminho de rolamento de máquinas de pátio [10].....	19
Tabela 2.2 – Utilização e designação típica para arames tubulares [9].....	38
Tabela 2.3 – Identificadores e seus tipos de ligas [9].....	39
Tabela 4.1 - Comparação da composição química do trilho CR135 utilizado com o exigido pela norma ASTM A759.....	42
Tabela 4.2 – Propriedades mecânicas do eletrodo tubular segundo a norma AWS A5.20 comparadas com o certificado e o catálogo do fabricante.....	43
Tabela 4.3 – Composição química do eletrodo tubular segundo a norma AWS A5.20 comparadas com o certificado e o catálogo do fabricante.....	43
Tabela 4.4 – Quantidade de corpos de prova necessários para a qualificação de um procedimento de soldagem conforme a norma AWS D1.1 e a localização da extração dos corpos de prova (CP) no trilho CR135 [28].....	45
Tabela 4.5 – Média dos dados das variáveis do processo de soldagem arame tubular autoprotegido para todos as 04(quatro) amostras do experimento.....	47
Tabela 5.1 – Resultado do ensaio de tração para todas as amostras, sendo dois corpos de prova por amostra.....	57
Tabela 5.2 – Resultado do ensaio de dobramento lateral para todas as amostras, sendo quatro corpos de prova por amostra.....	60
Tabela 5.3 – Resultado das medidas de dureza para todas as amostras do trilho. Foi utilizado um corpo de prova por amostra.....	61

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

AWS: American Welding Society

LE: Limite de Escoamento

LR: Limite de Resistência à Tração

ZAC: Zona Afetada pelo Calor

FCAW-S Arame Tubular Autoprotegido

GMAW Gas Metal Arc Welding

EFC Estrada de Ferro Carajás

TBT Tonelada Bruta Trafegada

ZPF Zona Parcialmente Fundida

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	2
AGRADECIMENTOS	3
RESUMO	5
ABSTRACT	6
LISTA DE FIGURAS.....	7
LISTA DE TABELAS.....	9
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS	10
SUMÁRIO.....	11
1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1 FERROVIAS.....	15
2.2 TRILHOS.....	16
2.2.1 TRILHOS PARA RECUPERADORAS E EMPILHADEIRAS DE MINÉRIO DE FERRO	17
2.2.2 TENSÕES EM TRILHOS DE RECUPERADORAS E EMPILHADEIRAS DE MINÉRIO DE FERRO.....	19
2.3 SOLDAGEM ALUMINOTÉRMICA.....	22
2.4 PROCESSO DE SOLDAGEM ARAME TUBULAR	28
3. OBJETIVO.....	40
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
4.1 TRILHO CR 135.....	41
4.2 CONSUMÍVEIS DE SOLDAGEM.....	42
4.2.1 CONSUMÍVEL PARA SOLDAGEM ARAME TUBULAR AUTOPROTEGIDO (FCAW-S)	42
4.3 EXECUÇÃO DA SOLDAGEM.....	44
4.3.1 EXPERIMENTOS	44
4.3.2 PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM	45
4.3.3 EQUIPAMENTO DE SOLDAGEM.....	46
4.3.4 VARIÁVEIS UTILIZADAS NA SOLDAGEM	46
4.3.5 CONTROLE DAS VARIÁVEIS DE SOLDAGEM.....	48
4.4 CARACTERIZAÇÃO METALOGRÁFICA	48
4.4.1 MACROGRAFIA.....	48
4.5 ENSAIOS MECÂNICOS.....	48
4.5.1 ENSAIO DE TRAÇÃO.....	49
4.5.2 ENSAIO DE DOBRAMENTO TRANSVERSAL	51
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	54
5.1 CARACTERIZAÇÃO METALOGRÁFICA	54
5.1.1 MACROGRAFIA.....	54
5.2 ENSAIOS MECÂNICOS.....	56
5.2.1 ENSAIO DE TRAÇÃO.....	56
5.2.2 ENSAIO DE DOBRAMENTO LATERAL	58
5.2.3 ENSAIO DE DUREZA	59
6. CONCLUSÕES.....	64
SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	66
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:	67

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.

O transporte ferroviário possui vastas vantagens em relação a outros meios de transporte por ser o que permite a maior capacidade de transporte de carga e de passageiros. Em muitos países em desenvolvimento, principalmente na África e América Latina, foi escolhido o uso predominante das rodovias ao invés de ferrovias. As ferrovias estão situadas em sua maior parte, em locais industrializados, como Europa, parte da Ásia e em regiões com grande população, como a China e a Índia [1].

No Brasil, a malha ferroviária é utilizada predominantemente para o transporte de cargas e representam uma boa opção para o escoamento da produção com rapidez e economia. Como grande produtor de minérios, possui três das maiores ferrovias do mundo e cerca de 28 mil quilômetros de ferrovias que interligam as várias regiões do país [1].

Além de minérios, os principais produtos transportados pela malha ferroviária são produtos siderúrgicos, grãos, cimento e cal, adubos e fertilizantes, derivados do petróleo, entre outros [2].

Para utilizar a malha ferroviária, a movimentação das locomotivas e vagões é feita sobre via contínua com segmento de trilho (8 a 24 metros) que são soldados em estaleiro, via centelhamento elétrico, até perfazerem barras com 180 a 300 metros de extensão. As mesmas são, então, posicionadas na via e soldadas [3].

A utilização de segmentos de trilhos também é feita em vias contínuas cujos equipamentos que se movimentam são chamados de Empilhadeiras e

Recuperadoras. Estes equipamentos são utilizados na indústria de mineração para descarregar, recuperar e embarcar produtos tais como minério, pelotas de minério, carvão, grãos e fertilizantes. Além destes equipamentos, os segmentos de trilhos fazem parte do caminho de rolamento de guindastes e pontes rolantes de elevada capacidade de içamento. Os trilhos são fabricados em aço com elevada resistência mecânica e alto carbono, podendo ser ou não tratados termicamente, possuem como norma de referência a ASTM A 759.

O principal processo de montagem e manutenção de trilhos é a soldagem. A soldabilidade destes aços alto carbono, que são utilizados nos trilhos, tem grande importância, pois os processos de soldagem empregados alteram as propriedades mecânicas das juntas soldadas que unem os diversos segmentos de trilhos que unem uma via contínua.

Dentre os processos de soldagem existentes, a soldagem aluminotérmica e o eletrodo revestido são os mais utilizados na montagem e manutenção de área destes segmentos de trilhos. O eletrodo revestido apesar de oferecer soldas de boa qualidade e baixo custo operacional, tem como ponto negativo a baixa produtividade. Quanto ao processo de soldagem aluminotérmica, possui uma boa produtividade, porém tem um custo operacional elevado e mão de obra especializada.

A baixa produtividade do processo eletrodo revestido e o custo elevado com mão de obra especializada no processo aluminotérmico tornaram-se a motivação para substituição destes processos.

Devido às características mencionadas da soldagem com eletrodo revestido e soldagem aluminotérmica, é necessária a substituição destes

processos de soldagem por um processo com menor custo e com boa produtividade.

Neste trabalho será feito a soldagem de manutenção em segmentos de trilho a fim de avaliar os resultados dos ensaios mecânicos na junta soldada e compará-los com o carregamento real entre a roda do equipamento e o trilho do caminho de rolamento, utilizando o processo de soldagem arame tubular autoprotegido, utilizando o consumível E71T8-H16 na raiz, enchimento e acabamento em uma junta soldada com cobre junta (backing). O trilho utilizado foi o CR135 produzido no Brasil pela Comercial Forte, com espessura no boleto de 87,31 mm.

Serão avaliados os resultados das propriedades mecânicas: ensaio de tração; dobramento lateral, dureza Vickers e macrografia. Será feita a comparação do resultado entre o limite de escoamento encontrado na junta soldada e a tensão principal encontrada no carregamento entre a roda do equipamento e o trilho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

2.1 FERROVIAS.

O transporte ferroviário para a movimentação de cargas de alto fluxo de produção está em evolução constante de forma a atender o mercado em processo de expansão. O Brasil possui inúmeras ferrovias de grande porte, dentre elas a Estrada de Ferro Carajás (EFC) da Companhia Vale Rio Doce (CVRD) que faz a ligação entre a Serra do Carajás e o Terminal Ferroviário da Ponta da Madeira. Ela tem 892 quilômetros de extensão e por seus trilhos são transportados 120 milhões de toneladas de carga e 350 mil passageiros por ano. Circulam cerca de 35 composições simultaneamente, entre as quais um dos maiores trens de carga em operação regular do mundo, com 330 vagões e 3,3 quilômetros de extensão [4].

A montagem de uma via contínua é feita com segmentos de trilhos (8 a 24 metros) que são soldados em estaleiro, via centelhamento elétrico, até perfazerem barras com 180 a 300 metros de extensão. As mesmas são, então, posicionadas na via e soldadas por aluminotermia [3].

Os segmentos de trilhos são os componentes ferroviários mais suscetíveis à falha devido a vários fatores, entre eles: alta pressão do contato das rodas em regime de carregamento cíclico e existência de tensões residuais, causadas pela deformação plástica superficial, pelo processo de soldagem, pela variação térmica na linha e pela tensão de projeto (tensão necessária para manter os trilhos alinhados) [3, 5].

Em sua estrutura interna, os segmentos de trilho podem possuir diversas descontinuidades, tais como inclusões não metálicas, que aliados às condições severas de trabalho podem nuclear defeitos que levam o material ao colapso estrutural. Por outro lado, parâmetros metalúrgicos como tamanho de grão e tipo de microestrutura presente, apresentam-se como fatores determinantes da tenacidade à fratura do material e das propriedades mecânicas [4].

2.2 TRILHOS.

São vigas longas de aço, cujas principais funções são: suportar cargas e guiar os carros que se movimentam sobre eles, seja vagões ou outros tipos de carros que se movimentam através de rodas sobre trilhos. Devido ao ambiente de trabalho mais agressivo, o trilho tem que resistir a corrosão, expansão térmica e suportar a carregamentos cíclicos. Tudo isso leva a um desgaste e uma possível falha nos trilhos. Além disso, os trilhos tem que ser usináveis e soldáveis. Para reduzir desgastes, alguns trilhos são endurecidos quer seja no boleto ou em todo o trilho. Os trilhos geralmente são aços carbono-manganês com microestrutura principal perlítica. Os métodos utilizados para fabricação de aços para trilhos variam de fornos a gás e fornos elétricos com desgaseificação a vácuo para remover hidrogênio, oxigênio e outros gases do aço fundido. O hidrogênio é o maior causador de trincas nos boletos do trilho. Na fabricação, métodos de lingotamento de tarugos ou fundição continuam, são utilizados. A composição química, limite de resistência à tração e dureza diferem com os diferentes tipos de trilhos [6].

Os trilhos são classificados em sete graduações pelos padrões europeus, incluindo carbono-manganês não tratado termicamente, ligas não tratadas (1% Cr), aços carbono-manganês tratados termicamente e aços baixa liga e em 11 graduações pelo padrão russo [6]. Trilhos para pontes rolantes e guindastes com padrões americanos são laminados conforme normas, incluindo a ASTM A 759 [7].

2.2.1 TRILHOS PARA RECUPERADORAS E EMPILHADEIRAS DE MINÉRIO DE FERRO

O Porto de Tubarão, localizado na cidade de Vitória-ES, compreendido entre cais e docas secas para manobra e com capacidade de embarque para mais de 100 milhões de toneladas de minério de ferro. Diuturnamente tem-se operações de embarque e descarga totalmente mecanizados. O desembarque descarga consistem basicamente na retirada de minério dos vagões ferroviários através dos viradores de vagões, e no seu encaminhamento, por meio de correias transportadoras, até a destinação programada – os porões de navios ou pátios de armazenamento [8].

Os pátios são equipados com máquinas empilhadeiras utilizadas para a descarga do minério oriundo da ferrovia, transferência entre pátios de armazenamento ou embarque direto para os navios. A recuperação do minério empilhado para embarque é realizada por meio de recuperadoras de minério que retiram o minério das pilhas e encaminham novamente à correia transportadora [8]. Em toda translação das máquinas de pátio, tanto as

empilhadeiras como as recuperadoras de minério, são utilizados como caminho de rolamento, uma via contínua com trilhos do tipo CR135, com formato mostrado na figura 2.1.

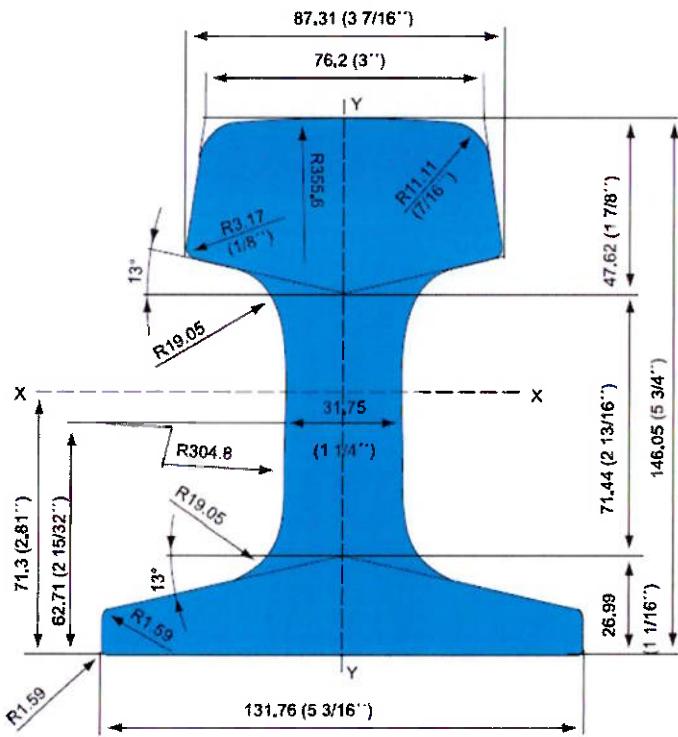


Figura 2.1 - Perfil do trilho CR135 para ponte rolante e guindaste – perfil americano, utilizado no caminho de rolamento das máquinas de pátio [9].

Os requisitos de composição química dos trilhos CR135 utilizado no caminho de rolamento das máquinas de pátio estão definidos na tabela 2.1. Os trilhos são posicionados sobre dormentes, que podem ser de madeira, concreto, polímero ou combinação de madeira com polímero.

Tabela 2.1 – Requisitos de composição química para trilhos utilizados em

Elemento	Percentual
Carbono	0,67 a 0,84
Manganês	0,70 a 1,10
Fósforo, máximo	0,04
Enxofre, máximo	0,05
Silício	0,10 a 0,50

caminho de rolamento de máquinas de pátio [10].

2.2.2 TENSÕES EM TRILHOS DE RECUPERADORAS E EMPILHADEIRAS DE MINÉRIO DE FERRO

As análises das tensões que incidem sobre os trilhos são consideradas bastante complexas. A abordagem deve levar em conta alguns fatores, tais como:

- Processo de fabricação dos trilhos;
- Parâmetros de operação: carga por eixo transportada e velocidade;
- Modo de assentamento do trilho: reta ou curva;
- Superelevação;
- Inclinação das rampas;
- Variações climáticas do local onde está instalado o trilho.

Além destes fatores, os trilhos ainda estão sujeitos a tensões primárias e secundárias [11].

2.2.2.1 TENSÕES PRIMÁRIAS

São aquelas impostas aos trilhos quando de sua laminação e avaliada com base na teoria das vigas, que considera o trilho como uma viga contínua em uma fundação elástica, assim, o carregamento da roda é aplicado no trilho como um momento fletor.

O momento fletor surge devido à carga estática do eixo, sendo dinamicamente multiplicada pelo movimento do equipamento e flutuações na superfície de contato roda/trilho [12]. A figura 2.2 mostra esquematicamente a configuração das solicitações nos trilhos.

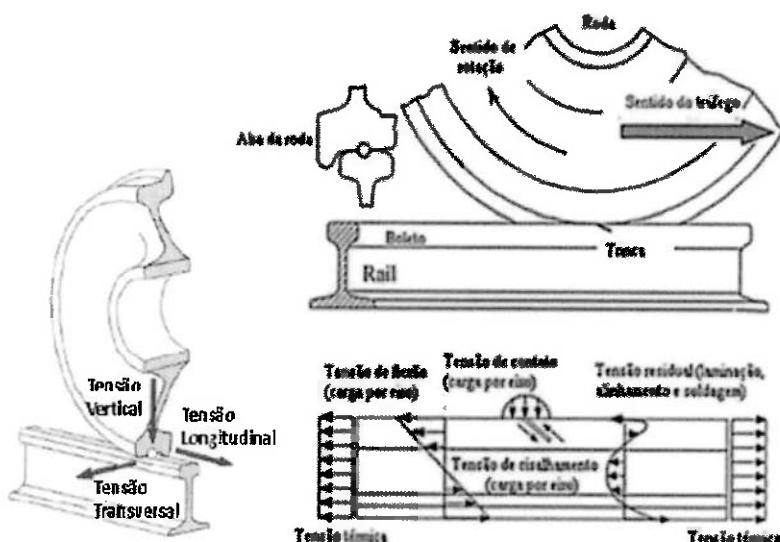


Figura 2.2 - Configurações das tensões primárias e secundárias impostas ao trilho [11].

2.2.2.2 TENSÕES SECUNDÁRIAS: TÉRMICAS E RESIDUAIS

Nas solicitações primárias são adicionadas as solicitações secundárias. As tensões residuais e térmicas constituem-se em solicitações secundárias

impostas ao trilho e devem ser consideradas nos cálculos para a avaliação da integridade estrutural dos trilhos continuamente soldados [13].

Tensões térmicas são encontradas onde a variação da temperatura e condições climáticas sazonais na via podem estar entre menos de 5°C e 40°C, nas condições brasileiras. Nas condições entre menos 40°C e 40°C no continente europeu e americano. Essas mudanças induzem deformações no material, o que devido à capacidade de contração e dilatação na via resultam em tensões térmicas [14].

Tensões residuais podem ser de tração ou de compressão, atuando na direção longitudinal, transversal e vertical, exercendo forte influência nas solicitações impostas aos trilhos e, consequentemente, na taxa de nucleação e propagação das trincas, tendo efeitos das tensões nas fatias de espessuras do trilho, conforme mostra a figura 2.3.

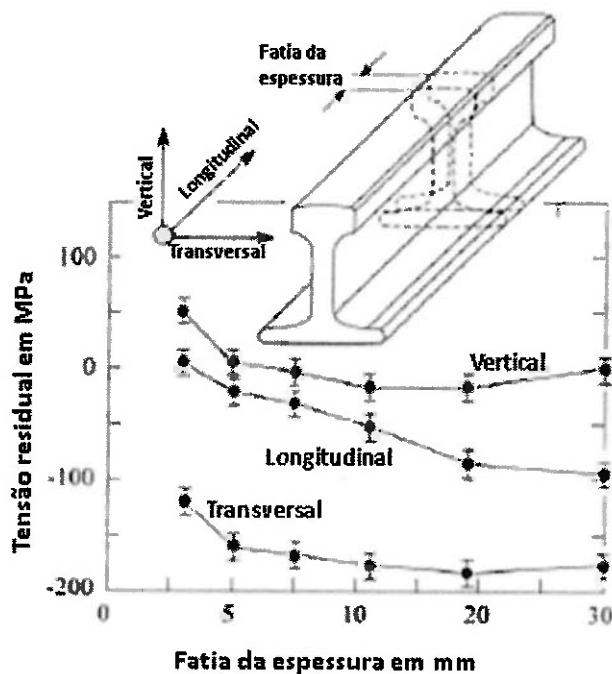


Figura 2.3 – Efeito da fatia da espessura analisada com a tensão residual em um ponto no boleto do trilho [11].

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. Nessas condições, o trilho acumula tensões à medida que aumenta o grau de deformação imposta, dependendo da condição de como são fabricados, as tensões residuais longitudinais são de tração no boleto e patim (até 10 mm da superfície) e de compressão na alma.

Em serviço, o contato roda/trilho provoca deformações plásticas pontuais na superfície do boleto e, com o consequente encruamento do material, incentiva uma redistribuição das tensões residuais a uma profundidade de 7,5 a 10 mm.

Nestas condições as tensões residuais de tração no boleto, decorrentes do processo de fabricação, passam a ser de compressão. Esse tipo de tensão é benéfico quando compressivas, pois dificultam a nucleação e propagação de trincas de fadiga que podem conduzir o trilho à ruptura [15].

2.3 SOLDAGEM ALUMINOTÉRMICA.

2.3.1 INTRODUÇÃO

A soldagem aluminotérmica é o processo de soldagem por fusão em que dois metais tornam-se ligados após terem sido aquecidos por um metal superaquecido que tenha experimentado uma reação exotérmica. O metal líquido resultante da reação entre o óxido metálico e o alumínio atua como um metal de adição [9].

O processo aluminotérmico foi descoberto em 1898, na Alemanha, pelo Dr. Hans Goldschmidt da Goldschmidt AG [9]. Este processo tem sido bastante utilizado em aplicações específicas na qual outro processo conhecido de soldagem não apresentaria a flexibilidade e condições adequadas para a realização no campo. É um processo que não possui relação com outros métodos de soldagem, pois se baseia em reações químicas entre materiais ferrosos ou não ferrosos e o alumínio [1].

A reação aluminotérmica tem como base o fato do alumínio extrair oxigênio de óxidos de outros metais para formar óxido de alumínio e liberar grande quantidade de calor, que poderá então ser aproveitado na soldagem de peças de ferro e aço [1].

Uma mistura adequadamente preparada de alumínio e um óxido, após a ignição inicial da reação, por ser altamente exotérmica, esta pode ser autossustentada, propagando-se violentamente por um curto prazo de tempo e tomando conta de toda mistura. A reação exotérmica requer cerca 20 a 30 segundos para se efetivar, independente da quantidade de produtos químicos envolvidos. Desta forma obtém-se como resultado desta reação, um metal liquefeito na base do cadinho com uma escória de óxido de alumínio sobrenadando este metal [1].

A reação aluminotérmica que ocorre na soldagem é descrita abaixo:

ÓXIDO METÁLICO + ALUMÍNIO (agente redutor) → ALUMÍNIO (óxido + metal + calor)

Considerando que a reação típica que ocorre na soldagem aluminotérmica de trilhos é:



A reação exotérmica é extremamente violenta se somente o óxido metálico e o agente redutor alumínio são utilizados. Pelotas de ligas de ferro são adicionadas a esta reação com o intuito de resfriar a uma temperatura típica de 3090 °C para 2480 °C. Estas adições também podem ser usadas para produzir a composição química desejada. A quantidade de ligas adicionadas é muito crítica, porque quantidades maiores adicionadas poderão resfriar a reação para temperaturas abaixo de 2040 °C, ponto em que a separação do metal/escória poderia ser incompleta [9].

A figura abaixo 2.3 detalha o processo de soldagem aluminotérmica com a inserção da porção aluminotérmica no cadinho até a fundição completa.

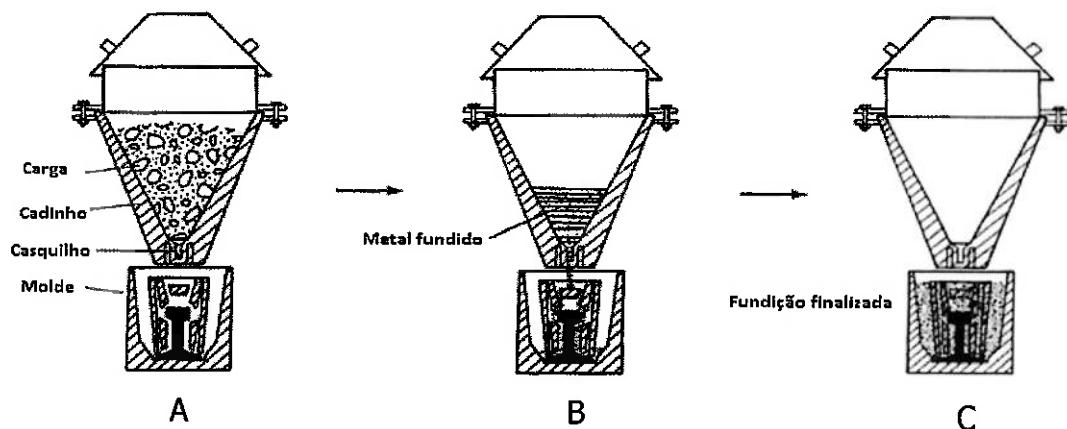


Figura 2.4 – Detalhamento do processo de soldagem aluminotérmica [9].

A quantidade de mistura (carga) mostrado na figura 2.3-A, também chamada de porção Thermit, é calculada com base na quantidade de metal que

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

Assim, a reação aluminotérmica não é espontânea, pois requer uma ignição inicial, em que é utilizado um acendedor especial. Desta forma, a soldagem aluminotérmica é um processo governado por fusão em que os trilhos são unidos após serem aquecidos por um banho de metal fundido pelo calor da reação aluminotérmica. A mistura liquefeita (metal fundido) age como o metal de adição da junta.

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

A figura 2.4 mostra um equipamento de soldagem aluminotérmica, onde basicamente são utilizados três equipamentos: Cadiño, Moldes e Sistema de Pré-Aquecimento.

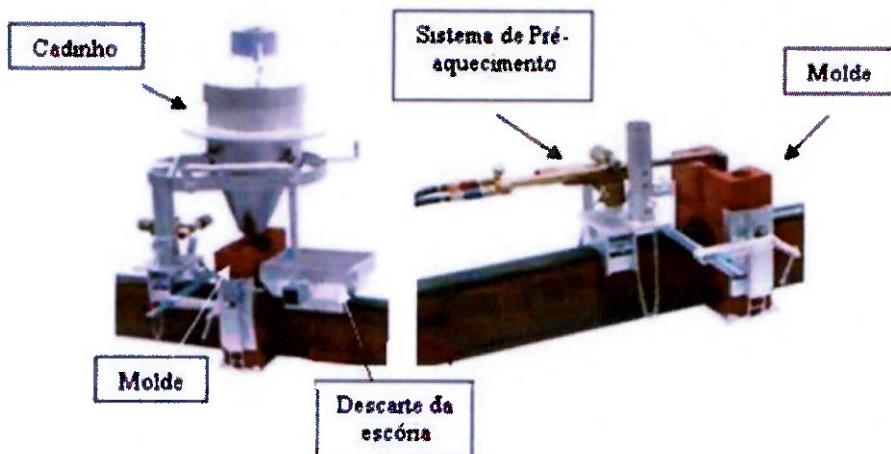


Figura 2.5 – Equipamentos utilizados na soldagem aluminotérmica [16].

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 da solda, no entanto, adaptações técnicas são permitidas e, às vezes, recomendadas, de acordo com as particularidades das condições de soldagem [17].

2.3.3 PROPRIEDADES DA SOLDAGEM ALUMINOTÉRMICA

Devido a sua estrutura de metal fundido, a solda possui invariavelmente propriedades mecânicas inferiores às do trilho. No entanto, são os parâmetros de soldagem em conjunto com a mistura aluminotérmica que determinam estas propriedades. O exame de procedimento de soldagem deve abordar a

distribuição de dureza ao longo da solda, limpeza do metal de solda, propriedades mecânicas como resistência a tração e fadiga, além das características metalúrgicas da solda. De particular interesse são os níveis de dureza na zona de fusão e na ZAC (zona afetada pelo calor), além do tamanho da ZAC [18].

No boleto, o metal de solda (MS) possui dureza mínima no centro. A dureza atinge um máximo na região da ZAC, a partir de onde a dureza cai novamente até os níveis do metal de 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 metal de solda é pouco pronunciada, nas demais regiões da solda os patamares de dureza são similares àquelas medidas no boleto [19,20].

A figura 2.5 mostra o perfil de dureza no plano longitudinal para três soldas em trilhos tratados.

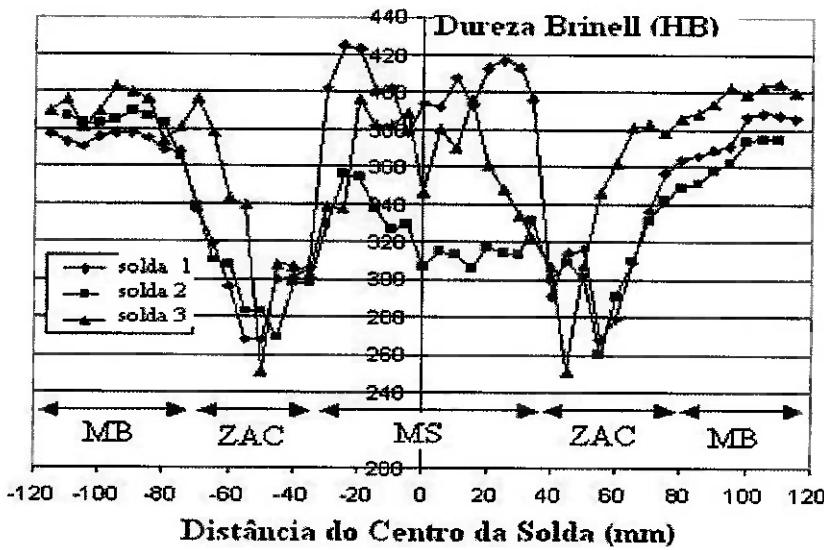


Figura 2.6 – Perfis de dureza longitudinal ao longo da solda [21].

2.4 PROCESSO DE SOLDAGEM ARAME TUBULAR.

2.4.1 INTRODUÇÃO

Fluxed Cored Arc Welding (FCAW), ou soldagem com arame tubular, o calor para a soldagem é produzido pelo arco elétrico entre o eletrodo, alimentado continuamente e o metal de base [9].

2.4.2 CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO

A soldagem com arame tubular tem duas grandes variações: O processo com gás de proteção usa um fornecimento externo de gás para ajudar na proteção do arco do nitrogênio e oxigênio da atmosfera, conforme mostrado na figura 2.6. Geralmente, os elementos presentes no núcleo dos eletrodos protegidos com gás são formadores de escória, desoxidantes, estabilizadores de arco e elementos de liga [9].

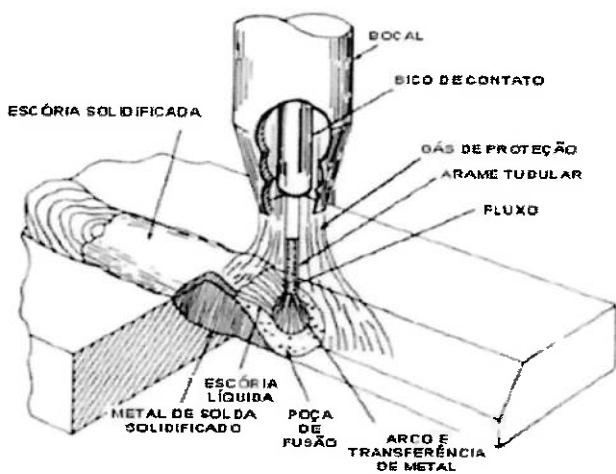


Figura 2.7 – Processo de soldagem arame tubular com proteção gasosa [9].

No processo de soldagem com arame tubular autoprotegido, os ingredientes do núcleo protegem o metal de solda da atmosfera sem o gás de proteção externo, conforme figura 2.7. Alguns eletrodos autoprotegido fornecem sua própria proteção através da decomposição dos ingredientes do núcleo. Outros dependem da proteção da escória, onde o metal cai, sendo transferido pelo arco elétrico e a poça do metal fundido é protegida da atmosfera pela escória formada na parte superior da poça de fusão. Alguns ingredientes do processo FCAW-S também pode conter amostras substanciais de desoxidantes e desnitrificantes para ajudar o metal de solda a ficar limpo e em alguns casos, estabilizar o arco e elementos de liga [9]. Ambos os métodos de soldagem com arame tubular, estão relacionados com outros processos de soldagem a arco elétrico. O método que se usa o gás de proteção auxiliar é similar ao processo de soldagem MIG/MAG (GMAW), com a utilização de um arame sólido e depende de um gás de proteção para proteger o arco e o metal fundido da contaminação do ar atmosférico [9]. O método autoprotegido se aproxima ao processo de soldagem eletrodo revestido (SMAW), que depende da decomposição e combustão do fluxo sólido para fornecer a proteção gasosa. No processo de soldagem eletrodo revestido, o fluxo está na parte externa do eletrodo, que limite a forma do eletrodo como reto (tipo um bastão), entretanto no arame tubular autoprotegido, o fluxo está interno a um eletrodo, que pode ser enrolado e fornecido pelo arco como um arame contínuo.

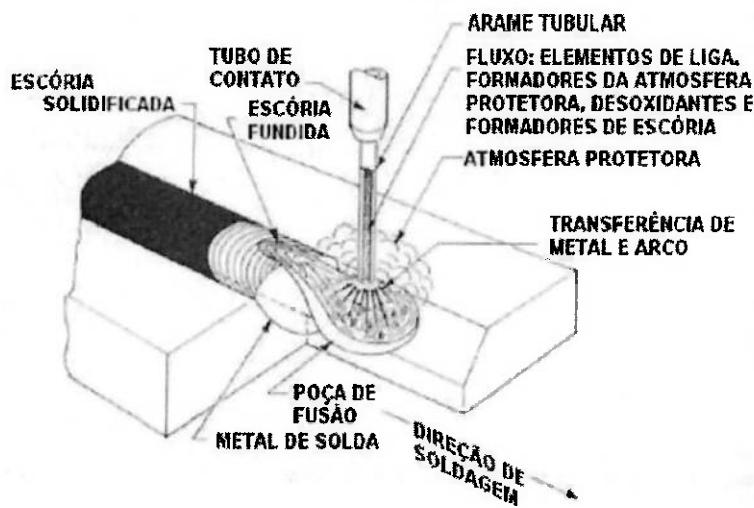


Figura 2.8 – Processo de soldagem arame tubular autoprotegido [22].

2.4.3 ARAME TUBULAR AUTOPROTEGIDO (FCAW-S)

O método de soldagem com arame tubular se tornou comumente conhecido por muitas aplicações, principalmente devido à simplicidade de operação que resulta da ausência dos equipamentos necessários para proteção adicional gasosa, o suporte do eletrodo é mais simples do que o requerido pelo processo com gás de proteção adicional. O arame tubular autoprotegido possui em seu interior uma quantidade maior de fluxo, o que proporciona, durante a queima, uma produção de gases e fumos suficiente para atuar tanto nas características de fusão, quanto na proteção global da poça de fusão durante a soldagem [23]. A soldagem com arame tubular autoprotegido é comumente utilizada para soldagem de aços carbono, porém tem sido utilizada com sucesso em soldagem de aços baixa liga [22]. Diversos graus de aços inoxidáveis são soldados tanto com ás auxiliar de proteção quanto com arame autoprotegido.

Eletrodos designados para soldagem dos aços AISI tipos 304, 316 e 347, e outros estão disponíveis. No Processo de soldagem autoprotegido, não há proteção intencional no metal fundido durante a soldagem. Consequentemente, é esperado que o metal fundido absorva uma grande quantidade de nitrogênio e oxigênio da atmosfera. Mesmo assim, os consumíveis são tipicamente fabricados com uma concentração elevada de alumínio, no qual reage com o nitrogênio e oxigênio para formar óxidos e nitretos [24]. Também existem diversos metais de adição para junção de aços inoxidáveis com aços carbono e com aços baixa liga [9]. O método autoprotegido pode ser soldado fora de posição pela seleção de um arame com diâmetro menor e com composição adequada, assim como para o método de proteção auxiliar gasosa. O intervalo de espessuras soldadas é o mesmo para ambos os métodos [22].

Arame tubular sem proteção gasosa auxiliar, não é adequado para transferência metálica por spray. Porque o metal é transferido da parte externa do eletrodo para a poça de solda, a proteção da oxidação desta área é mínima sem um gás de proteção auxiliar. Quando partículas finas do spray são criadas, a área superficial total é maior, que resulta em uma oxidação excessiva. Entretanto, o FCAW-S pode ser operado pela transferência metálica globular e por curto-círcito [22].

2.4.3.1 FUNDAMENTOS DO PROCESSO FCAW-S

O processo de soldagem arame tubular utiliza equipamentos semiautomáticos, mecanizados e sistemas totalmente automatizados.

Equipamentos auxiliares requeridos, como a proteção gasosa, dependem da variação do processo e do grau de automação. Equipamentos de remoção de fumos devem ser considerados na maioria das aplicações do processo de soldagem com arames tubulares [9]. Um típico equipamento semiautomático é mostrado na figura 2.8. Os equipamentos utilizados para soldagem com arames tubulares autoprotegido e com proteção auxiliar gasosa são similares. A diferença básica reside no fato do equipamento para soldagem com proteção auxiliar gasosa possuir um sistema de envio e controle de gases ao ponto de trabalho [23]. O equipamento utilizado para o processo de soldagem com gás auxiliar de proteção é tipicamente o mesmo que o utilizado no processo de soldagem MIG/MAG (GMAW) [9]. Da mesma forma, as características do arco que podem ser obtidas no processo FCAW são as mesmas do processo GMAW [22]. A figura 2.9 ilustra as diferenças entre o processo autoprotegido e o processo com proteção gasosa.

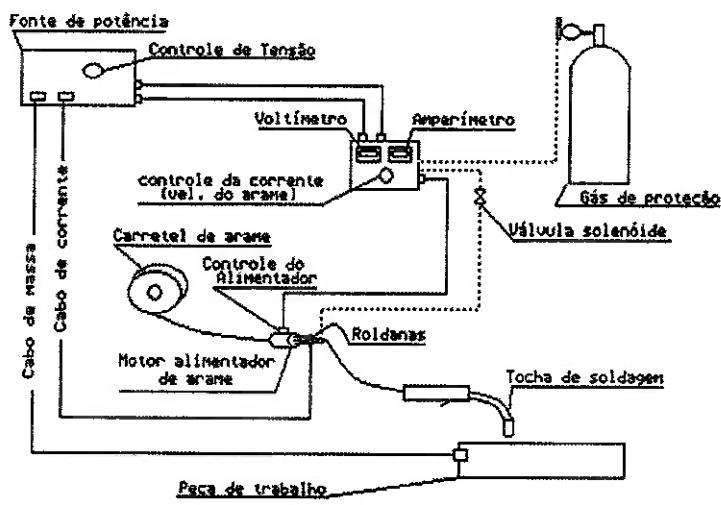


Figura 2.9 – Equipamento básico para soldagem com arames tubulares [22].

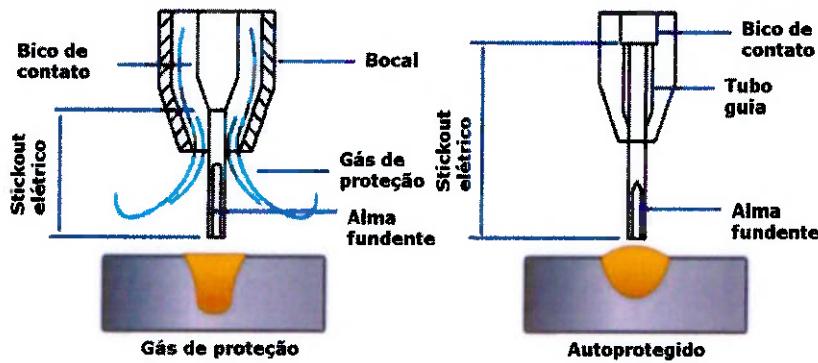


Figura 2.10 – FCAW autoprotegido e com proteção gasosa externa – Eletrodos [25].

2.4.3.2 PRINCIPIOS DE OPERAÇÃO

FCAW usa o calor produzido entre o arco elétrico e o eletrodo consumível tubular para ser soldado. A corrente elétrica passa através do gás ionizado produzindo um arco elétrico. As moléculas e átomos do gás são quebrados e ionizados por uma perda de elétrons deixando a carga positiva. Os íons positivos do gás fluem do polo positivo para o negativo e os elétrons fluem do polo negativo para o positivo. Os elétrons carregam 95% do calor e o restante é carregado pelos íons positivos. O calor do arco funde o eletrodo e a superfície do metal de base. O eletrodo fundido transfere o metal de adição através do arco e dentro da poça de fusão, forma uma escória na parte superior da solda que pode ser removida após soldagem. O arco é criado, iniciando a alimentação do arame que faz com que a ponta do eletrodo toque o metal de base e inicie o arco. A transferência do arco, geralmente não é iniciada até que a poça de fusão seja formada. A pistola de soldagem se movimenta ao longo da junta soldada, manualmente ou mecanicamente assim que as bordas da junta

estejam soldadas. O metal de solda se solidifica atrás do arco, completando assim a soldagem. Uma grande quantidade de fluxo esta contida no núcleo do arame tubular autoprotegido, comparando com o processo com gás de proteção. Isto é necessário para fornecer uma proteção e por causa disso, uma escória espessa é formada. Nestes arames, elementos desoxidantes e desnitrificantes são necessários no metal de adição e nos núcleos fluxados, porque algum nitrogênio é introduzido da atmosfera, podendo gerar poros e diminuir a ductilidade dos aços carbono [25].

2.4.3.3 CARACTERÍSTICAS DO ARCO

O processo de soldagem com arame tubular pode ser operado tanto com corrente constante como tensão constante, nas fontes de potência. As fontes de potência podem ser classificadas pelas características corrente-tensão como: tensão constante ou corrente constante. Entretanto existem equipamentos que operam com ambas as características. Tensão constante é preferida na maioria das aplicações. No sistema a arco com tensão constante, a tensão fornecida pelo arco é mantida a níveis relativamente constantes que dá uma curva plana ou próxima de uma curva tensão-corrente plana. Este tipo de fonte de potência é largamente utilizado para processo de soldagem com alimentação contínua de arame. Neste tipo de sistema, o comprimento do arco é controlado pela característica do nível de tensão na fonte e a corrente de soldagem é controlada pela velocidade de alimentação do arame [25]. Quando as outras variáveis do processo são constantes, aumentando a tensão de soldagem, a

poça de fusão tornasse mais larga e mais plana, conforme mostra a figura 2.10 [25].

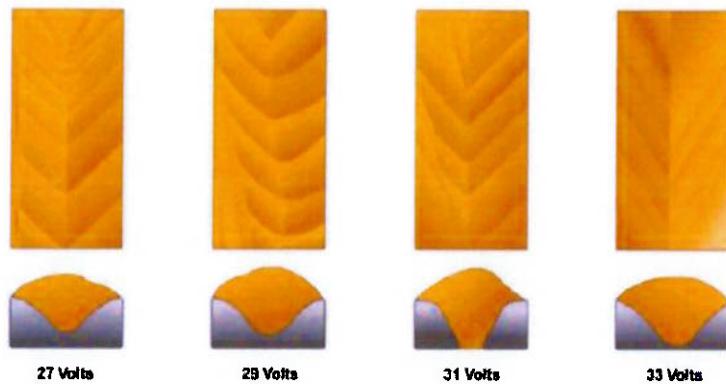


Figura 2.11 – Efeito do comprimento do arco na poça de fusão [25].

2.4.3.4 CARACTERÍSTICAS E CLASSIFICAÇÃO DOS ARAMES TUBULARES

Os arames tubulares apresentam várias configurações de seção transversal, podendo ser simplesmente um tubo, ou configurações mais complexas. A figura 2.10 mostra os tipos de configurações para seções transversais disponíveis atualmente no mercado. O fluxo contido no interior do tubo metálico atua de maneira semelhante ao revestimento nos eletrodos revestidos [23]. Os arames são produzidos por um processo especial no qual um baixo teor de carbono ou liga em forma de tira são progressivamente formados dentro de um formato em "U", preenchidos com ingredientes na alma, fechados com rolos para formar um tubo e finalmente trefilados para o diâmetro desejado. O fio é enrolado em pequenas embalagens, geralmente bobinas. O procedimento é descrito na figura 2.11. Modernos arames tubulares autoprotegido tem o formato do tipo "tubo de topo", substituindo tentativas anteriores de proteção do metal soldado

pela criação de complexas formas de metal em compartimentos com enchimento.

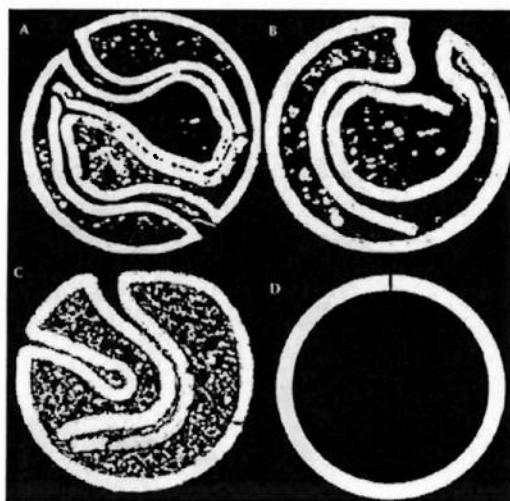


Figura 2.12 – Configurações de eletrodos tubulares autoprotegido (FCAW-S) para melhoria da proteção: Fita trançada (A), Dobra dupla (B), Encravado no centro (C) e Tubo de topo (D) [26].

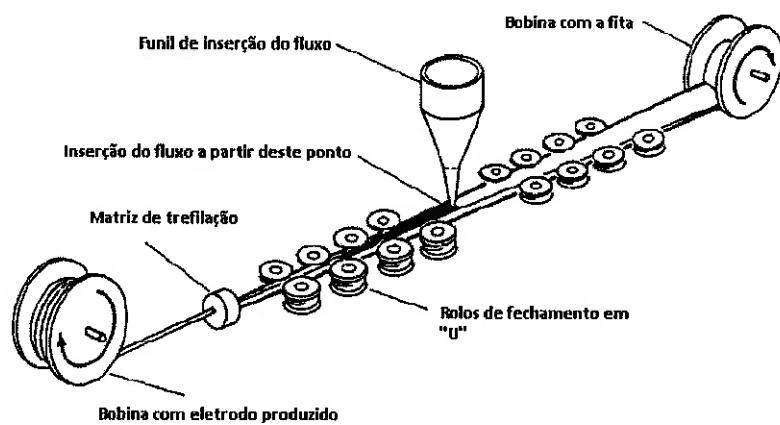


Figura 2.13 – Processo de fabricação de eletrodos tubulares com alma fundente. [9]

Arames tubulares para aço carbono são classificados pela AWS A5. 20, "Especificação de arames tubulares para aços carbono". O arranjo deste sistema de classificação é definido pela figura 2.12; o "X" indica a posição onde será designada. Por exemplo, a indicação de designação para o limite de resistência a tração pode ser um 6, para denotar 62 Ksi (430MPa), ou um 7,

para denotar 72 ksi (495 MPa). A atribuição do último dígito depende dos requisitos de proteção e características do eletrodo, assim como da recomendação de polaridade da soldagem. Essas características estão descritas na tabela 2.2. A designação EXXT-G e EXXT-GS são denominadas para permitir a classificação de arames não cobertos por nenhuma outra classificação.

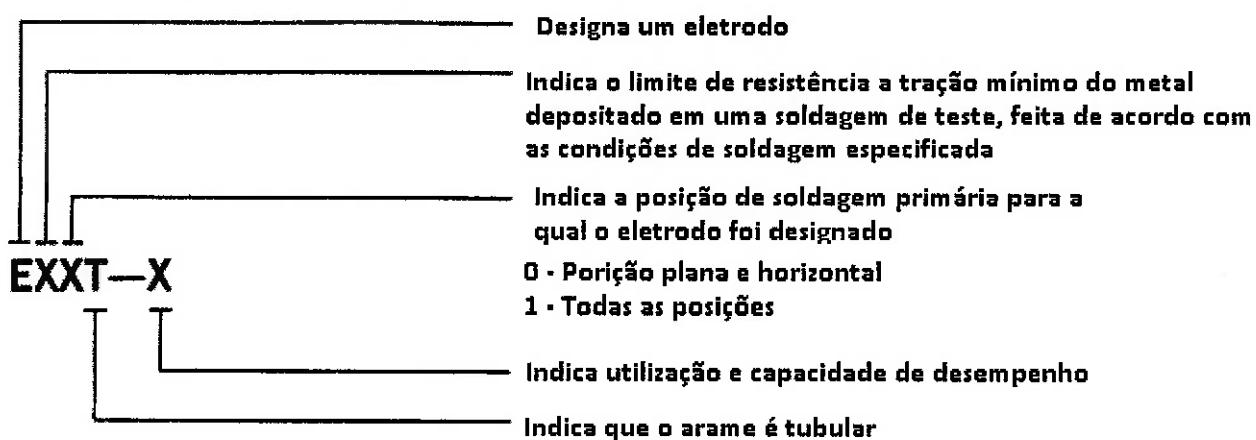


Figura 2.14 – Sistema de classificação para arames tubulares para aço carbono [9].

Arames para soldagem de aços baixa liga são classificados pela AWS A5.29, "Especificação de arames tubulares para aços ligados". Esta especificação utiliza um sistema de classificação similar à especificação AWS A5.20, exceto pelo identificador de composição química que é adicionado para essa designação. A classificação dos arames de acordo com essa especificação deverá ter o formato EXXTX-X. Todas as posições antes do traço deverão ter o mesmo significado assim como a especificação AWS A5.20. A posição depois do traço terá o identificador de composição química, que consiste em letra e número. A letra denomina o tipo de liga do arame, conforme mostrado na tabela 2.3.

Tabela 2.2 – Utilização e designação típica para arames tubulares [9].

Tipo	Proteção ^(A)	Simples ou Multipasses ^(B)	Transferência	Requisitos de teste de impacto	Polaridade ^(C)	Características especiais
T-1	Gás	Multipasses	Spray	27J (-18°C)	CC +	Pouco respingo, espessa camada de esória
T-2	Gás	Simples	Spray	Não requerido	CC +	Pouco respingo, espessa camada de esória, alto desoxidantes
T-3	Auto	Simples	Spray	Não requerido	CC +	Alta velocidade
T-4	Auto	Multipasses	Globular	Não requerido	CC +	Alta deposição, baixa penetração, resistente a trincas
T-5	Gás	Multipasses	Globular	27J (-30°C)	CC +	Tenacidade melhorada, resistente a trincas, escória fina
T-6	Auto	Multipasses	Spray	27J (-30°C)	CC +	Tenacidade melhorada, alta penetração
T-7	Auto	Multipasses	Globular	Não requerido	CC -	Resistente a trincas, fácil remoção de escória
T-8	Auto	Multipasses	Globular	27J (-30°C)	CC -	Tenacidade melhorada, resistente a trincas
T-10	Auto	Simples	Globular	Não requerido	CC -	Alta velocidade
T-11	Auto	Simples	Spray	Não requerido	CC -	Objetivo geral
T-G	Não especificado	Multipasses	Não especificado	Não requerido	Não especificado	Não especificado
T-GS	Não especificado	Simples	Não especificado	Não requerido	Não especificado	Não especificado

(A) ARAMES COM PROTEÇÃO GASOSA SÃO CLASSIFICADOS USANDO PROTEÇÃO COM CO₂, ENTRETANTO SÃO COMUMENTE UTILIZADAS MISTURAS AR-CO₂.

(B) ARAMES MULTIPASSES PODEM SER UTILIZADOS TANTO PARA SOLDAGEM MULTIPASSES COMO SOLDAGEM EM PASSE ÚNICO. ARAMES PASSE ÚNICO SOMENTE PODERÃO SER UTILIZADOS PARA PASSES ÚNICOS.

(C) CC+, CORRENTE CONTÍNUA ELETRODO POSITIVO; CC-, CORRENTE CONTÍNUA ELETRODO NEGATIVO.

(D) ARAMES T-5 SÃO CLASSIFICADOS UTILIZANDO CC+, PORÉM NA PRÁTICA, ÀS VEZES PODE SE UTILIZAR CC-.

Tabela 2.3 – Identificadores e seus tipos de ligas [9].

IDENTIFICADOR	TIPO DE LIGA
A	AÇO CARBONO - MOLIBDÊNIO
B	AÇO CROMO - MOLIBDÊNIO
NI	AÇO NÍQUEL
D	AÇO MANGANÊS - MOLIBDÊNIO
W	AÇO RESISTENTE AO DESGASTE
K	OUTROS AÇOS BAIXA LIGA
G	NÃO ESPECIFICADO

A especificação AWS A5.29 classifica somente os tipos de arames EXXT1-X, EXXT4-X, EXXT5-X e EXXT8-X, estão incluídos na especificação AWS A5.29. Requisitos de tenacidade ao impacto estão baseados na resistência, utilização e requisitos de composição química do arame [9].

Arames para aços inoxidáveis são classificados na AWS A5.22, "Especificação de arames tubulares para aços cromo e cromo-níquel resistentes à corrosão". A classificação para esta especificação possui a forma EXXXT-X. As três primeiras posições designam a composição química que correspondem a designação da AISI (American Iron and Steel Institute), tais como 308, 316 e 410, dos aços que possuem uma composição química similar. A posição final designa o tipo de proteção. Tipo T-1 são designados para utilizar gases de proteção CO₂ ou Argônio-CO₂ (a classificação requer o uso de CO₂). Tipo T-2 é designado para uso da proteção gasosa com Ar-2O₂. Tipo T-3 são autoprotegido. O tipo T-G está incluso para arames que não estão cobertos por outro tipo de designação de proteção.

3. OBJETIVO.

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo da soldagem de manutenção em trilhos aplicados em caminho de rolamento de máquinas empilhadeiras e recuperadoras de minério de ferro com o processo de soldagem arame tubular autoprotegido. Para caracterizar a soldagem foram realizados os seguintes ensaios: análise química, macrografia e ensaios mecânicos (tração, dobramento e dureza).

4. MATERIAIS E MÉTODOS.

4.1 TRILHO CR 135.

O trilho CR135 perfil americano utilizado neste trabalho foi doado pela empresa VALE e foram fabricados a partir de perfis laminados conforme norma ASTM A759 em aço carbono tipo standard sem tratamento térmico no boleto.

Na execução da soldagem foi utilizado um par de seções do trilho CR135 com as dimensões mostradas na figura 4.1. Cada seção do trilho CR135 tinha 200,0mm de comprimento, largura do patim com 131,76mm (5 3/16" polegadas), espessura da alma com 31,75mm (1 1/4" polegadas) e boleto com 87,31mm (3 7/16" polegadas).

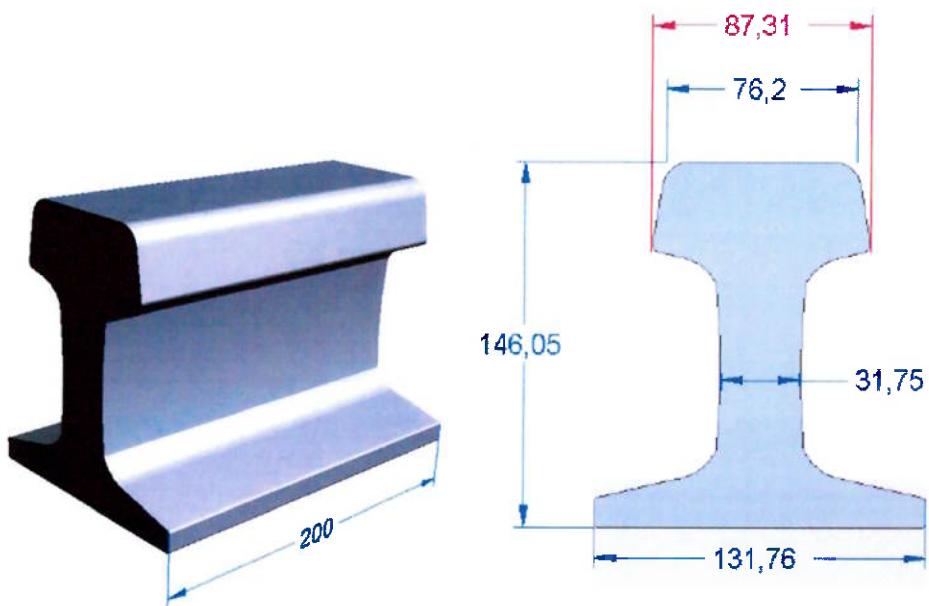


Figura 4.1 – Figura ilustrativa com as dimensões da seção do trilho CR135 utilizado para realizar a soldagem.

Os corpos de prova utilizados foram retirados a partir de cortes de seções de trilho com o processo de corte com serra elétrica, evitando assim a formação da zona afetada pelo calor (ZAC).

Na tabela 4.1 pode-se observar a composição química do trilho utilizado e o exigido pela norma ASTM A759 [10].

Tabela 4.1 - Comparaçao da composição química do trilho CR135 utilizado com o exigido pela norma ASTM A759.

ELEMENTOS DE LIGA	METAL DO TRILHO CR135	EXIGIDO PELA NORMA ASTM A759
Carbono	0,76	0,67 a 0,84
Manganês	1,02	0,70 a 1,10
Fósforo, máximo	0,007	0,04 máx
Enxofre, máximo	0,019	0,05 máx
Silício	0,39	0,10 a 0,50
Cromo	0,21	*NE
Molibdênio	0,01	*NE
Níquel	0,07	*NE

*NE: Não Especificado

4.2 CONSUMÍVEIS DE SOLDAGEM.

O consumível utilizado na execução da soldagem dos corpos de prova é fabricado pela Lincoln Electric Company.

4.2.1 CONSUMÍVEL PARA SOLDAGEM ARAME TUBULAR AUTOPROTEGIDO (FCAW-S).

Para a execução da soldagem dos passes de raiz, enchimento e acabamento, foi utilizado o arame tubular autoprotegido. O arame tubular

utilizado segue a especificação da norma AWS A5.20 "Specification For Carbon Steel Electrodes For Flux Cored Arc Welding", classificado como E71T8-H16 [27].

Na tabela 4.2 pode-se observar as propriedades mecânicas do eletrodo tubular utilizado e compará-las com a especificação AWS A5.20, enquanto que na tabela 4.3, tem-se a composição química do metal de solda depositado a partir do eletrodo tubular E71T8-H16 para comparar com o especificado pela AWS A5.20 e o catálogo do fabricante.

Tabela 4.2 – Propriedades mecânicas do eletrodo tubular segundo a norma AWS A5.20 comparadas com o certificado e o catálogo do fabricante.

CONSUMÍVEL E71T8-H16 DE ACORDO COM A AWS A 5.20			
PROPRIEDADES	ESPECIFICAÇÃO AWS	CATÁLOGO DO FABRICANTE	CERTIFICADO DO CONSUMÍVEL
LIMITE RESISTENCIA MÍN.	70-95 ksi (480-655 MPa)	83-86 ksi (575-595 MPa)	570
LIMITE ESCOAMENTO MÍN.	58 ksi (400 MPa) mín	63-66 ksi (435-455 MPa)	440
ALONGAMENTO %	22 mín	26-29	28
DUREZA, ROCKWELL B	Não especificado	87-89	88
CHARPY-V [-29°C (J)]	27	34-54	49, 50 e 57

Tabela 4.3 – Composição química do eletrodo tubular segundo a norma AWS A5.20 comparadas com o certificado e o catálogo do fabricante.

CONSUMÍVEL E71T8-H16 DE ACORDO COM A AWS A 5.20			
ELEMENTO QUÍMICO (%)	ESPECIFICAÇÃO AWS	CATÁLOGO DO FABRICANTE	CERTIFICADO DO CONSUMÍVEL
C	0,30 máx	0,15-0,20	0,18
Mn	1,75 máx	0,61-0,65	0,64
Si	0,60 máx	0,17-0,21	0,2
S	0,03 máx	≤0,03	0,01
P	0,03 máx	≤0,01	0,01
Al	1,8 máx	0,5-0,6	0,6

4.3 EXECUÇÃO DA SOLDAGEM.

4.3.1 EXPERIMENTOS.

Foram utilizados 04 (quatro) juntas com trilhos CR135 nos experimentos, onde cada par de seções do trilho formou uma junta soldada. Foi utilizado cobre junta (backing) em todas as amostras. A junta formada foi denominada amostra 1. Pode-se observar na figura 4.2 os detalhes da geometria das juntas montadas com as seções de trilhos CR135.

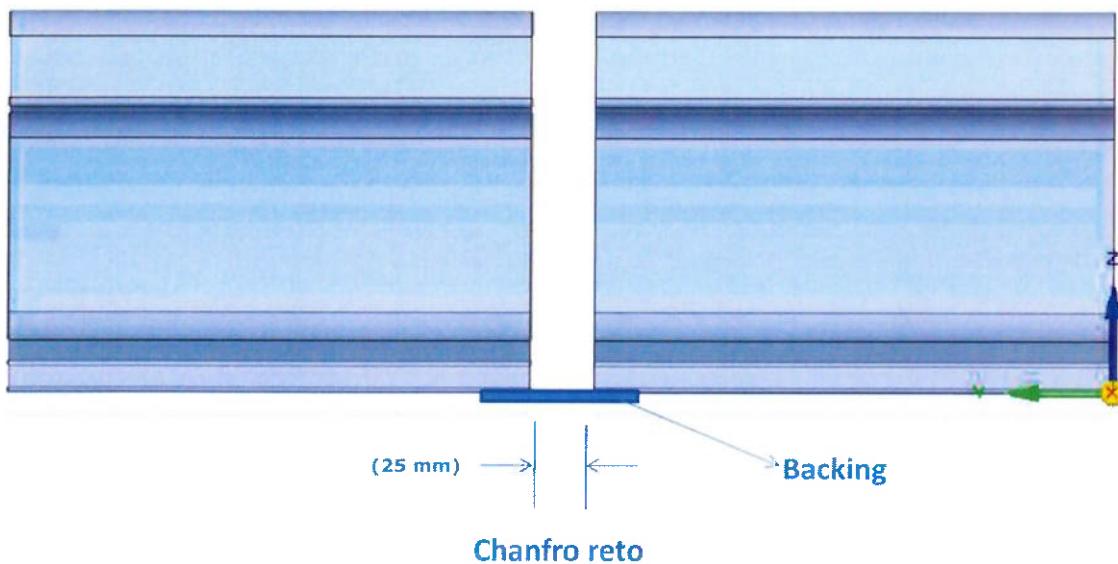


Figura 4.2 – Detalhe da junta soldada utilizando duas seções do trilho CR135 com backing

Em cada junta foi executada o mesmo processo de soldagem com arame tubular autoprotegido (FCAW-S). Os corpos de prova para análise química e os ensaios de propriedades mecânicas foram retirados de cada junta soldada. A soldagem das seções de trilhos foi executada pela empresa RID Melalmecânica em Serra, ES.

4.3.2 PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM.

Todos os experimentos realizados visam qualificar um procedimento de soldagem de manutenção em campo nos trilhos CR135, utilizados nos caminhos de rolamento das máquinas de pátio utilizadas na logística de transporte de minério de ferro, com isso buscou-se como referência a norma AWS D1.1 “Structural Welding Code – Steel” [28] para quantificar e informar onde extrair os corpos de prova, assim como o dimensional dos mesmos. Porém, com intuito de realizar outras análises, também foi feito medidas de dureza e macrografia da junta soldada.

Os ensaios tendo como referência a AWS D1.1, para espessuras acima de 25,4mm são: dobramento lateral e ensaio de tração. A quantidade de corpos de prova retirados em cada junta soldada pode ser observada na tabela 4.4 e a localização pode ser vista na figura 4.3.

Tabela 4.4 – Quantidade de corpos de prova necessários para a qualificação de um procedimento de soldagem conforme a norma AWS D1.1 e a localização da extração dos corpos de prova (CP) no trilho CR135 [28].

ENSAIOS	QUANTIDADE DE AMOSTRAS	LOCAL DE EXTRAÇÃO DO CP NO TRILHO
TRAÇÃO	2	BOLETO
DOBRAMENTO	4	ALMA

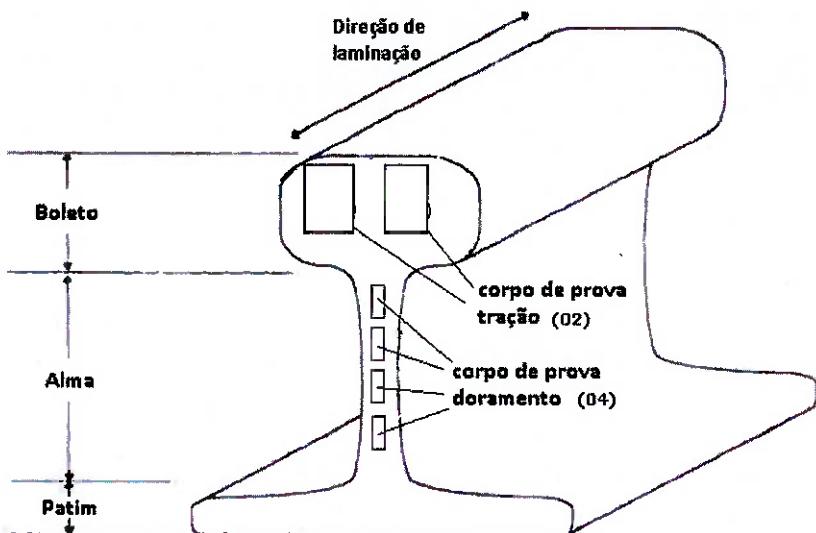


Figura 4.3 – Desenho esquemático com a indicação do local onde serão extraídos os corpos de prova da junta soldada.

4.3.3 EQUIPAMENTO DE SOLDAGEM.

O equipamento de soldagem utilizado na soldagem dos corpos de prova é fabricado pela empresa The Lincoln Eletric Company. Na soldagem com o processo arame tubular autoprotegido, em todas as amostras, foi utilizado uma fonte Powertec 505S, corrente contínua, com tensão constante e alimentador de arame LF24M.

4.3.4 VARIÁVEIS UTILIZADAS NA SOLDAGEM.

Para evitar o resfriamento rápido da junta soldada, foi realizado preaquecimento. Visto que o resfriamento ao ar poderia trazer consequências indesejadas à junta soldada, foi utilizada uma manta de kevlar para diminuir a velocidade de resfriamento. Para evitar o superaquecimento na soldagem, foi feito controle interpasso, visto que a quantidade de camadas realizadas é bem elevada, conforme mostra a figura 4.4.

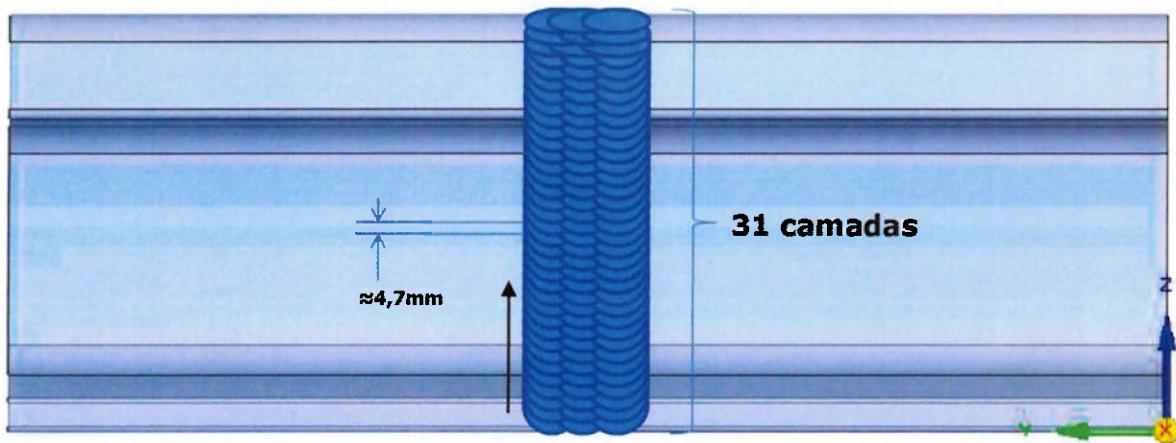


Figura 4.4 – Junta soldada em todos os experimentos, mostrando a quantidade de camadas, espessura aproximada de cada camada e o sentido do enchimento.

Em todos os experimentos foi utilizado o mesmo tipo de geometria de junta. A tabela 4.5 apresenta os valores médios das variáveis para as 04(quatro) amostras.

Em todos os experimentos foi adotado o processo de soldagem com arame tubular autoprotegido e os dados das variáveis do processo adotadas estão descritas na tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Média dos dados das variáveis do processo de soldagem arame tubular autoprotegido para todos os 04(quatro) amostras do experimento.

Camadas	Classificação do consumível	\varnothing	Corrente (A)	Tensão (V)	Corrente/ Polaridade	Velocidade (mm/minut.)	Temperatura interpasse (°C)
1 (raiz)	E-71T-8-H-16	1,6 mm	250 a 270	20 a 23	CC (-)	186	349
2 a 4 (base)	E-71T-8-H-16	1,6 mm	250 a 270	20 a 23	CC (-)	173	355
5 a 9 (alma)	E-71T-8-H-16	1,6 mm	250 a 270	20 a 23	CC (-)	274	360
10 a 13 (alma)	E-71T-8-H-16	1,6 mm	250 a 270	20 a 23	CC (-)	213	380
14 a 17 (boleto)	E-71T-8-H-16	1,6 mm	250 a 270	20 a 23	CC (-)	237	375
18 a 21 (boleto)	E-71T-8-H-16	1,6 mm	250 a 270	20 a 23	CC (-)	250	366
22 a 25 (boleto)	E-71T-8-H-16	1,6 mm	250 a 270	20 a 23	CC (-)	250	371
26 a 30 (boleto)	E-71T-8-H-16	1,6 mm	250 a 270	20 a 23	CC (-)	214	367
31 (acabamento)	E-71T-8-H-16	1,6 mm	250 a 270	20 a 23	CC (-)	188	379
TEMPERATURA DE PREAQUECIMENTO:						300°C	

4.3.5 CONTROLE DAS VARIÁVEIS DE SOLDAGEM.

Durante a soldagem das amostras foi feito o monitoramento da corrente e da tensão, com a utilização de um amperímetro e um voltímetro instalados no alimentador de arame. Para obter a velocidade de soldagem no patim, na alma e no boleto das amostras, foi utilizado o comprimento do cordão de solda dividido pelo tempo de arco aberto e fechado. Foi utilizado um cronômetro para medir o tempo de soldagem. Foi feito o preaquecimento e o controle interpasse, utilizando como instrumento de medida um termômetro digital.

4.4 CARACTERIZAÇÃO METALOGRÁFICA.

4.4.1 MACROGRAFIA.

As macrografias foram realizadas em todas as amostras soldadas, na região entre o patim e a alma do trilho.

O objetivo do ensaio é verificar a extensão da ZAC (zona afetada pelo calor) e verificar as descontinuidades utilizando o reagente Nital com concentração de 10%. O equipamento utilizado para obter as imagens foi uma lupa estereoscópica da marca Sony CCD TOP WAY e o software ImageJ 1.44d.

4.5 ENSAIOS MECÂNICOS.

Os ensaios mecânicos visam à qualificação de um procedimento de soldagem com referência na AWS D1.1[28]. Para realização da qualificação

foram realizados os ensaios de resistência à tração e o ensaio de dobramento lateral. Adicionalmente foi realizado o ensaio de dureza Vickers.

4.5.1 ENSAIO DE TRAÇÃO.

Este ensaio foi realizado a temperatura ambiente de 23°C e com um equipamento universal de ensaios mecânicos.

Os corpos de prova foram extraídos nas regiões indicadas na figura 4.3. Foram ensaiados um total de 2 (dois) corpos de prova para cada amostra. As dimensões finais são apresentadas na figura 4.6.

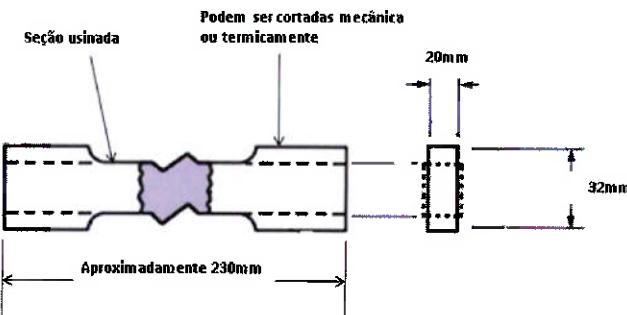


Figura 4.5 – Dimensões dos corpos de prova seção reduzida do ensaio de tração da junta soldada [28].

Para o metal de base, os corpos de prova foram extraídos da região do boleto de uma seção de trilho sem solda com 400 mm de comprimento mostrada na figura 4.7

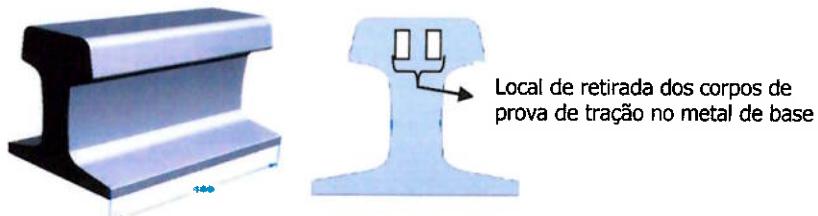


Figura 4.6 – Esquemático da região do trilho (boleto) onde foram extraídos os corpos de prova de tração no metal de base sem solda.

4.5.1.1 SIMULAÇÃO

Foi feito uma simulação com software licenciado ANSYS Multiphysics, para o carregamento (solicitação mecânica) entre a roda do equipamento e o trilho CR135. Foi criado um material com as mesmas propriedades mecânicas do trilho CR135 e aplicado nele, uma tensão de flexão – carga por eixo de 3,5 toneladas no centro da seção do trilho, na região da junta soldada. Foram consideradas as duas extremidades laterais do trilho engastadas. A junta soldada no centro do trilho também foi criada no software com as propriedades mecânicas específicas do consumível.

Para simplificação dos resultados, foram desprezadas as tensões térmicas, residuais e de contato.

4.5.1.2 CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO

Foi adotado como critério de aceitação para o ensaio de tração das juntas soldadas os seguintes termos:

- A fratura deverá ocorrer no metal de base e caso ocorra no metal de solda, o limite de escoamento medido deverá ser maior que a solicitação máxima obtida pelo cálculo estrutural através do software ANSYS Multiphysics multiplicado pelo fator de segurança 2. A figura 4.8 mostra as condições de contorno utilizadas para cálculo da solicitação entre a roda do equipamento portuário (empilhadeiras e recuperadoras

de minério) e o trilho CR135. Na figura 4.9 é mostrada a malha utilizada para o cálculo em elementos finitos.

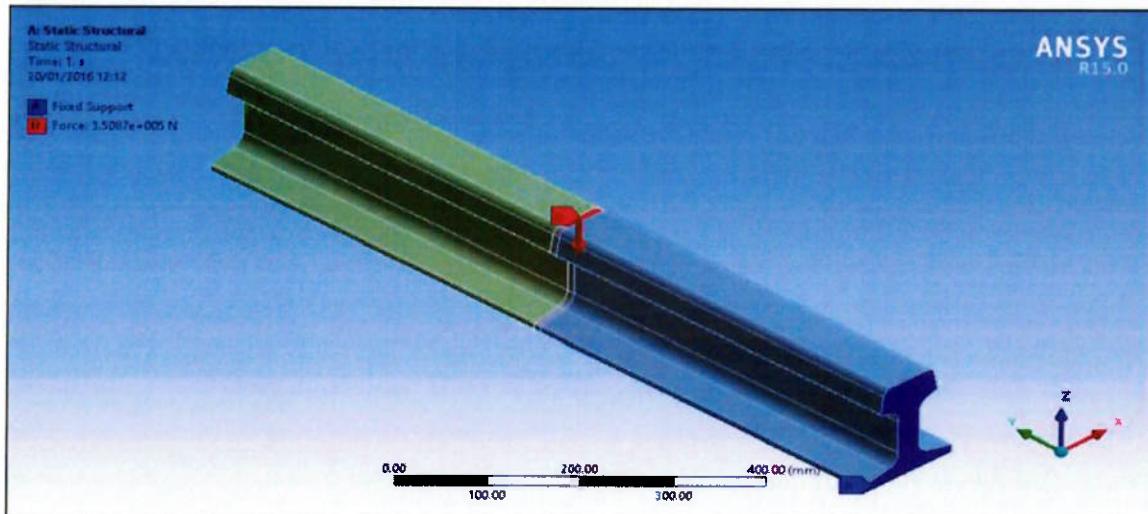


Figura 4.7 – Condições de contornos para o cálculo da solicitação mecânica do carregamento entre a roda e o trilho do caminho de rolamento: aplicação de uma carga concentrada de 3,5 toneladas; fixação das extremidades do trilho.

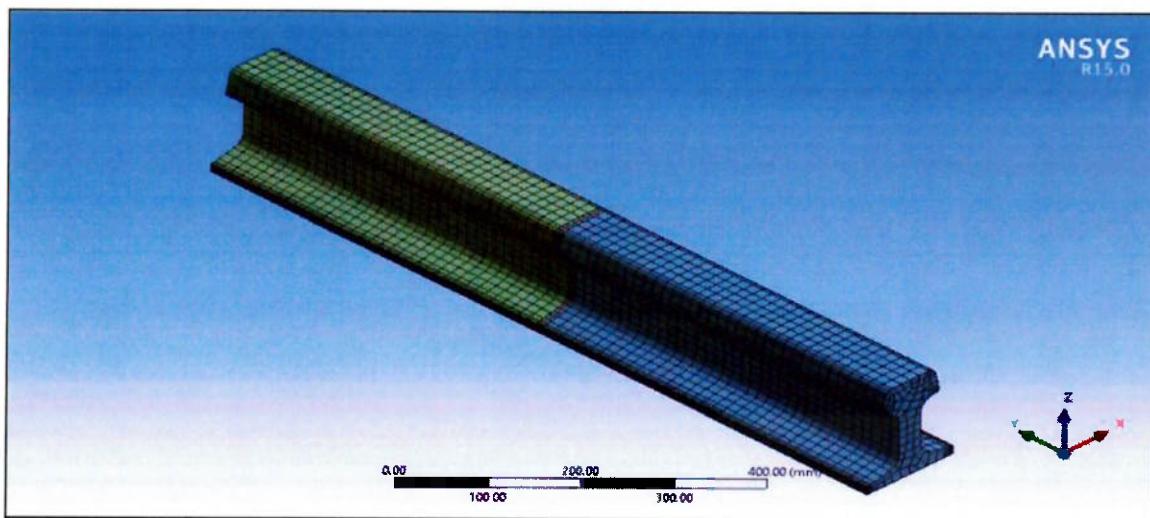


Figura 4.8 – Malha utilizada no cálculo por elementos finitos.

4.5.2 ENSAIO DE DOBRAMENTO TRANSVERSAL.

Os corpos de prova para o ensaio de dobramento lateral foram extraídos da alma da seção de trilho CR135 soldada conforme mostra a figura 4.3,

totalizando 04 (quatro) corpos de prova para cada amostra. As dimensões são mostradas na figura 4.10.

Foi adotado como critério de aceitação para este ensaio a norma AWS D1.1[28]. Neste caso serão aprovados os corpos de prova que não apresentarem descontinuidades que excedam as seguintes dimensões:

- 3mm, medido em qualquer direção na superfície
- 10mm, a soma das maiores dimensões de todas as descontinuidades excedendo 1mm, mas menor que ou igual a 3mm.
- 6mm, a trinca de canto máxima, exceto quando esta trinca de canto resulta de inclusão visível de escória ou outro tipo de descontinuidade de fusão, deve ter no máximo 3mm

Corpos de prova com trincas de canto que excedam 6mm, sem evidência de inclusão de escória ou outro tipo de descontinuidade de fusão devem ser desconsiderados, e um corpo de prova de teste substituto da ligação soldada original deve ser testado.

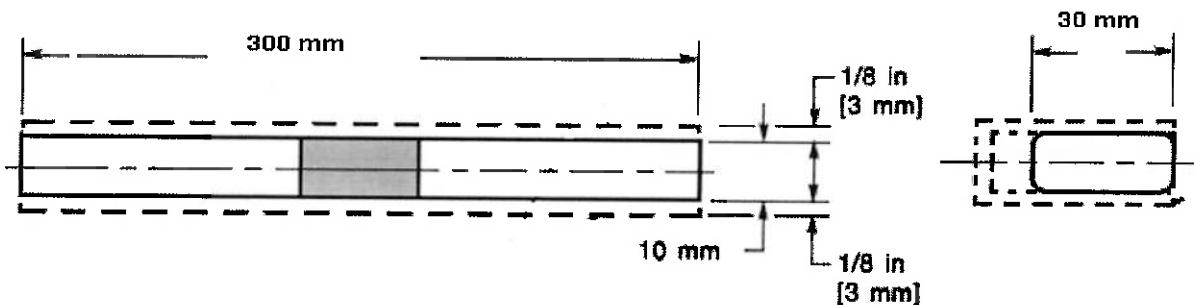


Figura 4.9 – Dimensões dos corpos de prova do ensaio de dobramento lateral [28].

4.5.3 ENSAIO DE DUREZA

O ensaio de dureza Vickers (10kg) foi realizado nas juntas soldadas das quatro amostras de trilhos soldadas a fim de verificar variações de dureza. As medições de dureza foram feitas nos corpos de provas extraídos da região do patim do trilho, conforme mostra o desenho esquemático na figura 4.11.

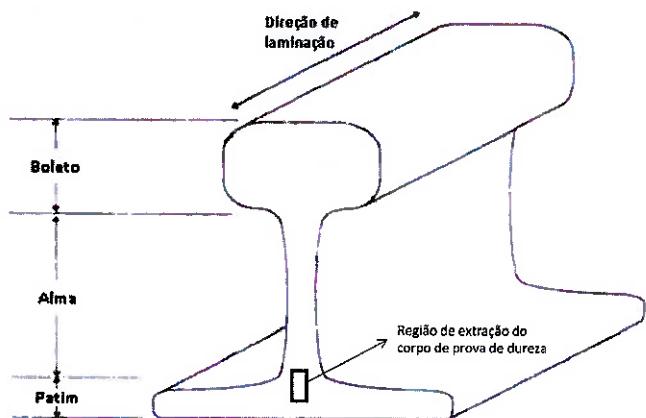


Figura 4.10 – Desenho esquemático da região do trilho (patim) onde foram extraídos os corpos de prova para o ensaio de dureza.

O perfil de dureza elaborado na região do patim foi baseado na norma N-133 da empresa Petrobrás [29], porém adaptado para um chanfro reto conforme figura 4.11.

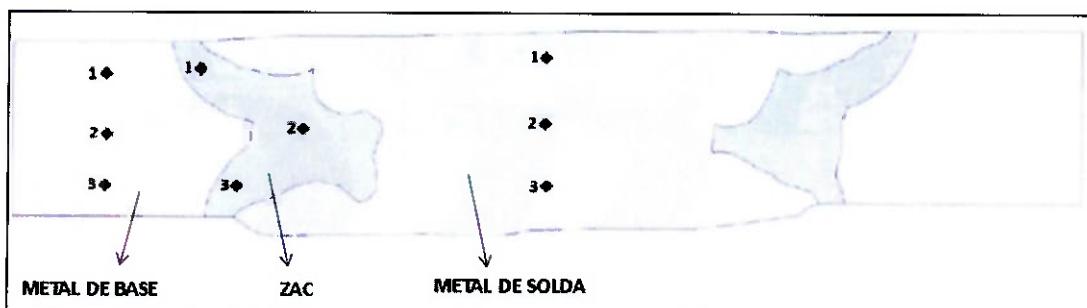


Figura 4.11 – Região do patim onde foram obtidos os pontos de dureza na junta soldada.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.

5.1 CARACTERIZAÇÃO METALOGRÁFICA.

5.1.1 MACROGRAFIA.

A macrografia da amostra 1 é apresentada na figura 5.1. Nesta, é possível visualizar os cordões de solda que foram realizados. É possível visualizar uma indicação de falta de fusão com 0,3mm proveniente de uma velocidade excessiva ou de uma corrente baixa.

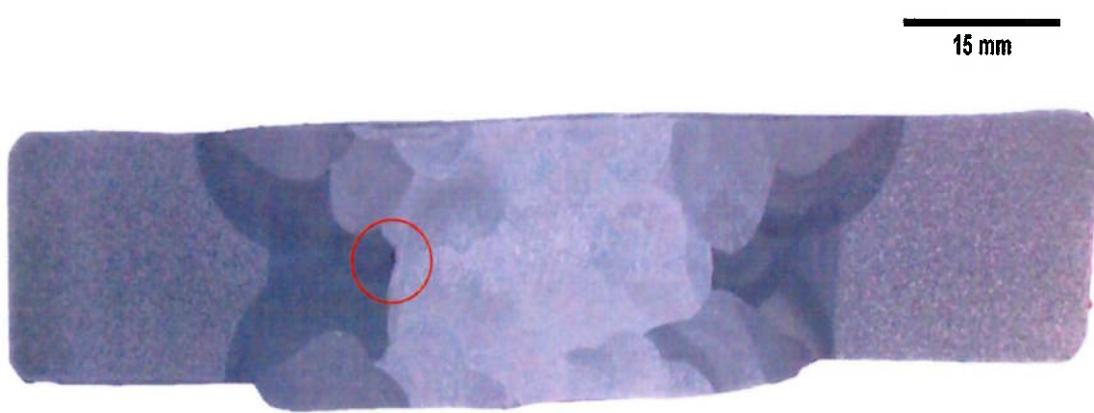


Figura 5.1 – Macrografia da amostra 1 soldada com o processo arame tubular autoprotegido localizado no patim do trilho. Círculo vermelho indica falta de fusão com 0,3mm. Nital 10%.

A macrografia da amostra 2 é apresentada na figura 5.2. Nesta, é possível visualizar os cordões de solda que foram realizados. É possível visualizar uma indicação de falta de fusão com 1,9mm e uma inclusão de

escória com 0,7mm, provenientes de baixa corrente e falta de limpeza interpasses, respectivamente.

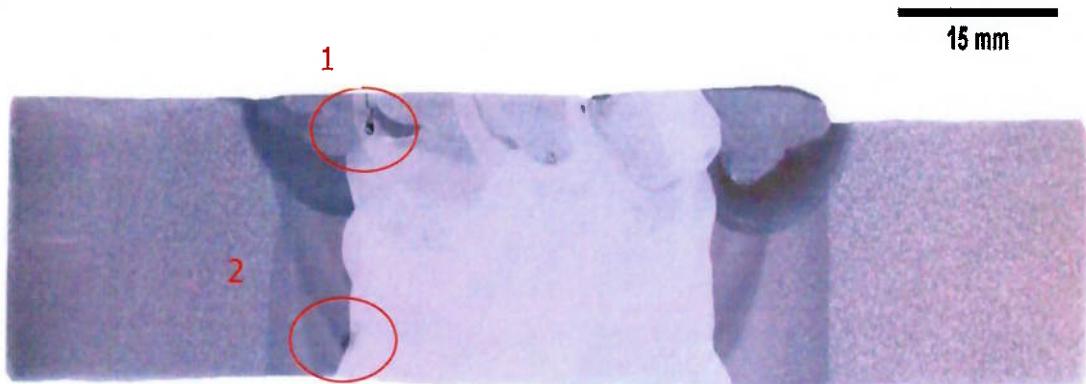
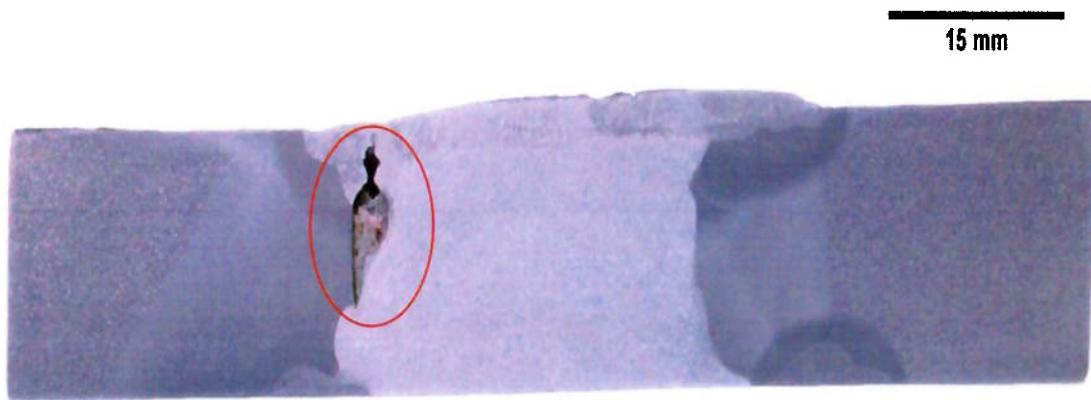


Figura 5.2 – Macrografia da amostra 2 soldada com o processo arame tubular autoprotegido localizado no patim do trilho. Círculos vermelhos indicam inclusão com 0,7mm(1) e falta de fusão com 1,9mm (2). Nital 10%.

A macrografia da amostra 3 é apresentada na figura 5.3. Nesta, é possível visualizar os cordões de solda que foram realizados. É possível visualizar uma indicação de falta de fusão com 10mm, proveniente de baixa



corrente.

Figura 5.3 – Macrografia da amostra 3 soldada com o processo arame tubular autoprotegido localizado no patim do trilho. Círculo vermelho indica falta de fusão com 10mm. Nital 10%.

A macrografia da amostra 4 é apresentada na figura 5.4. Nesta, é possível visualizar os cordões de solda que foram realizados. É possível visualizar uma indicação de inclusão de escória entre 1 e 2,1mm no metal de solda.

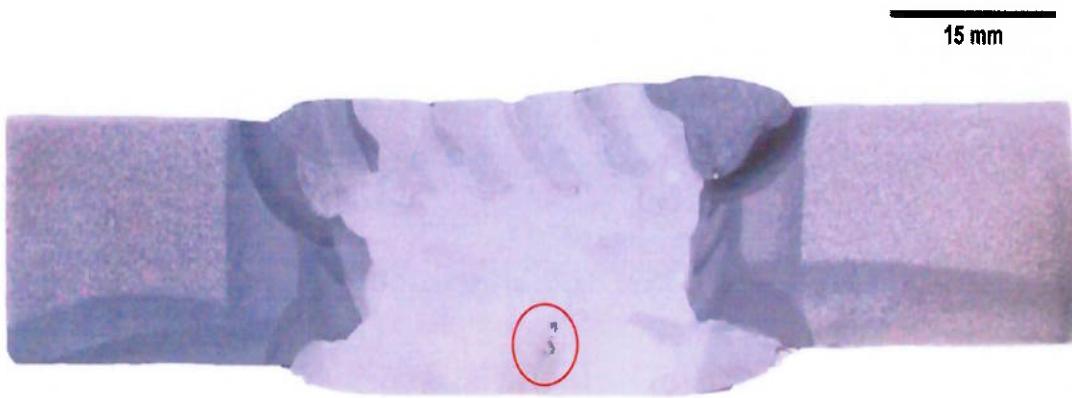


Figura 5.4 – Macrografia da amostra 4 soldada com o processo arame tubular autoprotegido localizado no patim do trilho. Círculo vermelho indica inclusão entre 1 e 2mm no metal de solda. Nital 10%.

5.2 ENSAIOS MECÂNICOS.

5.2.1 ENSAIO DE TRAÇÃO.

O resultado do ensaio de tração esta na tabela 5.1. A figura 5.5 apresenta um gráfico com os resultados de tração para as quatro amostras, incluindo também o metal de base e o valor obtido por cálculo estrutural pelo software ANSYS da solicitação mecânica real no trilho CR135.

Tabela 5.1 – Resultado do ensaio de tração para todas as amostras, sendo dois corpos de prova por amostra.

LIMITE DE ESCOAMENTO				
AMOSTRA	PROCESSO	CORPO DE PROVA	Mpa	LOCAL DE ROMPIMENTO
1	ARAME TUBULAR AUTOPROTEGIDO	CP 01	377	Rompeu na solda
		CP 02	394	
2	ARAME TUBULAR AUTOPROTEGIDO	CP 01	405	Rompeu na solda
		CP 02	413	
3	ARAME TUBULAR AUTOPROTEGIDO	CP 01	314	Rompeu na solda
		CP 02	368	
4	ARAME TUBULAR AUTOPROTEGIDO	CP 01	413	Rompeu na solda
		CP 02	421	

Limite de escoamento (MPa)

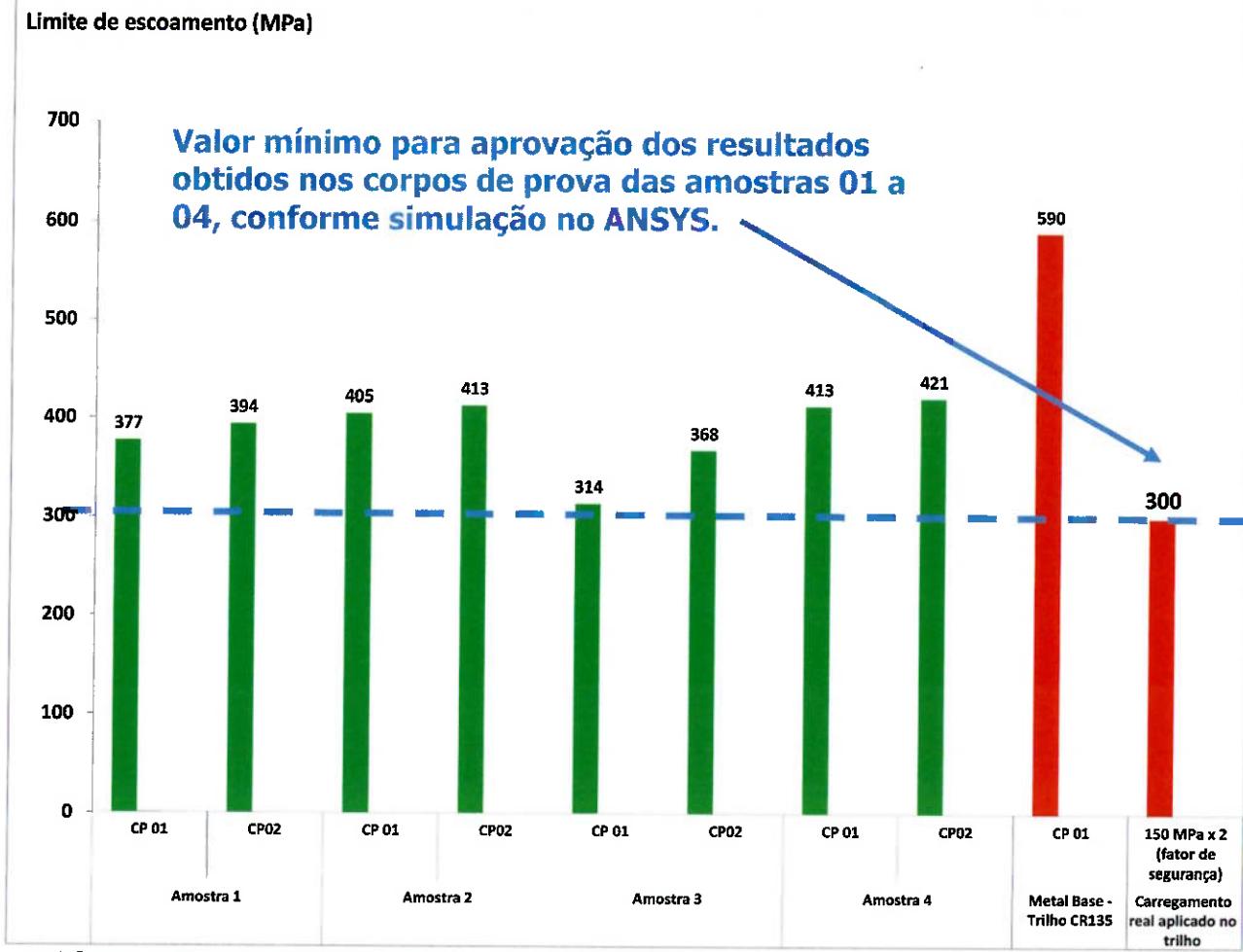


Figura 5.5 – Resultado do ensaio de tração para todas as amostras, comparado com o metal de base e o valor da solicitação mecânica no trilho CR135.

Todos os corpos de prova de todas as amostras ensaiadas tiveram um valor do limite de escoamento acima do valor especificado pela análise por cálculo estrutural. Em alguns casos foi bem acima do valor calculado, porém todos tiveram os rompimentos na região do cordão de solda, conforme se observa na tabela 5.1. O valor obtido nos corpos de prova é aceitável desde que esteja acima do valor da solicitação real calculada pelo software ANSYS multiplicado pelo fator de segurança adotado, conforme mostrado na última coluna da figura 5.5. Com isso todos os valores encontrados estão aprovados.

5.2.2 ENSAIO DE DOBRAMENTO LATERAL.

Foram realizados quatro ensaios de dobramento lateral para cada amostra de trilho CR135 e os resultados estão mostrados na tabela 5.2. A preparação dos corpos de prova, o método de ensaio e os critérios de aceitação são baseados na norma AWS D1.1 [28].

No ensaio de dobramento lateral, os corpos de prova da amostra 1 foram todas aprovadas, porém dois corpos de prova apresentaram descontinuidades, mas todos foram aprovados de acordo com o critério de aceitação da norma adotada.

Os corpos de prova da amostra 2 não foram aprovados devido à reprovação de um dos corpos de prova com rompimento no metal de solda.

Na amostra 3, todos os corpos de prova foram reprovados por apresentarem descontinuidades fora do limite de aceitação da norma.

Para a amostra 4, um dos quatro corpos de prova foi reprovado devido à presença de descontinuidades com dimensão superior ao permitido pela norma.

Para a norma utilizada, somente a amostra 1 foi aprovada.

Tabela 5.2 – Resultado do ensaio de dobramento lateral para todas as amostras, sendo quatro corpos de prova por amostra.

RESULTADO DO ENSAIO DE DOBRAMENTO LATERAL				
AMOSTRA	PROCESSO	CORPO DE PROVA	DIMENSÃO DESCONTINUIDADE	RESULTADO
1	ARAME TUBULAR AUTOPROTEGIDO	CP 01	METAL DE SOLDA: 2,1mm	APROVADO
		CP 02	METAL DE SOLDAS: 1,0mm	APROVADO
		CP 03	ROMPEU METAL BASE	APROVADO
		CP 04	ROMPEU METAL BASE	APROVADO
2	ARAME TUBULAR AUTOPROTEGIDO	CP 01	ROMPEU METAL BASE	APROVADO
		CP 02	ROMPEU METAL BASE	APROVADO
		CP 03	ROMPEU NA SOLDA	REPROVADO
		CP 04	ROMPEU METAL BASE	APROVADO
3	ARAME TUBULAR AUTOPROTEGIDO	CP 01	METAL DE SOLDA: 7,4mm	REPROVADO
		CP 02	METAL DE SOLDA: 24,5mm	REPROVADO
		CP 03	METAL DE SOLDA: 9,6mm	REPROVADO
		CP 04	METAL DE SOLDAS: 13,5mm	REPROVADO
4	ARAME TUBULAR AUTOPROTEGIDO	CP 01	METAL DE SOLDA: 2,5mm	APROVADO
		CP 02	METAL DE SOLDA: 4,8mm	REPROVADO
		CP 03	ROMPEU METAL BASE	APROVADO
		CP 04	ROMPEU METAL BASE	APROVADO

5.2.3 ENSAIO DE DUREZA

Os resultados das medidas de dureza das amostras de 01 a 04 estão demonstrados na tabela 5.3, divididos conforme região da junta soldada, extraídas do patim do trilho. Os locais 1, 2 e 3, representam, respectivamente, o local mais próximo da raíz, o intermediário e o mais afastado, conforme mostra a figura 4.12.

Para todas as amostras os valores do metal de solda apresentam uma tendência de serem os menores

Na ZAC há uma propensão, em todos os corpos de provas, da face ter maior dureza, porém não há muita similaridade entre a raiz e o enchimento. Para o enchimento e raiz, a menor dureza se caracteriza pelo fato de ter sofrido mais de um ciclo térmico, oriundo dos diversos passes realizados para preenchimento da junta do trilho, cujo fato não ocorre na face. Os ciclos térmicos geram um efeito similar a um tratamento térmico, reduzindo dureza e produzindo grãos mais refinados. Até mesmo no metal de solda, é verificado que a maior dureza está nas regiões mais próximas da face (dureza na localização 1). Para melhorar a visualização das medidas de dureza em relação a cada amostra, foram criados os gráficos das figuras 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10.

Tabela 5.3 – Resultado das medidas de dureza para todas as amostras do trilho. Foi utilizado um corpo de prova por amostra.

Amostra	Região do trilho	Metal base			ZAC			Metal de solda		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
1- CP único	Patim	351	351	351	383	285	309	199	156	156
2- CP único		351	351	351	464	405	383	220	170	160
3- CP único		351	351	322	420	322	441	179	147	147
4- CP único		351	351	351	383	322	383	187	143	170

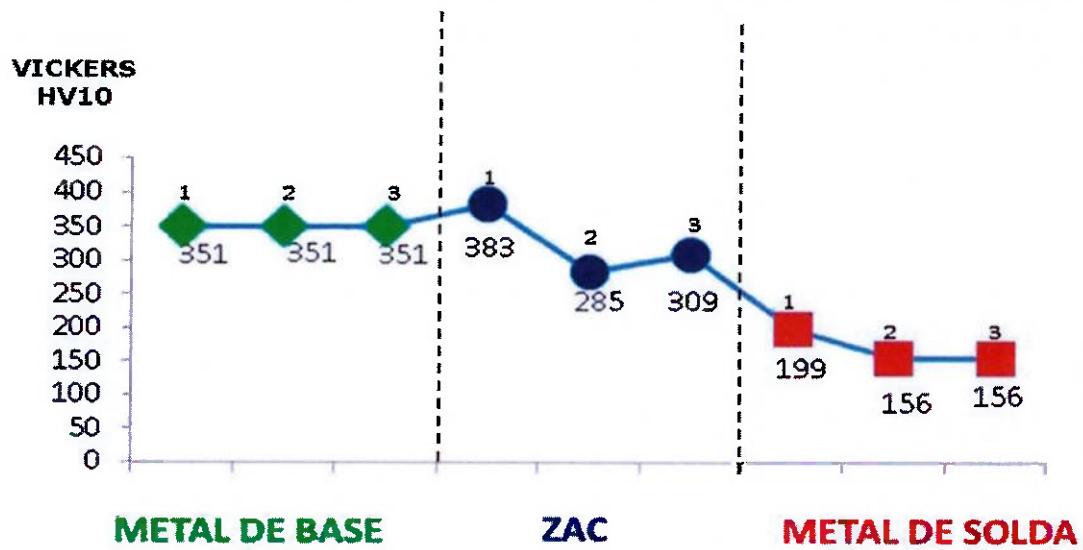


Figura 5.6 – Medidas de dureza da amostra 01, com as localizações indicadas entre parênteses. Corpo de prova único

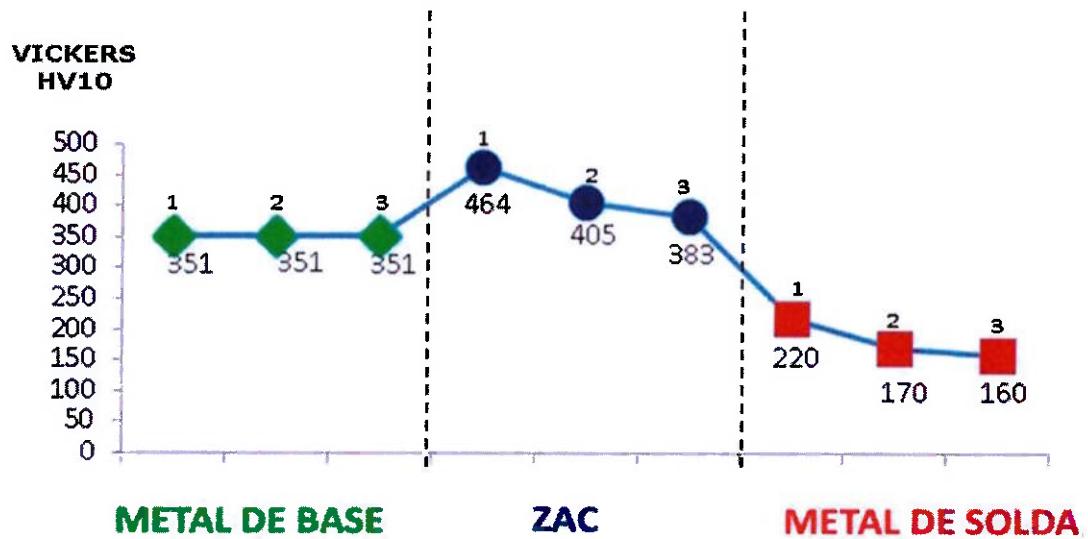


Figura 5.7 – Medidas de dureza da amostra 02, com as localizações indicadas entre parênteses. Corpo de prova único

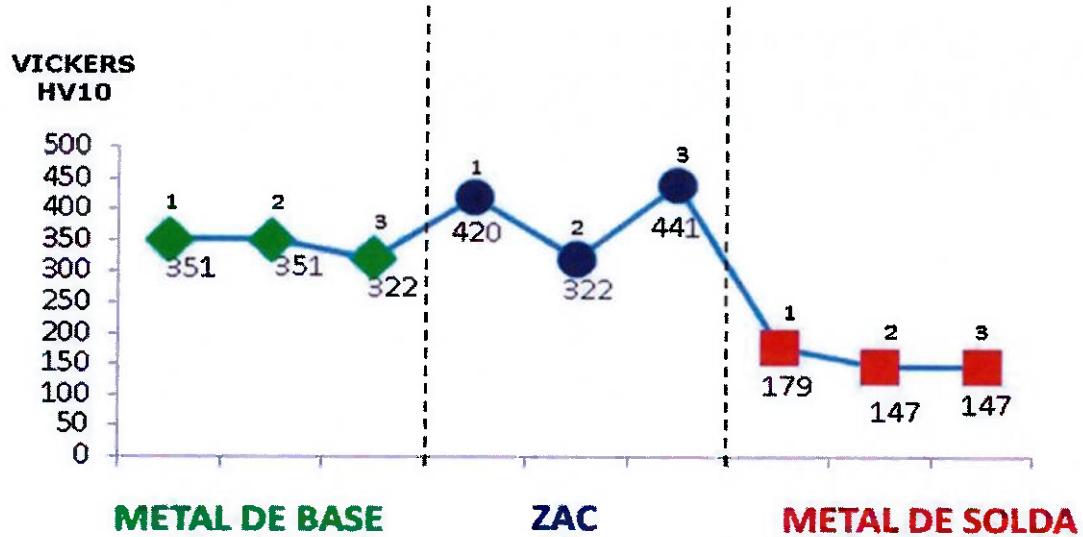


Figura 5.8 – Medidas de dureza da amostra 04, com as localizações indicadas entre parênteses. Corpo de prova único

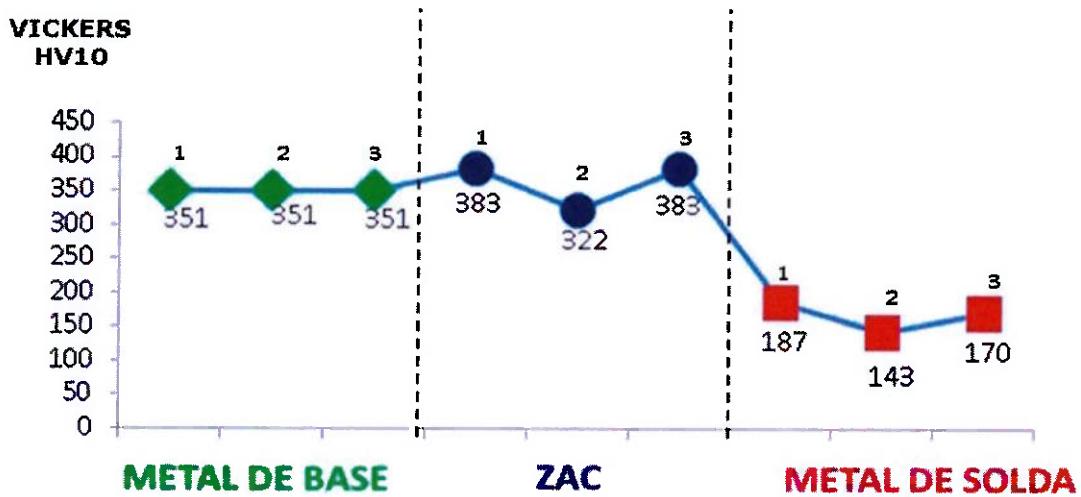


Figura 5.9 – Medidas de dureza da amostra 04, com as localizações indicadas entre parênteses. Corpo de prova único

As medidas de dureza na região do metal de solda apresentam grandes diferenças entre o metal base e a ZAC, isto acontece, pois foi utilizado um consumível com composição química e propriedades mecânicas bem diferentes.

Comparando as durezas encontradas nas regiões ensaiadas das amostras, observa-se a correlação entre os resultados obtidos no ensaio de tração, descritos na tabela 5.2, com os valores das durezas encontradas.

O local onde houve o rompimento dos corpos de prova do trilho CR135 no ensaio de tração está localizado no metal de solda. Esta região possui os menores valores de dureza. Existe a correlação da dureza Vickers com os limites de escoamento e resistência a tração [30], que leva a indicar a microestrutura do metal de solda do enchimento e raíz como local de menor limite de escoamento e respectiva menor resistência mecânica. A menor dureza encontrada no metal de solda pode ocasionar desgaste prematuro na região de contato entre a roda do equipamento e a junta soldada no trilho CR135, porém o contato entre estes dois pontos (roda x junta soldada do trilho CR135) ocorre em ciclos de contato da ordem de 01(um) contato a cada 02(duas) horas de equipamento operando por dia, ou seja, existe pouco contato entre as superfícies.

6. CONCLUSÕES.

Com base nos materiais utilizados, experimentos realizados e nos resultados obtidos, é possível concluir que:

1. Os resultados mostram que os ciclos térmicos impostos nas quatro amostras de trilho soldadas não foram prejudiciais às propriedades mecânicas da região da ZAC, pois apresentaram resultados em média, superiores ao encontrado no metal de base, mesmo as amostras tendo em torno de 31 camadas.
2. Os valores obtidos nos ensaios mecânicos mostram que a região de pior desempenho foi o metal de solda, visto que o rompimento dos corpos de prova ocorreu nesta região, porém era de se esperar devido às propriedades mecânicas do consumível ser inferior às do metal de base.
3. Pelos resultados obtidos no ensaio de tração, a soldagem de manutenção para trilhos CR135 pode ser utilizada desde que o critério de aceitação atenda aos requisitos de solicitação mecânica, calculados por software, entre a roda do equipamento de mineração e o trilho do caminho de rolamento. Caso seja utilizado os critérios de aceitação da AWS D1.1, nenhuma amostra estará aprovada.
4. Pelos resultados de dureza encontrados no metal de solda, pode ocorrer desgaste prematuro na região do reparo, pelo contato entre a roda do equipamento e o trilho CR135, mesmo que a dureza não seja um requisito da norma ASTM A759. Para mitigar este problema, deverá ser

realizado um revestimento ou passe de acabamento por soldagem com dureza superficial similar ao metal de base.

SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.

1. Qualificação de um procedimento para soldagem de manutenção em trilhos ferroviários tipo TR68 com a utilização de um consumível com níquel para o processo arame tubular autoprotegido.
2. Estudo sobre a influência do preaquecimento nas propriedades mecânicas da junta soldada pelo processo de soldagem arame tubular autoprotegido em trilho CR135.
3. Análise de produtividade comparando os processos de soldagem aluminotérmica e arame tubular autoprotegido na soldagem de trilhos CR135.
4. Estudo comparativo entre as propriedades mecânicas obtidas pelo processo de soldagem arame tubular autoprotegido com a utilização dos consumíveis a base de níquel e a base de alumínio.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

1. SARTORI, M. Caracterização Mecânica e Metalúrgica de Soldas Aluminotérmicas em Trilhos Ferroviários. Trabalho de Diplomação – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
2. ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres. Disponível em: <http://www.antt.gov.br/index.php/content/view/4735/Ferroviario.html>
Acesso em: 12/02/2016
3. SILVA, A.A.M. Caracterização Mecânica e Metalúrgica de Segmentos de Trilho Soldados pelo Processo THERMIT SOWOS, Trabalho de Conclusão, DEMET – UFRGS, Porto Alegre, 1997
4. MACEDO, M.L.K.; SILVA, A.A. M.; BARLAVENTO, M.A . REGULY, A . Avaliação Mecânica e Metalúrgica em Trilho Ferroviário Utilizado em Via Contínua , Jornadas SAM – CONAMET – AAS2001, 2001
5. SILVA, P.R.T. Caracterização de Trilhos Ferroviários Quanto à Tenacidade à Fratura e Comportamento em Fadiga, Dissertação de Mestrado, PPGEM – UFRGS, Porto Alegre, 1995.
6. SAARNA, M.; LAANSO, A. Rail and Rail Wed Testing, 4th International DAAAM Conference "Industrial Engineering – Innovation as Competitive Edge for SME, Tallin, Estonia, 2004.
7. COMERCIAL FORTE, Catálogo de Trilhos para Pontes Rolantes e Guindastes.

Disponível em <http://www.comercialforte.com.br/pag/02/08.pdf>

Acesso em: 05/09/2015

8. Verso Brasil Editora. VALE: Nossa História. Rio de Janeiro. Verso Brasil Editora, 2012. 410p.
9. American Society for Metals. ASM handbook. Vol. 6: Welding, brazing and soldering, Materials Park, Ohio: ASM International; 1993.
10. Standard Specification for Carbon Steel Crane Rails: A759. American Society for Testing and Materials. 2010.
11. ZERBST, U. et al. Introduction to the Damage Tolerance Behavior of Railway Rails. In: Engineering Fracture Mechanics, Kidlington, v. 76, n. 17, p. 2563-2601, 2009.
12. TIMOSHENKO, A.; LANGER, B. F. Stress in railroad track. New York: American Society of Mechanical Engineering. 1932. 34 p. (ASME transaction. 54).
13. BRIGUENTE, C.A. Caracterização Microestrutural e Mecânica de Trilhos Ferroviários Soldados de Topo por Caldeamento, 2013. 51 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho", Campus Ilha Solteira, 1997
14. SKYTTEBOL, A. Continuous Welded Railway Rails: Residual Stress Analyses, Fatigue Assessments and Experiments. 2004. 176 f. Thesis (Doctor in Mechanical Engineering) – Chalmers University of Technology, School of Mechanical Engineering. Sweden. 2004.
15. ROLDO, L. Análise de Tensões Residuais em Trilhos ferroviários. 1998. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

16. SILVA ROSA, J. C. Avaliação de Solda Aluminotérmica em Ângulo. Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
17. LEE, F.T. Managing Thermit Quality for Railroads. *Welding Journal*, 85. Janeiro de 2006.
18. MUTTON, P.J.; ALVAREZ, E.F. Failure Modes in Aluminothermic Rails Welds Under High Axle Load Conditions. *Engineering Failure Analysis* 11. pp. 151-166, 2004.
19. MYERS, J et al. Structure and Properties of Thermite Welds in Rails. *Welding Journal*, 61 (Research Supplement). pp. 258s-268s, 1982.
20. OFFEREINS, G.A.; MUTTON, P.J. Recent Experiences with the Performance of Aluminothermic Rail Welds under High Axle loads. 13º International Rail Track Conference, Canberra, Australia, 2001.
21. MARICH, S. Major Advances in Rail Technologies Achieved in the Past 10-20 Years. pp. 485-497, 1994.
22. American Society for Metals. *ASM handbook*. Vol. 6: Welding, brazing and soldering, Materials Park, Ohio: ASM International; 1991.
23. JOAQUIM, R. Processo de soldagem por arame tubular. [2006]. 23 p. Disponível em <http://www.infosolda.com.br/artigos/processos-de-soldagem/283-processo-de-soldagem-por-arame-tubular.html>
Acesso em:09/09/2015
24. Ceferino Steimbreger, 2014, Master of Science. Materials Engineering, Luleå University of Technology Department of Engineering Sciences and Mathematics, fatigue of welded structures

25. Welding Theory and Application, TC9-237, Department of Army Technical Manual, Headquarters, Department of the Army, Washington D.C., 1993.
26. Amata M. and Fiore S., "Choosing the proper self-Shielded FCAW wire". Welding Journal, 75 (6), pp. 33-39, 1996.
27. SPECIFICATION For Carbon and Low-Alloy Steel Flux Cored Electrodes For Flux Cored Arc Welding and Metal Cored Electrodes for Gas Metal Arc Welding: A5.36-2012. American Welding Society. Miami. 2011.
28. STRUCTURAL Welding Code – Steel: AWS D1.1/D1.1M. American Welding Society. 22º ed. Miami. 131p. 2010.
29. SOLDAGEM: N-133, Rev. M, Petróleo Brasileiro S.A., Rio de Janeiro. Junho/ 2015.
30. E.J. Pavlina and C.J. Van Tyne "Correlation of Yield Strength and Tensile Strength with Hardness for Steels". Journal of Materials Engineering and Performance, Volume 17(6), pp.888-893, 2008.