

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

CLÁUDIO MARIANO DA SILVA

**PERFIL DE DUREZA E COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA SOLDA E REGIÕES
AFETADAS PELA SOLDA ALUMINOTÉRMICA DE TRILHOS EMPREGADOS
POR UMA EMPRESA MINERADORA**

JUIZ DE FORA

2017

CLÁUDIO MARIANO DA SILVA

**PERFIL DE DUREZA E COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA SOLDA E REGIÕES
AFETADAS PELA SOLDA ALUMINOTÉRMICA DE TRILHOS EMPREGADOS
POR UMA EMPRESA MINERADORA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Moisés Luiz Lagares Júnior

Co-orientador: Prof. Dr. Luiz Henrique Dias Alves

JUIZ DE FORA

2017

(FICHA CATALOGRÁFICA - BIBLIOTECA UFJF)

Ficha catalográfica elaborada pelos bibliotecários da UFJF

(impressão no verso da folha de rosto)

A large empty rectangular box with a thin black border, occupying the central portion of the page. It is intended for the cataloging data to be printed on the reverse side of the title page.

CLÁUDIO MARIANO DA SILVA

**PERFIL DE DUREZA E COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA SOLDA E REGIÕES
AFETADAS PELA SOLDA ALUMINOTÉRMICA DE TRILHOS EMPREGADOS
POR UMA EMPRESA MINERADORA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Aprovada em 19 de junho de 2017.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Moisés Luiz Lagares Júnior (Orientador)
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Luiz Henrique Dias Alves (Co-orientador)
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Roberto Malheiros Moreira Filho
Universidade Federal de Juiz de Fora

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha mãe, que sempre será um exemplo para mim em relação a sua dedicação, amor, honestidade e trabalho duro. Palavras não são suficientes para agradecer todo suporte e ensinamentos que moldaram meu caráter e personalidade.

Agradeço ao meu irmão José Alcício e à minha irmã Ana Cláudia que sempre estiveram ao meu lado, me apoiando e me dando forças em todas minhas decisões e em todos os momentos da minha vida.

Ao meu orientador Prof. Dr. Moisés Lagares e ao meu co-orientador Prof. Dr. Luiz Henrique Dias Alves, pelos ensinamentos ao longo da minha vida acadêmica, e pela confiança e paciência.

Aos meus amigos André Procaci, Gulliver Catão, Artur Gardone e Guilherme Santos que, de alguma forma, participaram da minha vida nesse tempo de graduação, muito obrigado. Agradeço também à bolsista Danielle Domingos Ribeiro pela sua imprescindível ajuda na execução dos ensaios de dureza nas soldas.

Agradeço à USP pelo pioneirismo no desenvolvimento do projeto Cátedra Roda-Trilho e ao Prof. Dr. Luiz Henrique Dias Alves por trazer este projeto para a Faculdade de Engenharia da UFJF.

Aos meus professores (as) que compartilharam seu conhecimento e me instruíram para alcançar esse objetivo.

*Capricho é fazer o teu melhor, na
condição que você tem, enquanto não
tem condições melhores para fazer
melhor ainda!*

(Mário Sérgio Cortella)

RESUMO

As ferrovias brasileiras aumentam cada vez mais o volume de carga transportada, fazendo com que se aplique maiores esforços com maior frequência sobre os trilhos. Essa demanda sobre a via tem exigido estudos mais aprofundados sobre o contato roda-trilho, principalmente nos pontos de maior criticidade, como as juntas soldadas. Sabendo da importância de se conhecer melhor o desempenho e os processos relacionados à solda aluminotérmica, parcerias têm sido feitas entre várias universidades para que, juntas, desenvolvam projetos a fim de buscar as condições que permitem uma melhor qualidade final de soldas aluminotérmicas em trilhos ferroviários. Com isso, o objetivo deste trabalho é estudar o processo aluminotérmico de soldagem de trilhos empregado para o Heavy Haul e fazer a caracterização completa das juntas soldadas para os diversos tipos de trilhos empregados por uma empresa mineradora. Os resultados serão obtidos através de pesquisa sobre as características da solda aluminotérmica e todos os fatores que influenciam em seu desempenho, além de ensaios metalográficos microestrutural e de perfil de dureza de amostras de solda efetuadas na Estrada de Ferro Carajás.

Palavras-chave: solda aluminotérmica; trilhos ferroviários; metalurgia.

ABSTRACT

The Brazilian railroads have substantially increased the volume of cargo transported, causing, more frequently, the application of greater efforts on the rails. This demand on the railroad has demanded more in-depth studies about wheel-rail contact, especially in the points that present greater criticality, such as welded joints. By knowing the importance of searching more about the performance and processes related to thermit welding, partnerships among several universities have been made to, jointly, develop projects in order to seek the conditions that allow a better final quality for thermit welds in railroads. The aim of this work is to study the thermit process of rail welding that is used for Heavy Haul railroads and to make a complete characterization of welded joints for the different types of rails used by a mining company. The results will be obtained through research on the characteristics of the thermit weld and all the factors that influence its performance, besides microstructural metallographic and hardness profile tests of weld samples that were carried out at Carajás Railroad.

Keywords: thermit weld, rails, metallurgy

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Rocha de minério de ferro.....	22
Figura 2: Volume transportado, em TUs, nos primeiros 9 meses de cada ano.	23
Figura 3: Mina S11D.	24
Figura 4: Estruturas cristalinas CFC e CCC.....	25
Figura 5: Esquema de um corte transversal da Via Permanente.	30
Figura 6: Identificação do trilho.	31
Figura 7: Variação no espaçamento lamelar da perlita de acordo com o tipo de aço. ((a) Microestrutura de trilho de aço-carbono padrão; (b) Microestrutura de trilho de aço microligado; (c) Microestrutura de trilho de aço tratado termicamente).....	34
Figura 8: Processo de laminação do trilho.....	36
Figura 9: Junção de trilhos feita por tala de junção.....	37
Figura 10: Cadinho descartável.	40
Figura 11: Molde de trilho para solda aluminotérmica.	41
Figura 12: Alinhamento dos trilhos.	42
Figura 13: Molde do patim fixado.....	43
Figura 14: Molde montado e fixado por cinta metálica.	43
Figura 15: Vedação do molde com pasta refratária.	44
Figura 16: Processo de pré-aquecimento utilizando maçarico oxi propano.....	44
Figura 17: Reação aluminotérmica no interior do cadinho e preenchimento do molde.....	45
Figura 18: Princípio da solda aluminotérmica.....	45
Figura 19: Corte do molde utilizando equipamento eletro-hidráulico.	46
Figura 20: Tratamento superficial da solda utilizando-se esmerilhadora manual.	46
Figura 21: Dureza longitudinal em diferentes tipos de soldas aluminotérmicas.....	47
Figura 22: <i>Black Hole</i> no patim.....	48
Figura 23: Fractologia ilustrando inclusões de escória.	49
Figura 24: Rechupe na região entre a alma e o patim.	50
Figura 25: Solda com falta de fusão no patim do trilho.	51
Figura 26: Exemplo de solda com o defeito de bordamento.	51
Figura 27: Solda com forte porosidade.....	52
Figura 28: Trinca a quente com início no raio entre o boleto e a alma.	53
Figura 29: Superfície de fratura exibindo uma aparência de defeito <i>rock candy</i>	54

Figura 30: Fratura intergranular que caracteriza o defeito <i>rock candy</i>	54
Figura 31: (a) Fratura vertical (<i>straight breaks failures</i>) em solda aluminotérmica, iniciada no patim; e (b) Fratura horizontal (<i>horizontal split web failures</i>) iniciada na região da alma do trilho.	56
Figura 32: Serra de fita horizontal manual SM200M 220/380 V, parecida com o modelo usado no Laboratório de Processos de Fabricação da UFJF.	58
Figura 33: Cortadora Metalográfica FORTEL (80 mm ou 100 mm) “CFIII”.....	59
Figura 34: Durômetro Rockwell normal analógico EQUILAM.	60
Figura 35: Amostras dos trilhos soldados localizadas no Laboratório de Processos da UFJF.	65
Figura 36: Segmento do boleto de uma das amostras de solda.	65
Figura 37: Amostra de solda aluminotérmica preparada para os ensaios.	66
Figura 38: Corpo de prova com dureza padrão para calibragem do Durômetro Rockwell.....	67
Figura 39: Amostra da mistura aluminotérmica fundida para ensaio de composição química.	68
Figura 40: Perfil de dureza da solda S01 (A = 7 min, B = 23 mm, C < 1%).	69
Figura 41: Perfil de dureza da solda S03 (A = 5 min, B = 27 mm, C < 1%).	70
Figura 42: Perfil de dureza da solda S09 (A = 5 min, B = 23 mm, C < 1%).	70
Figura 43: Perfil de dureza da solda S02 (A = 5 min, B = 23 mm, C > 1,25%).	71
Figura 44: Perfil de dureza da solda S04 (A = 7 min, B = 27 mm, C > 1,25%).	72
Figura 45: Perfil de dureza da solda S12 (A = 7 min, B = 23 mm, C > 1,25%).	72
Figura 46: Perfil de dureza da solda S14 (A = 5 min, B = 27 mm, C > 1,25%).	73
Figura 47: Composição química e perfil de carbono equivalente da solda S01 (A = 7 min, B = 23 mm, C < 1%).	74
Figura 49: Composição química e perfil de carbono equivalente da solda S09 (A = 5 min, B = 23 mm, C < 1%).	75
Figura 48: Composição química e perfil de carbono equivalente da solda S03 (A = 5 min, B = 27 mm, C < 1%).	75
Figura 50: Composição química e perfil de carbono equivalente da solda S15 (A = 7 min, B = 27 mm, C < 1%).	75
Figura 52: Composição química e perfil de carbono equivalente da solda S06 (A = 7 min, B = 27 mm, C > 1,25%).	76
Figura 53: Composição química e perfil de carbono equivalente da solda S12 (A = 7 min, B = 23 mm, C > 1,25%).	76

Figura 51: Composição química e perfil de carbono equivalente da solda S02 (A = 5 min, B = 23 mm, C > 1,25%).	76
Figura 54: Composição química e perfil de carbono equivalente da solda S14 (A = 5 min, B = 27 mm, C > 1,25%).	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química para trilhos-carbono comum (%).	33
Tabela 2: Composição química para trilhos intermediários (%).	33
Tabela 3: Composição química para trilhos hipereutectoides (%).	33
Tabela 4: Variáveis e níveis de análise.	61
Tabela 5: Planejamento experimental.	62
Tabela 6: Distribuição das soldas na primeira etapa de experimentos.	64
Tabela 7: Distribuição das soldas na segunda etapa de experimentos.	64
Tabela 8: Média dos valores de dureza no centro das soldas em HRC e HB.	74
Tabela 9: Composição química e carbono equivalente das amostras de mistura aluminotérmica.	77

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AMV - Aparelho de Mudança de Via

Al - Alumínio

B - Boro

C - Carbono

Cr - Cromo

Cu - Cobre

GLP - Gás Liquefeito de Petróleo

Mn - Manganês

Mo - Molibdênio

Nb – Nióbio

Ni - Níquel

O - Oxigênio

PIB - Produto Interno Bruto

Si - Silício

TLS - Trilho Longo Soldado

V - Vanádio

ZAC - Zona Afetada pelo Calor

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	16
1.2	JUSTIFICATIVA.....	17
1.3	ESCOPO DO TRABALHO	18
1.4	ELABORAÇÃO DOS OBJETIVOS.....	19
1.5	DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA	19
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1	METALURGIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS.....	24
2.1.1	CARBONO EQUIVALENTE	26
2.1.2	AÇOS-LIGA.....	27
2.2	VIA PERMANENTE	29
2.3	TRILHO	30
2.3.1	COMPOSIÇÃO QUÍMICA E METALURGIA DOS TRILHOS	32
2.3.2	FABRICAÇÃO DOS TRILHOS.....	35
2.3.3	INSTALAÇÃO OU SUBSTITUIÇÃO DOS TRILHOS.....	36
2.4	SOLDAGEM ALUMINOTÉRMICA	38
2.4.1	EQUIPAMENTOS DE SOLDAGEM.....	39
2.4.2	PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM.....	42
2.4.3	PERFIL DE DUREZA.....	46
2.5	DEFEITOS EM SOLDA ALUMINOTÉRMICA	47
2.5.1	<i>BLACK HOLES</i>	48
2.5.2	INCLUSÕES.....	49
2.5.3	RECHUPE (CONTRAÇÃO DA SOLDA)	50
2.5.4	FALTA DE FUSÃO (<i>LACK OF FUSION – LOF</i>).....	50
2.5.5	BORDAMENTO DA SOLDA (<i>FLASHING/ FINNING/ COLD LAP</i>)	51
2.5.6	POROSIDADE.....	52

2.5.7	TRINCA A QUENTE.....	52
2.5.8	ROCK CANDY.....	53
2.6	FALHAS EM SOLDA ALUMINOTÉRMICA.....	55
2.7	DUREZA ROCKWELL – ABNT NBR NM ISO 6508-1:2008.....	57
3	<u>PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....</u>	58
3.1	DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS.....	58
3.1.1	SERRA DE FITA HORIZONTAL MANUAL.....	58
3.1.2	CORTADORA METALGRÁFICA.....	59
3.1.3	DURÔMETRO ROCKWELL NORMAL ANALÓGICO.....	59
3.2	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	61
3.2.1	DESCRIÇÃO DAS VARIÁVEIS.....	62
3.2.2	DISTRIBUIÇÃO DOS EXPERIMENTOS.....	63
3.3	METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	64
3.3.1	ENSAIO DE DUREZA E DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA.....	66
3.3.2	ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA MISTURA ALUMINOTÉRMICA.....	68
4	<u>RESULTADOS.....</u>	69
4.1	PERFIL DE DUREZA.....	69
4.2	COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS SOLDAS ALUMINOTÉRMICAS.....	74
4.3	COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA MISTURA ALUMINOTÉRMICA.....	77
5	<u>CONCLUSÕES.....</u>	78
6	<u>REFERÊNCIAS.....</u>	80
7	<u>ANEXO 1 – TERMO DE AUTENTICIDADE.....</u>	83

1 INTRODUÇÃO

Em uma iniciativa inédita da empresa no Brasil, uma empresa mineradora firmou parceria, em 2014, com universidades de referência no país para a criação do projeto Cátedra Roda-Trilho, voltado ao estudo e ao desenvolvimento de pesquisas em temas de interesse para a ferrovia. A parceria foi selada com a Universidade de São Paulo (USP), que centraliza os trabalhos e forma uma rede de pesquisas, distribuindo as áreas de estudo para as outras universidades associadas. Este projeto está na área de Engenharia, com foco em pesquisas sobre o desgaste provocado pelo contato entre roda e trilho, e sobre a caracterização de soldas realizadas na ferrovia.

Este trabalho de Conclusão de Curso faz parte dos entregáveis do Projeto Cátedra Roda-Trilho, sendo parte de um grande projeto iniciado em 2016, com duração total de 36 meses.

Este estudo foi realizado com o apoio da empresa Vale S.A

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O sistema ferroviário brasileiro é um importante meio de transporte para o país, evidenciando principalmente o transporte de cargas. Ideal seria a diminuição do tempo em suas viagens, além de maior capacidade de cargas a transportar, aumentando a competitividade do sistema. Isto seria conseguido com o aumento da velocidade e da capacidade de carga dos eixos e das vias férreas, sem afetar a segurança. Uma consequência lógica das maiores velocidades e cargas por eixo nas vias seria o aparecimento de defeitos e o aumento dos desgastes na via ao longo do tempo. O contato roda-trilho é o maior causador dos desgastes em ambos os elementos. Sendo que as tensões de contato, que ocorrem numa pequena área, são responsáveis pelo surgimento de muitos defeitos nos trilhos (MAGALHÃES, 2000).

Pesquisas vêm sendo realizadas nos seguintes campos: novos materiais, alteração das características do aço, incluindo a purificação e aumento da dureza, desenvolvimento de novos perfis de trilho, dinâmica da interação roda-trilho, substituição das emendas com talas

por trilhos longos soldados (TLS) e planos de esmerilhamento de trilhos e AMV's. O emprego dessas novas técnicas e alternativas possibilitam a aplicação de perfis com contato roda-trilho otimizados. O que estes estudos buscam é um meio de aumentar a vida útil dos trilhos, adiando ao máximo sua troca e assim reduzindo os custos de manutenção, já que a vida útil dos trilhos está relacionada com seu limite de desgaste e trincas (BRINA, 1979).

A Universidade Federal de Juiz de Fora, liderada pelos professores Dr. Luiz Henrique Dias Alves e Dr. Moisés Luiz Lagares Júnior, em parceria com a USP, ficou responsável pela proposta “Caracterização e modelagem estatística preditiva das soldas e regiões afetadas pela solda de trilhos”, englobando as soldas aluminotérmica e por centelhamento (*Flash-Butt Weld*). Todavia, o presente trabalho se restringe à caracterização metalográfica e do perfil de dureza da solda aluminotérmica e as áreas afetadas pela mesma, além da análise das falhas e defeitos gerados pelo procedimento de soldagem aluminotérmico.

1.2 JUSTIFICATIVA

O projeto tem por objetivo estudar os processos de soldagem de trilhos empregados para o *Heavy Haul* e fazer a caracterização completa das juntas soldadas para os diversos tipos de trilhos empregados por uma empresa mineradora. O resultado esperado, ao final dos 36 meses, é propor um modelo matemático para prever os níveis que as principais variáveis devem assumir para se obter as propriedades desejadas.

Cientificamente, o projeto se justifica em face de pouca literatura existente sobre juntas soldadas de trilhos e a forte importância desta região (junta soldada) no desempenho operacional da ferrovia, visto que se trata de uma região crítica do ponto de vista metalúrgico, e que tem apresentado problemas frequentes de fratura por fadiga e desgaste localizado. Com o aumento da carga por eixo e da utilização, estes processos de desgaste e fratura tendem a se agravar. Desta forma, torna-se fundamental esta caracterização, que dará subsídios teóricos e práticos para um melhor ajuste e controle dos processos de soldagem empregados.

1.3 ESCOPO DO TRABALHO

O primeiro passo do trabalho foi formar uma base teórica consistente, para então avançar para a fase experimentos em laboratório. Os alunos responsáveis pela solda aluminotérmica dentro do projeto Cátedra Roda-Trilho reuniram o máximo de conhecimento possível, tais como o procedimento de soldagem, as características metalúrgicas dos trilhos, as reações envolvidas no processo e defeitos e falhas mais comuns na solda aluminotérmica, através de livros, artigos científicos e teses de mestrado e doutorado. Os professores envolvidos no projeto deram todo o apoio na validação das informações coletadas.

Enquanto toda a revisão bibliográfica era levantada pelos alunos da UFJF, a equipe de campo realizava as soldas aluminotérmicas em um segmento de via utilizado para testes na Estrada de Ferro Carajás em São Luís do Maranhão-MA. A realização dessas soldas seguiu procedimentos estabelecidos pelo fornecedor do kit de solda, e para análise dos resultados qualitativos das amostras, levaram-se em conta três fatores importantes: *gap* ou abertura entre os topos dos trilhos a serem soldados, tempo de pré-aquecimento e carbono equivalente dos trilhos.

Foram realizados um total de 16 soldas aluminotérmicas, e essas amostras foram levadas para corte e preparação em Governador Valadares. Após estarem prontas para as análises em laboratório, as mesmas foram encaminhadas à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora para análise da área da composição química e ensaio de perfil de dureza. Devido a limitação no tempo para execução dos experimentos de dureza e composição química, foram escolhidas 8 amostras de solda para serem testadas, cada uma representando um experimento específico (estes serão descritos no Subcapítulo 3.2). Outro fator que limitou o alcance aos resultados foi o fato de duas amostras de soldas estarem em outra universidade durante a realização dos ensaios de dureza, assim as mesmas foram substituídas pelas suas réplicas. A análise da composição química foi realizada nas 8 soldas inicialmente escolhidas, não havendo substituições.

1.4 ELABORAÇÃO DOS OBJETIVOS

O projeto Cátedra Roda-Trilho tem por objetivos, estudar os processos de soldagem de trilhos empregados para o *Heavy Haul* e fazer a caracterização completa das juntas soldadas para os diversos tipos de trilhos. Estas premissas permitem que o projeto explore vários caminhos de pesquisa sem perder o foco principal, que é propor um modelo matemático para prever os níveis que as principais variáveis devem assumir para se obter as propriedades desejadas.

Uma das extensões desta pesquisa é avaliar se as soldas aluminotérmicas apresentarão defeitos, mesmo se a equipe de via seguir rigorosamente os procedimentos de soldagem que são propostos pelo fornecedor do kit de solda.

Sendo este trabalho parte integrante do projeto Cátedra Roda-Trilho, tem-se por principal objetivo, a elaboração de análises de composição química e ensaio de dureza das amostras de solda aluminotérmicas.

1.5 DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA

Miguel (2010) categoriza a metodologia de pesquisa em engenharia a partir de considerações sobre a natureza, os objetivos, a abordagem e os métodos passíveis de utilização. A pesquisa desenvolvida neste trabalho é de natureza aplicada, orientando-se através de objetivos exploratórios e descritivos. Para as finalidades previstas, emprega-se uma abordagem quantitativa baseada em método de experimento.

Para a análise do perfil de dureza e da composição química, um segmento do boleto de todas as amostras foi cortado e os ensaios foram executados através de um Durômetro *Rockwell* Analógico e um Espectrômetro Ótico.

Vale ressaltar que todas as análises foram feitas sobre amostras de soldas em trilhos que seguiram rigorosamente os procedimentos estabelecidos pelo fornecedor da solda, e foram respeitadas as boas práticas da soldagem aluminotérmica, tais como limpeza da superfície dos trilhos a serem soldados, alinhamento dos trilhos e do molde, vedações

adequadas, tempo de pré-aquecimento e resfriamento respeitados e o não contato da mistura aluminotérmica com a umidade.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

As motivações, a abordagem do assunto proposto, bem como a metodologia adotada, o escopo e os objetivos são tratados no Capítulo 1.

No Capítulo 2 foi feito o levantamento bibliográfico e conceitos que são base para o estudo da metodologia aplicada no processo de soldagem aluminotérmica. Também são apresentados informações sobre o cenário ferroviário brasileiro, trilhos e microestruturas metálicas.

O conteúdo do Capítulo 3 apresenta a metodologia que foi utilizada para realização dos ensaios e comparação metalúrgica entre as amostras. Este capítulo também descreve os principais materiais e equipamentos utilizados, e apresenta o procedimento experimental utilizado a fim de cumprir o objetivo de comparação deste trabalho.

Em seguida, no Capítulo 4, consolidam-se os resultados obtidos, discute a utilização da metodologia e comenta-se sobre as abordagens e a importância das variáveis na qualidade final da solda aluminotérmica.

Por fim, no Capítulo 5, conclui-se a cerca do presente estudo comparando os resultados alcançados com os resultados que seriam esperados pela literatura.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O transporte ferroviário para a movimentação de cargas de alto fluxo de produção está em evolução constante de forma a atender o mercado que está em processo de expansão. Este modal é um dos meios mais eficazes e econômicos no deslocamento de grandes volumes de carga. Em relação ao transporte rodoviário, a utilização da ferrovia de carga pode gerar uma economia de 40 a 50% nos custos de fretes (quando utilizado sistema bimodal trem e navio) e uma redução de até 7% no preço ao consumidor dos produtos transportados (BEER, 2006).

Em 2006, as tendências apontavam que o volume de cargas transportadas nos trens deveria triplicar nos próximos anos, assim seriam mais trens trafegando com uma quantidade cada vez maior de mercadorias. Isto significaria uma injeção de R\$ 15 bilhões/ano no PIB 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 de gases prejudiciais ao meio-ambiente, o que é justificável levando-se em conta as atuais discussões sobre questões ambientais.

Até o ano de 2013, o transporte ferroviário de cargas no Brasil experimentou um significativo incremento. De 2006 até 2012, a produção ferroviária obteve um crescimento total de 26%. A expansão de 29% no transporte de minério de ferro foi a que mais contribuiu para a elevação na movimentação de carga. Vale ressaltar que o minério de ferro é o principal produto transportado pelo modal ferroviário, correspondendo a cerca de 73% do total movimentado (CNT, 2013).



Figura 1: Rocha de minério de ferro

Fonte: <http://www.vale.com/brasil/pt/business/mining/iron-ore-pellets/Paginas/default.aspx>

No Brasil, as três ferrovias consideradas *Heavy Haul* pelo parâmetro de tonelada por eixo – Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM), Estrada de Ferro Carajás (EFC) e MRS Logística, todas com mais de 27 toneladas/eixo – vêm realizando vultosos investimentos para aumentar a carga por eixo transportada e atingir metas de produtividade compatíveis com as dos grandes *players* mundiais. Esses investimentos são destinados, principalmente, à adequação e à manutenção da via permanente, estrutura onde passam os trens, que, com o aumento tanto da frequência do seu uso quanto da carga solicitada e da velocidade de rolamento, apresenta cada vez maior probabilidade de desgaste e falhas da linha férrea, demandando cada vez mais manutenções e diminuindo sua confiabilidade (MAIS, 2005).

A MRS Logística, em sua divulgação dos resultados do 3º trimestre de 2016 (3T16), anunciou os maiores volumes já transportados pela companhia. Neste período a empresa transportou 45,7 milhões de toneladas (Mt), 5,9% acima do auferido no 3º trimestre de 2015 (3T15). Nos nove primeiros meses de 2016 a MRS transportou um total de 128,7 milhões de toneladas, 5% superior ao mesmo período de 2015. Somente em *Heavy Haul* (minério de ferro, carvão e coque), foram 33,7 milhões de toneladas transportadas no 3T16, aumento de 6,8% comparado ao 3T15, e 95,6 Mt nos nove primeiros meses de 2016, 4,9% acima do registrado em 2015, com recorde absoluto em minério de ferro para exportação nos períodos informados.

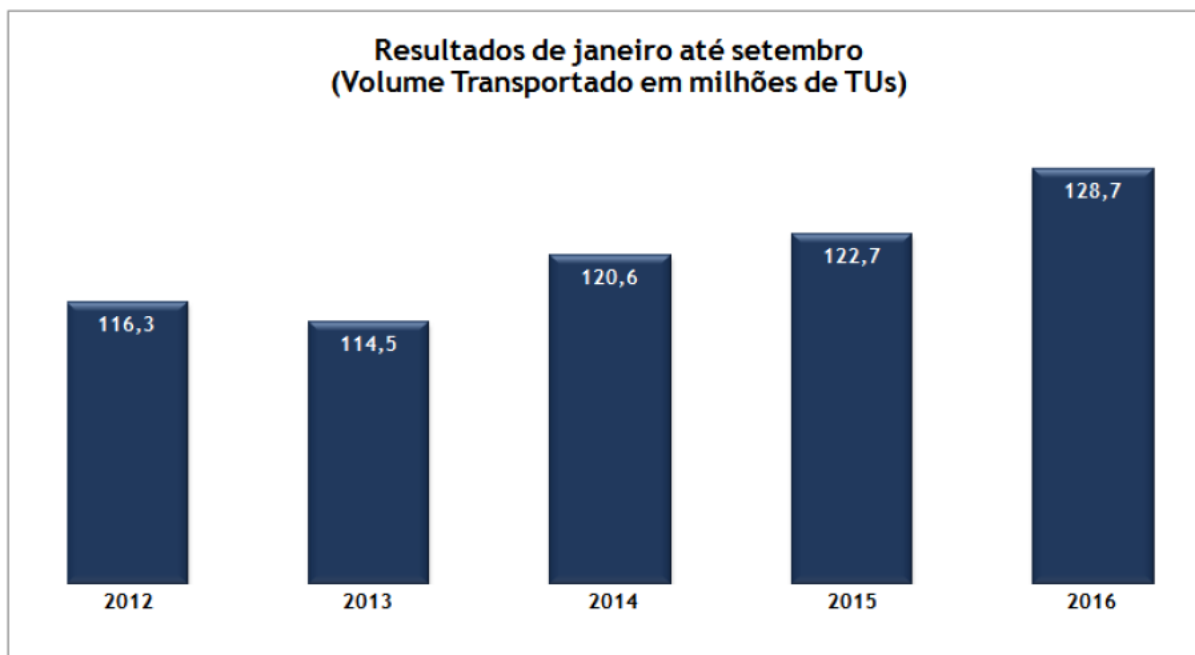


Figura 2: Volume transportado, em TUs, nos primeiros 9 meses de cada ano.
Fonte: MRS Logística

A EFC também registrou aumento no transporte e produção de minério de ferro. Em sua divulgação dos resultados do 4º trimestre de 2016 (4T16), a empresa divulgou que a produção de Carajás atingiu o novo recorde de 40,6 Mt no 4T16 (que representa uma taxa de produção anualizada de mais de 160 Mt), ficando 5,0% e 11,1% acima do 3T16 e do 4T15, respectivamente, principalmente devido à melhor performance operacional das minas e plantas, como resultado do impacto positivo de várias iniciativas da companhia para aumentar a produtividade da frota de equipamentos de mina e do aumento da disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos.

O *start-up* da mina de S11D foi iniciado no 4T16, com minério sendo alimentado nos dois sistemas móveis de britagem e transferido, através do sistema de correias transportadoras, para a planta de processamento, localizada a 9 km da mina. O minério processado foi empilhado no pátio e carregado nos trens com destino ao terminal marítimo de Ponta da Madeira.



Figura 3: Mina S11D.
Fonte: VALE Investors & Media

2.1 METALURGIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS

Os metais são constituídos por um aglomerado compacto de átomos, arranjados ordenadamente, denominado estrutura cristalina. Os aços são ligas de ferro-carbono e para entender como os átomos de ferro e carbono formam a estrutura cristalina, é necessário entender como são os aglomerados de átomos de ferro (raio atômico de 140 pm). Em temperaturas elevadas o aço apresenta uma estrutura denominada cúbica de face centrada – CFC, sendo formada por 8 átomos de ferro, situados nos vértices de uma célula unitária cúbica e por 6 átomos de ferro situados na face do cubo. Em temperaturas mais baixas os átomos de ferro se organizam em uma estrutura denominada cúbica de corpo centrado – CCC, com 8 átomos nos vértices da célula unitária cúbica e um único átomo no centro do cubo (TSCHIPTSCHIN, 2016).

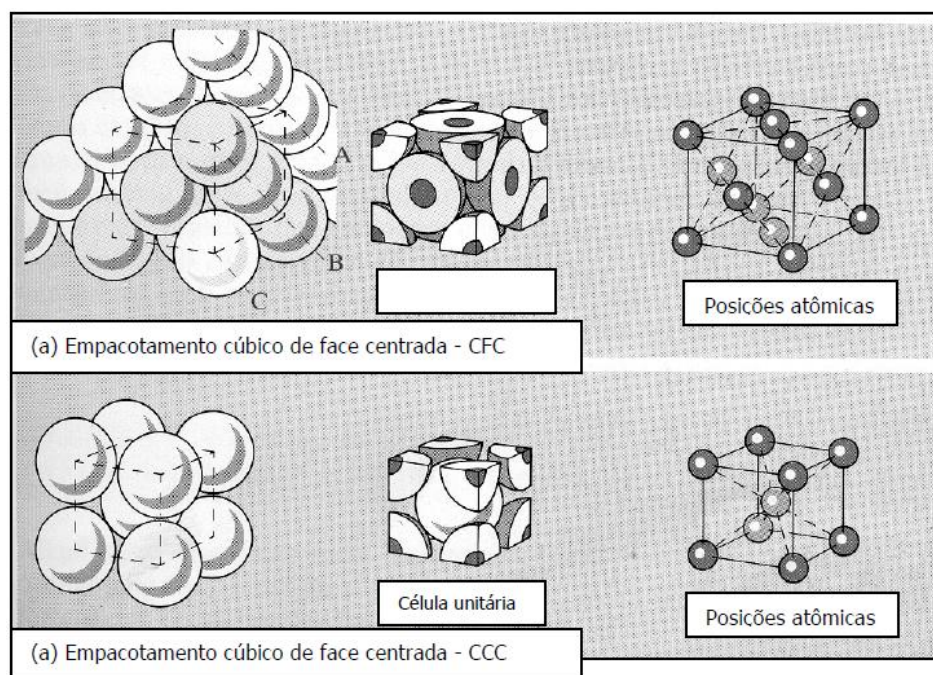


Figura 4: Estruturas cristalinas CFC e CCC.
 Fonte: (TSCHIPTSCHIN, 2016)

A estrutura CFC, denominada austenita ou fase γ , é estável desde temperaturas muito altas, até a temperatura de 912 °C, a partir de onde ocorre a transformação do ferro CFC para a estrutura CCC, denominada ferrita ou fase α , que é estável a temperatura ambiente. Quando o teor de carbono é mais alto, o carbono se combina com o ferro formando uma fase cerâmica, denominada cementita (carboneto de ferro Fe_3C). Esta é uma fase muito dura, frágil e suas propriedades mecânicas são parecidas com as do vidro (TSCHIPTSCHIN, 2016).

Nos aços em que o teor de carbono é maior que 0,1%, ocorre precipitação de cementita de forma alternada com a ferrita formando uma estrutura lamelar denominada perlita. Resumidamente, a cementita endurece o aço e a ferrita o mantém tenaz (TSCHIPTSCHIN, 2016). No resfriamento de um aço, a bainita refere-se à microestrutura resultante da decomposição da austenita em temperaturas acima da transformação martensítica e abaixo da reação perlítica (HONEYCOMBE, 1985; EDMONDS, 1995). As propriedades mecânicas dos aços carbono resfriados lentamente variam com o teor de carbono: quanto maior é o teor de carbono, maiores são limite de escoamento, o limite de resistência e a dureza, porém menor será a ductilidade.

A microestrutura resultante da transformação de fase tem um papel fundamental na obtenção de propriedades mecânicas de aços, principalmente aços com alta resistência tratados termicamente, na maioria das vezes por têmpera e revenimento. Os vários

constituintes dos aços já são conhecidos, como a ferrita, perlita, bainita e austenita. Na prática, a microestrutura resultante dessa transformação pode ser de uma só fase, como por exemplo, martensítica ou bainítica, ou pode ser mista, compondo duas ou mais fases. Combinações destas estruturas são responsáveis por atribuir diferentes características ao material (SOUZA, 2008).

2.1.1 Carbono equivalente

Em termos de seleção de material, as características de trabalho da Zona Afetada pelo Calor, ZAC, deve ser mais enfatizada que as características do metal de solda. Isto se deve às propriedades mecânicas e metalúrgicas da ZAC, que estão diretamente relacionadas ao metal de base selecionado, embora possam ser modificadas por parâmetros de soldagem e tratamento térmico pós-soldagem. Também é verdade que qualquer problema metalúrgico e/ou de soldabilidade associado às características da ZAC será mais difícil de lidar comparado com aqueles relacionados ao metal de solda (CHEN; POLLACK, 1996; p.1083-1085).

Segundo Chen e Pollack (1996), várias fórmulas de carbono equivalentes empíricos tem sido desenvolvidas e utilizadas para analisar a soldabilidade (tendência de trinca à frio induzida por hidrogênio) dos materiais de base. Nos Estados Unidos e em países da Europa, a equação do Instituto Internacional de Soldagem (*International Institute of Welding – IIW*) é a mais comumente usada:

$$CE(IIW) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu+Ni}{15} + \frac{Cr+Mo+V}{5} \quad (\text{eq.1})$$

No Japão, o parâmetro de caracterização de composição Ito-Bessyo, P_{cm} , é mais largamente usado. Esta fórmula de carbono equivalente é considerada por permitir uma avaliação mais realista da soldabilidade de aços de baixo carbono, quando comparada com a fórmula da equação do IIW. A Equação 2 mostra como o carbono equivalente é calculado para essa forma.

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn+Cu+Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (\text{eq.2})$$

Yurioka et al. (1983) também desenvolveram outro número para carbono equivalente denominado CEN (*Carbon Equivalent Number*), que incorpora tanto o carbono equivalente do IIW como o P_{cm} . O CEN é semelhante ao P_{cm} para aços com níveis de carbono que são inferiores a 0,17%, e segue a fórmula do IIW para níveis elevados de carbono.

$$CEN = C + A(C) * \left(\frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr+Mo+Nb+V}{5} + 5B \right) \quad (\text{eq.3})$$

onde $A(C)$ é igual a $0,75 + 0,25 \tanh [20(C - 0,12)]$.

Embora estas expressões de carbono equivalente tenham sido inicialmente desenvolvidas para caracterizar a tendência de trinca por hidrogênio para chapas de aço, elas também têm sido utilizadas para avaliar a endurecibilidade dos aços com base na sua composição química (CHEN; POLLACK, 1996; p.1083-1085).

2.1.2 Aços-liga

Para proporcionar melhores propriedades mecânicas, conforme a necessidade de cada aplicação, quantidades de elementos de liga podem ser adicionados intencionalmente ao aço carbono. Dessa forma, surgem os chamados aços-liga que, de acordo com a quantidade de elementos acrescentados em sua composição, podem ser classificados como aços de baixa, média ou alta liga (SOUZA, 2008).

Nestes aços, os seguintes elementos podem ser incorporados: manganês, silício, níquel, cromo, molibdênio, vanádio, nióbio, boro, alumínio, titânio, tungstênio, cobalto, cobre, zircônio, chumbo, etc. Tais elementos atuam de forma diferenciada e seus principais efeitos provocam alterações de propriedades mecânicas, tais como aumento de resistência, aumento da dureza, melhoria da temperabilidade, melhoria na tenacidade e usinabilidade e aumento da resistência à oxidação, à corrosão e à abrasão (SOUZA, 2008).

O aperfeiçoamento dos aços por meio da influência destes elementos se dá pela alteração de sua microestrutura através de diversos mecanismos, inclusive envolvendo tratamentos térmicos e termomecânicos. De modo geral, alguns desses elementos podem formar soluções sólidas ou compostos intermetálicos (que atuam no aumento de resistência do material); alterar a temperatura de ocorrência de transformação de fase; alterar a solubilidade

do carbono na ferrita e austenita; alterar a velocidade de reação da decomposição da austenita e alterar a velocidade de solubilização da cementita na austenita (SOUZA, 2001).

Os efeitos da maioria dos elementos de liga em aços carbono e de baixa liga seguem abaixo (CHEN; POLLACK, 1996; p.1083-1085):

- **Carbono**: tem um papel tremendamente importante na dureza geral dos aços soldados. Isto pode ser claramente visto pelo seu papel nas fórmulas de carbono equivalente. Um aumento no nível de carbono promove a formação de produtos de transformação a baixa temperatura, tais como bainita e martensita, e leva a uma significativa redução na resistência à fratura.
- **Manganês**: adicionado a uma solução sólida de endurecimento, o manganês pode baixar a temperatura de transformação da austenita a ferrita enquanto provê efeitos de reforço através de refinamento de grão. Todavia, o nível de manganês deve ser limitado a minimizar a segregação de solidificação e flexão microestrutural.
- **Cromo**: é um fortalecedor de solução sólida e formador de carboneto. Ele aumenta o endurecimento dos aços e melhora a resistência à oxidação e corrosão. A adição de cromo pode ser favorável em casos onde a precipitação de carbonetos de cromo é maior que a formação de lamelas de ferrita através de um efeito de fixação.
- **Níquel**: possui efeitos benéficos à transformação de aços, similar ao manganês, através da diminuição da temperatura de transformação da austenita. A adição de níquel também pode melhorar dureza, tal como provê um efeito de endurecimento de solução sólida.
- **Vanádio e nióbio**: são adicionados em pequenas quantidades em aços de baixa liga para obter as propriedades mecânicas desejadas. Vanádio e nióbio podem retardar a recristalização e crescimento de grão da austenita durante laminação e normalização. Durante a solda por fusão, especialmente com alta adição de calor, V e Nb dissolvem com temperaturas de pico maiores que 1100°C e sofrem reprecipitação durante resfriamentos mais lentos. A reprecipitação de V e Nb enfraquece a dureza do aço.

- **Titânio**: em forma estável de nitreto de titânio, tem sido observado que ele previne o engrossamento dos grãos de austenita precedentes em regiões adjacentes à fronteira de fusão da solda.
- **Silício**: gera aperfeiçoamento da tenacidade, retarda a transformação de carbonetos para cementita (pode até eliminar a mesma) e forma perlita nos contornos de grãos da austenita.

2.2 VIA PERMANENTE

A Via Permanente é, por conceito, a estrutura necessária para suportar e transmitir cargas ferroviárias de modo a permitir a circulação dos trens com confiabilidade, segurança e disponibilidade. Durante séculos, desde o início das ferrovias, seu desenho básico tem se mantido muito semelhante, evoluindo apenas em seus componentes, de acordo com o avanço das tecnologias de materiais. A Via Permanente é dividida em dois grandes grupos (STEFFLER, 2013):

- **Infraestrutura**: composta por todo o conjunto de obras de terraplenagem e de arte (túneis, viadutos e pontes). É responsável por fornecer o suporte à superestrutura e agir nas condições de contorno à circulação de trens, atuando diretamente na garantia de drenagem, preservação do gabarito de circulação e transposição de relevo acidentado;
- **Superestrutura**: apoiada sobre a infraestrutura, a superestrutura é a responsável por captar as cargas transmitidas pelas rodas dos veículos ferroviários, transmiti-las com segurança através das conexões estruturais da sua composição e descarregá-las de maneira uniforme e dissipada na plataforma ferroviária (sublastro, leito e subleito).

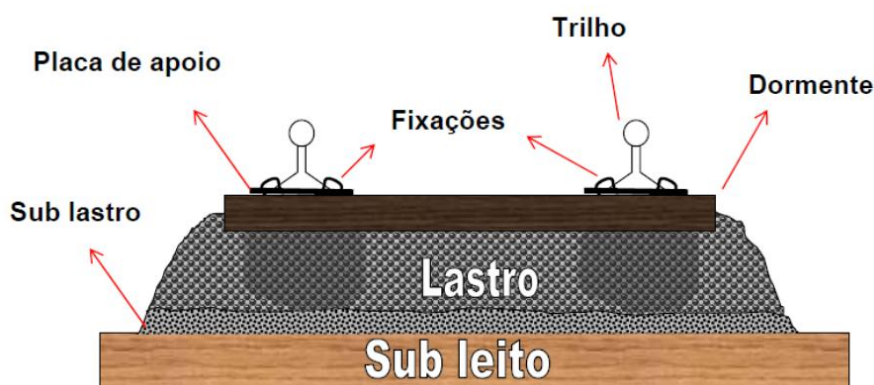


Figura 5: Esquema de um corte transversal da Via Permanente.
 Fonte: <http://docslide.com.br/documents/ferrovia-relatorio.html>

Percebe-se que a disposição básica dos componentes é bastante lógica e permite que exista estabilidade, facilidade na manutenção e segurança. O trilho, como viga principal de sustentação longitudinal e apoio às rodas, é travado transversalmente pelos dormentes, conferindo resistência mecânica de apoio, dissipação uniforme dos esforços e resistência longitudinal extremamente elevada (em virtude da ancoragem oferecida pelo lastro) (STEFFLER, 2013).

2.3 TRILHO

O trilho é o elemento da superestrutura que constitui o apoio e é, ao mesmo tempo, a superfície de rolamento para as rodas dos veículos ferroviários. Considerado o elemento nobre da superestrutura, vem sofrendo uma evolução permanente desde os primórdios das estradas de ferro até os dias atuais, com o grande desenvolvimento da tecnologia do aço. A forma e o comprimento evoluíram gradativamente até atingir os perfis modernos de grande seção e também permitir as pesadas cargas por eixo dos trens modernos (STEFFLER, 2013).

Segundo Rosa (2008), atualmente o perfil mais utilizado na ferrovia de carga é o Vignole, cuja geometria proporciona maior resistência à flexão, pois há maior concentração de massa em regiões onde as solicitações são maiores.

O perfil do trilho Vignole mostrado na Figura 6 possui três regiões distintas:

- Boleto;
- Alma;
- Patim.

O boleto corresponde à parte superior do trilho, sendo sujeito ao atrito e desgaste, deve ter quantidade considerável de massa concentrada já que está diretamente sujeito às rodas. A alma é a parte mais fina do trilho localizada entre o boleto e o patim, e sua altura e espessura influenciam o momento de inércia, resistência e rigidez transversal da seção. O patim é a região inferior do trilho, sendo responsável pela estabilidade do componente e transferência dos esforços para os dormentes (ROSA, 2008).

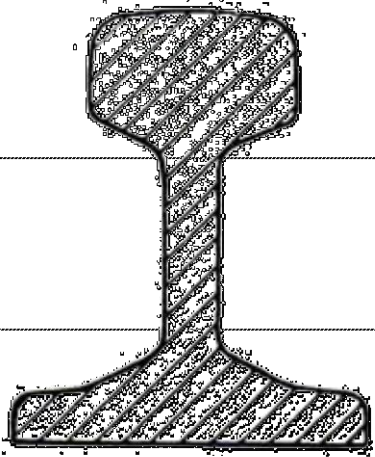
Região	Característica	Perfil
Boleto	Recebe a carga das rodas. Deve ter uma área de contato adequada para reduzir a pressão e permitir o desgaste	
Alma	Liga o boleto ao patim; sua altura determina o momento de inércia e, conseqüentemente, grande parte da resistência do perfil à carga máxima por eixo	
Patim	Transfere as cargas para os dormentes. É achatado para reduzir a pressão de contato e facilitar o acesso às fixações	

Figura 6: Identificação do trilho.

Fonte: (STEFFLER, 2013)

Devido às 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 à propagação de trincas pré-existentes;
- Boa tenacidade à fratura;
- Baixa suscetibilidade à fragilização por hidrogênio e adequada soldabilidade.

2.3.1 Composição química e metalurgia dos trilhos

Por se tratar de um material tão especial e oferecer as condições de rolamento com segurança e disponibilidade que se requer, existem hoje inúmeros tipos de trilhos, cada qual com sua composição metalográfica, cujo desempenho evoluiu sensivelmente com a tecnologia do aço nas últimas décadas. Os principais componentes do aço são o ferro, carbono, manganês, silício, fósforo e enxofre.

Rosa (2008) relatou que 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 resultantes. Entre os tratamentos térmicos empregados para trilhos, destacam-se:

- Boleto endurecido (*Head Hardened* – HH)
- Boleto profundamente endurecido (*Deep Head Hardened* – DHH)
- Trilho completamente tratado (*Full Heat Treated* – FHT)

Como indicado, a diferença nos tratamentos térmicos nos trilhos está 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 constante contato roda-trilho.

No passado, a maioria dos trilhos fabricados em todo o mundo era de aço carbono, uma tecnologia já ultrapassada e que não permitia um alcance de dureza superior à faixa de 250 BHN (*Brinell Hard Number*). O próximo passo na evolução da dureza foram os trilhos de aço-liga, que permitiu que o aço fosse aditivado com componentes como níquel e nióbio, para que suas propriedades mecânicas fossem incrementadas. Com isso, esses trilhos foram os primeiros a atingir a casa de dureza de 320 BHN. Hoje em dia os trilhos *Premium* com esta tecnologia de fabricação já chegaram à dureza de 440 BHN (STEFFLER, 2013).

Um exemplo da influência dos elementos químicos no aço é o trilho hipereutectoide, que surgiu no final dos anos 1990. Entre os engenheiros metalúrgicos é clara a relação proporcional entre o grau de dureza e o percentual de carbono que é injetado no aço. Conforme se aumenta, porém, a dureza de qualquer perfil, os engenheiros têm que administrar outro importante componente estrutural necessário do trilho – a tenacidade. Trilhos muito duros tendem a ser também muito frágeis. Isso pode gerar fraturas indesejáveis, provocando além da sucessiva parada na circulação dos trens, um enorme risco de segurança pela possibilidade de acidentes de grandes proporções. Dessa forma, a grande vitória do trilho hipereutectoide foi conseguir desenvolver um material com uma faixa de carbono próxima a 1% de sua composição (em trilhos-carbono o máximo é 0,75%), incrementando sensivelmente sua dureza sem necessariamente torná-lo frágil. Assim, os desenvolvedores deste tipo de trilho também chegaram a perfis com 440 HB de dureza nominal. As Tabelas 1, 2 e 3 indicam a composição química para os trilhos carbono, intermediário e hipereutectoide, respectivamente.

Tabela 1: Composição química para trilhos-carbono comum (%).

TRILHOS-CARBONO COMUM (%)		
	Mínimo	Máximo
Carbono	0,72	0,82
Manganês	0,80	1,10
Silício	0,10	0,50
Fósforo		0,02
Enxofre		0,02

Fonte: (STEFFLER, 2013)

Tabela 2: Composição química para trilhos intermediários (%).

TRILHOS INTERMEDIÁRIOS (%)		
	Mínimo	Máximo
Carbono	0,72	0,82
Manganês	0,70	1,25
Silício	0,10	1,00
Fósforo		0,02
Enxofre		0,02

Fonte: (STEFFLER, 2013)

Tabela 3: Composição química para trilhos hipereutectoides (%).

TRILHOS HIPEREUTECTOIDES (%)		
	Mínimo	Máximo
Carbono	0,84	1,00
Manganês	0,70	1,25
Silício	0,10	0,60
Fósforo		0,02
Enxofre		0,02

Fonte: (STEFFLER, 2013)

2.3.1.1 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 900-1200 MPa e dureza entre 260 e 290 HB 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 7 mostra a variação dos espaços interlamelares da perlita de acordo com o tipo e condição do material. Adições de Nb, V e Mo criam uma nova classe de trilhos perlíticos, os microligados, com resistência de aproximadamente 1300 MPa e dureza de até 400 HB. No entanto, tratamentos térmicos com resfriamento acelerado proporcionam maior refinamento na estrutura da perlita, dando maior ductibilidade a esses aços (SCHNEIDER, 2005).

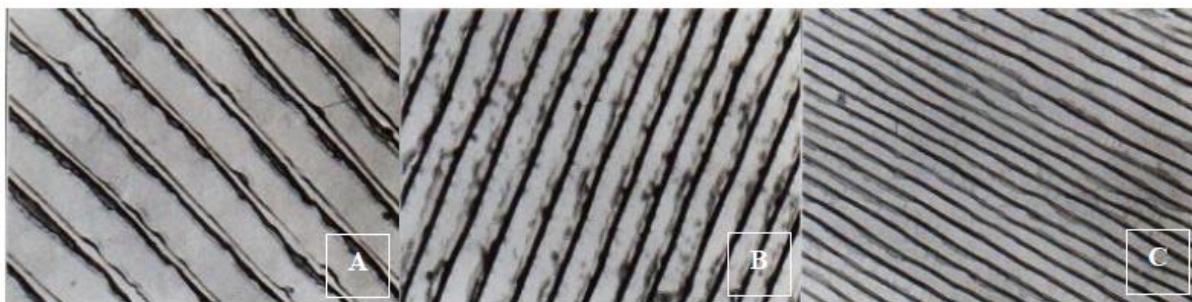


Figura 7: Variação no espaçamento lamelar da perlita de acordo com o tipo de aço. ((a) Microestrutura de trilho de aço-carbono padrão; (b) Microestrutura de trilho de aço microligado; (c) Microestrutura de trilho de aço tratado termicamente).

Fonte: (ROSA, 2008)

2.3.1.2 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 à fratura e resistência à propagação de defeitos. Estes trilhos são utilizados, preferencialmente, em vias de alta velocidade ou em curvas de ferrovias para o transporte de carga pesada.

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 está em estudo (AGLAN, 2004).

2.3.2 Fabricação dos trilhos

Quanto à fabricação, os trilhos são laminados a quente, a partir dos blocos provenientes dos lingotes. A seção do trilho é obtida pela passagem sucessiva do bloco aquecido numa série de cilindros de laminação. O número de passes depende de cada processo de fabricação do trilho. Esses passes são projetados de tal modo que a forma retangular do bloco é gradualmente desenvolvida na seção do trilho. Esta operação requer precisão de desenho dos diversos contornos dos cilindros e uma supervisão constante na fase de laminação para obter a seção desejada. Os passos mais importantes neste processo seguem abaixo (STEFFLER, 2013):

1. Aço líquido do autoforno forma os lingotes (grandes vigas de aço);
2. Os lingotes são cortados em seções para formarem os *blooms*;
3. Cada *bloom* passa por uma série de roletes que vai, a cada passada, dando forma;
4. Ao final do roletamento o perfil do trilho está pronto e suas pontas são cortadas;
5. Desempeno feito pela passagem do perfil por grandes rodas devido à tensão residual.

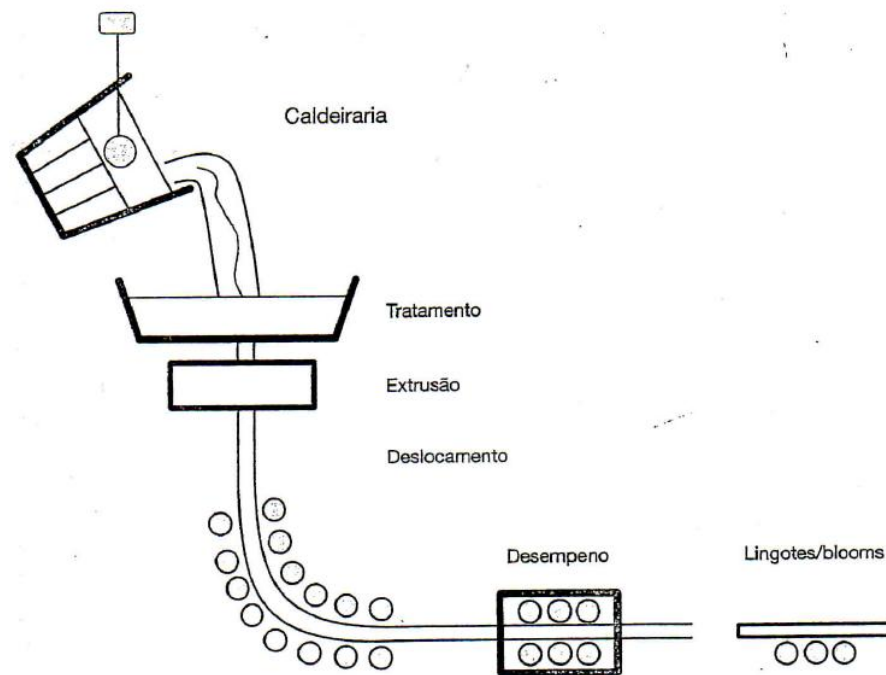


Figura 8: Processo de laminação do trilho.
Fonte: (STEFFLER, 2013)

2.3.3 Instalação ou substituição dos trilhos

Os trilhos são fabricados por diferentes fornecedores, porém os grandes fabricantes de trilho estão todos fora do Brasil. Com isso a logística de transporte marítimo limita a viabilidade econômica e física de se transportar barras de comprimentos muito grandes.

Em estruturas de Via Permanente mais antigas, os trilhos eram unidos entre si por um par de talas de junção, conforme Figura 9. Esse sistema era usado por ser de fácil e rápida instalação, baixo custo e permitia espaçamento – *gap* – entre os trilhos. O *gap* era destinado a compensar a dilatação dos trilhos nas temperaturas mais altas, evitando problemas de flambagem. Porém, este mesmo *gap* era responsável por pequenos impactos entre as rodas e as “quinas” dos trilhos, causando, além de desconforto sonoro, deformação cíclica tanto nas rodas quanto nos trilhos, além de obrigar que os trilhos tivessem furos para que pudessem ser “aparafusados”, concentrando tensão e ferrugem nessas cavidades. Diante dessas várias desvantagens, o custo com manutenção tanto da via, quanto das rodas, se torna alto e a velocidade e a carga que podem passar sobre esses *gaps* precisam ser diminuídas devido às tensões e aos desgastes, reduzindo assim o desempenho e a eficiência da via (BOUNZAN, 2016).

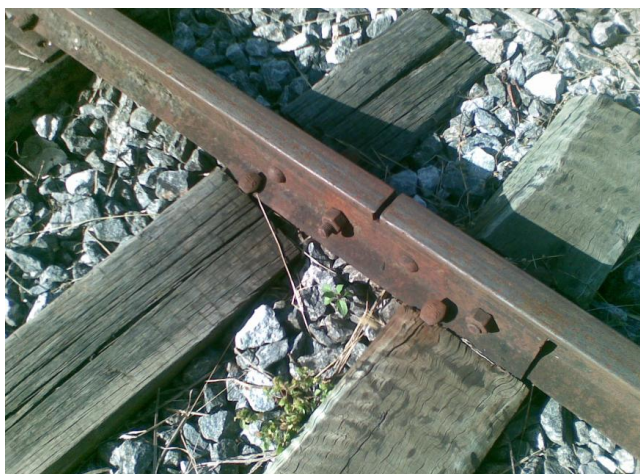


Figura 9: Junção de trilhos feita por tala de junção.

Fonte: <http://cfvv.blogspot.com.br/2011/04/fca-ferrovia-centro-atlantica-e-via.html>

Conforme citado anteriormente, o transporte marítimo de trilhos possui limitações, fazendo com que as ferrovias brasileiras comprem os mesmos com comprimento entre 12 e 24 metros, que posteriormente são unidos por solda, evitando assim o entalamento como forma de unir trilhos. O trilho formado pela união por solda elétrica de outros segmentos menores de trilho (12 a 24 metros) é chamado de Trilho Longo Soldado – TLS (*Continuous Welded Rail – CWR*, em inglês). Atualmente o processo de instalação do TLS mais usado se resume a:

- Em estaleiro de solda, os trilhos recém-fabricados são soldados através da solda por centelhamento (*flash butt welding*), um processo que usa a passagem de energia elétrica para fundir as extremidades dos trilhos e, através da compressão entre as extremidades fundidas, a solda é realizada. Os trilhos recém-fabricados são soldados até atingirem o comprimento de 200 a 500 m;
- Esses trilhos longos são então transportados via trem de carga até ao local de instalação, em campo, e são fixados nos dormentes para facilitar o seu alinhamento;
- Em seguida os trilhos longos são soldados pelo processo de Solda Aluminotérmica (*Thermite Welding*, em inglês), descrito no Subcapítulo seguinte.

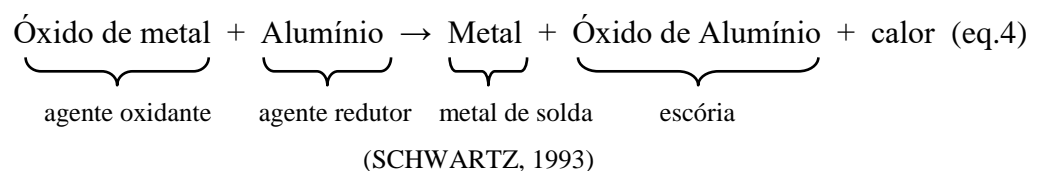
2.4 SOLDAGEM ALUMINOTÉRMICA

A soldagem aluminotérmica possui aplicação específica onde outros processos não apresentam necessária flexibilidade para sua realização em campo. Devido à sua relativa simplicidade e independência de fontes externas de energia, a soldagem aluminotérmica se consagrou como um dos métodos mais empregados na soldagem de trilhos no trecho de ferrovias. 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 em 1903 como *Thermit®* pela empresa *Goldschmidt AG* na Alemanha.

A soldagem aluminotérmica é um processo que ocorre por meio de fusão, na qual dois metais são unidos após serem fundidos a um terceiro metal superaquecido que se liquefaz após sofrer uma reação aluminotérmica. O metal em forma líquida, que é resultado de uma fusão entre óxido de metal, alumínio em pó, pó ou limalha de ferro, ligas metálicas e fundentes funciona como preenchimento durante o processo de soldagem.

O alumínio em pó funciona como elemento combustível, no qual seu poder de redução dos óxidos metálicos é muito alto. Esta reação de redução é fortemente exotérmica, gerando calor suficiente para liquefazer a liga, deixando-a com fluidez e temperatura suficientes para soldagem por fusão dos trilhos.

A reação aluminotérmica que ocorre durante o processo segue a seguinte configuração:



Como a energia de ligação dos átomos no óxido de metal é superior à energia necessária para ligar os átomos de alumínio e oxigênio, para formar o óxido de alumínio, essa diferença em energia é liberada em forma de calor. Usando essa equação é possível realizar soldas para diversos fins e de diversos metais. Um exemplo de outro uso comum da solda

aluminotérmica é a solda de fios de cobre – usados para transmissão de energia elétrica – com a equação a seguir:



Para a solda aluminotérmica em trilhos, a equação típica que ocorre é:



Como resultado desta transformação, obtém-se um metal aquecido, limpo e liquefeito. Se forem usados somente o óxido de metal e o alumínio esta reação se torna extremamente violenta. Micro esferas de ferro-liga são utilizadas para resfriar esta reação, partindo assim de uma temperatura de 3090°C para 2480°C, além de serem úteis para se chegar à composição química desejada. A adição balanceada de fundentes, como a fluorita, permite a formação de uma escória adequada que é rica em Al_2O_3 . A quantidade de liga adicionada à mistura é muito crítica, pois caso seja introduzida em grande quantidade, a reação será resfriada a uma temperatura abaixo de 2040°C, chegando a um ponto no qual a separação entre a escória e o metal de solda será incompleta. Depois de liquefeito, o metal é vazado em um molde de areia que é posicionado entre os trilhos a serem soldados (Schwartz, 1996, p.835-838).

2.4.1 Equipamentos de soldagem

Os equipamentos e materiais utilizados na soldagem aluminotérmica são, basicamente, o cadinho, o molde, o sistema de pré-aquecimento, a mistura aluminotérmica e a pasta de vedação. A descrição de cada equipamento e material segue abaixo:

2.4.1.1 Cadinho

O cadinho é um recipiente com tampa, em formato de panela, que se for descartável é feito de areia silicosa ligada quimicamente por uma resina fenólica, o resol alcalino, e se for reaproveitável (*long life*), será feito de metal. É no cadinho que será depositada a mistura

aluminotérmica, que depois de fundida, correrá para o molde por uma abertura em seu fundo. Essa abertura fica bloqueada por uma fina chapa de metal, que é facilmente derretida pela alta temperatura da mistura líquida.



Figura 10: Cadinho descartável.

Fonte: Curso de soldagem de trilhos, Professor Dr. Luiz Alves (UFJF, 2016)

2.4.1.2 Molde

O molde da solda aluminotérmica encaixa de forma precisa ao redor do trilho, e serve de caminho e fôrma para o aço líquido que corre através da abertura inferior do cadinho. Este molde é dividido em três partes, uma para cada lado do trilho e uma base para o patim. O molde é formado por areia silicosa juntamente com aditivos para aumentar a resistência a quente da areia de moldagem, como por exemplo, o óxido de ferro vermelho. O molde precisa possuir alta refratariedade para resistir às elevadas temperaturas, baixa expansão térmica para não dilatar e quebrar, permeabilidade suficiente para permitir a saída dos gases e não pode gerar gases por si só.



Figura 11: Molde de trilho para solda aluminotérmica.

Fonte: Curso de soldagem de trilhos, Professor Dr. Luiz Alves (UFJF, 2016)

2.4.1.3 Sistema de pré-aquecimento

Sistema utilizado para aquecer o topo dos trilhos antes da realização da solda. O pré-aquecimento pode ser por ar propano, grupo de pré-aquecimento (gás ou gasolina) ou oxi propano.

2.4.1.4 Pasta de vedação

Pasta usada para fazer a vedação entre o molde e o trilho. Essa pasta é formada por areia silicosa, argila refratária, etilenoglicol entre outros aditivos.

2.4.1.5 Mistura aluminotérmica

Mistura formada por óxido de ferro, alumínio em pó, pó ou limalha de ferro, ligas metálicas e fundentes que gera a liga metálica e a escória. Após ignição inicial, a mistura sofre uma reação de combustão que se autopropaga até liquefazer toda a mistura.

2.4.2 Procedimento de soldagem

O procedimento de soldagem depende da geometria do trilho, das condições de desgaste do trilho e das especificações do fabricante da solda. Seguir as recomendações do fabricante é uma prática industrial, mas adaptações técnicas são permitidas para adequação às particularidades de cada região e ferrovia.

Seguindo o procedimento recomendado pelo fornecedor da solda, adaptado pela empresa mineradora, o primeiro passo é garantir que a parte do trilho a ser soldada está solta dos dormentes. Os trilhos então são posicionados de topo, com suas faces perfeitamente acabadas, alinhadas horizontal e verticalmente e igualmente espaçadas por aproximadamente 25mm. Os trilhos então são içados por grampos a uma distância que varia de um a três dormentes da solda, de cada lado. Esses grampos têm a função de deslocar o trilho e segurá-lo, fixando-o em posição alinhada.



Figura 12: Alinhamento dos trilhos.

Fonte: Curso de soldagem de trilhos, Professor Dr. Luiz Alves (UFJF, 2016)

Em seguida é posicionado um molde de areia que se ajusta perfeitamente às laterais e ao fundo dos trilhos, ficando no seu interior a cavidade que será preenchida pelo metal líquido. Primeiro é encaixada a peça do molde que serve de base para o patim, sendo fixada pela pasta de vedação, e logo em seguida as partes laterais. Depois de posicionado, o molde é travado por uma prensa metálica que envolve suas laterais. O interior do molde é então limpo com ar comprimido, e a abertura superior é coberta para evitar que entre impurezas vindas do ambiente no interior do mesmo. Por fim, o molde é calafetado com massa refratária para evitar fuga de metal, sempre se lembrando de aplicar apenas uma quantidade necessária para a

completa vedação, evitando excesso, com riscos de causar contaminação da solda por inclusão de material silicoso (vítreo).



Figura 13: Molde do patim fixado.
Fonte: Equipe do projeto (EFC, 2016)



Figura 14: Molde montado e fixado por cinta metálica.
Fonte: Equipe do projeto (EFC, 2016)

Depois de calafetado, o molde é pré-aquecido com um conjunto formado por apoios e maçarico a fim de eliminar umidade e de certa forma reduzir o choque térmico devido ao contato do metal quente e liquefeito com os trilhos. Quanto maior o pré-aquecimento (tempo ou temperatura), maior será a penetração do metal de solda e maior a região de diluição. A medida que aumenta o tempo de pré-aquecimento, melhora-se a microestrutura, pois, sem esse processo, a velocidade de resfriamento da solda seria acelerada, formando uma forma de ferrita frágil.



Figura 15: Vedação do molde com pasta refratária.
Fonte: Equipe do projeto (EFC, 2016)



Figura 16: Processo de pré-aquecimento utilizando maçarico oxi propano.
Fonte: Equipe do projeto (EFC, 2016)

A mistura aluminotérmica é colocada dentro do cadinho, e esse é encaixado sobre o molde. Bandejas laterais são fixadas no molde para a coleta da escória, que por ter menor densidade, fica por cima do metal de solda e corre pelas laterais. O cadinho é então fechado, e a reação aluminotérmica é iniciada utilizando-se um acendedor. (SCHWARTZ, 1993) O calor proveniente da reação e da temperatura do aço liquefeito aquece a chapa de aço que há no fundo do cadinho ao ponto de essa chapa também entrar no estado líquido, abrindo a passagem para a cavidade de sangria. A liga metálica líquida então escorrerá e preencherá o molde completamente, inclusive seus canais de alimentação. A escória que estava acima do aço líquido não chega a entrar no molde, e seu excesso é então expelido para fora, nas bandejas coletoras, através dos furos laterais do cadinho.



Figura 17: Reação aluminotérmica no interior do cadinho e preenchimento do molde.
Fonte: <https://media.licdn.com>

O esquema dos processos de ignição, reação e fundição, respectivamente, é ilustrado na Figura 18:

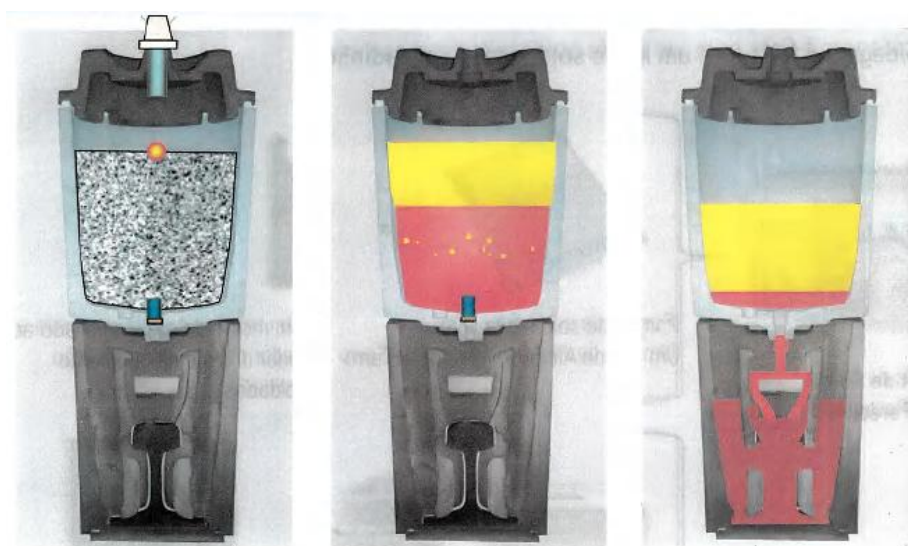


Figura 18: Princípio da solda aluminotérmica.
Fonte: Treinamento em solda aluminotérmica (RAILTECH WELDING & EQUIPMENT, 2016)

Após esperar o tempo necessário para resfriamento da solda e que o conjunto atinja temperatura adequada de trabalho, o cadinho, as bandejas e a cinta metálica são retirados. O molde é então quebrado com um equipamento eletro-hidráulico ou marreta. Como a solda fica com um aspecto extremamente grosseiro devido a rebarbas e ao resto de molde sobre o trilho, faz-se o uso de uma esmerilhadora para um tratamento superficial mais refinado.



Figura 19: Corte do molde utilizando equipamento eletro-hidráulico.
Fonte: Equipe do projeto (EFC, 2016).



Figura 20: Tratamento superficial da solda utilizando-se esmerilhadora manual.
Fonte: <http://mankinen.fi/en/track-maintenance/rail-grinding/>

Por fim, a ferrovia deve fazer constantes inspeções na solda utilizando veículo de ultrassom para identificar defeitos internos, o *TrackStar* para identificar problemas no boleto e problemas de geometria da via, além de inspeções visuais.

2.4.3 Perfil de dureza

Devido à sua estrutura de metal fundido, a solda possui, invariavelmente, propriedades mecânicas inferiores que 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, de particular interesse são os níveis de dureza na zona de fusão e na ZAC, além do tamanho da própria ZAC (MUTTON, 2004).

Myers (MYERS, 1982) apurou a falta de simetria no perfil de dureza da solda. No boleteo, o metal de solda 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. A Figura 21, de Marich (MARICH, 2005), mostra o perfil de dureza no plano longitudinal para três amostras de solda aluminotérmica diferentes.

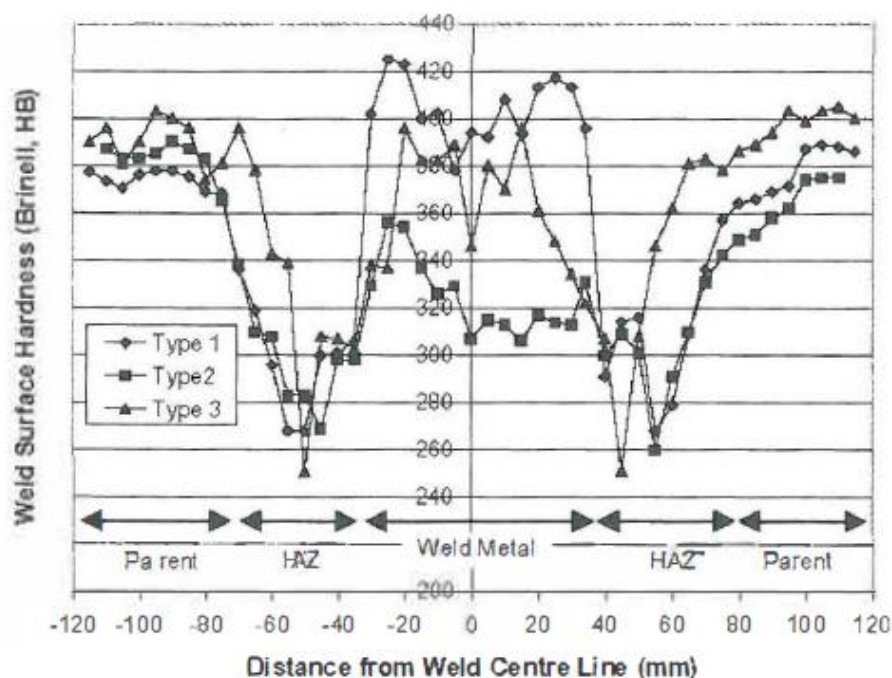


Figura 21: Dureza longitudinal em diferentes tipos de soldas aluminotérmicas.
Fonte: (MARICH, 2005)

2.5 DEFEITOS EM SOLDA ALUMINOTÉRMICA

Os defeitos de soldagem são classificados pelo *International Institute of Welding* (IIW) em função de sua natureza, forma e dimensões (BRANCO, 1986). Embora todos os efeitos de soldagem aluminotérmica tenham efeito similar na vida em fadiga das juntas (aumento da tensão local e redução do desempenho frente ao carregamento cíclico), as origens dos defeitos podem ser diferentes (ROSA, 2008).

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.

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

2.5.1 *Black Holes*

São poros isolados que surgem junto ao canal de alimentação da solda. Este tipo de defeito é uma das maiores causas de rejeição 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. Solda com *gaps* estreitos também são suscetíveis a este tipo de defeito.



Figura 22: *Black Hole* no patim.
Fonte: (WTIA, 2006)

2.5.2 Inclusões

As inclusões são definidas como a presença de material não constituinte do aço na solda solidificada. As inclusões de escória são bem comuns, sendo defeitos bastante perigosos à integridade da solda, pois podem nuclear trincas de fadiga. Geralmente estes defeitos são introduzidos por procedimentos incorretos de corte, alinhamento e limpeza dos trilhos, umidade na porção aluminotérmica, falhas no pré aquecimento da junta e escória retida vazando junto com o metal para o molde.

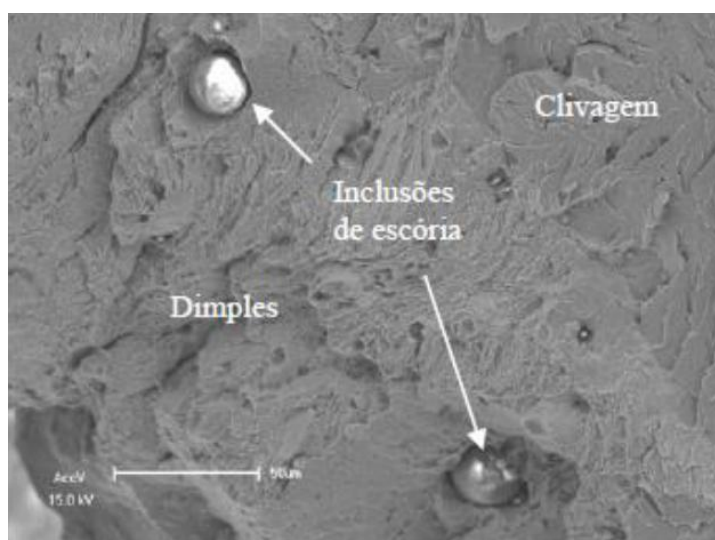


Figura 23: Fractologia ilustrando inclusões de escória.
Fonte: (ROSA, 2008)

Outro tipo de inclusão é a inclusão de areia, que ocorre 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. O material silicoso da pasta de vedação pode atingir temperaturas de vitrificação e se incrustar na superfície do trilho (ROSA, 2008).

2.5.3 Rechupe (contração da solda)

A contração da solda ocorre geralmente na última região de solidificação, sendo no patim ou no boleto, de acordo com o sistema de vazamento. Isso ocorre porque na solidificação o aço diminui de volume, dado que a temperatura se reduz. A contração está associada a um pré-aquecimento insuficiente, *gaps* reduzidos e ao movimento relativo da junta antes da solidificação total da solda. Os rechupes também podem ocorrer no plano microscópico. São necessários aproximadamente 25 minutos até que a solda atinja temperatura de 350°C, onde terá desenvolvido 80% da sua resistência mecânica (MUTTON, 2004).



Figura 24: Rechupe na região entre a alma e o patim.
Fonte: (WTIA, 2006)

Para que o rechupe não ocorra no metal da solda, o molde é desenhado para ter cubos de alimentação, denominados massalotes. Os massalotes alimentam o metal de solda que está se “encolhendo” devido à solidificação, transferindo a contração da solda para o próprio massalote.

2.5.4 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. Demora no vazamento, desalinhamento no *gap*, parâmetros inadequados de pré-aquecimento, como pressão dos gases e baixa temperatura ou porção de solda insuficiente podem causar a falta de fusão.



Figura 25: Solda com falta de fusão no patim do trilho.
Fonte: (WTIA, 2006)

2.5.5 Bordamento da solda (*Flashing/ Finning/ Cold Lap*)

O defeito tipo “*finning*” surge devido a um fluxo de metal fundido entre o trilho e o molde, o que forma uma borda com potencial para 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 na dimensão dos moldes, vazamento de escória na solda ou fusão da pasta de vedação que é colocada entre o molde e o trilho.

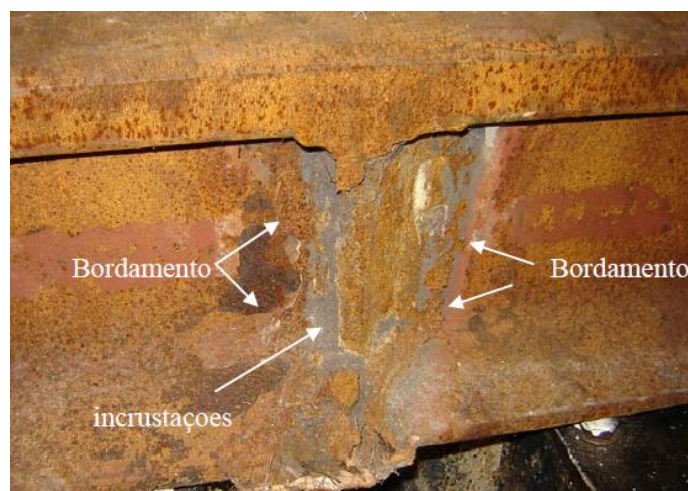


Figura 26: Exemplo de solda com o defeito de bordamento.
Fonte: (ROSA, 2008)

2.5.6 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 (ROSA, 2008).



Figura 27: Solda com forte porosidade.
Fonte: (WTIA, 2006)

2.5.7 Trinca a quente

As trincas a quente podem ser definidas como a fissuração formada a altas temperaturas perto do *solidus* de metal, onde o metal tem coerência, mas é completamente frágil. Pode ocorrer em metais de solda e na ZAC. Quase todos os metais (tais como aço carbono, aço de baixa liga, aço inoxidável austenítico, liga de níquel e liga de alumínio) podem vir a sofrer este defeito a qualquer nível.

Trincas a quente podem ser causadas por insuficiente pré-aquecimento, tamanho da junta inadequado, soldagem em temperatura inadequada (34 – 44°C), vibração no trilho causada por outros serviços ocorrendo durante o resfriamento da solda com a temperatura ainda no campo austenítico ou no campo pastoso, retirada dos massalotes antes do tempo e passagem de carga enquanto a temperatura ainda está alta.



Figura 28: Trinca a quente com início no raio entre o boleto e a alma.
Fonte: Curso de soldagem de trilhos, Professor Dr. Luiz Alves (2016)

2.5.8 *Rock Candy*

O uso comum de alumínio como desoxidante no aço pode, sob certas circunstâncias, quando combinado com uma taxa de arrefecimento lenta e com a presença de nitrogênio, reduzir a ductilidade e a dureza do aço por um fenômeno de precipitação. Quando esta condição de fragilidade está presente, a aparência da fratura é caracterizada por facetas angulares grosseiras e o fenômeno é referido como fratura intergranular ou *Rock Candy* (VALVES, 2003).

Tem sido estabelecido que o composto conhecido como nitreto de alumínio (AlN) poderia precipitar na forma de filmes finos nas superfícies dos grãos de austenita primária e ser uma das causas de fratura intergranular. As variáveis primárias que controlam a susceptibilidade de um aço a este tipo de fragilização são: o teor de alumínio, o teor de nitrogênio e a taxa de arrefecimento através da região austenítica do diagrama ferro-carbono (VALVES, 2003).

Outros compostos também têm sido encontrados em amostras que falharam por *Rock Candy*. Pesquisas feitas pela *Steel Founders' Society of America* (SFSA) identificaram a presença de boreto de carbono, outros tipos de boreto, sulfetos e ligas de carbeto que podem levar a uma fratura frágil por *Rock Candy*. O boro (B) geralmente é adicionado ao aço com o propósito de aumentar seu endurecimento, e mesmo em quantidades muito baixas, ele tem um grande efeito, particularmente em aços com baixo teor de carbono. Como o boro forma

carbonetos e nitretos estáveis em aço, recomenda-se níveis de boro entre 0,001 e 0,003% (DUTCHER, 1999).



Figura 29: Superfície de fratura exibindo uma aparência de defeito *rock candy*.
Fonte: (VALVES, 2003)



Figura 30: Fratura intergranular que caracteriza o defeito *rock candy*.
Fonte: Metal Failures: Mechanisms, Analysis, Prevention, Second Edition. Arthur J. McEvily (2013)

2.6 FALHAS EM SOLDA ALUMINOTÉRMICA

Estudos recentes mostram que as soldas aluminotérmicas são a principal fonte de falhas por fadiga ou por sobrecarga em trilhos usados em ferrovias *heavy haul*. As falhas de sobrecarga normalmente ocorrem como resultado de defeitos grosseiros e procedimentos de soldagem inadequados, enquanto as falhas por fadiga surgem através do início da fissura em locais de concentração de tensão ou defeitos, que se propagam sob condições cíclicas e de outras condições de carga. Trincas por fadiga eventualmente levam à fratura total do trilho, a menos que elas sejam detectadas por teste de ultrassom e então removidas (SALEHI, 2011).

As falhas por fadiga mais comuns em soldas aluminotérmicas podem ser categorizadas em dois grupos principais: fraturas verticais (*straight breaks failures*) e fraturas horizontais (*horizontal split web failures*).

As fraturas verticais se iniciam dos locais de concentração de tensão na borda do colar de solda, no patim, na região inferior da alma e na região entre o boleto e a alma. Essa fratura se propaga na direção vertical, conforme mostrado na Figura (trinca no patim). A iniciação e propagação deste tipo de fratura são altamente influenciadas pela tensão térmica sazonalmente dependente, esforço de flexão desenvolvido sob a influência do tráfego ferroviário e tensões longitudinais residuais desenvolvidas como resultado do procedimento de soldagem, condições de resfriamento e tratamentos térmicos pós-soldagem (SALEHI, 2011).

As fraturas horizontais envolvem o desenvolvimento de uma trinca de fadiga horizontal na qual se inicia por defeitos de superfície ou perto da superfície no colar de solda, geralmente nas regiões superior e central da alma. Estas falhas na solda são mais preocupantes em termos de risco de segurança se comparadas às falhas verticais, já que a direção do crescimento da trinca é alterada assim que a ponta da trinca ultrapassa o colar de solda, virando seu caminho de crescimento para o boleto ou para o patim. Esse comportamento pode resultar em perda de uma parte significativa do trilho, e conseqüentemente um grande risco de descarrilamento. Os fatores que afetam a iniciação e a propagação deste modo de fratura são bem entendidos, com a maioria das falhas ocorrendo em curvas ou em trechos de reta propensas a instabilidades nos truques da composição (*vehicle hunting*). Elevadas tensões verticais cíclicas devido à flexão transversal, e tensões residuais verticais, estão entre os

parâmetros mais importantes que influenciam a nucleação e o crescimento das fraturas horizontais.



Figura 31: (a) Fratura vertical (*straight breaks failures*) em solda aluminotérmica, iniciada no patim; e (b) Fratura horizontal (*horizontal split web failures*) iniciada na região da alma do trilho.

Fonte: (SALEHI, 2011)

A tração lateral é altamente influente no comportamento de fadiga da região inferior do boleto e, em menor grau, no filete da base do colar de solda. A flexão transversal do trilho devido à força de tração aumenta a tensão longitudinal na região inferior do boleto e, conseqüentemente, o dano da fadiga. Na prática, a maioria das falhas de fadiga que se iniciam na região da parte inferior do boleto ocorre em curvas mais acentuadas e em trechos de reta propensos ao comportamento de balanço excessivo dos vagões.

Uma tensão residual de tração longitudinal não é favorável, uma vez que aumenta a extensão dos danos por fadiga ao longo da borda do colar de solda e especialmente na região inferior do boleto, em que valores de tensão residual elevados são o contribuinte principal para a condição de início de trincas. Por outro lado, a tensão residual compressiva na região do patim reduz o risco de iniciação da fissura, embora a região esteja sujeita a esforços de tensão cíclicos como resultado da flexão do trilho.

2.7 DUREZA *ROCKWELL* – ABNT NBR NM ISO 6508-1:2008

Neste trabalho, os ensaios de dureza das amostras de solda aluminotérmica foram realizados utilizando o padrão de dureza *Rockwell*. Simbolizada por HR, a dureza *Rockwell* difere fundamentalmente do ensaio de dureza *Brinell* pelo fato de eliminar o tempo necessário para medição de qualquer dimensão da impressão causada, pois o resultado pode ser lido diretamente na máquina de ensaio. Os penetradores pequenos podem ser cones de diamante com 120° de conicidade ou esferas de aço temperado (BARBOSA; CURY 2016).

O penetrador é, em primeiro lugar, aplicado à superfície do material de ensaio sob uma carga secundária de 10 kgf (pré-carga), sendo o objetivo penetrar nas imperfeições da superfície da peça e vencer as deformações elásticas. Após a pré-carga de 10 kgf ser aplicada, um braço é acionado para aplicar a carga principal. Um mostrador graduado na máquina indica em escalas de dureza *Rockwell* (A, B, C, etc.), baseadas na diferença da profundidade de penetração causada pelas cargas principal e secundária. O número obtido de dureza é adimensional (BARBOSA; CURY 2016).

Nos ensaios de dureza *Rockwell* normal, utiliza-se cargas principais de 60, 100 ou 150 kgf. O número de dureza *Rockwell* deve ser seguido pelo símbolo HR, com um sufixo que indique a escala utilizada. Segue abaixo exemplo de interpretação de um resultado, como por exemplo, 64 HRC:

- 64 é o valor de dureza obtido no ensaio;
- HR indica que se trata de ensaio de dureza *Rockwell*;
- A última letra, no exemplo C, indica qual escala *Rockwell* empregada.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo, são apresentados os procedimentos e as ferramentas adotados na experimentação de solda aluminotérmica, com a finalidade de avaliar as variáveis de entrada que interferem nos resultados dos ensaios de dureza e composição química das amostras de solda. Este trabalho baseia-se na primeira sessão de experimentos de solda aluminotérmica realizados em conjunto com a USP no projeto Cátedra Roda-Trilho, realizados na área do Estaleiro de Soldas da Estrada de Ferro Carajás em São Luís – MA.

3.1 DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

3.1.1 Serra de fita horizontal manual

- Morsa manual;
- Escova para limpeza automática da lâmina;
- Guias de lâmina ajustáveis com inserto de metal duro;
- Velocidade de até 1700 RPM;
- Sistema de refrigeração de corte;
- 220 ou 380 VAC.



Figura 32: Serra de fita horizontal manual SM200M 220/380 V, parecida com o modelo usado no Laboratório de Processos de Fabricação da UFJF.

Fonte: <http://www.fg.com.br/serra-fita-horizontal-manual-sm200m-220-380v/p>

3.1.2 Cortadora metalográfica

- Altura: 540 mm, Largura: 620 mm, Profundidade: 650 mm;
- Tensão: 220 V / 380 V / 440 V – Trifásico;
- Potência do motor: 2.0 CV;
- Diâmetro de corte: 80 mm ou 100 mm;
- Medidas do disco: 305 x 2,0 x 31,75 mm.



Figura 33: Cortadora Metalográfica FORTEL (80 mm ou 100 mm) “CFIII”.
Fonte: <http://www.fg.com.br/serra-fita-horizontal-manual-sm200m-220-380v/p>

3.1.3 Durômetro Rockwell normal analógico

- Pré-carga 10 Kgf;
- Carga de ensaio: 60 – 100 – 150 Kgf;
- Controle de aplicação de carga e pré-carga automático;
- Escalas HRA, HRC e HRD na escala preta do display;
- Outras escalas: na parte vermelha do display.



Figura 34: Durômetro Rockwell normal analógico EQUILAM.
Fonte: <http://www.fg.com.br/serra-fita-horizontal-manual-sm200m-220-380v/p>

3.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Este trabalho tem como objetivo analisar a influência das variáveis de entrada do controle do procedimento de soldagem aluminotérmica no perfil de dureza e na composição química das amostras de solda aluminotérmica. Os resultados gerados pelos ensaios devem ser analisados e comparados com a literatura disponível.

Após revisão bibliográfica sobre o processo empregado para realizar soldas aluminotérmicas, descrito no Subcapítulo 2.4 deste trabalho, e durante reuniões da equipe do projeto Cátedra Roda-Trilho, foram escolhidas as seguintes variáveis de entrada para controle do procedimento de soldagem: tempo de pré-aquecimento, *gap* ou abertura e carbono equivalente. O fornecedor do material de solda permanece o mesmo já utilizado pela empresa mineradora em estudo, para todos os experimentos.

Avaliando os custos para realização de cada solda, foi decidido que cada variável seria estudada em apenas dois níveis: um nível inferior e um nível superior. Logo, o trabalho contou com oito experimentos já que foram utilizadas três variáveis e dois níveis de análise (2^3). Cada condição de solda teve uma réplica, totalizando, então, 16 soldas aluminotérmicas experimentais. Vale ressaltar que, para este trabalho, as réplicas são serão analisadas quanto à análise do perfil de dureza e perfil de composição química. As variáveis foram dispostas conforme Tabela 4 a seguir:

Tabela 4: Variáveis e níveis de análise.

	Variáveis	Nível inferior (-)	Nível superior (+)
A	Tempo de pré-aquecimento	5 minutos	7 minutos
B	GAP ou abertura entre trilhos	23 mm	27 mm
C	Carbono equivalente	< 1,00	> 1,25

Fonte: o autor, dados baseados nas decisões de projeto

Cada solda foi submetida a um experimento específico, que se diferenciam de acordo com as combinações das variáveis que variam entre um valor mínimo e um valor máximo. Seguindo a distribuição de todas as combinações possíveis entre as variáveis, representadas pelas letras A, B e C na Tabela 4, e níveis de análise, a matriz de experimentos foi definida conforme Tabela 5 a seguir:

Tabela 5: Planejamento experimental.

# Experimento	Variáveis		
	A	B	C
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+

Fonte: o autor

3.2.1 Descrição das variáveis

3.2.1.1 Tempo de pré-aquecimento

O tempo de pré-aquecimento compreende o período em que as extremidades dos trilhos são aquecidas com o uso de maçarico. Esse procedimento, como explicado anteriormente no Subcapítulo 2.4.2, ocorre após a montagem e a vedação das formas e é determinado pelo fornecedor da solda. Conforme procedimento empregado na empresa mineradora, o tempo de pré-aquecimento é de seis minutos, com a pressão do GLP a 1,4 kgf/cm², a pressão do oxigênio a 5,0 kgf/cm² e a chama de forma simétrica ao sair pelos alimentadores.

Para a realização dos experimentos, o tempo de pré-aquecimento foi variado entre um valor mínimo de 5 minutos e um valor máximo de 7 minutos.

3.2.1.2 *Gap* ou abertura

O *gap* é a distância entre as duas extremidades dos trilhos a serem soldadas e que serão preenchidas com o material de adição da solda. Para a solda aluminotérmica, também conforme procedimento empregado na empresa mineradora, a abertura deve ser de 25 mm \pm 2, ou seja, pode variar entre 23 mm e 27 mm. Para os experimentos foram utilizados os valores de 23 mm para mínimo e 27 mm para máximo.

3.2.1.3 Carbono equivalente

Dentre os fabricantes de trilhos utilizados atualmente no processo de soldagem, foram escolhidos dois fornecedores com base no Carbono Equivalente (vide Subcapítulo 2.1.1 para definições), nos quais foram escolhidos um tipo de trilho de carbono equivalente menor que 1% ($1 \pm 0,03$), e outro de carbono equivalente maior que 1,25% ($1,25 \pm 0,05$).

3.2.2 Distribuição dos experimentos

As soldas foram realizadas na área do Estaleiro de Soldas de São Luis, onde já haviam sido realizadas soldas de teste pela área de Confiabilidade da Estrada de Ferro Carajás. O local dispunha de dormentes de madeira com placas de apoio com grampos. Apesar de não possuir brita embaixo e entre os dormentes, o posicionamento dos mesmos permitiu a realização das soldas sem interferências significantes nos processos de soldagem (BOUZAN, 2016).

Conforme cronograma proposto pela equipe do projeto, os experimentos foram programados para serem realizados em dois momentos diferentes, em virtude da quantidade de soldas a serem realizadas (16 ao total). Foi acordada a realização de oito soldas em cada etapa, envolvendo quatro experimentos com suas respectivas réplicas. Para garantir a aleatoriedade dos experimentos, os quatro experimentos a serem realizados na primeira etapa foram sorteados (logo, os quatro experimentos que restaram foram realizados na segunda etapa), assim como a ordem de suas réplicas. Apesar da divisão em duas etapas, a equipe de operação se manteve a mesma nos dois momentos.

As tabelas a seguir mostram a distribuição das soldas em cada uma das duas etapas realizadas pela equipe. Conforme já informado, cada solda foi realizada respeitando-se a combinação das variáveis de um experimento específico, e sua réplica segue o mesmo experimento.

Tabela 6: Distribuição das soldas na primeira etapa de experimentos.

SOLDA	NÚM. EXPERIMENTO	TEMPO DE PRÉ-AQUECIMENTO (A)	GAP (B)	CARBONO EQUIVALENTE (C)
S01	02	7 minutos	23 mm	1,00
S02	05	5 minutos	23 mm	1,25
S03	03	5 minutos	27 mm	1,00
S04	08	7 minutos	27 mm	1,25
S05	03	5 minutos	27 mm	1,00
S06	08	7 minutos	27 mm	1,25
S07	02	7 minutos	23 mm	1,00
S08	05	5 minutos	23 mm	1,25

Fonte: o autor

Tabela 7: Distribuição das soldas na segunda etapa de experimentos.

SOLDA	NÚM. EXPERIMENTO	TEMPO DE PRÉ-AQUECIMENTO (A)	GAP (B)	CARBONO EQUIVALENTE (C)
S09	01	5 minutos	23 mm	1,00
S10	07	5 minutos	27 mm	1,25
S11	04	7 minutos	27 mm	1,00
S12	06	7 minutos	23 mm	1,25
S13	01	5 minutos	23 mm	1,00
S14	07	5 minutos	27 mm	1,25
S15	04	7 minutos	27 mm	1,00
S16	06	7 minutos	23 mm	1,25

Fonte: o autor

3.3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Os trilhos utilizados no processo foram disponibilizados pelo Estaleiro de Soldas, em São Luís – MA, em quatro segmentos de 3,5 metros cada, sendo dois segmentos de cada tipo de trilho a ser experimentado. Os mesmos foram deslocados do pátio de estocagem do Estaleiro de Soldas até o local da soldagem por meio de empilhadeira e guindaste rodoferroviário, com apoio das equipes do estaleiro de soldas e da manutenção de via, respectivamente. Os kits de soldagem foram disponibilizados pela área de materiais.

Após a soldagem, as soldas foram cortadas e encaminhadas para a Universidade Federal de Juiz de Fora para que fossem feitos os ensaios programados, conforme as amostras da Figura 35, que se encontram no Laboratório de Processos da UFJF.



Figura 35: Amostras dos trilhos soldados localizadas no Laboratório de Processos da UFJF.
Fonte: o autor

As soldas que foram estudadas são as S01, S02, S03, S06, S09, S12, S14 e S15, descritas nas Tabelas 6 e 7, na qual cada solda representa um experimento diferente. É importante ressaltar que o ensaio de dureza da solda S06 foi feito em sua réplica, S04, e o ensaio da S15 não foi realizado, já que as amostras estavam em outra universidade durante os experimentos, e como o tempo era restrito, não havia a possibilidade de esperar a chegada das amostras. Os ensaios de perfil de dureza e análise de composição química foram realizados sobre a região do bolete, com isso parte do bolete de todas as amostras foi cortada, longitudinalmente à solda, utilizando-se da serra de fita descrita no Subcapítulo 3.1.1. A Figura 36 mostra o segmento de bolete cortado de uma das amostras de trilho.



Figura 36: Segmento do bolete de uma das amostras de solda.
Fonte: o autor

Após os segmentos dos boletos serem formados, os mesmos foram novamente cortados em formato retangular para facilitar os ensaios de dureza. Esse segundo corte foi realizado utilizando a cortadora metalográfica FORTEL CFIII, descrita no Subcapítulo 3.1.2. A Figura 37 mostra a amostra no estágio final para testes.



Figura 37: Amostra de solda aluminotérmica preparada para os ensaios.
Fonte: o autor

3.3.1 Ensaio de dureza e de composição química

Os ensaios de dureza foram realizados sobre as amostras cortadas e limpas utilizando o Durômetro *Rockwell* Analógico, onde sua descrição e operação foram mostradas nos Subcapítulos 2.7 e 3.1.3. O penetrador utilizado para os ensaios de dureza foi um cone de diamante e o durômetro tinha sua calibragem conferida antes de todos os experimentos através de um corpo de prova padrão, mostrado na Figura 38 a seguir.



Figura 38: Corpo de prova com dureza padrão para calibragem do Durômetro Rockwell.
Fonte: o autor

O intervalo entre cada batida de dureza foi de 3 mm, conforme observado nos pontos batidos na amostra da Figura 37. Para cada amostra foram batidas três fileiras de dureza: a 3, 6 e 9 mm da superfície do boleto. A distância entre cada ponto medido foi de aproximadamente 3 mm, conforme orientação dos especialistas em solda da empresa mineradora. Como as amostras foram cortadas a partir do meio da solda, então o perfil de dureza se inicia a partir do centro da solda e se estende ao metal do trilho. A região mais próxima do centro da solda é indicada por uma fita conforme mostrado na Figura 37. Os resultados dos ensaios foram plotados em gráficos para melhor visualização do perfil de dureza de cada amostra.

Os ensaios para análise da composição química das amostras de solda foram realizados com um Espectrômetro modelo ARLW 34000. Para as soldas S01, S02, S03, S09, S12, e S14, foram feitas seis medições de composição química partindo do centro da solda até o metal do trilho; já para as soldas S06 e S15 foram feitas nove medições ao longo de toda amostra, do material de trilho do lado esquerdo ao material de trilho do lado direito. Os resultados foram transferidos para planilhas para melhor análise.

O valor do carbono equivalente foi calculado para cada ponto medido nas amostras, utilizando-se a fórmula proposta por Yurioka et al., apresentada no Subcapítulo 2.1.1. Os valores serão mostrados em gráficos para que seja feito um perfil de carbono equivalente para cada amostra ensaiada.

3.3.2 Análise da composição química da mistura aluminotérmica

Para fins de validação da mistura aluminotérmica usada no processo de soldagem, duas amostras desta mistura foram separadas para testes de composição química. Foram construídos dois moldes de areia de pequeno porte e cada porção de solda foi submetida à reação aluminotérmica, liquefazendo-se em seguida. Seguindo os procedimentos de um processo padrão de fundição, as misturas líquidas foram vazadas nos moldes, e após solidificarem e esfriarem, foram levadas para análise de composição química na USP.

Para os ensaios, as “bolachas” de mistura aluminotérmica foram cortadas ao meio e em parte de sua lateral, como mostrado na Figura 39. Os cortes foram feitos devido ao fato da escória ser menos densa que o metal da zona fundida, ficando assim depositada na parte externa das amostras (como uma casca). As superfícies cortadas foram limpas e lixadas, e o resultado final da composição química de cada amostra é a média dos resultados encontrados nas superfícies superior e lateral das “bolachas”.

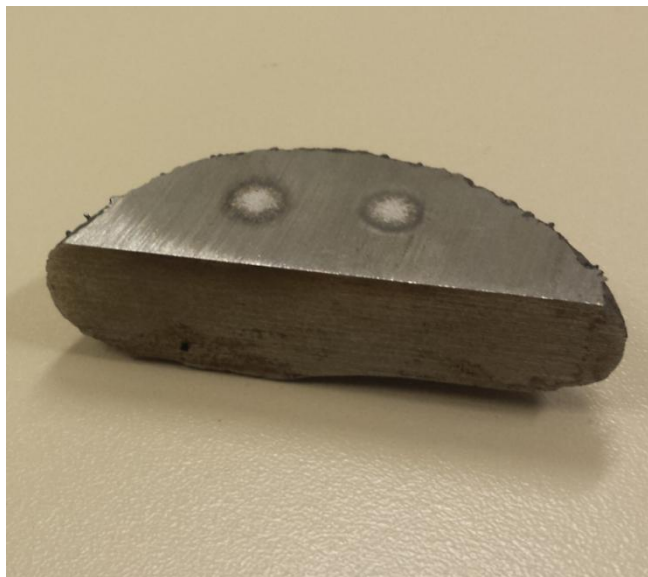


Figura 39: Amostra da mistura aluminotérmica fundida para ensaio de composição química.

Fonte: o autor

4 RESULTADOS

Os perfis de dureza e de composição química das amostras de solda revelam como as variáveis de entrada influenciam na qualidade final da solda. Dependendo das condições de soldagem, tanto a zona fundida quanto a ZAC podem estar fora das características padrão de dureza citadas na literatura especializada.

4.1 PERFIL DE DUREZA

Para a análise do perfil de dureza em escala *Rockwell*, as amostras de solda aluminotérmica foram divididas pelo tipo do trilho soldado, ou seja, amostras de trilhos de carbono equivalente menor que 1% e trilhos de carbono equivalente maior que 1,25%.

As soldas S01, S03, S09 foram feitas em trilhos com carbono equivalente menor que 1%, e os gráficos com o perfil de dureza das mesmas seguem abaixo:

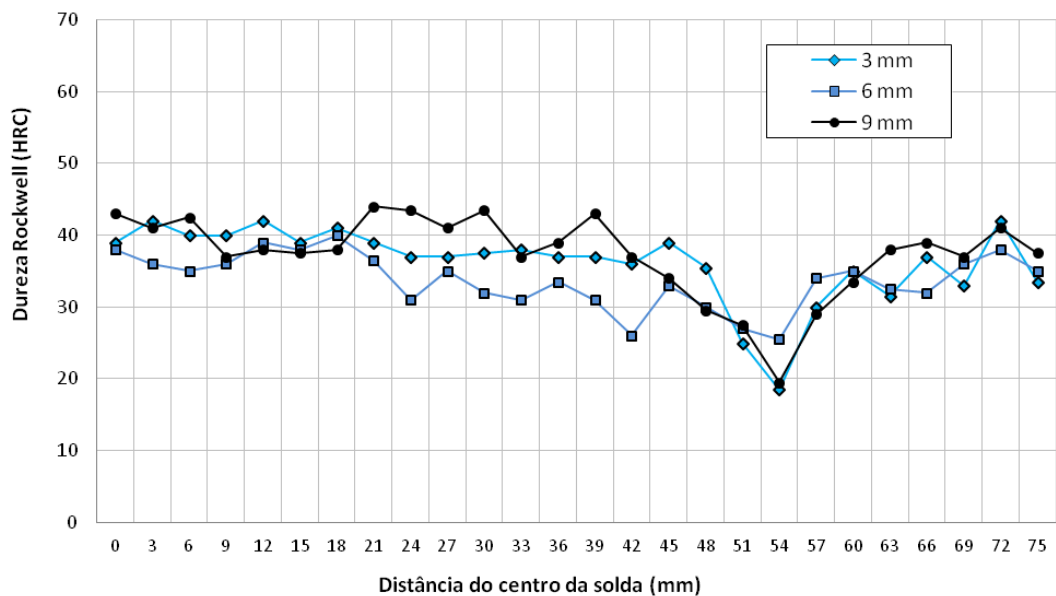


Figura 40: Perfil de dureza da solda S01 (A = 7 min, B = 23 mm, C < 1%).

Fonte: o autor

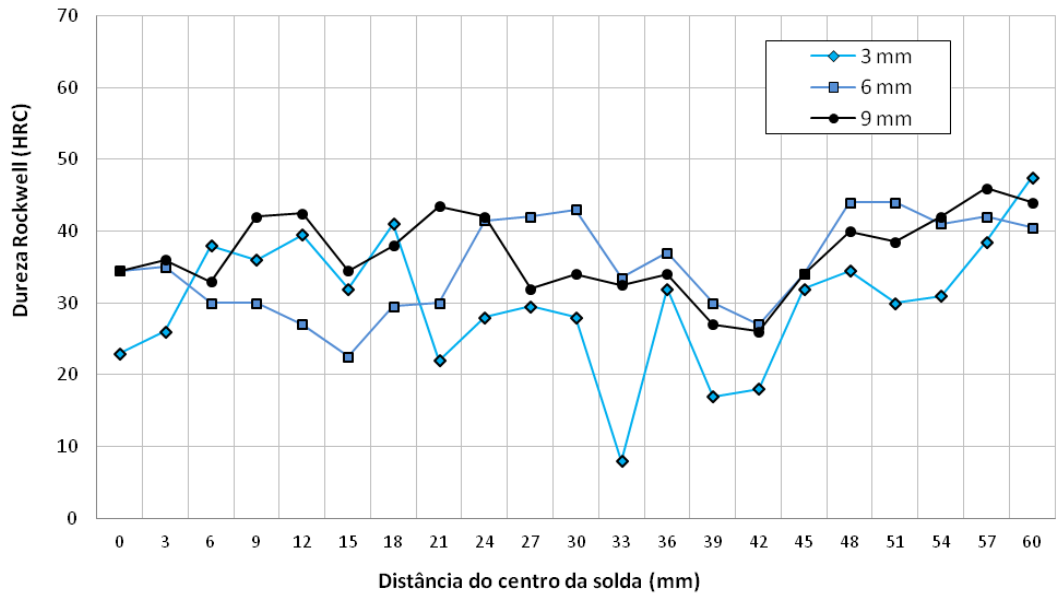


Figura 41: Perfil de dureza da solda S03 (A = 5 min, B = 27 mm, C < 1%).
Fonte: o autor

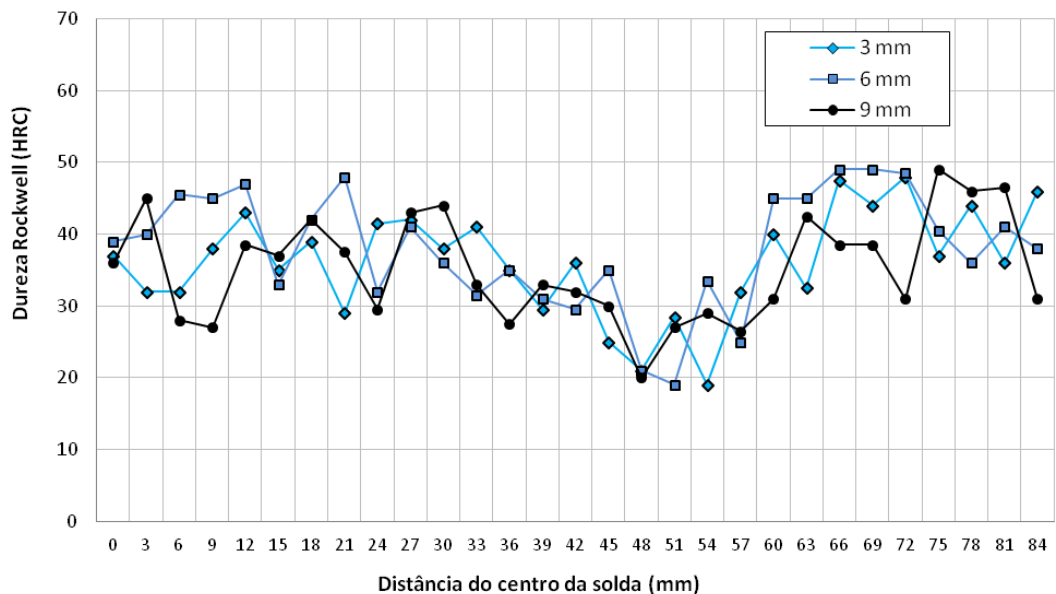


Figura 42: Perfil de dureza da solda S09 (A = 5 min, B = 23 mm, C < 1%).
Fonte: o autor

Ao analisar os valores de dureza no metal do trilho das soldas S01, S03 e S09, verifica-se uma variação entre os limites de 30 HRC e 50 HRC, para qualquer profundidade em relação à superfície do boleto. Se apenas for analisado o valor da dureza do metal do trilho (último ponto batido em relação ao centro da solda) medido a 3 mm da superfície do boleto (mais próximo da superfície), e convertendo o valor para a escala *Brinell*, verifica-se que o trilho da solda S03 apresenta maior dureza, 47,5 HRC que corresponde a aproximadamente

440 BHN (*Brinell Hardness Number*), mesmo tendo as mesmas características dos trilhos usados para as soldas S01 e S09.

Os perfis de dureza das soldas S01, S03 e S09 seguem conforme relatado na literatura, com uma queda de dureza na região da ZAC, pico de dureza na região de interseção entre a zona fundida e a ZAC e valores de dureza na zona fundida menores que no metal do trilho.

As soldas S02, S04, S12 e S14 foram feitas em trilhos com carbono equivalente maior que 1,25%, e os gráficos com o perfil de dureza das mesmas seguem abaixo:

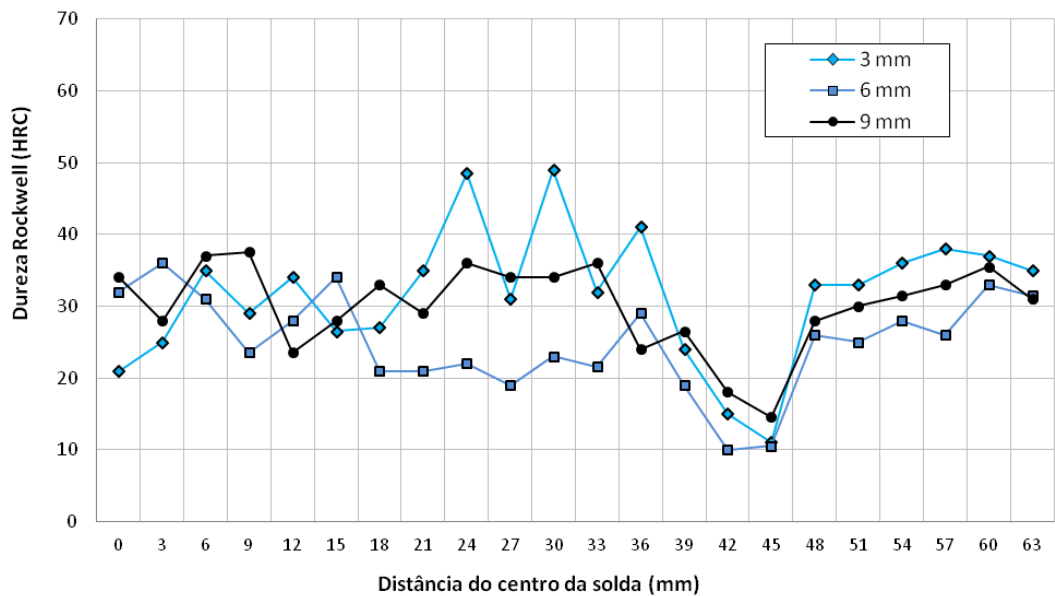


Figura 43: Perfil de dureza da solda S02 (A = 5 min, B = 23 mm, C > 1,25%).

Fonte: o autor

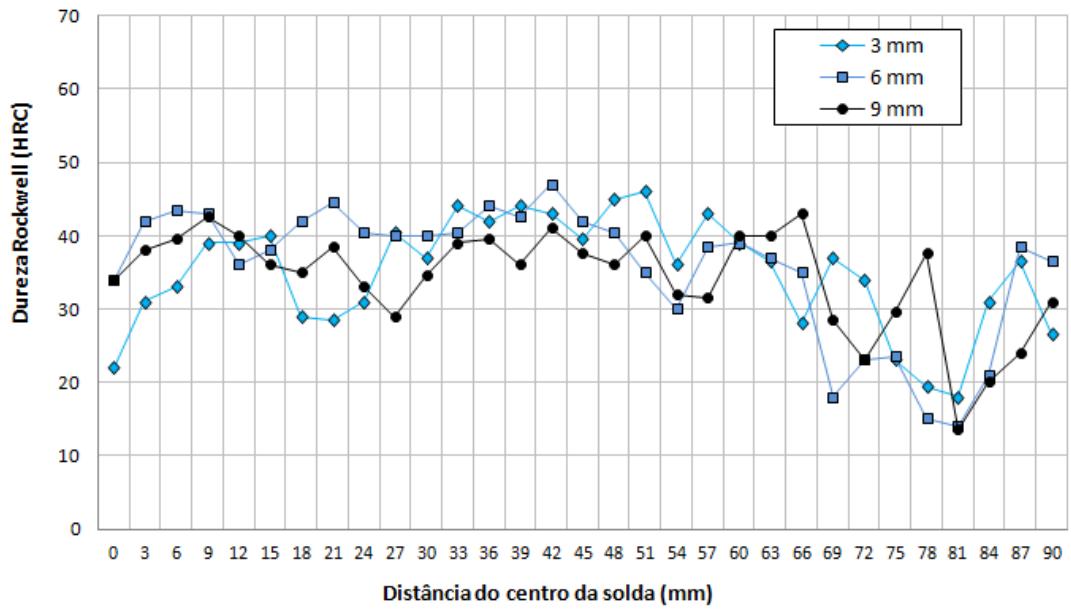


Figura 44: Perfil de dureza da solda S04 (A = 7 min, B = 27 mm, C > 1,25%).

Fonte: o autor

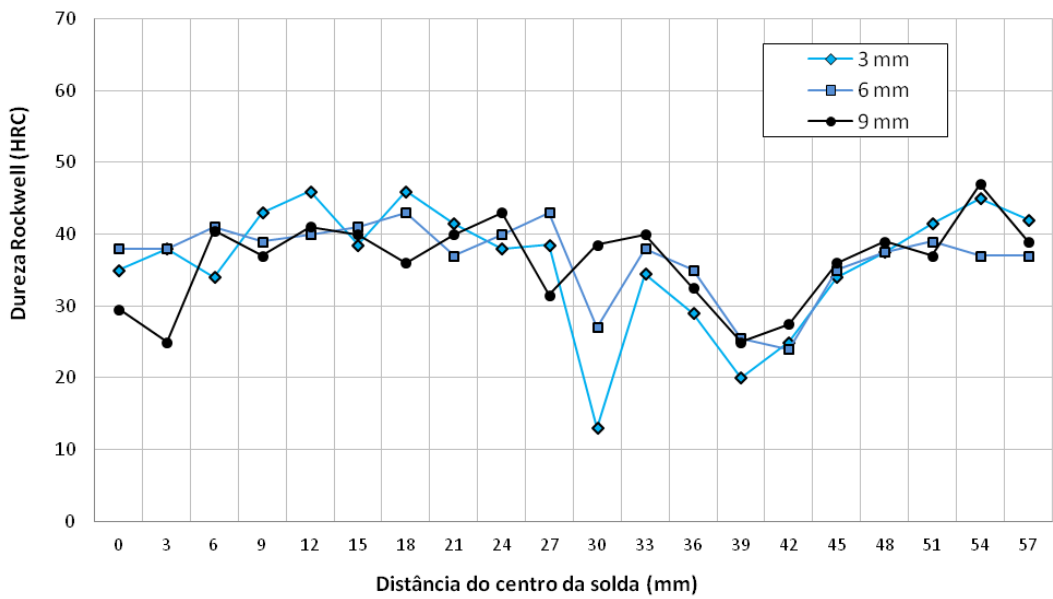


Figura 45: Perfil de dureza da solda S12 (A = 7 min, B = 23 mm, C > 1,25%).

Fonte: o autor

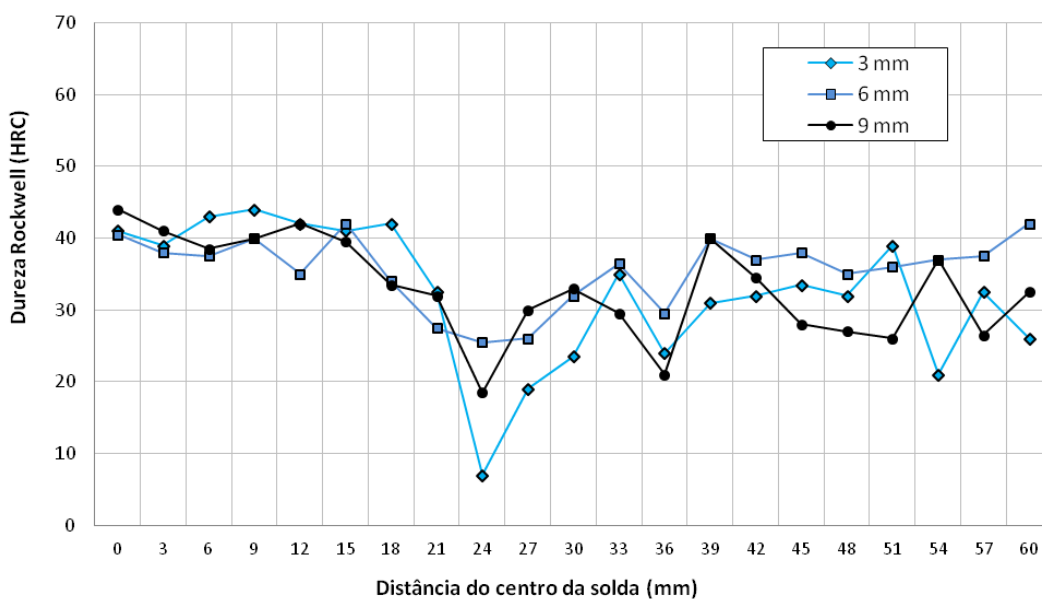


Figura 46: Perfil de dureza da solda S14 (A = 5 min, B = 27 mm, C > 1,25%).

Fonte: o autor

Ao analisar os valores de dureza no metal do trilho das soldas S02, S04, S12 e S14, verifica-se uma variação entre os limites de 25 HRC e 45 HRC, para qualquer profundidade em relação à superfície do bolete. Se apenas for analisado o valor da dureza do metal do trilho (último ponto medido) medida a 3 mm da superfície do bolete (mais próxima), e convertendo o valor para a escala *Brinell*, verifica-se que o trilho da solda S12 apresenta maior dureza, 42 HRC que corresponde a aproximadamente 390 BHN (*Brinell Hardness Number*), mesmo tendo as mesmas características dos trilhos usados para as soldas S02 e S14.

Os perfis de dureza das soldas S02, S04 e S12 seguem conforme relatado na literatura, com uma queda de dureza na região da ZAC, pico de dureza na região de interseção entre a zona fundida e a ZAC e valores de dureza na zona fundida menores que no metal do trilho. Para a solda S14, a dureza no centro da solda apresenta valor maior que no metal do trilho, indo contra o que diz a literatura, porém quanto aos outros aspectos, esta amostra segue o perfil esperado.

Analisando os perfis de todas as soldas, verifica-se que a distância em relação à superfície do bolete, para análise do perfil de dureza, não influencia ou traz uma tendência de resultados ao resultado final.

A Tabela 8 mostra a média da dureza no centro da solda para todas as amostras, levando-se em conta os valores a 3, 6 e 9 mm da superfície do bolete. Os valores das médias de dureza na escala *Rockwell C* também foram convertidos, de forma aproximada, para a escala de dureza *Brinell*. Os valores de dureza na linha central da solda, na escala *Brinell*, para

as amostras S02, S03, S04 e S12, não estão entre 340-360 HB, como sugerido pela literatura para evitar deformação da solda em ferrovias de *heavy haul* (MOLLER, 2001; OFFEREINS, 2001).

Tabela 8: Média dos valores de dureza no centro das soldas em HRC e BHN.

Soldas	Dureza (HRC)	Dureza (BHN)
S01	40,0	≈ 371
S02	29,0	≈ 279
S03	30,7	≈ 294
S04	30,0	≈ 285
S09	37,3	≈ 344
S12	34,2	≈ 319
S14	41,8	≈ 390

Fonte: o autor

4.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS SOLDAS ALUMINOTÉRMICAS

Para a análise da composição química, as amostras de solda aluminotérmica foram divididas pelo tipo do trilho soldado, ou seja, amostras de trilhos com carbono equivalente menor que 1% e trilhos com carbono equivalente maior que 1,25%.

As soldas S01, S03, S09 e S15 foram feitas em trilhos com carbono equivalente menor que 1%, e as tabelas com a composição química e os gráficos com o perfil de carbono equivalente seguem abaixo:

	LADO SOLDA			LADO TRILHO		
	1º	2º	3º	4º	5º	6º
C	0,79	0,83	0,88	0,878	0,87	0,87
Mn	0,996	0,957	0,971	0,949	0,96	0,96
Si	0,692	0,505	0,285	0,279	0,283	0,281
P	0,02	0,015	0,007	0,007	0,007	0,007
S	0,012	0,012	0,011	0,01	0,01	0,01
Cr	0,371	0,32	0,256	0,249	0,249	0,249
Ni	0,107	0,11	0,114	0,114	0,114	0,114
Mo	0,02	0,02	0,022	0,02	0,115	0,115
V	0,157	0,09	0,003	0,003	0,003	0,003
Al	0,041	0,022	0,003	0,003	0,003	0,003
Cu	0,01	0,07	0,137	0,135	0,138	0,138
Ceq	1,100	1,107	1,125	1,117	1,130	1,130

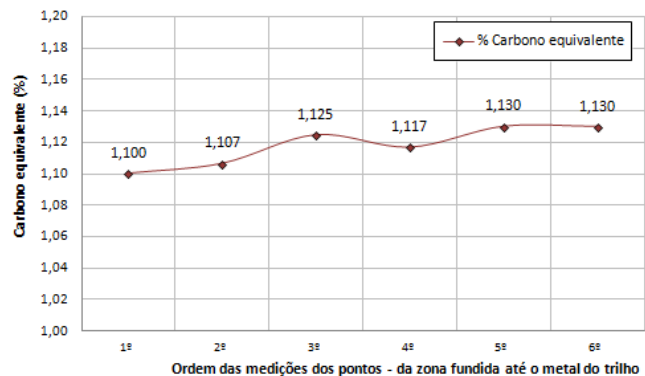


Figura 47: Composição química e perfil de carbono equivalente da solda S01 (A = 7 min, B = 23 mm, C < 1%).

Fonte: o autor

	LADO SOLDADA				LADO TRILHO	
	1º	2º	3º	4º	5º	6º
C	0,77	0,77	0,78	0,88	0,88	0,87
Mn	1,05	1,04	1,01	0,95	0,97	0,95
Si	0,754	0,765	0,82	0,284	0,286	0,28
P	0,02	0,02	0,021	0,006	0,008	0,006
S	0,015	0,01	0,014	0,013	0,012	0,012
Cr	0,367	0,364	0,373	0,245	0,254	0,25
Ni	0,107	0,107	0,107	0,114	0,114	0,114
Mo	0,021	0,02	0,02	0,02	0,022	0,02
V	0,154	0,154	0,166	0,003	0,003	0,003
Al	0,076	0,06	0,055	0,003	0,003	0,003
Cu	0,016	0,016	0,008	0,132	0,132	0,132
Ceq	1,091	1,089	1,100	1,118	1,124	1,109

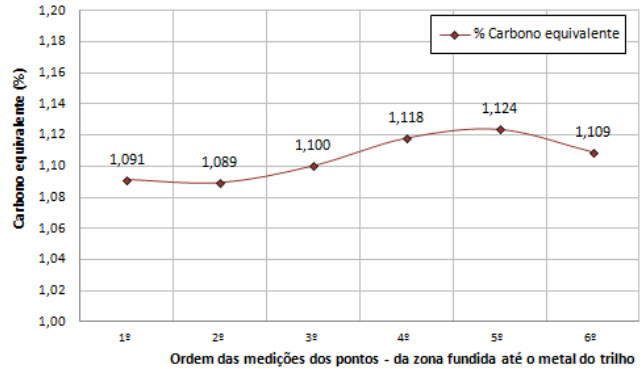


Figura 48: Composição química e perfil de carbono equivalente da solda S03 (A = 5 min, B = 27 mm, C < 1%).

Fonte: o autor

	LADO SOLDADA			LADO TRILHO		
	1º	2º	3º	4º	5º	6º
C	0,77	0,85	0,88	0,88	0,88	0,88
Mn	1,013	1	0,97	0,98	0,97	0,96
Si	0,74	0,33	0,29	0,287	0,284	0,283
P	0,023	0,009	0,008	0,007	0,007	0,008
S	0,016	0,012	0,01	0,013	0,013	0,01
Cr	0,373	0,265	0,255	0,256	0,253	0,254
Ni	0,1	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
Mo	0,021	0,022	0,022	0,022	0,022	0,022
V	0,176	0,019	0,003	0,003	0,003	0,003
Al	0,05	0,001	0,003	0,003	0,003	0,003
Cu	0,001	0,122	0,135	0,138	0,138	0,138
Ceq	1,089	1,105	1,124	1,126	1,124	1,122

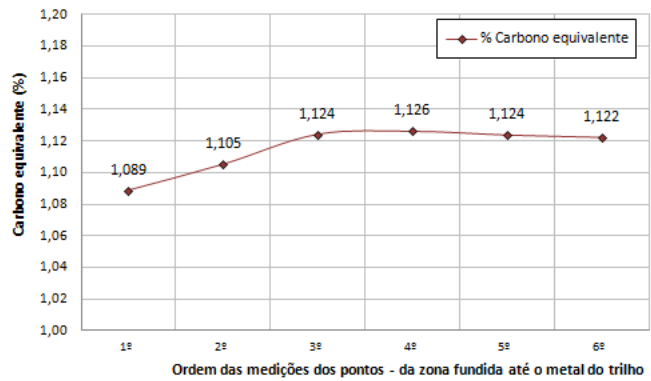


Figura 49: Composição química e perfil de carbono equivalente da solda S09 (A = 5 min, B = 23 mm, C < 1%).

Fonte: o autor

	LADO TRILHO E		CENTRO SOLDADA				LADO TRILHO D		
	TRILHO	8º	7º	6º	Meio	2º	4º	5º	TRILHO
C	0,817	0,825	0,738	0,749	0,743	0,738	0,743	0,746	0,812
Mn	0,959	0,927	0,948	0,961	0,904	0,9	0,9	0,937	0,947
Si	0,272	0,266	0,598	0,614	0,622	0,632	0,617	0,615	0,27
P	0,005	0,003	0,016	0,019	0,015	0,018	0,016	0,017	0,004
S	0,01	0,01	0,013	0,016	0,02	0,015	0,013	0,015	0,008
Cr	0,25	0,238	0,336	0,34	0,359	0,346	0,342	0,343	0,247
Ni	0,113	0,113	0,1	0,1	0,1	0,1	0,101	0,1	0,113
Mo	0,022	0,019	0,019	0,02	0,018	0,019	0,018	0,019	0,021
V	0,003	0,003	0,147	0,158	0,15	0,158	0,151	0,153	0,003
Al	0,003	0,003	0,088	0,085	0,068	0,064	0,064	0,08	0,003
Cu	0,134	0,132	0	0	0	0	0	0	0,135
Ceq	1,058	1,057	1,026	1,043	1,026	1,024	1,026	1,036	1,050

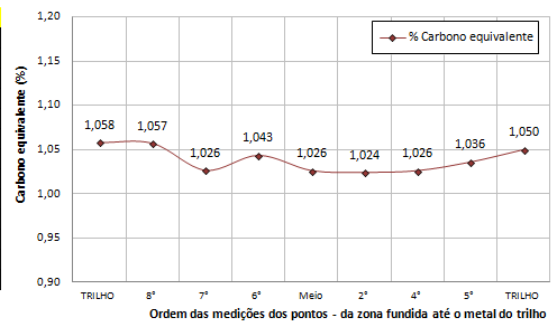


Figura 50: Composição química e perfil de carbono equivalente da solda S15 (A = 7 min, B = 27 mm, C < 1%).

Fonte: o autor

As soldas S02, S06, S12 e S14 foram feitas em trilhos com carbono equivalente maior que 1,25%, e as tabelas com a composição química e os gráficos com o perfil de carbono equivalente seguem abaixo:

	LADO SOLDADA			LADO TRILHO		
	1º	2º	3º	4º	5º	6º
C	0,807	0,8	0,956	0,986	1,006	1,007
Mn	1,099	1,11	1,259	1,291	1,257	1,28
Si	0,708	0,73	0,283	0,233	0,225	0,23
P	0,019	0,021	0,013	0,012	0,011	0,011
S	0,011	0,012	0,012	0,011	0,012	0,01
Cr	0,375	0,39	0,297	0,28	0,276	0,279
Ni	0,098	0,099	0,071	0,067	0,067	0,067
Mo	0,018	0,019	0,016	0,015	0,016	0,016
V	0,145	0,157	0,023	0,003	0,003	0,003
Al	0,055	0,055	0,009	0,003	0,004	0,004
Cu	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Ceq	1,132	1,134	1,248	1,274	1,287	1,293

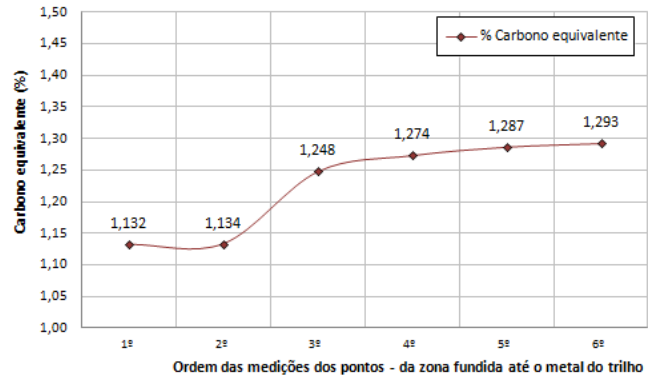


Figura 51: Composição química e perfil de carbono equivalente da solda S02 (A = 5 min, B = 23 mm, C > 1,25%).

Fonte: o autor

	LADO TRILHO E		CENTRO SOLDADA				LADO TRILHO D		
	TRILHO	7º	6º	5º	Meio	2º	3º	4º	TRILHO
C	0,962	0,896	0,766	0,768	0,758	0,756	0,759	0,768	0,951
Mn	1,239	1,201	1,048	1,026	1,024	1,031	1,031	1,062	1,2375
Si	0,221	0,229	0,668	0,673	0,681	0,679	0,671	0,659	0,218
P	0,013	0,006	0,017	0,017	0,018	0,019	0,018	0,017	0,01
S	0,013	0,009	0,015	0,011	0,013	0,016	0,013	0,014	0,0105
Cr	0,288	0,267	0,371	0,373	0,372	0,372	0,37	0,365	0,278
Ni	0,067	0,068	0,098	0,098	0,098	0,098	0,098	0,097	0,067
Mo	0,017	0,014	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,02	0,016
V	0,003	0,009	0,156	0,158	0,161	0,161	0,157	0,152	0,003
Al	0,004	0,005	0,065	0,05	0,056	0,055	0,058	0,066	0,004
Cu	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Ceq	1,243	1,167	1,083	1,082	1,072	1,071	1,073	1,085	1,229

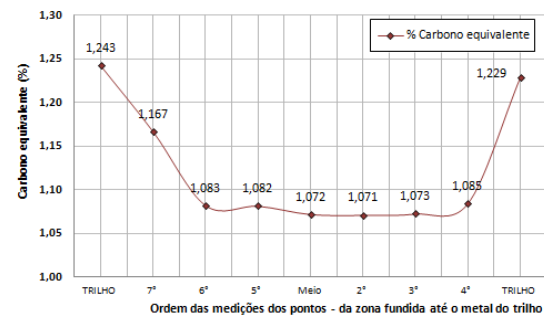


Figura 52: Composição química e perfil de carbono equivalente da solda S06 (A = 7 min, B = 27 mm, C > 1,25%).

Fonte: o autor

	LADO SOLDADA			LADO TRILHO	
	1º	2º	3º	4º	5º
C	0,754	0,802	0,94	0,92	0,93
Mn	0,909	1	1,27	1,3	1,16
Si	0,61	0,54	0,224	0,23	0,212
P	0,025	0,029	0,018	0,017	0,01
S	0,012	0,014	0,011	0,027	0,006
Cr	0,326	0,32	0,27	0,274	0,243
Ni	0	0,087	0,067	0,067	0,067
Mo	0,019	0,018	0,016	0,016	0,013
V	0,164	0,125	0,003	0,003	0,003
Al	0,065	0,061	0,003	0,003	0,003
Cu	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Ceq	1,033	1,088	1,222	1,208	1,187

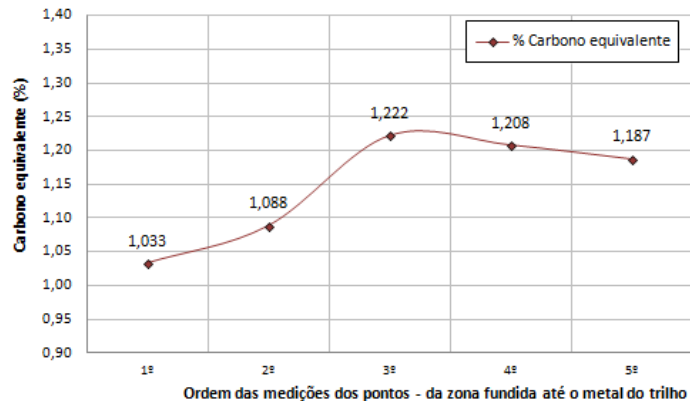


Figura 53: Composição química e perfil de carbono equivalente da solda S12 (A = 7 min, B = 23 mm, C > 1,25%).

Fonte: o autor

	LADO SOLDA		LADO TRILHO		
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª
C	0,75	0,75	0,93	0,93	0,93
Mn	0,94	0,924	1,24	1,298	1,265
Si	0,671	0,682	0,223	0,227	0,224
P	0,031	0,03	0,015	0,022	0,02
S	0,015	0,015	0,008	0,012	0,008
Cr	0,342	0,341	0,261	0,278	0,27
Ni	0,092	0,094	0,067	0,067	0,067
Mo	0,019	0,019	0,015	0,017	0,016
V	0,16	0,16	0,003	0,003	0,003
Al	0,078	0,075	0,003	0,003	0,003
Cu	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002
Ceq	1,043	1,041	1,205	1,219	1,211

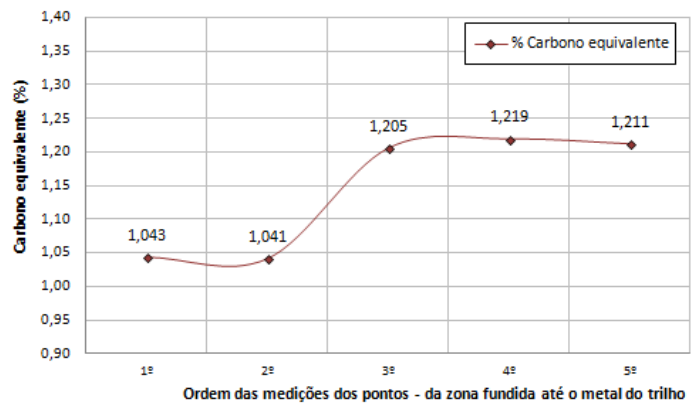


Figura 54: Composição química e perfil de carbono equivalente da solda S14 (A = 5 min, B = 27 mm, C > 1,25%).

Fonte: o autor

Analisando o perfil de carbono equivalente de todas as amostras, identifica-se um aumento do carbono equivalente no metal do trilho em relação à zona fundida, e isso se deve pelo fato da porcentagem de carbono ser maior no trilho do que na zona fundida. Vale lembrar que a concentração de carbono exerce grande influência na fórmula de carbono equivalente. Em relação aos elementos químicos, o aumento de Silício e Alumínio no lado da solda, em todas as amostras, pode acarretar em defeitos de inclusão.

4.3 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA MISTURA ALUMINOTÉRMICA

Conforme relatado no Subcapítulo 3.3.2, duas amostras da mistura aluminotérmica foram fundidas sob um processo padrão de fundição, e então foram executados ensaios de composição química. O resultado final para cada amostra é mostrado na Tabela 9.

Tabela 9: Composição química e carbono equivalente das amostras de mistura aluminotérmica.

AMOSTRA 1				AMOSTRA 2			
C	0,77	Sn	0,008	C	0,78	Sn	0,006
Mn	1,09	Ti	0,001	Mn	0,93	Ti	0,001
Si	0,77	N	0,0072	Si	0,7	N	0,0065
P	0,022	Pb	0	P	0,023	Pb	0
S	0,015	Ca	0,0001	S	0,016	Ca	0,0001
Cr	0,39	Al	0,074	Cr	0,375	Al	0,0518
Ni	0,078	Cu	0,121	Ni	0,062	Cu	0,071
Mo	0,016	Nb	0,001	Mo	0,013	Nb	0,001
V	0,164	B	0	V	0,172	B	0
Ceq	1,110			1,084			

Fonte: o autor

5 CONCLUSÕES

Este trabalho se propôs a fazer uma revisão bibliográfica sobre o procedimento da solda aluminotérmica, os fatores que o influenciam, seus impactos sobre a via permanente e traçar o perfil de dureza e composição química de 8 amostras de solda aluminotérmicas realizadas por uma empresa mineradora.

Os perfis de dureza das amostras de solda aluminotérmica dos trilhos disponibilizados seguem o perfil proposto pela literatura, com uma queda de dureza bastante perceptível na região da ZAC; assim, mesmo sem as macrografias, é possível prever, dentro do perfil de dureza, a região da ZAC para cada solda.

Os gráficos de perfil de carbono equivalente estão alinhados com a composição química de suas respectivas amostras, e comprovam a influência do carbono na fórmula de carbono equivalente. Todavia, o valor de carbono equivalente para a região do trilho não segue o sugerido pelos fornecedores: trilho com carbono equivalente menor que 1% e trilho com carbono equivalente maior que 1,25%.

A queda acentuada nos valores de dureza na região da ZAC não é refletida tanto na tabela de composição química, quanto no gráfico do perfil de carbono equivalente das amostras, pois essa queda pode estar mais relacionada com a microestrutura da zona afetada pelo calor do que sua composição química em si.

A mistura aluminotérmica possui elementos de liga que tem suas porcentagens aumentadas na zona fundida das amostras em comparação com a região do trilho, tais como Vanádio, Níquel, Cromo e Silício. Porém, os níveis de Manganês e Cobre caem na zona fundida, mesmo estando presentes na mistura aluminotérmica.

Para resultados mais precisos há a necessidade de um número maior de amostras, com consequentemente mais réplicas, acompanhado de um estudo estatístico integrado entre os defeitos superficiais e internos identificados nas soldas, o perfil de dureza e composição química das amostras. Pode-se também incluir mais variáveis ao estudo como, por exemplo, faixa de temperatura atingida pela solda, tempo de resfriamento, temperatura ambiente no momento da soldagem, etc.

Devido à abrangência e ao escopo de um Trabalho de Conclusão de Curso, há a necessidade de um maior aprofundamento em pontos importantes para entendimento completo do comportamento da solda aluminotérmica na ferrovia. Para trabalhos futuros e continuidade do Projeto Cátedra Roda-Trilho, os pontos abaixo devem ser explorados:

- Análise das propriedades mecânicas e físicas das amostras de solda aluminotérmica;
- Análise estatística dos resultados de dureza, composição química e carbono equivalente;
- Análises de macrografia e micrografia das amostras de solda aluminotérmicas;
- Novas práticas para a soldagem aluminotérmica;
- Estudo e acompanhamento das soldas realizadas diariamente pela empresa mineradora através de formulários de cumprimento dos procedimentos e relatórios de falhas e defeitos;
- Estudo de viabilidade para emprego de outros processos de solda *on track*, como caminhões de solda elétrica.

6 REFERÊNCIAS

- 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.
- BEER, A. **Série de reportagens “O Brasil nos trilhos”**. Rádio BandNews FM. Rede Bandeirantes, 2006.
- BOUZAN, B.M. **Efeito das variáveis de processo na qualidade de soldas aluminotérmicas em trilhos ferroviários**, 2016.
- BRINA, H. L. **Estradas de ferro**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, v.1, 1979.
- CHEN, C.C., POLLACK, A. Microalloying International, Inc. **Influence of Welding on Steel Weldment Properties**. ASM International. 1996; p.1083-1085.
- CORTADORA Metalográfica (80mm ou 100mm) “CFIII”**. Disponível em: <<https://fortel.com.br/produtos/detalhes-produtos/cortadora-metalografica-80mm-ou-100mm>>. Acesso em: 29/05/2017.
- DUTCHER, Daniel E.. **Understanding 'rock candy' fracture in steel castings**. Modern Casting, fev. 1999.
- EDMONDS, D. V. **Bainite Structures**. **ASM Handbooks**. Metals Park, Ohio: ASM, 1995. v.9, p.662-667.
- FIGUEIREDO, André et al. **Produção da VALE - 4T16**. Rio de Janeiro: VALE, 2017. 25 p.
- HONEYCOMBE, R. W. K. **A transformação bainítica. Aços – Microestrutura e Propriedades**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian. 1985. P. 155-173.
- MACEDO, M. L. K. et al. **Avaliação mecânica e metalúrgica em trilho ferroviário utilizado em via contínua**. Jornadas SAM – CONAMET – AAS 2001. Porto Alegre, 2001. Disponível em: <<http://www.materiales-sam.org.ar/sitio/biblioteca/posadas/trabajos/0617.pdf>>. Acesso em 21/03/2017.

MAGALHÃES, P. C., 2000. **Contato Roda-Trilho**. In: BRANCO, J. E. S. C.; FERREIRA, R. (Ed.). Tratado de estradas de ferro. Rio de Janeiro, p. 80-111.

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

MCEVILY, Arthur J.. **Brittle and Ductile Fractures. Metal Failures: Mechanisms, Analysis, Prevention**. 2. ed.: John Wiley & Sons, Inc, 2013. Cap. 7, p. 159.

MINÉRIO de Ferro e Pelotas. 2016. Disponível em: <<http://www.vale.com/brasil/pt/business/mining/iron-ore-pellets/Paginas/default.aspx>>. Acesso em: 25/03/2017.

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. Australia, 2004.

O ABC da soldadura por arco: Trinca a quente: Como ocorre e como pode ser impedida. 2016. Disponível em: <http://www.kobelco-welding.jp/portuguese/education-center/abc/ABC_2002-01.html>. Acesso em: 23/03/2017.

O SISTEMA ferroviário brasileiro – Brasília: CNT, 2013.

OFFEREINS, G.A. MUTTON, P.J. **Recent Experiences with the Performance of Aluminothermic Rail Weld under High Axle Loads**. 13th International Rail Track Conference, Camberra, Australia, 2001.

RESULTADOS do 3T16. Rio de Janeiro: MRS Logística, 2016. 11 p.

ROCKWELL Analógico. 2016. Disponível em: <<http://www.equilam.com/produtos.php?id=243>>. Acesso em: 29/05/2017.

ROSA, J. C. S. **Avaliação de Solda Aluminotérmica em ângulo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008.

SALEHI, I. et al. **Multi-axial fatigue analysis of aluminothermic rail welds under high axle load conditions**. International Journal of Fatigue 33, pp. 1324-1336. Australia, 2011.

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

SCHWARTZ, B. Et al, 1993. **ASM Metals Handbook vol. 6. Welding, Soldering and Brazing**. ASM International. p.835-839 e p.110-129.

SERRA fita horizontal manual SM200M 220/380V: TIMEMASTER. Disponível em: <<http://www.fg.com.br/serra-fita-horizontal-manual-sm200m-220-380v/p>>. Acesso em: 29/05/2017.

SOKEI, C. R. et al. **Avaliação da integridade de trilhos ferroviários soldados por caldeamento**. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho: 20º CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2012. Disponível em: <<http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecnica/maprotec/cbecimat2012c.pdf>>. Acesso em 21/03/2017.

VALE firma parceria com a USP e a UERJ para estudar temas de interesse da mineração. 2014. Disponível em: <<http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/vale-firma-parceria-usp-uerj-estudar-temas-interesse-mineracao.aspx>>. Acesso em: 22/03/2017.

VALVES, Edward. **Avoiding Aluminum Nitride Embrittlement in Steel Castings for Valve Components**. Flowserve Corporation, 2003.

WTIA – WELDING TECHNOLOGY INSTITUTE OF AUSTRALIA. **TGN-R-04 Aluminothermic Weld Defects**. Australia, 2015. Disponível em: <<http://wtia.com.au/wp-content/uploads/2015/02/TGN-R-04-Aluminothermic-weld-defects.pdf>>. Acesso em 25/03/2017.

7 ANEXO 1 – TERMO DE AUTENTICIDADE



UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA

Termo de Declaração de Autenticidade de Autoria

Declaro, sob as penas da lei e para os devidos fins, junto à Universidade Federal de Juiz de Fora, que meu Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica é original, de minha única e exclusiva autoria. E não se trata de cópia integral ou parcial de textos e trabalhos de autoria de outrem, seja em formato de papel, eletrônico, digital, áudio-visual ou qualquer outro meio.

Declaro ainda ter total conhecimento e compreensão do que é considerado plágio, não apenas a cópia integral do trabalho, mas também de parte dele, inclusive de artigos e/ou parágrafos, sem citação do autor ou de sua fonte.

Declaro, por fim, ter total conhecimento e compreensão das punições decorrentes da prática de plágio, através das sanções civis previstas na lei do direito autoral¹ e criminais previstas no Código Penal², além das cominações administrativas e acadêmicas que poderão resultar em reprovação no Trabalho de Conclusão de Curso.

Juiz de Fora, ____ de _____ de 20__.

NOME LEGÍVEL DO ALUNO (A)

Matrícula

ASSINATURA

CPF

¹ LEI N° 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998. Altera, atualiza e consolida a legislação sobre direitos autorais e dá outras providências.

² Art. 184. Violar direitos de autor e os que lhe são conexos: Pena - detenção, de 3 (três) meses a 1 (um) ano, ou multa.