

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

BEATRIZ MIRANDA BOUZAN

**EFEITO DAS VARIÁVEIS DE PROCESSO NA QUALIDADE DE SOLDAS
ALUMINOTÉRMICAS EM TRILHOS FERROVIÁRIOS**

JUIZ DE FORA
2016

BEATRIZ MIRANDA BOUZAN

**EFEITO DAS VARIÁVEIS DE PROCESSO NA QUALIDADE DE SOLDAS
ALUMINOTÉRMICAS EM TRILHOS FERROVIÁRIOS**

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

Parte integrante do Projeto da Cátedra Roda Trilho: Caracterização das soldas e regiões afetadas pela solda dos diversos tipos de trilhos empregados pela VALE S. A. e elaboração de um modelo para predizer propriedades desejadas na região da solda.

Orientadores: Doutor em Engenharia Mecânica. Moisés Luiz Lagares Junior
Doutor em Engenharia Mecânica. Luiz Henrique Dias Alves
Doutor em Engenharia de Produção, Roberto Malheiros Moreira Filho

JUIZ DE FORA
2016

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Bouzan, Beatriz Miranda.

Efeito das variáveis de processo na qualidade de soldas aluminotérmicas em trilhos ferroviários / Beatriz Miranda Bouzan. -- 2016.

86 f. : il.

Orientador: Lagares Junior Moisés Luiz

Coorientador: Luiz Henrique Dias Alves

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2016.

1. solda aluminotérmica. 2. defeito de soldagem. 3. planejamento de experimentos. I. Moisés Luiz, Lagares Junior, orient. II. Alves, Luiz Henrique Dias, coorient. III. Título.

BEATRIZ MIRANDA BOUZAN

**EFEITO DAS VARIÁVEIS DE PROCESSO NA QUALIDADE DE SOLDAS
ALUMINOTÉRMICAS EM TRILHOS FERROVIÁRIOS**

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

Aprovado em 28 de novembro de 2016.

BANCA EXAMINADORA

Doutor em Engenharia Mecânica, Moisés Luiz Lagares Junior
Universidade Federal de Uberlândia, UFU, Brasil

Doutor em Engenharia Mecânica, Luiz Henrique Dias Alves
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, Brasil

Doutor em Engenharia de Produção, Roberto Malheiros Moreira Filho
Universidade Federal Fluminense, UFF, Brasil

AGRADECIMENTOS

Agradeço à VALE S.A. pela oportunidade dada a UFJF de participar do Projeto CÁTEDRA RODA TRILHO, e aos Engenheiros Aldo Machado, Edilson Jun Kina e ao Prof. Dr. Amilton Sinatora, coordenadores do projeto na VALE S.A. pelo apoio prestado à nossa equipe do projeto, e também ao Engenheiro Ricardo de Souza pelo inestimado apoio e por sua decisiva participação na coordenação dos Experimentos, ao Senhor Raimundo Baldez, responsável técnico pelo ultrassom por suas orientações e acompanhamento da qualidade das soldas experimentadas, ao José Ribamar Santos e Jorge Gama pelas orientações, e a toda equipe da VALE - EFC responsável pela execução dos experimentos, ponto principal desse estudo.

Este trabalho foi entregue à minha responsabilidade devido à oportunidade concedida pelos orientadores deste estudo, professores Moisés Lagares e Luiz Alves, juntamente com a orientação em estatística do professor Roberto Malheiros, os quais eu agradeço o apoio, incentivo e orientação que recebi, assim como o privilégio de participar deste projeto, que levarei para minha vida acadêmica e profissional. Agradeço também o apoio e incentivo da minha família. Meus pais, Mônica e André, por entenderem a importância deste estudo e me permitirem o tempo de dedicação e conhecimento que foi necessário. Meu irmão Pedro, também graduando em Engenharia de Produção, por me auxiliar quando eu não reunia os conhecimentos necessários para continuar. E finalmente, meus tios Renato e Raquel Barraca, coparticipantes em toda a minha educação, fiéis torcedores pelo meu sucesso, e responsáveis pelas minhas habilidades em inglês, essenciais neste trabalho. Ao meu tio Renato, um obrigado especial por ser o responsável pelas minhas habilidades com português também.

RESUMO

O presente trabalho é realizado em parceria com a VALE S.A. afim de entender as condições que permitem uma melhor qualidade final de soldas aluminotérmicas em trilhos ferroviários. O objetivo desse estudo é encontrar melhores técnicas para aplicação da solda em condições ambientais e estruturais típicas do território brasileiro, e assim reduzir os erros, falhas e custos, e ainda, melhorar qualidade, tempo de vida e segurança das soldas e do processo de soldagem. Para isso, é apresentado nesse trabalho experimentos em trilhos realizados na Estrada de Ferro Carajás, de forma controlada e aplicando planejamento de experimentos via fatorial completo, variando três condições de entrada com duas réplicas: tempo de pré-aquecimento, *gap* entre os trilhos, e carbono equivalente do trilho empregado. Após coleta de dados e, posteriormente, tratamento destes usando métodos estatísticos e literaturas, um primeiro esboço do comportamento da solda aluminotérmica foi desenhado, podendo avaliar o procedimento utilizado, dadas as variações controladas no experimento *in loco*.

Palavras-chave: solda aluminotérmica; defeito de soldagem; planejamento de experimentos.

ABSTRACT

The present work is carried out in partnership with VALE S.A. in order to understand the conditions for a better final quality of aluminothermic welds in railroad tracks. The objective of this study is to disclose better techniques for the application of weld under typical environmental and structural conditions of the Brazilian territory, as well as for minimizing errors, failures and costs, and to improve quality, durability and safety of welds and its process. For this, experiments on rails carried out in the Carajás Railroad are presented in this study, in a controlled way and applying experiment planning via complete factorial, varying three input factors with two replicates: preheating duration, interval between the rails and equivalent carbon of the rail employed. After data collection and later treatments using statistical methods and literature, a first outline of the behavior of the aluminothermic weld was designed, turn possible to evaluate the procedure used, given as controlled variation of the factors was done in the experiments in loco.

Keywords: thermit weld; weld defects; design of experiments.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema da infraestrutura que constitui a via permanente.....	21
Figura 2: Esquema da infraestrutura de via permanente.	22
Figura 3: Estruturas cristalinas; (a) Austenita (CFC). (b) Ferrita (CCC). (c) Martensita (TCC)	23
Figura 4: Exemplos de tipos de perfil de trilhos.....	26
Figura 5: Esquemática do perfil de trilho.	26
Figura 6: Exemplos de tipos de fixação de trilhos.	27
Figura 7: Imagem ilustrativa de trilhos unidos por tala de junção.	28
Figura 8: Imagem ilustrativa de trilhos unidos por solda.	29
Figura 9: Exemplo de kit para solda aluminotérmica, fornecedor Railtech.	31
Figura 10: Grampeamento e alinhamento do trilho.....	33
Figura 11: Parte inferior do molde fixada e lixamento das partes laterais para adaptação ao trilho.	33
Figura 12: Molde montado e fixado por cinta metálica.	34
Figura 13: Vedação do molde com pasta refratária.	34
Figura 14: Sistema de apoio e maçarico aquecendo o interior do molde.	35
Figura 15: Mistura Thermit® pegando fogo dentro do cadinho montado acima do molde.	35
Figura 16: Processo de solda aluminotérmica em trilhos.	36
Figura 17: Esquema ilustrativo da separação da escória e do aço na solda.	37
Figura 18: Caracterização metalográfica de uma solda aluminotérmica - (a) Macroestrutura; (b) Região de solda. (c) Região limite da solda. (d) Região termicamente afetada pela solda. (e) Região não afetada, trilho intacto.	38
Figura 19: Exemplo de equipamento de corte de molde.	39
Figura 20: Exemplo de esmerilhadora manual.	39
Figura 21: (a) Fratura straight break em solda aluminotérmica, iniciada no patim; e (b) fratura horizontal split web iniciada na região da alma do trilho.....	40
Figura 22: Solda com forte porosidade.....	42
Figura 23: Fractografia ilustrando inclusões de escória.	43
Figura 24: Fratura em trilho com rechupe.	43
Figura 25: Exemplo de lack of fusion na região do patim.	44
Figura 26: Imagem mostrando em (A) presença de cold lap e em (B) e a ausência de cold lap.	44

Figura 27: Amostras de rebarba da área do jito.....	47
Figura 28: Equipamento de ultrassom manual.	52
Figura 29: Gráfico de desvio da onda do ultrassom. (a) Desvio da onda na superfície do trilho. (b) e (c) Desvios da onda indicando defeito interno.....	52
Figura 30: Ensaio de ultrassom da amostra S02.....	56
Figura 31: Ensaio de ultrassom da amostra S04.....	57
Figura 32: Evidência de defeito visual na amostra S06.	58
Figura 33: Imagem ampliada da evidência de defeito visual na amostra S06.....	58
Figura 34: Ensaio de ultrassom da amostra S06.....	59
Figura 35: Ensaio de ultrassom da amostra S07.....	59
Figura 36: Ensaio de ultrassom da amostra S09.....	60
Figura 37: Evidência de defeito visual na amostra S10.	61
Figura 39: Ensaio de ultrassom da amostra RS12.	63
Figura 40: Ensaio de ultrassom da amostra S13.....	64
Figura 41: Ensaio de ultrassom da amostra S15.....	65
Figura 42: Análise de Regressão Fatorial para Defeito Visual.	69
Figura 43: Resultado de Regressão Fatorial para Defeito Visual.....	70
Figura 44: Análise de Regressão Fatorial para Defeito Interno.	72
Figura 45: Resultado de Regressão Fatorial para Defeito Interno.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química de trilho de qualidade corrente, norma NBR 7590.	24
Tabela 2: Composição química de trilho de qualidade especial, norma NBR 7590.	24
Tabela 3: Composição química de trilho, norma ASTM-A-1 e AREA.	24
Tabela 4: Composição química de trilho, norma UIC-860-0.	25
Tabela 5: Classificação dos fatores e níveis	48
Tabela 6: Planejamento de Experimentos	49
Tabela 7: Cronograma da 1ª etapa dos experimentos.....	51
Tabela 8: Cronograma da 2ª etapa dos experimentos.....	51
Tabela 9: Resultado de análise química via espectrômetro	54
Tabela 10: Matriz de Resultados	66
Tabela 11: Matriz dos resultados - Atribuindo saída binária 0/1	67
Tabela 12: Efeitos dos fatores	67

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas;
Al - Elemento Químico Alumínio;
CWR - *Continuous Welded Rails*;
C - Elemento Químico Carbono;
°C - Unidade de Medida de Temperatura (Graus Celsius);
Co - Elemento Químico Cobalto;
Cr - Elemento Químico Cromo;
Cu - Elemento Químico Cobre;
DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes;
Fe - Elemento Químico Ferro;
HB - *Hardness Brinell*;
IHHA - *International Heavy Haul Association*
IWT - *International Institute of Welding*;
Kcal - Unidade de Medida de Energia;
LOF - *Lack of Fusion*;
Mn - Elemento Químico Manganês;
Mo - Elemento Químico Molibdênio;
m - Unidade de Medida de Comprimento
Nb - Elemento Químico Níbio;
Ni - Elemento Químico Níquel;
O - Elemento Químico Oxigênio;
S - Elemento Químico Enxofre;
Sn - Elemento Químico Estanho;
Si - Elemento Químico Silício;
Ti - Elemento Químico Titânio;
TLS - Trilhos Longos Soldados;
UFJF - Universidade Federal de Juiz de Fora
USP - Universidade de São Paulo;
V - Elemento Químico Vanádio;
W - Elemento Químico Tungstênio;
WTIA - *Welding Technology Institute of Australia*;
ZAC - Zona Afetada pelo Calor.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	15
1.2 JUSTIFICATIVA	15
1.3 ESCOPO DO TRABALHO.....	16
1.4 ELABORAÇÃO DOS OBJETIVOS	17
1.5 DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA.....	18
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	20
2.1 A VIA PERMANENTE	21
2.2 OS TRILHOS	22
2.2.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA E TRATAMENTOS.....	23
2.2.2 CARBONO EQUIVALENTE	25
2.2.3 GEOMETRIA.....	26
2.2.4 INSTALAÇÃO OU SUBSTITUIÇÃO DOS TRILHOS NA VIA PERMANENTE	27
2.3 SOLDA ALUMINOTÉRMICA.....	29
2.3.1 A REAÇÃO QUÍMICA	29
2.3.2 EQUIPAMENTOS E INSUMOS.....	31
2.3.3 PREPARAÇÃO, MONTAGEM E AQUECIMENTO	32
2.3.4 PROCESSO DA SOLDA.....	35
2.3.5 ACABAMENTO DA SOLDA.....	38
2.3.6 DEFEITOS E FALHAS EM SOLDAS ALUMINOTÉRMICAS	40
2.4 DOE – PLANEJAMENTO FATORIAL.....	45
2.4.1 FATORIAL COMPLETO	45
3. EXPERIMENTOS COM SOLDAS ALUMINOTÉRMICAS	47
3.1 ANÁLISE QUÍMICA DO JITO	47
3.2 DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE EXPERIMENTAÇÃO	48
3.2.1 DESCRIÇÃO DAS VARIÁVEIS A SEREM ESTUDADAS	49

3.2.2	DISTRIBUIÇÃO DOS EXPERIMENTOS	50
3.2.3	MEDIÇÃO DOS RESULTADOS	51
4.	RESULTADOS.....	54
4.1	RESULTADOS DA ANÁLISE QUÍMICA	54
4.2	RESULTADOS ALCANÇADOS NOS EXPERIMENTOS	55
4.3	RESULTADOS DA ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS EXPERIMENTOS	66
4.3.1	REGRESSÃO FATORIAL PARA DEFEITO VISUAL.....	69
4.3.2	REGRESSÃO FATORIAL PARA DEFEITO INTERNO	71
5.	CONCLUSÕES	75
	REFERÊNCIAS.....	77
	ANEXO A – CARACTERIZAÇÃO DOS TRILHOS SEGUNDO DNIT	81
	ANEXO B – TERMO DE AUTENTICIDADE.....	87

1. INTRODUÇÃO

Desde 2014 a empresa VALE S.A. e a Universidade de São Paulo – USP (Departamento de Engenharia Mecânica/Laboratório de Fenômenos de Superfície – LFS) vêm ampliando um projeto chamado Cátedra Roda-Trilho, que visa interiorizar no Brasil o conhecimento sobre o sistema roda-trilho. Esse conhecimento se resume no melhor entendimento dos processos empregados e dos materiais envolvidos no tribo-sistema roda-trilho, no desenvolvimento de novos materiais e desenvolvimento de novos processos, na gestão da manutenção e controle dos ativos e na segurança operacional.

A Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF ingressou nesse projeto com a proposta “Caracterização e modelagem estatística preditiva das soldas e regiões afetadas pela solda de trilhos empregados pela VALE”, que se dedica a estudar os tipos de solda empregados nas ferrovias da empresa VALE e, por fim, construir um modelo matemático capaz de definir quais condições devem ser atendidas para que a solda a ser realizada tenha as características desejadas. O projeto tem prazo de 30 meses e foi iniciado em maio de 2016. Este trabalho é parte dos entregáveis parciais propostos no projeto.

O projeto engloba o estudo e a caracterização de dois tipos diferentes de solda: solda por centelhamento e solda aluminotérmica. Por uma questão de delimitação para um trabalho de conclusão de curso este trabalho se destina, exclusivamente, à caracterização das soldas realizadas pelo processo aluminotérmico – as quais recebem o nome de solda aluminotérmica, solda Thermit ou Thermit® – e regiões afetadas por ela, além de analisar as condições de falhas e defeitos nessas regiões gerados durante o processo de soldagem.

A solda Thermit®, inventada em 1898 e patenteada por Hans Goldschmidt em 1903 (data de publicação) pela empresa Goldschmidt AG, na Alemanha, é um processo de solda por fundição de material adicional através de uma reação exotérmica autossustentada com pó de alumínio puro como reagente (patente US 729573 A).

Por se tratar de um processo de reação química sem restrições elevadas para temperatura e pressão para ignição e não necessitar de qualquer alimentação de energia externa é um processo muito versátil e portátil, e pode ser empregado em diversos casos, como solda de cabos elétricos ou solda de componentes de maquinários fabris já instalados, por exemplo. Este trabalho destinou-se a estudar exclusivamente seu emprego na solda de trilhos na via permanente em ambiente externo.

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Como citado anteriormente na introdução do Capítulo 1, este trabalho foi uma entrega parcial do projeto Cátedra Roda-Trilho, sob responsabilidade da UFJF. E por uma questão de delimitação para um trabalho de conclusão de curso este trabalho se destinou a descrever a caracterização das soldas aluminotérmicas e das regiões afetadas por ela, e analisar as condições de falha e defeitos nessas regiões geradas durante o processo de soldagem.

O estudo foi baseado em experimentos realizados na empresa VALE, na área do Estaleiro de Soldas da Estrada de Ferro Carajás – EFC, em São Luís/MA. Os experimentos foram acompanhados pela equipe responsável pelo projeto na UFJF, com apoio das equipes do estaleiro de soldas e da manutenção de via do Terminal Ferroviário de Ponta da Madeira – TFPM.

Como parte integrante de um projeto destinado à empresa VALE, os experimentos de solda foram limitados pelos fornecedores tanto do kit de solda (insumos e equipamentos necessários a execução da solda) como dos trilhos empregados nos experimentos utilizados pela empresa. O estudo também foi limitado à expertise e ao treinamento da equipe que foi designada para executar os experimentos, além da limitação na utilização dos equipamentos da empresa. Ou seja, este trabalho foi limitado aos materiais, equipamentos, procedimentos e processos adotados nas soldas realizadas na VALE, mais especificamente na região da EFC.

1.2 JUSTIFICATIVA

Este trabalho foi parte dos entregáveis parciais propostos no projeto “Caracterização e modelagem estatística preditiva das soldas e regiões afetadas pela solda de trilhos empregados pela VALE”, ligado ao projeto Cátedra Roda-Trilho, e apresentado ao Departamento do Instituto Tecnológico Vale - DITV, em 01 de agosto de 2015. O projeto tem por objetivo estudar os processos de soldagem dos diversos trilhos empregados para o *heavy haul* na empresa VALE S.A.. Este trabalho focou na caracterização das juntas soldadas pelo processo de aluminotermia e no impacto gerado pelas variáveis cabíveis do processo na qualidade final da solda. O resultado final desejado para o projeto é propor um modelo matemático que será capaz de prever os níveis que as principais variáveis do processo devem assumir para que se obtenham as propriedades desejadas da solda.

Este trabalho e o projeto se justificam pela pouca literatura existente – brasileira ou estrangeira – sobre o estudo do processo de solda aluminotérmica e pela forte importância de que a região de solda possua a melhor qualidade possível, visto que é a região com maior tendência para defeitos e fraturas em vias de TLS (trilhos longos soldados) devido a falhas e defeitos nas soldas ou descontinuidades das propriedades mecânicas do trilho soldado (LAWRENCE *et al.*, 2014).

A qualidade da solda interfere diretamente no desempenho operacional da ferrovia. Com o aumento da carga por eixo e da utilização esses processos de desgaste e fratura tendem a se agravar. Dessa forma torna-se fundamental essa caracterização, que dará subsídios teóricos e práticos para um melhor ajuste e controle dos processos de soldagem empregados.

1.3 ESCOPO DO TRABALHO

Este trabalho busca responder a três perguntas:

1. O procedimento determinado pelos fornecedores dos equipamentos e insumos da solda Thermite e usado pela VALE S.A. garante uma solda de qualidade?
2. Quais são os níveis para as variáveis de entrada que compõem o processo da solda Thermite, que serão aqui estudadas, que garantem uma maior probabilidade de obtenção de solda sem defeitos ou falhas?
3. Qual a relação entre cada variável de entrada e a probabilidade de ocorrência de falha e/ou defeito?

Para responder às questões propostas, toda a literatura sobre o assunto encontrada pelos integrantes do projeto foi reunida e discutida. Após todo o conhecimento técnico sobre o assunto ser disseminado na equipe do projeto, foram então realizados experimentos em conjunto com a empresa VALE, seguindo o procedimento proposto pelo fornecedor do kit de solda e adaptado pela VALE.

Este trabalho se propôs a reunir todo o conhecimento sobre o procedimento da solda e seus impactos sobre a estrutura da via permanente, assim como agregar a esse conhecimento os resultados primários dos experimentos a serem realizados; esses resultados focarão na probabilidade de existência ou não de defeitos nas soldas-testes, pois independentemente da qualidade das características mecânicas e da microestrutura final da solda, se ela já possuir defeito interno ou superficial “de nascença”, seu único futuro possível será a fratura do trilho soldado.

Os resultados dos experimentos, após análise de existência ou não de defeito na solda recém-executada, foram reunidos e estudados de acordo com os preceitos de planejamento de experimentos via fatorial completo. Assim, da análise dos experimentos espera-se uma maior compreensão sobre os impactos das variáveis de entrada sobre a condição final da solda e um primeiro levantamento sobre quais condições são necessárias para se reduzir a probabilidade de defeitos.

Ao final, espera-se que este trabalho, como parte integrante de um projeto maior, sirva como uma primeira base de dados analisados para a continuidade do projeto de “Caracterização e modelagem estatística preditiva das soldas e regiões afetadas pela solda de trilhos empregados pela VALE”, que tem como objetivo a construção de um modelo matemático que será capaz de prever os níveis que as principais variáveis do processo devem assumir para que se obtenham as propriedades da solda desejadas.

Como há pouca literatura, nacional ou internacional, disponibilizada sobre o assunto, este trabalho também teve a finalidade de se tornar uma literatura orientadora (referência bibliográfica) para a continuidade do projeto, reunindo as informações mais relevantes sobre o assunto. Como a qualidade da solda interfere diretamente no desempenho operacional da ferrovia e em razão do aumento da carga por eixo e da utilização os processos de desgaste e fratura tendem a se agravar, e dessa forma torna-se fundamental esta caracterização da região soldada e dos processos da solda, a qual dará subsídios teóricos e práticos para um melhor ajuste e controle dos processos de soldagem empregados.

1.4 ELABORAÇÃO DOS OBJETIVOS

Objetivo Geral: através do planejamento de experimentos e do estudo estatístico baseado no modelo de planejamento de experimentos via fatorial completo, determinar quais são os níveis para cada variável de entrada que compõe o processo da solda Thermite que garante uma solda com menor probabilidade de defeitos ou falhas.

Objetivos Específicos:

- Reunir as informações críticas sobre o processo de solda aluminotérmica;
- Analisar e discutir a qualidade da solda utilizando o procedimento padrão determinado pelos fornecedores da solda;
- Apontar melhorias corretivas sobre os procedimentos hoje utilizados em campo para aumentar a qualidade da solda;

- Gerar uma base de dados, proveniente dos experimentos, que servirá para a construção do modelo matemático que é o objetivo final do projeto.

1.5 DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA

Este trabalho foi construído através de quatro etapas: revisão bibliográfica, estudo sobre os procedimentos adotados pela VALE S.A., experimentação, análise dos corpos de prova e dos resultados.

Na etapa de revisão bibliográfica foram usadas as metodologias de pesquisa exploratória e pesquisa bibliográfica e documental. Isso possibilitou um levantamento de processos e informações concretas utilizados atualmente para definição do processo da solda aluminotérmica, assim como do processo determinado pelo fornecedor do kit de solda aqui estudado.

Nas etapas de experimentação e análise de experimentos foram usadas as metodologias de planejamento de experimentos, levantamento com fornecedores de equipamentos e insumos da solda, e na análise dos experimentos foram usadas as metodologias de pesquisa descritiva e explicativa, assim determinando e explicando todas as variáveis de entrada da solda aluminotérmica e sua relação com a qualidade final da solda.

Mais precisamente, os resultados dos experimentos foram analisados via metodologia estatística de fatorial completo, ou seja, foram analisados os efeitos no resultado final das soldas de acordo com a variação dos fatores de entrada, sem redução no número de experimentos necessários, e um primeiro esboço de relação entre as variáveis e o resultado final foi delimitado utilizando ferramentas estatísticas, como Análise de Variância em modelos de DOE – *Design of Experiments* – via modelo fatorial completo e adequação a modelo matemático, usando funções do programa MiniTab 17.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O Capítulo 1 tem por finalidade determinar o planejamento sobre o qual este trabalho foi desenvolvido, situando-o no espaço-tempo, argumentando sua importância e também delimitando sua abordagem, além de apresentar a metodologia com a qual ele foi construído.

O Capítulo 2 – Revisão da Literatura – destina-se a levantar o estado da arte sobre todos os assuntos em que este trabalho está envolvido, em especial os processos de soldas

aluminotérmicas, sendo dividido em quatro Subcapítulos. O Subcapítulo 2.1 detalha os componentes da via permanente, também conhecida como estrada de ferro ou ferrovia, e tem como finalidade explicar a função de cada componente em relação ao componente que irá sofrer a solda: o trilho.

No Subcapítulo 2.2 o trilho é caracterizado quanto à sua composição de material, sua geometria e propriedades mecânicas. O mesmo Subcapítulo ainda resume como o trilho é instalado na via permanente.

Em seguida, o Subcapítulo 2.3 caracteriza a solda aluminotérmica, aqui delimitada apenas no emprego de solda de trilhos ferroviários de aço, e também é exposto o processo de soldagem conforme ele foi repassado para a VALE através dos fornecedores de equipamento e insumos da solda. O Subcapítulo termina com um estudo sobre as possíveis falhas na região da solda já estudadas na literatura encontrada.

O último Subcapítulo da Revisão da Literatura aborda os conceitos e teoria por trás dos métodos de DOE e mais precisamente o método de planejamento de experimentos via fatorial completo. Este método será o utilizado para avaliação dos experimentos descritos no Capítulo 3 – Desenvolvimento – e seus resultados apresentados e discutidos no Capítulo 4 – Resultados.

Por fim, no último Capítulo deste trabalho, o Capítulo 5, são discutidas as análises sobre os resultados e exposta uma síntese de tudo que foi aprendido durante a realização deste trabalho. Além disso, neste Capítulo há também uma análise de como o assunto aqui estudado pode evoluir e o que poderia ser adicionado de forma que o estudo seja mais completo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

As ferrovias que buscam avançar no sentido de aumentar a sua capacidade de forma eficiente – transportar maior volume e peso com maior eficiência energética por distâncias longas em terra – estão sempre perseguindo o objetivo de transportar ainda mais volume de carga em menor tempo e maior segurança. Motivada pela expansão da economia da China nos últimos 10 anos, que solicitava do mercado mundial minérios e outras *commodities*, a modalidade ferroviária de carga pesada (*heavy haul*) tem buscado melhorar e inovar, aumentando a carga por eixo transportada. (MAIS, 2005)

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)

Para que a confiabilidade e a operação de linhas férreas de alta velocidade e capacidade se mantenham em patamares competitivos, é indispensável uma boa manutenção regular da via ou a sua completa substituição para evitar que zonas de velocidade restrita (quando há riscos operacionais devido às condições da via) sejam criadas ou, ainda, que aconteçam descarrilamentos decorridos de defeitos ou trincas nos trilhos. A manutenção é uma atividade que demanda um custo muito elevado, por necessitar não só de uma equipe considerável de mão de obra capacitada como também de equipamentos pesados caros, como, por exemplo, socadoras, reguladoras, desguarnecedoras e trens esmerilhadores.

Trabalhos comuns de manutenção envolvem a troca dos dormentes, lubrificação de trilhos e sistemas de fixação, apertar componentes frouxos na via, trocar lastro e sublastro, alinhar trilhos e realizar tratamento dos trilhos já instalados ou substituí-los completamente, ou ainda substituir parte do trilho que esteja trincado ou com defeitos irreversíveis (vide Subcapítulo 2.1 para definição dos itens de via aqui citados).

Na atividade de instalação ou substituição parcial, ou não, dos trilhos atualmente as soldas são os processos mais empregados, e dependendo do resultado a região afetada pela

solda se torna uma região crítica, muito propensa a falhas, defeitos e desgaste. Por esses motivos este Capítulo será dedicado à caracterização da via permanente, de seus componentes, em especial os trilhos, e das soldas aluminotérmicas e regiões afetadas pela solda.

2.1 A VIA PERMANENTE

A via permanente, também chamada no Brasil de “estrada de ferro”, é a infraestrutura sobre a qual os materiais rodantes (locomotivas, vagão e equipamentos de manutenção de via) se locomovem guiados pelos trilhos. Ela é composta pelo solo, por lastro, sublastro, dormentes, trilhos e sistemas de fixação dos trilhos nos dormentes, além dos sistemas de sinalização. A Figura 1, a seguir, esquematiza essa infraestrutura.

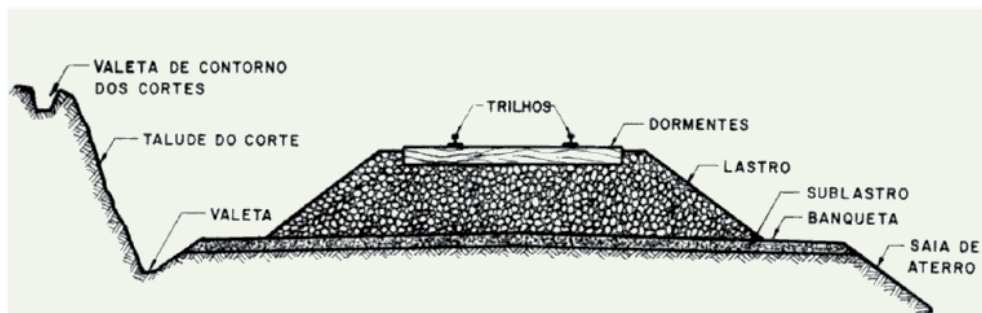


Figura 1: Esquema da infraestrutura que constitui a via permanente.

Fonte: http://vfco.brazilia.jor.br/ferrovias/bitolas/img/corte_Via.gif. Acesso em: <09/07/2016>

O lastro e o sublastro são geralmente compostos de brita ou material macrogranular que permita o escoamento de água proveniente de chuva ou neve, impedindo que o sistema de dormentes e trilhos fique ao alcance de massas consideráveis de água, com o objetivo de diminuir a oxidação dos trilhos (e dos dormentes, dependendo do seu material de composição). Eles também possuem a função de manter os dormentes estáticos, e por isso o lastro preenche inclusive os espaços entre os dormentes, impedindo que os dormentes se desloquem entre si. (MACEDO, 2009)

Os dormentes têm a função de fixar os trilhos, impedindo seu livre movimento, e de servir de apoio, sendo os responsáveis por transmitir as cargas provenientes da passagem de trens para o lastro e o sublastro até o solo, assim distribuindo as cargas por uma área maior. Os dormentes podem ser de madeira, cimento, ligas metálicas (principalmente o aço), polímeros ou ainda compósitos. (MACEDO, 2009)

Os trilhos, que no Subcapítulo adiante serão estudados com mais detalhamento, são estruturas metálicas longas com a função de guiar os rodéis dos materiais rodantes, e é onde a roda desses equipamentos de fato entra em contato com a via permanente. A distância entre os trilhos, chamada de bitola, deve ser fixa e constante. Caso essa distância não esteja adequada ou varie, o contato roda-trilho fica comprometido, podendo ocasionar o descarrilamento de material rodante, que é quando o material rodante “sai” do trilho, perdendo sua superfície de rolamento e conseqüentemente sua trajetória de deslocamento. (MACEDO, 2009)

O esquema apresentado na Figura 2, a seguir, ilustra de forma mais realista essas estruturas aqui citadas.

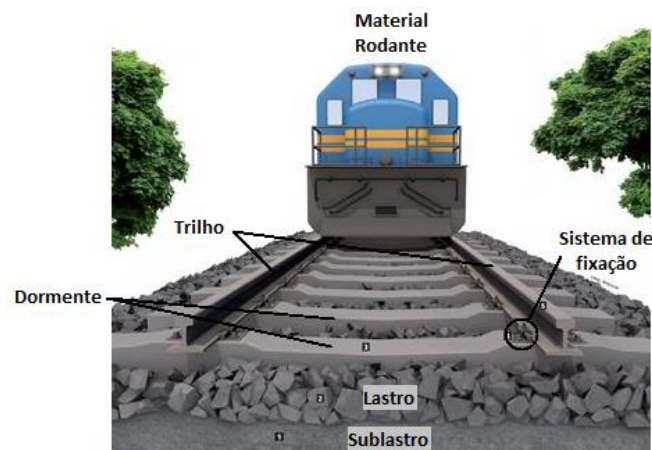


Figura 2: Esquema da infraestrutura de via permanente.

Fonte: <http://infraestruturaurbana.pini.com.br/solucoes-tecnicas/29/imagens/i389969.jpg>. Acesso em: <09/07/2016>

2.2 OS TRILHOS

Dependendo do tipo de serviço a ser empregado, o trilho – que pode ser comparado a uma viga de aço – pode ter variações de composição química, tratamento químico ou de superfície e de formato e dimensão de seu perfil. Porém, independente do uso, o trilho deve ser capaz de reunir algumas propriedades mecânicas e metalúrgicas básicas, como: (ROLDO,1998)

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

2.2.1 Composição química e tratamentos

Os trilhos são estruturas compostas por aço, e dependendo de seu processo de fabricação a liga pode apresentar variação de microestrutura entre: (COTTRELL, 1975)

- Perlita: mistura eutetóide formada de colônias de lamelas alternadas de carboneto de ferro com estrutura ortorrômbica, chamadas de cementita, com lamelas de ferrita (Ferro α), microestrutura em que os átomos de ferro estão em formação CCC (cubo de corpo centrado);
- Bainita: Mistura eutetóide de ferrita e cementita, que difere da perlita apenas por não intercalar laminarmente a cementita e a ferrita, mas sim composta de placas de cementita precipitadas entre as estruturas de ferrita;
- Martensita: microestrutura em que os átomos de ferro estão em formação TCC (tetragonal de corpo centrado) com carbono supersaturando a célula.

As ilustrações destas estruturas cristalinas são fornecidas na Figura 3, a seguir.

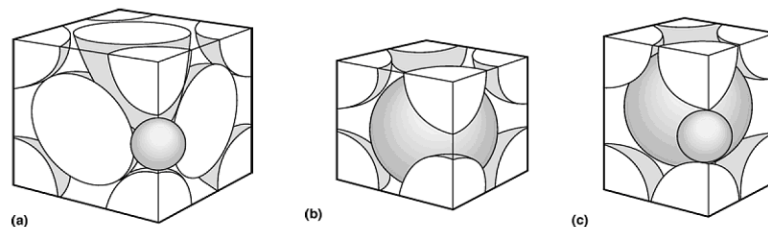


Figura 3: Estruturas cristalinas; (a) Austenita (CFC). (b) Ferrita (CCC). (c) Martensita (TCC)

Fonte: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABOpQAF/caracterizacao-microestrutural-identificacao-das-causas-trincas-aco-astm-a217-wc9-lingoteiras-utilizadas-na-fundicao-zinco?part=2>>. Acesso em 23/07/2016.

As estruturas mais comuns usadas nos aços para trilhos são a perlita fina e a bainita, sendo a primeira de maior empregabilidade. (LONSDALE *et al*, 2015) A estrutura austenita, que é uma microestrutura de uma solução sólida de carbono em ferro γ , ou seja, em formação CFC (cubo de face centrada), também pode ser encontrada, em probabilidade muito baixa, devido a sua instabilidade na temperatura ambiente. Sua presença ocorre em aços de alto teor de carbono, e/ou presença de altos teores de níquel (Ni) e cromo (Cr), elementos capazes de estabilizar essa estrutura. (COTTRELL, 1975)

A composição química da liga, que pode variar de fabricante e empregabilidade de trilho, é descrita a seguir pelas normas brasileira NBR 7590, americana ASTM-A-1 ou AREA e europeia UIC-860-0:

Tabela 1: Composição química de trilho de qualidade corrente, norma NBR 7590.

Qualidade		Composição Química (%)					Característica Mecânica		Código ABNT (NBR 9608)
		C Carbono	Mn Manganês	Si Silício	P (Máx.) Fósforo	S (Máx.) Enxofre	RT (Min.) _{s1}	A (%) Alongamento	
1	A	0,50-0,70	0,60-1,00	0,07-0,35	0,05	0,05	680	10	-
	B	0,40-0,60	0,80-1,25	0,05-0,35	0,05	0,05	680	14	-
2	A	0,62-0,82	0,60-1,10	0,10-0,35	0,05	0,05	780	9	A006
	B	0,55-0,75	1,30-1,70	0,10-0,50	0,05	0,05	780	12	-
3	A	0,60-0,80	0,80-1,30	0,10-0,50	0,05	0,05	880	8	A007
	B	0,55-0,75	1,30-1,70	0,10-0,50	0,05	0,05	880	10	-

Fonte: DNIT, [S/D].

Tabela 2: Composição química de trilho de qualidade especial, norma NBR 7590.

Qualidade		Composição Química (%)						Característica Mecânica		Código ABNT (NBR 9608)	
		C	Mn	Si	P (Máx.)	S	Cr Cromo	Nb Nióbio	RT (Min.)		A (%)
6	a	0,65	0,80	0,30	0,03	0,035	0,70	-	1000	8	-
		0,80	1,30	0,90							
7	a	0,60	0,90	0,50	0,03	0,035	-	0,02	1000	8	P503
		0,80	1,50	1,10							

Fonte: DNIT, [S/D].

Tabela 3: Composição química de trilho, norma ASTM-A-1 e AREA.

Qualidade	Composição Química (%)					Característica Mecânica	
	C	Mn	Si	P (Máx.)	S (Máx.)	RT (Min.)	A (%)
30 a 40 kg/m	0,55 - 0,68	0,60 - 0,90	0,10 - 0,25	0,04	0,05	833 - 980	12,5
40 a 45 kg/m	0,61 - 0,77	0,60 - 0,90	0,10 - 0,25	0,04	0,05	833 - 980	12,5
45 a 60 kg/m	0,67 - 0,80	0,70 - 1,00	0,10 - 0,25	0,04	0,05	833 - 980	12,5
Acima de 60 kg/m	0,69 - 0,82	0,70 - 1,00	0,10 - 0,25	0,04	0,05	833 - 980	12,5

Fonte: DNIT, [S/D].

Tabela 4: Composição química de trilho, norma UIC-860-0.

Qualidade	Composição Química (%)					Característica Mecânica	
	C	Mn	Si	P (Máx.)	S (Máx.)	RT (Min.)	A (%)
Normal	0,37 – 0,60	0,70 – 1,20	0,35 máx.	0,04 – 0,08	0,50 – 0,80	686 - 813	14
A	0,65 – 0,75	0,80 – 1,30	0,35 máx.	0,05 máx.	0,05 máx.	882	10
B	0,50 – 0,70	1,30 – 1,70	0,35 máx.	0,05 máx.	0,05 máx.	882	10
C	0,45 – 0,65	1,70 – 2,00	0,35 máx.	0,05 máx.	0,05 máx.	882	10

Fonte: DNIT, [S/D].

Como citado anteriormente, dependendo do serviço e do tipo de equipamento que trafegará sobre a via permanente poderá haver variações nos tipos de trilhos empregados em cada situação, assim como variação no tipo de composição química do trilho ou na sua geometria.

2.2.2 Carbono Equivalente

O carbono equivalente é um valor numérico que corresponde à contribuição que o elemento carbono e outros componentes de liga possuem na composição química de um aço, fornecendo informação de suscetibilidade de formação de trincas induzidas por hidrogênio em um aço. Esse valor numérico é alcançado através da equação (eq.1) a seguir, desenvolvida pelo IIW – *International Institute of Welding* – que se tornou uma medida comumente aceita para a soldabilidade dos aços. (MACIEL, 2012)

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

Medindo o carbono equivalente é possível ter uma noção da temperabilidade do aço. Isso é importante, pois quanto maior a temperabilidade maior a dureza e mais fácil a formação de trincas. (MACIEL, 2012)

Várias outras fórmulas para o carbono equivalente são usadas, dentre elas uma fórmula desenvolvida no Japão para aços com baixo teor de carbono, em que a quantidade de carbono não passa de aproximadamente 0,11%, e outra semelhante foi desenvolvida por Düren, que também é usada para aços com baixo teor de carbono. (SENAI, 1997) Porém, como este

trabalho enfoca aço para trilhos que possuem teor de carbono de médio a alto, apenas a equação 1 (eq.1) será apresentada, por ser a mais adequada para ser utilizada.

2.2.3 Geometria

Outra característica do trilho que muda dependendo do serviço e do tipo de equipamento que trafegará sobre a via permanente é o seu perfil. A Figura 4, a seguir, ilustra alguns tipos de perfis de trilho.

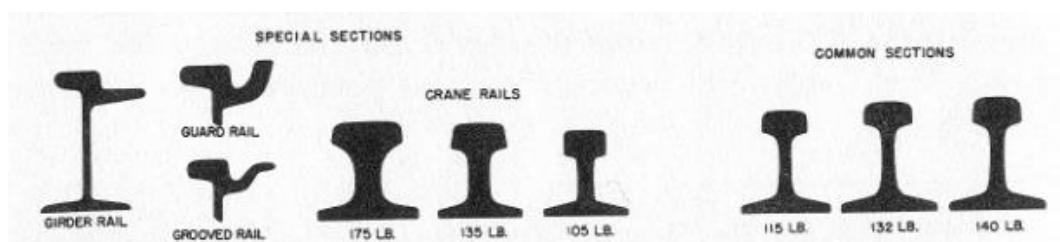


Figura 4: Exemplos de tipos de perfil de trilhos.

Fonte: *Railroad Museum of Pennsylvania* em http://explorepahistory.com/kora/files/1/2/1-2-5F4-25-ExplorePAHistory-a0b9x3-a_349.jpg. Acessado em <04/06/2016>

No Brasil, para o uso de transporte de cargas e pessoas em trens o perfil utilizado é o Vignole, indicado com o perfil 115 LB da Figura 4. Dentro da categoria de trilhos Vignole há vários tipos de trilhos diferentes em suas dimensões e composição – vide Anexo A para exemplos de variações de dimensão de trilhos Vignole –, mas seguindo o formato básico esquematizado pela Figura 5, que divide o perfil do trilho em boleto, alma e patim.

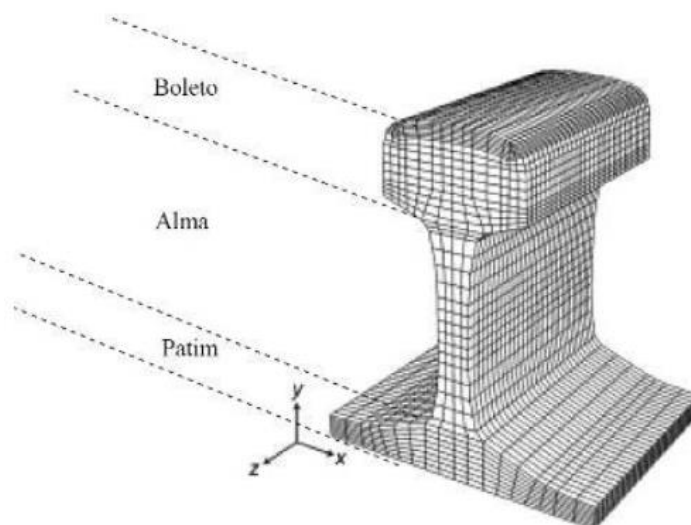


Figura 5: Esquematização do perfil de trilho.
Fonte: SKYTTEBOL, 2005.

A função do boleto é ser a superfície de contato com a roda dos equipamentos que trafegam pela via, e seu formato deve “casar” com o formato da roda, servindo de guia para a movimentação desta. O patim é onde o trilho é fixado nos dormentes, e sua forma achatada confere maior estabilidade e distribuição de carga. Já a alma deve ser mais fina, para conferir possibilidade de acomodação em movimentos fletores, mas deve ser grossa o suficiente para sustentar as cargas a que é submetida.

2.2.4 Instalação ou substituição dos trilhos na via permanente

Como citado anteriormente, os trilhos são fabricados com comprimento entre 12 e 24 m, e para formar a estrutura da via permanente necessita ser fixado nos dormentes e conectado nos trilhos adjacentes para formar a superfície de rolamento dos materiais rodantes. Atualmente são encontrados diversos sistemas de fixação diferentes para os trilhos, e os mais modernos evitam que os trilhos necessitem de cavidades para a passagem de parafusos, pois essas cavidades são acumuladoras de tensões nos trilhos. Seguem alguns exemplos de sistema de fixação na Figura 6.



Figura 6: Exemplos de tipos de fixação de trilhos.

Fonte: <http://www.suyurailway.com/Products.asp>. Acessado em: <09/07/2016>

Em estruturas de via permanente mais antigas os trilhos eram unidos entre si por um par de tala de junção, conforme Figura 7. Esse sistema era usado por ser de fácil e rápida instalação, baixo custo e permitia espaçamento – *gap* – entre os trilhos destinado a compensar a dilatação dos trilhos nas temperaturas mais altas. 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 nessa área da ferrovia, além de obrigar que o trilho tivesse cavidades para que pudesse ser “aparafusado”, 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 por esses *gaps* precisam ser limitadas devido às tensões e aos desgastes, diminuindo a performance da via.



Figura 7: Imagem ilustrativa de trilhos unidos por tala de junção.
Fonte: <http://3.bp.blogspot.com/>. Acessado em: <09/07/2016>

Em 1924 a primeira via formada por trilhos longos contínuos – TLC (*continuous welded rail* – CWR, em inglês) foi construída na Alemanha. Nesse tipo de estrutura os trilhos com comprimento entre 12 e 24 m são unidos por solda, erradicando a formação de *gaps* e todas as suas desvantagens aqui citadas. Atualmente o processo de instalação dos TLCs 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 aluminotermia (*thermite welding*), descrito no Subcapítulo seguinte, formando os trilhos contínuos exemplificados na Figura 8.



Figura 8: Imagem ilustrativa de trilhos unidos por solda.

Fonte: [https://en.wikipedia.org/wiki/Track_\(rail_transport\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Track_(rail_transport)). Acessado em: <09/07/2016>

2.3 SOLDA ALUMINOTÉRMICA

Como citado anteriormente, a solda aluminotérmica, também conhecida como solda Thermit®, inventada em 1898 e patenteada por Hans Goldschmidt em 1903 (data de publicação), pela empresa Goldschmidt AG na Alemanha, é um processo de solda por fundição de material adicional através de uma reação exotérmica autossustentada com pó de alumínio puro como reagente (patente US 729573 A).

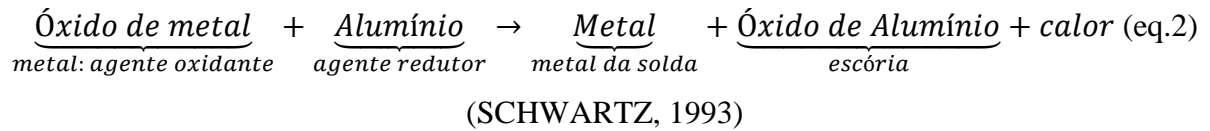
Por se tratar de um processo de reação química sem restrições elevadas para temperatura e pressão para ignição e não necessitar de qualquer alimentação de energia externa, é um processo muito versátil e portátil, e pode ser empregado em diversos casos, como solda de cabos elétricos, componentes de maquinários fabris já instalados e trilhos, por exemplo.

Como uma solda versátil, seu procedimento e a composição química da reação são únicos para cada situação de uso. E como este trabalho se limita a estudar a solda em trilhos, será esse procedimento em especial que será descrito aqui.

2.3.1 A reação química

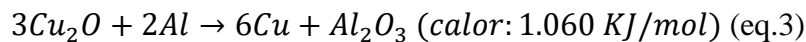
O procedimento da solda, como foi patenteado, descreve uma reação química entre dois reagentes – um óxido de metal da solda e o alumínio no seu estado metálico puro – em temperatura ambiente, ou seja, ambos reagentes no estado sólido. Para uma maior interação entre os reagentes eles são reduzidos a pó ou pequenos grânulos, na ordem de décimos de milímetro de diâmetro. A essa mistura de pó ou grânulos de óxido de metal e alumínio puro foi dado o nome de mistura Thermit® de acordo com a patente US 729573 A.

A reação exotérmica envolvida na solda aluminotérmica pode ser generalizada pela equação:

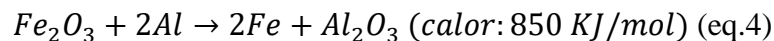


Como a energia de ligação dos átomos no óxido de metal é superior à energia necessária para ligar os átomos de alumínio e oxigênio, para formar o óxido de alumínio essa diferença em energia é liberada em forma de calor. No caso, para a solda aluminotérmica ser efetiva esse calor deve ser suficiente para aquecer e liquefazer o metal que é produto dessa reação, assim formando o material de adição na solda por fundição.

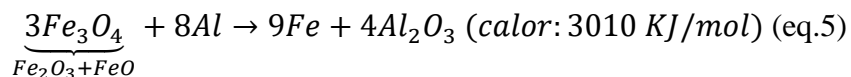
Usando essa equação é possível realizar soldas para diversos fins e de diversos metais. Um exemplo de outro uso comum da solda aluminotérmica é a solda de fios de cobre – usados para transmissão de energia elétrica – com a equação a seguir:



No caso da solda de trilhos, como os materiais base dos trilhos são os componentes do aço, em especial o ferro, a equação mais estável que ocorrerá será a equação com óxido férrico (SCHWARTZ, 1993), descrita a seguir:



Dependendo da pureza da mistura o óxido ferroso também pode estar presente, e parte da reação química será regida pela equação com o tetróxido de triferro, descrita a seguir:



No caso da solda de trilhos o calor liberado nas equações 3 e 4 é suficiente para liquefazer o ferro e elevar a temperatura dos produtos da reação, podendo atingir temperaturas de 3.090°C. Porém, a mistura Thermit® para soldas de trilhos não contém apenas os óxidos de ferro e alumínio, ela possui alguns aditivos, como aço, carbono, manganês e silício, que irão

compor o aço, modificando as propriedades mecânicas da liga para melhor se assemelhar à composição do trilho a ser soldado, além de outros componentes para melhorar ou controlar o processo de fundição. Esses aditivos também absorvem o calor liberado pela reação química e, por isso, servem como reguladores de temperatura, podendo reduzir os 3.090°C para temperaturas na ordem dos 2.480°C, ideais para manter a separação física entre o aço líquido formado e a escória, composta pelo óxido de alumínio e restos da reação (SCHWARTZ, 1993).

2.3.2 Equipamentos e insumos

Os equipamentos e insumos aqui descritos são os utilizados exclusivamente no processo da solda aluminotérmica de trilhos na VALE.

Os equipamentos e insumos componentes do kit de solda utilizado são: cadinho, bandeja externa, molde, pasta refratária e acendedor. A Figura 9, a seguir, ilustra um exemplo de kit de equipamento e insumo fornecido pela Railtech, uma das empresas europeias que produz kit de solda aluminotérmica:



Figura 9: Exemplo de kit para solda aluminotérmica, fornecedor Railtech.
Fonte: RAILTECH, [S/D].

O cadinho, item (a) na Figura 9, é um recipiente com tampa em forma de panela com fundo em formato de funil, e sua constituição pode ser de resina de areia para fundição ou então metálico, dependendo se será descartável ou não, respectivamente. No fundo do formato de funil do cadinho há uma abertura para a futura passagem do metal líquido que fará a soldagem, e essa abertura é vedada por uma chapa fina de aço. Há também uma ou mais aberturas laterais, que servirão para a saída da escória da reação química e serão conectadas com as bandejas externas.

O molde, itens (d) e (e) na Figura 9, composto de resina de areia para fundição, é dividido em três partes: uma metade de molde para cada lado do trilho – item (d) – e um fundo que será posto embaixo do trilho – item (e). Sua função é ser o recipiente da liga metálica líquida proveniente da solda e onde essa liga e o trilho a ser soldado entram em contato, dando forma à solda enquanto ela se solidifica. A composição do molde permite que o mesmo seja lixado no local para atender aos vários tipos e dimensões diferentes de trilho.

Já o acendedor, que pode ser de várias constituições, tem a função de proporcionar tempo para que o operador se afaste do equipamento antes que a reação química se inicie.

Os insumos estão representados pelos itens (b) e (c) da Figura 9. O item (b) é a mistura Thermit® descrita no Subcapítulo 2.3.1. O item (c) é uma substância pastosa, refratária, que servirá para unir as partes do molde e vedar as cavidades entre essas partes, impedindo que o aço líquido saia do molde, além de evitar perda de calor por essas cavidades.

2.3.3 Preparação, montagem e aquecimento

O procedimento a seguir é o descrito pelo fornecedor homologado do kit de solda e adaptado pela VALE.

As extremidades dos trilhos a serem soldados necessitam estar soltas dos dormentes e perfeitamente alinhadas, tanto horizontalmente quanto verticalmente, e com um espaçamento – *gap* – adequado. Por isso os trilhos 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. As extremidades dos trilhos a serem soldados são então limpas, retirando-se a camada de sujeira e oxidação que cobre a superfície geralmente por escova de aço. Após a limpeza os trilhos são então alinhados perfeitamente, usando padrões, como, por exemplo, réguas. Vide a Figura 10, a seguir, para ilustração desta primeira etapa de preparação.



Figura 10: Grampeamento e alinhamento do trilho.
Fonte: Equipe do projeto.

Após esse tratamento e alinhamento das extremidades dos trilhos o molde deve ser instalado envolvendo essas extremidades, e servirá para receber a liga metálica líquida proveniente da solda. O molde possui três partes, como citado no Subcapítulo 2.3.2: uma metade de molde para cada lado do trilho e um fundo que será posto embaixo do trilho. A composição do molde permite que o mesmo seja lixado no local para atender aos vários tipos e dimensões diferentes de trilho, como ilustra a Figura 11.



Figura 11: Parte inferior do molde fixada e lixamento das partes laterais para adaptação ao trilho.
Fonte: Equipe do projeto.

Primeiro a parte do fundo do molde é colocada em posição e seus encaixes são preenchidos com a pasta refratária, e então as partes laterais lixadas do molde são encaixadas tanto nos trilhos quanto na parte do fundo. Após o encaixe do molde no trilho o mesmo é fixado por uma cinta metálica, que o manterá fixo e perfeitamente ajustado ao trilho, vide Figura 12. O seu interior é limpo através de jatos de ar comprimido ou gás, e então a abertura superior é

tampada para evitar a entrada de sujeira. As fendas entre as partes do molde então são preenchidas com o material pastoso refratário, que selará o molde tanto impedindo que metal líquido vaze quanto que o calor escape do molde durante o processo, conforme a Figura 13, na sequência.



Figura 12: Molde montado e fixado por cinta metálica.
Fonte: Equipe do projeto.



Figura 13: Vedação do molde com pasta refratária.
Fonte: Equipe do projeto.

Um sistema de aquecimento do interior do molde é então montado e ligado por tempo predeterminado pelo fornecedor. Ele tem a função de evitar a solidificação imediata da solda quando ela tocar nas partes internas do molde ou no trilho, como também de retirar toda e qualquer umidade do sistema. Alguns tipos de sistema são usados como maçarico e apoios que permitirão ao maçarico ficar fixado e virado para o interior do molde sem a necessidade de presença humana, conforme exemplificado na Figura 14. A temperatura final após o aquecimento depende da potência do sistema de aquecimento e do tempo empregado, e é recomendado que o sistema molde-trilho seja aquecido até 1.000 °C, estimada aproximadamente.



Figura 14: Sistema de apoio e maçarico aquecendo o interior do molde.
Fonte: Equipe do projeto.

2.3.4 Processo da solda

Após o aquecimento o equipamento da solda é montado. Ele é constituído do cadinho, bandeja externa e acendedor (vide Subcapítulo 2.3.2 para descrição desses itens). Em sequência a mistura Thermit® é colocada dentro do cadinho, que é então tampado, evitando que água ou umidade entre em contato com a mistura, e logo em seguida o acendedor é aceso, conforme ilustra a Figura 15.



Figura 15: Mistura Thermit® pegando fogo dentro do cadinho montado acima do molde.
Fonte: Equipe do Projeto.

O esquema do processo no cadinho é ilustrado na Figura 16, onde o processo descrito acima é ilustrado na etapa (a).

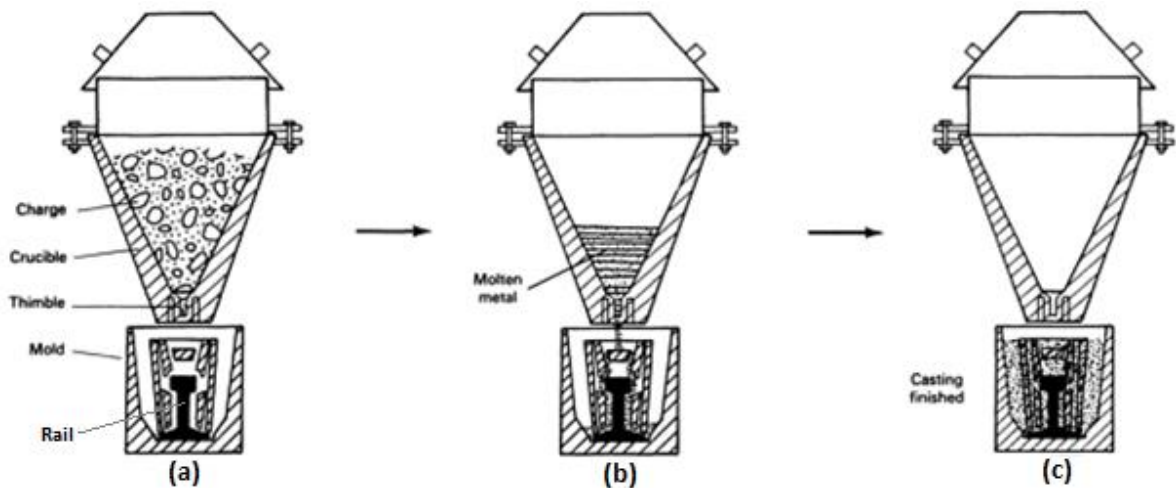


Figura 16: Processo de solda aluminotérmica em trilhos.
Fonte: SCHWARTZ, 1993.

Com a energia absorvida da ignição do acendedor a reação transpõe sua energia de ativação – energia necessária para iniciar as primeiras quebras das ligações químicas dos reagentes, iniciando a reação química – dando sequência à reação exotérmica, capaz de liquefazer os metais componentes da mistura Thermit® e os produtos da reação, dada a sua intensa liberação de calor, formando então aço líquido para a solda e escória que deve ser descartada – etapa (b) da Figura 16. (SCHWARTZ, 1993)

Como citado no Subcapítulo 2.3.1, há uma separação física entre o aço líquido, produto da reação, e a escória. Essa separação se deve ao fato de que o aço líquido é mais denso que a escória – composta basicamente por Al_2O_3 . Por causa dessa separação o aço líquido se acumula no fundo do cadinho. (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, conforme ilustração na Figura 17. (SCHWARTZ, 1993)

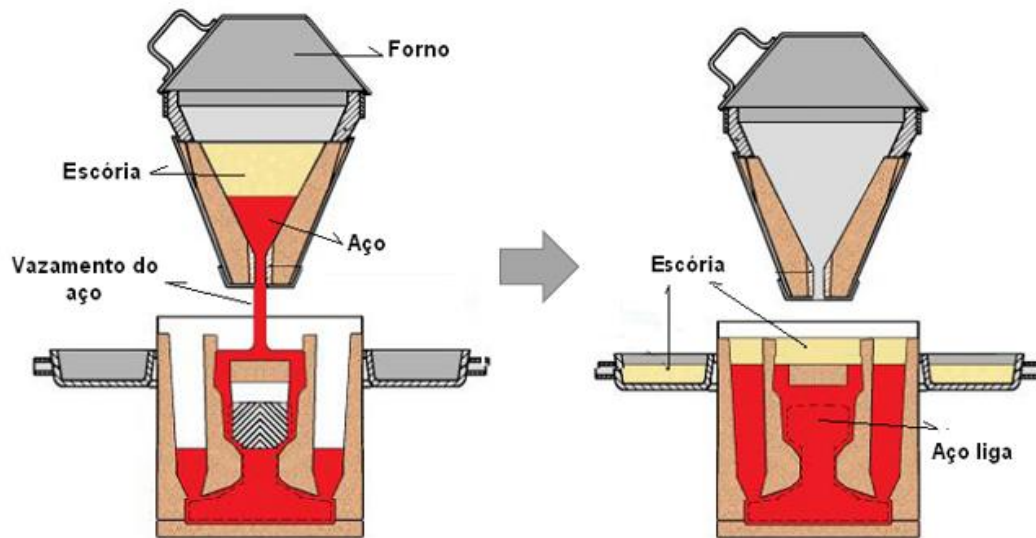


Figura 17: Esquema ilustrativo da separação da escória e do aço na solda.
Fonte: equipe do projeto.

Enquanto o aço líquido preenche o molde ele também entra em contato direto com as extremidades dos trilhos que estão dentro do molde. Esse contato funde parte dessas extremidades, que se unirá ao aço líquido proveniente do cadinho formando então a solda – etapa (c) da Figura 16. Porém, parte da extremidade não entra em fusão, mas é aquecida a temperaturas muito elevadas. Essa área – denominada de “zona termicamente afetada” e representada na Figura 18 – dependendo das condições de temperatura atingida pode ter extensão variável e suas características mecânicas e/ou sua microestrutura afetadas. (SCHWARTZ, 1993)

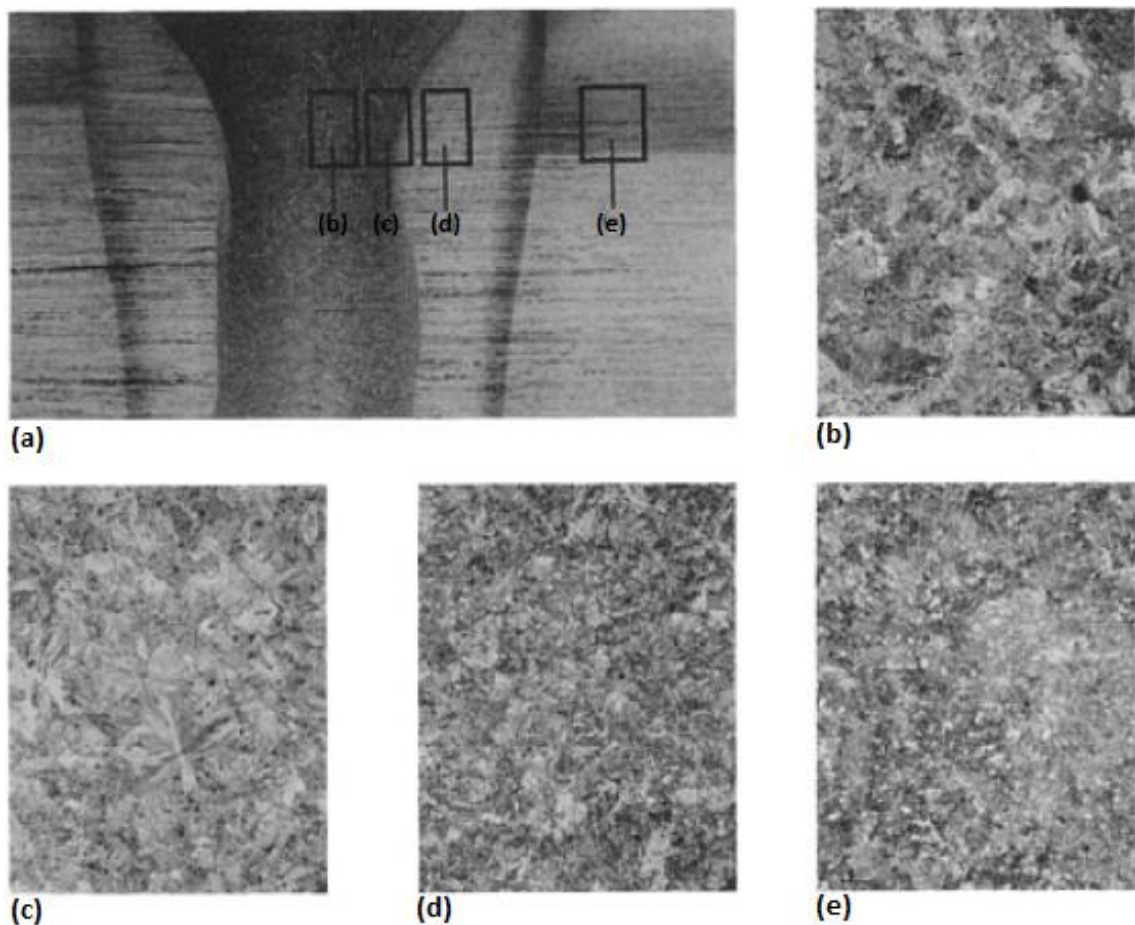


Figura 18: Caracterização metalográfica de uma solda aluminotérmica - (a) Macroestrutura; (b) Região de solda. (c) Região limite da solda. (d) Região termicamente afetada pela solda. (e) Região não afetada, trilho intacto. Fonte: SCHWARTZ, 1993.

A estrutura metalúrgica presente na solda depende da composição química da mistura Thermit®, da composição dos trilhos, da temperatura atingida pela solda e das taxas de resfriamento impostas ao processo. A microestrutura indicada na solda é perlita, que deve apresentar apenas variações granulométricas ao longo das diferentes zonas - ao se caminhar na direção da zona (e) para a (b) na Figura 18, os grãos de metal aumentam de tamanho, isso devido ao aquecimento que facilita que grãos se unam, formando novos grãos maiores – embora sejam permitidas mínimas percentagens de ferrita. (ROSA, 2008)

2.3.5 Acabamento da solda

Passado o tempo determinado pelo fornecedor, suficiente para que o molde seja completamente preenchido com o aço líquido e este já tenha completado sua solidificação, e a escória seja escoada para as bandejas e o sistema como um todo tenha atingido uma temperatura adequada para o trabalho, o cadinho é retirado de cima do molde preenchido e a cinta metálica

é retirada do molde, que é então quebrado até que a solda fique exposta. Esta operação pode ser feita manualmente com marreta ou utilizando equipamento próprio para retirada de rebarba, como na Figura 19, a seguir.



Figura 19: Exemplo de equipamento de corte de molde.
Fonte: RAILTECH, [S/D].

Após a retirada grosseira do molde e da rebarba a solda ainda apresenta restos de rebarbas e do molde na sua constituição, que serão retirados através do esmerilhamento do trilho. Segundo procedimento da MRS Logística em seu site, o esmerilhamento é um processo de “lixamento” do trilho e a esmerilhadora é um equipamento capaz de retirar camadas finas de metal e polir o trilho, para que ele atinja uma superfície plana sem defeitos principalmente na área superficial do boleto, na superfície de rolamento. Segue exemplo de esmerilhadora na Figura 20 a seguir.



Figura 20: Exemplo de esmerilhadora manual.
Fonte: RAILTECH, [S/D].

Por último a solda deve ser inspecionada, tanto visualmente, para detectar defeitos na sua superfície, quanto usando processos de inspeção do seu interior, como ultrassom (vide Subcapítulo 3.2.3).

2.3.6 Defeitos e falhas em soldas aluminotérmicas

As falhas em soldas aluminotérmicas dependem das condições finais da solda, assim como do tráfego e da manutenção da via permanente. As falhas, denominadas fraturas de trilho no meio ferroviário, são “quebras” nos trilhos e podem ocorrer por fadiga ou sobrecarga, e são aceleradas pelos altos carregamentos, principalmente nas vias de *heavy haul*, e também pela existência de defeitos de soldagem. (MUTTON e ALVAREZ, 2004)

Sobre as fraturas de trilhos há basicamente dois tipos: fraturas verticais (*straight break failure*) e fraturas horizontais (*horizontal split web failure*). As fraturas *straight break* são verticais, como indicadas em sua nomenclatura, e mais comumente se originam da região do patim e se propagam até o boleto. As fraturas do tipo *horizontal split web* são horizontais, também como indicadas em sua nomenclatura, e se originam internamente, principalmente da região da alma do trilho, e se propagam horizontalmente até fazerem uma “curva” se propagando até o patim e/ou o boleto. (SALEHI, 2011)

Segue a Figura 21, ilustrando as fraturas vertical e horizontal.



Figura 21: (a) Fratura *straight break* em solda aluminotérmica, iniciada no patim; e (b) fratura *horizontal split web* iniciada na região da alma do trilho.

Fonte: SALEHI, 2011.

As fraturas do tipo *horizontal split web* são consideradas mais severas que as fraturas *straight break*. Isso porque o comprimento de trilho afetado na fratura vertical é menor que

numa fratura horizontal, que pode se estender por vários centímetros de cada lado da solda, e também por ser uma fratura com angulatura mais aberta pode fazer com que as partes separadas do trilho fiquem desniveladas ou desaparelhadas – como é mostrado na Figura 21, item (b) – aumentando significativamente o risco de descarrilamento no ponto fraturado. (SALEHI, 2011)

Essas fraturas, apesar de geralmente serem iniciadas em pontos de defeito da solda, também podem se iniciar na região do boleto, com a formação de trincas de fadiga à medida que o material rodante passa na região da solda. Porém, essas trincas de fadiga na região do boleto são facilmente controláveis através de análises periódicas do trilho por ensaios de ultrassom dinâmico com veículos adaptados com aparelho de ultrassom que, ao passar pela via, pode registrar as trincas encontradas e, posteriormente, uma camada fina da superfície do boleto pode ser retirada através de esmerilhamento ou até pela própria passagem de material rodante. (SKYTTEBOL, 2005)

Independentemente da região do trilho em que as trincas tenham se iniciado, elas surgem a partir de concentradores de tensões internos, como os defeitos de soldagem ou deformações de uso, ou ainda descontinuidades de propriedade mecânica na região afetada pela solda. (SKYTTEBOL, 2005)

Este Subcapítulo consiste na descrição dos defeitos de soldagem que podem ocorrer. Segue breve explicação sobre os tipos de defeitos comumente encontrados nas fraturas de trilho em regiões de solda aluminotérmica.

Porosidade

A porosidade consiste na formação de pequenos “buracos” internos na solda, muito semelhantes aos poros numa pedra-pomes. A umidade é a principal causa desse defeito, uma vez que impede a correta reação da mistura aluminotérmica e pode causar a formação de alguns gases ou mesmo água na forma de vapor. A porosidade pode ainda ser decorrente do material de vedação, que ao entrar em contato com o material líquido de adição da solda pode também formar gases. (SALEHI, 2011)



Figura 22: Solda com forte porosidade.
Fonte: WTIA, 2015.

Black Holes

Black holes são poros isolados que surgem junto ao canal de alimentação da solda (jito). Este tipo de defeito é facilmente observado em inspeção visual, já que ocorre na superfície da solda, na área do jito. O defeito é causado pelo material de vedação, que ao entrar em contato com o material líquido de adição da solda pode formar gases que ficam presos na região. (JULIO, 2008)

Inclusões

As inclusões são definidas como a presença de material não constituinte do aço na solda solidificada. Uma das inclusões mais comuns é a de escória da reação aluminotérmica, um defeito perigoso para a integridade da solda, pois pode nuclear trincas de fadiga. Geralmente esses defeitos ocorrem por falta de limpeza adequada do cadinho (quando multiuso), presença de umidade na porção, falhas no pré-aquecimento da junta ou ainda, má qualidade da porção Thermite. (SALEHI, 2011)

Outro tipo de inclusão é a de areia, que ocorre quando o molde de fundição não foi limpo devidamente. A areia de vedação pode alcançar temperaturas de vitrificação e se incrustar na superfície do trilho. Pode haver inclusão também quando se trata de soldas utilizando trilho desgastado, uma vez que pode haver penetração de areia previamente no trilho. Se a inclusão for superficial o defeito pode ser removido por esmerilhamento. (JULIO, 2008)

A Figura 23. (JULIO, 2008) apresenta a fractografia de uma junta soldada ilustrando a inclusão de escória.

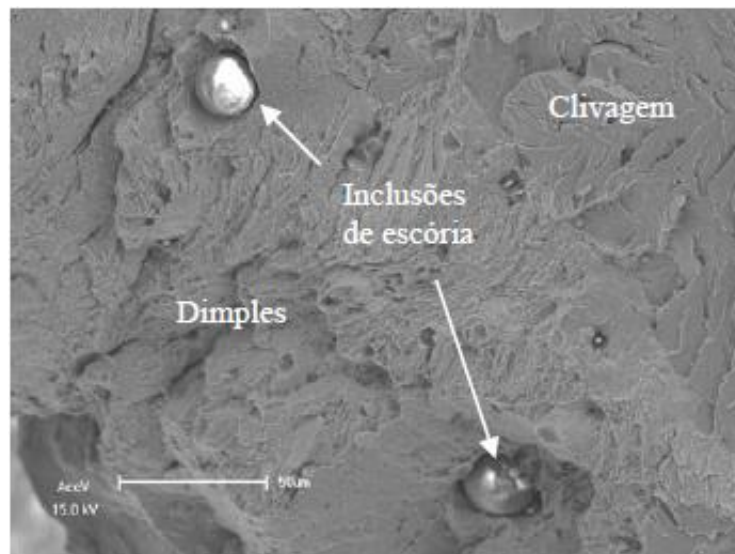


Figura 23: Fractografia ilustrando inclusões de escória.
Fonte: JULIO, 2008.

Rechupe (*Shrinkage*) – Contração da Solda

O rechupe pode ser definido como volumes da junta da solda que não ficaram preenchidos com o material de adição. Isso ocorre porque na solidificação o aço diminui de volume, dado que a temperatura se reduz, e se a alimentação de aço líquido no molde não for adequada ou o ar ficar preso no molde, devido à formação de finas camadas de aço solidificado, o rechupe poderá acontecer. A contração da solda também pode estar associada ao pré-aquecimento insuficiente ou ao movimento relativo da junta antes da solidificação total da solda. Segue a Figura 24, ilustrando um caso de região com rechupe fraturada. (SKYTTEBOL, 2005)



Figura 24: Fratura em trilha com rechupe.

Fonte: <<http://www.tsb.gc.ca/eng/rapports-reports/rail/2014/r14c0114/r14c0114.asp>>. Acesso em 30/10/2016.

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

A falta de fusão ocorre quando o metal líquido do material de adição não provoca soldagem completa em alguma parte do trilho. Parâmetros inadequados de pré-aquecimento, como pressão dos gases, baixa temperatura ou porção de Thermita insuficiente, também podem causar LOF. Na Figura 25 tem-se um exemplo de LOF em que o trilho original não se fundiu com o material de solda, ficando, inclusive, de cor diferente. (WTIA, 2015)



Figura 25: Exemplo de *lack of fusion* na região do patim.
Fonte: WTIA, 2015.

Bordamento da Solda (*Flashing/Finning/Cold Lap*)

O bordamento surge quando parte do metal de adição fundido “escorre” entre o trilho e o molde, o que forma uma borda com potencial para concentração de tensões. Geralmente ele é originado por variação no dimensional dos moldes, vazamento de escória na solda ou fusão da pasta de vedação que é colocada entre o molde e o trilho. (LAWRENCE, 2004)

Segue exemplo de bordamento (ou *cold lap*) no item (a) da Figura 26.

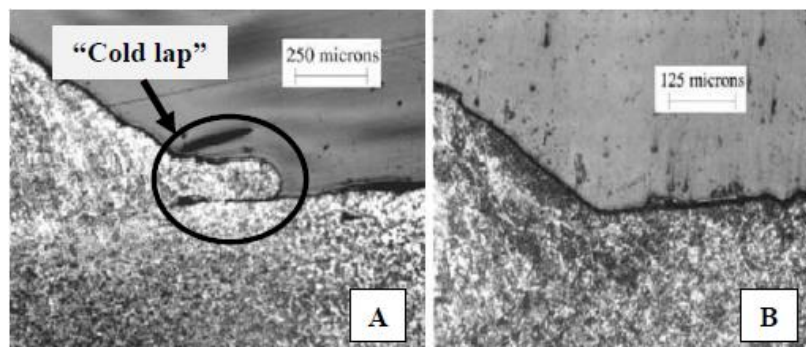


Figura 26: Imagem mostrando em (A) presença de *cold lap* e em (B) e a ausência de *cold lap*.

Fonte: LAWRENCE, 2004.

2.4 DOE – PLANEJAMENTO FATORIAL

Planejar experimentos é definir uma sequência de coletas de dados experimentais para realizar certos estudos. Dentre os métodos de planejamento experimental o planejamento fatorial é o mais simples e largamente utilizado quando se deseja estudar os efeitos de duas ou mais variáveis de influência, sendo que em cada tentativa ou réplica todas as combinações possíveis dos níveis de cada variável são investigadas (BARROS NETO *et al.*, 1996).

2.4.1 Fatorial completo

Seguem algumas definições, descritas a seguir: (NEVES *et al.*, 2002)

- **Fator:** cada variável do sistema em estudo;
- **Nível:** condições de operação dos fatores de controle investigadas nos experimentos. Nos sistemas mais simples usam-se dois níveis indicados por (+) para o maior valor e (-) para o menor;
- **Modelo estatístico:** equação que define o sistema em estudo;
- **Efeito:** mudança ocorrida na resposta quando se muda do nível inferior para um superior. Matematicamente o efeito principal pode ser representado por:

$$\Delta_{FATOR} = \bar{y}_{FATOR \text{ no NÍVEL (+)}} - \bar{y}_{FATOR \text{ no NÍVEL (-)}} = \bar{y}_+ - \bar{y}_- \quad (\text{eq.6})$$

para fatoriais com dois níveis.

- **Erro-padrão para os efeitos:** erro na determinação dos efeitos. É o mesmo tanto para os efeitos principais quanto para os de interação, e pode ser calculado por meio da equação:

$$\text{Erro - Padrão do Efeito} = \frac{S}{\sqrt{2^{K-1}}} \quad (\text{eq.7})$$

onde S é o desvio-padrão amostral e K o número de fatores.

É importante salientar que por ser de valores médios o erro nos efeitos é menor que o da medida. Também cabe ressaltar que o erro de uma média de uma amostragem é sempre menor que do individual de qualquer elemento da amostragem.

O Planejamento Fatorial Completo normalmente é representado por A^K , sendo que “K” representa o número de fatores e “A” o número de níveis escolhidos (NEVES *et al.*, 2002). O caso mais simples de planejamento fatorial completo é aquele em que cada fator “K” está presente em apenas dois níveis, (+) e (-), determinado com experimento fatorial 2^K . Ou seja, em um experimento com K fatores (ou variáveis) e dois níveis são realizados 2^K experimentos, contemplando todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores.

Apesar de os planejamentos fatoriais completos do tipo 2^K serem mais comuns, com um número reduzido de níveis é praticamente impossível explorar de maneira completa um sistema com um número elevado de variáveis. Ainda assim, planejamentos fatoriais completos do tipo 2^K se mostram vantajosos pela sua simplicidade, pois permitem verificar tendências importantes para a realização de investigações posteriores sem grandes esforços (NEVES *et al.*, 2002).

Para que o planejamento fatorial completo tenha representatividade e significância as réplicas ou repetições de experimentos são de fundamental importância e servem para determinar o erro experimental na resposta em estudo e/ou a reprodutibilidade do esquema experimental utilizado. Para que o estudo possa ser adequado ao sistema de planejamento de experimentos cada combinação de níveis dos fatores deve ter o mesmo número de réplicas de experimentos. Além disso, todos os ensaios e réplicas devem ser realizados de forma aleatória, visando evitar distorções estatísticas comprometedoras da qualidade dos resultados obtidos e dos efeitos calculados para as variáveis estudadas (GALDÁMEZ, 2002).

3. EXPERIMENTOS COM SOLDAS ALUMINOTÉRMICAS

Este Capítulo tem por objetivo relatar as ferramentas e os procedimentos adotados na experimentação de solda aluminotérmica, com a finalidade de avaliar as variáveis de entrada que interferem no resultado final da solda. Este trabalho se baseia na primeira sessão de experimentos de solda aluminotérmica realizados em conjunto com a empresa VALE no projeto Cátedra Roda-Trilho, e descritos no relatório interno da VALE S.A. – EFC, número 19361 (SOUZA E BALDEZ, 2016). Os experimentos foram realizados na área do Estaleiro de Soldas da Estrada de Ferro Carajás em São Luis – MA.

3.1 ANÁLISE QUÍMICA DO JITO

Foi realizada análise química de material retirado da área do jito (alimentador da forma de solda aluminotérmica conectado à curva do boleto) de duas soldas aluminotérmicas não experimentais, ou seja, realizadas nos trilhos da via permanente da EFC, seguindo procedimento PRO – 20966 – Executar Solda Aluminotérmica na EFC, durante turno operacional. A análise foi realizada em espectrômetro ARLW. Realizada uma queima por amostra, sendo uma amostra de cada solda.



Figura 27: Amostras de rebarba da área do jito.
Fonte: a autora.

3.2 DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE EXPERIMENTAÇÃO

Após estudo sobre o processo empregado para realizar soldas aluminotérmicas, descrito no Subcapítulo 2.3 deste trabalho, e durante reunião com concelho da VALE S.A. responsável pelo andamento do projeto, foram escolhidas pela empresa as seguintes variáveis de entrada para acompanhamento e controle: tempo de pré-aquecimento, *gap* ou abertura e Carbono Equivalente. O fornecedor do kit de soldagem ficou estabelecido como o próprio fornecedor já empregado pela VALE, sem adição nos experimentos de outros fornecedores.

Os dados apresentados nos Subcapítulos 3.2.1 e 3.2.2 foram definidos também em reunião entre a equipe do projeto da UFJF e do concelho da VALE S.A. responsável pelo andamento do projeto, e descritos no relatório interno da VALE S.A. – EFC, número 19361 (SOUZA E BALDEZ, 2016).

Dado o número reduzido de variáveis de entrada, escolheu-se o método de planejamento de experimentos via fatorial completo (vide Subcapítulo 2.4). Também avaliando o custo para realização de cada solda, que não é baixo, foi decidido que cada fator seria estudado em apenas dois níveis. Logo, utilizando três fatores e dois níveis foi utilizado o planejamento fatorial completo de 2^3 , ou seja, oito experimentos. Ainda por causa do preço por solda, inicialmente, na primeira etapa de experimentos, foram realizadas duas réplicas, somando, ao total, 16 soldas experimentais. As variáveis foram classificadas conforme Tabela 5 a seguir:

Tabela 5: Classificação dos fatores e níveis

Fatores		Nível Inferior (-)	Nível Superior (+)
A	Tempo de pré-aquecimento	5 min	7 min
B	GAP ou abertura entre trilhos	23 mm	27 mm
C	Carbono Equivalente	≈1,00	≈1,25

Fonte: a autora, dados baseados no relatório interno da VALE S.A. – EFC, 19361 (SOUZA E BALDEZ, 2016).

Seguindo a distribuição de todas as combinações de níveis de fatores possíveis, representados pelas letras A, B e C conforme Tabela 5, a matriz de experimentos foi definida conforme Tabela 6 a seguir.

Tabela 6: Planejamento de Experimentos

Planejamento de Experimentos			
Experimento	A	B	C
01	-	-	-
02	+	-	-
03	-	+	-
04	+	+	-
05	-	-	+
06	+	-	+
07	-	+	+
08	+	+	+

Fonte: a autora.

3.2.1 Descrição das variáveis a serem estudadas

a) 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 2.3.3, ocorre após a montagem e a vedação das formas e é determinado pelo fornecedor da solda. Conforme o procedimento empregado na VALE, PRO – 20966 – Executar Solda Aluminotérmica na EFC, 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 kgf/cm² e a chama de forma simétrica ao sair pelos alimentadores (jitos).

Para a realização dos experimentos esse tempo de pré-aquecimento foi variado entre um valor máximo de sete minutos e um valor mínimo de cinco minutos.

b) *Gap* ou abertura

O *gap* é a distância entre as duas extremidades dos trilhos a serem soldadas que serão preenchidas com o material de adição da solda. Para a solda normal, também conforme o procedimento empregado na VALE, PRO – 20966 – Executar Solda Aluminotérmica na EFC, a abertura deve ser de 25 mm ± 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.

c) **Carbono equivalente**

Dentre os fabricantes de tipos de trilhos utilizados atualmente no processo de soldagem foram escolhidos dois fornecedores com base no Carbono Equivalente (vide Subcapítulo 2.2.2 para definições) das composições químicas fornecidas pelos fabricantes dos trilhos.

Foram escolhidos um trilho de carbono equivalente de 1% ($1 \pm 0,03$), e outro de carbono equivalente de 1,25% ($1,25 \pm 0,05$).

d) **Fornecedor do kit de soldagem**

Atualmente, para o processo de soldagem na EFC está homologada apenas um fornecedor de insumos e equipamentos de solda aluminotérmica. Como o processo de testes para homologação da solda aluminotérmica de outro fornecedor está em andamento, este fornecedor concordou em participar do processo de testes a serem direcionados pelo projeto Roda-Cátedra.

Entretanto, como a homologação do segundo fornecedor ainda não havia sido finalizada durante o desenvolvimento deste trabalho o fornecedor aqui estudado será apenas o já homologado.

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 EFC. 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.

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 da VALE empregada nos dois momentos foi a mesma.

Os experimentos foram distribuídos conforme as tabelas a seguir, com a realização de duas réplicas para cada experimento.

Tabela 7: Cronograma da 1ª etapa dos experimentos

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

Fonte: a autora, dados baseados no relatório interno da VALE S.A. – EFC, 19361 (SOUZA E BALDEZ, 2016).

Tabela 8: Cronograma da 2ª etapa dos experimentos

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

Fonte: a autora, dados baseados no relatório interno da VALE S.A. – EFC, 19361 (SOUZA E BALDEZ, 2016).

Os trilhos utilizados no processo foram disponibilizados pelo Estaleiro de Soldas 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 do TFPM, respectivamente. Os kits de soldagem foram disponibilizados pela área de materiais.

3.2.3 Medição dos resultados

Assim como o procedimento de verificação da qualidade das soldas em via permanente, todas as soldas passaram por inspeção visual, com a finalidade de identificar trincas da superfície da região de solda ou defeitos aparentes, como rechupes, rebarba ou

microporos, e também por ensaio de ultrassom. A inspeção por ultrassom realizada nos experimentos foi a manual, que se resume em passar um aparelho de ultrassom que possui alta sensibilidade para detecção de pequenas descontinuidades que possa existir no interior do trilho ou da solda, como ilustram as Figura 28 e Figura 29 a seguir.



Figura 28: Equipamento de ultrassom manual.
Fonte: Equipe do Projeto.

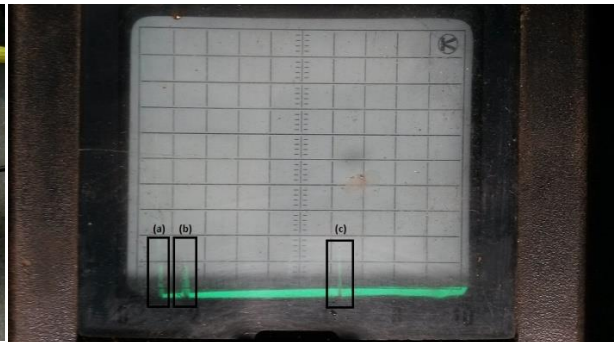


Figura 29: Gráfico de desvio da onda do ultrassom. (a) Desvio da onda na superfície do trilho. (b) e (c) Desvios da onda indicando defeito interno.
Fonte: Equipe do Projeto.

O ensaio por ultrassom é um método não destrutivo que consiste em emitir um feixe de ondas acústicas no material sob exame e captar o feixe emitido após interação com o material. O ultrassom é um tipo de onda acústica situada na faixa de 0,5 MHz a 25 MHz e geralmente são utilizadas ondas longitudinais, pois elas se propagam em uma velocidade maior do que as ondas transversais. O pulso ultrassônico é gerado e transmitido através de um transdutor especial, encostado no material. Eles são refletidos por uma descontinuidade ou pela superfície oposta da peça, e são captados pelo transdutor, convertidos em sinais eletrônicos (gráfico de ondas) e mostrados na tela LCD do aparelho, como na Figura 29.

Caso não haja descontinuidades na peça analisada a tela LCD apresentará duas ondas – a primeira referente à entrada do pulso na peça (eco de entrada), e a segunda referente à saída do pulso da outra extremidade da peça (eco de fundo) – de mesma amplitude. Caso haja descontinuidade surgirão novas ondas entres os ecos de entrada e de fundo, com amplitudes proporcionais ao tamanho da descontinuidade que reduzirão a amplitude do eco de fundo. Há casos em que as descontinuidades são tão pequenas que não geram ondas visuais na tela do aparelho, mas geram impacto no eco de fundo do mesmo modo. Logo, se o eco de fundo estiver com amplitude diferente do eco de entrada há identificação de descontinuidade.

Os ensaios foram realizados pelo setor de Engenharia Ferroviária da VALE S.A., de acordo com orientação da ABENDI – Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos – conforme informações a seguir:

- Equipamento USK8S da Krautkramer – GE, analógico, com transdutor WB45° e frequência de 2 MHz;
- Equipamento Epoch LTC da Olympus, digital, com transdutor WB45° e frequência de 2 MHz;
- Acoplante: água.

4. RESULTADOS

Este Capítulo tem por objetivo descrever os resultados obtidos na primeira etapa de análise dos experimentos de solda aluminotérmica, referentes à existência ou não de defeitos internos ou externos nas soldas realizadas. Tem-se por tarefa também apresentar os resultados encontrados no decorrer do estudo e discutir sua significância estatística e prática.

4.1 RESULTADOS DA ANÁLISE QUÍMICA

Como o material analisado era da região do jito (alimentador da região abaixo do boleto), podemos presumir que sua composição pode ser exclusivamente proveniente da porção Thermit® (material de adição da solda) e de seu contato com o material do cadinho e do molde de areia de fundição. Os resultados de composição química dos aços, além do ferro (Fe), resumidos na Tabela 9.

Tabela 9: Resultado de análise química via espectrômetro

Identificação: Amostra A				Identificação: Amostra B			
Resultado da Análise				Resultado da Análise			
Componente	(%) em peso	Componente	(%) em peso	Componente	(%) em peso	Componente	(%) em peso
C	0,7900	Mn	0,8600	C	0,8000	Mn	0,9500
Si	0,8100	P	0,0190	Si	0,7400	P	0,0180
S	0,0220	Cu	0,0860	S	0,0090	Cu	0,0810
Cr	0,4160	Ni	0,0510	Cr	0,4080	Ni	0,0490
Sn	0,0050	Nb	0,0030	Sn	0,0050	Nb	0,0030
Mo	0,0270	Pb	0,0000	Mo	0,0250	Pb	0,0000
Al	0,0345	AlS	0,0130	Al	0,0667	AlS	0,0290
Ali	0,0210	V	0,2140	Ali	0,0370	V	0,1950
Ti	0,0010	W	0,0000	Ti	0,0010	W	0,0000
B	0,0003	Ca	0,0001	B	0,0002	Ca	0,0001
N	0,0037	Cq	1,0660	N	0,0044	Cq	1,0820

Fonte: a autora.

Note que cada amostra, A e B, tem origem em soldas distintas, e suas composições apresentam algumas divergências de composição significativas, como alumínio (Al), enxofre (S) e manganês (Mn), indicando variação nas condições da solda ou até leve variação de composição da porção Thermit®. De modo geral o resultado foi a identificação de aço próximo

à classificação eutetóide, que é um aço que tem um teor de carbono entre 0,70 e 0,80%, com fases de ferrita e cementita em contorno de grão de perlita.

Uma observação importante é a indicação de presença de níquel (Ni) e cromo (Cr), elementos usados para estabilizar a estrutura austenítica e otimizar características mecânicas como dureza e tenacidade, que geralmente compõem trilhos de qualidade superior. A presença de Vanádio (V) também reforça que o aço produto da solda é um aço de boa qualidade, ao que tange composição química, já que o Vanádio é um elemento que reforça dureza e promove o refinamento dos grãos de perlita durante a solidificação da solda. Outra observação interessante é a presença significativa de alumínio (Al) e silício (Si), que provavelmente deve-se a erros estequiométricos na porção de reação, já que o Si é um dos agentes estabilizadores da reação, ou ao não alcance da fase de equilíbrio da reação química. Outra possibilidade é a presença de escória da reação aluminotérmica e areia de fundição (caso o molde não seja limpo adequadamente). Independente do motivo, a presença desses elementos pode implicar na existência de inclusões na solda, pontos que serão concentradores de tensão, podendo gerar trincas e fraturas.

4.2 RESULTADOS ALCANÇADOS NOS EXPERIMENTOS

Após o processo de esmerilhamento da cada região soldada a inspeção visual foi feita e registrada via fotografias feitas pela equipe do projeto. Após inspeção visual foi realizada inspeção via ultrassom, também registrada por fotografias. Seguem os dados e resultados de todas as soldas realizadas e que foram consideradas para a análise estatística, provenientes do relatório interno da VALE S.A. – EFC, número 19361 (SOUZA E BALDEZ, 2016).

S01

- Experimento: 02;
- Variáveis: 07 min / 23 mm / $\approx 1,00$;
- Horário de início do alinhamento da solda: 08:45;
- Início do pré-aquecimento: 09:25;
- Temperatura no início do pré-aquecimento: 38°C;
- Pressão do oxigênio / GLP: 5 kgf/cm² / 1,4 kgf/cm²;
- Lote / fabricação da porção: 5T6070 / 23 de setembro de 2015;
- Não houve identificação de defeito visual ou interno.

S02

- Experimento: 05;
- Variáveis: 05 min / 23 mm / $\approx 1,25$;
- Horário de início do alinhamento da solda: 09:50;
- Início do pré-aquecimento: 10:10;
- Temperatura no início do pré-aquecimento: $45,5^{\circ}\text{C}$;
- Pressão do oxigênio / GLP: 5 kgf/cm^2 / $1,4 \text{ kgf/cm}^2$;
- Lote / fabricação da porção: 5T6070 / 23 de setembro de 2015;
- Não apresentou defeitos visuais;
- Apresentou duas indicações de descontinuidade na inspeção por ultrassom, uma próxima à superfície e outra a aproximadamente 96 mm da superfície do bolete, como mostra a foto da tela do aparelho de ultrassom a seguir.



Figura 30: Ensaio de ultrassom da amostra S02.

Fonte: Relatório interno da VALE S.A. – EFC, número 19361 (SOUZA E BALDEZ, 2016).

S03

- Experimento: 03;
- Variáveis: 05 min / 27 mm / $\approx 1,00$;
- Horário de início do alinhamento da solda: 12:10;
- Início do pré-aquecimento: 12:30;
- Temperatura no início do pré-aquecimento: $45,5^{\circ}\text{C}$;
- Pressão do Oxigênio / GLP: 5 kgf/cm^2 / $1,2 \text{ kgf/cm}^2$;
- Lote / fabricação da porção: 5T6070 / 23 de setembro de 2015;
- Não houve identificação de defeito visual ou interno.

S04

Experimento: 08

- Variáveis: 07 min / 27 mm / $\approx 1,25$;
- Horário de início do alinhamento da solda: 13:05;
- Início do pré-aquecimento: 13:20;
- Temperatura no início do pré-aquecimento: $43,5^{\circ}\text{C}$;
- Pressão do Oxigênio / GLP: 5 kgf/cm^2 / $1,2 \text{ kgf/cm}^2$;
- Lote / fabricação da porção: 5T6070 / 23 de setembro de 2015;
- Não apresentou defeitos visuais;
- Com indicação na inspeção por ultrassom, apresentou descontinuidade a 92 mm da superfície do boleto, como mostra indicação na foto a seguir.

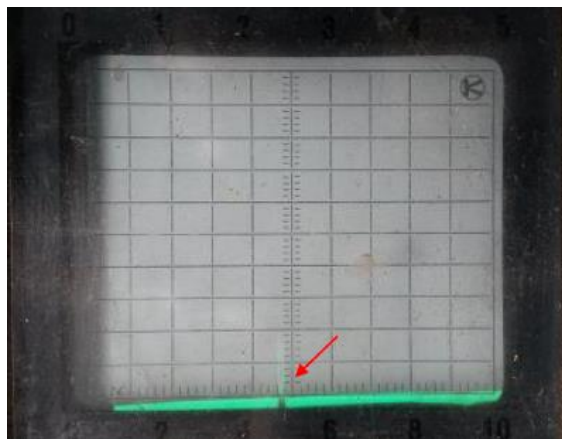


Figura 31: Ensaio de ultrassom da amostra S04.

Fonte: Relatório interno da VALE S.A. – EFC, número 19361 (SOUZA E BALDEZ, 2016).

S05

- Experimento: 03;
- Variáveis: 05 min / 27 mm / $\approx 1,00$;
- Horário de início do alinhamento da solda: 09:40;
- Início do pré-aquecimento: 10:00;
- Temperatura no início do pré-aquecimento: $39,5^{\circ}\text{C}$;
- Pressão do oxigênio / GLP: 5 kgf/cm^2 / $1,2 \text{ kgf/cm}^2$;
- Lote / fabricação da porção: 5T6070 / 23 de setembro de 2015;
- Não houve identificação de defeito visual ou interno.

S06

Primeira solda a apresentar defeito visual, e por isso, a pedido da equipe da UFJF foi realizada uma réplica chamada RS06. Porém, como não houve indicação de erro de execução na S06, o resultado a ser considerado neste trabalho é o da S06 a seguir.

- Experimento: 08;
- Variáveis: 07 min / 27 mm / $\approx 1,25$;
- Horário de início do alinhamento da solda: 10:10;
- Início do pré-aquecimento: 10:25;
- Temperatura no início do pré-aquecimento: 40°C;
- Pressão do oxigênio / GLP: 5 kgf/cm² / 1,4 kgf/cm²;
- Lote / fabricação da porção: 5T6070 / 23 de setembro de 2015;
- Na inspeção visual apresentou trincas na região do jito, alimentador abaixo da região do boleto, como mostram as fotos a seguir:



Figura 32: Evidência de defeito visual na amostra S06.
Fonte: Relatório interno da VALE S.A. – EFC, número 19361 (SOUZA E BALDEZ, 2016).

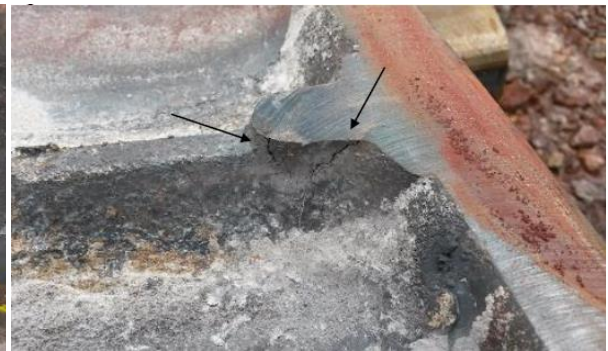


Figura 33: Imagem ampliada da evidência de defeito visual na amostra S06.
Fonte: Relatório interno da VALE S.A. – EFC, número 19361 (SOUZA E BALDEZ, 2016).

- Na inspeção por ultrassom foram identificadas descontinuidades, uma próxima à superfície do boleto e outra a 136 mm da superfície do boleto, como mostra indicação na foto a seguir.

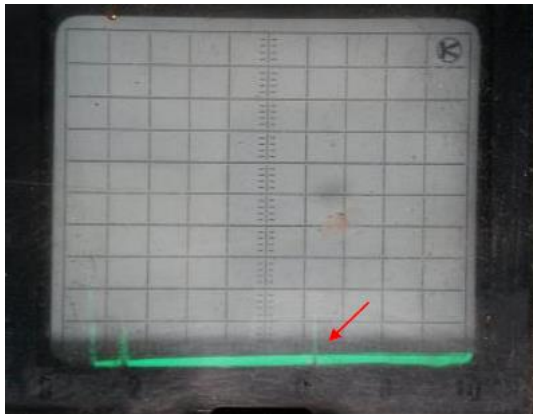


Figura 34: Ensaio de ultrassom da amostra S06.

Fonte: Relatório interno da VALE S.A. – EFC, número 19361 (SOUZA E BALDEZ, 2016).

S07

- Experimento: 02;
- Variáveis: 07 min / 23 mm / $\approx 1,00$;
- Horário de início do alinhamento da solda: 08:40;
- Início do pré-aquecimento: 08:55;
- Temperatura no início do pré-aquecimento: 30°C;
- Pressão do oxigênio / GLP: 5 kgf/cm² / 1,4 kgf/cm²;
- Lote / fabricação da porção: 5T6070 / 23 de setembro de 2015;
- Não apresentou defeitos visuais;
- Na inspeção por ultrassom apresentou descontinuidade a 80 mm da superfície do bolete, como mostra a foto a seguir.

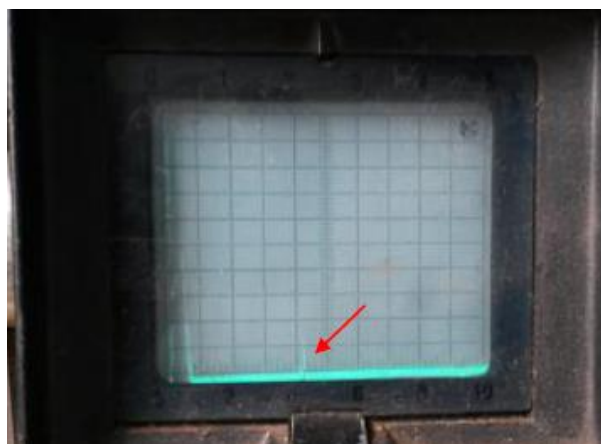


Figura 35: Ensaio de ultrassom da amostra S07.

Fonte: Relatório interno da VALE S.A. – EFC, número 19361 (SOUZA E BALDEZ, 2016).

S08

- Experimento: 05;
- Variáveis: 05 min / 23 mm / $\approx 1,25$;
- Horário de início do alinhamento da solda: 10:00;
- Início do pré-aquecimento: 10:15;
- Temperatura no início do pré-aquecimento: $37,5^{\circ}\text{C}$;
- Pressão do oxigênio / GLP: 5 kgf/cm^2 / $1,4 \text{ kgf/cm}^2$;
- Lote / fabricação da porção: 5T6070 / 23 de setembro de 2015;
- Não houve identificação de defeito visual ou interno.

S09

- Experimento: 01;
- Variáveis: 05 min / 23 mm / $\approx 1,00$;
- Horário de início do alinhamento da solda: 10:45;
- Início do pré-aquecimento: 11:05;
- Temperatura no início do pré-aquecimento: 44°C ;
- Pressão do oxigênio / GLP: 5 kgf/cm^2 / $1,5 \text{ kgf/cm}^2$;
- Lote / fabricação da porção: 6T6870 / 22 de abril de 2016;
- Não apresentou defeitos visuais;
- Na inspeção por ultrassom apresentou descontinuidade a 100 mm da superfície do boleto, como mostra foto a seguir.

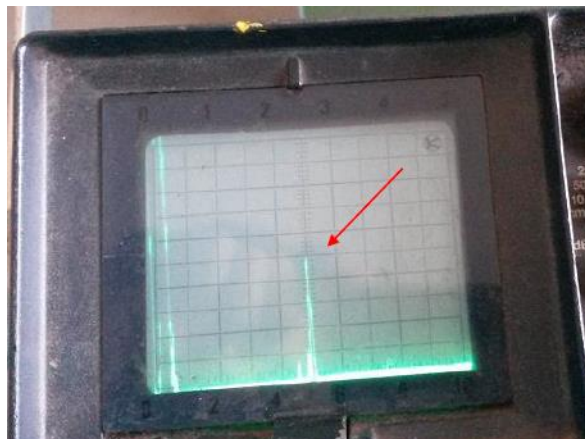


Figura 36: Ensaio de ultrassom da amostra S09.

Fonte: Relatório interno da VALE S.A. – EFC, número 19361 (SOUZA E BALDEZ, 2016).

S10

- Experimento: 07;
- Variáveis: 05 min / 27 mm / $\approx 1,25$;
- Horário de início do alinhamento da solda: 11:15;
- Início do pré-aquecimento: 12:07;
- Temperatura no início do pré-aquecimento: 45°C;
- Pressão do oxigênio / GLP: 5 kgf/cm² / 1,3 kgf/cm²;
- Lote / fabricação da porção: 6T6870 / 22 de abril de 2016.
- Em inspeção visual identificou-se trinca na região onde houve contato com o jito, alimentador abaixo da região do boleto. Segue foto apresentando o defeito.



Figura 37: Evidência de defeito visual na amostra S10.

Fonte: Relatório interno da VALE S.A. – EFC, número 19361 (SOUZA E BALDEZ, 2016).

- Não houve identificação de defeito interno via ultrassom.

S11

- Experimento: 04;
- Variáveis: 07 min / 27 mm / $\approx 1,00$;
- Horário de início do alinhamento da solda: 08:35;
- Início do pré-aquecimento: 09:00;
- Temperatura no início do pré-aquecimento: 32°C;
- Pressão do oxigênio / GLP: 5 kgf/cm² / 1,5 kgf/cm²;
- Lote / fabricação da porção: 6T6870 / 22 de abril de 2016;
- Não houve identificação de defeito visual ou interno.

S12

Segunda solda que necessitou de realização de réplica, chamada RS12, devido ao mal funcionamento da rebarbadora durante a S12. Por este motivo, os dados considerados para a análise estatística são da solda RS12.

- Experimento: 06;
- Variáveis: 07 min / 23 mm / $\approx 1,25$;
- Horário de início do alinhamento da solda: 11:01;
- Início do pré-aquecimento: 11:40;
- Temperatura no início do pré-aquecimento: 46°C;
- Pressão do oxigênio / GLP: 5 kgf/cm² / 1,5 kgf/cm²;
- Lote / fabricação da porção: 6T6870 / 22 de abril de 2016;
- Em inspeção visual identificou-se trinca na região onde houve contato com o jito, alimentador abaixo da região do boleto. Segue foto apresentando o defeito.



Figura 38: Evidência de defeito visual na amostra RS12.

Fonte: Relatório interno da VALE S.A. – EFC, número 19361 (SOUZA E BALDEZ, 2016).

- Na inspeção por ultrassom foi encontrada descontinuidade a 109 mm da superfície do boleto, como mostra foto a seguir.



Figura 38: Ensaio de ultrassom da amostra RS12.

Fonte: Relatório interno da VALE S.A. – EFC, número 19361 (SOUZA E BALDEZ, 2016).

S13

- Experimento: 01;
- Variáveis: 05 min / 23 mm / $\approx 1,00$;
- Horário de início do alinhamento da solda: 10:15;
- Início do pré-aquecimento: 10:40;
- Temperatura no início do pré-aquecimento: 47°C;
- Pressão do oxigênio / GLP: 5 kgf/cm² / 1,4 kgf/cm²;
- Lote / fabricação da porção: 6T6870 / 22 de abril de 2016;
- Não apresentou defeitos visuais;
- Na inspeção por ultrassom apresentou descontinuidade a 154 mm da superfície do bolete, como mostra foto a seguir.



Figura 39: Ensaio de ultrassom da amostra S13.

Fonte: Relatório interno da VALE S.A. – EFC, número 19361 (SOUZA E BALDEZ, 2016).

S14

- Experimento: 07;
- Variáveis: 05 min / 27 mm / $\approx 1,25$;
- Horário de início do alinhamento da solda: 14:15;
- Início do pré-aquecimento: 14:40;
- Temperatura no início do pré-aquecimento: 48°C;
- Pressão do oxigênio / GLP: 5 kgf/cm² / 1,3 kgf/cm²;
- Lote / fabricação da porção: 6T6870 / 22 de abril de 2016;
- Não houve identificação de defeito visual ou interno.

S15

- Experimento: 04;
- Variáveis: 07 min / 27 mm / $\approx 1,00$;
- Horário de início do alinhamento da solda: 08:55;
- Início do pré-aquecimento: 09:16;
- Temperatura no início do pré-aquecimento: 34°C;
- Pressão do oxigênio / GLP: 5 kgf/cm² / 1,4 kgf/cm²;

- Lote / fabricação da porção: 6T6870 / 22 de abril de 2016;
- Não apresentou defeitos visuais;
- Na inspeção por ultrassom apresentou descontinuidade a 100 mm da superfície do bolete, como mostra foto a seguir.

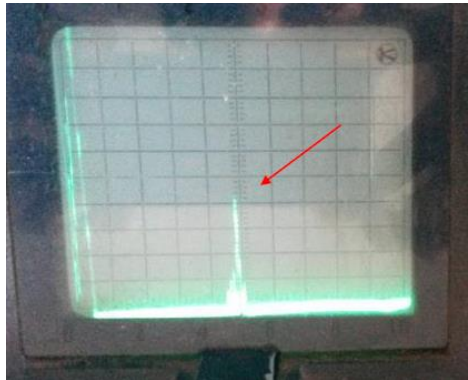


Figura 40: Ensaio de ultrassom da amostra S15.

Fonte: Relatório interno da VALE S.A. – EFC, número 19361 (SOUZA E BALDEZ, 2016).

S16

- Experimento: 06;
- Variáveis: 07 min / 23 mm / $\approx 1,25$;
- Horário de início do alinhamento da solda: 09:12;
- Início do pré-aquecimento: 09:40;
- Temperatura no início do pré-aquecimento: 40°C;
- Pressão do oxigênio / GLP: 5 kgf/cm² / 1,4 kgf/cm²;
- Lote / fabricação da porção: 6T6870 / 22 de abril de 2016;
- Não houve identificação de defeito visual ou interno.

Como demonstram os resultados obtidos, houve uma incidência de apontamentos de defeitos internos mais significativa que as de defeitos visuais. Organizando os experimentos em uma matriz de resultado de acordo com metodologia de planejamento de experimentos via fatorial completo e classificando os resultados como “apresentou defeito” (S) e “não apresentou defeito” (N), obteve-se a Tabela 10 a seguir:

Tabela 10: Matriz de Resultados

Resultado dos Experimentos										
Soldas	Experimento	A	B	C	AB	AC	BC	ABC	Defeito Visual	Defeito Interno
S09	01	-	-	-	+	+	+	-	N	S
S01	02	+	-	-	-	-	+	+	N	N
S03	03	-	+	-	-	+	-	+	N	N
S11	04	+	+	-	+	-	-	-	N	N
S02	05	-	-	+	+	-	-	+	N	S
S12	06	+	-	+	-	+	-	-	S	S
S10	07	-	+	+	-	-	+	-	S	N
S04	08	+	+	+	+	+	+	+	N	S
S13	01	-	-	-	+	+	+	-	N	S
S07	02	+	-	-	-	-	+	+	N	S
S05	03	-	+	-	-	+	-	+	N	N
S15	04	+	+	-	+	-	-	-	N	S
S08	05	-	-	+	+	-	-	+	N	N
S16	06	+	-	+	-	+	-	-	N	N
S14	07	-	+	+	-	-	+	-	N	N
S06	08	+	+	+	+	+	+	+	S	S

Fonte: a autora.

Note que apenas sete soldas não apresentaram qualquer tipo de defeito num universo de 16 soldas, o que é um resultado muito preocupante, dado que defeitos possuem alta probabilidade de desencadear uma fratura de trilho.

4.3 RESULTADOS DA ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS EXPERIMENTOS

Para uma análise estatística dos resultados dos 16 experimentos de solda aluminotérmica considerados foi necessário transformar as saídas dos resultados de qualitativa (classificação S/N) para quantitativa, em que foi utilizado o resultado binário 0/1, onde 0 irá representar resultados sem defeito e 1 os resultados que apresentaram defeito. Atualizando a matriz apresentada na Tabela 10 com os resultados numéricos, foi gerada a Tabela 11 a seguir:

Tabela 11: Matriz dos resultados - Atribuindo saída binária 0/1

Resultado dos Experimentos - Atribuindo Valor ao Resultado										
Soldas	Experimento	A	B	C	AB	AC	BC	ABC	Defeito Visual	Defeito Interno
S09	01	-	-	-	+	+	+	-	0	1
S01	02	+	-	-	-	-	+	+	0	0
S03	03	-	+	-	-	+	-	+	0	0
S11	04	+	+	-	+	-	-	-	0	0
S02	05	-	-	+	+	-	-	+	0	1
S12	06	+	-	+	-	+	-	-	1	1
S10	07	-	+	+	-	-	+	-	1	0
S04	08	+	+	+	+	+	+	+	0	1
S13	01	-	-	-	+	+	+	-	0	1
S07	02	+	-	-	-	-	+	+	0	1
S05	03	-	+	-	-	+	-	+	0	0
S15	04	+	+	-	+	-	-	-	0	1
S08	05	-	-	+	+	-	-	+	0	0
S16	06	+	-	+	-	+	-	-	0	0
S14	07	-	+	+	-	-	+	-	0	0
S06	08	+	+	+	+	+	+	+	1	1

Fonte: a autora.

Usando a fórmula matemática (eq.6), vista no Subcapítulo 2.4, para cálculo de efeito dos fatores estudados no planejamento de experimentos, chegou-se aos valores apresentados na Tabela 12 a seguir:

Tabela 12: Efeitos dos fatores

Efeitos dos fatores							
	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
Δ_{DV}	0,125	0,125	0,375	-0,125	0,125	0,125	-0,125
Δ_{DI}	0,250	-0,250	0,000	0,500	0,250	0,250	0,000

Fonte: a autora.

Apesar da análise parcial, os cálculos de efeito já evidenciam que para o defeito visual (DV) o fator com maior efeito é o C, o carbono equivalente do trilha usado na solda, com efeito de 0,375, onde quanto maior o valor do carbono equivalente maior a probabilidade de ocorrer defeito superficial. Outra evidência é que para defeito interno (DI) a interação entre os fatores

A e B (AB) possui o maior efeito, de 0,500, ou seja, se a interação entre os fatores for positiva (os níveis de A e B seguem o mesmo padrão, os dois em nível superior ou os dois em nível inferior) haverá maior probabilidade de defeito interno.

A matriz de resultados, Tabela 11, também foi utilizada no programa MiniTab 17, um programa estatístico que consegue, através da matriz de DOE fatorial, chegar a uma análise de significância de cada fator e de cada interação entre fatores em relação ao resultado final. Ou seja, o programa é capaz de modelar uma função com os fatores e interações entre eles como variáveis, que retorna o valor provável de saída, no caso, a probabilidade de ocorrer defeito dados os níveis usados nos fatores.

Primeiramente, usando a ferramenta “Stat > DOE > Factorial > Creat Factorial Design”, no *worksheet* do programa foi gerada a matriz de resultados para fatorial completo de três fatores e dois níveis, com duas repetições. Em seguida, usando o *worksheet* citado e acessando a ferramenta “Stat > DOE > Factorial > Analyse Factorial Design”, o MiniTab 17 fará análise ANOVA e regressão usando a matriz de resultados para fatorial completo de três fatores e dois níveis, com duas repetições, chegando então a uma função aproximada, que melhor se adapte aos resultados obtidos. Para isso o programa utiliza análise de variância por teste de hipótese. Nos próximos Subcapítulos os resultados das regressões serão apresentados e discutidos.

4.3.1 Regressão Fatorial para Defeito Visual

Relembrando a designação de cada variável e seus níveis apresentados na Tabela 5, segue saída de análise de variância e coeficientes com $\alpha = 5\%$ (ou seja, o intervalo de confiança do teste é de 95%), apresentada na Figura 41 a seguir.

Factorial Regression: Defeito Visual versus A; B; C							
Analysis of Variance							
Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	0,93750	38,46%	0,93750	0,13393	0,71	0,665
Linear	3	0,68750	28,21%	0,68750	0,22917	1,22	0,363
A	1	0,06250	2,56%	0,06250	0,06250	0,33	0,580
B	1	0,06250	2,56%	0,06250	0,06250	0,33	0,580
C	1	0,56250	23,08%	0,56250	0,56250	3,00	0,122
2-Way Interactions	3	0,18750	7,69%	0,18750	0,06250	0,33	0,802
A*B	1	0,06250	2,56%	0,06250	0,06250	0,33	0,580
A*C	1	0,06250	2,56%	0,06250	0,06250	0,33	0,580
B*C	1	0,06250	2,56%	0,06250	0,06250	0,33	0,580
3-Way Interactions	1	0,06250	2,56%	0,06250	0,06250	0,33	0,580
A*B*C	1	0,06250	2,56%	0,06250	0,06250	0,33	0,580
Error	8	1,50000	61,54%	1,50000	0,18750		
Total	15	2,43750	100,00%				

Model Summary					
S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)	
0,433013	38,46%	0,00%	6	0,00%	

Figura 41: Análise de Regressão Fatorial para Defeito Visual.

Fonte: a autora.

Na análise de variância podemos observar que os fatores e/ou interações entre eles que mais obtiveram relevância para atingir os resultados, e conseqüentemente, mais relevância na explicação do modelo matemático, foram o fator C – Carbono Equivalente do trilha empregado na solda –, com 23,08% de contribuição para o modelo, e o fator Erro, que engloba tanto a margem de aleatoriedade estatística quanto variáveis não estudadas, com 61,54% de contribuição para o modelo.

Os valores de contribuição encontrados e descritos da Figura 41 são obtidos mediante as tentativas do programa de encaixar os experimentos num padrão de comportamento. Porém, o teste ANOVA para significância dos fatores em relação à alteração no resultado gerou p-valor (ou *p-value*) para cada fator e interação acima do valor preestabelecido $\alpha = 5\% = 0,05$. Assim, de acordo com o teste ANOVA não há fatores significantes para o resultado, nem mesmo o fator C, que possui o melhor p-valor, de 0,122, mas que ainda é superior ao α e não possui

significância. Ou seja, desde os fatores e interações estudados não há variáveis decisivas estatisticamente para o resultado.

Ao fim do teste ANOVA, com a alta taxa de contribuição do Erro, obteve-se um R^2 (ou R-sq) – indicador de quanto do resultado pode ser explicado pelo modelo matemático encontrado, e por consequência, pelos fatores e suas interações – do teste de apenas 38,46%, ou seja, o modelo matemático explica apenas 38,48% do resultado obtido, uma representatividade muito baixa, o que pode significar que os motivos que levam a uma solda possuir defeito visual não foram estudados neste modelo, ou não houve amostra suficiente que revelasse um padrão de comportamento estatístico para esta saída. Porém, esse resultado foi obtido provavelmente pela baixa quantidade de repetições dos experimentos.

Porém, o indicador R^2 não leva em consideração o teste de significância, ou seja, os valores de p-valor encontrados, e por isso o programa também disponibiliza o indicador R^2 (ajustado) – ou R-sq(adj) – que reúne a informação de contribuição para o modelo e os p-valor encontrados. E como mostra a Figura 41, o R^2 (ajustado) encontrado foi de 0%, valor modelado pelo fato de nenhum fator ter recebido um p-valor significativo.

Segue o resultado final do programa com a definição dos coeficientes do modelo matemático evidenciado na Figura 42, que ilustra o teste de regressão.

Term	Effect	Coef	SE Coef	95% CI	T-Value	P-Value	VIF
Constant		0,188	0,108	(-0,062; 0,437)	1,73	0,122	
A	0,125	0,062	0,108	(-0,187; 0,312)	0,58	0,580	1,00
B	0,125	0,063	0,108	(-0,187; 0,312)	0,58	0,580	1,00
C	0,375	0,188	0,108	(-0,062; 0,437)	1,73	0,122	1,00
A*B	-0,125	-0,062	0,108	(-0,312; 0,187)	-0,58	0,580	1,00
A*C	0,125	0,062	0,108	(-0,187; 0,312)	0,58	0,580	1,00
B*C	0,125	0,063	0,108	(-0,187; 0,312)	0,58	0,580	1,00
A*B*C	-0,125	-0,063	0,108	(-0,312; 0,187)	-0,58	0,580	1,00

Regression Equation in Uncoded Units

$$\text{Defeito Visual} = 0,188 + 0,062 A + 0,063 B + 0,188 C - 0,062 A*B + 0,062 A*C + 0,063 B*C - 0,063 A*B*C$$

Figura 42: Resultado de Regressão Fatorial para Defeito Visual.

Fonte: a autora.

Nessa segunda etapa de cálculos da regressão do MiniTab 17 chega-se aos valores dos coeficientes do modelo matemático. Esse modelo matemático responderá por resultados quantitativos devido à utilização do resultado binário 0-1 na matriz, porém com saída contínua.

Como o modelo também foi construído sobre os níveis dos fatores codificados como (+) e (-), ou seja +1 e -1, respectivamente, o significado do resultado é então alterado, e no modelo matemático descrito no fim da Figura 42 deverão ser empregados apenas os valores +1 e -1 para os fatores, e como resposta obter-se-ão valores contínuos do intervalo [0,1], podendo assim significar o risco de a solda final apresentar defeito visual dado o nível dos fatores.

E com isso, o fator C – Carbono Equivalente – se consolida como o fator com impacto mais significativo sobre o modelo, obtendo o maior valor de coeficiente em módulo, no valor positivo de 0,108. O fato de o coeficiente do fator C estar positivo demonstra que seu impacto é diretamente proporcional à possibilidade de a solda resultante ter defeito visual, ou seja, quando maior for o Carbono Equivalente do trilho usado maiores as chances de a solda apresentar algum defeito visual.

Como o Carbono Equivalente interfere na soldabilidade de um material através de sua constituição química (vide Subcapítulo 2.2.2), a sua relevância para a existência ou não de defeito visual pode ser explicada, já que quanto maior o valor do Carbono Equivalente mais controlados deverão ser os procedimentos de soldagem, como: pré-aquecimento, nível de energia imposto no sistema, escoamento do metal, e solidificação.

Como o processo de solda aluminotérmica é manual, com alta interferência humana, onde os operadores de via não possuem condições de controlar o procedimento, apenas executá-lo, haverá, então, realmente maior probabilidade de falhas na fusão entre trilho e material de adição da solda, além de descontrole sobre a interação entre aço líquido e o molde ou sobre o resfriamento (que é ao ar livre), que pode gerar uma solda com problemas de solidificação na parte externa do trilho.

4.3.2 Regressão Fatorial para Defeito Interno

Relembrando a designação de cada variável e seus níveis apresentadas na Tabela 5, segue a saída de análise de variância e coeficientes com $\alpha = 5\%$, apresentada na Figura 43, a seguir.

Factorial Regression: Defeito Interno versus A; B; C							
Analysis of Variance							
Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	2,00000	50,00%	2,00000	0,28571	1,14	0,423
Linear	3	0,50000	12,50%	0,50000	0,16667	0,67	0,596
A	1	0,25000	6,25%	0,25000	0,25000	1,00	0,347
B	1	0,25000	6,25%	0,25000	0,25000	1,00	0,347
C	1	0,00000	0,00%	0,00000	0,00000	0,00	1,000
2-Way Interactions	3	1,50000	37,50%	1,50000	0,50000	2,00	0,193
A*B	1	1,00000	25,00%	1,00000	1,00000	4,00	0,081
A*C	1	0,25000	6,25%	0,25000	0,25000	1,00	0,347
B*C	1	0,25000	6,25%	0,25000	0,25000	1,00	0,347
3-Way Interactions	1	0,00000	0,00%	0,00000	0,00000	0,00	1,000
A*B*C	1	0,00000	0,00%	0,00000	0,00000	0,00	1,000
Error	8	2,00000	50,00%	2,00000	0,25000		
Total	15	4,00000	100,00%				

Model Summary				
S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)
0,5	50,00%	6,25%	8	0,00%

Figura 43: Análise de Regressão Fatorial para Defeito Interno.
Fonte: a autora.

Na análise de variância podemos observar que a interação A*B – interação entre tempo de pré-aquecimento e *gap* entre os trilhos, respectivamente – obteve maior relevância dentre os fatores e/ou interações, com 25,00% de contribuição para o modelo, e o fator Erro com 50,00% de contribuição.

Da mesma forma que o teste para defeito visual, o teste ANOVA para significância dos fatores em relação aos defeitos internos resultou em p-valor (ou *p-value*) para cada fator e interação acima do valor preestabelecido α . Assim, de acordo com o teste ANOVA não há fatores significantes para o resultado. Porém, a interação A*B chegou muito perto, com p-valor de 0,081, representando uma forte indicação de significância se comparada com os outros p-valores obtidos.

Ao fim do teste ANOVA, novamente com a alta taxa de contribuição do Erro, obteve-se um R^2 de apenas 50,00%, um resultado um pouco melhor que o teste de defeito visual, o que pode significar que nem todos os motivos que levam uma solda a possuir defeito interno foram estudados neste modelo, ou não houve amostra suficiente que revelasse um padrão mais adequado de comportamento para esta saída. O R^2 (ajustado) encontrado na Figura 43, que foi de 6,25%, obteve esse valor pelo fato de nenhuma variável ter recebido um p-valor significativo, e apenas a interação A*B obteve alguma ordem de significância.

Segue o resultado final do programa com a definição dos coeficientes do modelo matemático evidenciado na Figura 44, que ilustra o teste de regressão.

Coded Coefficients								
Term	Effect	Coef	SE Coef	95% CI	T-Value	P-Value	VIF	
Constant		0,500	0,125	(0,212; 0,788)	4,00	0,004		
A	0,250	0,125	0,125	(-0,163; 0,413)	1,00	0,347	1,00	
B	-0,250	-0,125	0,125	(-0,413; 0,163)	-1,00	0,347	1,00	
C	-0,000	-0,000	0,125	(-0,288; 0,288)	-0,00	1,000	1,00	
A*B	0,500	0,250	0,125	(-0,038; 0,538)	2,00	0,081	1,00	
A*C	0,250	0,125	0,125	(-0,163; 0,413)	1,00	0,347	1,00	
B*C	0,250	0,125	0,125	(-0,163; 0,413)	1,00	0,347	1,00	
A*B*C	-0,000	-0,000	0,125	(-0,288; 0,288)	-0,00	1,000	1,00	

Regression Equation in Uncoded Units									
Defeito Interno = 0,500 + 0,125 A - 0,125 B - 0,000 C + 0,250 A*B + 0,125 A*C + 0,125 B*C - 0,000 A*B*C									

Figura 44: Resultado de Regressão Fatorial para Defeito Interno.
Fonte: a autora.

Nessa segunda etapa de cálculos da regressão a interação A*B – interação entre tempo de pré-aquecimento e *gap* entre os trilhos – se consolida como o fator com maior impacto sobre o modelo, obtendo o maior valor de coeficiente em módulo, no valor positivo de 0,125. O fato de o coeficiente de A*B estar positivo demonstra que seu impacto é diretamente proporcional à possibilidade de a solda resultante ter defeito interno, ou seja, quando os níveis de A e B estiverem alinhados (ambos no valor superior ou ambos no valor inferior), maiores as chances de a solda apresentar algum defeito interno.

Mesmo não obtendo significância individualmente os fatores A e B possuem efeitos inversos na qualidade da solda, conforme a Figura 44. O fator A – tempo de pré-aquecimento – possui efeito e coeficiente positivos, ou seja, quando está em nível superior ele apresentou maior taxa de defeito interno, e já o fator B – *gap* entre os trilhos a serem soldados – possui efeito e coeficiente negativos, ou seja, quando estava em nível superior ele apresentou menor taxa de defeito interno. Essa diferença de sentido dos efeitos amplia o efeito de a interação A*B possuir coeficiente positivo, ou seja, os melhores resultados (menor taxa de incidência de defeito interno) ocorrem quando eles estão em níveis inversos, principalmente com A em nível inferior e B em nível superior, como pode ser conferido na Tabela 10.

Supõe-se que os melhores resultados com um nível superior de B se devem ao fato de que um *gap* maior permitir que mais material de adição a altas temperaturas fique entre os

trilhos, assim levando mais calor à região que passará por um processo de resfriamento mais adequado que um *gap* menor. Em um *gap* menor poderia ocorrer da diferença de temperatura entre trilho aquecido e material de adição causar solidificação parcial e temporária do material de adição, levando a solda a não ter um processo de fundição-solidificação homogêneo.

Já o efeito do fator A, que revela que tempos de pré-aquecimentos mais curtos resultam em soldas com menor chance de defeito interno, não está alinhado com a literatura revisada, que sempre indica que o pré-aquecimento é uma etapa importante e que tempos de pré-aquecimento de até 15 minutos são empregados. Porém, tempos elevados de pré-aquecimento podem levar a solda a ter um processo de solidificação mais lento, o que aumenta a probabilidade da formação lenta dos grãos gerar segregação entre grãos, liga ainda fundida e materiais de inclusão, numa extensão grande da solda, podendo gerar poros, microrechupes ou ainda concentração de inclusões no centro da região de solda.

Outra suposição seria que esse resultado possa estar influenciado por variáveis que não foram estudadas neste teste, lembrando que nenhum fator ou interação atingiu p-valor satisfatório no teste ANOVA.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho buscou responder a três perguntas já citadas no Subcapítulo 1.3:

1. O procedimento determinado pelos fornecedores dos equipamentos e insumos da solda Thermite e usado pela VALE S.A. garante uma solda de qualidade?
2. Quais são os níveis para as variáveis de entrada que compõem o processo da solda Thermite que serão aqui estudadas que garantem uma maior probabilidade de obtenção de solda sem defeitos ou falhas?
3. Qual o relacionamento entre cada variável de entrada e a probabilidade de ocorrência de falha e/ou defeito?

Para a pergunta de número 1, por meio dos experimentos percebeu-se que não há garantias, já que os 16 experimentos foram realizados dentro dos parâmetros estabelecidos pelo fornecedor e das normas de segurança da VALE S.A., e mesmo assim apenas seis das 16 soldas não apresentaram defeito, lembrando que este trabalho não avaliou as propriedades mecânicas das soldas, apenas o defeito. Por isso, conclui-se que a VALE S.A. possui motivação suficiente para despender recursos no estudo desse tipo de solda ou no estudo da substituição do tipo de processo de soldagem empregado.

Sobre a segunda pergunta, através do estudo estatístico aqui empregado pode-se observar que o uso de trilhos com menor teor de carbono em sua constituição proporciona soldas com menor probabilidade de defeito externo. Já para defeitos internos o fator tipo de trilho neste teste ficou sem qualquer significância, inclusive sendo retirado do modelo, porém observou-se que utilizar *gaps* mais extensos e durações mais curtas de pré-aquecimento aumenta a probabilidade de não ocorrer defeito interno na solda. Entretanto, para a terceira pergunta os testes estatísticos empregados apontam que dentre as três variáveis estudadas – tempo de pré-aquecimento, *gap* e carbono equivalente do trilho – não há fatores nem interações com significância estatística comprovada. Logo, sua relação não pode ser realmente determinada estatisticamente apenas com os experimentos realizados, visto que foi realizado quantidades mínimas de repetições, e mesmo nesse cenário, observou-se valores de p-valor e R^2 próximos de um nível satisfatório.

Como os resultados dos testes estatísticos apresentaram baixa ou nenhuma significância dos fatores estudados sobre a condição de defeito visual ou interno e com o alto valor de Erro encontrado pelos testes ANOVA, recomenda-se que novos experimentos sejam

realizados. A baixa significância e a fraca adequação do modelo matemático do teste ANOVA possuem algumas interpretações, como:

- Há necessidade de incluir mais réplicas ao teste, já que com mais réplicas o teste talvez pudesse chegar a uma modelagem mais adequada ou ter maior chance de encontrar um padrão de comportamento;
- Pode haver necessidade de aumentar a amplitude dos valores numéricos dos níveis empregados (como o de tempo de pré-aquecimento, que teve uma amplitude de apenas dois minutos);
- Ou então, futuramente empregar pelo menos mais um nível para alguns fatores, para que o teste pudesse fazer avaliações mais precisas;
- Ou as variáveis estudadas não são fatores que possuem alta relação com a probabilidade de defeito visual ou interno, logo haveria necessidade de um replanejamento dos experimentos agregando um maior número de fatores, como, por exemplo, faixa de temperatura atingida pela solda, faixa de temperatura ambiente no momento da solda, tempo de resfriamento, etc.;
- Ou, ainda, o modelo matemático para cada defeito é tão complexo que talvez o teste ANOVA seja insuficiente para determiná-lo.

Por fim, como este trabalho se propôs a reunir conhecimento sobre o procedimento da solda aluminotérmica e seus impactos sobre a estrutura da via permanente, e dado o escopo do trabalho de conclusão de curso, um aprofundamento maior na literatura não pôde ser concluído. Logo, para trabalhos futuros e a continuação do projeto Cátedra Roda-Trilho ainda é cabível o aprofundamento em diversos assuntos, como:

- Análise das propriedades mecânicas dos experimentos de solda aluminotérmica;
- Conhecimentos sobre as ligas de aço empregadas e a diferença com a constituição química da porção Thermit®;
- Busca de literatura envolvendo as causas e trabalhos já estudados sobre mitigações dos defeitos encontrados nas soldas aluminotérmicas;
- Busca por literatura demonstrando diferença de qualidade entre a solda aluminotérmica e os outros processos hoje empregados;
- E estudo de viabilidade para emprego de outros processos de solda *on track*, como caminhões rodoferroviários de solda elétrica ou gás pressurizado que poderiam substituir a solda aluminotérmica.

REFERÊNCIAS

- ACERLORMITTAL. **Trilhos para *Heavy Haul***. Disponível em: <<http://blog.arcelormittal.com.br/trilhos-para-trens-de-carga-pesada/>>. Acesso em 07/05/2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1977. **NBR 12206**: trilho “Vignole” e acessórios - escolha. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1982. **NBR 7599**: trilho com defeito. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1982. **NBR 7650**: trilho. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988. **NBR 7640**: defeitos de trilhos utilizados para via férrea. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1991. **NBR 11693**: trilho “Vignole” e acessórios - reaproveitamento. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1991. **NBR 7590**: trilho “Vignole”. Rio de Janeiro.
- BARROS NETO, B. et al. **Planejamento e otimização de experimentos**. 2ed. Campinas: Editora UNICAMP, 1996.
- BOSCH, R., 2002. **Rail grinding strategies on Netherlands Railways**. Rail Engineering International. Num. 1, vol. 31.
- BUTTON, S. T. **Metodologia para planejamento experimental e análise de resultados**. 2005. Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br/~sergio1/pos-graduacao/IM317/im317.htm>>. Acesso em 22/10/2016.
- BRINA, H. L., 1979. **Estradas de ferro**. LTC – Livros Técnicos e Científicos. Editora S.A.. 1ed. Rio de Janeiro.
- CHEN, Y et al. **Weld Defect Formation in Rail Thermite Welds**. JRRT44 IMechE 2006, Proc. IMechE Vol. 220 Part F: J. Rail and Rapid Transit.
- COTTRELL, A. H.. **Introdução à metalurgia**. Edward Arnold (Publishers) Ltd., 2ª Edição. Londres, 1975.
- DA SILVA, A.A.M et al. **Análise de Falha e Caracterização Metalúrgica de um Segmento de Trilho Soldado por Aluminotermia**. Jornadas SAM 2000 - IV Colóquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga, pp. 799-806, agosto de 2000.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **ETM-005 – solda aluminotérmica**: especificação técnica de material. [S/D]. Disponível em: < <http://www.dnit.gov.br/> >. Acesso em 04/06/2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **PIM-001 – trilho**: procedimento para inspeção de material. [S/D]. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/download/ferrovias/consulta-publica/101-pim-trilho.pdf>>. Acesso em 04/06/2016.

DUVEL, J. e MUTTON, P. **Rail requirements for 40 tonne Axle Loads**. 8ª Conferência Internacional de Ferrovias de Carga Pesada, Rio de Janeiro, Brasil, 2005.

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

GALDÁMEZ, E. V. C. **Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos na melhoria da qualidade de um processo de fabricação de produtos plásticos**. São Carlos, 2002. 133p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

GUIMARÃES, C. A. **Análise das solicitações dinâmicas na via férrea através da simulação da interação entre o veículo e a via**. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 1999.

LAWRENCE, F. V et al. **Improving the Fatigue Resistance of Thermite Railroad Rail Weldments**. University of Illinois, Illinois. 2014?. Disponível em: <<http://fcg.mechse.illinois.edu/files/2014/07/Lawrence-presentation.pdf>>. Acessado em 04/06/2016.

LEE, F.T. **Managing Thermit Quality for Railroads**. Welding Journal, 85. [S/L], 2006.

LONSDALE, C et al. **Rails and Wheels Materials. Guidelines to best practices for heavy haul railway operations**. IHHA, Perth, Australia, 2015.

MACEDO, F. B. **Estudo do desgaste de trilhos ferroviários**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção)-Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2009.

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 22/10/2016.

MACIEL, T. M. et al. **Efeito do carbono equivalente sobre a presença de trincas a frio em juntas soldadas de aços ARBL**. Campina Grande, 2012?. Disponível em <http://www.dem.ufrn.br/~freirej/publicacoes_pdf/8congressochileno.pdf>. Acesso em 22/10/2016.

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.

MAIS toneladas por eixo. **Revista Ferroviária**. São Paulo, 2005. Disponível em: <<http://www.revistaferroviaria.com.br/index.asp?InCdMateria=2349&InCdEditoria=6>>. Acesso em 07/05/2016.

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.

MRS LOGÍSTICA (1). **Inovação: Esmerilhadora de Trilhos.** [S/D]. Disponível em: <<https://www.mrs.com.br/post-blog-inovacao/esmerilhadora-de-trilhos/>>. Acesso em 07/05/2016.

MRS LOGÍSTICA (2). **Inovação: Track Star e Ultra-som.** [S/D]. Disponível em: <<https://www.mrs.com.br/post-blog-inovacao/track-star-e-ultrasom/>>. Acesso em 07/05/2016.

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.

NEVES, C. F. C. et al. Variables search technique applied to gas separation. **Química Nova.** v.25, n 2, p.327-329, 2002.

Patente US 729573 A. Disponível em: <<https://www.google.com/patents/US729573>>. Acesso em 07/05/2016.

Patente US 8721807 A. Disponível em: <<http://www.google.ch/patents/US8721807>>. Acesso em: 07/05/2016.

PETRONI, C. V. **Estudo da performance dos diversos tipos de trilhos assentados na via da MRS, critérios de desgaste, fadiga de contato.** Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Transporte Ferroviário de Carga do Instituto Militar de Engenharia)-Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2006.

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

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.

RAILTECH. **Site da empresa: Catálogo de Produtos.** [S/D]. Disponível em: <http://www.iat-pandrolbrasil.com.br/htm/produtos/produtos_railtech.html>. Acesso em 04/06/2016.

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.

SCARPEL, R. A.. **MOQ-14 Projeto e análise de experimentos.** Material de apoio didático, ITA. Rio de Janeiro, [S/D].

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

SENAI. **Soldagem.** Coleção tecnológica SENAI, 1ª ed.. [S/L], 1997.

SHANGHAI SUYU RAILWAY MATERIAL CO.. **Site da empresa: Catálogo de Produtos.** [S/D]. Disponível em: <<http://www.suyurailway.com/Products.asp>>. Acesso em 04/06/2016.

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

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/engenhariamecanica/maprotec/cbecimat2012c.pdf>>. Acesso em 07/05/2016.

TERASHITA, Y.; TATSUMI, M. **Analysis of Damaged Rail Weld.** QR of RTRI (Rail welding, Track Technology Div.), Vol. 44, No. 2. Tokyo, 2003.

Track. Disponível em: <[https://en.wikipedia.org/wiki/Track_\(rail_transport\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Track_(rail_transport))>. Acesso em 07/05/2016.

SOUZA R., BALDEZ, R.. **Relatório interno da VALE S.A. – EFC, 19361.** São Luís, 2016.

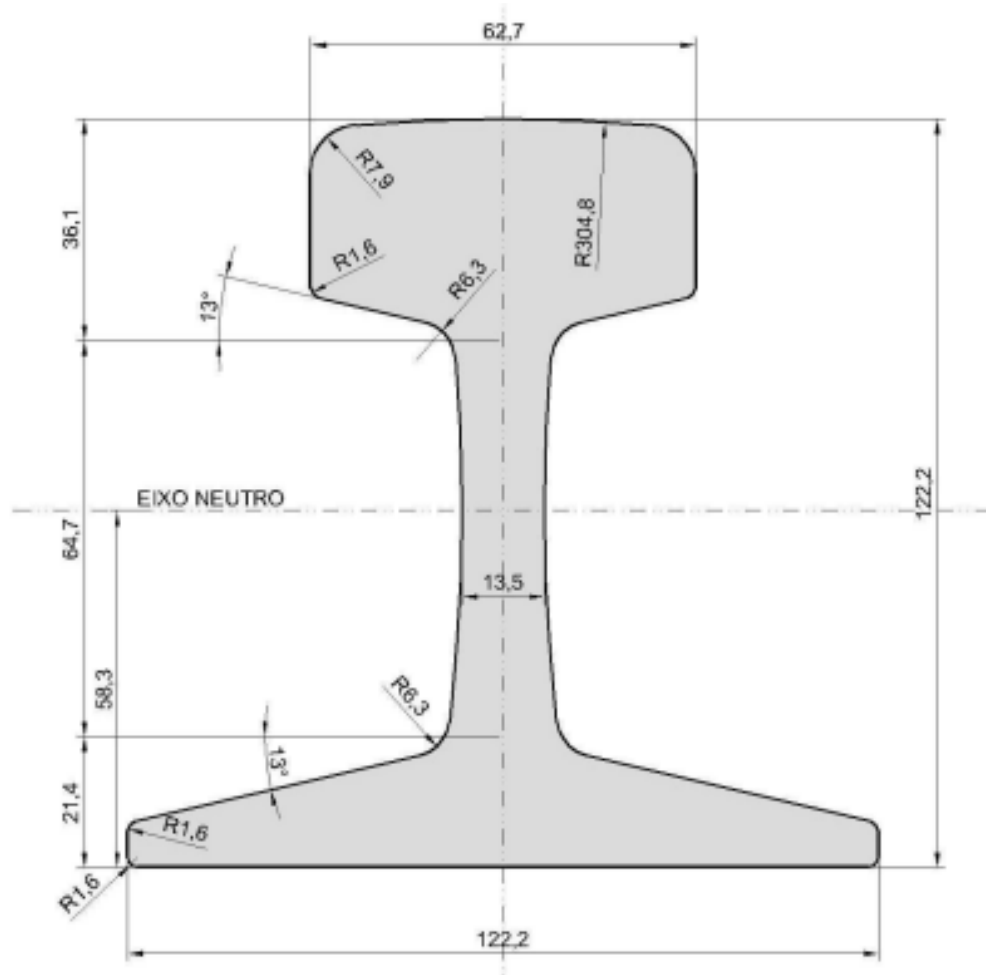
VIANA, T. G.. **Estudo comparativo do comportamento de aços (trilhos) premium na tenacidade à fratura e na propagação de trinca por fadiga, de aplicação ferroviária.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais)-REDEMAT. Ouro Preto, 2015.

WALPOLE, R. E., et al. **Probabilidade e Estatística para Engenharia e Ciências.** Editora Pearson / Prentice Hall (Grupo Pearson), 8ª Edição. [S/L], 2009.

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 22/10/2016.

ANEXO A – CARACTERIZAÇÃO DOS TRILHOS SEGUNDO DNIT

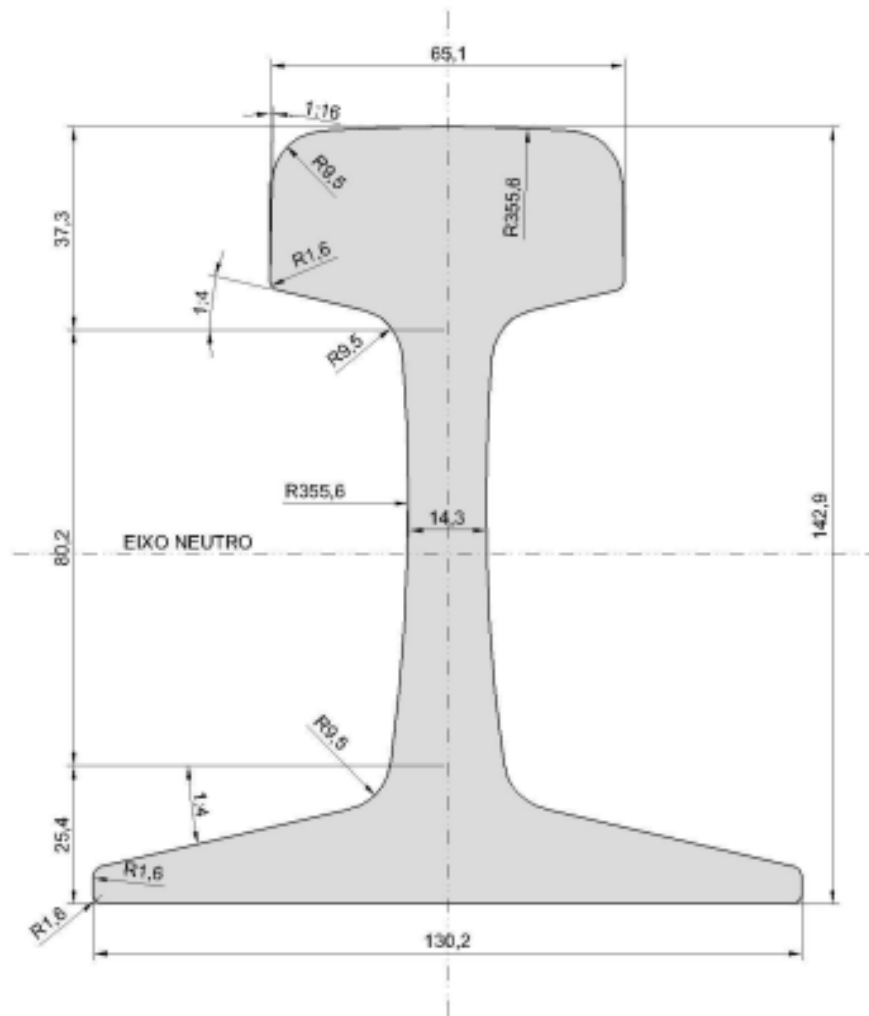
Trilho TR 37



ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL (cm²)	47,29
MOMENTO DE INÉRCIA (cm⁴)	951,50
MÓDULO DE RESISTÊNCIA DO BOLETO (cm³)	149,10
MÓDULO DE RESISTÊNCIA DO PATIM (cm³)	162,90
PESO POR METRO (kg/m)	37,10

Fonte: PIM-001 – DNIT, [S/D].

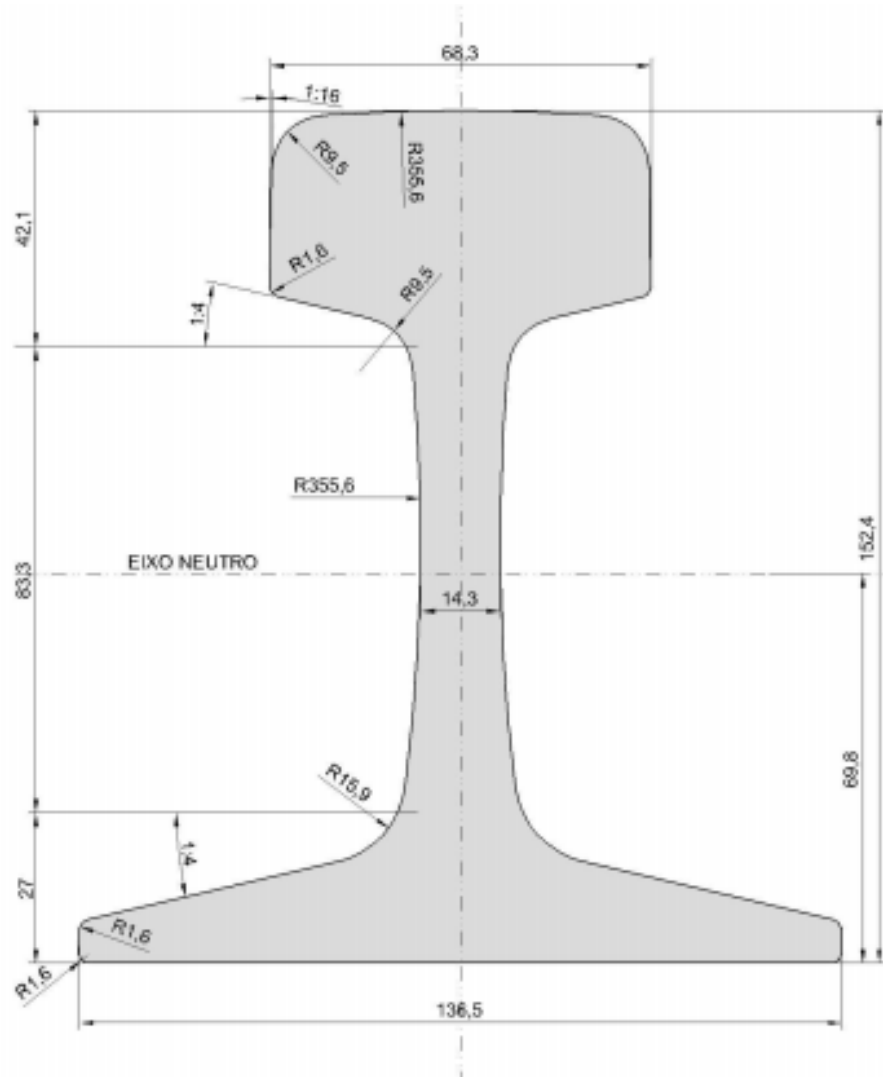
Trilho TR 45



ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL (cm²)	56,90
MOMENTO DE INÉRCIA (cm⁴)	1610,80
MÓDULO DE RESISTÊNCIA DO BOLETO (cm³)	205,60
MÓDULO DE RESISTÊNCIA DO PATIM (cm³)	249,70
PESO POR METRO (kg/m)	44,64

Fonte: PIM-001 – DNIT, [S/D].

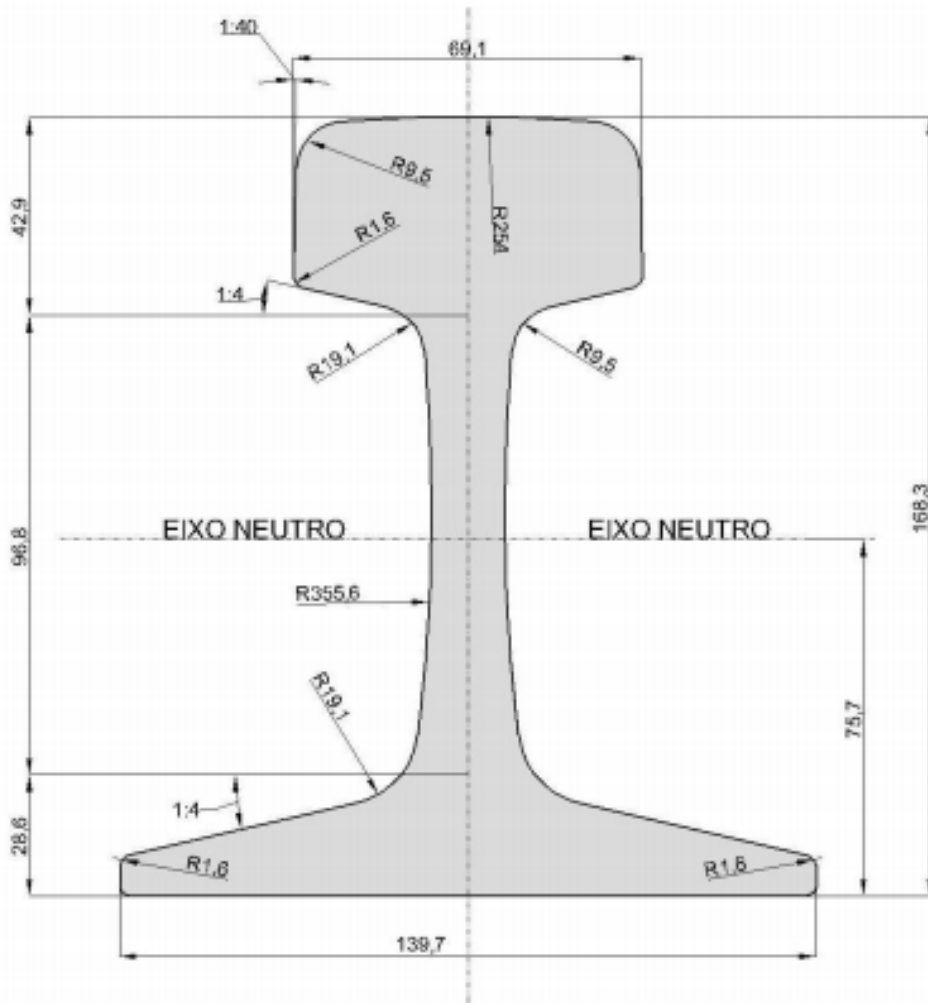
Trilho TR 50



ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL (cm²)	64,19
MOMENTO DE INÉRCIA (cm⁴)	2039,50
MÓDULO DE RESISTÊNCIA DO BOLETO (cm³)	247,40
MÓDULO DE RESISTÊNCIA DO PATIM (cm³)	291,70
PESO POR METRO (kg/m)	50,35

Fonte: PIM-001 – DNIT, [S/D].

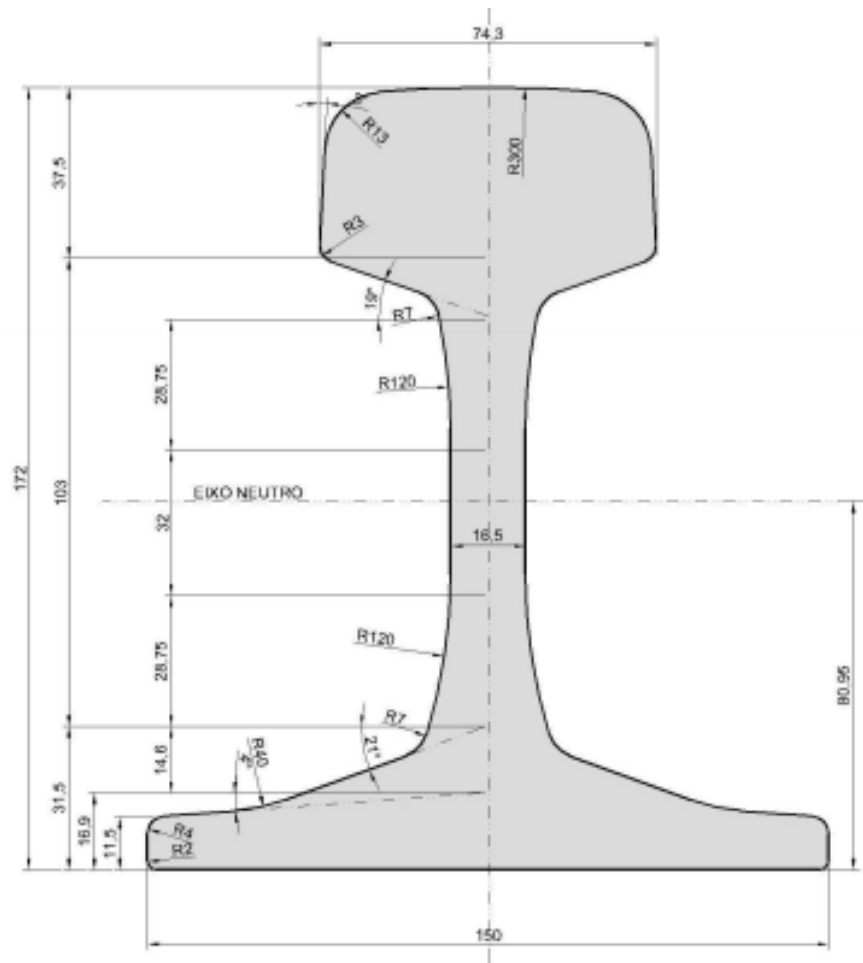
Trilho TR 57



ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL (cm²)	72,58
MOMENTO DE INÉRCIA (cm⁴)	2730,5
MÓDULO DE RESISTÊNCIA DO BOLETO (cm³)	294,80
MÓDULO DE RESISTÊNCIA DO PATIM (cm³)	360,70
PESO POR METRO (kg/m)	56,90

Fonte: PIM-001 – DNIT, [S/D].

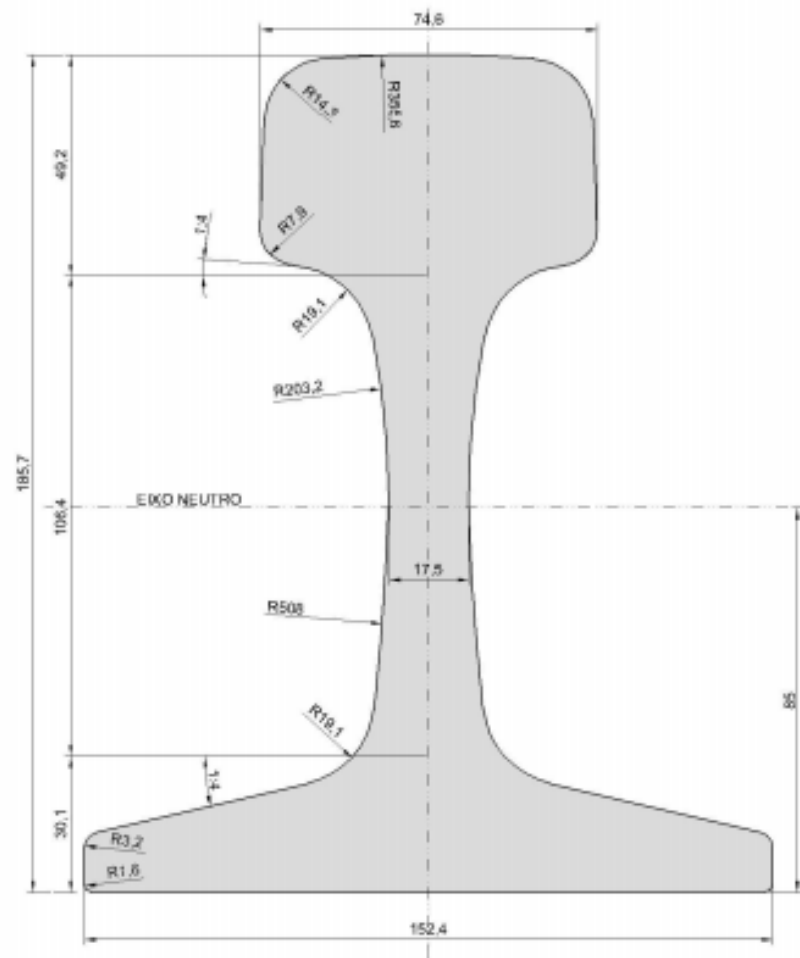
Trilho UIC 60



ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL (cm²)	76,88
MOMENTO DE INÉRCIA (cm⁴)	3055
MÓDULO DE RESISTÊNCIA DO BOLETO (cm³)	335,5
MÓDULO DE RESISTÊNCIA DO PATIM (cm³)	377,4
PESO POR METRO (kg/m)	60,34

Fonte: PIM-001 – DNIT, [S/D].

Trilho TR 68



ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL (cm²)	86,12
MOMENTO DE INÉRCIA (cm⁴)	3850,10
MÓDULO DE RESISTÊNCIA DO BOLETO (cm³)	391,60
MÓDULO DE RESISTÊNCIA DO PATIM (cm³)	463,80
PESO POR METRO (kg/m)	67,56

Fonte: PIM-001 – DNIT, [S/D].

ANEXO B – 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 de Produção 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.