

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E MECÂNICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**Gérson Fernando Rocha Oliveira**

**Caracterização Macro e Microestrutural e levantamento do Perfil de Dureza da região da solda e afetada pela solda de trilhos com diferentes perfis de desgaste soldados por aluminotermia**

Juiz de Fora

2019

**Gérson Fernando Rocha Oliveira**

**Caracterização Macro e Microestrutural e levantamento do Perfil de Dureza da região da solda e afetada pela solda de trilhos com diferentes perfis de desgaste soldados por aluminotermia**

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 Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Henrique Dias Alves

Juiz de Fora

2019

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Oliveira, Gérson Fernando Rocha.

Caracterização Macro e Microestrutural e levantamento do Perfil de Dureza da região da solda e afetada pela solda de trilhos com diferentes perfis de desgaste soldados por aluminotermia / Gérson Fernando Rocha Oliveira. – 2019.

70 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Henrique Dias Alves

Dissertação – UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA, DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E MECÂNICA. CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, 2019.

1. Solda Aluminotérmica. 2. Trilhos ferroviários. 3. Metalurgia. 4. Perfis de boleto desgastados I. Alves, Luiz Henrique Dias, orient.

**Gérson Fernando Rocha Oliveira**

**Caracterização Macro e Microestrutural e levantamento do Perfil de Dureza da região da solda e afetada pela solda de trilhos com diferentes perfis de desgaste soldados por aluminotermia**

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 Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em 20 de Novembro de 2019.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Luiz Henrique Dias Alves - Orientador  
Universidade Federal de Juiz de Fora

---

Raphael Fortes Marcomini  
Universidade Federal de Juiz de Fora

---

Carlos Renato Pagotto  
Universidade Federal de Juiz de Fora

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente aos meus pais, aos quais possuem imensa participação pelo meu ingresso e permanência na Universidade Federal de Juiz de Fora, e diante da realização de um sonho não tenho palavras para expressar de forma adequada meu enorme sentimento de gratidão e admiração.

Em seguida gostaria de agradecer ao meu orientador Prof Dr. Luiz Henrique Dias Alves, bem como ao colega de profissão e amigo Tiago Tepedino, ambos pela orientação e conhecimento repassados ao longo da construção deste trabalho.

A minha namorada Gabriella Garcia, que esteve comigo durante a maior parte da minha graduação, sempre com palavras e gestos de incentivo e motivação. Seu companheirismo certamente tornou muitas desafios da graduação mais possíveis de serem vencidos.

Aos meus amigos, em especial Giovane Cipriano e Henrique Ayres, que foram companhias fundamentais ao longo da caminhada pela graduação em Engenharia Mecânica, se fazendo presente em inúmeros momentos.

A todos os professores que atuaram de forma direta ou indireta para conquista deste objetivo.

"A felicidade só é real quando compartilhada."

## RESUMO

A indústria ferroviária nacional tem buscado constantemente aumento da capacidade de carga transportada, exigindo que os trilhos suportem esforços cada vez mais intensos. Essa demanda sobre a via tem exigido estudos mais aprofundados sobre o contato roda-trilho, especialmente nos pontos onde ocorrem o maior número de falhas, as juntas soldadas. Sabendo da importância de se conhecer melhor os parâmetros envolvidos e o processo relacionados à solda aluminotérmica, este 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 diferentes com perfis de desgastes ou com alturas diferentes empregados para o Heavy Haul, uma vez que a maior ocorrência de soldagem realizadas em ferrovias já existentes acontece dessa forma. O objetivo geral deste trabalho é analisar de forma metalográfica, microestrutural, análise química para garantir uma solda de trilhos com diferentes perfis de desgaste com melhor qualidade e confiabilidade de uma amostra de solda efetuada na Estrada de Ferro Carajás.

Palavras-chave: Solda Aluminotérmica, Trilhos ferroviários, Metalurgia, Perfis de boleto desgastados.

## ABSTRACT

The national railway industry has constantly searched for the raise of transported loads, demanding that the rails bear an increasing amount of stresses. That demand has required in-depth studies of the wheel-rail contact, specially on the points where most of the failure happens: welded joints. Knowing the importance of knowing better the parameters and the processes related to aluminothermic welding, this research is conducted partnered with VALE S.A, to understand the conditions that allow a better final quality of the aluminothermic welding in railway rails with different wear profiles or with different heights used for Heavy Haul, since the greater occurrence of welding carried out in existing railroads happens in this way. The main goal of this research of the characteristics of aluminothermic welding and all the factors that can influence its performance, in addition to metallographic and hardness profiles of weld sample carried out on the Carajás Railroad, to ensure a weld of rails with different wear profiles with better quality and reliability.

Key-words: Thermitic Welding, railroad tracks, metallurgy, different wear profiles.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação das partes componentes do Trilho Vignole . . . . .	16
Figura 2 – Imagem ilustrativa do elementos da Via Permanente . . . . .	17
Figura 3 – Imagem ilustrativa do processo de fabricação do trilho ferroviário . . .	20
Figura 4 – Trilhos unidos por tala de junção . . . . .	21
Figura 5 – Representação da Zona Afetada pelo Calor e Zona de Fusão . . . . .	22
Figura 6 – Processo de Soldagem Aluminotérmico em Trilhos Ferroviários . . . . .	24
Figura 7 – Kit de Soldagem Aluminotérmica: (a) Cadinho, (b) acendedor, (c) pasta refratária, (d) molde, (e) bandeja externa. . . . .	25
Figura 8 – Posicionamento dos trilhos . . . . .	26
Figura 9 – Fixação do molde por cinta metálica . . . . .	26
Figura 10 – Aplicação da pasta refratária nas frestas . . . . .	27
Figura 11 – Pré-aquecimento das juntas soldadas . . . . .	28
Figura 12 – Realização do processo de Soldagem Aluminotérmica . . . . .	29
Figura 13 – Acabamento da junta soldada com esmerilhadora elétrica manual . . .	29
Figura 14 – Defeito <i>Black Hole</i> na região do patim . . . . .	30
Figura 15 – Ocorrência de inclusões na região soldada . . . . .	31
Figura 16 – Fratura em trilho devido a ocorrência de Rechupe . . . . .	32
Figura 17 – Defeito de Lack of Fusion na Solda Aluminotérmica . . . . .	32
Figura 18 – Defeito de Bordamento da solda . . . . .	33
Figura 19 – Falhas vertical e horizontal em soldas aluminotérmicas de trilhos ferroviários . . . . .	34
Figura 20 – Perfil de Dureza de diferentes tipos de soldas aluminotérmicas . . . . .	35
Figura 21 – Zona crítica destacada no diagrama Ferro-Carbono . . . . .	36
Figura 22 – Central de Usinagem Romi D600 . . . . .	40
Figura 23 – Fresas de topo planetárias utilizada na usinagem . . . . .	41
Figura 24 – Face da Amostra sendo desbastada na Romi D600 . . . . .	41
Figura 25 – Durômetro analógico . . . . .	42
Figura 26 – Lixadeira elétrica manual e <i>Flap Disc</i> . . . . .	43
Figura 27 – Chapa aquecedora . . . . .	43
Figura 28 – Reagentes para o ataque químico utilizando Nittal . . . . .	44
Figura 29 – Vidrarias utilizadas no preparo da solução . . . . .	44
Figura 30 – Capela para realização de ataques químicos . . . . .	45
Figura 31 – Bloco padrão de calibração para dureza Rockwell C . . . . .	47
Figura 32 – Macrografia com ataque realizado com Nittal . . . . .	49
Figura 33 – Dimensões ZAC e ZF na Macrografia . . . . .	50
Figura 34 – Gráfico com o perfil de dureza para profundidade de 3 mm, 8 mm, e 13 mm . . . . .	51
Figura 35 – Gráfico com o perfil de dureza para profundidade de 3 mm . . . . .	52

Figura 36 – Gráfico com o perfil de dureza para profundidade de 8 mm . . . . .	52
Figura 37 – Gráfico com o perfil de dureza para profundidade de 13 mm . . . . .	53
Figura 38 – Regiões nas quais foram retiradas amostras para análise micrográfica .	54
Figura 39 – Gráfico de Carbono Equivalente versus Região da Solda . . . . .	57
Figura 40 – Microestrutura da região 1 da amostra, 1000x . . . . .	58
Figura 41 – Ampliações da Região 1 . . . . .	59
Figura 42 – Microestrutura da região 2 da amostra, 1000x . . . . .	60
Figura 43 – Ampliações da Região 2 . . . . .	60
Figura 44 – Microestrutura da região 3 da amostra, 2000x . . . . .	61
Figura 45 – Ampliações da Região 3 . . . . .	62
Figura 46 – Microestrutura da região 4 da amostra, 2000x . . . . .	62
Figura 47 – Ampliações da Região 4 . . . . .	63
Figura 48 – Microestrutura da região 5 da amostra, 2000x . . . . .	63
Figura 49 – Ampliações da Região 5 . . . . .	64

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
<i>AWS</i>	<i>American Welding Society</i>
CNC	Comando Numérico Computadorizado
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
UFJF	Univesidade Federal de Juiz de Fora
<i>WTIA</i>	<i>Welding Technology Institute of Australia;</i>
<i>ZAC</i>	<i>Zona Afetada pelo Calor</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

Al	Elemento químico - Alumínio
C	Elemento químico - Carbono
°C	Unidade de Medida de Temperatura (Graus Celsius)
Co	Elemento químico - Cobalto
Cr	Elemento químico - Cromo
Cu	Elemento químico - Cobre
cm	Unidade de Medida de Comprimento (Centímetros)
Fe	Elemento químico - Ferro
kcal	Unidade Medida de Energia (Quilocalorias)
kg	Unidade de Medida de Massa (Quilogramas)
Mn	Elemento químico - Manganês
Mo	Elemento químico - Molibdênio
m	Unidade de Medida de Comprimento (Metros)
Nb	Elemento químico - Nióbio
Ni	Elemento químico - Níquel
O	Elemento químico - Oxigênio
S	Elemento químico - Enxofre
Sn	Elemento químico - Estanho
Si	Elemento químico - Silício
Ti	Elemento químico - Titânio
V	Elemento químico - Vanádio
W	Elemento químico - Tungstênio
$\varepsilon$	Alongamento
$\sigma_{min}$	Resistência à tração mínima

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>13</b>
1.1	Considerações iniciais . . . . .	13
1.2	Motivação . . . . .	13
1.3	Objetivos . . . . .	14
1.3.1	Objetivo Geral . . . . .	14
1.3.2	Objetivos Específicos . . . . .	14
1.4	Estrutura do Trabalho . . . . .	14
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA . . . . .</b>	<b>16</b>
2.1	Trilhos Ferroviários . . . . .	16
2.1.1	Composição Química . . . . .	17
2.1.2	Trilhos de Composição Perlítica . . . . .	18
2.1.3	Trilhos de Composição Baianítica e Martensítica . . . . .	19
2.1.4	Processo de Fabricação e Manutenção dos Trilhos Ferroviários . . . . .	19
2.2	Processo de Soldagem . . . . .	22
2.2.1	Termos e Conceitos Fundamentais . . . . .	22
2.2.2	Processo de Soldagem Aluminotérmica . . . . .	23
2.2.2.1	Equipamentos e Consumíveis utilizados no processo de Soldagem Aluminotérmica . . . . .	24
2.2.3	Procedimento de Soldagem Aluminotérmica . . . . .	25
2.2.3.1	Defeitos e Falhas em Solda Aluminotérmica . . . . .	29
2.3	Perfil de Dureza . . . . .	34
2.4	Macrografia . . . . .	36
2.4.1	Diretrizes para a realização da Macrografia . . . . .	36
2.5	Dureza <i>Rockwell</i> – ABNT NBR NM ISO 6508-1:2008 . . . . .	38
2.6	Micrografia . . . . .	38
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA . . . . .</b>	<b>40</b>
3.1	Equipamentos Utilizados . . . . .	40
3.1.1	Central de usinagem ROMI D600 . . . . .	40
3.1.2	Durômetro analógico . . . . .	42
3.1.3	Lixadeira elétrica manual . . . . .	42
3.1.4	Chapa Aquecedora Microprocessada . . . . .	43
3.1.5	Vidrarias Laboratoriais para Químicos . . . . .	43
3.2	Macrografia . . . . .	45
3.2.1	Ataque químico à quente . . . . .	45

3.2.2	Ataque químico com Nital . . . . .	46
3.3	Ensaio de Dureza Rockwell C . . . . .	46
3.4	Análise Química da Amostra . . . . .	47
3.4.1	Procedimento Experimental . . . . .	48
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES . . . . .</b>	<b>49</b>
4.1	Macrografia . . . . .	49
4.2	Perfil de Dureza . . . . .	50
4.3	Análise Química da Amostra . . . . .	53
4.4	Micrografia . . . . .	58
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES . . . . .</b>	<b>65</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>67</b>
	<b>ANEXO A – TERMO DE AUTENTICIDADE . . . . .</b>	<b>70</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações iniciais

O sistema ferroviário brasileiro é imprescindível para o transporte no país, especialmente para cargas pesadas. Com os adventos tecnológicos em contante desenvolvimento em nossa sociedade industrial, busca-se por condições onde o transporte possa ser realizado em um tempo cada vez menor, transportando-se mais carga. Essas condições de operação para atender as demandas econômicas industriais acabam por impor maior desgaste às vias e ao maquinário. O contato roda trilha, é o conjunto que apresentara maior deterioração devido a cargas muito elevadas aplicadas a superfícies muito pequenas. Por razões de maior eficiência e segurança no transporte ferroviário, o estudo da região da solda nos trilhos da ferrovia é fundamental.

Pesquisas vêm sendo realizadas nos seguintes campos: novos materiais, alteração das características do aço, incluindo a purificação e aumento da dureza, desenvolvimento de novos perfis de trilha, dinâmica da interação roda-trilha, substituição das emendas com talas por trilhos longos soldados (TLS) e planos de esmerilhamento de trilhos. O emprego dessas novas técnicas e alternativas possibilitam a aplicação de perfis com contato roda-trilha otimizados. O que estes estudos buscam é um meio de aumentar a vida útil dos trilhos, adiando ao máximo sua troca e assim reduzindo os custos de manutenção, já que a vida útil dos trilhos está relacionada com seu limite de desgaste e trincas (BRINA, 1979).

A Universidade Federal de Juiz de Fora, liderada pelos professores Dr. Luiz Henrique Dias Alves e Dr. Moisés Luiz Lagares Júnior, em parceria com a USP, ficou responsável pela proposta “Caracterização e modelagem estatística preditiva das soldas e regiões afetadas pela solda de trilhos”, englobando as soldas aluminotérmica e por centelhamento (Flash-Butt Weld). Porém este trabalho irá se ater e contribuir na caracterização da solda aluminotérmica para trilhos com diferentes alturas ou também denominados trilhos com diferentes perfis de desgaste.

## 1.2 Motivação

O projeto tem sua motivação atrelada a importância do desenvolvimento da capacidade de carga e redução do tempo do transporte ferroviário brasileiro. Para este trabalho, a caracterização de soldas aluminotérmicas em trilhos com diferentes perfis de desgaste ou diferentes alturas é uma especificidade que deve ser estudada de forma minuciosa uma vez que são as juntas soldadas de maior ocorrência ao longos das vias, uma vez que para substituição ou manutenção da mesma, é realizado o processo de soldagem aluminotérmica, diferentemente da instalação que ocorre com soldagem por centelhamento.

Por fim, este trabalho busca contribuir como mais uma fonte da literatura que poderá ser consultada em trabalhos futuros correlacionados ao tema, uma vez que atualmente este tópico apresenta pouca literatura disponível. Além de contribuir como um modelo de análise mais sofisticada e precisa dos parâmetros de soldagem para soldas aluminotérmicas.

### 1.3 Objetivos

#### 1.3.1 Objetivo Geral

Através da preparação da amostra e realização dos ensaios, tem-se como objetivo geral a caracterização metalúrgica, química e das propriedades mecânicas das soldas e regiões afetadas pela solda de trilhos soldados por aluminotermia com diferentes perfis de desgaste ou diferentes alturas, afim de obter os melhores parâmetros de soldagem.

#### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Estudar o processo de soldagem aluminotérmica de trilhos ferroviários;
- Contribuir para o processo de desenvolvimento um modelo capaz de prever os níveis que os parâmetros de processo devem assumir para garantir uma solda de trilhos com diferentes perfis de desgaste otimizada, com melhor qualidade e confiabilidade, mitigando assim falhas e/ou fraturas em campo.
- Desenvolvimento de um trabalho que possa ser utilizado como base para trabalhos futuros do projeto “Cátedra Roda Trilho” da VALE.

### 1.4 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho integra 5 capítulos. No primeiro capítulo é feita uma introdução ao tema, apresentando uma contextualização geral da relevância científica e econômica do assunto abordado, justificativas para a realização do trabalho e os objetivos pretendidos e alcançados.

O segundo capítulo compõe uma revisão bibliográfica que fundamenta os principais princípios teóricos que embasam o estudo e experimentos posteriormente realizados. Nesta etapa são detalhados os conceitos referentes a trilhos ferroviários, processo de soldagem aluminotérmica e macrografia.

No terceiro capítulo é descrito como foram realizados os métodos e procedimentos experimentais, lixamento, ataque químico, ensaio de dureza e macrografia, assim como os equipamentos utilizados para cumprir esta etapa e os desafios encontrados durante o desenvolvimento do trabalho.



Já no quarto são apresentados os resultados, dispostos em forma de figuras, tabelas e gráficos obtidos através dos procedimentos experimentais realizados, e ainda uma breve discussão em cima das informações levantadas.

Por fim, no quinto capítulo é exposta uma conclusão geral sobre o trabalho desenvolvido e possíveis aspectos a serem aperfeiçoados e/ou desenvolvidos em trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, uma revisão bibliográfica composta por fundamentos teóricos que sustentam o escopo deste trabalho está disposta a seguir.

### 2.1 Trilhos Ferroviários

Os trilhos ferroviários podem ser considerados como um dos elementos que compõe a superestrutura de uma via permanente, que ainda é composta por dormentes, lastros, sistemas de fixação dos trilhos nos dormentes e sinalizações.

Segundo STEFFLER (2013) o trilho pode ser considerado o elemento nobre da superestrutura, vem sofrendo uma evolução permanente desde os primórdios das estradas de ferro até os dias atuais, com o grande desenvolvimento da tecnologia do aço. A forma e o comprimento evoluíram gradativamente até atingir os perfis modernos de grande seção e também permitir as pesadas cargas por eixo dos trens modernos.

Os trilhos são fabricados de aço carbono pelo processo de laminação, com comprimento de 12 a 36 metros e sua função é permitir o tráfego bem como guiar as rodas dos trens - locomotivas, carros e vagões, constituindo assim, a superfície de rolamento de uma via férrea (MACÊDO, 2009). Estes componentes são presos aos dormentes e transferem para estes os esforços do material rodante da via. Além disso, os trilhos podem ser unidos entre si através de talas ou podem ser soldados. A solda é mais utilizada e recomendada, já que ela não gera as descontinuidades que acontece nos casos das talas.

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

A Figura 1 representa de forma bem definida a três principais regiões do trilho, sendo o boleto, a alma e o patim, e suas respectivas funções.

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

Figura 1 – Representação das partes componentes do Trilho Vignole

Fonte: (STEFFLER, 2013)

Para uma melhor caracterização da via permanente, algumas considerações acerca dos demais elementos que a compõe serão descritos da seguinte forma. Conforme mencionado em (HENRIQUE, 2006), os dormentes são vigas posicionadas transversalmente em relação ao trilho que tem como principais funções transferir a carga recebida ao lastro, manter a bitola, restringir os movimentos do trilho e amortecer as vibrações. Os materiais empregados para confecção dos dormentes são madeira, concreto, aço e polímeros. A madeira é a mais usual por ser de fácil manuseio e atender a toda as funções para qual este componente se propõe. As dimensões dos dormentes variam de acordo com a dimensão da bitola e o espaçamento entre eles.

Lastros são geralmente compostos por um material granular idealmente de 15 a 45 centímetros de espessura, que fica logo acima do solo. Suas principais funções são: distribuir ao solo os esforços, dar elasticidade a via durante a passagem de veículos, corrigir as irregularidades da infraestrutura formando uma superfície uniforme para a colocação dos dormentes, impedir o deslocamento dos dormentes e manter a superestrutura drenada (BRINA, 1983). Atualmente, os materiais utilizados para desempenhar tais funções são a pedra britada e a escória de alto forno.

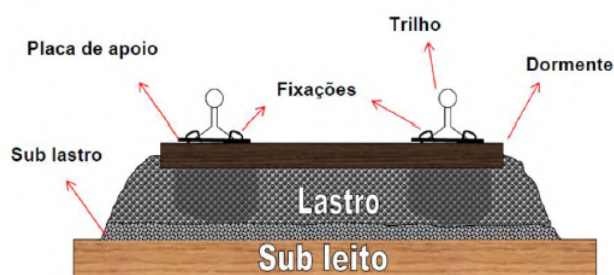


Figura 2 – Imagem ilustrativa do elementos da Via Permanente

Fonte: (CÂMARA, 2016)

### 2.1.1 Composição Química

Em relação a composição química, os trilhos podem apresentar variações em sua composição de acordo com a atividade desempenhada, bem como a data de sua fabricação, uma vez que com o advento tecnológico diversas pesquisas foram fundamentais para gerar novas diretrizes acerca da composição química de trilhos ferroviários. Os principais componentes do aço são o ferro, carbono, manganês, silício, fósforo e enxofre.

Entre os principais tipos de tratamento térmico utilizados para trilhos ferroviários, destacam-se os seguintes processos:

- Boleto endurecido (*Head Hardened ou HH*);

- Boleto profundamente endurecido (*Deep Head Hardened ou DHH*);
- Trilho completamente tratado (*Full Heat Treated ou FHT*).

De acordo com a indicação estabelecida pelo nome dos tratamentos térmicos citados acima, a principal diferença entre eles se dá pelo alcance da profundidade atingida pelo processo de endurecimento. Para os trilhos *HH* a profundidade da região endurecida é de aproximadamente 30 mm. No trilho *DHH* a dureza máxima ocorre a uma profundidade de até 45 mm, enquanto no trilho *FHT* toda a seção transversal é tratada termicamente. Os trilhos *DHH* e *FHT* possuem um perfil mais gradual para a diminuição de dureza superficial do que os trilhos *HH*, no entanto os tratamentos térmicos proporcionam valores de dureza similares em profundidades entre 5-10 mm (MARICH, 1994).

É válido ressaltar que, tais processos garantem os valores de dureza do trilho na faixa correspondente indicada no início de sua instalação, pois durante sua vida útil o contato roda trilho acaba por ocasionar o processo de encruamento, que pode alterar sua dureza superficial.

Atualmente, aços com microestrutura perlítica têm sido amplamente utilizados, já que a perlita é um dos materiais compósitos mais interessantes quando nos atentamos para suas propriedades, pois agrega a matriz dúctil (ferrita) e um reforço alinhado a alta dureza (cementita). Embora não seja uma estrutura caracterizada por elevada tenacidade à fratura, tem elevada dureza, alta resistência mecânica, resistência ao desgaste e resistência à fadiga e tenacidade à fratura bastante razoáveis a empregabilidade para as atuais condições para o transporte ferroviário nacional.

Abaixo será apresentado, na tabela 2, a composição química do trilho de aço de qualidade corrente da ABNT.

Tabela 1 – Classificação de composição química do trilho

Qualidade	C [%]	Mn [%]	Si [%]	P <sub>máx</sub> [%]	S <sub>máx</sub> [%]	$\sigma_{mín}$ [MPa]	$\varepsilon$ [%]
1-A	0,50-0,70	0,60-1,00	0,07-0,35	0,05	0,05	680	10
1-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	680	9
2-B	0,55-0,75	1,30-1,70	0,10-0,50	0,05	0,05	680	12
3-A	0,60-0,80	0,80-1,30	0,10-0,50	0,05	0,05	680	8
3-B	0,55-0,72	1,30-1,70	0,10-0,50	0,05	0,05	680	10

Fonte: (Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR9608)

### 2.1.2 Trilhos de Composição Perlítica

Os trilhos perlíticos se caracterizam por possuírem um percentual de carbono entre 0,6% e 0,9% e teores consideráveis de manganês e cromo. As microestruturas desses trilhos

são em forma de lamelas intercaladas de ferrita e cementita. A presença de colônias destas lamelas em várias orientações e espaçamentos confere ao material grande resistência ao desgaste (CALLISTER, 2012).

De acordo com Roldo (1998), trilhos perlíticos são materiais com microestrutura perlítica que não possuem ferrita livre. A dureza deste tipo de material está entre 260 e 400 HB e resistência a tração de 900 a 1200 MPa na condição de como fabricado. Além disso, de acordo com Silva (1995), o acréscimo da quantidade de perlita atua positivamente sobre a resistência mecânica conferindo uma melhor resistência ao desgaste, porém ocasionando um efeito prejudicial na tenacidade e na ductibilidade.

### 2.1.3 Trilhos de Composição Baianítica e Martensítica

Os trilhos baianíticos possuem baixo teor de carbono (0,02% - 0,4%) com significativas adições de Mn e Si, além de Cr, Mo, Ni e B. A resistência mecânica dos trilhos baianíticos está entre 820-1400 MPa, com superior tenacidade à fratura e resistência à propagação de defeitos. Estes trilhos são utilizados, preferencialmente, em vias de alta velocidade ou em curvas de ferrovias para o transporte de carga pesada. Já os trilhos martensíticos por sua vez exibem boa resistência ao impacto e maior capacidade de encruamento com satisfatória resistência à fadiga.

Entretanto, os trilhos baianíticos e martensíticos geralmente possuem menor ductibilidade do que os trilhos perlíticos e a utilização destes materiais em ferrovias de cargas pesadas ainda está sendo avaliada em pesquisas e estudos (AGLAN, 2004).

### 2.1.4 Processo de Fabricação e Manutenção dos Trilhos Ferroviários

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

1. Aço líquido do autoforno forma os lingotes ou lingotamento contínuo (grandes vigas de aço);
2. Os lingotes são cortados em seções definidas para formarem os blooms;
3. Cada bloom passa por uma série de roletes que vai, a cada ciclo, dando forma a geometria final requerida;

4. Ao final do roletamento o perfil do trilho está pronto e suas pontas são cortadas;
5. Desempeno feito pela passagem do perfil por grandes rodas devido à tensão residual.

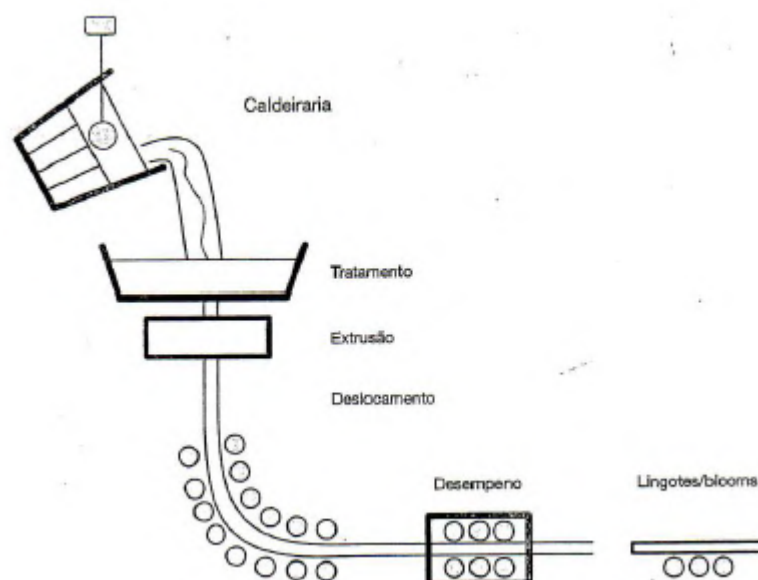


Figura 3 – Imagem ilustrativa do processo de fabricação do trilho ferroviário

Fonte: (STEFFLER, 2013)

Já em relação ao processo de manutenção dos trilhos ferroviários, da mesma forma que sua fabricação, o desenvolvimento tecnológico permitiu que mudanças fossem realizadas ao longo do tempo para que o Via Permanente permaneça sob condições de operação por mais tempo, visando menor custo e simplicidade das ações de substituição e/ou reparo dos trilhos ou demais componentes.

Mariano (2017) descreve que em estruturas de Via Permanente mais antigas, os trilhos eram unidos entre si por um par de talas de junção. Esse sistema era usado por ser de fácil e rápida instalação, baixo custo e permitia espaçamento, ou também denominado de *gap* entre os trilhos. O *gap* era destinado a compensar a dilatação dos trilhos nas temperaturas mais altas, evitando problemas de flambagem. Porém, este mesmo *gap* era responsável por pequenos impactos entre as rodas e as “quinas” dos trilhos, causando, além de desconforto sonoro, deformação cíclica tanto nas rodas quanto nos trilhos, além de obrigar que os trilhos tivessem furos para que pudessem ser “aparafusados”, concentrando tensão e ferrugem nessas cavidades. Por questões de planejamento e custos de manutenção a ocorrência destes *gaps* ao longo da via permanente foi gradativamente reduzindo com o passar do tempo, até atingirmos o procedimento atual de instalação.



Figura 4 – Trilhos unidos por tala de junção

Fonte: Autor

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

1. 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;
2. 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;
3. Em seguida os trilhos longos são soldados pelo processo de Solda Aluminotérmica (*Thermite Welding*, em inglês), processo em foco de estudo neste trabalho, que será detalhado posteriormente.

Para as ocasiões de manutenção ou substituição de trilho já instalado em Via permanente, utiliza-se novamente o processo de Soldagem Aluminotérmica, porém para a solda de um trilho de perfil já desgastado com um de perfil novo, circunstância a qual motiva o presente trabalho.

## 2.2 Processo de Soldagem

Segundo *AWS – American Welding Society*, a solda pode ser definida como a coalescência (junção em um só corpo de partes que estavam separadas) localizada de metais ou não metais produzidos ou pelo aquecimento dos materiais até a temperatura de soldagem (com ou sem aplicação de pressão) ou somente pela aplicação de pressão, com ou sem o uso de material de adição. Sendo a soldagem o processo de união que produziu a solda.

### 2.2.1 Termos e Conceitos Fundamentais

Nesta subseção serão definidos, alguns termos e siglas referentes a conceitos de maior importância no que se refere ao processo de solda (POSSALI ,2017).

- Metal de base: é o material que constitui as partes a unir (o metal de cada lado de uma junta);
- Material de adição: É o material que será usado como enchimento no processo de soldagem, capaz de preencher as folgas entre as superfícies a unir. O material adicional é de mesma natureza das partes e será utilizado para garantir a continuidade de propriedades, no caso da soldagem por fusão;
- Zona Afetada pelo Calor (ZAC): É a porção de metal adjacente a região soldada, afetada pelo calor do processo de soldagem, onde ocorrem as principais transformações de fases, e decorrente destas, as discontinuidades;
- Linha de Interface: Linha exata que se sucedeu a soldagem (linha limite da ZAC).

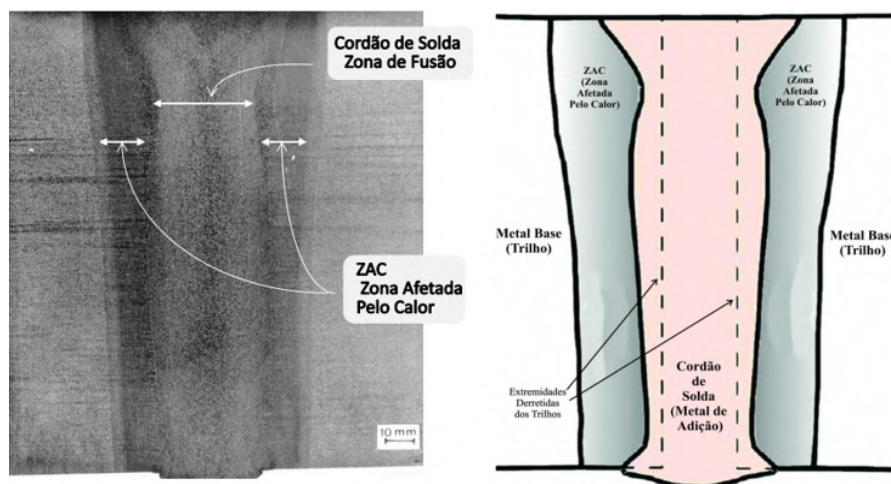


Figura 5 – Representação da Zona Afetada pelo Calor e Zona de Fusão

Fonte: VALE [S/D]



## 2.2.2 Processo de Soldagem Aluminotérmica

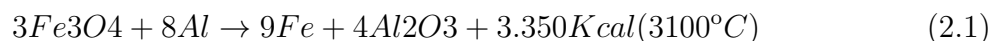
O processo de soldagem aluminotérmica foi criado pelo químico Hans Goldschmidt no final do século XIX, ao perceber que a reação exotérmica entre o pó de alumínio e um óxido metálico pode ser iniciada por uma fonte externa de calor gerando altas temperaturas e grandes quantidades de calor. Assim é possível realizar a união de peças metálicas a partir do calor e do metal produzidos da reação química entre o óxido de ferro e o alumínio.

Esse processo de soldagem tem sido amplamente utilizado em aplicações específicas, nos quais outros processos de soldagem existentes não apresentam flexibilidade e condições adequadas para realização da solda no campo.

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

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

De acordo com a literatura (Bracarense et al. 2011), a reação mais utilizada para descrever o processo de reação aluminotérmica é esta apresentada a seguir.



Segundo Possali (2017), a temperatura teórica de 3100 °C é reduzida por perdas de calor no cadinho, por radiação e pelo auxílio de componentes não reagentes normalmente adicionados à mistura, para que se consiga temperatura de cerca de 2.480 °C. Isto é muito importante, pois o alumínio vaporiza a 2.500 °C. Por outro lado, a temperatura não pode ser muito baixa, pois a escória de alumínio se solidifica a 2.040 °C. Aditivos também podem ser usados para aumentar a fluidez e baixar a temperatura de solidificação da escória. Caso necessário, é possível adicionar elementos de liga ao metal de adição para a melhoria das propriedades mecânicas.

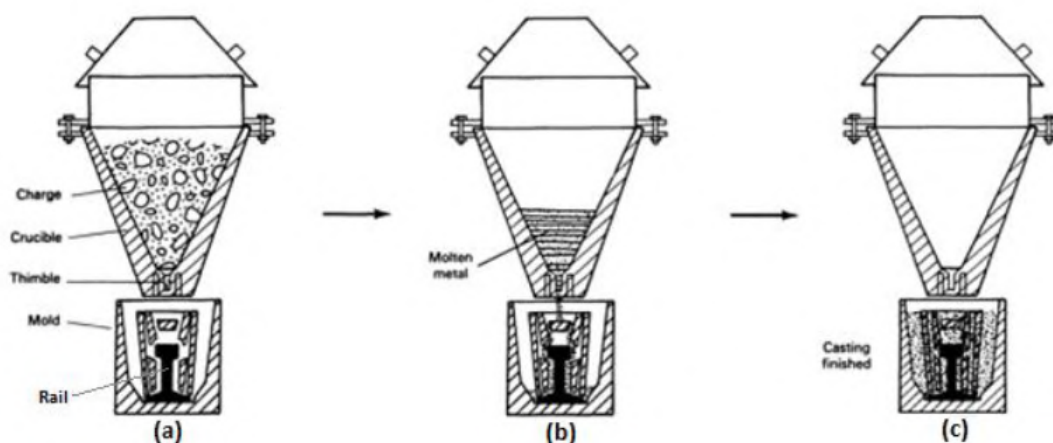


Figura 6 – Processo de Soldagem Aluminotérmico em Trilhos Ferroviários

Fonte: (SCHWARTZ, 1993)

### 2.2.2.1 Equipamentos e Consumíveis utilizados no processo de Soldagem Aluminotérmica

Os equipamentos e materiais utilizados na soldagem aluminotérmica são, basicamente, o cadinho, o molde, o sistema de pré-aquecimento, a mistura aluminotérmica e a pasta de vedação. A seguir uma breve descrição da função de cada um destes será apresentado, acompanhados de uma figura com a representação do Kit para realização da Solda Aluminotérmica.

- **Cadinho:** O cadinho é um recipiente com tampa, em formato de forno, onde na maioria das aplicações para Solda Aluminotérmica é feito de areia silicosa ligada quimicamente por uma resina fenólica. É no cadinho que será depositada a mistura aluminotérmica, que depois de fundida, irá se direcionar para o molde através da abertura em seu fundo, que no início do processo encontra-se tampada com uma fina chapa de metal que é também fundida pelo calor de reação exotérmica envolvido no processo.
- **Molde:** O molde tem função de forma e guia para o aço líquido que passa através da abertura inferior do cadinho. Este molde é dividido em três partes principais, uma para cada lado do trilho e uma base para o patim. O molde é constituído por areia silicosa juntamente com aditivos para aumentar a resistência a quente da areia de moldagem. Além disso o molde precisa possuir alta refratariedade para resistir às elevadas temperaturas, baixa expansão térmica para não dilatar e quebrar, permeabilidade suficiente para permitir a saída dos gases, pois estes podem ser responsáveis por causar diversos defeitos a solda.
- **Sistema de pré aquecimento:** Este sistema é utilizado para realizar o pré aquecimento do boleto como forma de preparação para receber a mistura aluminotérmica a altas temperaturas. O gás mais comumente usado é o ar propano.

- Pasta de vedação: Esta pasta é utilizada para fazer a vedação de possíveis aberturas ou frestas entre o molde e o trilho. Além de impedir o vazamento da mistura aluminotérmica, a mesma ainda reduz as perdas de energia térmica, dificultando a dissipação da energia térmica liberada para fora do conjunto trilho e molde. Essa pasta é formada por areia silicosa, argila refratária, etilenoglicol entre outros aditivos.
- Mistura aluminotérmica: Mistura formada por óxido de ferro, alumínio em pó, pó ou limalha de ferro, ligas metálicas e fundentes que geram a liga metálica e escória. Após ignição inicial, a mistura sofre uma reação de combustão que se autopropaga até liquefazer (consumir) toda a mistura presente inicialmente dentro do cadinho.



Figura 7 – Kit de Soldagem Aluminotérmica: (a) Cadinho, (b) acendedor, (c) pasta refratária, (d) molde, (e) bandeja externa.

Fonte: (RAILTECH)

### 2.2.3 Procedimento de Soldagem Aluminotérmica

Nesta subseção do trabalho o processo de Solda Aluminotérmica será descrito de forma detalhada ao longo de todas as suas etapas, bem como a presença de imagens com o objetivo de complementar a descrição textual.

1. Preparação dos trilhos e via permanente: Antes de se iniciar de fato o processo de soldagem aluminotérmica existem alguns procedimentos pré solda que devem ser seguidos para a realização de um procedimento com maior qualidade final. Os principais que merecem destaque são: a verificação da integridade física dos trilhos, o afrouxamento de aproximadamente 2 metros da fixação adjacente a junta soldada e a definição da folga ou *gap* entre os mesmos. Este parâmetro conforme já comentado por outros trabalhos pertencentes ao projeto Cátedra Vale Soldas, é de fundamental importância para garantia da qualidade final da junta soldada.

2. Alinhamento e grampeamento dos trilhos: Nesta etapa é realizado o posicionamento dos trilhos a partir do *gap* definido anteriormente e assim algumas premissas de posicionamento e grampeamento devem ser respeitadas. O alinhamento do topo dos boletos e a perpendicularidade da fixação com a superfície do chão deve ser garantida. Feito isso o grampeamento poderá iniciar porém nas extremidades no trilho onde não está a junta a ser soldada. Ver Figura 8.



Figura 8 – Posicionamento dos trilhos

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

3. Fixação do molde fazendo o uso de cintas metálicas: Nesta etapa, após finalizadas todas as etapas de preparação e posicionamento o molde será colocado ao redor da junta a ser soldada, e para garantir uma fixação adequada que evite que os componentes envolvidos se desloquem ou se movimentem durante a realização do cordão de solda. Ver Figura 9.



Figura 9 – Fixação do molde por cinta metálica

Fonte: Equipe do projeto (EFC, 2016)

4. Calafetagem de frestas e aplicação da pasta refratária: Concluído o posicionamento, por mais cautela e atenção que sejam durante os procedimentos, pode ser que ainda exista a presença de frestas, pequenas perfurações ou buracos no conjunto. Uma prática comum mas não obrigatória é a calafetagem utilizando papel de possíveis pontos de vazamento ou aberturas, para posteriormente a aplicação de pasta refratária, esta por sua vez considerada mandatória no procedimento. Ver Figura 10.



Figura 10 – Aplicação da pasta refratária nas frestas

Fonte: Equipe do projeto (EFC, 2016)

5. Pré aquecimento da junta a ser soldada: A operação de pré-aquecimento é uma das mais importante no processo de soldagem aluminotérmica, já que nessa etapa elimina-se a umidade e reduz de certa forma o choque térmico, já que o metal liquefeito entra em contato direto com o trilho. Além disso, um bom pré-aquecimento melhora a penetração do metal de solda e aumenta a região de diluição. Desse modo, é garantido que a soldagem fique mais homogênea. É importante que todas as partes do perfil do trilho seja aquecido de forma homogênea, normalmente a temperatura de pré-aquecimento chega em torno de 950 a 1000 °C. Ver Figura 11.
6. Posicionamento do cadinho e execução da reação aluminotérmica: Após o processo de montagem dos equipamentos para soldagem, a mistura aluminotérmica é inserida no cadinho com o auxílio de um acendedor e então inicia-se a reação aluminotérmica. De acordo com Schwartz (1993), o calor liberado da própria reação e temperatura do aço liquefeito aquece a chapa de aço que há no fundo do cadinho, de modo que essa entre no estado líquido permitindo abrir uma cavidade para sangria. Desse modo, a liga metálica líquida escorrerá e preencherá o molde completamente e os canais de alimentação. A escória que também é produzida durante a reação deve ser descartada, isso ocorre pois há uma separação física entre o aço líquido e a escória



Figura 11 – Pré-aquecimento das juntas soldadas

Fonte: Equipe do projeto (EFC, 2016)

devido a diferença de densidade, já que essa é menos densa que o aço. Logo ela é expelida para fora nas bandejas coletoras, através dos furos laterais do cadinho. 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. Porém, parte da extremidade não entra em fusão. 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, última etapa da Figura 9. Porém, parte da extremidade não entra em fusão, mas é aquecida a temperaturas muito elevadas. Essa área, denominada de Zona Afetada pelo Calor (ZAC). Dependendo das condições de temperatura atingida a extensão da ZAC pode variar bem como suas características mecânicas e/ou sua microestrutura podem ser afetadas (SCHWARTZ, 1993). Ver Figura 12.

7. Resfriamento e retirada da conta e molde metálicos: Após ocorrer a reação térmica e a mistura alcançar a junta na totalidade de sua extensão e o processo se encerrar é recomendado que sejam aguardados de 5 a 10 minutos para iniciar o processo de retirada da cinta metálica e dos moldes. Durante essa retirada é imprescindível realizá-la com o mínimo de impactos e vibrações possíveis.
8. Acabamento da junta soldada: Após o processo de soldagem é realizada uma inspeção visual para verificar a qualidade da solda. Em seguida é feita a remoção de rebarba fazendo o uso de rebarbadoras hidráulicas e esmerilhadoras manuais elétricas.



Figura 12 – Realização do processo de Soldagem Aluminotérmica

Fonte: Equipe do projeto (EFC, 2016)



Figura 13 – Acabamento da junta soldada com esmerilhadora elétrica manual

Fonte: (MAKINEN, Railway Technology)

### 2.2.3.1 Defeitos e Falhas em Solda Aluminotérmica

Nesta subseção, será discutido acerca dos defeitos e falhas mais comuns atrelados ao processo de soldagem por aluminotermia. Ainda que não seja o foco principal do

trabalho, é de extrema importância que sejam avaliados as circunstâncias onde o processo não ocorreu de forma ideal, ocasionando defeitos e/ou falhas que para a aplicação em trilhos ferroviários não podem ocorrer quando tratamos de processos de solda aluminotérmica.

Embora todos os efeitos de soldagem aluminotérmica tenham efeito similar na vida em fadiga das juntas (aumento da tensão local e redução do desempenho frente ao carregamento cíclico), as origens dos defeitos podem ser diferentes (ROSA, 2008).

Alguns defeitos são causados por procedimentos de soldagem ou material de consumo inadequados, como os holes, inclusões de escória ou areia e bordamento da solda. Outros são gerados por parâmetros de soldagem incorretos como rechupes, solda-fria e segregação. Ocorrem, ainda, variações no perfil da solda, geradas por severas condições de serviço, que também são interpretadas como defeitos. A seguir são apresentados alguns dos principais tipos de defeitos observados em soldas aluminotérmicas de acordo com o documento do Welding Technology Institute of Australia (WTIA, 2006).

- *Black Holes*

Os chamados *Black Holes* podem ser facilmente observados através de inspeção visual, uma vez que sua principal característica é a presença de um poro isolado na região do canal de alimentação da solda. Sua causa mais comum está relacionada com a formação de gases oriundos do material de vedação. Caso o *gap* da solda esteja mal dimensionado, este defeito é mais propenso de ocorrer.



Figura 14 – Defeito *Black Hole* na região do patim

Fonte: (WTIA, 2010)

- *Inclusões*

As inclusões são definidas como a presença de material não constituinte do aço na solda solidificada. As inclusões de escória são bem comuns, sendo defeitos bastante



perigosos à integridade da solda, pois podem nuclear trincas de fadiga. Geralmente estes defeitos são introduzidos por procedimentos incorretos de corte, alinhamento e limpeza dos trilhos, umidade na porção aluminotérmica, falhas no pré aquecimento da junta e escória retida vazando junto com o metal para o molde.

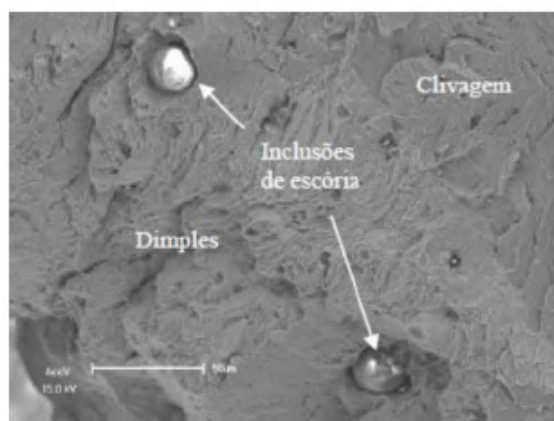


Figura 15 – Ocorrência de inclusões na região soldada

Fonte: (JULIO, 2008)

Outro tipo de inclusão é a inclusão de areia, que ocorre quando o material de vedação entra em contato com a chama durante o pré-aquecimento ou com o metal líquido durante o vazamento. A maior incidência do defeito ocorre na soldagem de um trilho novo com um trilho desgastado, uma vez que pode haver penetração de areia devido ao desnível do trilho usado, o que o faz ter destaque para este trabalho. O material silicoso da pasta de vedação pode atingir temperaturas de vitrificação e se incrustar na superfície do trilho (ROSA, 2008).

- Contração excessiva de solda (Rechupe)

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, passando pelo processo de cristalização, 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 16, ilustrando um caso de região com rechupe fraturada. (SKYTTEBOL, 2005)



Figura 16 – Fratura em trilho devido a ocorrência de Rechupe

Fonte: (Railway Investigation Report R14C0114)

- 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 17 tem-se uma representação ilustrativa de "espaços" entre o cordão de solda e o material do trilho (LOF). (WTIA, 2015)

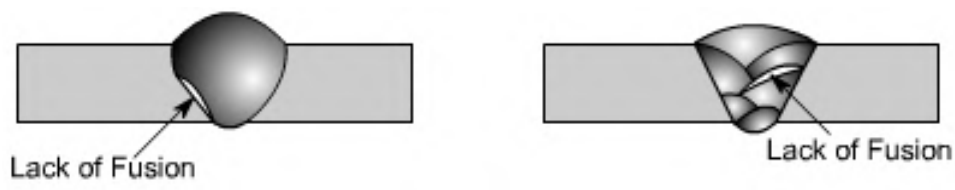


Figura 17 – Defeito de Lack of Fusion na Solda Aluminotérmica

Fonte: (Welding Defects, Manufacturing Process)

- 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)

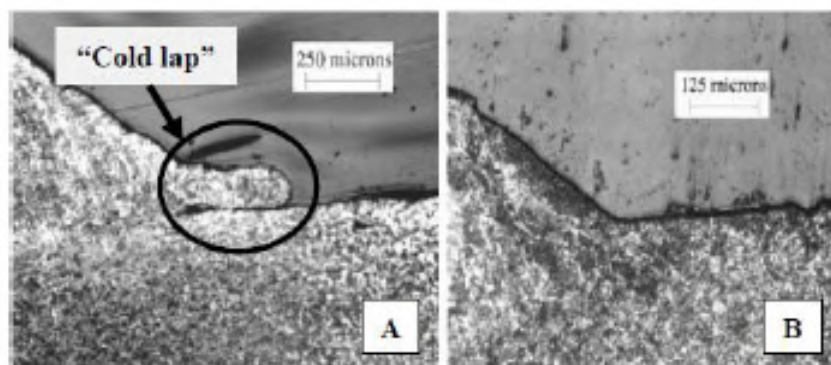


Figura 18 – Defeito de Bordamento da solda

Fonte: (LAWRENCE, 2004)

Uma vez que foram demonstrados os principais tipos de defeitos que podem ocorrer no processo de soldagem aluminotérmica, ainda é pertinente uma breve explicação acerca dos principais tipos de falhas em soldas aluminotérmicas.

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

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

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

As fraturas horizontais envolvem o desenvolvimento de uma trinca de fadiga horizontal na qual se inicia por defeitos de superfície ou perto da superfície no colar de solda, geralmente nas regiões superior e central da alma. Estas falhas na solda são mais preocupantes em termos de risco de segurança se comparadas às falhas verticais, já que

a direção do crescimento da trinca é alterada assim que a ponta da trinca ultrapassa o colar de solda, virando seu caminho de crescimento para o boleto ou para o patim. Esse comportamento pode resultar em perda de uma parte significativa do trilho, e conseqüentemente um grande risco de descarrilamento. Os fatores que afetam a iniciação e a propagação deste modo de fratura são bem entendidos, com a maioria das falhas ocorrendo em curvas ou em trechos de reta propensas a instabilidades nos truques da composição (*vehicle hunting*). Elevadas tensões verticais cíclicas devido à flexão transversal, e tensões residuais verticais, estão entre os parâmetros mais importantes que influenciam a nucleação e o crescimento das fraturas horizontais.

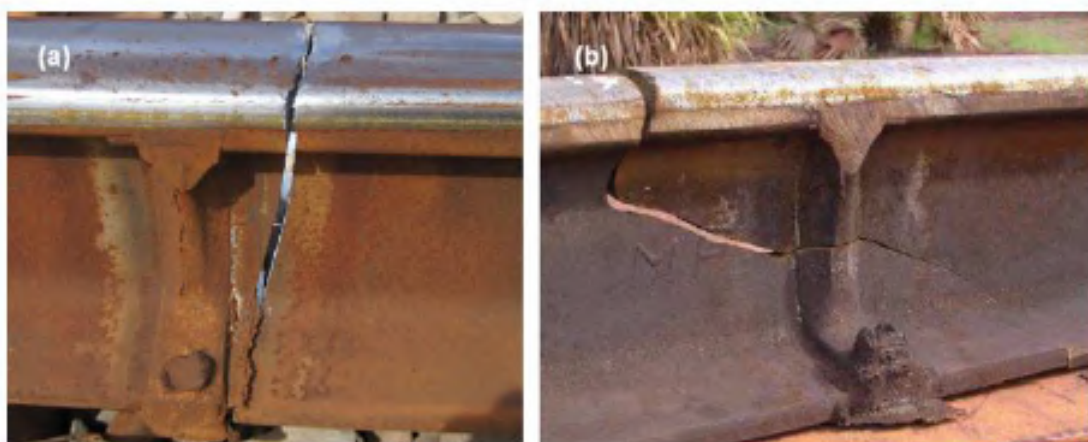


Figura 19 – Falhas vertical e horizontal em soldas aluminotérmicas de trilhos ferroviários

Fonte: (SALEHI, 2011)

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

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

### 2.3 Perfil de Dureza

Conforme descrito no título desta monografia, uma das principais formas de caracterização e análise de resultados para os corpos-de-prova de juntas soldadas por

aluminotermia é a construção do Perfil de Dureza ou Mapa de Dureza.

Devido à sua estrutura de metal fundido, a solda possui, invariavelmente, propriedades mecânicas inferiores que às do trilho. No entanto, são os parâmetros de soldagem em conjunto com a mistura aluminotérmica que determinam estas propriedades. O 47 exame de procedimento de soldagem deve abordar a distribuição de dureza ao longo da solda, de particular interesse são os níveis de dureza na zona de fusão e na ZAC, além do tamanho da própria ZAC (MUTTON, 2004).

Myers (MYERS, 1982) apurou a falta de simetria no perfil de dureza da solda. No boleto, o metal de solda possui dureza mínima no centro. A dureza atinge um máximo na região da ZAC, partir de onde a dureza cai novamente até os níveis do metal base. A Figura 20, de Marich (MARICH, 2005), mostra o perfil de dureza no plano longitudinal para três amostras de solda aluminotérmica diferentes.

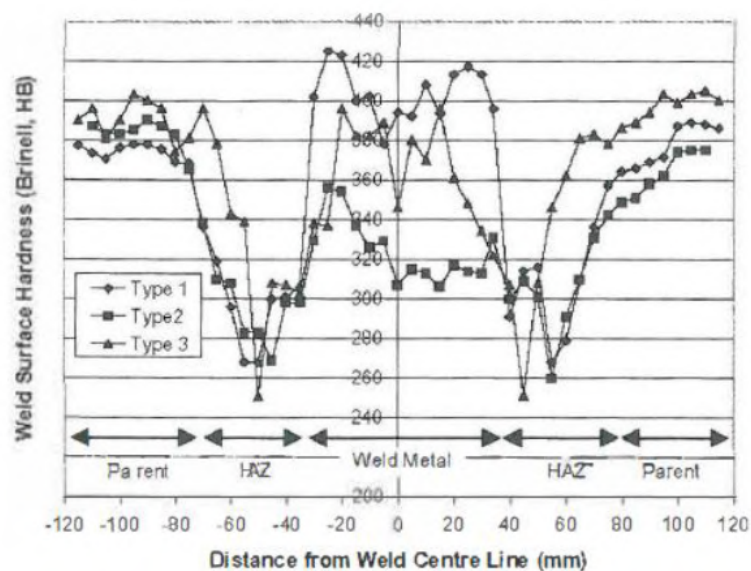


Figura 20 – Perfil de Dureza de diferentes tipos de soldas aluminotérmicas

Fonte: (MARICH, 2005)

Alves et. al. (2019) apresenta a microestrutura típica desta região de queda de dureza e relata que esta se apresenta de forma esferoidizada. Esse processo é conhecido como apenas esferoidização ou ainda eutetoide divorciado, pelo fato dos carbonetos não serem totalmente dissolvidos na austenita e para reduzirem sua energia de superfície adotam a morfologia esferoidizada.

A Figura 21, representa o diagrama Ferro-Carbono, onde a região em destaque é chamada de Zona Crítica, onde os fenômenos de esferoidização descritos acima.

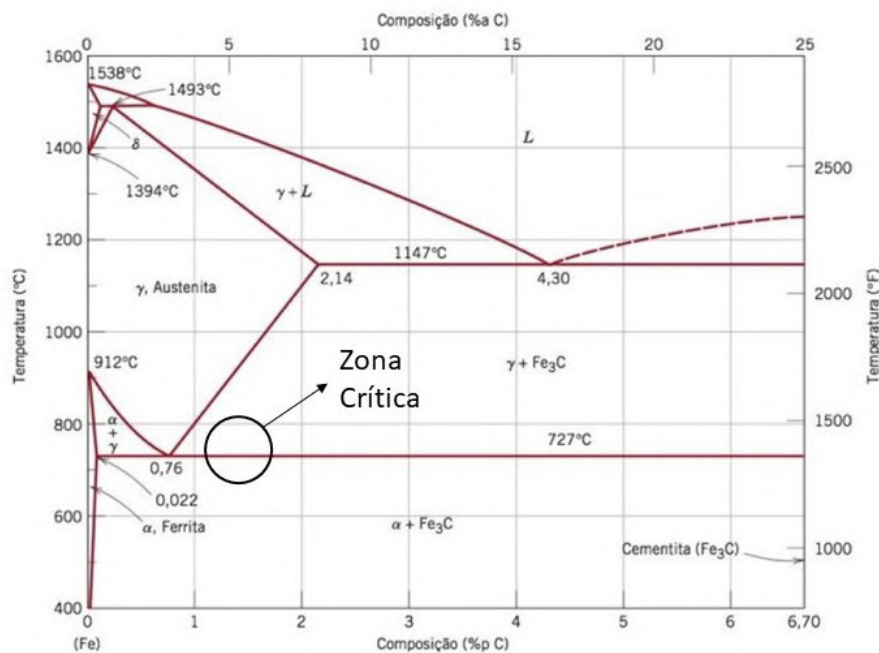


Figura 21 – Zona crítica destacada no diagrama Ferro-Carbono

Fonte: Adaptado de (CALLISTER, 2012)

## 2.4 Macrografia

Colpaert (2008) define como macrografia o exame do aspecto de uma peça ou amostra, segundo uma seção plana devidamente polida, e em geral, atacada por um reativo apropriado. O aspecto, assim obtido, chama-se macroestrutura. O exame é feito à vista desarmada ou com auxílio de uma lupa. A palavra macrografia é também empregada para designar os documentos que reproduzem a macroestrutura, em tamanho natural ou com ampliação máxima de 10 vezes.

### 2.4.1 Diretrizes para a realização da Macrografia

Para realizar a análise macrográfica de um corpo-de-prova, algumas etapas devem ser previamente realizadas, como a escolha da seção a ser avaliada, preparação de uma superfície plana e polida na seção desejada e ataque da mesma utilizando um reagente químico compatível. A seguir será realizado a descrição das três etapas citadas acima.

1. Escolha da seção a ser analisada: A escolha da seção será determinada primordialmente por dois fatores, sendo eles a geometria da peça e o tipo de informação que se deseja obter. Colpaert (2008) ressalta algumas características macroestruturais tanto para as quais o corte de seção transversal é preferido quanto para o corte longitudinal.

Para o corte transversal as características são:

- Verificação da homogeneidade do material ao longo de sua seção;
- Caracterização da forma e intensidade da segregação;
- Avaliação da posição, forma e dimensões de eventuais porosidades, trincas e bolhas;
- Caracterização de forma e dimensões de dendritas;
- Verificação da existência de restos vazios ou rechupes;
- Verificação da aplicação de tratamento termo-químico superficial (cementação, nitretação, etc.), sua profundidade e regularidade;
- Verificação da profundidade da têmpera;
- Avaliação da extensão da zona termicamente afetada, zona de fusão, etc. em juntas soldadas (macrografia transversal à solda).

Para o corte longitudinal as características são:

- Se uma peça é fundida, forjada ou laminada;
  - Se a forma de uma peça foi obtida por usinagem ou conformação;
  - A presença de solda no comprimento de arames, fios, barras, vergalhões, etc.;
  - Avaliação de soldas por fricção de topo;
  - Eventuais defeitos nas proximidades de fratura;
  - A extensão de tratamentos térmicos superficiais.
2. Preparação da superfície para análise: Após a escolha de corte da seção do corpo de prova, o passo seguinte é a preparação da superfície, que consiste no corte ou desbaste e polimento. Para realizar o corte pode se utilizar a serra ou um cortador de disco abrasivo ou até mesmo uma serra abrasiva. De acordo com o que se deseja examinar, pode-se adotar um procedimento de corte, como corte com maçarico, indicado para corte de amostras de materiais ferrosos em grandes fragmentos, corte por serramento mecânico, para materiais em geral exceto para materiais duros e corte com disco abrasivo, sob refrigeração que possibilita obter seções com boa qualidade. Para finalizar esta etapa que tem por objetivo deixar o corpo-de-prova com a superfície polida. O polimento pode ser realizado com lixas metalográficas, onde o polimento é feito atritando a superfície a ser polida sobre a lixa. Em caso de corpos e prova de maiores dimensões, o mesmo pode ser realizado com uma lixadeira elétrica utilizando o disco adequado para o polimento.
3. Ataque químico da superfície: O ataque de superfície tem como finalidade revelar os detalhes macroestruturais de interesse, para isso a superfície preparada até a fase de polimento é uniformemente submetida à ação de um reativo. Segundo Colpaert

(2008), o contato do corpo-de-prova pode ser realizado de três modos, sendo eles: ataque por imersão, onde a superfície polida é mergulhada contendo o reagente (normalmente usado quando a temperatura de operação não é ambiente), o ataque por aplicação (uma parte do reativo é aplicada na seção preparada com auxílio de um pincel ou chumaço de algodão) e por último a impressão direta de Baumann, onde é utilizada uma folha de papel fotográfico convenientemente umedecido com um reagente apropriado (aplicada sobre a superfície polida e obtendo-se sobre ele um decalque da maneira como se encontra distribuídos os sulfetos no aço).

## 2.5 Dureza *Rockwell* – ABNT NBR NM ISO 6508-1:2008

Para a terminação do Perfil de Dureza, ocasionalmente também denominado de Mapa de Dureza, iremos utilizar a escala Rockwell, mais especificamente a escala Rockwell C. Como a maioria dos procedimentos experimentais adotados em escala mundial, a escala dureza Rockwell está normatizada pela Norma ABNT NBR NM ISO 6508-1:2008.

Em relação ao equipamento utilizado para medição de dureza, este é denominado durômetro. Em relação aos penetradores pode-se citar que os penetradores pequenos podem ser cones de diamante com  $120^\circ$  de conicidade ou esferas de aço temperado.

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

Nos ensaios de dureza Rockwell mais comumente utilizados, utilizam-se cargas principais de 60, 100 ou 150 kgf. O número de dureza Rockwell deve ser seguido pelo símbolo HR, com um sufixo que indique a escala utilizada. Segue abaixo exemplo de interpretação de um resultado, como por exemplo, 68 HRC:

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

## 2.6 Micrografia

O ensaio de micrografia pode ser definido como a análise de uma peça previamente polida e em geral atacada por um reagente específico e apropriado para cada tipo de metal,



de modo a revelar a microestrutura da peça metálica em análise, ou seja, através deste ensaio é possível com o uso de microscópio determinar os microconstituintes de um metal.

Em termos gerais, metal é um aglomerado de agregados cujos cristais podem ser de mesma composição química ou não. A estes cristais dá-se o nome de grãos.

Com o auxílio de uma técnica apropriada, consegue-se evidenciar os contornos dos grãos de que o material é formado. As propriedades mecânicas de um metal dependem da forma que estes grãos se organizam na estrutura do metal, e seus respectivos tamanhos.

A formação diferenciada dos grãos pode decorrer de trabalhos mecânicos aplicados à peça, ou mesmo de tratamentos térmicos, que pode melhorar as propriedades dos materiais, como ductibilidade, fragilidade, dureza, tenacidade, dentro outros. O registro deste Ensaio Micrográfico é feito por fotomicrografias obtidas em microscópios.

Dando ênfase ao ensaio de micrografia correlacionado ao processo de solda, busca-se com este ensaio conhecer as características do metal principalmente na zona termicamente afetada pelo calor (ZTA ou ZAC), região esta com maior possibilidade de problemas de natureza metalúrgica na soldagem.

De modo geral, o ensaio de micrografia pode fornecer as seguintes características de um metal:

- Tamanho de grão;
- Nível de inclusão;
- Classificação de estruturas cristalina;
- Dimensão e distribuição de grafitas;
- Dimensionamento de descarbonetação superficial;
- Dimensionamento de profundidade de tratamentos.

No capítulo de Resultados serão apresentadas as Micrografias obtidas para diferentes regiões do corpo de prova do trilho, onde será discutido algumas das características apresentadas acima, como a classificação da estrutura cristalina, o tamanho dos grãos, a ocorrência do nível de inclusão e também a distribuição e dimensão das grafitas.

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo referente ao presente trabalho serão discutidos os detalhes referentes as diretrizes e processo ao qual irão reger predominantemente as análises para os resultados subsequentes. Dessa forma, serão apresentados os equipamentos utilizados para o preparo da amostra, a metodologia empregada para a realização do ataque químico à quente e com Solução Nital, os parâmetros referentes ao ensaio de dureza Rockwell C e por fim o passo a passo desenvolvido para o ensaio de análise química da amostra.

#### 3.1 Equipamentos Utilizados

Nesta seção serão enumerados alguns dos principais equipamentos utilizados para a preparação do corpo de prova para estar adequado a realização de sequência de ensaios que serão apresentados posteriormente.

##### 3.1.1 Central de usinagem ROMI D600

A central de usinagem Romi D600 é um equipamento de usinagem que opera por meio de CNC ou Comando Numérico Computadorizado. Este equipamento é do tipo fresadora e possui 5 eixos de trabalho. O CNC pode ser considerado um grande marco na era da usinagem pois através da criação de diversas linguagens, como a Sinumerik da Siemens utilizada no equipamento em questão, permitiu que os processos de usinagem deixasse de depender da habilidade do operador, deixando que o computador seguisse os passos de um programação pré estabelecida. Atrelada ao CNC, a Romi D600 permite a realização de diversas operações de usinagem de alta precisão. Para o trabalho em questão, a Romi D600 foi utilizada para ajustar as dimensões do corpo de prova do trilho com fim de deixá-lo adequado para realizar os procedimentos de Macrografia, Perfil de Dureza, Micrografia e Análise química.



Figura 22 – Central de Usinagem Romi D600

Fonte: (Indústrias ROMI S.A)

Os procedimentos utilizando a Romi D600 foram operações de desbaste, que se fez necessária devido ao elevado grau de empenamento da peça. Inicialmente as laterais do trilho foram desbastadas a fim de garantir o paralelismo entra as laterais, e por fim na face onde buscou-se a análise das propriedades mecânicas, macro e microestruturas, após o desbaste foram realizados passes de acabamento.

As figuras 23, 24, mostram algumas das ferramentas utilizadas, as chamadas fresas, bem como uma imagem de uma etapa intermediária do processo de usinagem da amostra do trilho.



Figura 23 – Fresas de topo planetárias utilizada na usinagem

Fonte: Autor



Figura 24 – Face da Amostra sendo desbastada na Romi D600

Fonte: Autor

### 3.1.2 Durômetro analógico

O durômetro analógico foi o equipamento utilizado para realização dos ensaios de dureza na amostra do trilho, cujo procedimento será detalhado mais adiante. O resultado do Perfil de Dureza da amostra será apresentado no capítulo subsequente de "Resultados". Segue a Figura 25 do equipamento seguida de algumas especificações técnicas do mesmo.

- Pré-carga nominal: 10 Kgf;
- Carga nominal de ensaio: 60 – 100 – 150 Kgf;
- Controle de aplicação de carga e pré-carga através de alavanca e movimentação da base respectivamente;
- Escalas HRA, HRC e HRD na escala de cor preta do visor;
- Demais escalas de dureza Rockwell na escala vermelha.



Figura 25 – Durômetro analógico

Fonte: Autor

### 3.1.3 Lixadeira elétrica manual

A lixadeira elétrica manual da marca Bosch foi utilizada para melhorar o acabamento da face a ser submetida aos ataques químicos e ao ensaio de dureza, uma vez que o acabamento superficial se faz de grande importância para que os resultados obtidos apresentem melhor qualidade e sejam atribuídos maior confiabilidade aos experimentos realizados posteriormente.



Figura 26 – Lixadeira elétrica manual e *Flap Disc*  
Adaptado de (BOSCH)

#### 3.1.4 Chapa Aquecedora Microprocessada

Para a manipulação dos químicos e vidrarias, que serão apresentadas a seguir, foi necessário a utilização da Chapa Aquecedora, para garantir que os parâmetros de temperatura descritos no procedimento experimental do Ataque Químico à Quente. O funcionamento do equipamento basicamente consiste na presença de uma serpentina aquecida que transfere o calor a uma chapa metálica, que distribui o calor de forma homogênea. O dispositivo está demonstrado na Figura 27.



Figura 27 – Chapa aquecedora  
Fonte: Autor

#### 3.1.5 Vidrarias Laboratoriais para Químicos

Devido ao risco para manipulação de ácido à altas temperaturas, bem como o Nital, para realização dos ensaios de Macrografia, foram utilizadas as vidrarias presentes no Laboratório de Metalografia da Faculdade de Engenharia da UFJF. O uso das vidrarias

bem como recipientes adequados para manipulação de químicos é fundamental para garantir a segurança durante a realização dos experimentos.

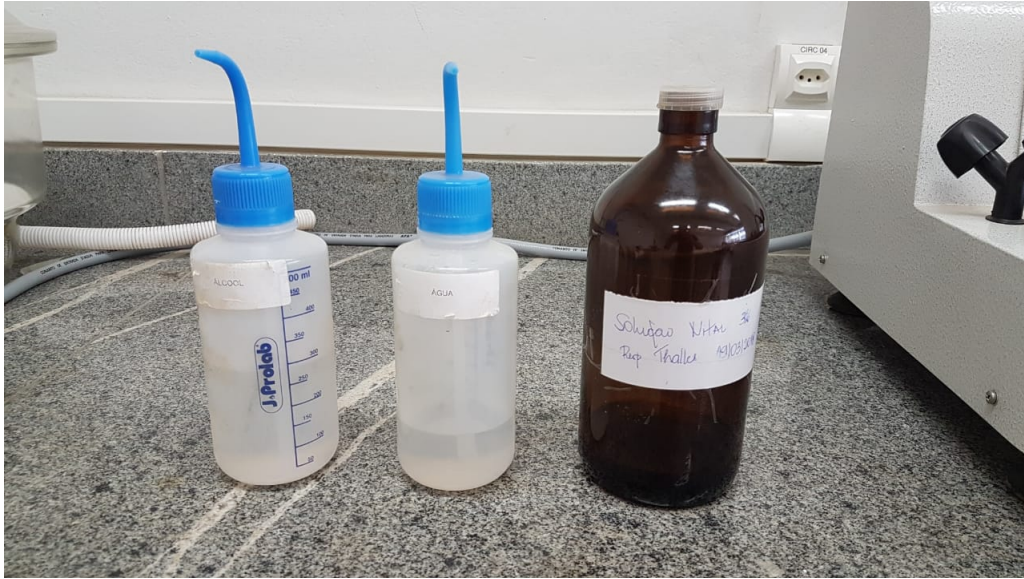


Figura 28 – Reagentes para o ataque químico utilizando Nital

Fonte: Autor



Figura 29 – Vidrarias utilizadas no preparo da solução

Fonte: Autor

### 3.2 Macrografia

Para a realização da Macrografia, foram utilizadas duas metodologias para revelar a superfície, afim de identificarmos as regiões principais da solda apresentadas no capítulo anterior. Em relação a Macrografia a metodologia será dividida para o ataque químico do corpo de prova à quente e utilizando Nital.

Ambos os procedimentos foram realizados no Laboratório de Metalografia da Faculdade de Engenharia da UFJF, utilizando-se luvas, máscaras e óculos de proteção, para garantir a segurança durante a realização dos ensaios. Além disso, os procedimentos foram realizados utilizando as vidrarias apropriadas e dentro do ambiente controlado da capela, que principalmente para o ataque químico à quente, o exaustor no topo da mesma, reduzindo os efeitos de evaporação do ácido atingissem o exterior da capela.



Figura 30 – Capela para realização de ataques químicos

Fonte: Autor

#### 3.2.1 Ataque químico à quente

O primeiro reagente que foi escolhido para revelar as regiões da junta soldada foi uma solução formada por 50% de água ( $H_2O$ ), 38% de ácido clorídrico ( $HCL$ ) e 12% de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ). Esta solução também foi preparada no laboratório de química da Universidade Federal de Juiz de Fora..

O procedimento consistia em colocar a solução um recipiente de vidro com dimensões de de 36x40 centímetros parcialmente preenchido com a solução de ácido em uma quantidade suficiente para mergulharmos a superfície a ser analisada em sua totalidade. Em seguida a solução presente no recipiente foi submetida ao aquecimento até  $80^{\circ}C$  com auxílio de uma mesa aquecedora elétrica. Após o aquecimento da solução, submerge-se

a superfície da amostra deixando-a por 30 minutos à temperatura constante de 70°C. O controle da temperatura foi realizado com o auxílio de um béquer contendo água, onde um termômetro de mercúrio estava submerso, podendo assim garantir a manutenção da temperatura.

Ao final do procedimento foram adotados dois tipos de métodos para a lavagem: o primeiro foi com álcool etílico, entretanto observou-se que o álcool reagia com a solução remanescente na superfície, deixando-a manchada e comprometendo assim a análise visual e as imagens coletadas da superfície. Para resolver esta circunstância, foi utilizada apenas água e os resultados obtidos foram mais satisfatórios.

### 3.2.2 Ataque químico com Nital

Um dos reagentes utilizados para revelar as regiões da junta soldada foi o Nital, este é um agente químico composto por ácido nítrico  $\text{HNO}_3$  e álcool etílico. A solução utilizada para realização deste ensaio era de 20% de ácido nítrico e 80% de álcool etílico. A solução utilizada nesse experimento foi preparada no laboratório de química da Universidade Federal de Juiz de Fora.

O procedimento se deu de forma análoga ao anterior, seguindo as etapas de colocar a amostra com a superfície para ser atacada em um recipiente de vidro com dimensões de 36x40 centímetros parcialmente preenchido com a solução de Nital em uma quantidade suficiente para mergulharmos a superfície a ser analisada em sua totalidade e permanecer por 10 segundos. Após o tempo do ataque a superfície era lavada com água corrente e em seguida era aplicado uma fina camada de álcool etílico sobre a mesma. As fotografias foram tiradas imediatamente após finalizada esta sequência, visto que mesmo com o processo de limpeza abundante os resquícios de reagente químico continuavam atacando a superfície o que, pode ser um fator comprometedor para a visualização da Macroestrutura.

### 3.3 Ensaio de Dureza Rockwell C

Os ensaios de dureza foram realizados sobre as amostras cortadas e limpas utilizando o Durômetro Rockwell Analógico, cujos parâmetros técnicos foram apresentados na seção 3.1. O penetrador utilizado para os ensaios de dureza foi um cone de diamante e o durômetro tinha sua calibragem conferida antes de todos os experimentos através de um corpo de prova padrão, que é apresentado na figura 31.





Figura 31 – Bloco padrão de calibração para dureza Rockwell C

Fonte: Autor

O intervalo entre cada batida de dureza foi de 5 mm, conforme observado nos pontos batidos na amostra. Para cada amostra foram batidas três fileiras de dureza: a 3, 8 e 13 mm da superfície do boleto. A distância entre cada ponto medido foi de aproximadamente 5 mm. O perfil de dureza se estende ao longo de toda a face do trilho anranguendo desde a extremidade do trilho novo, passando pelo centro da solda até, a outra extremidade do trilho desgastado. Os resultados dos ensaios foram plotados em gráficos para melhor visualização do perfil de dureza da amostra variando a prufindidade em relação ao topo do trilho.

#### 3.4 Análise Química da Amostra

Os ensaios para análise da composição química das amostras de solda foram realizados com um Espectrômetro modelo ARLW 34000. Foram realizados 5 pontos de medição de composição química partindo do centro da solda até o metal do trilho. Os resultados foram transferidos para planilhas para melhor análise.

O valor do carbono equivalente foi calculado para cada ponto medido na amostra, utilizando-se a fórmula proposta por Yurioka et al.

$$CE(IIW) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Mn + Ni}{15} + \frac{Cr + Mo + V}{5} \quad (3.1)$$

Os valores irão estar representados em gráficos de dispersão para que seja possível elaborar um perfil de carbono equivalente para a amostra ensaiada no capítulo subsequente de "Resultados".

### 3.4.1 Procedimento Experimental

Este trabalho tem como objetivo analisar a macrografia, o perfil de dureza, a análise química e micrografia de uma amostra onde se utilizou procedimento de soldagem aluminotérmica com trilhos de diferentes perfis de desgaste. É importante ressaltar que dentro do escopo do projeto este é o primeiro trabalho que visa uma análise voltada para a solda realizada com diferentes perfis de desgaste.

Após revisão bibliográfica sobre o processo empregado para realizar soldas aluminotérmicas, descrito na Subseção 2.2.3 deste trabalho, e durante reuniões da equipe do projeto Cátedra Roda-Trilho, foi definido que seria realizado uma análise robusta e detalhada de uma amostra com trilhos soldados por solda aluminotérmica, Os resultados gerados pelos ensaios devem ser analisados e comparados com a literatura disponível, bem como os demais trabalho já realizados dentro do escopo do projeto Cátedra Roda-Trilho. Em caso de observação de resultados com grandes diferenças qualitativas ou quantitativas entre os já presentes em literatura ou trabalhos anteriores, cria-se a oportunidade para continuação desta linha de pesquisa em trabalhos futuros.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Macrografia

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos através do procedimento de macrografia. Conforme definido na Metodologia foram realizados ensaios de ataque químico utilizando ataque químico à quente e com solução Nital.

Devido as dimensões iniciais do corpo de prova do trilho com diferentes perfis de desgaste, foi necessário a realização do processo de fresamento para tratar a superfície a ser atacada. As imagens adquiridas ao final do experiento de ataque químico a quente apresentaram diversas manchas, e as principais regiões relevantes da solda não puderam ser evidenciadas de forma clara.

A Figura 32 revela a imagem resultado de ataque químico com Nital.

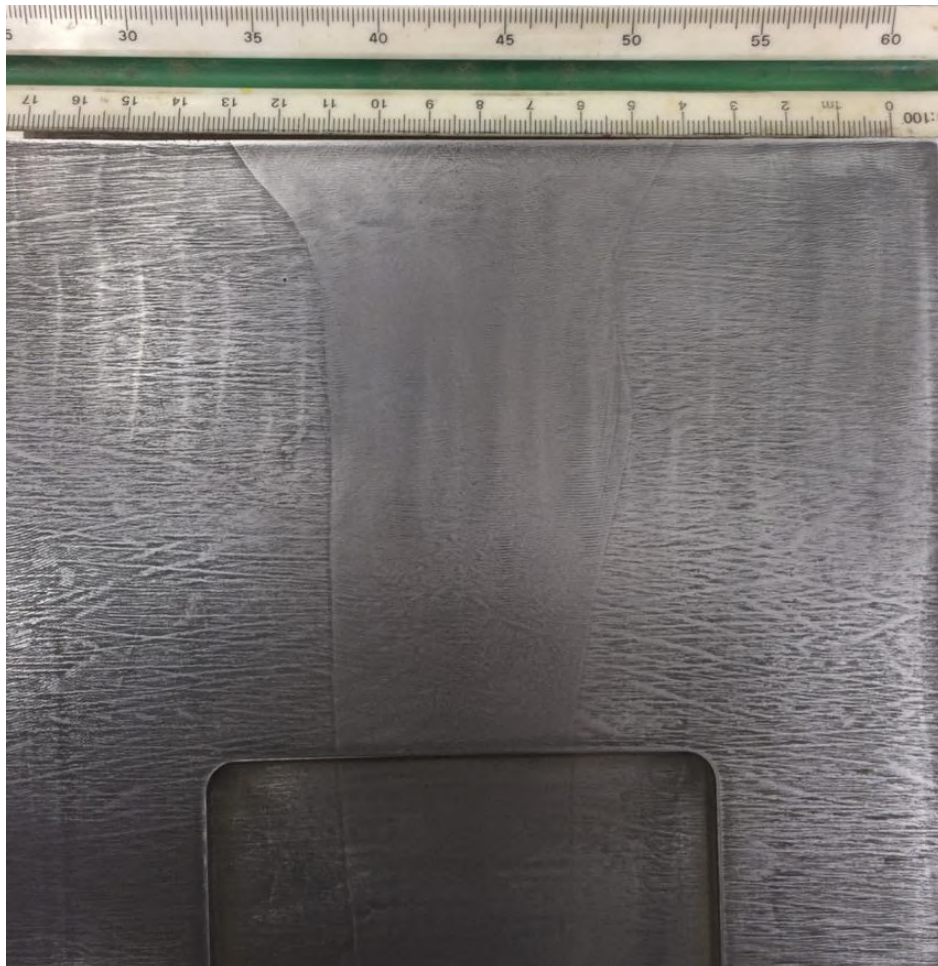


Figura 32 – Macrografia com ataque realizado com Nital

Fonte: Autor

Pode-se afirmar que as características do material que se colocam e maior evidência, é a estrutura dendrítica observada em toda a região de metal base do trilho, e em parte

da ZAC, não estando presente apenas na "poça de fusão" ou ZF. Como os limites da ZAC, não puderem ser claramente evidenciados, adiante temos a Figura 33, onde teremos a figura adaptada a partir de um resultado de ataque químico para estabelecermos melhor os limites da ZAC e da ZF, bem como mensurar suas dimensões em pontos arbitrários definidos pelo autor.

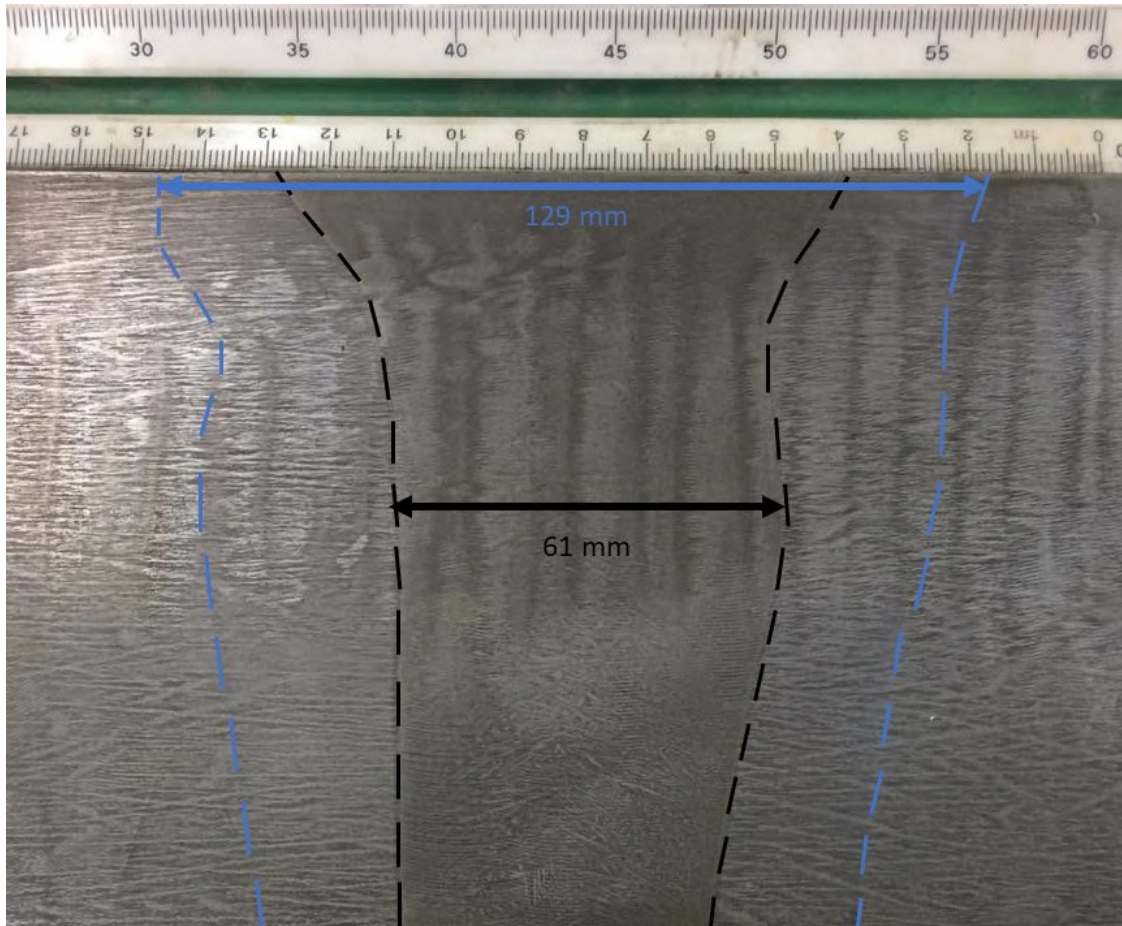


Figura 33 – Dimensões ZAC e ZF na Macrografia

Fonte: Autor

#### 4.2 Perfil de Dureza

Nesta seção serão comentados e analisados os resultados obtidos para o ensaio de dureza da amostra. O ensaio de dureza foi realizado conforme as diretrizes indicadas no capítulo de Metodologia.

Para iniciar a exibição dos resultados, temos apresentado a Figura 34, que apresenta o gráfico com os resultados do perfil de dureza traçado para as distâncias de 3 mm, 8 mm e 13 mm do limite superior do boleto.

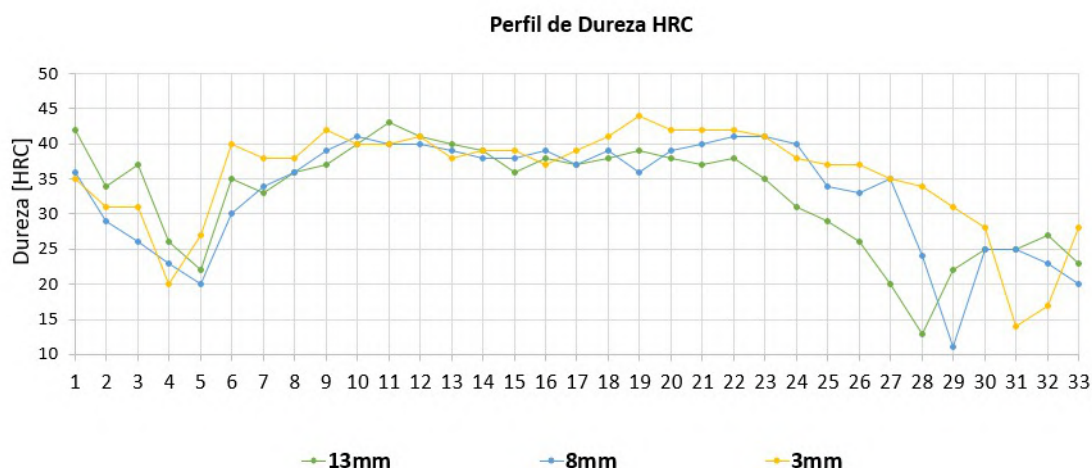


Figura 34 – Gráfico com o perfil de dureza para profundidade de 3 mm, 8 mm, e 13 mm

Fonte: Autor

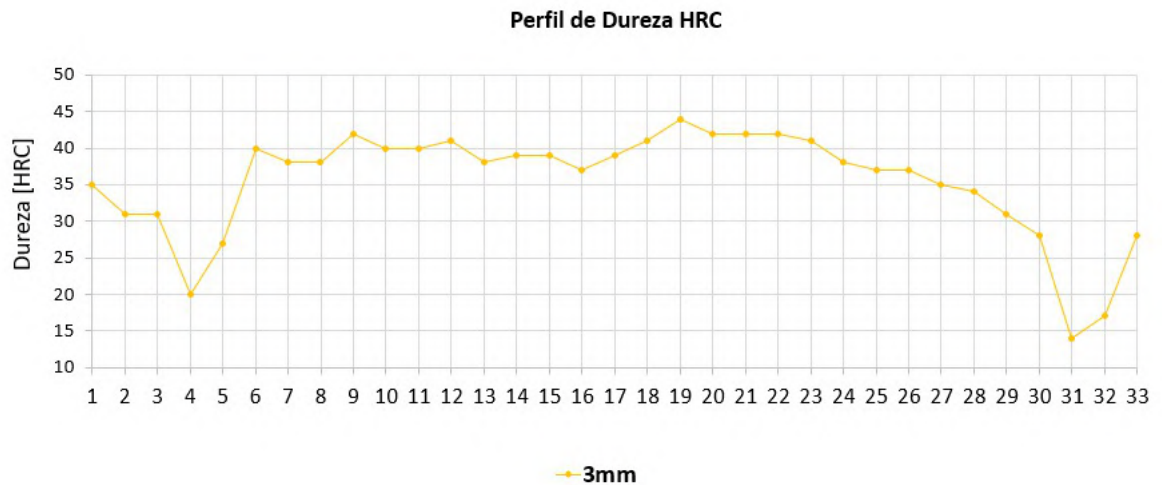
Inicialmente, podemos começar a discussão confirmando o comportamento do gráfico com o esperado pela literatura, onde a região da solda apresenta os maiores valores de dureza, seguidos pela região de metal base do trilho, e que a região de transição entre a solda e o metal base (limite da ZAC) apresenta um pico com os menores valores de dureza, formando uma curva comumente denominada de "dentes de vampiro".

Pela análise da figura é possível constatar que o perfil de dureza não é simétrico em relação a região lateral da solda (zona fundida), fato este que está relacionado a solda ter sido realizada entre um trilho de perfil novo com um trilho que apresenta perfil desgastado. O lado direito do gráfico, para as três profundidades distintas, apresenta valores mínimos de dureza menores que a porção esquerda. Isso pode ser correlacionado com o lado desgastado do trilho, que apresentou menor dureza na zona de transição entre a solda e o metal base do trilho.

Ainda é importante ressaltar que pode-se observar que a profundidade do trilho correlação direta para obtermos relações de proporcionalidade com os valores máximos ou mínimos encontrados no perfil de dureza. Esta característica também já havia sido observada em outros trabalhos do projeto Cátedra Roda-Trilho, com análise de solda aluminotérmicas envolvendo trilhos com perfis novos.

A seguir serão apresentados os gráficos de dispersão separados individualmente para a representação do perfil de dureza da amostra para as distâncias de 3 mm, 8 mm e 13 mm da região superior do boleto, totalizando 33 pontos para cada respectiva profundidade.

Para a distância de 3 mm da parte superior do boleto, os valores de dureza encontrados variam entre a faixa de 14 HRC a 44 HRC.



0

Figura 35 – Gráfico com o perfil de dureza para profundidade de 3 mm

Fonte: Autor

Para a distância de 8 mm da parte superior do boleto, os valores de dureza encontrados variam entre a faixa de 11 HRC a 41 HRC.

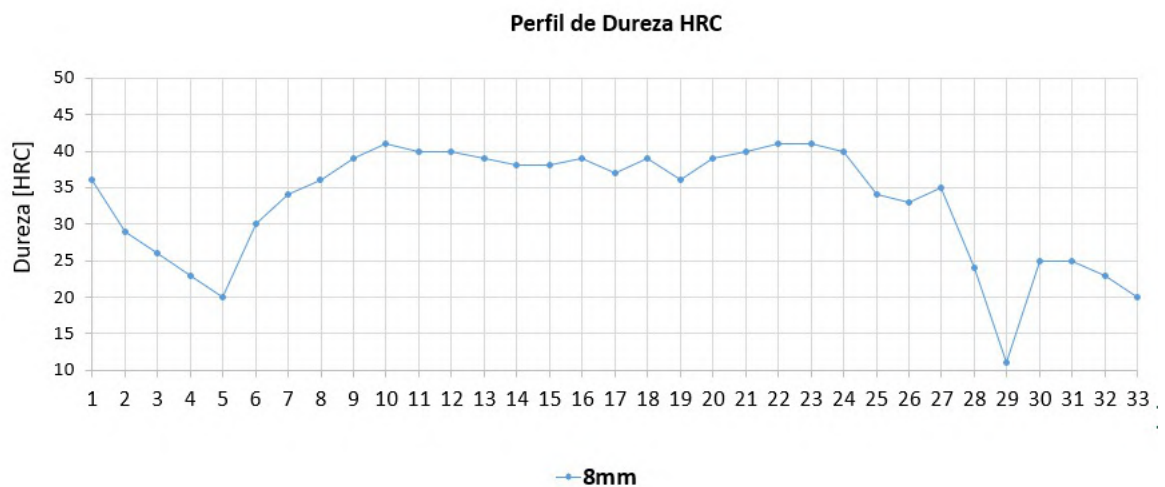


Figura 36 – Gráfico com o perfil de dureza para profundidade de 8 mm

Fonte: Autor

Para a distância de 13 mm da parte superior do boleto, os valores de dureza encontrados variam entre a faixa de 13 HRC a 42 HRC.

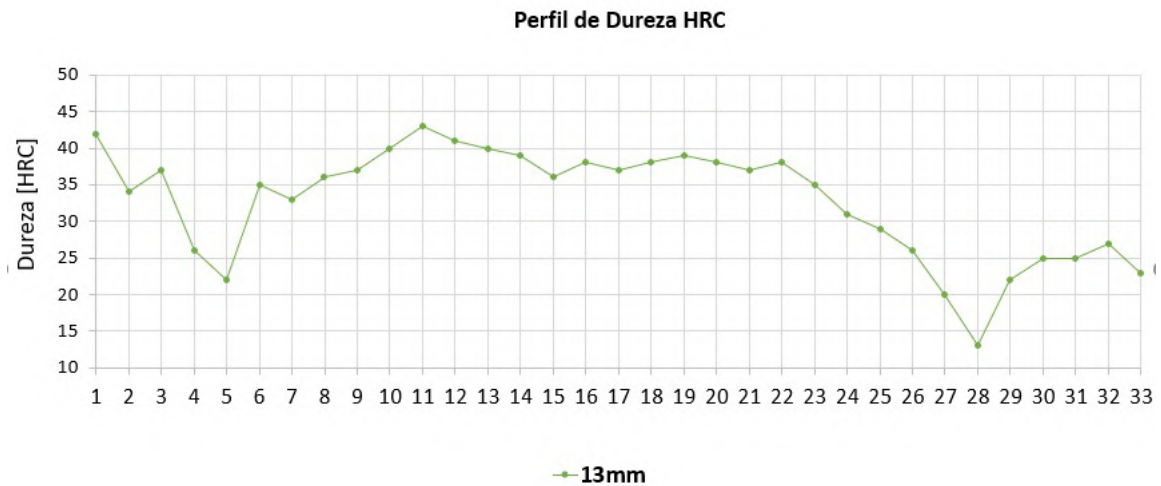


Figura 37 – Gráfico com o perfil de dureza para profundidade de 13 mm

Fonte: Autor

Para finalizar a análise do perfil de dureza da amostra, os valores de dureza centrais serão apresentados na tabela 2 na escala Rockwell C, e convertidos a unidade de dureza Brinell. Os valores encontrados estão dentro da faixa esperada, conforme discutido no capítulo de Revisão Bibliográfica deste trabalho.

Tabela 2 – Média de valores no centro da solda de acordo com a profundidade

Profundidade	Dureza HRC	Dureza HB
3 mm	39	≈ 362
8 mm	37	≈ 344
13 mm	37	≈ 344

Fonte: (O Autor)

#### 4.3 Análise Química da Amostra

Nesta seção serão apresentadas tabelas para a composição química para cinco diferentes regiões da amostra, englobando, de forma análoga ao perfil de dureza, regiões de metal base do tilho novo, região da solda e por fim a região de metal base do trilho já desgastado. Na Figura 38, estão demarcadas as regiões as quais foram submetidas a análise química no espectrômetro ARLW.

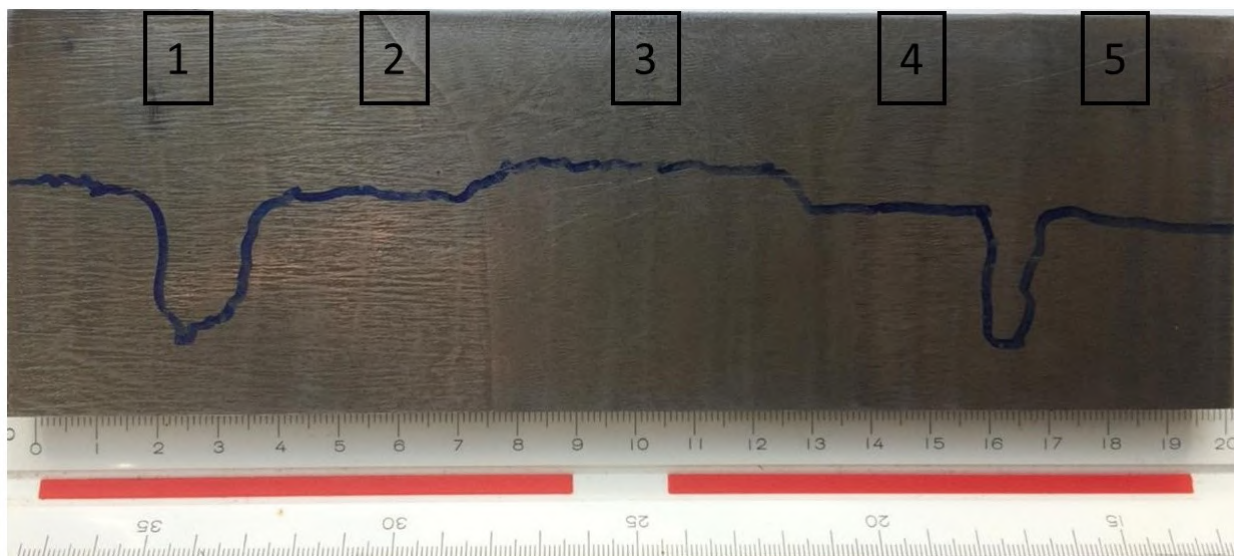


Figura 38 – Regiões nas quais foram retiradas amostras para análise micrográfica

Fonte: Autor

Na tabela 3, tem-se os valores aferidos no espectrômetro dos principais elementos químicos presentes na região 1 da amostra.

Tabela 3 – Tabela de Composição Química da Região 1

Composição Química da R <sub>1</sub>	
C = 0,7900	Mn = 0,8700
Si = 0,2400	P = 0,0170
S = 0,0090	Cu = 0,0050
Cr = 0,0320	Ni = 0,0190
Sn = 0,0010	Nb = 0,0010
Mo = 0,0080	Al = 0,0036
Al <sub>i</sub> = 0,0020	Al <sub>s</sub> = 0,0020
Ti = 0,0011	V = 0,0020
N = 0,0042	B = 0,0000

Fonte: (O Autor)

Ao analisar os dados de composição química da amostra da Região 1, que se constitui de metal base do trilho com o boleto de perfil novo, os resultados demonstram coerentes, uma vez que apresentam uma maior concentração de Carbono E Manganês. Esta região ainda apresenta presença de Silício, porém a presença deste elemento deve ser mais evidenciada nas regiões de transição, entre metal base do trilho, e mistura aluminotérmica, nos limites da ZF. Os demais elementos não apresentam relevância para esta região avaliada.

Na Tabela 4 tem-se os valores aferidos no espectrômetro dos principais elementos químicos presentes na região 2 da amostra.



Tabela 4 – Tabela de Composição Química da Região 2

Composição Química da R <sub>2</sub>	
C = 0,7600	Mn = 0,8500
Si = 0,3900	P = 0,0190
S = 0,0110	Cu = 0,0340
Cr = 0,1410	Ni = 0,0360
Sn = 0,0020	Nb = 0,0010
Mo = 0,0130	Al = 0,0148
Al <sub>i</sub> = 0,0080	Al <sub>s</sub> = 0,0070
Ti = 0,0011	V = 0,0570
N = 0,0041	B = 0,0000

Fonte: (O Autor)

Já ao analisar o espectro apresentado para a região 2, de acordo com o citado na literatura, temos uma região de transição que combina o resultado entre características do metal base do trilho com os limites da ZF, onde começam a se destacar a presença de elementos presentes na mistura aluminotérmica. O índice de Carbono e Manganês se reduzem ligeiramente, porém fica evidente o aumento dos seguintes elementos: Silício, Cromo, Alumínio, Molibdênio, Cobre, Níquel e Vanádio. Esta tendência de aumento deve ainda se manter, a medida que se aproxima da região central da solda, onde tais elementos devem ser ainda mais evidentes, devido a sua alta presença na constituição da mistura aluminotérmica.

Na Tabela 5 tem-se os valores aferidos no espectrômetro dos principais elementos químicos presentes na região 3 da amostra.

Tabela 5 – Tabela de Composição Química da Região 3

Composição Química da R <sub>3</sub>	
C = 0,7300	Mn = 0,8300
Si = 0,6700	P = 0,0200
S = 0,0100	Cu = 0,0900
Cr = 0,3550	Ni = 0,0680
Sn = 0,0050	Nb = 0,0030
Mo = 0,0420	Al = 0,0390
Al <sub>i</sub> = 0,0250	Al <sub>s</sub> = 0,0140
Ti = 0,0011	V = 0,1560
N = 0,0041	B = 0,0000

Fonte: (O Autor)

A tabela de composição química da região 3 apresenta resultado fidedigno a região central da solda, estando de acordo com o demonstrado na Figura 38, região central da solda, onde as características da mistura aluminotérmica estarão mais evidentes. De acordo com a tendência já demonstrada na região 2, de redução em pequena escala de Carbono e Manganês. Os elementos Silício, Cromo, Alumínio, Molibdênio, Cobre, Níquel e

Vanádio atingiram seu ápice na composição química, conforme já se era esperado. Para a continuidade do perfil do boleto, a região 4 prevê-se resultados análogos a região 2, porém deste vez dentro da ZAC de transição entre a poça de fusão e o metal base do trilho com perfil desgastado.

Na Tabela 6 tem-se os valores aferidos no espectrômetro dos principais elementos químicos presentes na região 4 da amostra.

Tabela 6 – Tabela de Composição Química da Região 4

Composição Química da R <sub>4</sub>	
C = 0,8000	Mn = 0,8900
Si = 0,4200	P = 0,0110
S = 0,0200	Cu = 0,0360
Cr = 0,4410	Ni = 0,0280
Sn = 0,0020	Nb = 0,0010
Mo = 0,0110	Al = 0,0021
Al <sub>i</sub> = 0,000	Al <sub>s</sub> = 0,0020
Ti = 0,0011	V = 0,0020
N = 0,0040	B = 0,0000

Fonte: (O Autor)

A região 4 apresenta características quanto a composição química muito semelhantes a região 2, onde ocorre um ligeiro aumento na presença de Carbono e Manganês, e os elementos principais relacionados a mistura aluminotérmica reduzem na composição, seguindo tendência de alcançarem valores extremamente reduzidos na região 5, indicando um região situada em metal base do trilho.

Tabela 7 – Tabela de Composição Química da Região 5

Composição Química da R <sub>5</sub>	
C = 0,8000	Mn = 0,8900
Si = 0,4300	P = 0,0110
S = 0,0170	Cu = 0,0360
Cr = 0,4420	Ni = 0,0280
Sn = 0,0020	Nb = 0,0010
Mo = 0,0110	Al = 0,0021
Al <sub>i</sub> = 0,000	Al <sub>s</sub> = 0,0020
Ti = 0,0011	V = 0,0020
N = 0,0040	B = 0,0000

Fonte: (O Autor)

A região de análise de composição química demonstrou valores muito semelhantes a região 4, e de forma análoga a região 1, apresentou parâmetros compatíveis com uma área contendo apenas metal base do trilho, por sua vez no lado com o boleto com perfil já desgastado. Ainda é relevante citar que, ao serem analisadas todas as amostras, pode-se

constatar que o perfil do trilho, sendo novo ou desgastado não possui relevância e/ou não interfere nos resultados apresentados para composição química ao longo do perfil apresentado na Figura 38 da amostra.

Conforme citado anteriormente, no capítulo de Metodologia deste trabalho, será apresentado a seguir, na Figura 39, o gráfico gerado a partir do cálculo de Carbono equivalente utilizando a Equação 3.1.

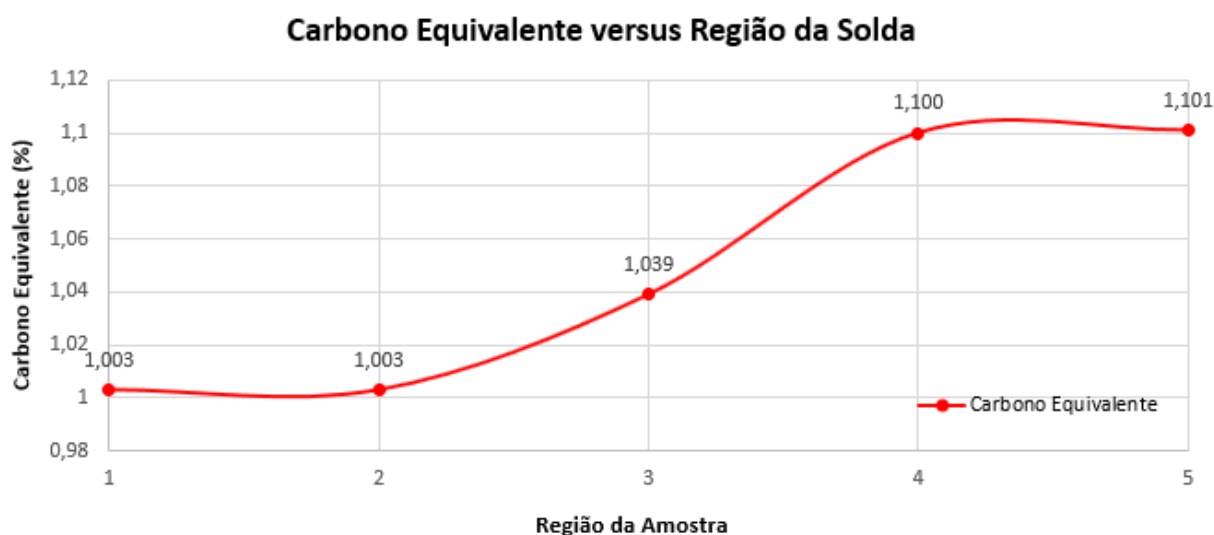


Figura 39 – Gráfico de Carbono Equivalente versus Região da Solda

Fonte: Autor

Com o gráfico apresentado acima na Figura 39 pode-se constatar que para as cinco regiões avaliadas através de análise química, os valores máximos e mínimos para o carbono equivalente estão na faixa entre 1,003 % e 1,101 %, que são valores plausíveis de acordo com a literatura presente no capítulo de Revisão Bibliográfica deste trabalho.

#### 4.4 Micrografia

Nesta seção do capítulo de resultados, serão apresentadas as imagens obtidas através do ensaio de Micrografia. As regiões caracterizadas apresentam os mesmos índices já comentados no Perfil de Dureza e Análise Química da amostra.

As Figuras 40 e 41 são referentes ao limite da ZAC com o metal base do trilho, a qual denominamos de região 1, com as ampliações de 1000x, 2000x e 3000x. A primeira imagem revela uma região com diferentes tipos de granulação, onde pode-se observar a presença de perlita fina, perlita livre e por fim perlita esferoidizada.

A perlita fina está presente, porém em regiões pontuais menos afetadas pelo calor gerado pela reação química da solda. Esta deverá se manifestar com maior clareza na região central da solda. As regiões mais escurecidas estão correlacionadas tanto com presença de ferrita livre, e também podem estar associadas a manchas provenientes do processo de ataque químico devido a um possível residual de ácido que não foi totalmente removido após o ataque a superfície. Já a perlita esferoidizada é conhecida pelo fato dos carbonetos não serem totalmente dissolvidos na austenita e para reduzirem sua energia de superfície adotam a formato de esferas.

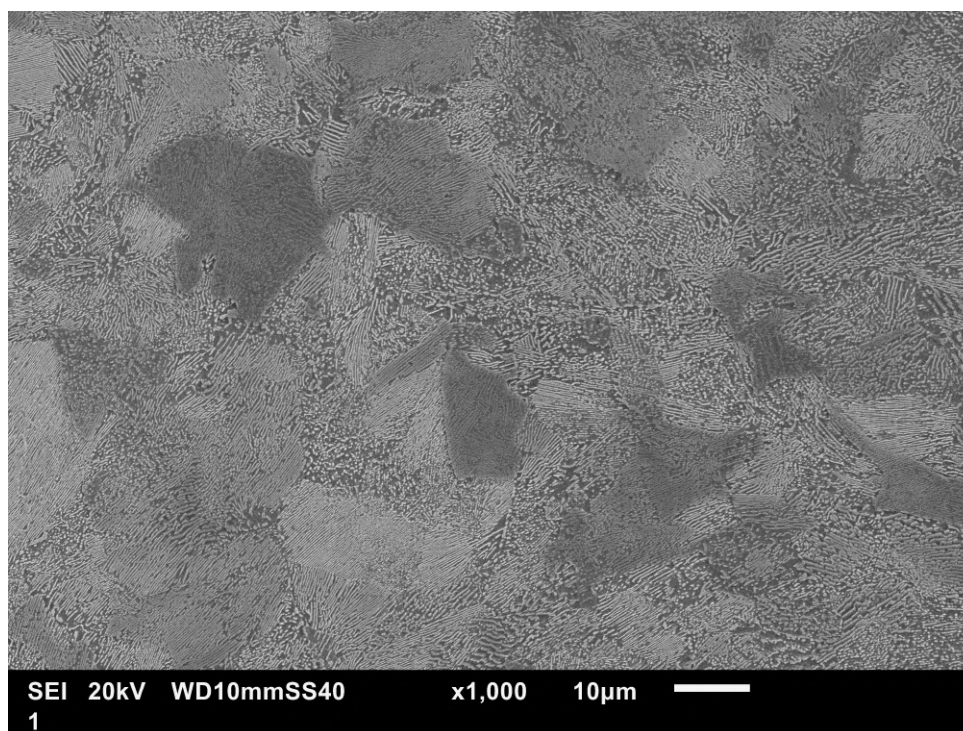
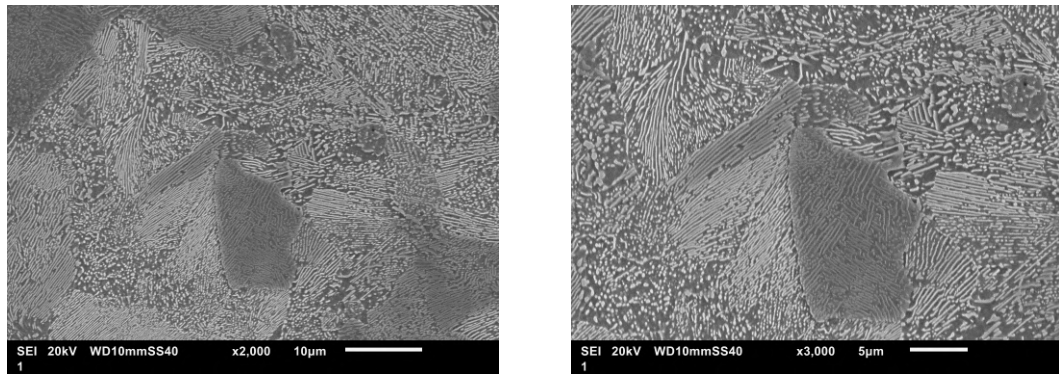


Figura 40 – Microestrutura da região 1 da amostra, 1000x

Fonte: Autor

As imagens com ampliação de 2000x e 3000x permitem constatar com maior detalhe as observações realizadas sobre a primeira. Os carbonetos de maior granulação são principalmente gerados devido a deformação plástica e altas temperaturas provenientes da reação aluminotérmica.



(a) Região 1 2000x

(b) Região 1 3000x

Figura 41 – Ampliações da Região 1

Fonte: Autor

Avançando para a região 2, na Figura 42 temos a transição da Zona Afetada pelo Calor para a Zona Fundida, no lado do perfil novo do trilho, a imagem com ampliação de 1000x apresenta perlita de granulação muito fina, bem como a presença de 5 micro-inclusões. A perlita extremamente fina pode ser explicada pela alta velocidade de troca de calor imposta pelo trilho a ferrita no processo de resfriamento da solda aluminotérmica. Já as micro-inclusões são esperadas, por se tratar de região onde o metal sofreu processo de fusão.

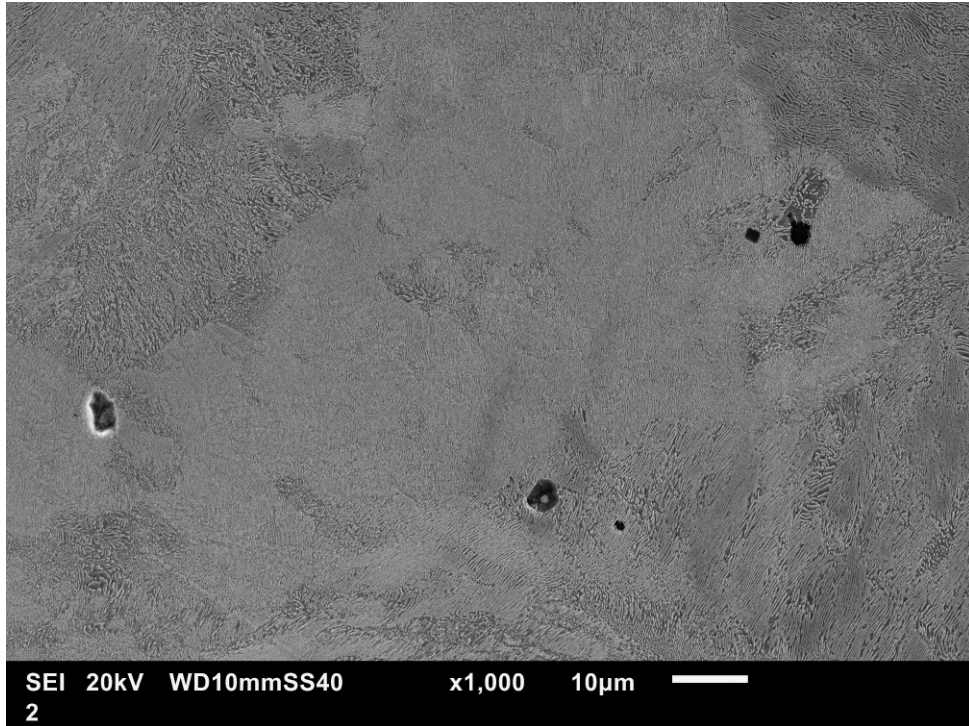
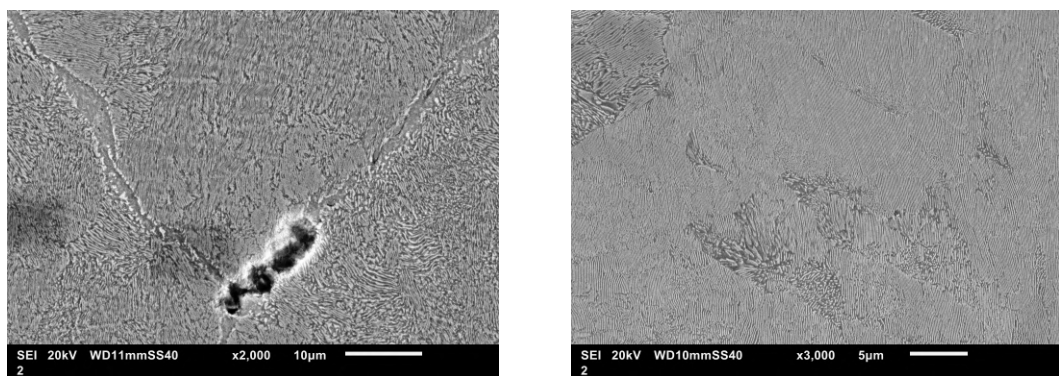


Figura 42 – Microestrutura da região 2 da amostra, 1000x

Fonte: Autor

A Figura 43, possui duas peculiaridades importantes de serem destacadas, onde a esquerda temos maior detalhe para uma micro-inclusão de aproximadamente 13 micrômetros, bem como o contorno de grão bastante evidente. Já a direita, é possível notar uma região com perlitas finas com espaçamento interlamelar com espaçamentos de ordem de grandeza inferiores a 0,1 micrômetros.



(a) Região 2 2000x

(b) Região 2 3000x

Figura 43 – Ampliações da Região 2

Fonte: Autor

As imagens da região 3, Figuras 44 e 45 no centro da poça de fusão, apresentam microestrutura que com a granulação basicamente de perlita fina. Uma característica presente na literatura, bastante esperada para esta região é a presença de micro-rechupes ao longo da porção central da solda. A ausência dos mesmos e a alta presença de perlita fina, pode-se constatar que a solda em questão apresenta altíssima qualidade. A nível de análise micrográfica, não foi foram constatados nenhum dos defeitos apresentados no capítulo de Revisão Bibliográfica. O espaçamento interlamelar muito pequeno, novamente da ordem de grandeza menor que 0,1 micrômetro. A partir disso é razoável afirmarmos que a qualidade e as propriedades microestruturais da região da solda apresenta qualidade que pode ser comparada com as regiões do metal base, porém esta é uma circunstância excepcional e não se apresenta desta forma na maioria dos casos.

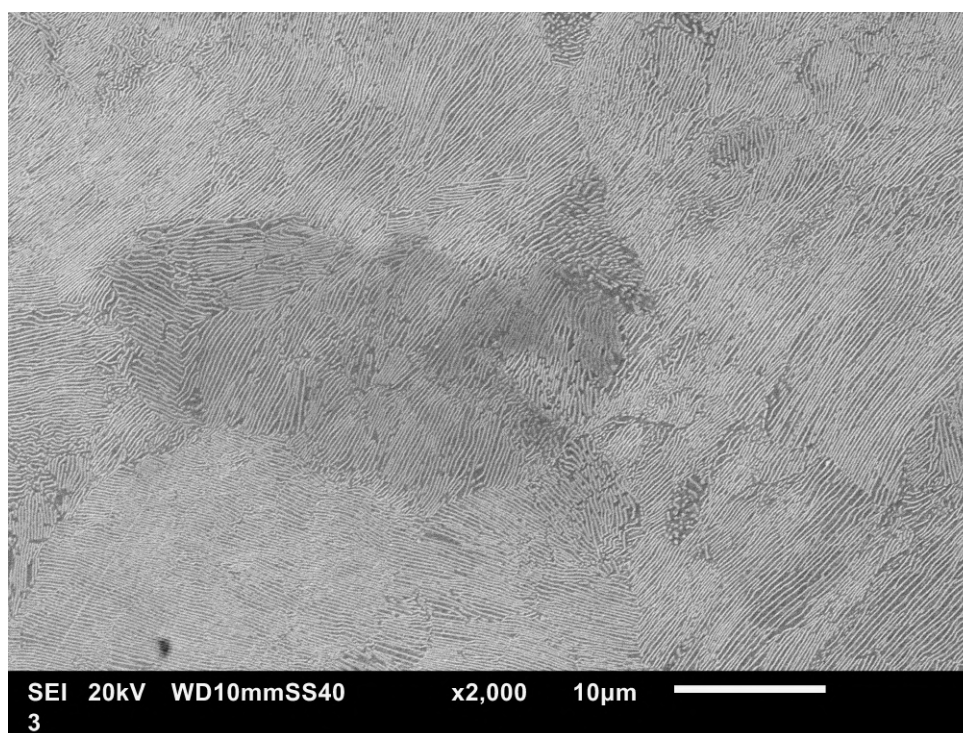


Figura 44 – Microestrutura da região 3 da amostra, 2000x

Fonte: Autor

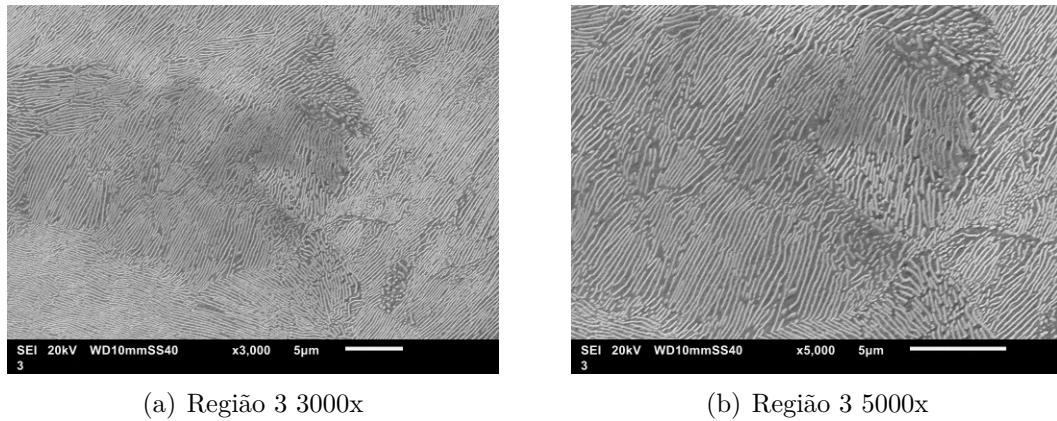


Figura 45 – Ampliações da Região 3

Fonte: Autor

Na região 4, a análise que pode ser feita é análoga a região 2, porém esta situada na região do trilho desgastado. Pelas Figuras 46 e 47, fica evidente a caracterização de uma região que conta praticamente com perlita esferoidizada, porém no trilho desgastado esta não conta com manchas mais escuras de ferrita livre, ou carbonetos de maior granulação. As inclusões que eram observadas na região 2, nem mesmo nas imagens de maior ampliação não são detectadas, contribuindo para que possamos atribuir as características de homogeneidade .

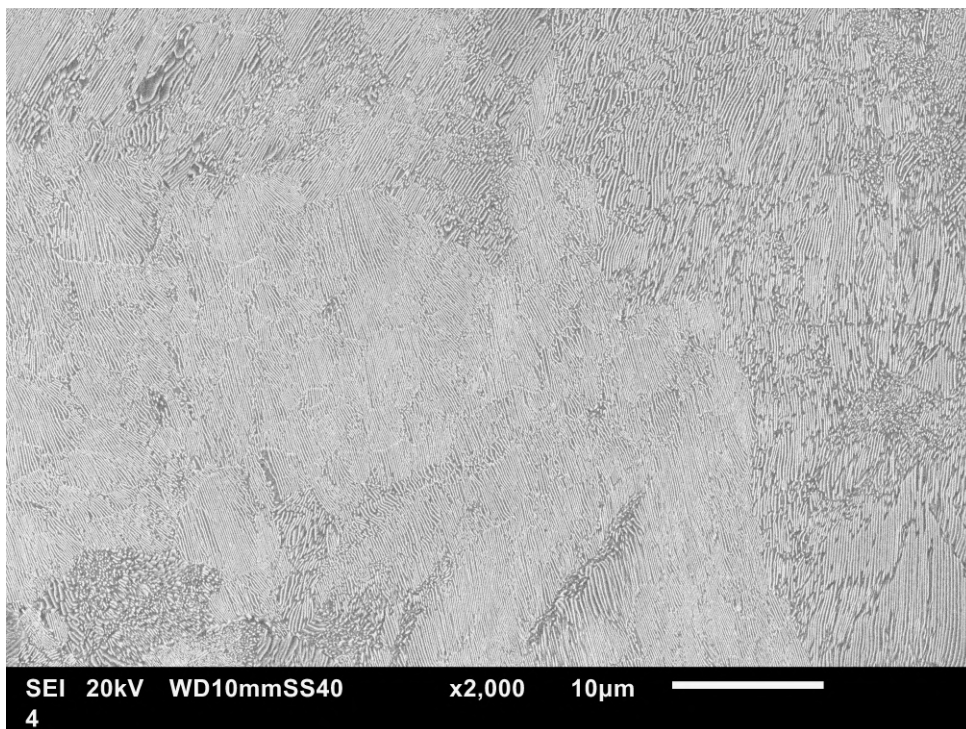
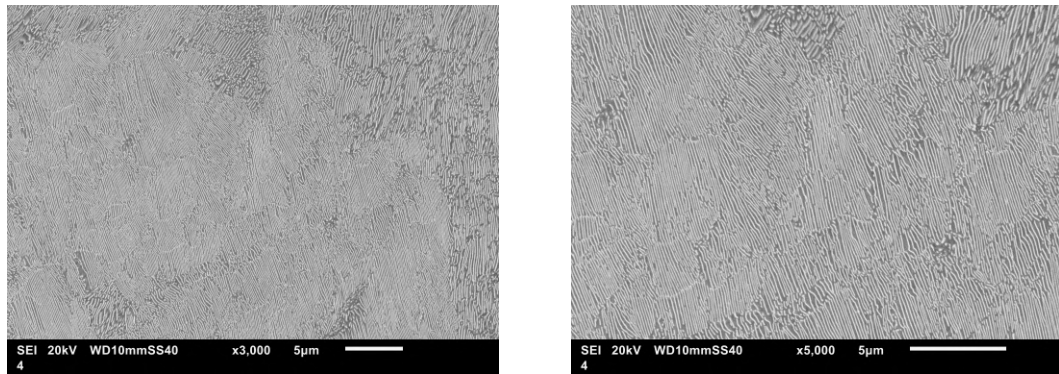


Figura 46 – Microestrutura da região 4 da amostra, 2000x

Fonte: Autor





(a) Região 4 3000x

(b) Região 4 5000x

Figura 47 – Ampliações da Região 4

Fonte: Autor

Ao longo da região 5, Figuras 48 e 49, a presença de predomina a perlita esferoidizada, formada como consequência de uma dissolução incompleta de cementita em austenita, a temperaturas dentro da temperatura crítica zona, gerando uma estrutura com um núcleos de cementita. Durante o resfriamento subsequente imposto na ZAC, esses núcleos crescem com uma morfologia esferoidizada, de forma semelhante ao que foi evidenciado na análise da região 1.

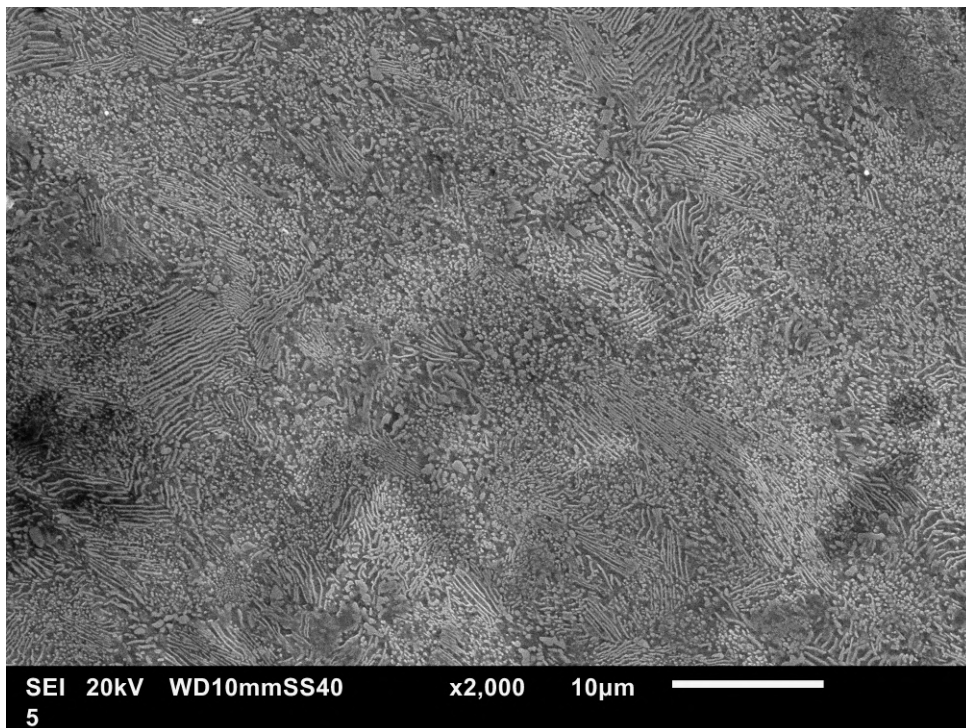
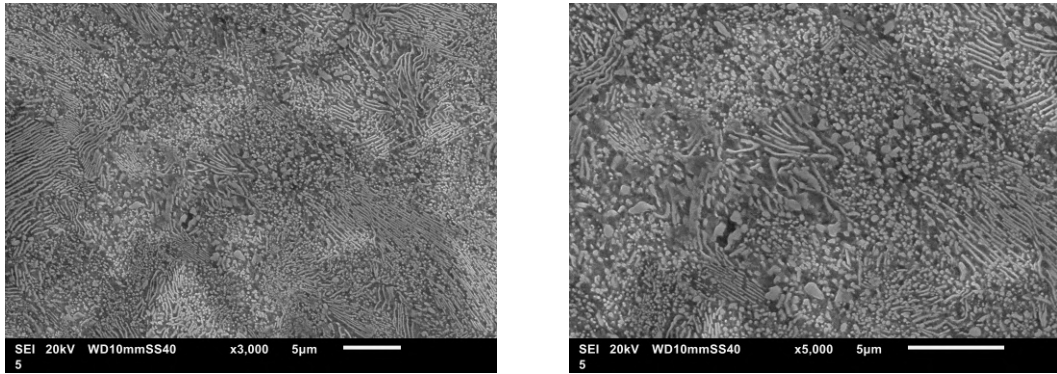


Figura 48 – Microestrutura da região 5 da amostra, 2000x

Fonte: Autor

Por fim, é importante pontuar que o trilho com perfil desgastado, região 5, não apresentou grandes diferenças microestruturais nas regiões de limite da ZAC para a amostra utilizada neste trabalho. Para estabelecer esta afirmação, entretanto, será sugerido como atividade para trabalhos futuros realizar esta análise para demais corpos de prova.



(a) Região 5 3000x

(b) Região 5 5000x

Figura 49 – Ampliações da Região 5

Fonte: Autor

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho se encerra com a garantia de que os objetivos foram alcançados, onde a Revisão Bibliográfica demonstrou fundamental importância para a compreensão de todos os conceitos e premissas teóricas estabelecidas para a realização dos ensaios. O conhecimento detalhado da Metodologia contribuiu para que todos os procedimentos e testes fossem realizados de forma criteriosa e normativa, garantindo maior credibilidade aos resultados apresentados.

A análise macroscópica mostrou que, na fusão zona, a granulometria próxima ao limite da fusão foi muito mais refinado do que o resto da fusão material da zona. Dendritos alinhados em direção ao centro e topo da solda também foram observados com bastante evidência na macrografia. Além disso os melhores resultados foram obtidos através do ataque químico utilizando solução de Nital.

Os testes de dureza demonstraram que a soldagem junta apresenta dureza homogênea do piso face do trilho para o centro. Além disso, para todo o corpo de prova, dureza do metal de solda é igual ou maior que a dureza do trilho, que atesta a boa qualidade do metal de solda a esse respeito. No áreas da ZAC a dureza cai consideravelmente, atingindo, próximo às bordas do ZAC, não apresentando simetria, devido aos trilhos unidos possuírem diferentes perfis de desgaste, valores em torno de a metade da dureza do trilho.

A caracterização química mostrou que a amostra consistia em um material com baixo teor de carbono. Além disso, a ZF apresentou maior teor de elementos presentes na mistura aluminotérmica, em destaque para o Silício, Cromo, Alumínio, Molibdênio, Cobre, Níquel e Vanádio que atingem seus maiores valores na composição química.

A análise microestrutural mostrou refinada perlita na região do metal de solda, especialmente perto de o limite de fusão. Na ZAC, começa a perlita para obter carbonetos um pouco mais espessos e fragmentados começar para aparecer nos contornos das colônias. Perto de bordas da ZAC a estrutura é predominantemente esferoidizado, típico de eutetoide divorciado (DET). Para resultados mais precisos há a necessidade de um número maior de amostras, com conseqüentemente mais réplicas, acompanhado de um estudo estatístico integrado entre os defeitos superficiais e internos identificados nas soldas, o perfil de dureza, composição química das amostras, macrografias e micrografias. Pode-se também incluir mais variáveis ao estudo como, por exemplo, faixa de temperatura atingida pela solda, tempo de resfriamento, temperatura ambiente no momento da soldagem, tempo de pré aquecimento e GAP de posicionamento dos trilhos.

Como sugestão para trabalhos futuros tem-se os seguintes tópicos abaixo:

- Novas práticas para a soldagem aluminotérmica para trilhos com diferentes perfis de desgaste;

- Realizar análise quantitativa, com maior número de amostras, para o processo de Soldagem Aluminotérmica em trilhos com diferentes perfis de desgaste.
- E estudo de viabilidade para emprego de outros processos de solda em campo, como caminhões rodoferroviários de solda elétrica ou gás pressurizado que poderiam substituir a solda aluminotérmica.
- Análise estatística dos resultados obtidos;
- Estudo e acompanhamento das soldas realizadas periodicamente através do cumprimento de procedimentos e relatórios de falhas e defeitos;

## REFERÊNCIAS

- [1] AGLAN, H.A. et al. **Mechanical and fracture behavior of bainitic rail steel.** Journal of Processing Technology, Elsevier, Volume 151, Issues 1-3, pp. 268-274, September 2004.
- [2] ALVES, L.H.D. **Mathematical Modeling to Predict and Optimize Mechanical Properties and Microstructural Heterogeneities of Welds and Heat-Affected Zones in Vale's Thermite Welding Process,** International Heavy Haul STS Conference, 2019.
- [3] ANTT - Agência Nacional de Transportes Terrestres. **Evolução do transporte ferroviário de cargas.** Brasília, agosto de 2016. Disponível em: <<http://www.antt.gov.br>>. Acesso: 10/03/2019.
- [4] BOSCH. **Lixadeira Manual Bosch.** Disponível em: <<https://www.bosch-professional.com/br/pt/>>. Acesso em: 21/09/2019.
- [5] BOUZAN, B.M. **Efeito das variáveis de processo na qualidade de soldas aluminotérmicas em trilhos ferroviários,** 2003.
- [6] BRACARENCE, A. Q. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia.** Elsevier Brasil, 2011.
- [7] CALLISTER, W.D.Jr **Fundamentals of Materials Science and Engineer.** Department of Metallurgical Engineering The University of Utah. 5ed, 2012.
- [8] CHEN, C.C., POLLACK, A. **Microalloying International, Inc. Influence of Welding on Steel Weldment Properties.** ASM International. 1996; p.1083-1085.
- [9] COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns.** Editora Blucher, São Paulo Brasil, 2008.
- [10] DA SILVA, Claudio M. **Perfil de Dureza e Composição Química da solda e regiões afetadas pela solda aluminotérmica de trilhos empregados por um empresa mineradora.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Juiz de Fora – Faculdade de Engenharia, Juiz de Fora, 2017
- [11] DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **ETM-010 – solda aluminotérmica: especificação técnica de serviço.** [S/D].
- [12] EDMONDS, D. V. **Bainite Structures. ASM Handbooks.** Metals Park, Ohio: ASM, 1995. v.9, p.662-667.
- [13] HENRIQUE C. **Manutenção de via permanente com foco na produção.** Trabalho de conclusão de curso. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2006.
- [14] LAWRENCE, F. V et al. **Improving the Fatigue Resistance of Thermite Railroad Rail Weldments.** University of Illinois, Illinois. 2014?. Disponível em: <<http://fcp.mechse.illinois.edu/files/2014/07/Lawrence-presentation.pdf> >. Acessado em 22/06/2019.

- [15] MACÊDO, F. B. **Estudo do desgaste de trilhos ferroviários**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Juiz de Fora – Faculdade de Engenharia, Juiz de Fora, 2009.
- [16] MACEDO, M. L. K. **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: 27 out. 2018.
- [17] 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.
- [18] POSSALI, Andreia M. **Análise Macrográfica de Soldas Aluminotérmicas de Trilhos Ferroviários**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Juiz de Fora – Faculdade de Engenharia, Juiz de Fora, 2018
- [19] RAILTECH. **Site da empresa: Catálogo de Produtos**. [S/D]. Disponível em: <<http://www.iat-pandrolbrasil.com.br/produtos/produtosrailtech>>. Acesso em 04/08/2019.
- [20] **ROCKWELL Analógico**. 2016. Disponível em: <<http://www.equilam.com/produtos.php?id=243>>. Acesso em: 29/02/2019.
- [21] ROLDO, L. **Análise de Tensões Residuais em Trilhos Ferroviários**.. Dissertação, PPGEM, UFRGS, 1998.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] SARTORI, M. **Caracterização Mecânica e Metalúrgica de soldas aluminotérmica em trilhos ferroviários**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2010.
- [25] SCHNEIDER, E. L. **Análise da Vida Remanescente de Trilhos com Defeitos Transversais Desgastados em Serviço**. Dissertação. PPGEM, UFRGS, 2005.
- [26] SCHWARTZ, B. **ASM Metals Handbook vol. 6. Welding, Soldering and Brazing**, ASM International. p.835-839 e p.110-129, 1993.
- [27] SILVA, P. R. T. **Caracterização de trilhos ferroviários quanto a tenacidade à fratura e comportamento em fadiga**, 93p. Dissertação, Mestrado – PPGEMM Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 1995.
- [28] STEFFLER, Fabio. **Via Permanente Aplicada: Guia Teórico e Prático**, Paperback, 2013.

- [29] 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: 10 nov. 2018. Disponível em: <http://www.dnit.gov.br/>. Acesso em: 02 fev. 2019

**ANEXO A – TERMO DE AUTENTICIDADE****UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
FACULDADE DE ENGENHARIA****Termo de Declaração de Autenticidade de Autoria**

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

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

Declaro, por fim, ter total conhecimento e compreensão das punições decorrentes da prática de plágio, através das sanções civis previstas na lei do direito autoral<sup>1</sup> e criminais previstas no Código Penal<sup>2</sup>, além das cominações administrativas e acadêmicas que poderão resultar em reprovação no Trabalho de Conclusão de Curso.

Juiz de Fora, 20 de Novembro de 2019.

---

Gérson Fernando Rocha Oliveira – Discente  
Matrícula: 201571003 – CPF: 134.800.076-78

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

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