

Universidade Federal de Juiz de Fora  
Departamento de Engenharia de Produção e Mecânica  
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica

**Danielle Domingos Ribeiro**

**Análise Macroestrutural e das Propriedades Mecânicas da Zona  
Termicamente Afetada de Trilhos Ferroviários Soldados por  
Centelhamento**

Juiz de Fora

2018

**Danielle Domingos Ribeiro**

**Análise Macroestrutural e das Propriedades Mecânicas da Zona  
Termicamente Afetada de Trilhos Ferroviários Soldados por  
Centelhamento**

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

Coorientador: Prof. Dr. Moisés Luiz Lagares Júnior

Juiz de Fora

2018

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

Domingos Ribeiro, Danielle.

Análise Macroestrutural e das Propriedades Mecânicas da Zona Termicamente Afetada de Trilhos Ferroviários Soldados por Centelhamento / Danielle Domingos Ribeiro. – 2018.

106 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Henrique Dias Alves

Coorientador: Prof. Dr. Moisés Luiz Lagares Júnior

Dissertação – Universidade Federal de Juiz de Fora, Departamento de Engenharia de Produção e Mecânica. Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, 2018.

1. Zona termicamente afetada. 2. Trilhos ferroviários. 3. Soldagem por centelhamento. 4. Macrografia. 5. Método de Taguchi. I. Alves, Luiz Henrique Dias, orient. II. Lagares Júnior, Moisés Luiz, coorient. III. Título.

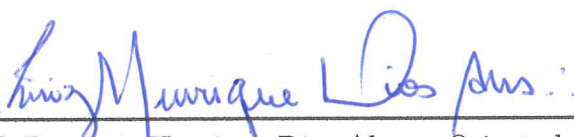
**Danielle Domingos Ribeiro**

**Análise Macroestrutural e das Propriedades Mecânicas da Zona  
Termicamente Afetada de Trilhos Ferroviários Soldados por  
Centelhamento**

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 06 de Novembro de 2018.

**BANCA EXAMINADORA**

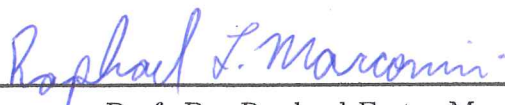


---

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

---

Prof. Dr. Moisés Luiz Lagares Júnior - Coorientador  
Universidade Federal de Juiz de Fora



---

Prof. Dr. Raphael Fortes Marcomini  
Universidade Federal de Juiz de Fora

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar à minha família, por estar ao meu lado ao longo de todo esse período, principalmente à minha mãe, que é a minha base em todos os momentos.

Aos meus amigos e familiares, por todo o apoio que sempre me deram ao longo dessa jornada.

Aos meus orientadores Dr. Luiz Henrique Dias Alves e Dr. Moisés Lagares Júnior pela oportunidade de estar nesse projeto, e por terem me orientado com paciência e confiança.

Aos demais bolsistas do projeto Cátedra, com destaque para Andreia Maria Possali e Tiago Carvalho Tepedino Cruz, Klissian Chinaider Reis e Davi de Carvalho Gonçalves por terem me ajudado a realizar meu trabalho, e por terem desenvolvido trabalhos de excelência que contribuíram para o desenvolvimento da minha pesquisa.

À VALE S.A pelo projeto, e pelas oportunidades que tive que engrandeceram ainda mais minha formação.

A todos os professores e técnicos administrativos do curso de Engenharia Mecânica da UFJF, pelo auxílio ao longo da pesquisa e também ao longo da graduação.

Às demais pessoas que, ao exercerem suas funções ao longo desses anos, mesmo sem me conhecerem, me permitiram chegar até aqui.

Independentemente das circunstâncias, nunca permitir-se ser derrotado.

Josei Toda

## RESUMO

O setor ferroviário apresenta grande relevância no transporte de cargas no cenário nacional. Para que seja possível aumentar a eficiência do transporte, ou seja, elevar a quantidade de carga transportada por eixo, faz-se necessário realizar estudos de aprimoramento a seus diversos componentes, dentre os quais destacam-se as soldas dos trilhos. Para avaliar a qualidade das soldas e conseqüentemente aprimorar seus parâmetros, foi desenvolvido, em parceria com a VALE S.A - PROJETO CÁTEDRA RODA TRILHO, um estudo onde foram selecionados quatro parâmetros do processo de soldagem – corrente, quantidade de pulsos, força de recalque e carbono equivalente. Foram avaliados 32 trilhos sendo 16 do tipo DHH e 16 do tipo UHC. Para todas as amostras, após os cortes foram realizados ensaios macrográficos e de dureza, nos quais foi possível caracterizar a zona termicamente afetada (ZTA) e perceber que o tamanho da ZTA, a queda de dureza e o tamanho do dente de vampiro ZTA – reduções equidistantes da dureza na região de esferoidização – devam ser minimizados. Dessa forma, avaliou-se pelo método de Taguchi qual combinação de fatores melhor contribui para a redução desses parâmetros e conseqüentemente para maior qualidade da solda. Ao fim das análises, observou-se que para atender aos quesitos esperados deve-se, de um modo geral, realizar o processo de soldagem com a corrente e a quantidade de pulsos no ponto inferior.

Palavras-chave: Zona termicamente afetada. Trilhos ferroviários. Soldagem por centelhamento. Macrografia. Método de Taguchi.

## ABSTRACT

The rail sector is of great importance in the transport of cargoes in the national scenario. In order to increase the efficiency of transport, ie to increase the amount of cargo transported by axle, it is necessary to carry out studies to improve its various components, among which the welding of the rails. In order to evaluate the quality of the welds and consequently to improve their parameters, a study was developed in partnership with VALE S.A PROJECT CÁTEDRA RODA TRILHO, where four welding process parameters - current, number of pulses, settling force and carbon equivalent were selected. Thirty-two rails were evaluated, 16 being DHH type and 16 UHC type. For all samples, after the cuts were performed macrographic and hardness tests, in which it was possible to characterize the thermally affected zone (ZTA) and to realize that the size of the ZTA, the hardness fall and the size of the vampire tooth ZTA - reductions equidistant from the hardness in the spheroidization region - should be minimized. Thus, it was evaluated by the Taguchi method which combination of factors best contributes to the reduction of these parameters and consequently to a higher weld quality. At the end of the analysis, it was observed that in order to meet the expected requirements, it is generally necessary to carry out the welding process with the current and the number of pulses at the lower point.

Key-words: Thermally Affected Zone. Railroad racks. Welding by sparking. Macrography. Taguchi method.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Elementos básicos constituintes da via permanente . . . . .	23
Figura 2 – Perfil do trilho do tipo Vignole . . . . .	24
Figura 3 – Estrutura cristalina das microestruturas . . . . .	26
Figura 4 – Etapas do processo de soldagem por centelhamento (A)Posicionamento das peças (B)Aplicação da tensão de cisalhamento (C)Centelhamento (D)Aplicação da força de recalque . . . . .	28
Figura 5 – Ponto de contato das irregularidades da superfície da junta . . . . .	29
Figura 6 – Diagrama Ferro Carbono . . . . .	35
Figura 7 – Macrografia de boleto de solda por centelhamento . . . . .	39
Figura 8 – Microscopia eletrônica de varredura em solda por centelhamento em (A)Região austenitizada (B)Região intermediária (C)Região de menor dureza (D)Material base . . . . .	40
Figura 9 – Variação da dureza da ZTA e no metal base para:(a) aços com baixo teor de de carbono e (b) um aço ligado Cr-Ni-Mo . . . . .	41
Figura 10 – Modelo de tabela ANOVA . . . . .	50
Figura 11 – Gráfico linear para o L8 . . . . .	53
Figura 12 – Equipamento de corte de trilho por abrasão . . . . .	54
Figura 13 – Serra de fita utilizada para o corte dos trilhos . . . . .	55
Figura 14 – Durômetro utilizado para ensaios de dureza . . . . .	56
Figura 15 – Chapa aquecedora utilizada no ensaio macrográfico . . . . .	57
Figura 16 – Trilhos alocados no laboratório de análises metalográficas da UFJF	58
Figura 17 – Representação da localização das amostras nos trilhos . . . . .	58
Figura 18 – Cortes realizados nas soldas . . . . .	59
Figura 19 – Soldas prontas para análises subsequentes . . . . .	59
Figura 20 – Solução empregada no ensaio . . . . .	60
Figura 21 – Disposição dos pontos de dureza . . . . .	61
Figura 22 – Resultado macrografia solda D1 . . . . .	62
Figura 23 – Resultado ensaio de dureza solda D1 . . . . .	62
Figura 24 – Resultado macrografia solda D8 . . . . .	63
Figura 25 – Resultado ensaio de dureza solda D8 . . . . .	63
Figura 26 – Resultado macrografia solda D11 . . . . .	64

Figura 27 – Resultado ensaio de dureza solda D11 . . . . .	64
Figura 28 – Resultado macrografia solda D13 . . . . .	65
Figura 29 – Resultado ensaio de dureza solda D13 . . . . .	65
Figura 30 – Resultado macrografia solda V1 . . . . .	66
Figura 31 – Resultado ensaio de dureza solda V1 . . . . .	66
Figura 32 – Resultado macrografia solda V6 . . . . .	67
Figura 33 – Resultado ensaio de dureza solda V6 . . . . .	67
Figura 34 – Resultado macrografia solda V12 . . . . .	68
Figura 35 – Resultado ensaio de dureza solda V12 . . . . .	68
Figura 36 – Resultado macrografia solda V14 . . . . .	69
Figura 37 – Resultado ensaio de dureza solda V14 . . . . .	69
Figura 38 – Resultado macrografia solda V2 . . . . .	70
Figura 39 – Resultado ensaio de dureza solda V2 . . . . .	70
Figura 40 – Resultado macrografia solda V7 . . . . .	71
Figura 41 – Resultado ensaio de dureza solda V7 . . . . .	71
Figura 42 – Resultado macrografia solda V9 . . . . .	72
Figura 43 – Resultado macrografia solda V9 . . . . .	72
Figura 44 – Resultado macrografia solda V13 . . . . .	73
Figura 45 – Resultado ensaio de dureza solda V13 . . . . .	73
Figura 46 – Resultado macrografia solda D2 . . . . .	74
Figura 47 – Resultado ensaio de dureza solda D2 . . . . .	74
Figura 48 – Resultado macrografia solda D7 . . . . .	75
Figura 49 – Resultado ensaio de dureza solda D7 . . . . .	75
Figura 50 – Resultado macrografia solda D12 . . . . .	76
Figura 51 – Resultado ensaio de dureza solda D12 . . . . .	76
Figura 52 – Resultado macrografia solda D16 . . . . .	77
Figura 53 – Resultado ensaio de dureza solda D16 . . . . .	77
Figura 54 – Resultado macrografia solda V3 . . . . .	78
Figura 55 – Resultado ensaio de dureza solda V3 . . . . .	78
Figura 56 – Resultado macrografia solda V5 . . . . .	79
Figura 57 – Resultado ensaio de dureza solda V5 . . . . .	79
Figura 58 – Resultado macrografia solda V11 . . . . .	80
Figura 59 – Resultado ensaio de dureza solda V11 . . . . .	80

Figura 60 – Resultado macrografia solda V16 . . . . .	81
Figura 61 – Resultado ensaio de dureza solda V16 . . . . .	81
Figura 62 – Resultado macrografia solda D3 . . . . .	82
Figura 63 – Resultado ensaio de dureza solda D3 . . . . .	82
Figura 64 – Resultado macrografia solda D5 . . . . .	83
Figura 65 – Resultado ensaio de dureza solda D5 . . . . .	83
Figura 66 – Resultado macrografia solda D9 . . . . .	84
Figura 67 – Resultado ensaio de dureza solda D9 . . . . .	84
Figura 68 – Resultado macrografia solda D15 . . . . .	85
Figura 69 – Resultado ensaio de dureza solda D15 . . . . .	85
Figura 70 – Resultado macrografia solda D4 . . . . .	86
Figura 71 – Resultado ensaio de dureza solda D4 . . . . .	86
Figura 72 – Resultado macrografia solda D6 . . . . .	87
Figura 73 – Resultado ensaio de dureza solda D6 . . . . .	87
Figura 74 – Resultado macrografia solda D10 . . . . .	88
Figura 75 – Resultado ensaio de dureza solda D10 . . . . .	88
Figura 76 – Resultado macrografia solda D14 . . . . .	89
Figura 77 – Resultado ensaio de dureza solda D14 . . . . .	89
Figura 78 – Resultado macrografia solda V4 . . . . .	90
Figura 79 – Resultado ensaio de dureza solda V4 . . . . .	90
Figura 80 – Resultado macrografia solda V8 . . . . .	91
Figura 81 – Resultado ensaio de dureza solda V8 . . . . .	91
Figura 82 – Resultado macrografia solda V10 . . . . .	92
Figura 83 – Resultado ensaio de dureza solda V10 . . . . .	92
Figura 84 – Resultado macrografia solda V15 . . . . .	93
Figura 85 – Resultado ensaio de dureza solda V15 . . . . .	93
Figura 86 – Efeitos principais para razões S/N para ZTA . . . . .	95
Figura 87 – Efeitos principais para razões S/N para Dureza . . . . .	97
Figura 88 – Efeitos principais para razões S/N para dente de vampiro . . . . .	99

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química dos trilhos . . . . .	51
Tabela 2 – valores superior e inferior dos parâmetros escolhidos para o método de Taguchi . . . . .	52
Tabela 3 – Montagem dos experimentos . . . . .	53
Tabela 4 – Montagem dos experimentos para ZTA . . . . .	96
Tabela 5 – Análise de variância pela razão S/R-Tamanho da ZTA . . . . .	96
Tabela 6 – Montagem dos experimentos para queda de dureza . . . . .	98
Tabela 7 – Análise de variância pela razão S/R- Queda de dureza . . . . .	98
Tabela 8 – Montagem dos experimentos para largura do dente de vampiro .	100
Tabela 9 – Análise de variância pela razão S/R- Redução dente de vampiro	100

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAR	Association of American Railroads
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANTF	Associação Nacional de Transportes Ferroviários
ASTM	American Society for Testing and Materials
AREMA	American Railway Engineering and Maintenance of Way Association
CCC	Cúbico de corpo centrado
CFC	Cúbico de face centrada
UIC	Internacional Union of Railways
PEE	Planejamento Estatístico dos Experimentos
ZTA	Zona Termicamente Afetada

## LISTA DE SÍMBOLOS

%pC	Porcentagem de Carbono
CE	Carbono Equivalente
C	Carbono
Mn	Manganês
Si	Silício
Mo	Molibdênio
Cr	Cromo
Ni	Níquel
V	Vanádio
Cu	Cobre
P	Fósforo
S	Enxofre

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>16</b>
1.1	Contextualização e motivação . . . . .	16
1.2	Justificativa . . . . .	18
1.3	Escopo do trabalho . . . . .	19
1.4	Objetivos . . . . .	20
1.4.1	Objetivo Geral . . . . .	20
1.4.2	Objetivo Específico . . . . .	20
1.5	Definição da metodologia . . . . .	20
1.6	Estrutura do trabalho . . . . .	21
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA . . . . .</b>	<b>23</b>
2.1	Trilhos ferroviários . . . . .	23
2.1.1	Geometria . . . . .	24
2.1.2	Composição química e tratamentos . . . . .	25
2.2	Processo de soldagem por resistência . . . . .	26
2.2.1	Processo de soldagem topo a topo por centelhamento - Flash Welding (FW) . . . . .	27
2.2.1.1	Pré Aquecimento . . . . .	27
2.2.1.2	Centelhamento . . . . .	29
2.2.1.3	Recalque . . . . .	29
2.2.1.4	Etapas adicionais ao processo . . . . .	30
2.2.2	Máquinas e equipamentos para soldagem por centelhamento . . .	30
2.2.3	Aplicações do processo de soldagem topo a topo por centelhamento	31
2.2.4	Variáveis do processo . . . . .	31
2.2.4.1	Modelo de centelhamento . . . . .	32
2.2.4.2	Tensão de centelhamento . . . . .	32
2.2.4.3	Corrente de centelhamento . . . . .	32
2.2.4.4	Distância inicial de fixação . . . . .	33
2.2.4.5	Velocidade de Recalque . . . . .	33

2.2.4.6	Força de recalque . . . . .	33
2.2.4.7	Distância de recalque . . . . .	33
2.2.4.8	Tempo de corrente de recalque . . . . .	34
2.2.4.9	Quantidade de pulsos . . . . .	34
2.2.4.10	Carbono Equivalente . . . . .	34
2.3	Zona Termicamente Afetada (ZTA) . . . . .	37
2.4	Dureza das soldas por centelhamento . . . . .	39
2.5	Macrografia . . . . .	40
2.6	Ensaio de dureza . . . . .	42
2.6.1	Ensaio Rockwell . . . . .	43
2.7	Norma AREMA . . . . .	43
2.8	Método de Taguchi . . . . .	45
2.8.1	Planejamento estatístico dos experimentos . . . . .	45
2.8.2	Experimento fatorial completo . . . . .	46
2.8.3	Arranjo ortogonal e matriz experimental . . . . .	46
2.8.4	Experimentos fatoriais fracionados . . . . .	46
2.8.5	Método de Taguchi . . . . .	47
2.8.6	Análise estatística dos experimentos . . . . .	49
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA . . . . .</b>	<b>51</b>
3.1	Descrição do material utilizado . . . . .	51
3.2	Descrição dos equipamentos utilizados . . . . .	53
3.2.1	Máquina de centelhamento . . . . .	53
3.2.2	Serra de fita horizontal manual . . . . .	54
3.2.3	Durômetro Rockwell normal analógico . . . . .	55
3.2.4	Chapa aquecedora . . . . .	56
3.3	Metodologia experimental . . . . .	57
3.3.1	Ensaio de macrografia . . . . .	60
3.3.2	Ensaio de dureza . . . . .	61
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISES . . . . .</b>	<b>62</b>
4.1	Resultados ensaios macrográficos e de dureza . . . . .	62
4.2	Modelos matemáticos e análise de variância . . . . .	94



4.2.1	Resultados do tamanho da ZTA . . . . .	94
4.2.2	Resultado para a queda de dureza . . . . .	97
4.2.3	Resultado para a largura do dente de vampiro . . . . .	99
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES . . . . .</b>	<b>101</b>
5.1	Sugestões para Trabalhos Futuros . . . . .	102
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>103</b>
	<b>ANEXO A – TERMO DE AUTENTICIDADE . . . . .</b>	<b>106</b>

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 Contextualização e motivação

O transporte ferroviário é um tipo de deslocamento realizado através das vias férreas, caracterizado por sua capacidade de transportar grandes volumes com elevada eficiência energética, principalmente em casos de deslocamento a médias e longas distâncias. Dentre as cargas típicas transportadas pode-se citar produtos siderúrgicos, minérios, grãos, derivados do petróleo, cimento, dentre outros. No Brasil, o sistema ferroviário concentra-se nas regiões Sul, Sudeste e Nordeste, atendendo parte do Centro Oeste e Norte do país.

De acordo com a ANTF (Associação Nacional dos transportadores ferroviários), no Brasil, o transporte ferroviário apresenta aproximadamente 25% do total da matriz de transportes. Apesar de ainda ter uma pequena participação, principalmente em relação ao transporte rodoviário, as ferrovias se mostram extremamente importantes, uma vez que mais de 90% do minério do país chegam aos portos pelos trilhos. O modal ainda responde pelo transporte de mais de 42% dos grãos sólidos agrícolas exportados e no caso do açúcar, esse índice é de quase 55%.

Devido à importância do setor ferroviário para a economia, e visando continuamente o aumento da produtividade e a redução dos custos, faz-se necessário realizar um processo contínuo de aprimoramento nos diversos componentes que compõem esse modal de transporte, gerando conseqüentemente maior eficiência do sistema e competitividade das empresas.

De acordo com Gonçalves (2017), para aumentar sua competitividade, as empresas ferroviárias buscam transportar um maior volume de carga em um menor tempo de viagem. Entretanto a consequência do aumento da velocidade do trem e do aumento da carga por eixo é o maior desgaste do conjunto roda-trilho, que tende a falhar na região soldada.

O fenômeno da deterioração estrutural, que é a causa típica de falha de trilhos modernos comumente envolve fadiga de controle de deformação e também

está relacionado com as interações mecânicas de rodas e trilhos. (X.ZHAO ET AL, 2015)

Em relação à junta soldada, quatro métodos são usados para unir trilhos, a saber: a solda de topo por pressão, soldagem aluminotérmica, a soldagem por centelhamento e soldagem de arco fechado. Dessas, a soldagem por centelhamento tem a maior eficiência de soldagem, com um tempo de soldagem de aproximadamente 1,5 – 4 min, e também é um excelente método do ponto de vista de estabilidade e controle da qualidade. (FUJI, 2015)

Como a falha por fadiga é um dos principais modos de falha das ferrovias durante suas vidas de serviço, juntas de solda são frequentemente as partes mais fracas e sua qualidade afeta diretamente o desempenho de fadiga e a vida útil das ferrovias.

Para investigar o impacto dos parâmetros do processo de soldagem, bem como a influência das características mecânicas e metalúrgicas das juntas na qualidade da solda de trilhos, foi desenvolvido pela empresa VALE o projeto CÁTEDRA RODA-TRILHO. Essa iniciativa, tem como objetivo caracterizar as juntas soldadas empregadas pela empresa, desenvolvendo otimizações nos processos e procedimentos para adequar as características da solda visando maior vida útil e qualidade em serviço.

Conforme Gonçalves (2017), a duração do trabalho nessa etapa foi ao todo de aproximadamente 30 meses, com uma expectativa de produção de um extenso volume de trabalhos científicos, podendo ser dividido em três etapas:

- Primeira etapa: realizar uma revisão geral dos processos de soldagem de trilhos por centelhamento. Nesta fase serão levantados todos os parâmetros de soldagem empregados atualmente e a relação causa-efeito sobre a junta soldada;
- Segunda etapa: Caracterização completa dessas juntas, compreendendo variação microestrutural, macroestrutural, área de diluição, composição química, dureza e propriedades mecânicas;
- Terceira etapa: Elaborar um modelo matemático que possibilitará prever os

níveis que as principais variáveis devem assumir para se obter as propriedades desejadas

O projeto, que conta com a participação de diversas instituições de ensino do país, dentre elas a Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), está sendo desenvolvido em parceria com os estaleiros de solda e as ferrovias da empresa. A partir de uma visita realizada às dependências da empresa na ferrovia de Carajás, em São Luiz do Maranhão (MA), identificou-se uma grande intensidade de falhas nas áreas de juntas soldadas. Devido às necessidades de aumento da produtividade no transporte de cargas, bem como a redução dos custos, o estudo e aprimoramento dos parâmetros que influenciam na região soldada de trilhos é um fator crucial e também estratégico do ponto de vista financeiro.

Outra motivação para o desenvolvimento deste projeto se faz devido à falta de material acadêmico na literatura referente ao processo de soldagem por centelhamento e a influência dos parâmetros na qualidade das soldas. Dessa forma, objetiva-se também gerar conhecimento e material de pesquisa que possa ser útil para o aprimoramento de tecnologias de soldagem na área de ferrovias como um todo.

## 1.2 Justificativa

O presente trabalho tem seu desenvolvimento embasado na segunda parte do projeto CÁTEDRA RODA-TRILHO descrita no item anterior, principalmente no que se refere à compreensão da macroestrutura, da dureza e das propriedades mecânicas da junta soldada, principalmente no que tange à Zona Termicamente Afetada (ZTA). Esse entendimento visa identificar a influência dos parâmetros e processos de soldagem na qualidade da junta soldada objetivando o aprimoramento destes e conseqüentemente a qualidade da solda.

De acordo com Albuquerque (2011), a extensão da zona termicamente afetada assim como a sua granulometria é de fundamental importância no que diz respeito às propriedades mecânicas da junta soldada. Além disso, as características

das ZTA dependem, além da composição química dos consumíveis, dos parâmetros, procedimentos e processos de soldagem utilizados.

Com base nessa justificativa, serão realizadas análises nas soldas, primeiramente a partir de ensaios macrográficos e, em seguida, com a análise do perfil de dureza ao longo de toda a região soldada, com foco na região da ZTA, comparando por fim essas informações e identificando o grau e a intensidade da influência dos parâmetros e procedimentos de soldagem nos resultados.

### 1.3 Escopo do trabalho

O presente trabalho desenvolve uma comparação entre a dureza e a composição macroestrutural da região da junta soldada, principalmente no que tange à caracterização da zona termicamente afetada pelo calor (ZTA), avaliando como os parâmetros envolvidos no processo de soldagem por centelhamento afeta a qualidade da junta soldada.

As soldas foram realizadas no estaleiro de soldas da VALE, na cidade de São Luis do Maranhão (MA). Após a finalização do processo de soldagem de todos os trilhos, estes foram separadas, cortados previamente e encaminhados para a Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), onde foram iniciadas as análises. O volume de material é composto por 34 amostras de trilho medindo 200 mm cada, sendo 16 amostras do tipo D e 16 amostras do tipo V.

Após a chegada aos laboratórios da UFJF, as amostras foram cortadas novamente, agora para preparar as dimensões para a execução do perfil de dureza. Este foi desenvolvido abrangendo toda a região soldada, iniciando pelo metal de base. Ao final desta etapa, as soldas foram submetidas ao ensaio de macrografia.

Os resultados obtidos nos ensaios macrográficos e nos perfis de dureza foram analisados e comparados com os procedimentos realizados no processo de soldagem, onde foram realizadas as conclusões do trabalho. Para a execução da análise dos resultados, foi fundamental o estudo dos diversos trabalhos realizados em outros segmentos de pesquisa dentro do projeto CATEDRA, principalmente aqueles que elucidavam os parâmetros do processo de soldagem por centelhamento.

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1 Objetivo Geral

Caracterizar a Zona Afetada pelo Calor (ZTA), de trilhos soldados por centelhamento a partir perfil de dureza e da macrografia da junta soldada, avaliando, com base no método de Taguchi, a influência dos principais parâmetros do processo na qualidade da solda.

### 1.4.2 Objetivo Específico

- Estudar o procedimento de soldagem por centelhamento de trilhos ferroviários;
- Analisar, com base no método de Taguchi, a influencia dos principais parâmetros operacionais variação da dureza e das dimensões da ZTA das soldas Flash-Butt welding de trilhos;
- Desenvolver um trabalho que seja base de conhecimento e consulta para futuros alunos integrantes do projeto Cátedra Roda-Trilho.

## 1.5 Definição da metodologia

A pesquisa para o desenvolvimento do trabalho inicia-se com a realização da revisão bibliográfica. Nesta etapa, procurou-se conhecer de forma mais aprofundada o processo de soldagem por centelhamento, suas etapas principais e os fatores que influenciam na soldagem.

Em um segundo momento, realizou-se a pesquisa referente à formação macro-estrutural e a relação das propriedades mecânicas das juntas soldadas, direcionando o estudo para a região da zona afetada pelo calor (ZTA). A partir disso, detalha-se os ensaios realizados nas amostras, mostrando que os procedimentos utilizados para análise seguiram as normas que validam o procedimento.

Posteriormente, realiza-se uma abordagem sobre as etapas realizadas para a execução dos ensaios, bem como os insumos, materiais e equipamentos utilizados ao longo do processo.

Ao fim dos estudos teóricos, realizou-se os ensaios práticos, desde o preparo das amostras, até a realização dos ensaios.

Por último, elucida-se os resultados obtidos com as análises das soldas identificando a influência dos parâmetros da soldagem na qualidade da região soldada.

Deve-se destacar que a pesquisa apresenta uma natureza aplicada, visto que os resultados obtidos e as conclusões geradas deverão ser introduzidas na produção da empresa ao longo do tempo. Quanto aos objetivos, estes possuem caráter explicativo, pois esta pesquisa procura identificar os fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência de determinado fenômeno ou evento através dos resultados obtidos pelos experimentos. (GONÇALVES, 2017)

## 1.6 Estrutura do trabalho

No primeiro capítulo faz-se uma contextualização a respeito do tema do trabalho e descreve-se sobre o projeto CÁTEDRA RODA-TRILHO, abordando as características principais e os objetivos a serem conquistados durante o desenvolvimento do projeto. Neste capítulo também são definidos o escopo, a metodologia, o objetivo geral e os específicos da presente pesquisa.

No segundo capítulo, escreve-se a revisão bibliográfica do trabalho. Inicia-se desenvolvendo sobre o processo de soldagem por centelhamento, explicando suas etapas e os equipamentos utilizados. Em seguida, faz-se uma pesquisa a respeito da metalurgia da solda, elucidando um pouco sobre o que a literatura indica a respeito da macroestrutura nas partes da junta soldada, principalmente na zona afetada pelo calor (ZTA). Discorre-se também sobre o que é esperado em relação às propriedades mecânicas e também em relação ao tratamento térmico das juntas soldadas.

Em seguida no terceiro capítulo, são descritos os materiais e métodos

utilizados no trabalho, passando pelas máquinas de corte, máquinas de dureza, equipamentos para ensaio de macrografia, bem como todos o procedimento realizado para o desenvolvimento da pesquisa.

No quarto capítulo, são explanados os resultados da pesquisa, onde será realizada a comparação tanto dos ensaios macrográficos quanto dos ensaios de dureza, e também os resultados das análises estatísticas, identificando como as combinações dos parâmetros de soldagem impactam na qualidade da junta soldada.

Por fim, no quinto capítulo, são apresentadas as conclusões da pesquisa, bem como as orientações para otimização dos parâmetros e procedimentos de soldagem. Além disso, serão indicados propostas de trabalhos futuros que possam dar continuidade e complementar o presente trabalho.

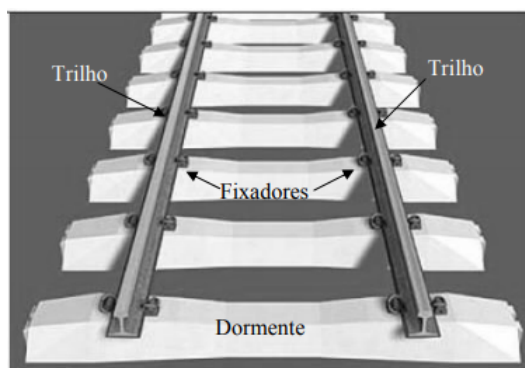


## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Trilhos ferroviários

Os Trilhos são um dos componentes da via permanente, sendo vigas longas fabricadas em aço, resistentes ao desgaste, choques e ações mecânicas, sobre o qual trafegam e são guiadas as rodas do equipamento de tração e do material rodante. São posicionados sobre os dormentes com o objetivo de transferir as solicitações do material rodante da via. Possuem também a função de sustentar e conduzir os trens, apresentando características estruturais de uma viga extensa e contínua. (SARTORI, 2010). A figura 1 ilustra os elementos básicos constituintes da via permanente.

Figura 1 – Elementos básicos constituintes da via permanente



Fonte: ROSA,2008

Dependendo do tipo de serviço, o trilho pode ter variações químicas metalúrgicas e dimensionais. Porém, independente do uso, deve reunir algumas propriedades mecânicas e metalúrgicas básicas, a saber: (ROLDO, 1998)

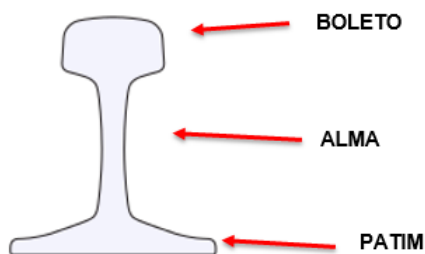
- Elevados limites de resistência mecânica aliada a boa tenacidade;
- Alta dureza e resistência ao desgaste;
- Resistência à fadiga de contato e à propagação de trincas pré-existentes;
- Boa tenacidade à fratura

- Baixa suscetibilidade à fragilização por hidrogênio e adequada soldabilidade.

### 2.1.1 Geometria

A geometria dos trilhos pode variar de acordo com a sua utilização. Atualmente, o perfil mais utilizado para trilhos ferroviários é o Vignole, composto de boleto, alma e patim, definido pela norma ABNT NBR 7590 (Associação Brasileira De Normas Técnicas). A figura 2 ilustra o perfil do trilho do tipo Vignole.

Figura 2 – Perfil do trilho do tipo Vignole



Fonte: <http://www.wikiwand.com/pt/Trilho> Acesso em: 18/05/2018. Adaptado pelo autor.

O Boleto é a parte superior do trilho sendo a superfície de contato com as rodas do material rodante, recebendo a carga e guiando a movimentação das rodas. Por ser sujeito ao atrito e ao desgaste, deve conter uma quantidade de massa para suportar os elevados esforços do contato roda trilho.

A alma é a parte mais fina do trilho e está localizada entre o boleto e o patim. Sua altura determina o momento de inércia e resistência do perfil em relação à carga máxima por eixo.

Por último, o patim é a região onde os trilhos são fixados nos dormentes. Apresenta o perfil achatado na base para que se reduzam a pressão de contato e para que se facilite o acesso às fixações.

### 2.1.2 Composição química e tratamentos

Para que os trilhos possam executar suas funções de forma satisfatória, é necessário que estes possuam propriedades adequadas como dureza, tenacidade, elasticidade e resistência à flexão. Dentre os diversos materiais disponíveis atualmente, o aço é o que apresenta as melhores vantagens para a aplicação em trilhos ferroviários. (SARTORI, 2010).

O aço é constituído basicamente por ferro, carbono, manganês, silício e fósforo. Sua composição influencia diretamente as propriedades metalúrgicas e físicas, afetando seu desempenho e sua vida útil em fadiga. Sua composição química pode variar, dentre diversos fatores o relacionado ao fabricante e a utilização do trilho e são descritas por diversas normas nacionais e internacionais, a saber a NBR 7590. ASTM-A-1 e UIC-860-0.

De acordo com Cottrell (1975), dependendo da sua composição química e do seu processo de fabricação, o aço pode apresentar variação de microestrutura dentre

- Perlita: mistura eutetóide formada de colônias de lamelas alternadas e acopladas de carboneto de ferro com estrutura ortorrômbica, chamadas de cementita, com lamelas de ferrita (Ferro alfa), microestrutura em que os átomos de ferro estão em formação CCC (cúbico de corpo centrado). Essa mistura pode ainda apresentar o carboneto na forma esferoidizada, o que gera uma perlita de menor dureza;
- Bainita: Mistura eutetóide de ferrita e cementita, que difere da perlita apenas por não intercalar laminarmente a cementita e a ferrita, mas sim composta de placas de cementita precipitadas entre as estruturas de ferrita;
- Martensita: Microestrutura em que os átomos de ferro estão em formação TCC (tetragonal de corpo centrado) com carbono supersaturando a célula.
- Perlita com ferrita: Essa configuração microestrutural é encontrada para composições hipoeutetóides, ou seja, para composições com percentual de

carbono inferior a 0.76% de carbono. Nesse caso, se observa colônias de perlita envolvidas por grãos de ferrita pró-eutetóide. (CALLISTER,2002).

A figura 3 ilustra a estrutura cristalina das microestruturas citadas.

Figura 3 – Estrutura cristalina das microestruturas



Fonte: <http://corro4v072.blogspot.com.br/2008/03/estrutura-cristalina> Acesso em: 18/05/2018. Adaptado pelo autor.

De acordo com Silva (2017), a microestrutura resultante da transformação de fase dos constituintes como a ferrita, perlita, bainita e austenita tem um papel fundamental na obtenção de propriedades mecânicas de aços, principalmente daqueles com alta resistência tratados termicamente, na maioria das vezes por têmpera e revenimento.

De modo geral, a microestrutura resultante dessa transformação pode ser de uma só fase, como por exemplo, a martensita ou bainita, ou pode ser mista, compondo duas ou mais fases. Combinações destas estruturas são responsáveis por atribuir diferentes características ao material.

Neste trabalho, os trilhos analisados são do tipo perlíticos, ou seja, apresentam perlita em sua microestrutura.

## 2.2 Processo de soldagem por resistência

A soldagem por resistência abrange processos que tem como princípio básico a união de peças metálicas devido à geração de calor ocasionada pela passagem de corrente elétrica entre elas. Devido à resistência das partes à passagem de corrente elétrica e da aplicação de uma pressão na área a ser unida, ocorre um aumento da temperatura por efeito Joule, que resultará na fusão na interfase e consequentemente, na união das peças.

Atualmente, existem diversos processos de soldagem por resistência: (MARRQUES, P Et al,2011).

- Soldagem por pontos (Resistance Spot Welding - RSW);
- Soldagem por projeção (Projection Welding - RPW);
- Soldagem por costura (Resistance Seam Welding - RSEW);
- Soldagem por resistência por alta frequência (High Frequency Resistance Welding - HFRW);
- Soldagem topo a topo por resistencia (Upset Welding - UW) e por centelhamento (Flash Welding - FW).

Dos processos supracitados, será dado enfoque no processo de soldagem topo a topo por centelhamento, que é utilizado para soldagem de trilhos ferroviários, que são o objeto de estudo deste trabalho.

### 2.2.1 Processo de soldagem topo a topo por centelhamento - Flash Welding (FW)

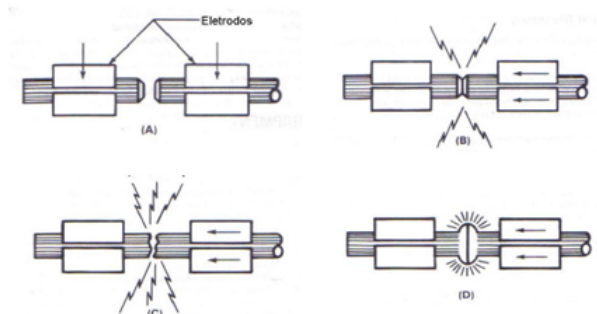
No processo de soldagem topo a topo por centelhamento, são fixados mordentes do tipo eletrodo às peças que serão soldadas. Estes são conectados ao secundário de um transformador de soldagem por resistência de forma que suas extremidades estejam em contato (GOMES FILHO, 2007). Neste caso, tem-se uma peça fixa e outra móvel, e ambas são condutoras de eletricidade.

O processo de soldagem por centelhamento pode ser definido basicamente em três estágios: pré-aquecimento, centelhamento e recalque. A figura 4, ilustra as etapas do processo de soldagem por centelhamento.

#### 2.2.1.1 Pré Aquecimento

Inicialmente, ocorre a aproximação da parte móvel em direção à parte fixa, e uma pequena pressurização. Como ambas estão energizadas, quando se estabelece o contato entre essas superfícies, inicia-se a passagem de corrente, aquecendo as

Figura 4 – Etapas do processo de soldagem por centelhamento (A) Posicionamento das peças (B) Aplicação da tensão de cisalhamento (C) Centelhamento (D) Aplicação da força de recalque



Fonte: GOMES FILHO, 2007

partes por efeito Joule. Em seguida, as peças são afastadas e realiza-se o processo de aproximação e afastamento da junta, de modo que o aquecimento se torne progressivo até que as partes estejam prontas para iniciar o processo subsequente. (WAINER, 1983)

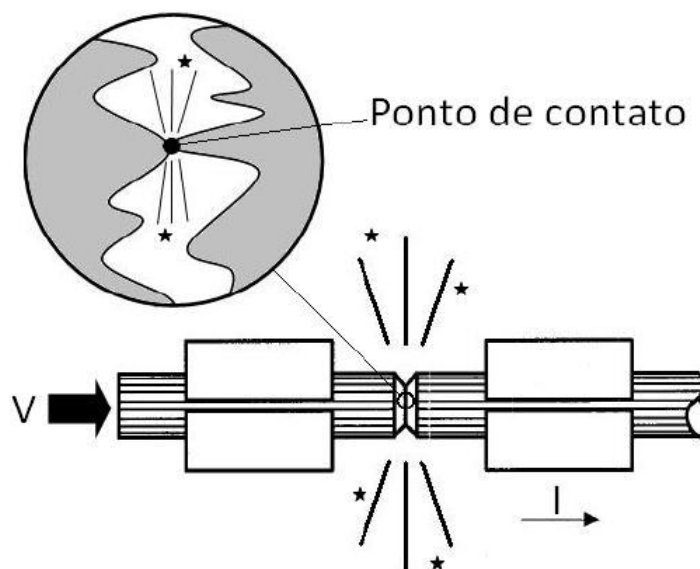
As vantagens do pré-aquecimento são que esse calor prévio facilita o início e a sustentação do centelhamento, a tensão elétrica requerida para manter o centelhamento pode ser diminuída e o material consumido é menor. O processo de pré aquecimento é fundamental, principalmente para soldagem de seções maiores, e também para aquelas que apresentam alta resistividade mecânica. Este estágio inicial também é importante para a melhora das propriedades mecânicas das soldas. (GONÇALVES, 2016; GOMES FILHO, 2007; WAINER, 1983, P. 657).

Como desvantagem do pré-aquecimento, tem-se a adição de uma etapa ao processo de soldagem, o que pode aumentar a duração e o consumo energético necessário para realizar a operação. Outra desvantagem é a reprodutibilidade do processo, pois, em certos casos, o pré-aquecimento é controlado manualmente e a qualidade da solda torna-se dependente do fator humano. (DOMINGUES, 2013).

### 2.2.1.2 Centelhamento

Nesta etapa, inicia-se a aproximação da parte móvel em direção à parte fixa, até que ocorra o contato entre as irregularidades da superfície da junta, gerando descargas elétricas que vão ocasionar em pequenos arcos elétricos que desenvolverão um aquecimento por efeito Joule. Este irá progredir até atingir o ponto de fusão do metal. Quando se inicia o processo de fusão do metal, ocorre uma ejeção de metal líquido formado incandescente, no formato de fagulhas do tipo “centelhas”, as quais dão o nome ao processo. A figura 5, ilustra como se dá o contato entre as irregularidades da superfície da junta na etapa de centelhamento. (WAINER,1983)

Figura 5 – Ponto de contato das irregularidades da superfície da junta



Fonte: DOMINGUES, 2013

### 2.2.1.3 Recalque

Após as superfícies serem aquecidas de forma satisfatória, realiza-se uma força de compressão da parte móvel em direção à parte fixa, desenvolvendo um processo de forjamento entre as partes. Nesse processo, ocorrem deformações

plásticas no material e, devido ao restabelecimento das relações moleculares do material, as propriedades mecânicas se moldam de acordo com o material de base.

O estágio de recalque proporciona ainda a redução e/ou eliminação das porosidades geradas durante a ação de centelhamento e também a remoção dos óxidos gerados através do processo de aquecimento durante a fase do centelhamento (GOMES FILHO, 2007).

#### 2.2.1.4 Etapas adicionais ao processo

Após o processo de centelhamento, existem ainda as etapas de pós aquecimento e raspagem que podem ser realizadas no material.

A etapa de pós aquecimento, é realizada após o recalque. Nela, aplica-se corrente elétrica no material aquecendo-o por efeito Joule. É utilizada com o objetivo de tratar o material termicamente e melhorar as propriedades mecânicas da junta soldada.

A etapa de raspagem consiste em um processo de acabamento, onde são utilizadas lâminas do tipo raspadoras para retirar a rebarba de material que se acumulou no entorno da solda durante o processo de recalque. Essa etapa é utilizada quando se necessita de uma solda com ótimo acabamento superficial.

#### 2.2.2 Máquinas e equipamentos para soldagem por centelhamento

De acordo com Gomes Filho, (2007), a soldagem topo a topo por centelhamento deve contar com os seguintes equipamentos:

- Estrutura da máquina, na qual está montada o porta eletrodo fixo e um conjunto de guias isoladas eletricamente;
- Porta eletrodo móvel, montado sobre as guias isoladas eletricamente;
- Conjunto de mordentes eletrodos, montados rigidamente em cada porta eletrodo para alinhar e fixar as partes a serem soldadas;
- Mecanismo para controlar o deslocamento do porta eletrodo-móvel;



- Transformador de energia de soldagem.

### 2.2.3 Aplicações do processo de soldagem topo a topo por centelhamento

As soldas realizadas pelo processo de soldagem topo a topo por centelhamento são utilizadas em barra, tubo ou perfil, com até aproximadamente 20.000mm<sup>2</sup> de secção transversal. Apresenta aplicações em diversos setores, como na indústria aeronáutica, indústria automotiva, construção civil, indústria aeronáutica, dentre outras. Foram observados trabalhos para aplicação da soldagem por centelhamento em lâminas de serras de fitas e elos de correntes. Trilhos ferroviários, também podem ser unidos com grandes ganhos de produtividade (GOMES FILHO, 2007).

### 2.2.4 Variáveis do processo

No processo de soldagem topo a topo por centelhamento, existem diversas variáveis que tem como o objetivo garantir a boa execução da solda e a qualidade da mesma em serviço. Estas podem ser combinadas de diversas formas, adequando o processo às exigências de qualidade e às condições de uso.

As variáveis do processo de soldagem por centelhamento podem ser agrupadas de diversas formas. De acordo com Gonçalves (2017), estas podem ser agrupadas em variáveis de centelhamento e variáveis de recalque. A organização entre variáveis está exemplificada abaixo:

#### Variáveis de centelhamento

- Modelo de Centelhamento;
- Tensão de Centelhamento;
- Extensão inicial.

#### Variáveis de recalque

- Velocidade de Recalque;

- Força de Recalque;
- Distância de Recalque;
- Corrente de Recalque.

A influência das variáveis na constituição das propriedades mecânicas e da macroestrutura e conseqüentemente na qualidade da solda será discutida em tópicos posteriores ao longo deste trabalho.

#### 2.2.4.1 Modelo de centelhamento

O modelo de centelhamento pode ser compreendido como a velocidade que o porta eletrodo avança. Este pode ser do tipo linear, em que o porta eletrodo avança com velocidade constante; tipo parabólico, em que o porta eletrodo avança com uma taxa de aceleração constante e o centelhamento cúbico, em que a aceleração do porta eletrodo aumenta a uma taxa constante.

De acordo com Gomes Filho (2007), as variações na forma de se obter o centelhamento alteram a obtenção do gradiente de temperatura na interface da junta, bem como na quantidade de material perdido.

#### 2.2.4.2 Tensão de centelhamento

A tensão de centelhamento deve ser suficiente para promover um processo de soldagem estável. Gomes Filho(2007) afirma que a tensão de centelhamento deve ser selecionada como a menor possível, em torno de 2V a 16V, suficiente apenas para manter um bom e consistente processo de centelhamento.

#### 2.2.4.3 Corrente de centelhamento

O aumento da corrente elétrica faz a temperatura da junta soldada aumentar, no início do centelhamento a taxa de aumento de corrente é alta e atinge seu máximo pouco antes do recalque. (GOMES FILHO, 2007)

Um aumento muito rápido da intensidade da corrente pode gerar a formação de crateras e conseqüentemente no aprisionamento de óxidos na interface da solda.

#### 2.2.4.4 Distância inicial de fixação

A distância inicial de fixação é considerada como a soma do comprimento da região compreendida entre cada peça e os eletrodos. Essa distância determina a extensão do fluxo de calor. Em geral, quanto maior for a distância inicial, mais uniforme será o gradiente de temperatura. Esse parâmetro portanto é fundamental, pois é responsável pela distribuição de temperatura na zona afetada pelo calor (ZTA).

#### 2.2.4.5 Velocidade de Recalque

Conforme Savage, citado por Gomes Filho (2007), velocidades de recalque mais altas induzem a menos defeitos na solda do que as velocidades mais baixas. Geralmente a velocidade inicial é maior, para garantir a expulsão dos óxidos antes da solidificação e, ao final, a velocidade diminui.

#### 2.2.4.6 Força de recalque

Através da força de recalque é possível expelir o metal fundido contendo óxidos e impurezas. Dessa forma, uma adequada força de recalque pode favorecer a microestrutura da junta fundida pois, através com a deformação plástica juntamente com uma temperatura adequadas, propicia o refinamento de grãos de perlita e uma distribuição homogênea dos grãos, resultando em um aumento de dureza (GONÇALVES, 2017).

#### 2.2.4.7 Distância de recalque

De acordo com Gomes Filho (2007), a extensão da distância de recalque deve ser suficiente para expelir totalmente os óxidos e o metal fundido das interfaces para as superfícies externas e também para que as duas interfaces tenham contato metal

– metal em toda a seção transversal. Defeitos intersticiais, inclusões, porosidades e descontinuidades aumentam à medida que a distância de recalque e o produto “Tempo de centelhamento x Distância de recalque” diminuem.

#### 2.2.4.8 Tempo de corrente de recalque

O aumento do tempo de corrente de recalque gera um aumento da quantidade de calor transferida para as peças, além de aumentar o tempo de resfriamento. Dessa forma, no âmbito da microestrutura, os grãos de ferrita aumentam tanto na quantidade quanto no tamanho, provocando redução na dureza do material da zona soldada. Esta redução na dureza, pode provocar uma fratura no trilho ao ser submetido às cargas de trabalho. (GONÇALVES, 2017).

#### 2.2.4.9 Quantidade de pulsos

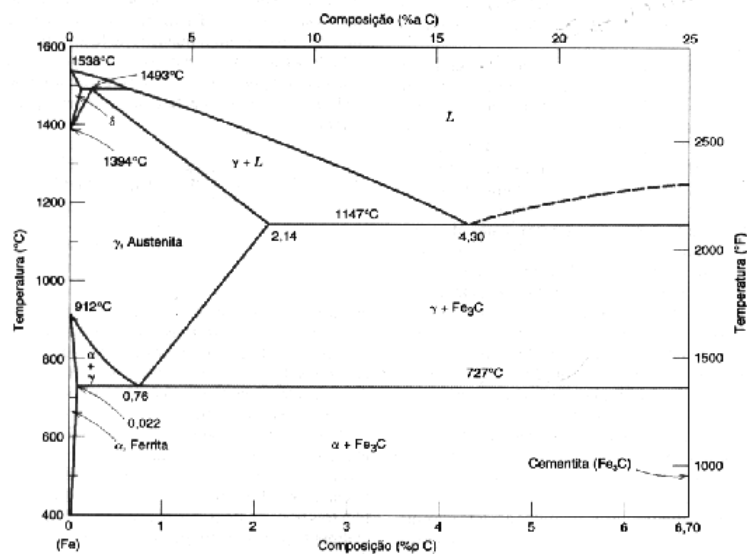
A quantidade de pulso corresponde ao número de vezes que se permite a passagem de corrente elétrica pelos trilhos quando estes são aproximados durante o pré-aquecimento. Na máquina de soldagem utilizada neste experimento cada pulso tem a duração de aproximadamente 3.6 segundos e o intervalo entre um pulso e outro, quando não existe a passagem de corrente, é de aproximadamente 2.0 segundos. (GONÇALVES, 2017)

#### 2.2.4.10 Carbono Equivalente

Antes de iniciar a discussão sobre a variável carbono equivalente, faz-se necessário discorrer sobre o diagrama de ferro carbono. De todas os sistemas de ligas binárias, o formado por ferro e carbono é considerado o mais importante (CALLISTER,2002). A figura 6 apresenta o diagrama de fases ferro carbono.

O eixo das composições, ao longo do eixo horizontal, se estende somente até 6,70%pC. Nessa concentração, se forma o composto intermediário carbeto de ferro, ou cementita ( $Fe_3C$ ). O eixo das temperaturas, ao longo do eixo vertical, demonstra que o ferro puro, ao ser aquecido, experimenta duas alterações na sua estrutura cristalina antes de se fundir. À temperatura ambiente, o ferro

Figura 6 – Diagrama Ferro Carbono



Fonte: CALLISTER, 2002

apresenta uma forma estável, conhecida como ferrita (ferro alfa, com composição CCC). A ferrita experimenta uma transformação polifórmica para austenita (ferro gama, com composição CFC) à temperatura de 912°C. Esta estrutura persiste até 1394°C, temperatura em que a austenita CFC reverte novamente para uma fase com estrutura CCC, conhecida como ferrita delta, a qual se funde a uma temperatura de 1538°C. Dessa forma, o diagrama ferro carbono é subdividido em regiões onde se diversas fases, oriundas das varrições de composição química e de temperatura. (CALLISTER, 2002)

Com relação às mudanças de fase que ocorrem no resfriamento lento, deve-se destacar aquele que ocorrem mediante a passagem da região gama para o campo das fases alfa + Fe<sub>3</sub>C, com composição de 0,76%pC, denominada composição eutetóide. À medida que a liga resfria, passa sua microestrutura que era totalmente austenita para a microestrutura perlita (camadas alternadas de ferrita e cementita). Ao olhar para as ligas com composição à esquerda do ponto eutetóide, ou seja, com 0,022 a 0,76%pC, também conhecidas como ligas hipoeutetóides, a microestrutura correspondente do resfriamento consistirá de uma matriz ferrítica, conhecida como

ferrita proeutetóide ao redor de colônias de perlita isolada. Por ultimo, ao verificar as ligas com composição à direita do ponto eutetóide, ou seja, com 0,76 a 2,14%pC, conhecidas como ligas hipereuteóides, verifica a presença de uma microestrutura constituída de perlita e cementita proeutetóide. (CALLISTER, 2002)

O carbono é uma impureza intersticial no ferro e, apesar de estar presente em concentrações relativamente baixas, influencia de maneira significativa as propriedades mecânicas do ferro em temperatura ambiente (ferrita). Conjuntamente a esse fator, contribui para a constituição da microestrutura ao longo do resfriamento das ligas.

De acordo com Alves (2009), carbono equivalente fornece um valor quantitativo na contribuição na composição química do próprio teor de carbono e dos demais elementos químicos presentes no aço sob a forma de um carbono equivalente. Para processos como solda e tratamento térmico, é um fator importante e decisivo para a definição de temperaturas de pré aquecimento para soldagem, temperaturas de revenido e definição de meios de severidade de têmpera.

De acordo com Alves (2009), o carbono equivalente do aço é função de sua composição química e varia conforme a equação abaixo, regida pela norma AAR-M201/06-2007 em sua última revisão.

$$CE = C + \frac{Mn+Si}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15}$$

Onde:

- CE - Percentual de carbono equivalente
- C - Percentual de Carbono
- Mn - Percentual de Manganês
- Si - Percentual de Silício
- Mo - Percentual de Molibdênio
- Cr - Percentual de Cromo

- Ni - Percentual de Níquel
- V - Percentual de Vanádio
- Cu - Percentual de Cobre

Embora esta expressão tenha sido inicialmente desenvolvida para caracterizar a tendência de trinca por hidrogênio para chapas de aço, ela também têm sido utilizadas para avaliar a endurecibilidade dos aços com base na sua composição química (SILVA, 2017)

De acordo com Metals Handbook, vol.06, do ponto de vista metalúrgico, o equivalente de carbono pode estar relacionado ao desenvolvimento de microestruturas, ou seja, à medida que o equivalente de carbono aumenta, as microestruturas são desenvolvidas durante o resfriamento. Em alto carbono, para valores equivalentes, estruturas martensíticas podem ser esperadas.

A medição do carbono equivalente é importante pois a partir dele é possível ter uma noção da temperabilidade do aço. Isso é importante pois quanto maior a temperabilidade, maior a dureza e mais fácil a formação de trincas. (BOUZAN, 2016)

Todos os trilhos utilizados no trabalho são do tipo hipereutetóide e tem carbono equivalente mensurado pela equação supracitada.

### 2.3 Zona Termicamente Afetada (ZTA)

Para Marques (2009), ZTA ou Zona Afetada pelo Calor, é a região não fundida do metal de base, que teve sua microestrutura e/ou propriedades alteradas pelo ciclo térmico de soldagem. Nessa região, as temperaturas de pico foram superiores à temperatura crítica do material em questão e inferiores à sua temperatura de fusão.

De acordo com Filho (2017), as regiões da linha central da solda e da zona termicamente afetada apresentam significativas alterações microestruturais em relação ao metal de base, onde nessas regiões a microestrutura se torna mais grossa

do que a do metal de base. Assim, a microestrutura na linha central é a mesma daquela da zona afetada pelo calor, em ambos os lados da linha de junção, exceto pelo tamanho dos grãos. Em todas as ligas, o tamanho de grão na região da solda é maior e vai diminuindo à medida que se afasta da junta até o metal de base.

A microestrutura na zona afetada pelo calor de uma solda por centelhamento é determinada pelos seguintes fatores: (GOMES FILHO, 2007)

- A temperatura máxima alcançada em um determinado ponto por um determinado período de tempo durante a operação de soldagem;
- A taxa de resfriamento experimentada pelas partes dos materiais previamente aquecidas da temperatura crítica de transformação;
- A temperabilidade do aço a ser soldado;
- O efeito do trabalho mecânico resultante da etapa de recalque.

Para Mansouri e Monshi,(2004), a microestrutura da junta soldada por centelhamento de trilhos perlíticos consiste em três regiões, sendo a primeira a de crescimento de grão, a segunda corresponde a de grãos recristalizados e a terceira sendo uma região parcialmente transformada.

De acordo com Porcaro (2016), a soldagem por centelhamento de trilhos ferroviários resulta em microestrutura perlítica em toda a extensão da Zona Termicamente Afetada (ZTA). No entanto, essa morfologia varia significativamente em função do ciclo térmico e das recristalizações decorrentes do processo de soldagem. As transformações morfológicas da perlita produzem uma significativa queda de dureza, na região de transformação parcial da ZTA, o que, por sua vez, reduz a resistência ao desgaste em regiões específicas do boleto do trilho, e pode contribuir para falhas.

As variações microestruturais podem ser facilmente observadas a partir de ataques macrográficos. A figura 7 ilustra um exemplo de macrografia de um boleto soldado por centelhamento. Pode-se reparar a região central da solda, bem como as variações superficiais referentes às variações microestruturais.



Figura 7 – Macrografia de bolete de solda por centelhamento



Fonte: NISHIKAWA,2018

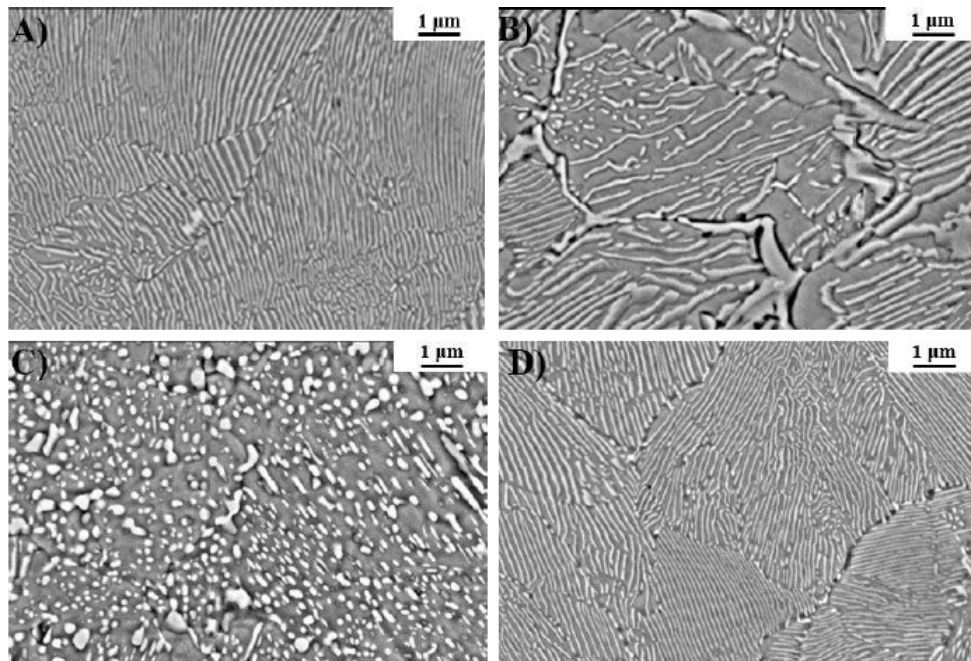
De acordo com Nishikawa (2018), há seis regiões distintas simétricas com relação à linha central da solda em direção ao metal de base. A linha central apresenta a formação de ferrita pró eutetóide decorrente de descarbonetação na região. Próxima à linha de ligação encontra-se microestrutura perlítica, seguida por uma região de menor dureza, com presença de perlita esferioidizada. A região intermediária apresenta carbonetos parcialmente deteriorados com cementita em contorno de grão. O material base, por fim, apresenta microestrutura perlítica. A figura 8 apresenta a microscopia eletrônica de varredura em soldas por centelhamento.

#### 2.4 Dureza das soldas por centelhamento

O comportamento mecânico de um material reflete a relação entre a sua resposta ou deformação a uma carga ou força que esteja sendo aplicada. Uma das principais propriedades é a dureza, que além de ser simples de ser verificada, é barata e não necessita de destruir o corpo de prova.

De acordo com Filho (2007), para aços com baixo teor de carbono laminados a frio, a dureza do material na ZTA é inferior àquela do metal de base que não foi aquecido. Isso é possível pois o aquecimento remove através do processo de

Figura 8 – Microscopia eletrônica de varredura em solda por centelhamento em (A) Região austenitizada (B) Região intermediária (C) Região de menor dureza (D) Material base



Fonte: NISHIKAWA,2018

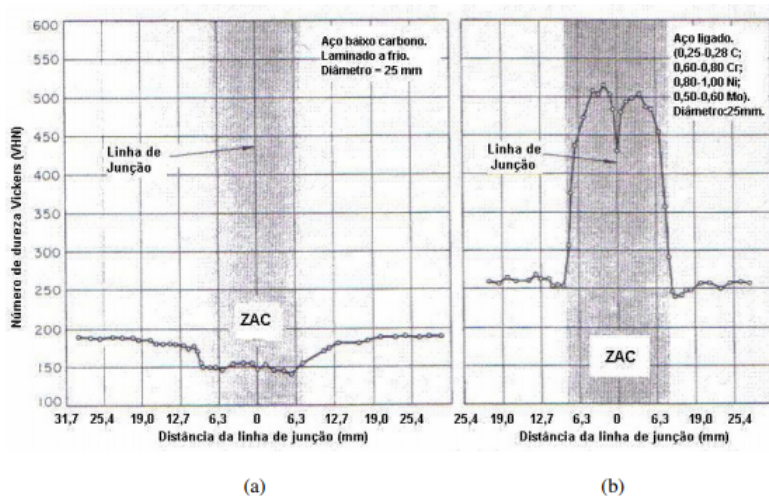
recristalização, o endurecimento por deformação proveniente da etapa de laminação a frio. Dessa forma, a dureza dos pontos da linha central da solda e das extremidades da ZTA apresentam durezas menores que o restante do metal aquecido.

Para aços ligados, identifica-se uma queda da dureza da linha central da solda, causada pelo processo de descarbonetação e observa-se um aumento da dureza da ZTA em comparação ao metal de base original. A figura 9, mostra a variação da dureza da ZTA e no metal de base para um aço de baixo carbono e um aço ligado.

## 2.5 Macrografia

De acordo com Colpaert, (1974), a macrografia consiste no exame do aspecto de uma peça ou amostra metálica, segundo uma seção plana devidamente polida e

Figura 9 – Variação da dureza da ZTA e no metal base para:(a) aços com baixo teor de carbono e (b) um aço ligado Cr-Ni-Mo



Fonte: GOMES FILHO, 2007

em regra atacada por um reativo apropriado. O aspecto, assim obtido, chama-se macroestrutura. O exame, nesse caso é feito ao olho livre ou com o apoio de uma lupa. A designação “macrografia” também é utilizada para designar os documentos que reproduzam a macroestrutura em tamanho natural ou com ampliação máxima de 10 vezes.

O ensaio de macrografia abrange etapas que são fundamentais para a correta avaliação do material a ser analisado. Para Colpaert, (1974), o ensaio pode ser dividido em:

1. Escolha e localização da seção a ser estudada: A escolha do local a ser analisado deve ser influenciado pela forma da peça, pelos dados que se deseja obter com o ensaio e também a partir de demais informações relevantes sobre o material que deverão ser levados em consideração.
2. Realização de uma superfície plana e polida no lugar escolhido: a obtenção da superfície considerada ideal compreende duas etapas principais. A primeira é referente ao corte, que pode ser realizado com serra ou com cortador de disco abrasivo e localiza a superfície a examinar; quando esse meio não é viável,

recorre-se ao desbaste que é praticado com o esmeril comum ou com o auxílio de plaina até atingir a região de interesse. O segundo, refere-se ao polimento, que é iniciado sobre lixa, em direção normal aos riscos de lima ou de lixa grossa já existentes e é levado até o completo desaparecimento destes.

3. Ataque da superfície por um reagente químico adequado: O contato do corpo de prova com o reagente pode ser obtido de três modos. O primeiro se dá mergulhando a superfície polida numa cuba contendo certo volume de reagente, sendo conhecido por ataque por imersão. O segundo, é realizado estendendo uma camada de reativo sobre a seção do estudo com o auxílio de um pincel ou chumaço de algodão – denominado de ataque por aplicação. Por último, lança-se mão de um papel fotográfico, convenientemente umedecido com reagente adequado, aplicando-o sobre a superfície polida, e obtendo sobre ele um decalque da maneira como se encontram distribuídos os sulfuretos – método conhecido como impressão direta de Baumann.

## 2.6 Ensaio de dureza

A dureza é uma propriedade mecânica fundamental nos materiais pois é uma medida da resistência do material a uma deformação plástica localizada, como por exemplo, uma pequena impressão ou risco. Técnicas quantitativas para determinação da dureza foram desenvolvidas ao longo dos anos, nas quais um pequeno penetrador é forçado sobre a superfície de um material a ser testado, sobre condições controladas de carga e taxa de aplicação. Faz-se a medida da profundidade ou do tamanho da impressão resultante, a qual por sua vez é relacionada a um número índice de dureza.(CALLISTER, 2002)

Os ensaios de dureza são realizados com mais frequência do que qualquer ensaio mecânico devido a várias razões:

- São simples e de baixo custo;
- O ensaio é não destrutivo;

- Outras informações podem ser estimadas a partir do resultado do ensaio de dureza.

Atualmente, são utilizados diversos tipos de ensaios de dureza, que se diferenciam pelo tipo do penetrador, carga principal, escala de dureza, dureza estimada do material, bem como as aplicações do material a ser analisado. Dentre os diversos tipos de escala, pode-se citar Rockwell, Brinell e Vickers. Será dada uma maior ênfase ao método Rockwell, por ser o tipo de ensaio empregado no presente trabalho (DIETER, 1981).

### 2.6.1 Ensaio Rockwell

De acordo com Callister(2002), os ensaios Rockwell constituem o método mais comumente utilizado para medir a dureza, pois são simples e não exigem habilidades especiais. Diversas escalas podem ser utilizadas a partir de combinações de vários penetradores e diferentes cargas, o qual permitem o ensaio de todos os metais e ligas, desde os mais duros até os mais macios.

Para esse tipo de ensaio, os penetradores incluem bolas de aço esféricas e endurecidas, com diâmetros diversos, e um penetrador cônico de diamante que é usado para materiais mais duros. Com esse sistema, um número índice de dureza é determinado pela diferença na profundidade de penetração que resulta da aplicação de uma carga inicial menor seguida por uma carga principal maior. Essa carga menor, também conhecida como pré-carga, aumenta a precisão do ensaio.

Ao especificar a dureza Rockwell, tanto o número índice de dureza como o símbolo da escala devem ser indicados. A escala é designada pelo símbolo HR seguido pela identificação da escala apropriada. Nesse trabalho, foi utilizada dureza Rockwell do tipo C, ou seja, com penetrador de diamante e pré carga de 150kgf.

## 2.7 Norma AREMA

A AREMA(American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association), é uma norma americana utilizada para a execução de projetos ferroviários.

As informações recomendadas pela AREMA são referentes ao que tange as propriedades mecânicas, tolerâncias dimensionais e procedimentos de teste necessários para assegurar a qualidade de soldas de topo por centelhamento. Este tem por objetivo cobrir a qualificação inicial do processo e os requisitos de garantia de qualidade dos procedimentos.

Dentre os critérios de dureza recomendados pela norma AREMA, estão os seguintes:

- Nenhuma solda deve ter valores de dureza superiores a 400 BHN ou 43 Rc.
- A dureza dentro da solda deve estar dentro de mais ou menos 30 pontos BHN ou mais ou menos 5 Rc da dureza da cabeça dos trilhos principais, exceto na linha central descarbonetada e na borda esferodizada da zona afetada pelo calor.

Para macrografia, os critérios descritos pela norma são o seguinte:

- A linha de ligação deve ser perpendicular à direção de laminação do trilho.
- A linha de ligação não deve exibir nenhuma área de ataque ácido excessivo.

Sobre os critérios referentes aos ensaios, a norma orienta que para o ensaio de dureza:

- Os valores de dureza RC ou equivalente devem ser medidos 5 mm abaixo da superfície de rolamento, na vertical. seção longitudinal em intervalos de 1/8 de polegadas;
- A zona soldada completa no trilho pai deve ser testada;
- A medição do centro deve estar na linha de ligação da solda.

Por fim , para o ensaio de macrografia, a norma AREMA orienta:

- A macrografia deve ser uma seção vertical tomada na direção de rolamento ao longo da linha central do trilho e deve incluir uma área não afetada de cada trilho;

## 2.8 Método de Taguchi

### 2.8.1 Planejamento estatístico dos experimentos

Em algumas circunstâncias, ao se realizar análises de experimentos faz-se necessário avaliar o efeito da variação conjunta de duas ou mais variáveis. Porém, para a realização desse objetivo, nem sempre é satisfatório variar um parâmetro de forma individual por vez. Nesse caso, é importante examinar as combinações de níveis diferentes do fator para avaliar a influência de cada fator no resultado, além de perceber como que o elemento pode ser modificado pela alteração de outros fatores. Nessa forma de análise o efeito de cada fator pode ser determinado com a mesma exatidão do que se caso tivesse sido realizada a análise de cada variável separadamente. (ALVES, 2009)

Para realizar esse modelo de experimento, deve-se escolher um conjunto de níveis formados pelos valores máximos e mínimos assumidos pelos fatores e experimentar uma ou mais interações com cada uma das combinações possíveis dos níveis dos fatores. De forma geral, o Planejamento estatístico dos experimentos (PEE), que pode ser do tipo completo ou fracionado, utiliza planejamentos fatoriais em dois níveis, do tipo  $2^k$  ou  $2^{k-p}$ , onde  $k$  representa o número de fatores e o “2” o número de níveis. Nesse modelo, um fator é indicado por letra maiúscula e os níveis inferior e superior são respectivamente representados pelos sinais (-) e (+). (ALVES, 2009).

Este método apresenta versatilidade, podendo ser utilizado na otimização de processos existentes ou em novos processos, contribuindo para a redução do número de experimentos e consequentemente da redução do tempo e do custo. Este contribui também para a redução da variância, melhorando o conhecimento do fenômeno estudado. (ALVES, 2009)

### 2.8.2 Experimento fatorial completo

Experimento fatorial completo pode ser compreendido como o planejamento de experimentos em que a cada réplica completa de experimentos, todas as combinações possíveis dos níveis são investigados. (MONTGOMERY et al, 2004, p.2016). Esse valor pode ser calculado da forma:

$$N = A^k$$

Onde N é o número de experimentos, A é o número de níveis e K é o número de fatores. (ALVES, 2009)

### 2.8.3 Arranjo ortogonal e matriz experimental

A matriz de experimentos é confeccionada com uma coluna referente ao número de experimentos e outras colunas para os fatores, subdividida pela quantidade de fatores. As últimas colunas são geralmente utilizadas para as respostas. Os níveis são nomeados com os sinais de (-) para nível inferior e (+) para nível superior, ou com os algarismos (1) para inferior e (2) para superior. Na matriz, cada linha representa os níveis dos fatores e cada coluna representa um fator específico cuja influência na variável de resposta se deseja medir, Além disso, a matriz deve ser ortogonal, ou seja, a quantidade de experimentos para o nível alto deve ser igual às do nível baixo e a soma dos produtos em qualquer das colunas deve ser zero. (ALVES,2009)

### 2.8.4 Experimentos fatoriais fracionados

De acordo com Alves (2009) o experimento fatorial fracionado tem como objetivo reduzir o número de experimentos, uma vez que em uma análise com muitas variáveis, o número de experimentos fica demasiadamente grande e se torna impraticável um fatorial completo. Nesse caso, para reduzir o número de experimentos foram desenvolvidas matrizes de fatoriais fracionados que permitem



planejar o experimento e se obter uma boa qualidade de resposta com menor número de experimentos.

Para a realização de fatoriais fracionados deve-se fazer o confundimento de alguns fatores para gerar código para os demais fatores. Nesse caso, confundir significa multiplicar a coluna desse fator pela de outro fator e gerar código para um terceiro elemento. Por exemplo, multiplica-se a coluna do fator A pela coluna do fator B, gerando código para o fator C. Quando isso ocorre, tem-se uma interação de segunda ordem, quando um fator principal está confundido com a interação de outros dois. Quando um fator recebe código a partir da interação de três fatores, tem-se uma interação de terceira ordem. (ALVES, 2009)

### 2.8.5 Método de Taguchi

O método de Taguchi, também conhecido como “Projeto Robusto” foi desenvolvido por Genichi Taguchi, no Japão na década de 60 e fornece uma nova dimensão aos experimentos estatisticamente projetados. (ALVES, 2009)

Esse método tem como principal objetivo melhorar as características do processo ou de um produto, minimizando as variações através da identificação e ajuste dos fatores controláveis. Neste caso, ao ajustar os fatores, os produtos podem ser fabricados de modo a serem mais robustos a eventuais mudanças que possam vir a ocorrer. (GONÇALVES, 2017)

Nesse método, Taguchi propõe a criação da “função perda”, visto que qualquer variação nas dimensões da característica funcional de qualidade, tanto para um produto quanto para um processo envolverá em custos adicionais. Nesse caso, a função perda possibilita medir o custo da qualidade não atendida. (ALVES, 2009)

De acordo com Alves (2009), Taguchi denomina de ruídos as causas que afetam a variabilidade das funções do produto. Eles podem ser de origem interna, quando estão ligados às características do produto, de origem externa, quando decorrem tanto da condição de utilização quanto do ambiente onde o produto funciona e também podem ser do tipo de produção, quando ocorrem em função das variabilidades que ocasionam problemas ou falhas no produto decorrente da

manufatura.

De acordo com Gonçalves (2017), o método de Taguchi propõe a análise da resposta média para cada combinação no arranjo interno, e que a variabilidade seja analisada escolhendo uma razão sinal-ruído (S/N) apropriada. Nesse caso, três padrões são empregados:

- Nominal melhor (S/N): usada quando se objetiva que a resposta esteja numa posição intermediária. Nesse caso, a condição (S/N) é definida por:

$$SN_T = 10 \cdot \log\left(\frac{\bar{y}^2}{S^2}\right)$$

- Quanto maior melhor (S/N): usada quando se deseja maximizar os resultados, ou seja, quanto maior for a variável resposta, melhor será o desempenho do objeto de estudo. Nessa situação, a condição (S/N) é definida por:

$$SN_L = -10 \cdot \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i}\right)$$

- Quanto menor melhor (S/N): usada quando se deseja minimizar os resultados, ou seja, quanto menor for a variável resposta melhor será o desempenho do objeto de estudo. Nesse caso, a condição (S/N) é definida por:

$$SN_S = -10 \cdot \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2\right)$$

De acordo com Alves (2009), Taguchi propôs arranjos ortogonais que devem ser escolhidos em função do número de níveis que as variáveis vão assumir e em função do número de variáveis e interações a serem estudadas. Para a escolha do arranjo ortogonal adequado, pode-se empregar o método do “Número de Graus de Liberdade”. O arranjo ortogonal a ser escolhido deve possuir um número de condições experimentais, de no mínimo igual ao número de graus de liberdade calculado, que é definido na tabela dos arranjos ortogonais de Taguchi.

Nesse trabalho, tem-se como objetivo avaliar a resposta sinal ruído para a condição “menor, melhor”, ou seja, quanto menor for a variável resposta, melhor será o desempenho.

#### 2.8.6 Análise estatística dos experimentos

Após a realização dos experimentos, o passo seguinte é a determinação de quais efeitos são estatisticamente significantes. A principal ferramenta analítica para esta etapa é a análise de variância (ANOVA). No contexto de experimentos com arranjos ortogonais a Anova é muito útil para subdividir a variação total em variação devido aos efeitos principais, aos efeitos das interações e devido ao erro. De acordo com Gonçalves (2017), os resultados dispostos na Tabela Anova, geralmente possui os seguintes elementos:

- Origem da variação: Representa os componentes como efeitos principais, efeitos de interação, efeitos do erro que contribuem para a variância total.
- Média de quadrados: É obtida a partir da divisão da soma de quadrados pelo número de graus de liberdade associados aos efeitos do fator.
- Estatística F: A estatística F mede o efeito de cada fator ou interação em relação ao erro. Ou seja, é a taxa da média de quadrados pela variância do erro. A distribuição F possui dois graus de liberdade, que são os parâmetros que a caracterizam.
- Contribuição percentual: Mede a contribuição real da variação percentual de um fator sobre a variação total.
- Soma de Quadrados: A soma dos quadrados representa uma medida de variação ou desvio da média. Devido aos efeitos principais e de interação, é uma medida da variabilidade causada pelos fatores ou suas interações.
- Graus de liberdade: O grau de liberdade do erro é obtido subtraindo os graus de liberdade dos efeitos principais e de interação do número total de graus de liberdade.

A figura 10 apresenta um exemplo de tabela ANOVA.

Figura 10 – Modelo de tabela ANOVA

Origem da Variação	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Média de Quadrados	Estatística F	Contribuição Percentual
A	1	0.51	0.51	42.58	7.38
C	1	0.34	0.34	28.25	4.83
E	1	4.31	4.31	357.72	63.27
G	1	1.21	1.21	100.23	17.60
<b>Erro Combinado</b>	35	0.42	0.012	—	6.92
<b>Total</b>	39	6.79	—	—	100

Fonte: GONÇALVES,2017

### 3 METODOLOGIA

Nessa seção, serão apresentados o material utilizado para a realização do trabalho, bem como os equipamentos e procedimentos empregados para o preparo das amostras e para a realização dos ensaios de dureza e de macrografia.

Em seguida, no tópico “metodologia experimental”, serão explicadas as sequências e as etapas de cada ensaio, desde a chegada dos trilhos ferroviários no laboratório de análise metalográfica da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) até a tomada dos resultados.

#### 3.1 Descrição do material utilizado

Os trilhos empregados no trabalho foram soldados pelo processo de centelhamento no estaleiro de soldas da empresa VALE, em São Luiz do Maranhão – MA. Foram realizadas soldas em quatro segmentos de 3,5 metros sendo dois segmentos de cada tipo de trilho a ser analisado. Os tipos de trilho são:

- Tipo D: Trilho ferroviário com menos de 1,0% de carbono equivalente na composição química, do tipo DHH, ou *Deep Head Hardened* (boleto endurecido profundamente) com dureza de 370 HB. Foram utilizados 16 trilhos;
- Tipo V: Trilho ferroviário com mais de 1,2% de teor de carbono na composição química do tipo UHC, ou *Ultra High Carbon* (ultra alto carbono) com dureza de 400 HB. Foram utilizados 16 trilhos.

A tabela 1 apresenta a composição química dos trilhos avaliados.

Tabela 1 – Composição química dos trilhos

Tipo	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	Ni	Cu	S	P
DHH	0.780	1.010	0.230	0.234	0.000	0.003	0.013	0.004	0.009	0.019
UHC	0.962	1.239	0.221	0.288	0.017	0.003	0.067	0.001	0.013	0.013

Fonte: Projeto VALE Solda - CÁTEDRA RODA TRILHO

Percebe-se pela tabela 1 e pela figura 6 que ambos os trilhos estudados são hipereutetóide e, dessa forma, o carbono equivalente calculado fornece os seguintes valores:

Trilho DHH: 0.8545

Trilho UHC: 1.2710

Os trilhos foram soldados segundo o Método de Taguchi. Para o trabalho, foram escolhidos quatro parâmetros do processo de soldagem, a saber: corrente de pulso, quantidade de pulsos, força de recalque e carbono equivalente. Os valores inferiores e superiores para os parâmetros escolhidos encontram-se na tabela 2.

Tabela 2 – valores superior e inferior dos parâmetros escolhidos para o método de Taguchi

Fatores	Inferior (1)	Superior (2)
A - Corrente de pulso	60 KA	80 KA
B - Quantidade de pulso	8	13
C - Força de recalque	550KN	650KN
D - Carbono equivalente	<1.00%	>1.2%

Fonte: Projeto VALE Solda - CÁTEDRA RODA TRILHO

A matriz de experimentos foi realizada pelo Método de Taguchi, que já disponibiliza a ordem dos fatores dos experimentos. Dessa forma, foi necessário identificar a quantidade de variáveis e as interações de interesse. A partir da figura ??, onde tem-se o gráfico linear do experimento, que o primeiro fator da tabela é o A, seguido pelo B. O terceiro termo é a interação de A com B. O quarto termo é o C, seguido pela interação de A com C e da interação de B com C. Por último, tem-se o fator D. Esse, por ter sido avaliado como de baixa relevância, não se acrescentou a interação deste com os demais fatores. A tabela 11 apresenta a matriz de experimentos.

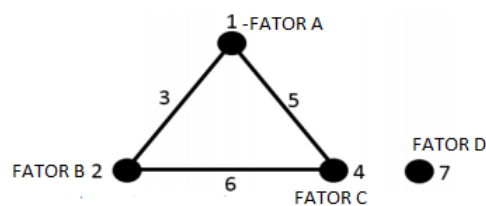
Tabela 3 – Montagem dos experimentos

Run	A	B	AB	C	AC	BC	D
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Fonte: Projeto VALE Solda - CÁTEDRA RODA TRILHO

A figura ?? mostra gráfico linear para o L8

Figura 11 – Gráfico linear para o L8



Fonte: Projeto VALE Solda - CÁTEDRA RODA TRILHO

Dessa forma, as soldas foram identificadas com o símbolo V ou D seguido pelo número de soldas e com o tipo de combinação. Por exemplo, a solda V3 – C1, é um trilho do tipo V, número 3, com a combinação todo tipo C1.

## 3.2 Descrição dos equipamentos utilizados

### 3.2.1 Máquina de centelhamento

Para o desenvolvimento das soldas realizadas para o presente trabalho, foi utilizada uma máquina de soldagem por centelhamento com as características expostas abaixo:

- Tensão de rede: 440 V;
- Máxima potência de solda: 679 kVA;
- Corrente de curto-circuito: 252 kA;
- Potência contínua de conexão: 332 kVA;
- Força de recalque: mínimo de 40 kN e máximo de 800 kN;
- Curso do carro de recalque: máximo de 50 mm;
- Curso de deslocamento da máquina: máximo de 400 mm.

Utilizou-se também de um pirômetro com capacidade de medição de temperaturas de até 1100 graus, um equipamento de corte de trilhos por abrasão e um sistema de ultrassom manual. A figura 12 apresenta uma máquina para cortar os trilhos após o centelhamento

Figura 12 – Equipamento de corte de trilho por abrasão



Fonte: GONÇALVES,2017

### 3.2.2 Serra de fita horizontal manual

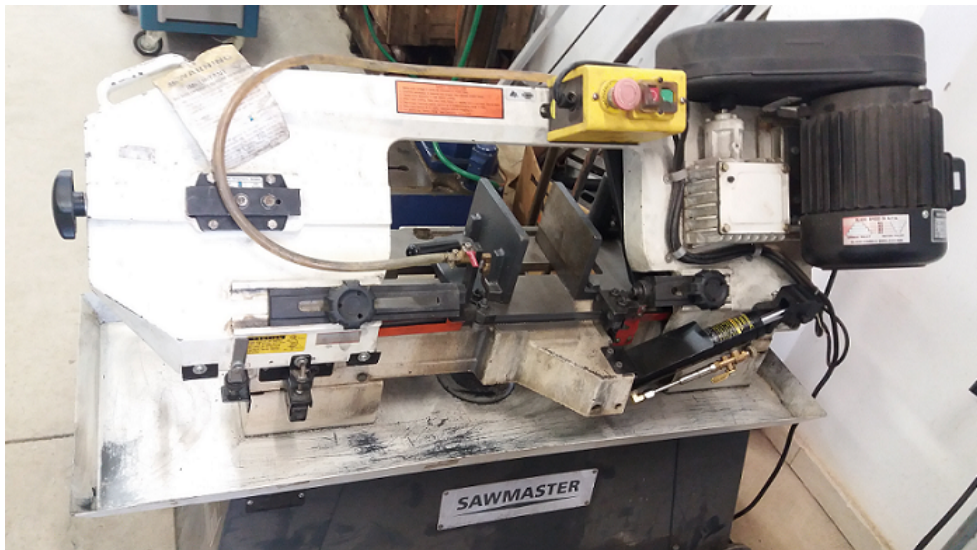
Para a realização dos cortes dos trilhos, preparando-os para as etapas posteriores, foi utilizada a serra de fita horizontal manual. Esta apresenta as especificações abaixo:



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

A figura 13 apresenta a máquina serra de fita utilizada no trabalho

Figura 13 – Serra de fita utilizada para o corte dos trilhos



Fonte: O AUTOR

### 3.2.3 Durômetro Rockwell normal analógico

Para a execução dos ensaios de dureza, foi utilizado o durômetro de dureza rockwell, com pré carga, manual. As informações da máquina encontram-se abaixo:

- Pré-carga 10 Kgf;

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

A figura 14 apresenta a máquina utilizada para a execução dos ensaios de dureza

Figura 14 – Durômetro utilizado para ensaios de dureza



Fonte: O AUTOR

### 3.2.4 Chapa aquecedora

Para execução do ensaio macrográfico, foi utilizada uma chapa aquecedora para o aquecimento da solução de ataque. Algumas especificações da máquina encontram-se abaixo:

- Semimanual;
- Temperatura máxima de 300°C;

- Potência de 600W;
- Modelo SXMI25 / série 003;
- Peso líquido: 5Kg;
- Voltagem: 110V.

A figura 15 apresenta a máquina aquecedora utilizada no ensaio macrográfico

Figura 15 – Chapa aquecedora utilizada no ensaio macrográfico



Fonte: O AUTOR

### 3.3 Metodologia experimental

Após o término da soldagem, os trilhos foram cortados e encaminhados para a Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) para que os demais ensaios e análises dessem prosseguimento. Foram entregues 34 soldas, sendo 17 do tipo D e 17 do tipo V. A figura 16 demonstra os trilhos alocados no laboratório de análises metalográficas da UFJF.

As análises da zona afetada pelo calor das soldas topo a topo por centelhamento foram realizadas em fatia longitudinal do boleto do trilho. A figura 17, ilustra o local do trilho no qual foram retiradas as amostras.

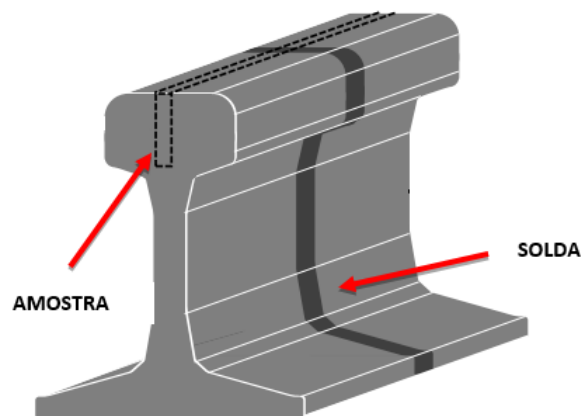
Como a região analisada é aquela compreendida no boleto, foram feitos cortes no trilho para que este estivesse adequado para os posteriores ensaios macrografia e dureza. Dessa forma, realizou-se as seguintes sequências do corte:

Figura 16 – Trilhos alocados no laboratório de análises metalográficas da UFJF



Fonte: O AUTOR

Figura 17 – Representação da localização das amostras nos trilhos

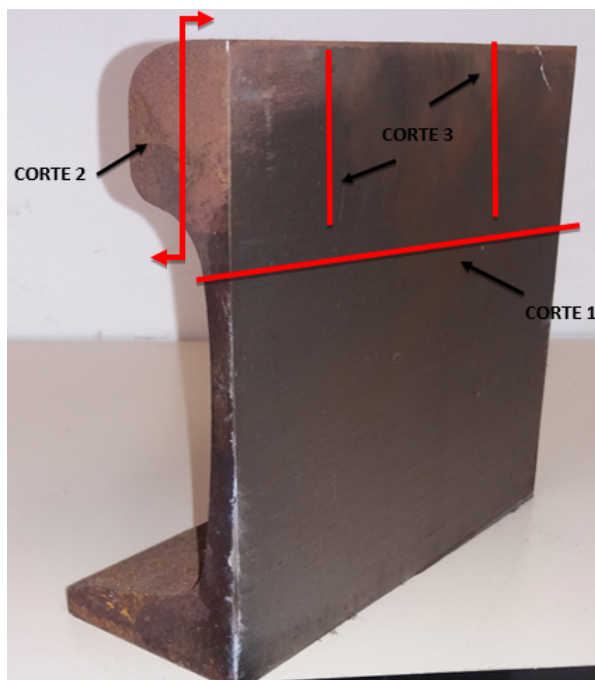


Fonte: NISHIKAWA, 2018. Adaptado pelo autor

- Corte 1: Corte realizado para a separação do boleto das demais regiões do trilho (alma e patim);
- Corte 2: Corte realizado na região do boleto no sentido longitudinal de modo que as faces a serem analisadas ficassem paralelas, para que fosse possível realizar os ensaios de dureza;
- Corte 3: Corte realizado no sentido transversal do boleto, retirando partes do metal base da solda com o objetivo de reduzir o tamanho da amostra.

A figura 18, ilustra os cortes realizados nas soldas

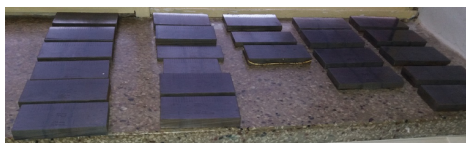
Figura 18 – Cortes realizados nas soldas



Fonte: O AUTOR

Após os cortes supracitados, as amostras foram encaminhadas para o ensaio de macrografia. A figura 19, abaixo, ilustra a solda pronta para os ensaios subsequentes.

Figura 19 – Soldas prontas para análises subsequentes



Fonte: O AUTOR

### 3.3.1 Ensaio de macrografia

Inicialmente as soldas foram submetidas ao lixamento, de modo que a superfície a ser analisada fique plana e polida. As lixas utilizadas para esse passo foram de granulometria 150, 220, 280, 320 e 400.

O reagente utilizado para revelar a superfície foi uma solução constituída por 50% de água ( $H_2O$ ), 38% de ácido clorídrico (HCL) e 12% de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ). Esta foi preparada no laboratório de análises metalográficas da UFJF pelo graduando Tiago Tepedino. A figura 20 demonstra a solução utilizada no ensaio.

Figura 20 – Solução empregada no ensaio



Fonte: O AUTOR

Para a realização do ensaio, colocou-se solução em um pirex de vidro temperado, e aqueceu-se com o auxílio da placa aquecedora até a temperatura próxima de  $75^{\circ}C$ . Para acurar a temperatura, colocou-se um béquer com água dentro do pirex e, dentro dele foi inserido um termômetro.

Após o aquecimento da solução, submergiu-se a superfície da amostra a ser analisada e manteve-se nessa posição por seis minutos. Ao final desse tempo, a amostra foi lavada com álcool 70% e, ao ser secada, recebeu um banho de verniz para que fossem minimizadas as ações de corrosão.

### 3.3.2 Ensaio de dureza

Após a realização do ensaio de macrografia, iniciou-se os ensaios de dureza nas amostras. Para a realização dos ensaios, foi utilizado o Durômetro Rockwell Analógico que contém um penetrador de diamante em formato cônico. Para garantir a acuidade dos resultados, a calibragem foi aferida antes de iniciar os ensaios da máquina, e também a cada 5 (cinco) pontos de medida. Isso foi possível, com a utilização de um corpo de prova com dureza padrão.

Para a execução do ensaio, foram realizados pontos em quatro fileiras, com distâncias de 3mm e 6mm do bolete. Por fileira, foram realizados 21 pontos de dureza, espaçados de 3mm de distância de cada um, sendo o primeiro ponto em cima da linha central da solda, e para cada lado, foram realizados 10 pontos no sentido da linha da solda em direção ao metal base. A figura 21 ilustra a disposição dos pontos de dureza realizados no ensaio.

Figura 21 – Disposição dos pontos de dureza



Fonte: O AUTOR

Os ensaios foram regidos pela norma AREMA, supracitada no item 2.7.

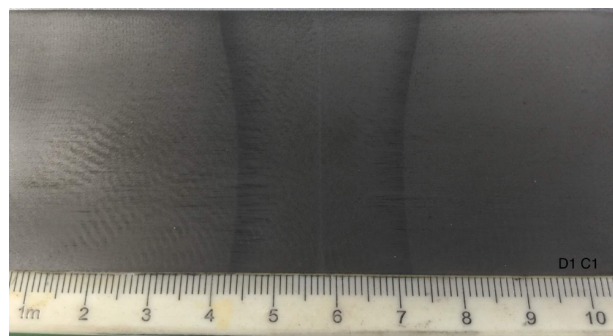
Após a confecção das medidas, estas foram inseridas no excel, onde foram confeccionados gráficos da dureza em Rockwell em função da distância.

## 4 RESULTADOS E ANÁLISES

### 4.1 Resultados ensaios macrográficos e de dureza

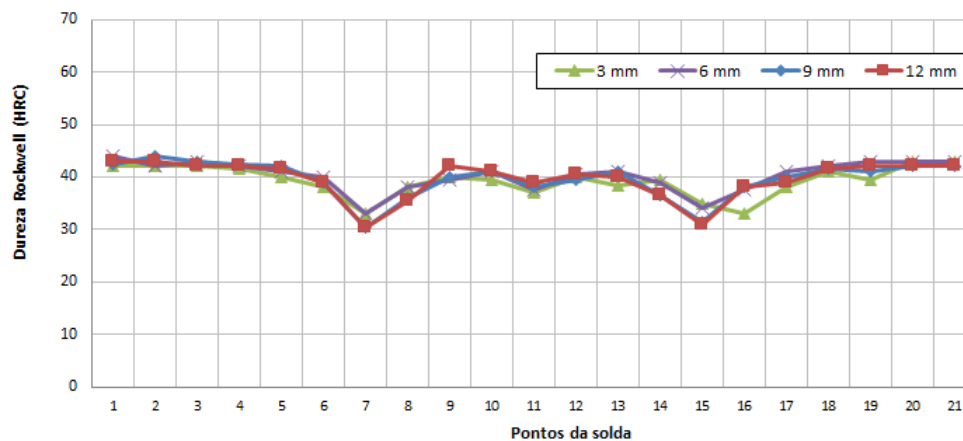
Segue abaixo os resultados do ensaio de macrografia e do ensaio de dureza. Serão expostos os resultados das soldas a partir das combinações dos experimentos.

Figura 22 – Resultado macrografia solda D1



Fonte: Projeto VALE Solda - CÁTEDRA RODA TRILHO

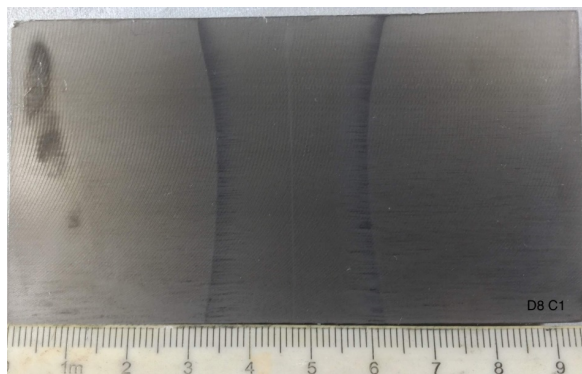
Figura 23 – Resultado ensaio de dureza solda D1



Fonte: O AUTOR

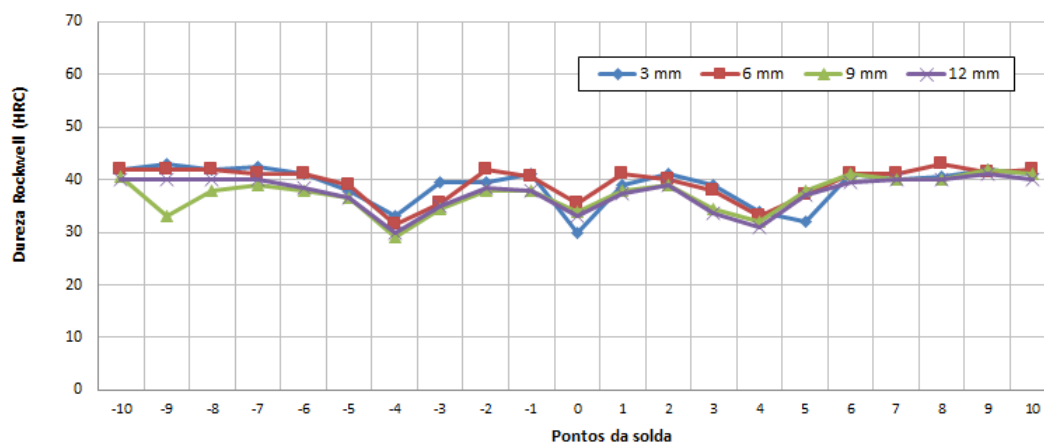


Figura 24 – Resultado macrografia solda D8



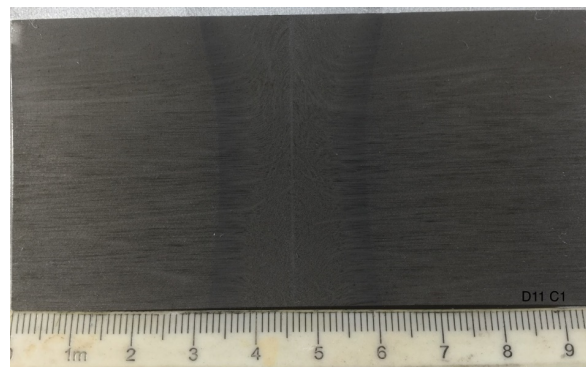
Fonte: Projeto VALE Solda - CÁTEDRA RODA TRILHO

Figura 25 – Resultado ensaio de dureza solda D8



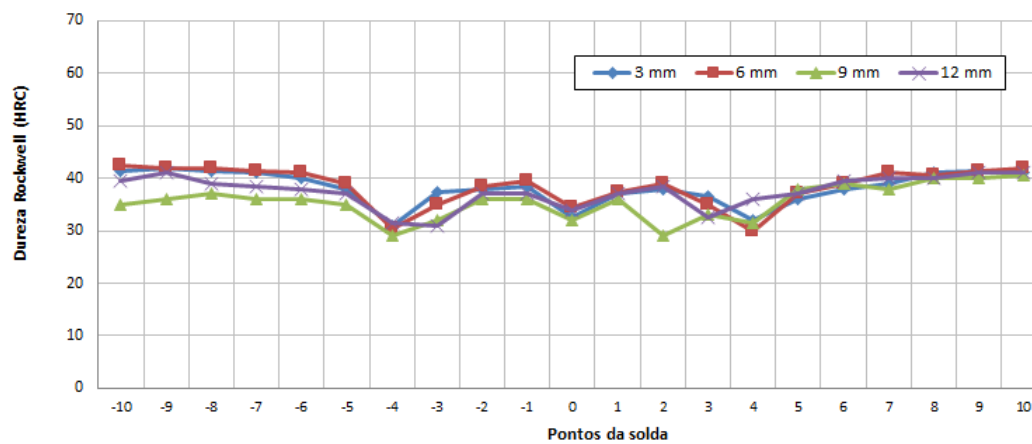
Fonte: O AUTOR

Figura 26 – Resultado macrografia solda D11



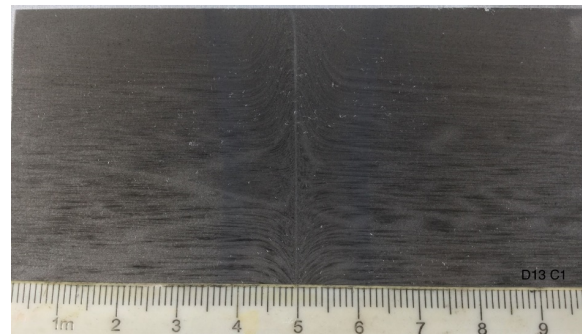
Fonte: Projeto VALE Solda - CÁTEDRA RODA TRILHO

Figura 27 – Resultado ensaio de dureza solda D11



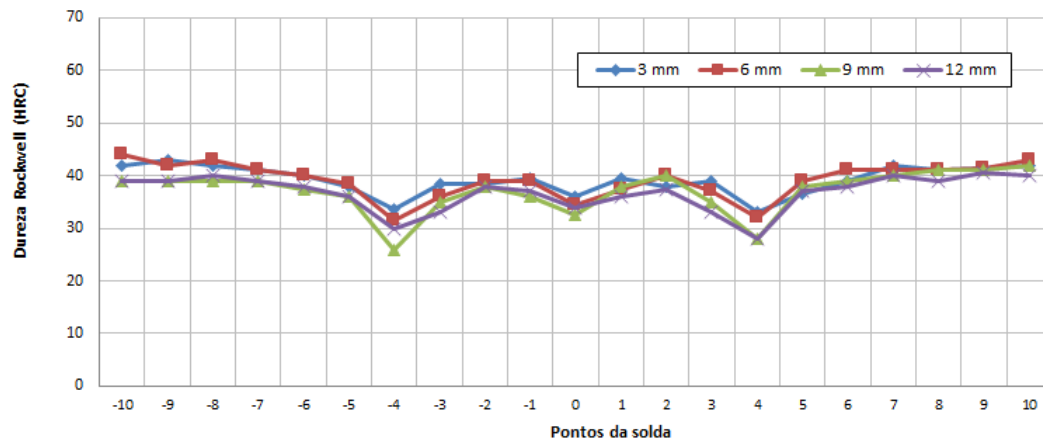
Fonte: O AUTOR

Figura 28 – Resultado macrografia solda D13



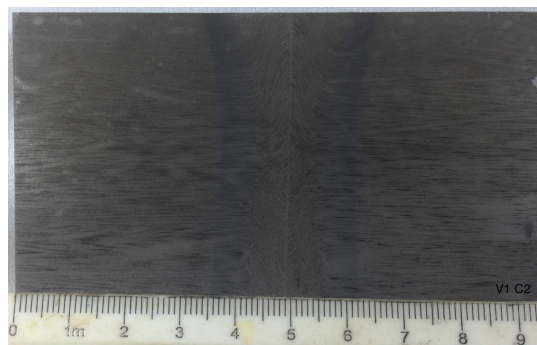
Fonte: Projeto VALE Solda - CÁTEDRA RODA TRILHO

Figura 29 – Resultado ensaio de dureza solda D13



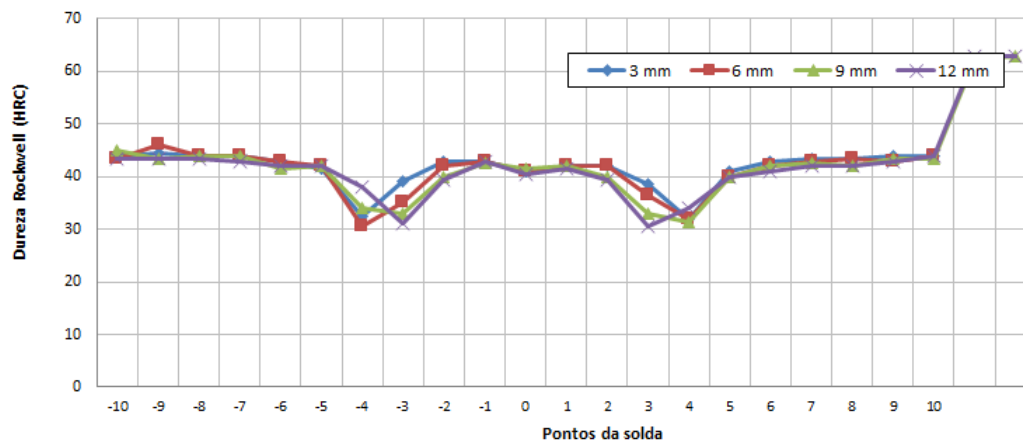
Fonte: O AUTOR

Figura 30 – Resultado macrografia solda V1



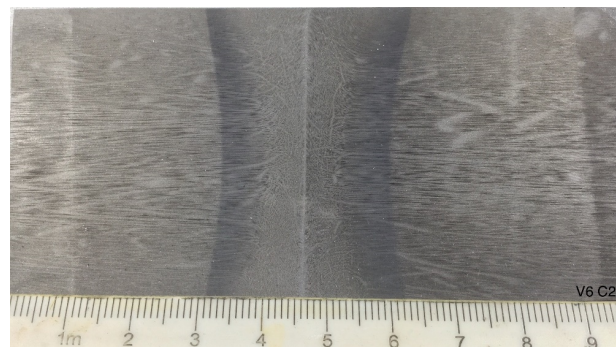
Fonte: Projeto VALE Solda - CÁTEDRA RODA TRILHO

Figura 31 – Resultado ensaio de dureza solda V1



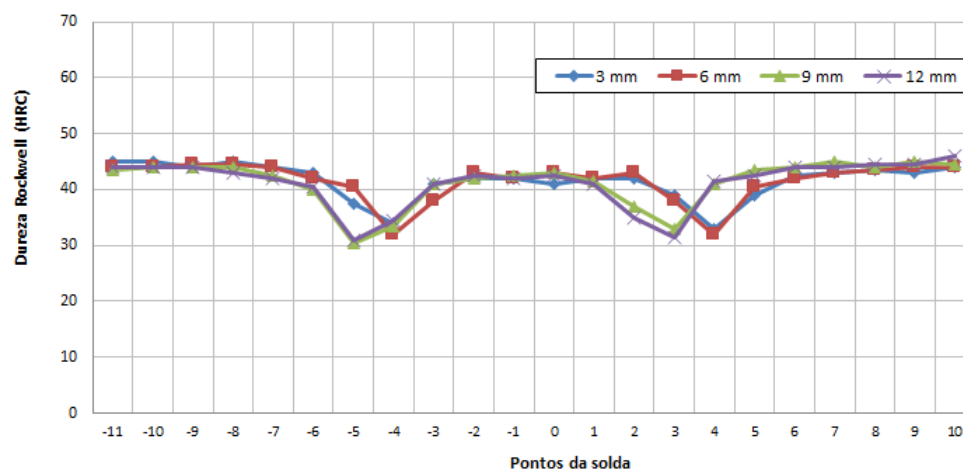
Fonte: O AUTOR

Figura 32 – Resultado macrografia solda V6



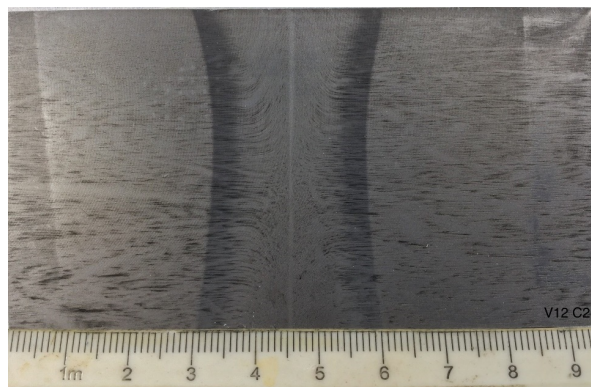
Fonte: Projeto VALE Solda - CÁTEDRA RODA TRILHO

Figura 33 – Resultado ensaio de dureza solda V6



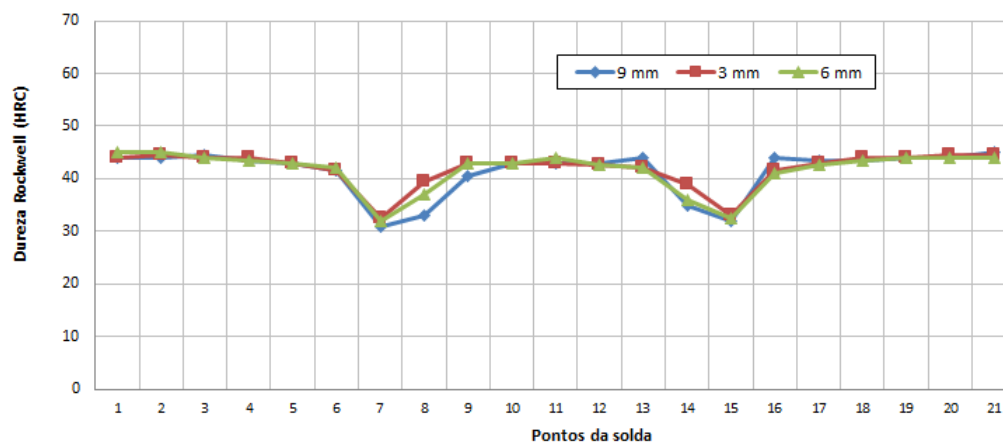
Fonte: O AUTOR

Figura 34 – Resultado macrografia solda V12



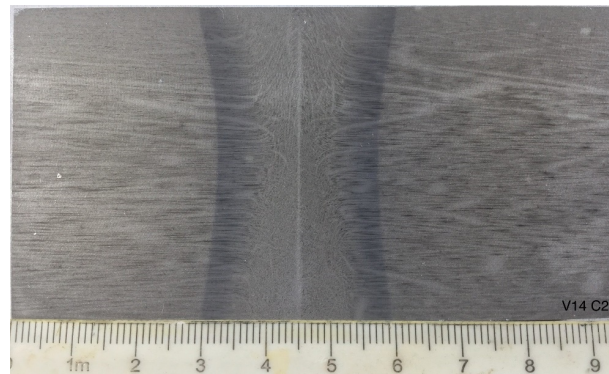
Fonte: Projeto VALE Solda - CÁTEDRA RODA TRILHO

Figura 35 – Resultado ensaio de dureza solda V12



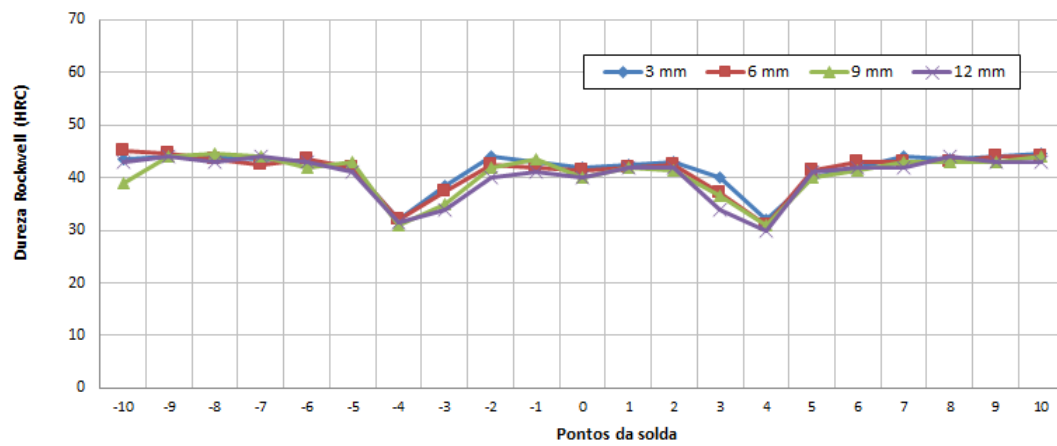
Fonte: O AUTOR

Figura 36 – Resultado macrografia solda V14



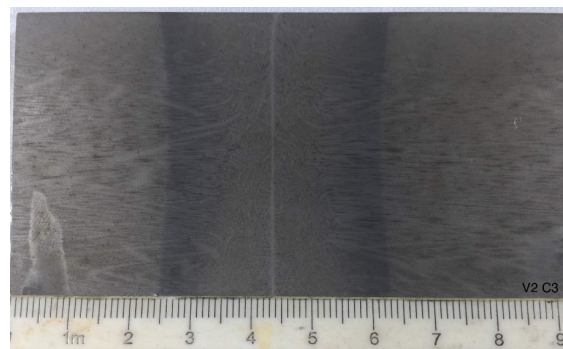
Fonte: Projeto VALE Solda - CÁTEDRA RODA TRILHO

Figura 37 – Resultado ensaio de dureza solda V14



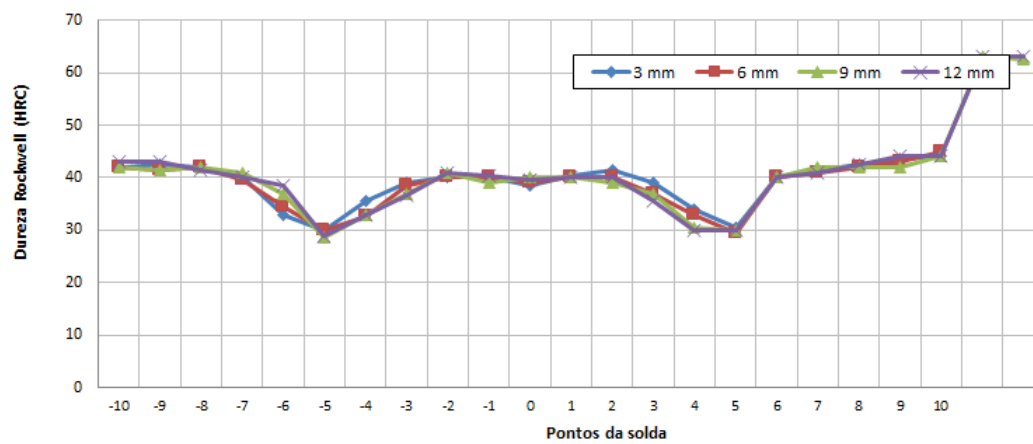
Fonte: O AUTOR

Figura 38 – Resultado macrografia solda V2



Fonte: Projeto VALE Solda - CÁTEDRA RODA TRILHO

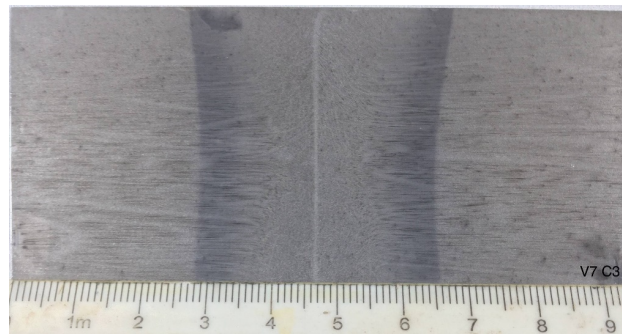
Figura 39 – Resultado ensaio de dureza solda V2



Fonte: O AUTOR

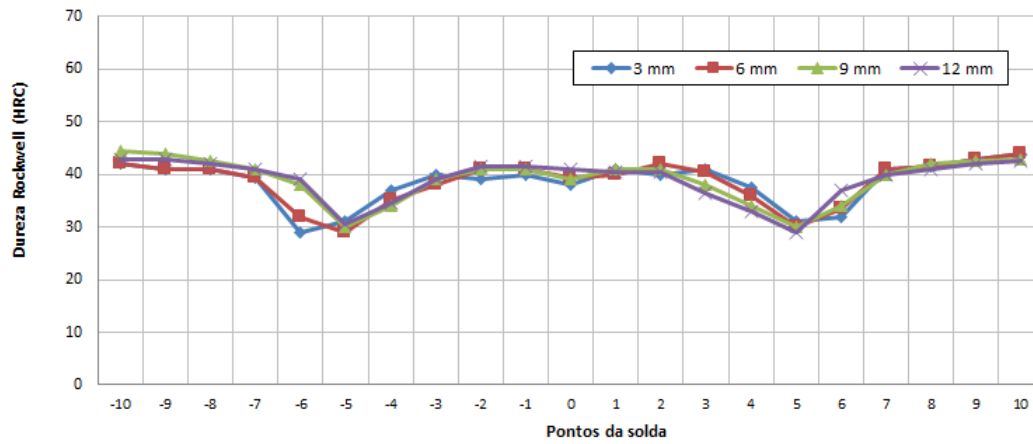


Figura 40 – Resultado macrografia solda V7



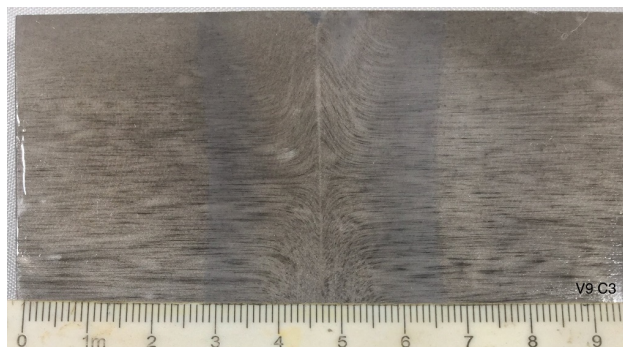
Fonte: Projeto VALE Solda - CÁTEDRA RODA TRILHO

Figura 41 – Resultado ensaio de dureza solda V7



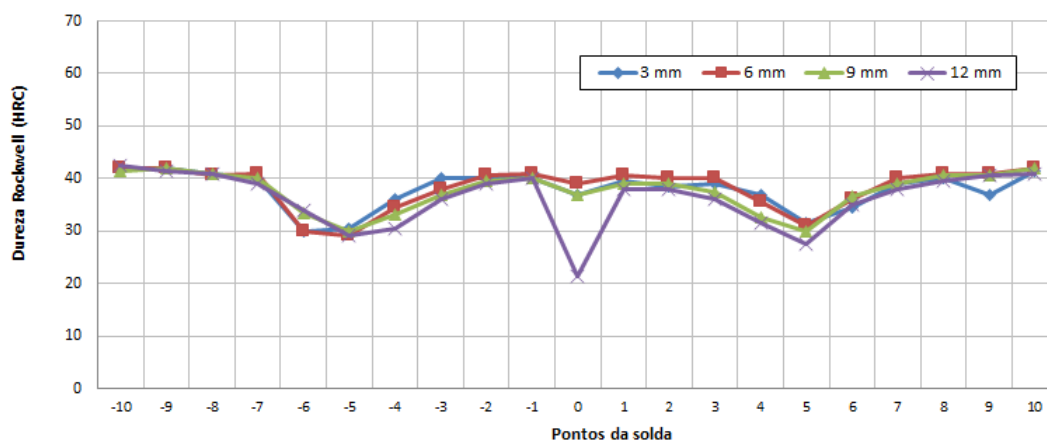
Fonte: O AUTOR

Figura 42 – Resultado macrografia solda V9



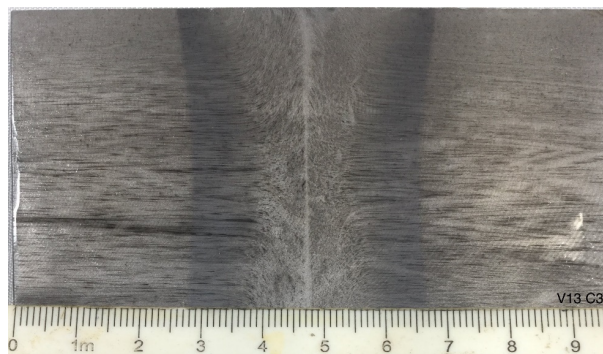
Fonte: Projeto VALE Solda - CÁTEDRA RODA TRILHO

Figura 43 – Resultado macrografia solda V9



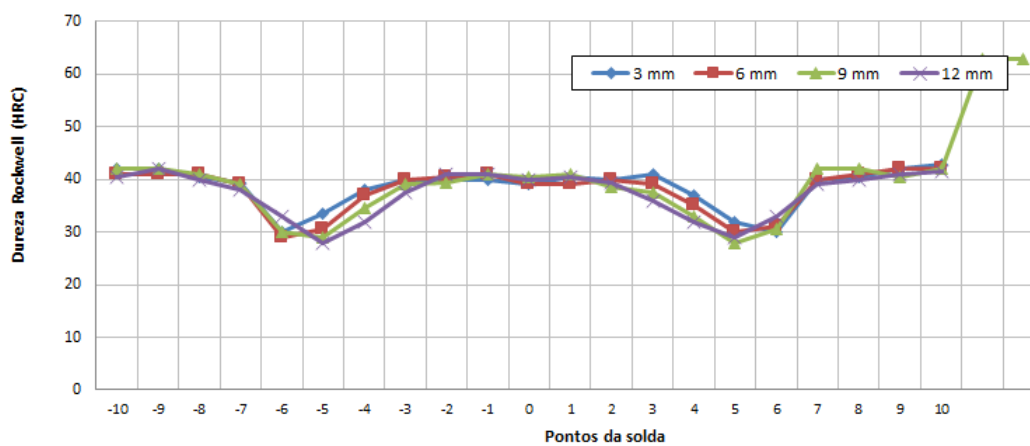
Fonte: O AUTOR

Figura 44 – Resultado macrografia solda V13



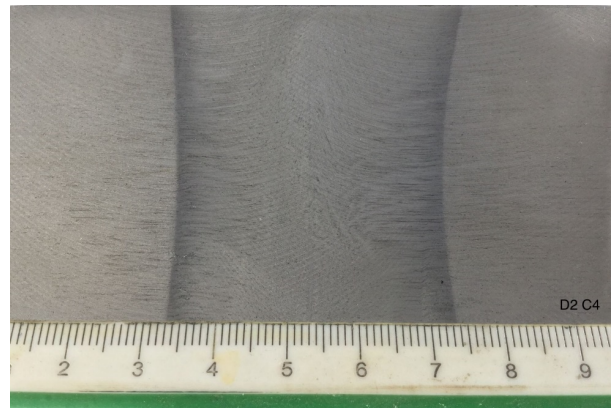
Fonte: Projeto VALE Solda - CÁTEDRA RODA TRILHO

Figura 45 – Resultado ensaio de dureza solda V13



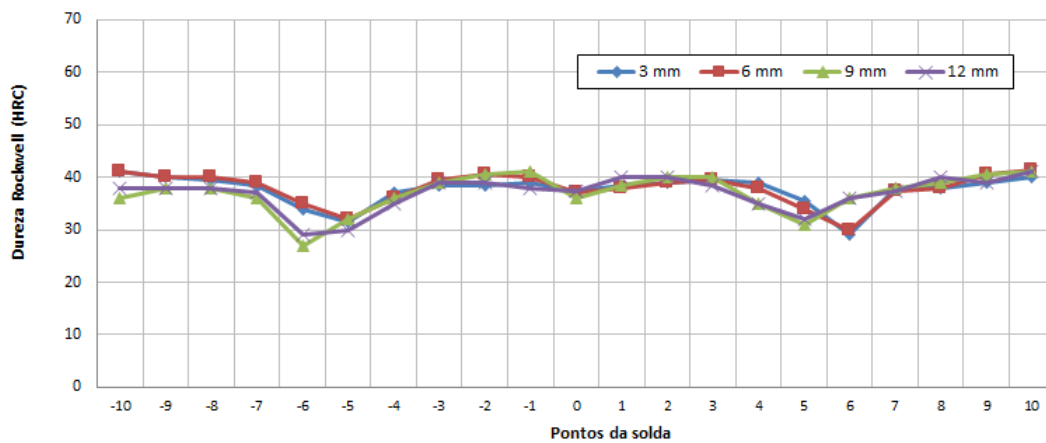
Fonte: O AUTOR

Figura 46 – Resultado macrografia solda D2



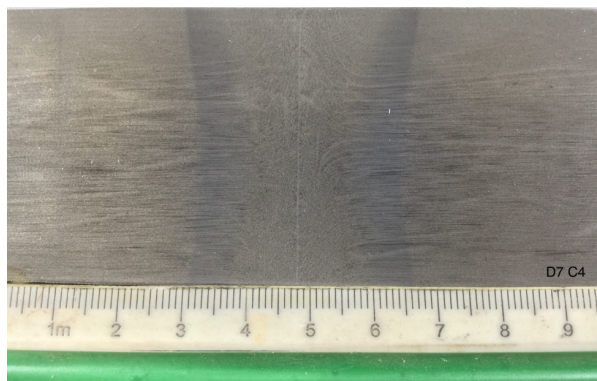
Fonte: Projeto VALE Solda - CÁTEDRA RODA TRILHO

Figura 47 – Resultado ensaio de dureza solda D2



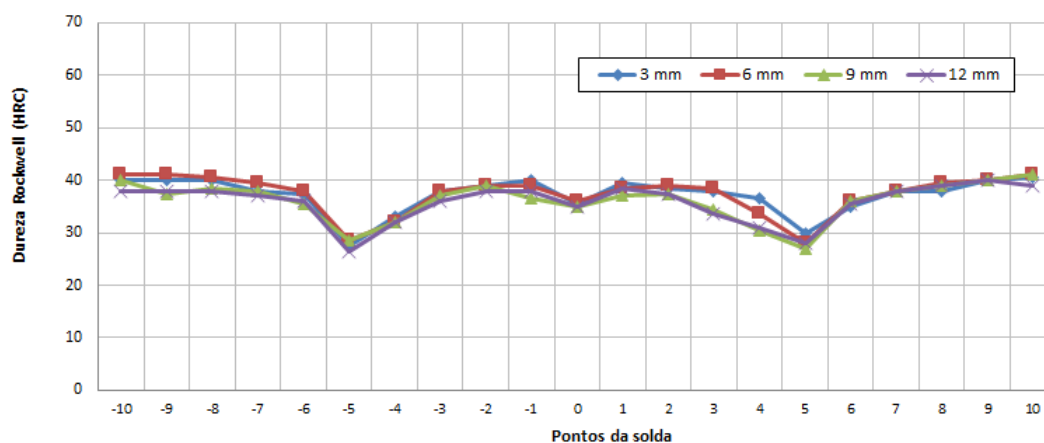
Fonte: O AUTOR

Figura 48 – Resultado macrografia solda D7



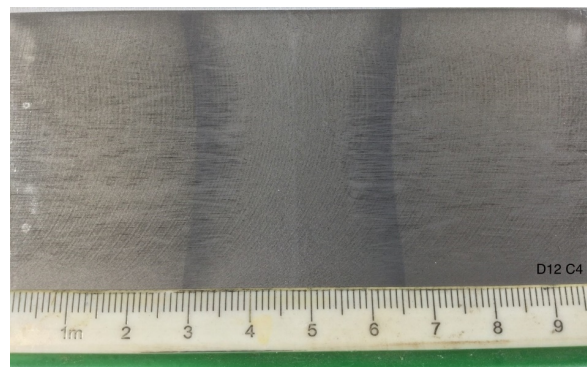
Fonte: Projeto VALE Solda - CÁTEDRA RODA TRILHO

Figura 49 – Resultado ensaio de dureza solda D7



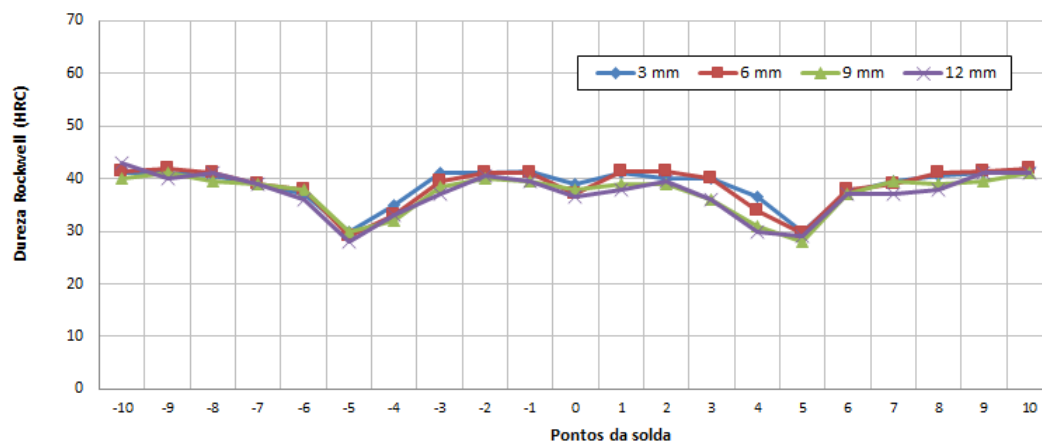
Fonte: O AUTOR

Figura 50 – Resultado macrografia solda D12



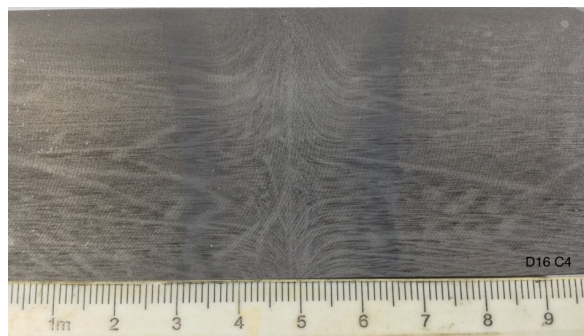
Fonte: Projeto VALE Solda - CÁTEDRA RODA TRILHO

Figura 51 – Resultado ensaio de dureza solda D12



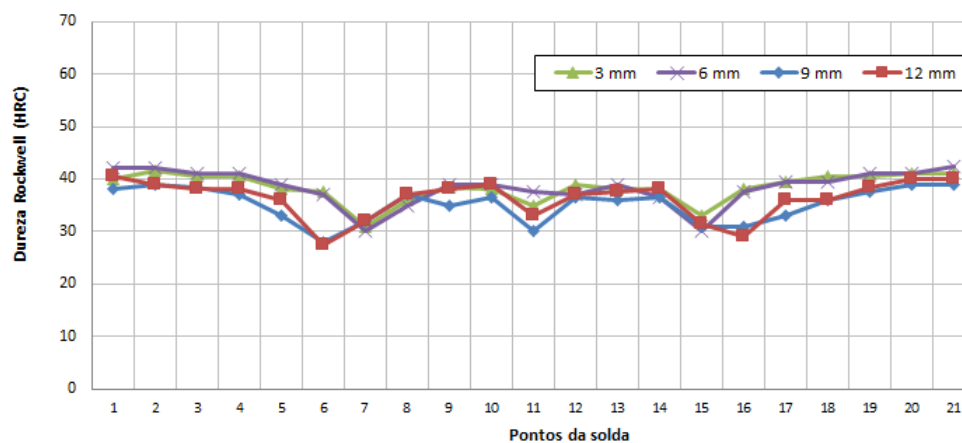
Fonte: O AUTOR

Figura 52 – Resultado macrografia solda D16



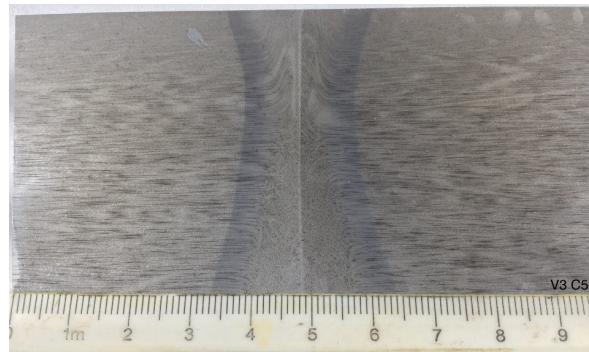
Fonte: Projeto VALE Solda - CÁTEDRA RODA TRILHO

Figura 53 – Resultado ensaio de dureza solda D16



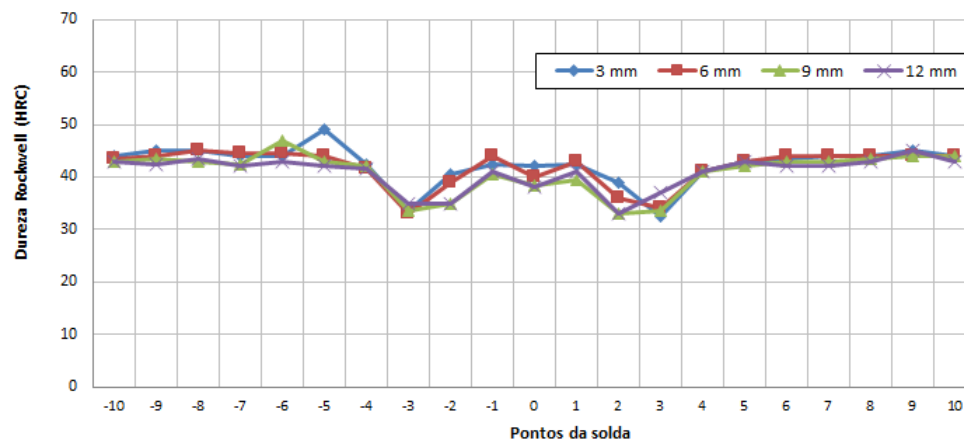
Fonte: O AUTOR

Figura 54 – Resultado macrografia solda V3



Fonte: Projeto VALE Solda - CÁTEDRA RODA TRILHO

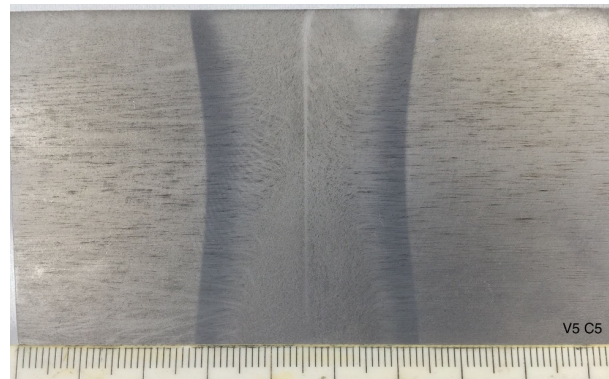
Figura 55 – Resultado ensaio de dureza solda V3



Fonte: O AUTOR

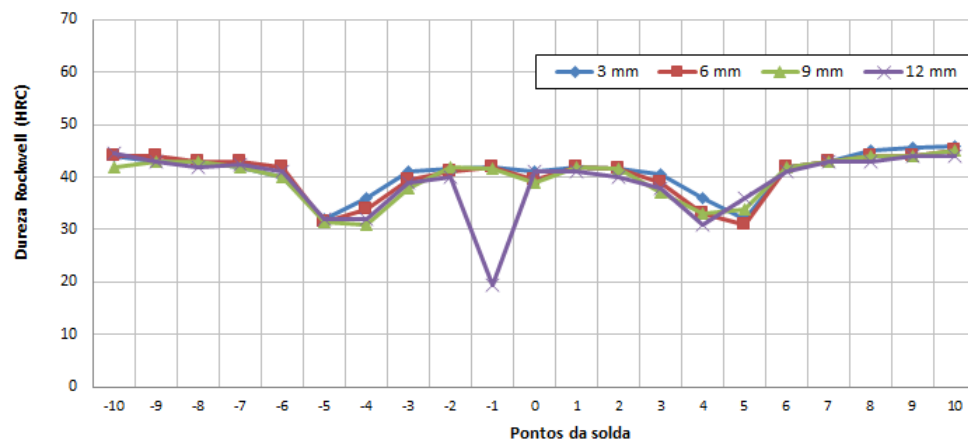


Figura 56 – Resultado macrografia solda V5



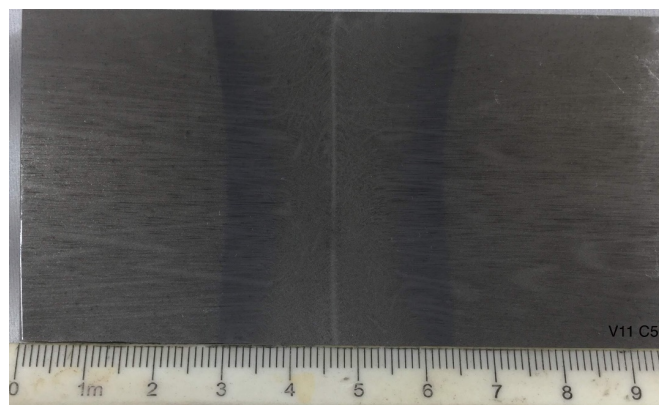
Fonte: Projeto VALE Solda - CÁTEDRA RODA TRILHO

Figura 57 – Resultado ensaio de dureza solda V5



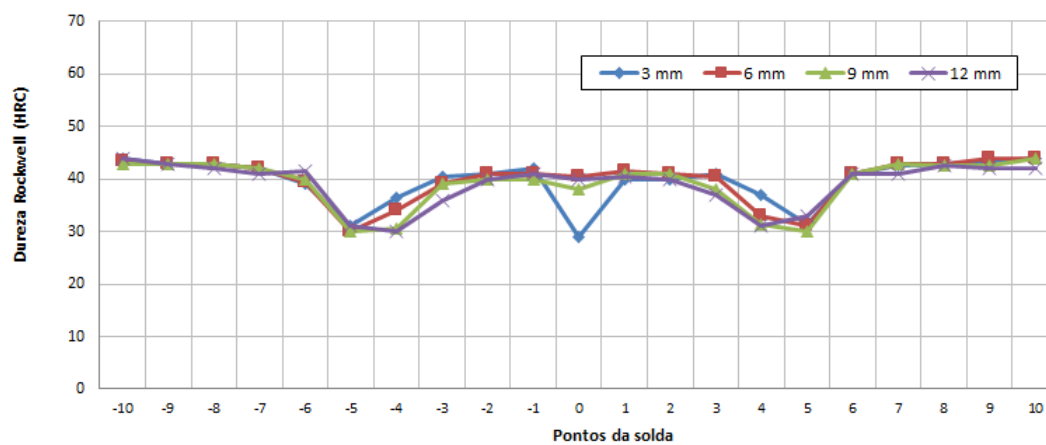
Fonte: O AUTOR

Figura 58 – Resultado macrografia solda V11



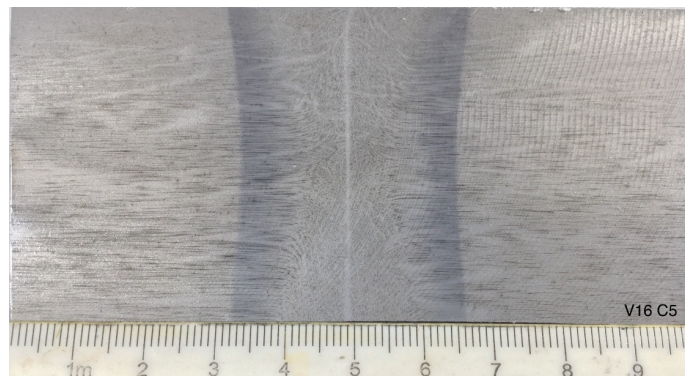
Fonte: Projeto VALE Solda - CÁTEDRA RODA TRILHO

Figura 59 – Resultado ensaio de dureza solda V11



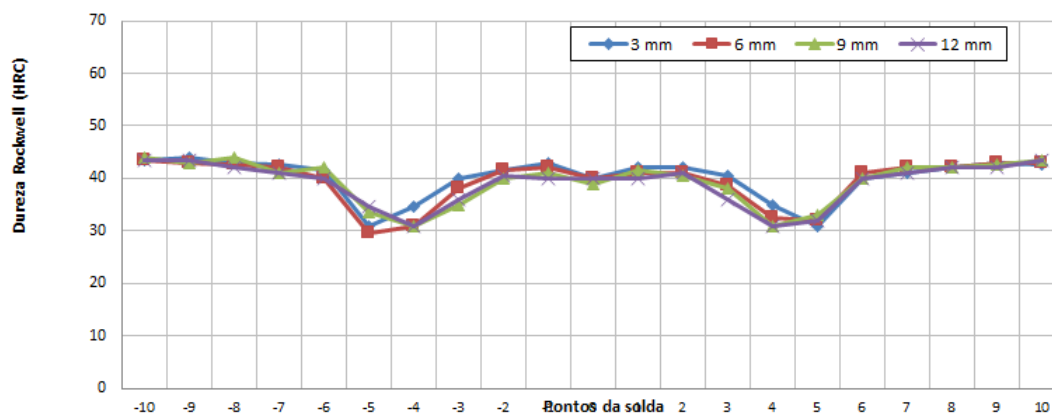
Fonte: O AUTOR

Figura 60 – Resultado macrografia solda V16



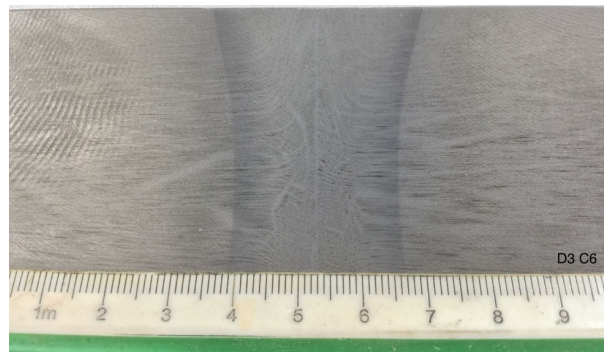
Fonte: Projeto VALE Solda - CÁTEDRA RODA TRILHO

Figura 61 – Resultado ensaio de dureza solda V16



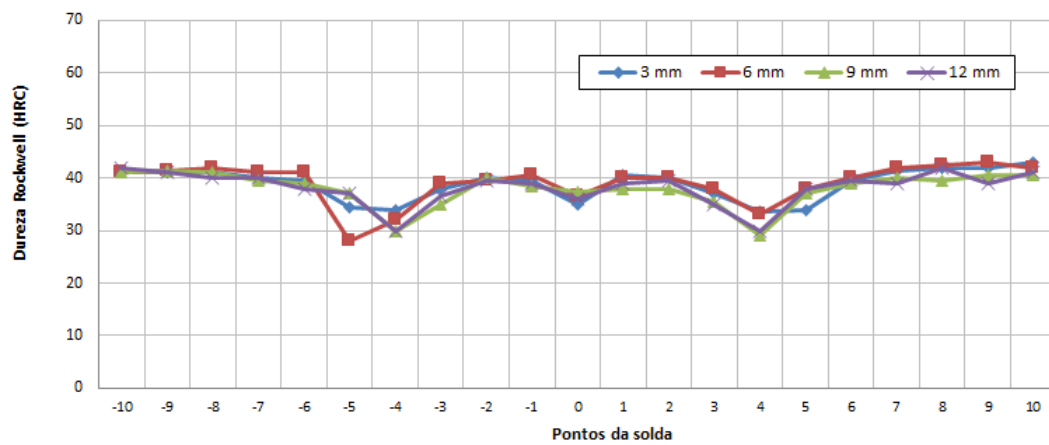
Fonte: O AUTOR

Figura 62 – Resultado macrografia solda D3



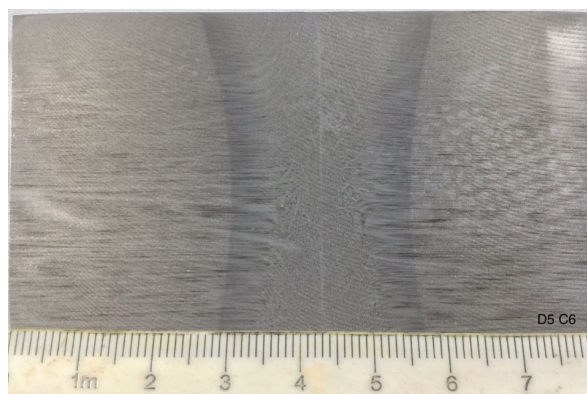
Fonte: Projeto VALE Solda - CÁTEDRA RODA TRILHO

Figura 63 – Resultado ensaio de dureza solda D3



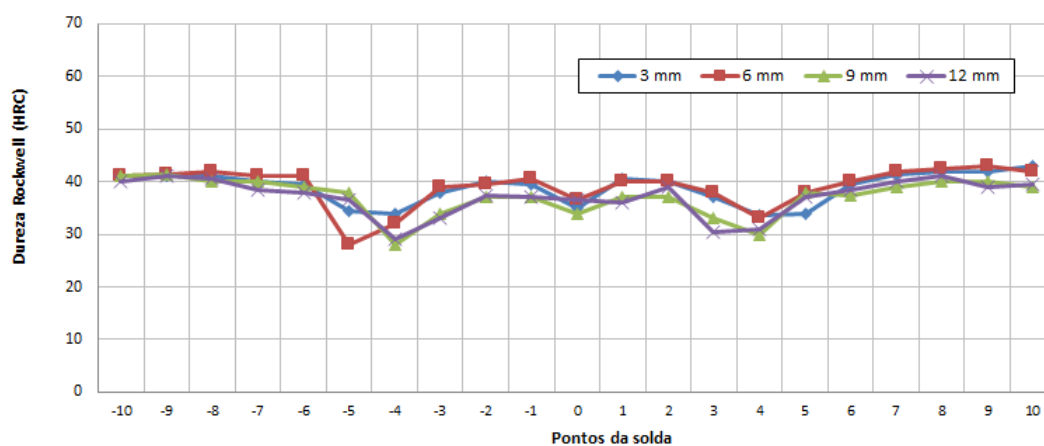
Fonte: O AUTOR

Figura 64 – Resultado macrografia solda D5



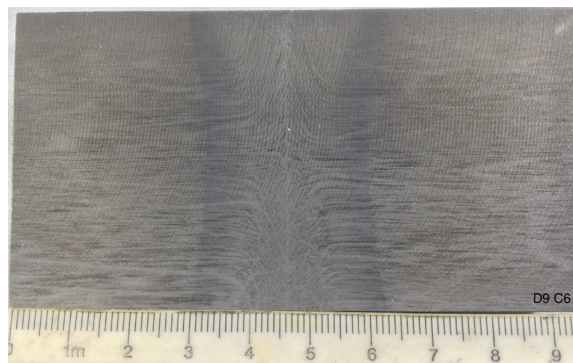
Fonte: Projeto VALE Solda - CÁTEDRA RODA TRILHO

Figura 65 – Resultado ensaio de dureza solda D5



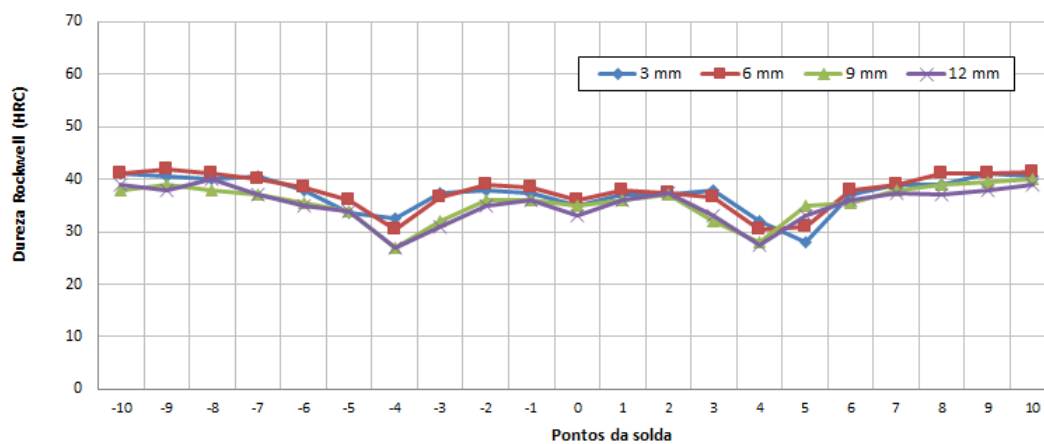
Fonte: O AUTOR

Figura 66 – Resultado macrografia solda D9



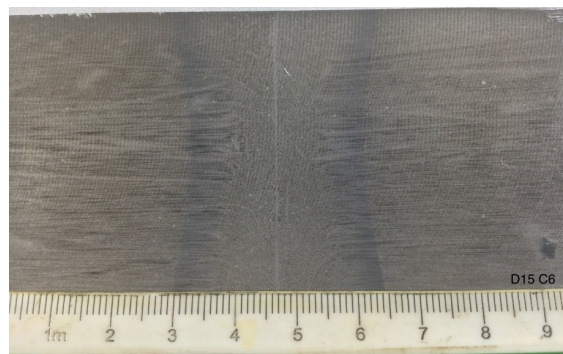
Fonte: Projeto VALE Solda - CÁTEDRA RODA TRILHO

Figura 67 – Resultado ensaio de dureza solda D9



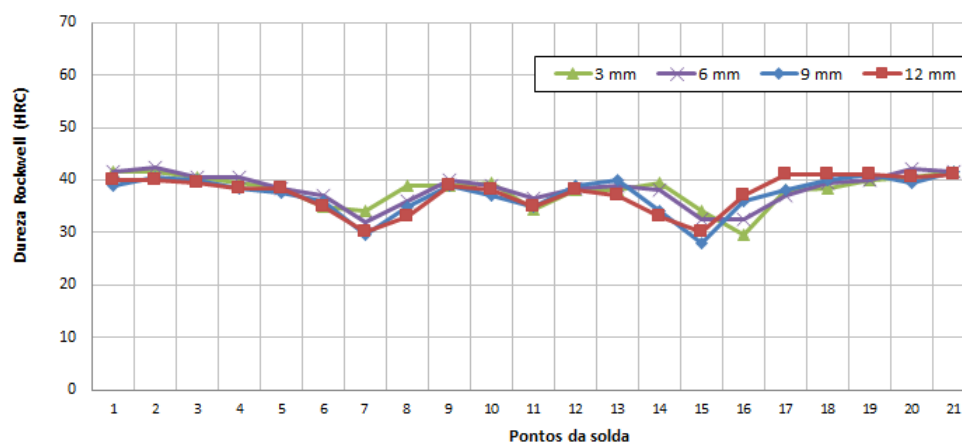
Fonte: O AUTOR

Figura 68 – Resultado macrografia solda D15



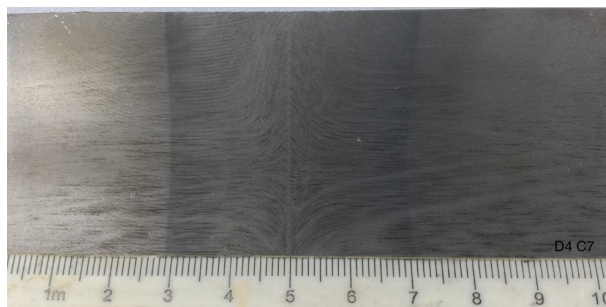
Fonte: Projeto VALE Solda - CÁTEDRA RODA TRILHO

Figura 69 – Resultado ensaio de dureza solda D15



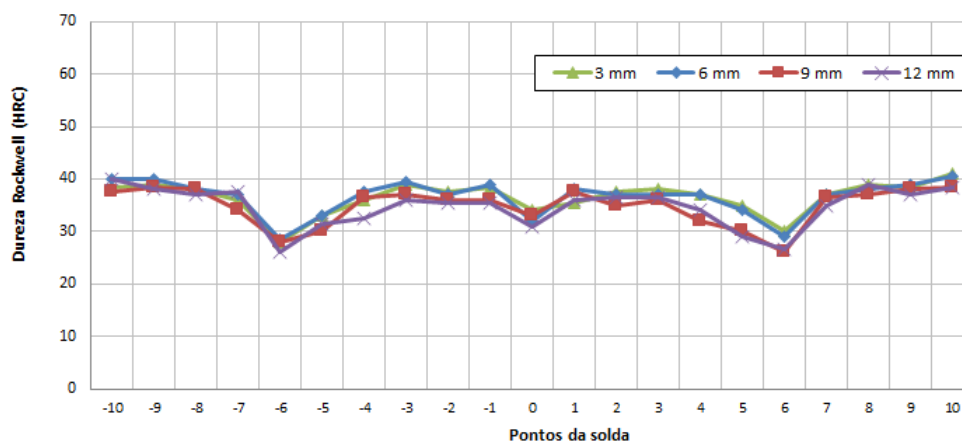
Fonte: O AUTOR

Figura 70 – Resultado macrografia solda D4



Fonte: Projeto VALE Solda - CÁTEDRA RODA TRILHO

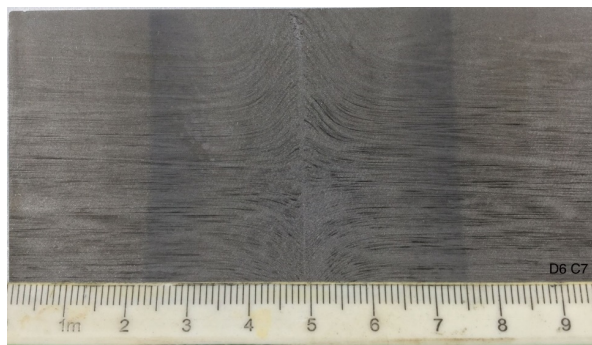
Figura 71 – Resultado ensaio de dureza solda D4



Fonte: O AUTOR

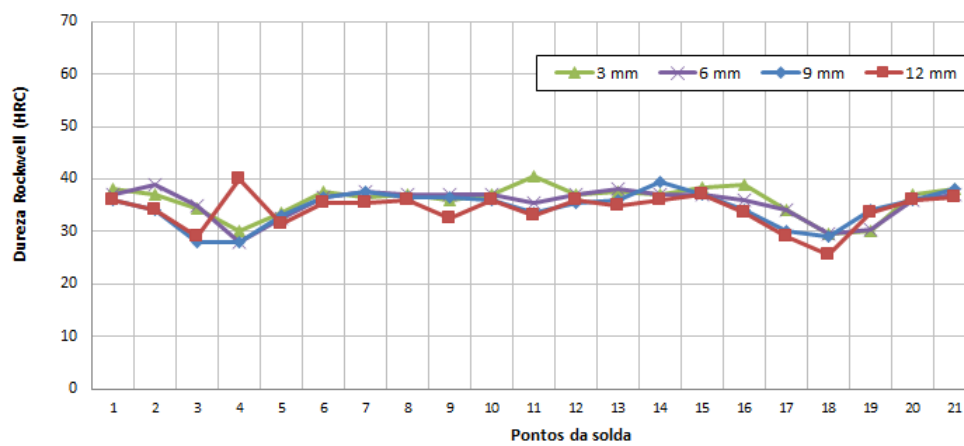


Figura 72 – Resultado macrografia solda D6



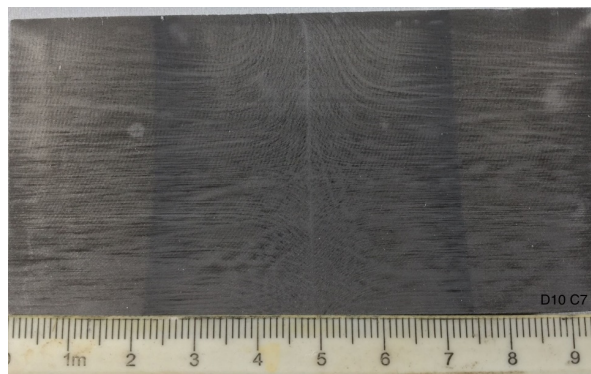
Fonte: Projeto VALE Solda - CÁTEDRA RODA TRILHO

Figura 73 – Resultado ensaio de dureza solda D6



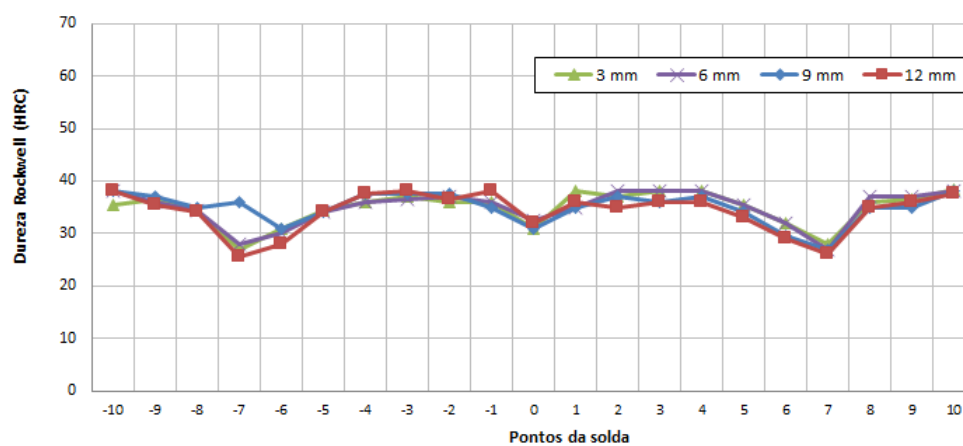
Fonte: O AUTOR

Figura 74 – Resultado macrografia solda D10



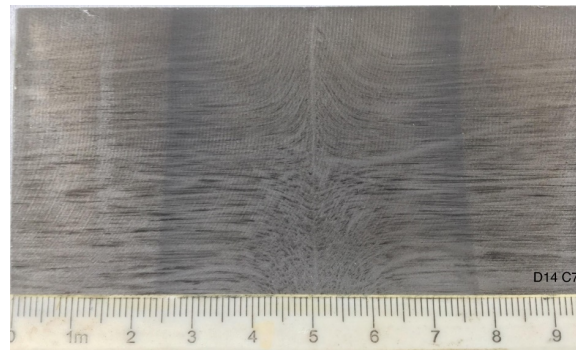
Fonte: Projeto VALE Solda - CÁTEDRA RODA TRILHO

Figura 75 – Resultado ensaio de dureza solda D10



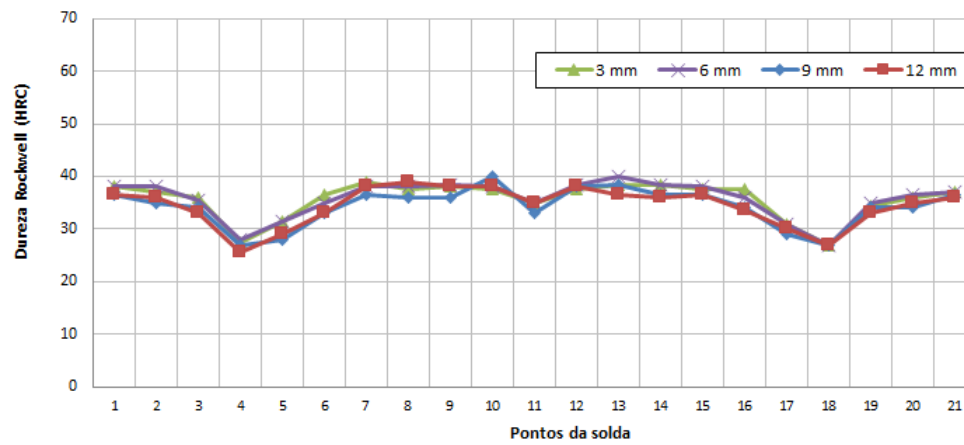
Fonte: O AUTOR

Figura 76 – Resultado macrografia solda D14



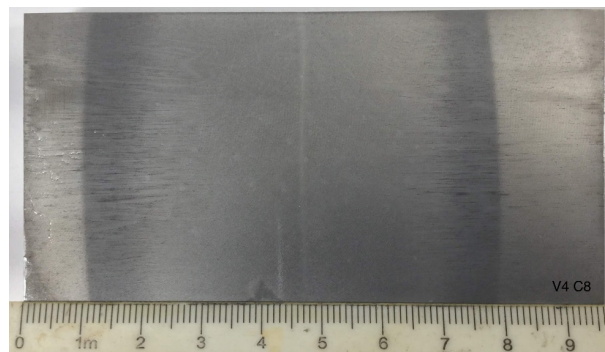
Fonte: Projeto VALE Solda - CÁTEDRA RODA TRILHO

Figura 77 – Resultado ensaio de dureza solda D14



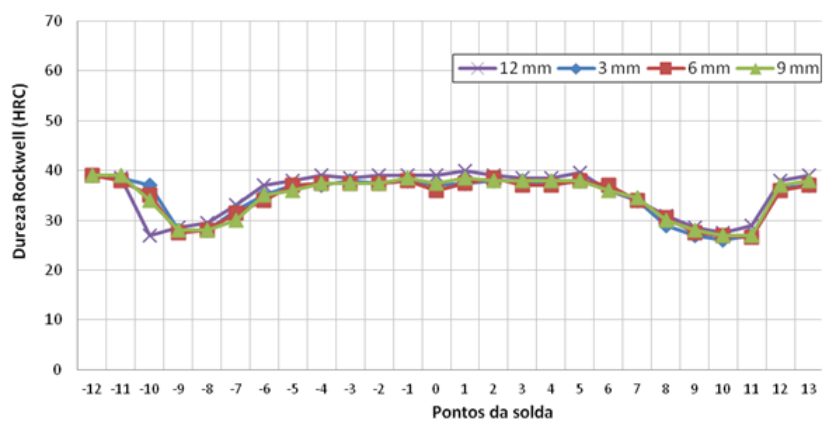
Fonte: O AUTOR

Figura 78 – Resultado macrografia solda V4



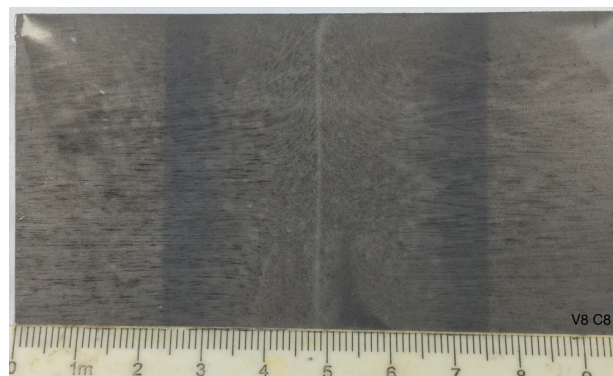
Fonte: Projeto VALE Solda - CÁTEDRA RODA TRILHO

Figura 79 – Resultado ensaio de dureza solda V4



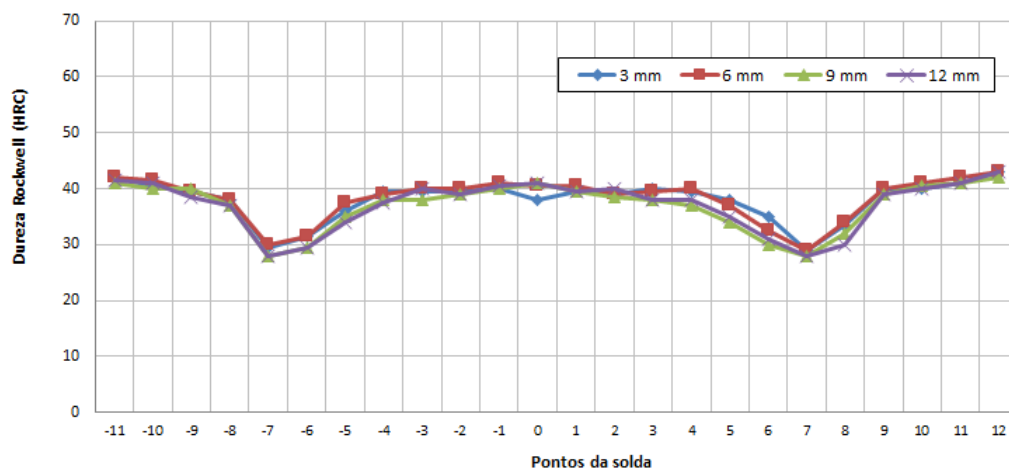
Fonte: O AUTOR

Figura 80 – Resultado macrografia solda V8



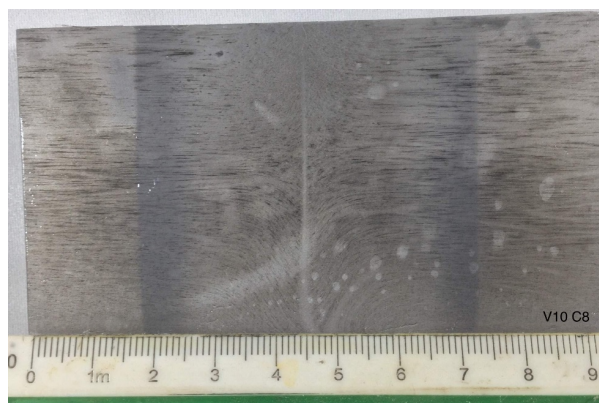
Fonte: Projeto VALE Solda - CÁTEDRA RODA TRILHO

Figura 81 – Resultado ensaio de dureza solda V8



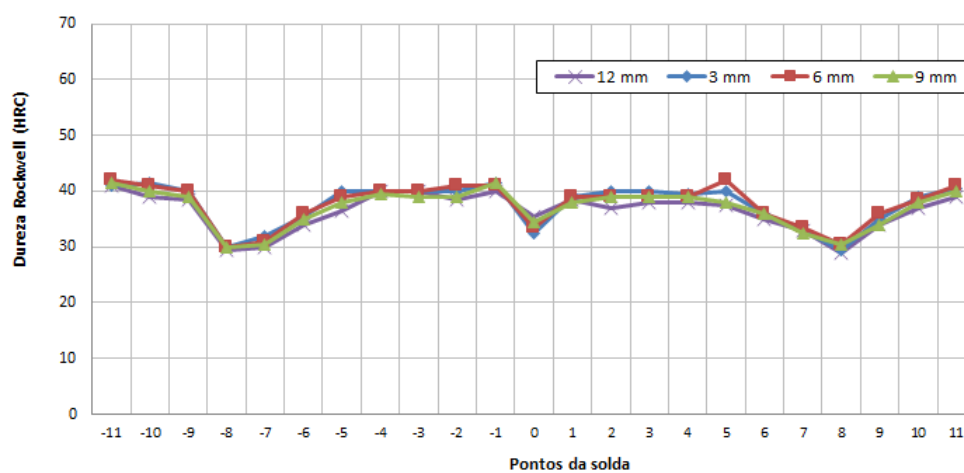
Fonte: O AUTOR

Figura 82 – Resultado macrografia solda V10



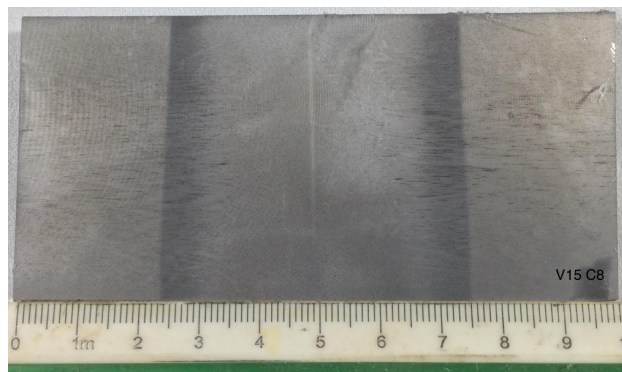
Fonte: Projeto VALE Solda - CÁTEDRA RODA TRILHO

Figura 83 – Resultado ensaio de dureza solda V10



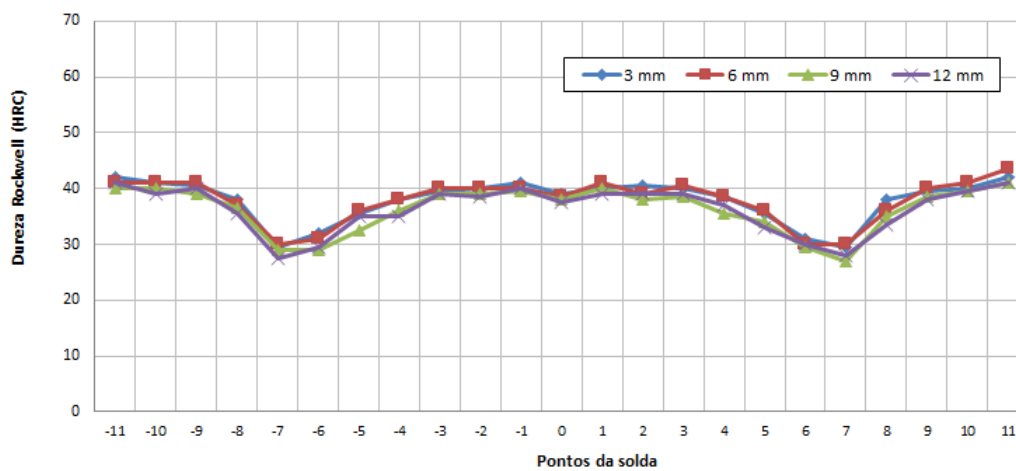
Fonte: O AUTOR

Figura 84 – Resultado macrografia solda V15



Fonte: Projeto VALE Solda - CÁTEDRA RODA TRILHO

Figura 85 – Resultado ensaio de dureza solda V15



Fonte: O AUTOR

Com a análise das macrografias, pode-se observar primeiramente uma linha sutil, ao centro da amostra, e de cor mais clara que as demais, compreendendo a zona central soldada. Em direção ao metal base, percebe-se uma faixa cinza com transição abrupta. O tamanho da variação da ZTA depende, principalmente com os parâmetros de soldagem, sendo a combinação C8, a que apresentou maior tamanho da ZTA, e a combinação C2 a que apresentou o menor tamanho.

Percebe-se também, que algumas soldas apresentaram a distribuição do calor de forma uniforme ao longo da face longitudinal, como as combinações C8. Outras, entretanto, apresentaram distribuição diferente, com maior taxa de calor nas bordas da região analisada.

Com relação às análises dos perfis de dureza, percebe-se que os valores encontrados são menores onde o ataque macrográfico se apresenta mais escurecido. Nessas regiões, por haver instabilidade da dureza, aparecem nos gráficos dos perfis as regiões denominadas “dentes de vampiro”. As demais regiões apresentam uma dureza constante com média de 40HRC para as soldas do tipo V e de 35HRC para as soldas do tipo D, conforme o que foi visto de Gomes Filho (2007) sobre aços ao carbono.

Observou-se também uma ligeira redução da dureza na região central da solda, validando o esperado mediante a revisão bibliográfica, conforme o que foi visto de Nishikawa, (2017). Além disso, percebe-se que a distribuição da dureza e seus respectivos valores não se alteram com o aumento da distância do local analisado ao boleto.

## 4.2 Modelos matemáticos e análise de variância

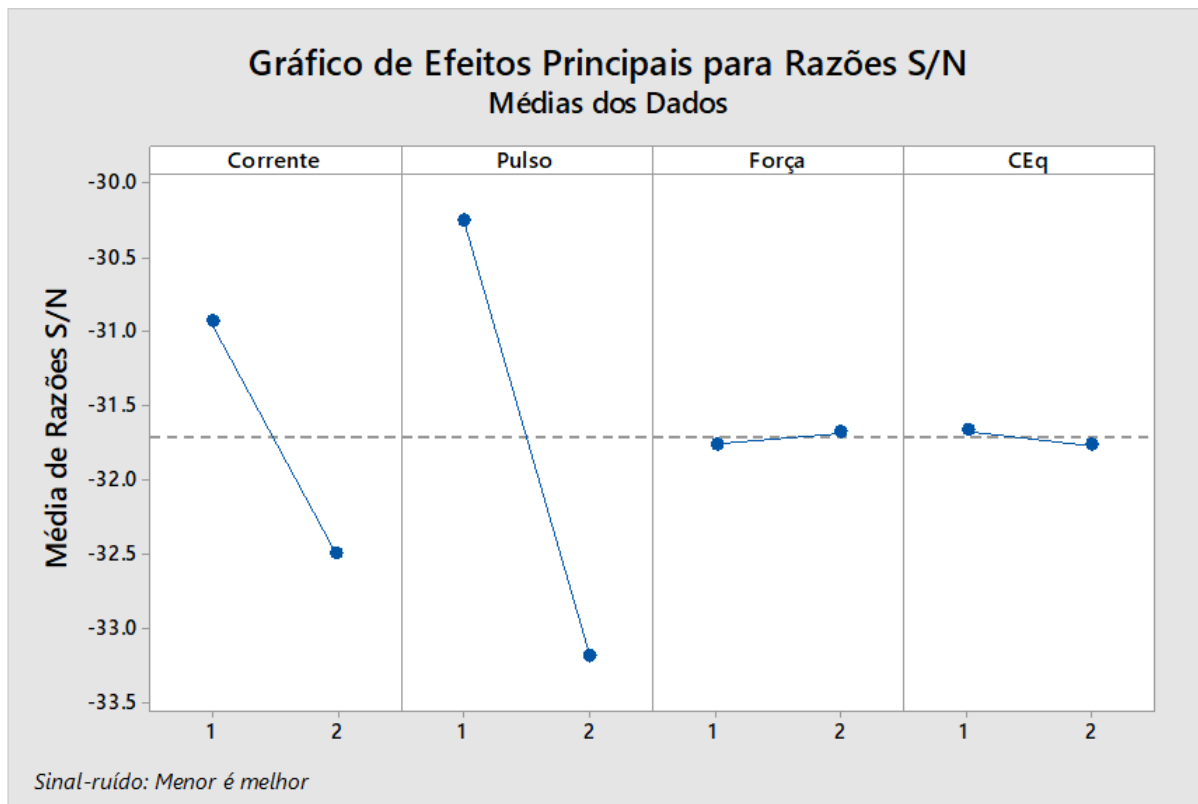
### 4.2.1 Resultados do tamanho da ZTA

Para o estudo do tamanho da ZTA, foi realizada uma análise dos parâmetros e seus respectivos efeitos no resultado. Dessa forma, foi gerado o gráfico que se encontra na figura 86

A figura 86 revela parâmetros - corrente, pulso, força de recalque e carbono



Figura 86 – Efeitos principais para razões S/N para ZTA



Fonte: Projeto VALE Solda - CÁTEDRA RODA TRILHO

equivalente - analisados e suas contribuições para o resultado estando no valor mínimo (1) e no valor máximo (2). Para a análise da variabilidade, escolheu-se a relação S/R "menor é melhor" ou seja deseja-se minimizar os resultados para maximizar o desempenho do objeto de estudo. Percebe-se que tanto a corrente quanto a intensidade de pulsos apresenta uma grande contribuição positiva estando no valor mínimo. Já a força de recalque e o carbono equivalente apresentam baixa contribuição nos resultados.

Realizando os cálculos para as combinações da matriz de experimentos, tem-se os resultados obtidos na tabela 4:

Pode-se perceber que a combinação que apresentou menor relação para a razão S/N foi a combinação em a corrente e pulso se encontram no valor mínimo e

Tabela 4 – Montagem dos experimentos para ZTA

Corrente	Pulso	Força	Carbono Eq	S/N
1	1	1	1	-30.05
1	1	2	2	-29.93
1	2	1	2	-31.90
1	2	2	1	-31.90
2	1	1	2	-30.71
2	1	2	1	-30.37
2	2	1	1	-34.39
2	2	2	2	-34.55

Fonte: Projeto VALE Solda - CÁTEDRA RODA TRILHO

a força e o carbono equivalente se encontram no valor máximo, dando uma razão de -29.93

Para validar o resultado obtido, foram realizados cálculos da variância pela razão S/N. Os valores encontram-se na tabela 5

Tabela 5 – Análise de variância pela razão S/R-Tamanho da ZTA

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P-Valor
Corrente	1	4.868	4.868	4.868	245.29	0.00
Quantidade de pulso	1	17.0969	17.0969	17.0969	861.49	0.00
Corrente*Qtde de pulso	1	2.0405	2.0405	2.0405	102.82	0.001
Erro Residual	3	0.0794	0.0794	0.0198		
Total	7	24.0847				

Fonte: Projeto VALE Solda - CÁTEDRA RODA TRILHO

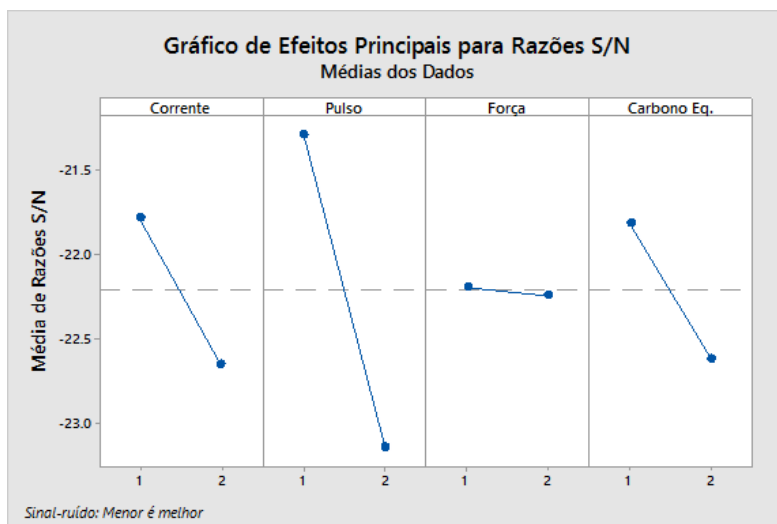
Pode-se perceber que os valores encontrados para o P-Valor foram zero para corrente e quantidade de pulso e 0.001 para a multiplicação dos resultados. Desse modo, a partir dos resultados pode-se garantir a validade dos experimentos e também das equações utilizadas. A equação abaixo apresenta a equação de regressão em unidades não codificadas.

$$C9 = 85.31 - 0.03210\text{Força} - 6.914\text{Pulso} - 0.8500\text{Corrente} + 2.233\text{CEq} + 0.002567\text{Força}\times\text{Pulso} + 0.000045\text{Força}\times\text{Corrente} + 0.1155\text{Pulso}\times\text{Corrente}$$

#### 4.2.2 Resultado para a queda de dureza

Para o estudo da queda da dureza, foi realizada uma análise dos parâmetros e seus respectivos efeitos no resultado. Dessa forma, foi gerado o gráfico que se encontra na figura 87.

Figura 87 – Efeitos principais para razões S/N para Dureza



Fonte: Projeto VALE Solda - CÁTEDRA RODA TRILHO

A figura 87 revela parâmetros - corrente, pulso, força de recalque e carbono equivalente - analisados e suas contribuições para o resultado estando no valor mínimo (1) e no valor máximo (2). Partindo do ponto que a condição utilizada para a análise também foi do tipo menor é melhor, percebe-se que a corrente, a intensidade de pulsos e o carbono equivalente apresentam uma grande contribuição positiva estando no valor mínimo. Já a força de recalque apresenta uma contribuição pequena.

Realizando os cálculos para as combinações da matriz de experimentos, tem-se os resultados obtidos na tabela 6:

Pode-se perceber que a combinação que apresentou menor relação para a razão S/N foi a combinação em que ambos os fatores se encontraram no valor mínimo, dando uma razão de -20.28.

Tabela 6 – Montagem dos experimentos para queda de dureza

Corrente	Pulso	Força	Carbono Eq	S/N
1	1	1	1	-20.28
1	1	2	2	-21.31
1	2	1	2	-23.08
1	2	2	1	-22.46
2	1	1	2	-22.24
2	1	2	1	-21.35
2	2	1	1	-23.18
2	2	2	2	-23.84

Fonte: Projeto VALE Solda - CÁTEDRA RODA TRILHO

Para validar o resultado obtido, foram realizados cálculos onde foram da variância pela razão S/N. Os valores encontram-se na tabela 7

Tabela 7 – Análise de variância pela razão S/R- Queda de dureza

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P-Valor
Corrente	1	1.50423	1.50423	1.50423	79.93	0.003
Quantidade de pulso	1	6.80823	6.80823	6.80823	361.75	0.000
Carbono Eq.	1	1.28658	1.28658	1.28658	68.36	0.004
Corrente*Qtde de pulso	1	0.03317	0.03317	0.03317	1.76	0.276
Erro Residual	3	0.05846	0.05846	0.01882		
Total	7	9.68867				

Fonte: Projeto VALE Solda - CÁTEDRA RODA TRILHO

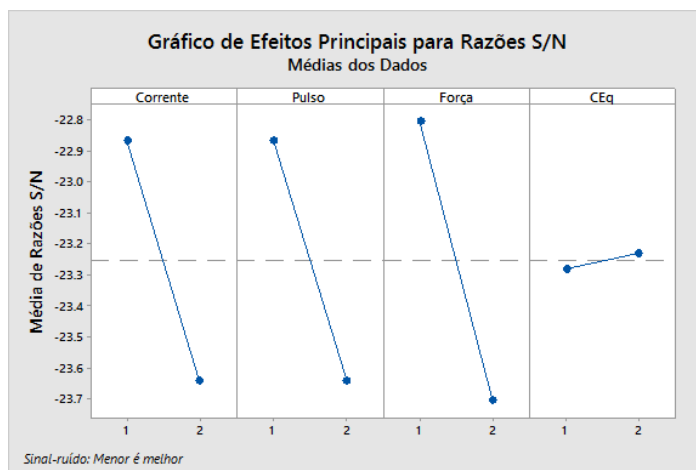
Pode-se perceber que os valores encontrados para o P-Valor foram praticamente nulos. Desse modo, a partir dos resultados pode-se garantir a validade dos experimentos e também das equações utilizadas. A equação abaixo apresenta a equação de regressão em unidades não codificadas.

$$\begin{aligned} \text{Queda de dureza} = & -10.28 - 0.009937\text{Força} + 0.5250\text{Pulso} + 0.1612\text{Corrente} + \\ & 6.094\text{CEq} + 0.000125\text{ForçaxPulso} - 0.000156\text{ForçaxCorrente} - \\ & 0.000625\text{PulsoxCorrente} \end{aligned}$$

### 4.2.3 Resultado para a largura do dente de vampiro

Para o estudo da largura do dente de vampiro, novamente foi realizada uma análise dos parâmetros e seus respectivos efeitos no resultado. Dessa forma, foi gerado o gráfico que se encontra na figura 88

Figura 88 – Efeitos principais para razões S/N para dente de vampiro



Fonte: Projeto VALE Solda - CÁTEDRA RODA TRILHO

A figura 88 revela parâmetros - corrente, pulso, força de recalque e carbono equivalente - analisados e suas contribuições para o resultado estando no valor mínimo (1) e no valor máximo (2). Nessa condição utilizada para a análise novamente foi do tipo menor é melhor.

Realizando os cálculos para as combinações da matriz de experimentos, tem-se os resultados obtidos na tabela 8:

Pode-se perceber que a combinação que apresentou menor relação para a razão S/N foi a combinação em que a corrente e o pulso se encontraram no valor mínimo, e a força e o carbono equivalente se encontram no valor máximo, dando uma razão de -21.96.

Para validar o resultado obtido, foram realizados cálculos onde foram da variância pela razão S/N. Os valores encontram-se na tabela 9.

Pode-se perceber que os valores encontrados para o P-Valor foram pratica-

Tabela 8 – Montagem dos experimentos para largura do dente de vampiro

Corrente	Pulso	Força	Carbono Eq	S/N
1	1	1	1	-23.74
1	1	2	2	-21.96
1	2	1	2	-22.16
1	2	2	1	-23.61
2	1	1	2	-22.66
2	1	2	1	-23.11
2	2	1	1	-22.66
2	2	2	2	-26.15

Fonte: Projeto VALE Solda - CÁTEDRA RODA TRILHO

Tabela 9 – Análise de variância pela razão S/R- Redução dente de vampiro

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P-Valor
Corrente	1	1.2110	1.2110	1.2110	233.43	0.042
pulso	1	1.1966	1.1955	1.1955	230.64	0.042
Rec	1	1.6257	1.6257	1.6257	313.36	0.036
Corrente*Qtde de pulso	1	1.1058	1.10578	1.10578	213.14	0.044
corrente*rec	1	2.2801	2.28010	2.28010	439.49	0.030
Erro Residual	1	0.0052	0.00519	0.00519		
Total	7	12.3415				

Fonte: Projeto VALE Solda - CÁTEDRA RODA TRILHO

mente nulos. Desse modo, a partir dos resultados pode-se garantir a validade dos experimentos e também das equações utilizadas. Deve-se ressaltar que os resultados deram abaixo de 0.05, gerando uma confiabilidade de 95% nos resultados. A equação abaixo apresenta a equação de regressão em unidades não codificadas.

$$C9 = 172.8 - 0.2418\text{Força} - 8.525\text{Pulso} - 1.467\text{Corrente} + 1.094\text{CEq} + 0.01112\text{ForçaxPulso} + 0.002031\text{ForçaxCorrente} + 0.03062\text{PulsoxCorrente}$$

## 5 CONCLUSÕES

Pelo apresentado na pesquisa de um modo geral pode-se concluir que:

- Todos os quesitos programados para a execução da pesquisa foram realizados dentro do período proposto;
- Com relação ao ensaio de dureza, observou-se que os resultados obtidos para o perfil de dureza são mais satisfatórios quando se garante que a amostra a ser analisada tenha faces paralelas, superfícies lisas e um tamanho adequado para garantir a acuidade da medição.
- Conclui-se que o material analisado não se encontra dentro do que é estipulado pela norma AREMA visto que esta estipula que nenhuma solda deve ter valores de dureza superiores a 43HRC. Nos resultados foram obtidas diversas medidas que ultrapassaram esse valor nos dois tipos de trilhos, principalmente no do tipo UHC. Os demais fatores exigidos pela norma foram atendidos.
- Sobre os ensaios macrográficos, pode-se concluir que estes foram executados com êxito, visto que as regiões foram reveladas de forma satisfatória atendendo aos objetivos de comparação com os ensaios de dureza.
- Sobre a comparação dos ensaios macrográficos com os ensaios de dureza, percebe-se que estes foram coerentes, visto que foi possível identificar na região central da solda uma ligera queda de dureza, influenciada pela descarbonetação da região. Observou-se também dois pontos equidistantes da linha central da solda que apresentaram instabilidade nos valores da dureza, com queda considerável na resistência. Esses pontos são conhecidos como "dentes de vampiro" e coincidem com a região da ZTA onde ocorre esferoidização.

Pela análise estatística dos experimentos pode-se concluir que:

- Para a redução do tamanho da ZTA os fatores que mais contribuem são a quantidade de pulso e a corrente, sendo que a força e o Carbono equivalente tem pouca influência. Tanto a corrente quanto a quantidade de pulso influenciam positivamente estando no mínimo.

- Para a queda de dureza, observa-se que os fatores que mais contribuem para o resultado são a quantidade de pulso, a corrente e o carbono equivalente, sendo que a força apresenta pouca influência. Nesse caso, conclui-se que a corrente, a quantidade de pulso e o carbono equivalente contribuem positivamente estando no nível inferior.
- Para a redução do dente de vampiro, observa-se que a força, a corrente, e a quantidade de pulso apresentam maior influência no resultado, sendo que o carbono equivalente é pouco relevante. Desse modo, pode-se concluir que a corrente, a quantidade de pulso e a força contribuem positivamente estando no nível inferior.

Dessa forma, depreende-se que para melhorar as propriedades metalúrgicas e mecânicas da região afetada pelo calor da solda, deve-se trabalhar de um modo geral com a corrente e a quantidade de pulsos no ponto inferior.

### 5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

- Realização da caracterização microestrutural da ZTA das soldas por centelhamento;
- Avaliação de soldas realizadas com os parâmetros estipulados neste trabalho, identificando se os resultados encontrados se mantêm e se não há formação de componentes microestruturais como martensita.



## REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, S ET AL Avaliação da microestrutura e propriedades mecânicas de metais de solda obtidos por processo de soldagem manual e automatizado utilizado na soldagem de aço API 5L X80. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2011.
- ALVES, L.H.D Utilização do método de Taguchi na modelagem e otimização de vazios relacionados à solidificação em processo de fundição de aço ABNT 1030. Tese de Doutorado. Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá. São Paulo. 2009.
- AMERICAN RAILWAY ENGINEERING AND MAINTENANCE-OF-WAY ASSOCIATION Manual for Railway Engineering - Specification for Fabrication of Continuous Welded Rail. AREMA, v.1, cap. 4, 1999, 138 p.
- AMERICAN WELDING SOCIETY Welding Handbook. AWS, vol.3, cap. 3, 9. Ed.,2007, 34 p.
- ANTF - Agência Nacionade Transportes Ferroviários O setor ferroviário de carga brasileiro.Disponível em: <[www.antf.org.br/informacoes-gerais](http://www.antf.org.br/informacoes-gerais)> Acesso:15/04/2018
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 7590: trilho “Vignole”. Rio de Janeiro. 1991
- ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROADS Manual of standars and recommended practices sections. Whashington D.C. 2007
- BOUZAN, B.M.Efeito das variáveis de processo na qualidade de soldas aluminotérmicas em trilhos ferroviários.Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2016.
- CALLISTER, W. D, Jr.Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. Livros Técnicos e Científicos, 7. Ed 2002, p. 188
- COLPAERT, H.Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. Editora Blucher, São Paulo Brasil, 1974.
- COTTRELL, A. H.Introdução à metalurgia. Edward Arnold (Publishers) Ltd., 2ª Edição. Londres, 1975.
- DIETER, G. E. Metalurgia Mecânica. Guanabara Dois (1981), p.102-105; 144-147.

- DOMINGUES, N. Soldabilidade por Centelhamento do Aço Dual Phase 780. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia UFMG. 2013.
- FILHO, O. Influência da corrente elétrica, da força de recalque e do tratamento térmico de revenimento na soldagem topo a topo por centelhamento de serras de fita bimetálica. 2007. 45f. Dissertação de Mestrado (Tecnologia em Metalurgia) - USP, São Paulo, 2007.
- FUJII, M. ET AL. Rail Flash-Butt Welding Technology. JFE TECHNICAL REPORT, n. 20, p.159-163, 2015.
- GONÇALVES, D. C. Planejamento e procedimento experimental de soldagem de trilho ferroviário por centelhamento. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2017.
- MANSOURI, H.; MONSHI, A. Microstructure and residual stress variations in weld zone of flash-butt welded railroads. Science and Technology of Welding and Joining, v.9, n.3, p.237-245, 2004.
- MARQUES, P. et al. Soldagem: Fundamentos e Tecnologia. 3ª Edição, Editora UFMF, Belo Horizonte, 2011, 363p.
- MONTGOMERY, D.C. Design and Analysis of experiments. 7th Edition. ed. [S.I]: John Wiley and Sons, Inc, 2004.
- NISHIKAWA, L.P. Soldagem de trilhos ferroviários perlíticos: Origem das microestruturas. Dissertação de Mestrado - USP, São Paulo, 2018.
- PORCARO, R ET. AL. Microestrutura e propriedades mecânicas de um aço para trilhos ferroviários soldado por centelhamento. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 2016.
- ROLDO, L. Análise de Tensões Residuais em Trilhos Ferroviários. Dissertação, PPGEM, UFRGS, 1998.
- ROSA, J. C. S. Avaliação de Solda Aluminotérmica em ângulo. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008.
- 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.
- SILVA, C.M. Perfil de dureza e composição química da solda e regiões afetadas pela solda aluminotérmica de trilhos empregados por uma empresa mineradora. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2017.

WAINER, E. Soldagem. Associação Brasileira de Metais. 19ª Edição. São Paulo. 1983.

ZHAO, X.; FAN, Y; LIU, Y; WANG, H; DONG, P. Evaluation of fatigue fracture mechanism in a flash butt welding joint of a U75V type steel for railroad applications. . *Elsevier - Engineering Failure Analysis*, 55, p. 26-38, 2015.

**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, 06 de Novembro de 2018.

*Danielle Domingos Ribeiro*

Danielle Domingos Ribeiro – Discente  
201271005: – CPF:096.080.506-00

<sup>1</sup>LEI Nº 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.