

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

DAVI DE CARVALHO GONÇALVES

**PLANEJAMENTO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL DE SOLDAGEM DE
TRILHO FERROVIÁRIO POR CENTELHAMENTO**

JUIZ DE FORA

2017

DAVI DE CARVALHO GONÇALVES

**PLANEJAMENTO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL DE SOLDAGEM DE
TRILHO FERROVIÁRIO 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 Engenheiro de Mecânico.

Orientador: Doutor em Engenharia Mecânica. Moisés Luiz Lagares Júnior

Co-Orientador: Doutor em Engenharia Mecânica. Luiz Henrique Dias Alves

JUIZ DE FORA

2017

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

Gonçalves, Davi de Carvalho.

Planejamento E Procedimento Experimental De Soldagem De Trilho Ferroviário Por Centelhamento / Davi de Carvalho Gonçalves. - 2017.

97 f. : il.

Orientador: Moisés Luiz Lagares Júnior

Coorientador: Luiz Henrique Dias Alves

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2017.

1. Soldagem por Centelhamento. 2. Planejamento de Experimento. 3. Método de Taguchi. I. Lagares Júnior, Moisés Luiz, orient. II. Alves, Luiz Henrique Dias, coorient. III. Título.

DAVI DE CARVALHO GONÇALVES

**PLANEJAMENTO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL DE SOLDAGEM DE
TRILHO FERROVIÁRIO 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 Engenheiro de
Mecânico.

Aprovado em 19 de junho de 2017.

BANCA EXAMINADORA

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

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

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

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Marilda e Flávio, pelo apoio concedido durante a graduação e por sempre desejarem o melhor para mim. À minha companheira Marcela, presente ao meu lado desde o primeiro dia do primeiro período. Ao meu irmão André pela convivência e às minhas avós por tornarem os finais de semana em casa mais significativos. Sem o apoio e presença de vocês esta trajetória não seria possível. Presto meus agradecimentos também aos professores Moisés Lagares, Luiz Alves e Roberto Malheiros, não só pela orientação durante este trabalho, mas também por me proporcionarem a oportunidade de participar de um grande projeto de pesquisa que sem dúvida complementou e muito a minha formação profissional. Agradeço também à Universidade Federal de Juiz de Fora, seu corpo docente e funcionários que fizeram parte da minha graduação pelas oportunidades de estudo, ensinamentos e momentos que contribuíram com minha formação acadêmica. Meus sinceros agradecimentos também a todas as pessoas que colaboraram com seu conhecimento e solicitude durante a realização do experimento.

“Eu amei, eu ri e chorei
Eu tive minhas falhas, minha hora de perder
E agora que as lágrimas cessaram
Eu acho isso tudo tão divertido
E pensar que eu fiz tudo aquilo
E eu posso dizer sem modéstia
Oh, não, não eu
Eu fiz do meu jeito”

Trecho de “*My Way*”, Paul Anka

RESUMO

Este estudo foi realizado com o apoio da empresa Vale S.A., que busca um melhor entendimento e aperfeiçoamento dos seus processos de soldagem a fim de reduzir falhas e fraturas em trilhos ferroviários soldados por centelhamento e por aluminotermia. O objetivo deste trabalho é oferecer aos integrantes do projeto Cátedra Roda-Trilho, sejam alunos ou professores, um manual sobre o processo de experimentação realizado para estudo da soldagem de trilhos ferroviários por centelhamento. Servindo, assim, como material de consulta durante as etapas posteriores do projeto acerca do processo de soldagem por centelhamento, suas variáveis, a influência das variáveis na microestrutura e propriedades mecânicas do trilho e também do tratamento estatístico que será utilizado, desde os fundamentos do método de Taguchi até as etapas para se proceder análise e interpretação dos dados obtidos. A metodologia se baseará na exposição de informações e conclusões encontrados na literatura, fazendo uso de gravuras, gráficos e tabelas para facilitar o entendimento e consolidar o conhecimento do leitor sobre soldagem por centelhamento, planejamento de experimentos e método de Taguchi. Com os resultados obtidos da realização de metade do experimento, serão apresentadas algumas conclusões preliminares, baseadas apenas na interpretação desses dados a partir das informações reunidas neste trabalho. São apresentadas sugestões de trabalhos futuros, que podem estender a duração do projeto Cátedra Roda-Trilho, mas refletirão em um domínio completo do procedimento de soldagem por centelhamento utilizado pela empresa.

Palavras-chave: Soldagem por Centelhamento, Planejamento de Experimento, Método de Taguchi.

ABSTRACT

This study was carried out with the support of the company Vale S.A., which seeks a better understanding and improvement of its welding processes in order to reduce failures and fractures in railroad tracks welded by flash butt welding and by aluminothermic welding. The objective of this work is to offer to the members of the Cátedra Roda-Trilho project, whether students or teachers, a manual about the experimentation process carried out to study the rail tracks welded by the flash butt welding process. Furthermore, during the later stages of the project, this work can be used as a reference material about the flash butt welding process, its factors, the influence of each factor on the microstructure and mechanical properties of the rail, as well about the statistical treatment that will be used to analyse and interpret the obtained data. The methodology will be based on the exposition of knowledge and conclusions found in books and papers, making use of engravings, graphs and tables to a better understanding of each stage of the flash butt welding process, the design of experiments and the Taguchi method. With the results obtained from the first part of the experiment, some preliminary conclusions will be presented, based only on the interpretation of the first obtained data from the knowledge presented in the following chapters of this work. Suggestions for future work will be presented, which may extend the duration of the Cátedra Roda-Trilho project, but will result in a complete domain of the rail welding procedure used by the company.

Keywords: Flash Butt Welding, Design of Experiments, Taguchi Method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Princípio da soldagem por centelhamento.	21
Figura 2: Esquema do centelhamento.	22
Figura 3: Campo de tensões no trilho antes da soldagem por centelhamento.	24
Figura 4: Campo de tensões residuais no trilho após da soldagem por centelhamento.	24
Figura 5: Microestrutura da zona de solda.	24
Figura 6: Microestrutura da região de crescimento de grãos; a) No centro da região soldada, b) Microestrutura da região 1 a 6 mm da linha central da região soldada, c) Microestrutura da região 1 a 9 mm da linha central da região soldada.	25
Figura 7: a) Microestrutura da região 2. b) Microestrutura da interface entre as regiões 1 e 2 da região soldada. Fonte: Adaptado de MANSOURI; MONSHI, 2004.	26
Figura 8: Microestrutura da região 3.	27
Figura 9: Maior ampliação da microestrutura da região parcialmente transformada.	27
Figura 10: Microestrutura do metal base.	27
Figura 11: a) Modelo de ondas com uma diferença de 20% entre as correntes durante o centelhamento. b) Modelo de ondas mostrando uma conexão suave entre as correntes durante a fase de centelhamento.	31
Figura 12: Micrografia de parte da linha de solda relativa ao modelo de ondas da Figura 11.a, é possível observar a presença de óxidos, que não foram completamente expulsos pelo recalque.	32
Figura 13: Micrografia de parte da linha de solda relativa ao modelo de ondas da Figura 11.b.	32
Figura 14: Aspecto microscópico de uma junta com “encavalamento”, após raspagem e laminação a frio.	33
Figura 15: Superfície de fratura devido a um <i>flat spot</i>	34
Figura 16: Superfície de fratura do <i>flat spot</i> (esquerda) e do metal base (direita).	35
Figura 17: Vista detalhada da superfície de fratura do <i>flat spot</i> mostrando as partículas de escória maiores (em branco) e menores (cor escura).	35
Figura 18: a) e b) Dispersões típicas das inclusões de óxidos.	36
Figura 19: Composição química dos elementos.	37
Figura 20: a) Zona afetada pelo calor que apresentou amaciamento, aço ASTM A529-Classe 50. b) Zona afetada pelo calor sem amaciamento, aço ASTM A529-Classe 50.	38
Figura 21: Superfície de fratura.	40

Figura 22: Regiões de nucleação e crescimento de trinca.	40
Figura 23: Presença de degrau na rebarba de cordão de solda, ponto concentrador de tensão.	41
Figura 24: Regiões com fratura frágil (marcas de sargento), na alma, boleto e patim do trilho.	41
Figura 25: Micrografia do metal base.	42
Figura 26: Microestrutura da zona afetada pelo calor.	42
Figura 27: Microestrutura do cordão de solda.	42
Figura 28: Microestrutura da linha central.	43
Figura 29: Dados da dureza Brinell.	43
Figura 30: a) Crescimento da trinca por fadiga; b) Área de transição; c) Área de fratura frágil.	44
Figura 31: Superfície da junta soldada que falhou por fadiga.	45
Figura 32: Microestrutura de região #2, mostrando uma estrutura de solidificação anormal, composta de ferro. Fonte: X. YU ET AL, 2015.	45
Figura 33: Trinca em um trilho hipereutetóide.	46
Figura 34: Ledeburita e a rede de cementita responsável por diminuir a dureza local.	46
Figura 35: Composição química do aço U75V.	47
Figura 36: Microestrutura do aço U75V.	47
Figura 37: Parâmetros dos processos de soldagem em um aço U75V.	47
Figura 38: a) Processo de Solda I, com amaciamento da ZAC em um aço U75V. b) Processo de Solda II, sem amaciamento da ZAC em um aço U75V.	48
Figura 39: Microestrutura processo de solda I.	49
Figura 40: Microestrutura processo de solda II.	50
Figura 41: Curvas S-N das juntas soldadas.	50
Figura 42: Superfície oxidada.	51
Figura 43: Superfície de fratura da região oxidada.	51
Figura 44: Origem da trinca devido à oxidação.	51
Figura 45: Crescimento grosseiro de grãos na interface de solda.	52
Figura 46: a) Região de nucleação de trinca nas juntas soldadas pelo processo (I). b) Ampliação da região de nucleação da trinca.	52
Figura 47: Região de propagação da trinca.	53
Figura 48: Região de nucleação de trinca nas juntas soldadas pelo processo (II).	53
Figura 49: Exemplo de arranjo ortogonal.	55
Figura 50: Exemplo de um Planejamento de Fatores do Experimento.	55

Figura 51: Efeito dos fatores de controle.	56
Figura 52: Equipamento de corte de trilho por abrasão.....	59
Figura 53: Gráfico Linear para o arranjo ortogonal L8	66
Figura 54: Arranjo ortogonal L8 do experimento.	67
Figura 55: Efeitos dos fatores representados graficamente.	70
Figura 56: Gráfico de interação entre 2 fatores.	71
Figura 57: Procedimento de corte de trilhos por abrasão.	77
Figura 58: Amostras do trilho Tipo I separadas.	77
Figura 59: Amostra de trilho que será submetido ao ensaio de dureza.	79
Figura 60: Corte longitudinal da amostra de trilho.....	79
Figura 61: Montagem do ensaio de flexão.	80
Figura 62: Gráfico de força.	81
Figura 63: Gráfico de corrente elétrica.....	82
Figura 64: Gráfico de deslocamento.....	82
Figura 65: Resultados dos cursos de recalque.....	84
Figura 66: Resultados dos cursos de centelhamento + recalque.	85
Figura 67: Resultados das velocidades de recalque.....	86
Figura 68: Resultados dos tempos totais.	86
Figura 69: Resultados das correntes de centelhamento (Valor RMS).....	87
Figura 70: Resultados dos tempos de centelhamento.....	88
Figura 71: Resultados dos tempos de corrente de recalque.....	88
Figura 72: Resultados da corrente de recalque (Valor RMS).....	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Exemplo de arranjo ortogonal equilibrado.	61
Tabela 2: Segundo exemplo de arranjo ortogonal equilibrado.....	62
Tabela 3: Níveis das variáveis.	64
Tabela 4: Tabela triangular para o arranjo ortogonal L8	66
Tabela 5: Planejamento de Experimento Para o Trilho TIPO I.....	69
Tabela 6: Planejamento de Experimentos Para o Trilho TIPO II.....	69
Tabela 7: Tabela da interação representada na Figura 56.	71
Tabela 8: Exemplo de tabela ANOVA.	72
Tabela 9: Exemplo de tabela com os valores da razão sinal-ruído (SNR).	73
Tabela 10: Resultados das medições dos tempos de resfriamento das soldas do trilho Tipo I.	76
Tabela 11: Resultados das soldagens do trilho Tipo I.	83

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO.....	15
1.2. JUSTIFICATIVA	16
1.3. ESCOPO DO TRABALHO.....	17
1.4. OBJETIVOS	18
1.5. DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA.....	18
1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1. SOLDAGEM DE TRILHOS POR CENTELHAMENTO.....	21
2.1.1. PRÉ-AQUECIMENTO	22
2.1.2. CENTELHAMENTO	22
2.1.3. RECALQUE.....	23
2.1.4. VARIÁVEIS DE CENTELHAMENTO	23
2.1.5. VARIÁVEIS DE RECALQUE	23
2.2. MICROESTRUTURA E CAMPO DE TENSÕES DA ZONA SOLDADA	23
2.2.1. REGIÃO 1 (REGIÃO DE CRESCIMENTO DE GRÃO)	25
2.2.2. REGIÃO 2 (REGIÃO DE RECRISTALIZAÇÃO)	25
2.2.3. REGIÃO 3 (REGIÃO PARCIALMENTE TRANSFORMADA)	26
2.3. VARIÁVEIS DO PROCESSO.....	28
2.3.1. TEMPO DE CORRENTE DE RECALQUE	28
2.3.2. FORÇA DE RECALQUE	28
2.3.3. VELOCIDADE DE RECALQUE.....	29
2.3.4. DISTÂNCIA DE RECALQUE.....	29
2.3.5. TRATAMENTO TÉRMICO.....	29
2.3.6. TENSÃO DE CENTELHAMENTO.....	30
2.3.7. MODELOS DE CENTELHAMENTO	30
2.3.8. EXTENSÃO INICIAL	31
2.3.9. CORRENTE DE CENTELHAMENTO	31
2.4. DEFEITOS E DESCONTINUIDADES	32
2.5. DESCONTINUIDADES MECÂNICAS.....	33
2.6. DESCONTINUIDADES METALÚRGICAS	34
2.7. FRATURA E FALHA POR FADIGA	39
2.7.1. CARACTERÍSTICAS DA FALHA POR FADIGA	40
2.8. CAUSAS DA FALHA POR FADIGA.....	44
2.8.1. METAL FUNDIDO NA SOLDA	44
2.8.2. FORMAÇÃO DE LEDEBURITA	46
2.8.3. FRATURA TRANSGRANULAR, GRAFITIZAÇÃO E CORROSÃO	47

2.9. O MÉTODO DE TAGUCHI	54
3. MATERIAIS.....	59
4. O PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTO	60
4.1. ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DAS RESPOSTAS DO EXPERIMENTO	70
5. REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO	76
5.1. RESPOSTAS DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	78
6. RESULTADOS PRELIMINARES E DISCUSSÃO	81
6.1. RESULTADOS PRELIMINARES	81
6.2. EFEITO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM NA PRODUTIVIDADE DO PROCESSO E ADEQUAÇÃO À NORMA AREMA (1999).....	84
6.3. ATRIBUIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE QUALIDADE ÀS RESPOSTAS DO EXPERIMENTO	89
7. CONCLUSÃO	92
8. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	93
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94
ANEXO A – TERMO DE AUTENTICIDADE	97

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO

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 rodatrielho, que tende a falhar na região soldada. (X. ZHAO ET AL, 2015)

Segundo Guangwen (2010), a maioria dos danos ao veículo e componentes da via são causados por elevadas forças de impacto. Irregularidades nas superfícies de rodas e trilhos são as principais fontes causadoras de tais forças de impacto. Trilhos unidos por parafusamento são um exemplo de irregularidade (não continuidade) na superfície do trilho, sendo progressivamente substituídos por uniões soldadas. A união contínua de trilhos apresenta a vantagem de oferecer uma superfície contínua de rolamento, minimizando os níveis de impacto do tribossistema roda/trilho nas juntas soldadas e prolongando a vida útil tanto das rodas como dos trilhos e demais componentes da via.

Entretanto, de acordo com Fujii (2015), a soldagem de trilhos ferroviários não é um processo simples, pois os trilhos têm um perfil único e uma grande seção transversal, caracterizando-se também por um alto teor de carbono, pois a resistência ao desgaste e a resistência a danos são prioridades nesta aplicação. Quatro métodos são usados para unir os trilhos, a saber: soldagem por centelhamento, soldagem por pressão de gás, soldagem aluminotérmica e soldagem de arco fechado. Destes, a soldagem por centelhamento possui a maior eficiência de soldagem (tempo de soldagem: aproximadamente 1,5-4 min) entre os métodos de soldagem de trilhos utilizados no mundo, o que garante uma alta produtividade e é também um excelente método dos pontos de vista de estabilidade e controle de qualidade.

Os diversos parâmetros utilizados durante esse processo de soldagem definirão a qualidade da junta, já que a região soldada caracteriza-se por uma variação nas características do material (resistência, dureza e microestrutura), além de poder conter defeitos internos e elevadas tensões residuais. Contudo, a configuração desses parâmetros, que serão abordados no decorrer deste trabalho, variam conforme a composição química dos trilhos e a máquina de soldagem por centelhamento utilizada e podem não estar ajustados para uma configuração ótima. Em face da necessidade de geração de conhecimento, formação de pessoas e melhor entendimento do processo de união de trilhos empregado pela referida empresa, desenvolveu-

se o projeto Cátedra Roda-Trilho. Tal projeto tem por objetivo estudar os processos de soldagem de trilhos e fazer a caracterização completa das juntas soldadas para os diversos tipos de trilhos empregados pela empresa, além de propor um modelo matemático para prever os níveis que as principais variáveis devem assumir para se obter as propriedades desejadas.

O projeto, que ainda conta com participação da Universidade de São Paulo, vem sendo desenvolvido nos laboratórios da UFJF e nas ferrovias e estaleiros de solda da empresa, com duração de 30 meses e 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, 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.

Uma avaliação realizada na visita à Estrada de Ferro Carajás sobre as causas de falhas em trilhos, mostrou a forte concentração destas falhas nas áreas de solda ou áreas termicamente afetadas pela solda. Quando se projeta o futuro da ferrovia a tendência é de aumento das cargas por eixo bem como a frequência de trânsito, tornando a região de solda criticamente importante no desempenho operacional da ferrovia. Além disso existe uma escassez na literatura sobre o processo de soldagem por centelhamento e a influência dos níveis de cada variável na qualidade final da solda, servindo de estímulo para realização deste trabalho.

1.2. JUSTIFICATIVA

Focado na primeira e segunda etapas descritas no item anterior, este trabalho se justifica como parte das tarefas a serem executadas dentro do projeto Cátedra Roda-Trilho, especificamente, a construção e execução do planejamento experimental. Muitos aspectos do desenvolvimento de projetos e otimização de processos requerem experimentos eficientes e precisos, que, quando bem conduzidos, resultam em economia e maior lucratividade. O experimento é um procedimento planejado com base em uma hipótese, que visa provocar fenômenos a partir de condições estabelecidas, observar e analisar os seus efeitos. Com o

planejamento experimental, busca-se a obtenção de dados confiáveis que confirmem ou não as hipóteses formuladas, relacionadas aos objetivos específicos da pesquisa.

Esta etapa é de grande relevância, pois se realizada de forma precipitada os resultados do experimento podem não ser úteis. Portanto, durante os testes, o pesquisador deve acompanhar e conduzir o experimento cuidadosamente para assegurar o cumprimento do planejamento de experimentos e garantindo que a mensuração e registro dos valores observados sejam precisos.

Dito isso, o presente trabalho se propõe a reunir e detalhar todas as informações e fundamentação teórica sobre a soldagem por centelhamento que serviram como base para a elaboração do planejamento de experimentos, além de descrever toda a etapa de coleta de dados e os resultados preliminares que podem ser obtidos pela análise de tais dados.

1.3. ESCOPO DO TRABALHO

Este trabalho trata do planejamento experimental para soldagem de trilhos ferroviários por centelhamento e as conclusões que se podem extrair com base apenas na análise de certos parâmetros envolvidos em tal processo, a saber: distância, tempo, força, velocidade e corrente elétrica. Optou-se pela realização de um experimento fatorial fracionado devido ao elevado número de recursos materiais e financeiros demandados pelo fatorial completo. A abordagem de Taguchi foi escolhida para a construção do planejamento experimental. O experimento foi realizado em São Luís (MA), local onde se localiza o estaleiro de soldas da empresa.

Após a soldagem de todos os trilhos, as amostras devem ser separadas e enviadas à cidade de Juiz de Fora, onde terão suas propriedades mecânicas e metalúrgicas completamente analisadas. Entretanto, existe uma discrepância entre o prazo de conclusão do projeto Cátedra Roda-Trilho e o prazo para a realização de um trabalho de conclusão de curso. Dessa forma, o tempo se mostra como a principal limitação deste trabalho. O volume de unidades (16 amostras de trilho medindo 200 mm cada) e a distância entre os locais de realização dos experimentos e de análise das amostras tornam o processo de envio das juntas soldadas complexo.

Portanto, os corpos de testes ainda não foram enviados à Universidade Federal de Juiz de Fora, impedindo a concretização dos objetivos iniciais deste trabalho, a saber: análise das propriedades mecânicas, composição micro estrutural e identificação da zona afetada pelo calor das juntas.

A Revisão Bibliográfica foi elaborada visando o estudo desses temas, entretanto ela não foi alterada mesmo com a impossibilidade da análise das amostras de trilho, pois esta pesquisa

será continuada por outros alunos, de forma que todas as informações e fundamentos reunidos na revisão poderão ser utilizados para auxiliar a realização dos futuros trabalhos de conclusão de curso relativos ao projeto Cátedra Roda-Trilho. Por essa razão, a revisão Bibliográfica se caracteriza por ser extensa e possuir conteúdos além do necessário para o embasamento teórico e compreensão dos resultados apresentados ao fim deste trabalho

1.4. OBJETIVOS

Objetivo Geral: Descrever todo o processo de experimentação realizado até o presente momento do projeto Cátedra Roda-Trilho, desde a abordagem do conteúdo científico utilizado para a elaboração dos objetivos, variáveis de controle, variáveis de resposta e o método de tratamento de dados do planejamento de experimento até a realização das experiências.

Objetivos Específicos

- Estudar o procedimento de soldagem por centelhamento;
- Apresentar os efeitos das variáveis da soldagem por centelhamento na microestrutura da junta;
- Relacionar as variáveis do processo com a ocorrência de defeitos internos;
- Relatar todo o processo de experimentos realizados no estaleiro de soldas da Estrada de Ferro Carajás;
- Apresentar alguns resultados preliminares a partir da observação dos dados gerados por cada soldagem;
- Servir de base de conhecimento e consulta para futuros alunos integrantes do projeto Cátedra Roda-Trilho.

1.5. DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA

Este trabalho pode ser caracterizado, quanto a sua natureza, de origem aplicada, visto que os resultados apresentados poderão ter aplicação prática no que diz respeito ao processo de soldagem de trilhos por centelhamento da empresa. 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. Em relação à abordagem, a pesquisa é quantitativa, pois seus resultados podem ser quantificados, ou seja, faz-se o uso da linguagem matemática para análise de dados, que

foram coletados pelo próprio *software* da máquina de soldagem mediante condições de controle, portanto tratam-se de valores precisos. (MIGUEL, 2010).

Em relação ao método, esta é uma pesquisa experimental, pois baseia-se na determinação de um objeto de estudo e na seleção de variáveis capazes de influenciá-lo, além da definição das formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto. (GIL, 1991).

Essa pesquisa se inicia pela construção da revisão bibliográfica, onde busca-se consolidar o conhecimento sobre a soldagem por centelhamento e o planejamento experimental. A seguir detalha-se todo o planejamento de experimentos, mostrando que o mesmo foi construído obedecendo-se a todas as recomendações e exigências necessárias para a obtenção de dados estatisticamente válidos. Por fim, procede-se a análise dos parâmetros de soldagem contidos nos gráficos gerados pelo *software* da máquina de solda.

1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo 1 é realizada uma introdução sobre a soldagem por centelhamento e o projeto Cátedra Roda-Trilho, abordando a importância deste projeto e da correta execução de um planejamento de experimentos. Também são definidos o escopo, a metodologia, os objetivos gerais e os objetivos específicos deste trabalho.

O capítulo 2 se concentra em discutir detalhadamente o processo de soldagem por centelhamento e todas as suas variáveis. Apresenta também um estudo sobre os tipos de defeitos encontrados em juntas soldadas por este tipo de soldagem bem como sua relação com as variáveis do processo. O objetivo deste capítulo é fornecer informações sobre os efeitos que as variáveis podem apresentar sobre a microestrutura e sobre a ocorrência de defeitos internos.

No capítulo 3 os materiais e equipamentos utilizados no experimento são brevemente descritos e no capítulo 4 toda a fase de planejamento do experimento será detalhada, além de explanar sobre o tratamento de dados que será aplicado aos resultados obtidos na fase de experimentação. O objetivo deste capítulo é dissertar acerca da abordagem estatística que deverá ser seguida nas próximas etapas deste projeto de pesquisa.

O capítulo 5 trata da realização do experimento ao passo que o capítulo 6 apresenta alguns resultados preliminares, de caráter qualitativo apenas, que se baseiam no conhecimento reunido na revisão da literatura no capítulo 2 e na avaliação dos relatórios das soldas gerados

pelo software da máquina de soldagem e inicia a discussão acerca das características de qualidade que serão atribuídas às variáveis de resposta.

No capítulo 7 encontra-se a conclusão deste trabalho, contendo alguns resultados importantes apesar da escassez de dados. Por fim, no capítulo 8 são apresentadas sugestões de trabalhos futuros, desde a continuação imediata deste Trabalho de Conclusão de Curso até estudos sobre temas que foram suprimidos do escopo do projeto Cátedra Roda-Trilho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. SOLDAGEM DE TRILHOS POR CENTELHAMENTO

Ainda se tem pouco conhecimento sobre as influências das variáveis do processo na qualidade final da solda. O presente trabalho concentra-se na área de estudo de trilhos e ferrovias, tendo por objetivo resumir publicações onde foram realizados estudos e experimentos em que foram variados determinados parâmetros e analisadas as respectivas influências desses parâmetros sobre a área soldada do trilho.

A soldagem por centelhamento é um processo de soldagem por resistência elétrica em que a união das peças depende de dois fatores: (*Welding Handbook*, 2007)

- Calor gerado a partir da resistência à passagem de corrente elétrica;
- Pressão aplicada na área de contato das peças a serem soldadas.

Nas peças a serem soldadas são fixados eletrodos, que estão conectados ao circuito secundário de um transformador. (FUJII ET AL, 2015)

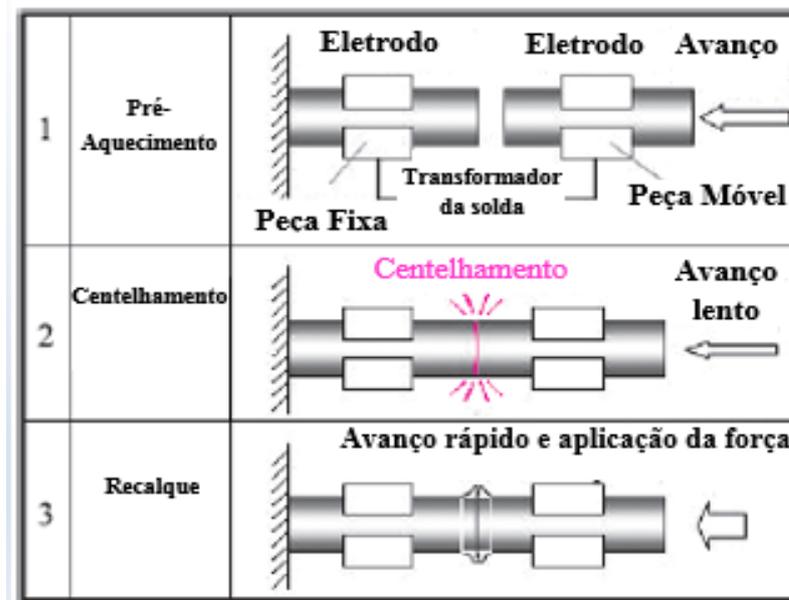


Figura 1: Princípio da soldagem por centelhamento.

Fonte: Adaptado de FUJII ET AL, 2015.

Basicamente a soldagem por centelhamento é dividida em três etapas: pré-aquecimento, centelhamento e recalque. (*Welding Handbook*, 2007)

2.1.1. PRÉ-AQUECIMENTO

No pré-aquecimento, as superfícies a unir são aproximadas e levemente pressionadas, permitindo-se a passagem de corrente elétrica e aquecendo as superfícies por efeito joule. A seguir as peças são afastadas e este ciclo é repetido até que as suas extremidades estejam aquecidas o suficiente para dar início ao centelhamento. 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. Além disso é possível soldar materiais de maior resistência mecânica e superfícies de maior seção transversal pois, com o amaciamento prévio das peças, menor força pode ser necessária para realizar o recalque. Em peças com pequena seção transversal não é comum a utilização do pré-aquecimento. (DOMINGUES, 2013; GOMES FILHO, 2007)

2.1.2. CENTELHAMENTO

Uma voltagem é aplicada entre as peças (uma permanece fixa e a outra pode se mover) e em seguida elas são aproximadas. As superfícies a serem soldadas de cada peça são irregulares e formam discretos pontos de contato, pelos quais flui uma grande densidade de corrente elétrica. A resistência à passagem de corrente elétrica provoca o efeito joule, que é o responsável pela geração de calor na região de solda. Essa resistência elétrica é a soma das resistências entre os eletrodos e as peças, entre as duas peças a serem unidas e entre as superfícies de contato. (DOMINGUES,2013)

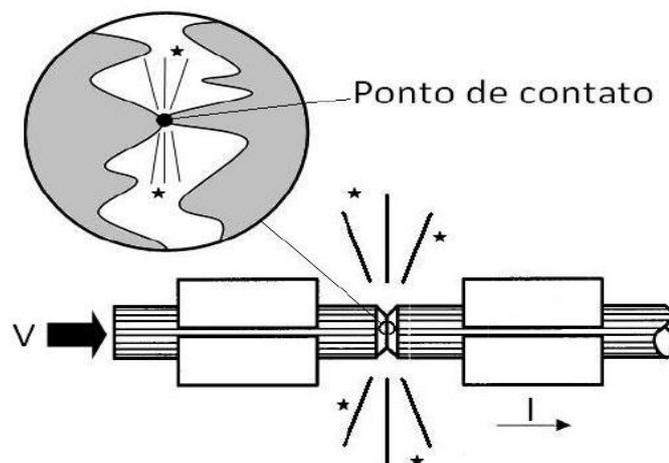


Figura 2: Esquema do centelhamento.
Fonte: DOMINGUES, 2013.

2.1.3. RECALQUE

Após a obtenção de um suficiente gradiente de temperatura nas superfícies das extremidades a serem unidas a peça móvel é pressionada contra a fixa. Esta pressão deve ser suficiente para expelir o metal líquido (contendo óxidos e impurezas) da interface entre as peças, garantindo um contato metal-metal. Dessa forma ocorrem deformações plásticas nas superfícies de contato e nas áreas adjacentes. Existem diversas variáveis na soldagem por centelhamento e pode-se dividi-las em dois grupos: (GOMES FILHO, 2007)

2.1.4. VARIÁVEIS DE CENTELHAMENTO

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

2.1.5. VARIÁVEIS DE RECALQUE

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

2.2. MICROESTRUTURA E CAMPO DE TENSÕES DA ZONA SOLDADA

Segundo Hinteregger (1990), citado por Mansouri e Monshi (2004), depois da laminação a quente, os trilhos iniciam seu resfriamento. Diferentes taxas de resfriamento em diferentes partes da seção transversal resultam em uma distorção ou "empenamento" do trilho ao longo de seu comprimento, com o conseqüente surgimento de tensões residuais. Além disso, ao final desse processo de resfriamento com diferentes taxas em diferentes locais, tensões de compressão são desenvolvidas no boleto e na alma, ao passo que tensões de tração são desenvolvidas no patim.

Para eliminar distorções e empenamentos dos trilhos utiliza-se um outro processo semelhante à laminação a frio, no qual a deformação plástica é a responsável por provocar o alinhamento do trilho. Essa deformação plástica provoca uma nova distribuição de forças na estrutura do trilho com o conseqüente surgimento de tensões residuais. De acordo com Schleinzer e Fischer (2000), citado por Mansouri e Monshi (2004), após o alinhamento o campo de tensões no trilho é: compressão na alma e tração no boleto e patim.

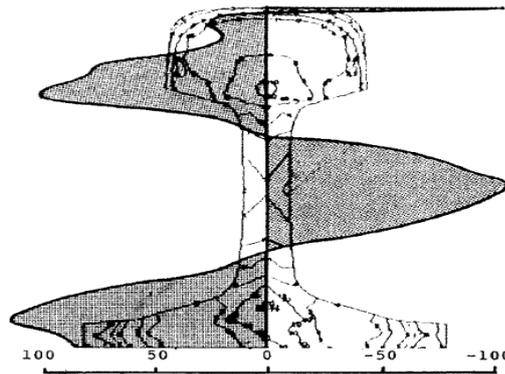


Figura 3: Campo de tensões no trilho antes da soldagem por centelhamento.
Fonte: MANSOURI; MONSHI, 2004.

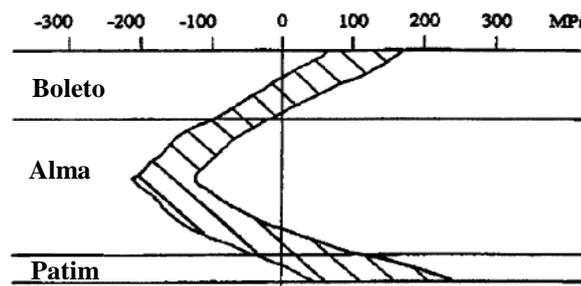


Figura 4: Campo de tensões residuais no trilho após da soldagem por centelhamento.
Fonte: Adaptado de MANSOURI; MONSHI, 2004.

Ainda de acordo com Mansouri e Monshi (2004), é possível identificar 3 regiões na área soldada:

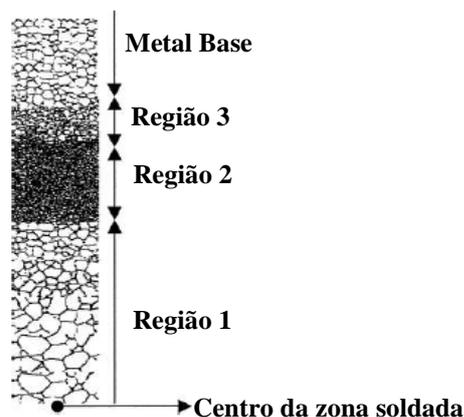


Figura 5: Microestrutura da zona de solda.
Fonte: Adaptado de MANSOURI; MONSHI, 2004.

2.2.1. REGIÃO 1 (REGIÃO DE CRESCIMENTO DE GRÃO)

Região próxima ao centro da zona de solda. Aqui o diâmetro do grão diminui ao se afastar do centro da zona de solda. A microestrutura é composta por perlita e ferrita. Depois da deformação plástica causada pelo recalque, por estar no centro da zona soldada, essa região possui maior deformação e temperatura em relação às outras partes, o que ocasiona uma recristalização de grãos mais grosseira. Ao afastar-se do centro da área soldada a temperatura diminui e, conseqüentemente, o tamanho dos grãos também diminui.

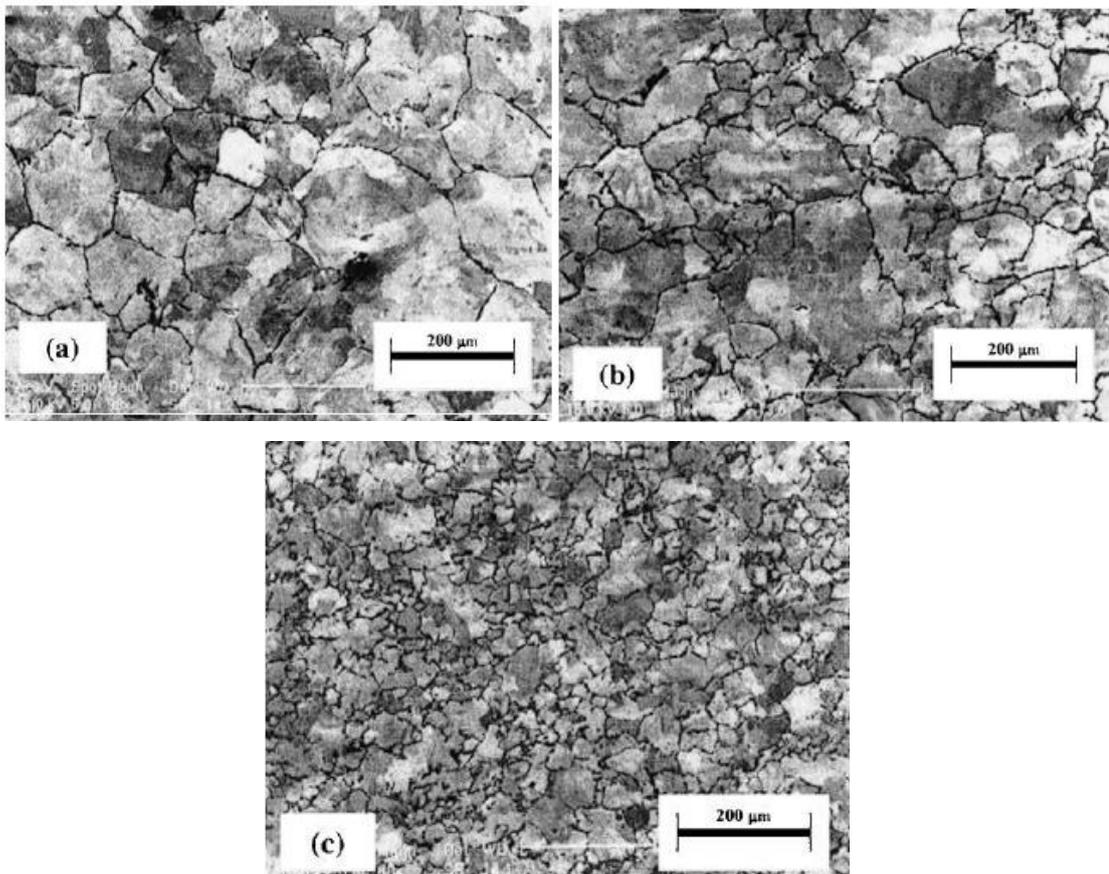


Figura 6: Microestrutura da região de crescimento de grãos; a) No centro da região soldada, b) Microestrutura da região 1 a 6 mm da linha central da região soldada, c) Microestrutura da região 1 a 9 mm da linha central da região soldada.

Fonte: MANSOURI; MONSHI, 2004.

2.2.2. REGIÃO 2 (REGIÃO DE RECRISTALIZAÇÃO)

Região mais distante do centro da zona soldada, existindo, entre as interfaces das regiões 1 e 2, uma mistura de áreas com recristalização de grãos mais refinados e áreas com recristalização grosseira de grão.

Nesta região a temperatura após a deformação plástica causada pelo recalque continua acima de A3 (diagrama Ferro-Carbono) e a deformação é suficiente para a recristalização acontecer em qualquer lugar, conseqüentemente o crescimento dos grãos recristalizados é menor e os grãos se mantêm mais refinados.

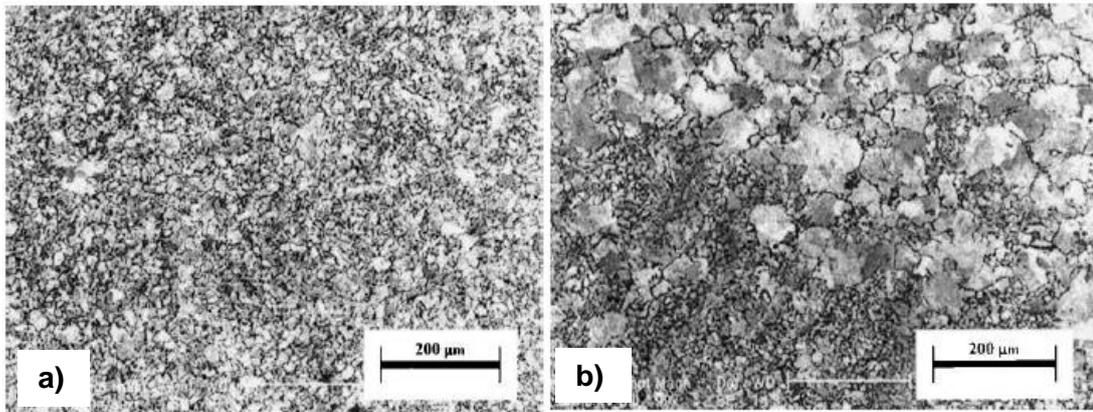


Figura 7: a) Microestrutura da região 2. b) Microestrutura da interface entre as regiões 1 e 2 da região soldada.
Fonte: Adaptado de MANSOURI; MONSHI, 2004.

2.2.3. REGIÃO 3 (REGIÃO PARCIALMENTE TRANSFORMADA)

Região mais distante do centro da zona soldada e depois da região 2. Microestrutura composta de pequenos grãos de ferrita no interior dos grãos iniciais de perlita, pois nessa região (após a deformação plástica causada pelo recalque) a temperatura está na zona ALPHA+GAMA do diagrama Ferro-Carbono, sendo esta a única diferença micro estrutural entre os grãos da região 3 e os grãos do metal-base.

A micro estrutura da junta soldada é perlita-ferrita. A ferrita ocupa de 5-10% da microestrutura e cobre todo o contorno de grão da perlita (exceto na região 3, onde estão no interior dos grãos de perlita). Além disso, devido à natureza da soldagem por centelhamento, não existe influência da microestrutura do metal fundido na zona de solda (como grãos dendríticos) e todos os grãos são equiaxiais. (MANSOURI; MONSHI, 2004)

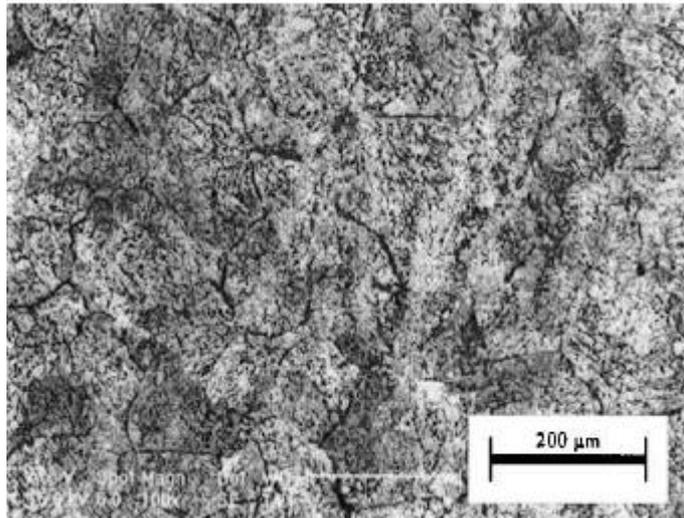


Figura 8: Microestrutura da região 3.
Fonte: MANSOURI, MONSHI, 2004.

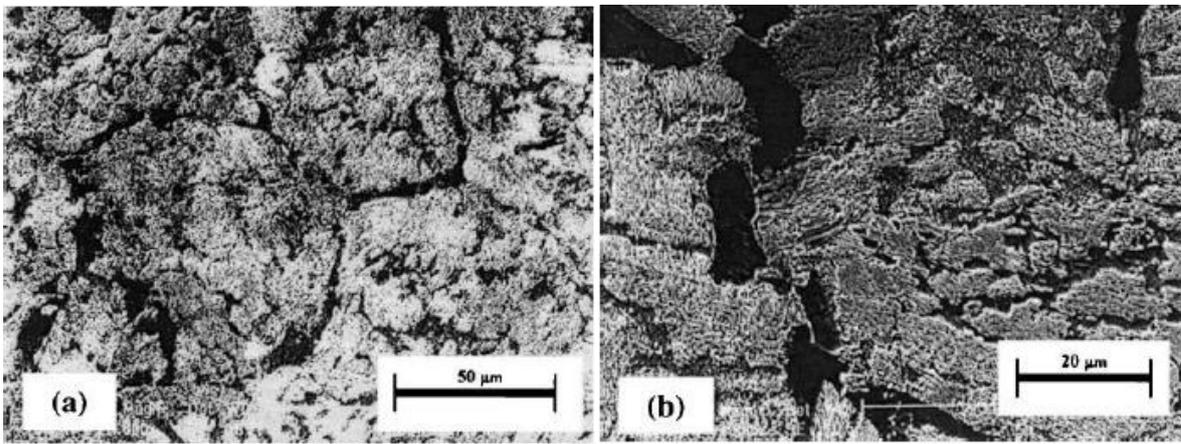


Figura 9: Maior ampliação da microestrutura da região parcialmente transformada.
Fonte: MANSOURI, MONSHI, 2004.

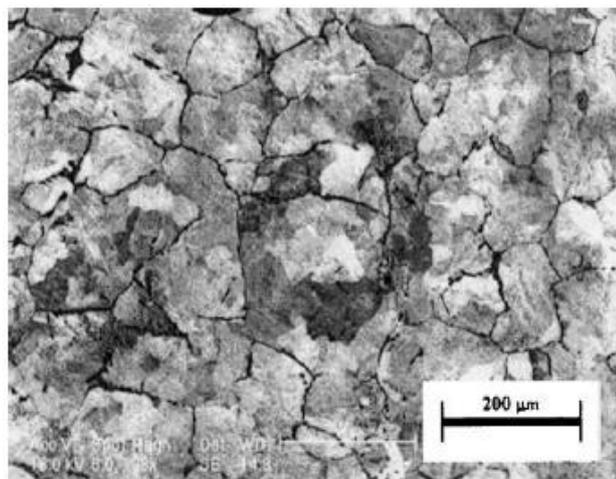


Figura 10: Microestrutura do metal base.
Fonte: MANSOURI, MONSHI, 2004.

Em trilhos de composição micro estrutural ferrita-perlita, a temperatura e a taxa de resfriamento geralmente não são suficientes para a formação de martensita. (ZHANG ET AL, 2007; MANSOURI, MONSHI, 2004)

Como a taxa de área de superfície lateral em relação ao volume é maior na alma do que no boleto e no patim, a densidade de corrente elétrica que passa na alma também é maior, pois a corrente elétrica nos metais passa principalmente nas camadas superficiais e, conseqüentemente, a temperatura na alma é maior. Além disso como a taxa de área de superfície lateral em relação ao volume é maior na alma do que no boleto e no patim a taxa de resfriamento na alma também é maior. Uma taxa de resfriamento maior significa um crescimento de grão menor, que por sua vez representa um aumento na dureza. Por isso o centro da zona soldada na alma possui uma dureza maior que nas outras áreas. Durante o resfriamento o calor perdido por convecção e radiação pela alma é maior que no boleto e no patim, conseqüentemente a quantidade de contrações que ocorrem na região da alma que está entre os eletrodos também é maior. Logo, após o resfriamento completo o campo de tensões no trilho, depois de soldado, se inverte: Tensão de compressão no boleto e no patim e tensão de tração na alma. (MANSOURI; MONSHI, 2004)

2.3. VARIÁVEIS DO PROCESSO

2.3.1. TEMPO DE CORRENTE DE RECALQUE

O aumento do tempo de corrente de recalque aumenta a quantidade de calor transferida para as peças que estão sendo unidas além de aumentar o tempo de resfriamento. Como resultado na microestrutura os grãos de ferrita aumentam em quantidade e tamanho, provocando uma redução na dureza do material na zona soldada. (ARABACI ET AL, 2007)

Essa redução de dureza do material é conhecida como amaciamento e pode provocar uma fratura no trilho ao ser submetido à carga de trabalho.

2.3.2. FORÇA DE RECALQUE

A força de recalque é responsável por expelir o metal fundido contendo óxidos e impurezas. Uma força de recalque muito baixa pode reter um filme líquido de metal contendo óxidos, que ao se solidificarem ocasionarão inclusões ou rechupes, que são pontos

concentradores de tensão. Além disso, uma força de recalque adequada pode beneficiar a microestrutura da zona fundida pois a deformação plástica adequada, juntamente com uma temperatura adequada, propicia o refinamento de grãos de perlita e uma distribuição homogênea desses grãos, resultando em um aumento de dureza. (ZIEMIAN ET AL, 2012)

2.3.3. VELOCIDADE DE RECALQUE

Deve ser suficiente para evitar a solidificação dos óxidos antes de serem expelidos da interface da junta. Os óxidos geralmente têm ponto de fusão maior que seu metal base e ao se solidificarem eles tornam-se mais densos, o que dificulta sua expulsão e aumenta a chance de inclusões ou zonas de segregação (que diminuem a dureza naquela região). Geralmente a velocidade inicial é maior, para garantir a expulsão dos óxidos antes da solidificação, e ao final (devido ao aumento da resistência e deformação plástica) a velocidade diminui. (GOMES FILHO, 2007)

2.3.4. DISTÂNCIA DE RECALQUE

Deve ser uma distância suficiente para expelir totalmente os óxidos e impurezas da superfície de contato, propiciando um contato metal-metal. Estes óxidos podem estar presentes tanto no filme líquido de metal como nas crateras causadas por uma elevada tensão de centelhamento. A distância de recalque foi descrita por Ziemian et al (2012), através de uma equação de regressão obtida a partir da análise de regressão matemática, como sendo a variável singular que juntamente com o produto das variáveis "Tempo de centelhamento x Distância de recalque" são os fatores que mais influenciam nos defeitos da junta. 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.

2.3.5. TRATAMENTO TÉRMICO

O objetivo do tratamento térmico é conferir ao material as propriedades mecânicas que ele possuía antes de sofrer algum processo de conformação ou deformação. Zhang et al (2007) propôs que a configuração ótima para o recozimento da junta soldada para trilhos de carbono

seria de 900°C durante 10 minutos, com base nas características de resistência à flexão e resistência à fadiga por flexão de um trilho de aço carbono com microestrutura ferrita-perlita.

2.3.6. TENSÃO DE CENTELHAMENTO

Deve ser suficiente para promover um centelhamento consistente. Quando um contato é formado entre as protuberâncias das superfícies inicia-se a passagem de corrente. Esse ponto de contato acaba sendo fundido e expulso após cessar a passagem de corrente. Entretanto a indutância do transformador impede que a corrente caia instantaneamente. Uma parte do calor gerado pela expulsão da ponte de contato e o subsequente intervalo de decaimento da corrente elétrica é transferido à interface de centelhamento, criando uma cratera de filme líquido. (SULLIVAN; SAVAGE, 1971)

Quanto maior essas crateras maior é a possibilidade de retenção de óxidos e metal fundido, ocasionando inclusões. De acordo com Savage (1962), citado por Gomes Filho (2007), a tensão de cisalhamento deve ser selecionada como sendo a menor possível, normalmente situada entre 2 e 16V, apenas o suficiente para manter o centelhamento. Uma tensão elevada provoca a formação de crateras maiores na superfície e uma tensão muito baixa não fornece um gradiente de temperatura adequado.

2.3.7. MODELOS DE CENTELHAMENTO

É a velocidade com que o porta eletrodo avança. Uma velocidade maior implica uma perda menor de material. Existem três modelos de centelhamento (GOMES FILHO, 2007):

- Centelhamento **Linear**: O porta-eletrodo avança com velocidade constante;
- Centelhamento **Parabólico**: O porta-eletrodo avança com uma taxa de aceleração constante;
- Centelhamento **Cúbico**: A aceleração do porta-eletrodo aumenta a uma taxa constante.

Segundo Savage (1962), citado por Gomes Filho (2007), quanto maior a velocidade do porta-eletrodo mais acentuado será o gradiente de temperatura produzido. Os gradientes de temperatura produzidos com centelhamento parabólico são mais íngremes do que aqueles para centelhamento linear (considerando-se a mesma perda de material resultante do mesmo tempo de centelhamento). De acordo com Kim et al (2009), modelos de centelhamento comuns

apresentam um período de aproximação à velocidade lenta e constante no início, o que facilita o início da operação de centelhamento com peças frias, posteriormente transforma-se em um modelo por aceleração, aproximando-se de um modelo parabólico.

2.3.8. EXTENSÃO INICIAL

A extensão inicial é a soma do comprimento de cada peça entre eletrodos no início da soldagem. Essa variável é responsável pela distribuição de temperatura na zona afetada pelo calor. O tamanho das peças unidas a cada eletrodo influencia na resistência elétrica à passagem de corrente. Como a resistência dessas peças é diretamente proporcional ao seu comprimento, uma extensão desigual das peças resulta em diferentes resistências, ou seja, o efeito joule vai ser diferente em cada peça e o resultado será um diferente gradiente de temperatura. O gradiente de temperatura deve ser o mesmo em cada peça, caso contrário ocorrerá um encavalamento durante o recalque. A extensão inicial também define o tamanho da zona de deformação plástica. (GOMES FILHO, 2007)

2.3.9. 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)

Quanto maior for a diferença entre os valores das correntes na fase de centelhamento pior será a qualidade da solda, o ideal é que as correntes sejam conectadas suavemente, como pode ser visto nas figuras abaixo. (KIM ET AL, 2009)

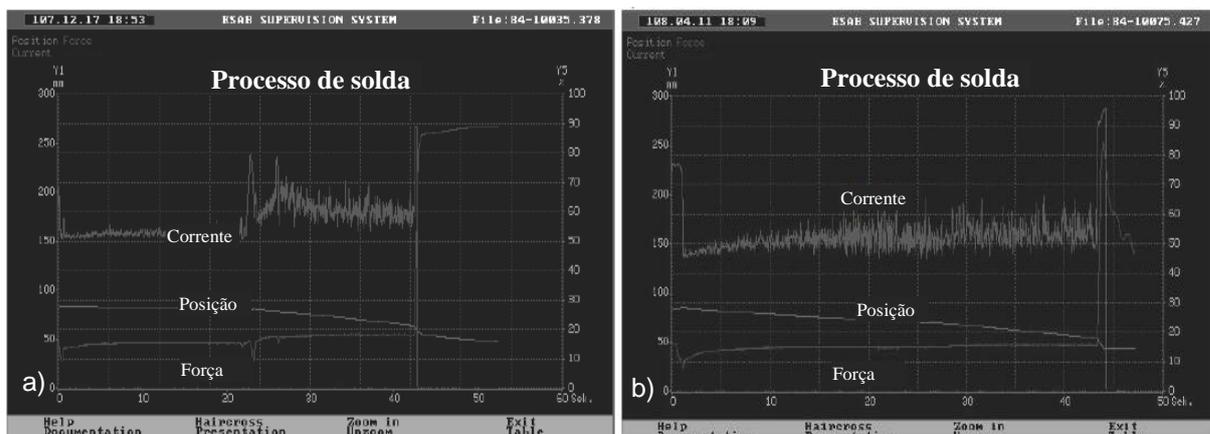


Figura 11: a) Modelo de ondas com uma diferença de 20% entre as correntes durante o centelhamento. b) Modelo de ondas mostrando uma conexão suave entre as correntes durante a fase de centelhamento.

Fonte: Adaptado de KIM ET AL, 2009.

Um aumento muito rápido da intensidade da corrente de centelhamento, como na Figura 11.a, leva à formação de crateras e consequente aprisionamento de óxidos na interface de solda. (KIM ET AL, 2009)

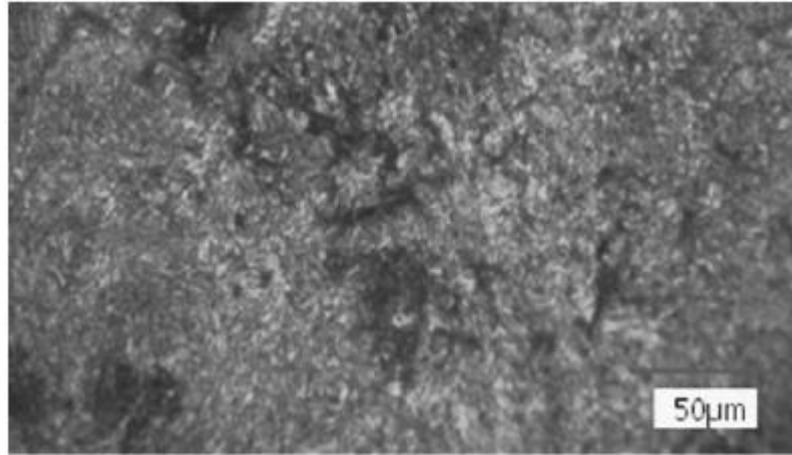


Figura 12: Micrografia de parte da linha de solda relativa ao modelo de ondas da Figura 11.a, é possível observar a presença de óxidos, que não foram completamente expulsos pelo recalque.
Fonte: KIM ET AL, 2009.

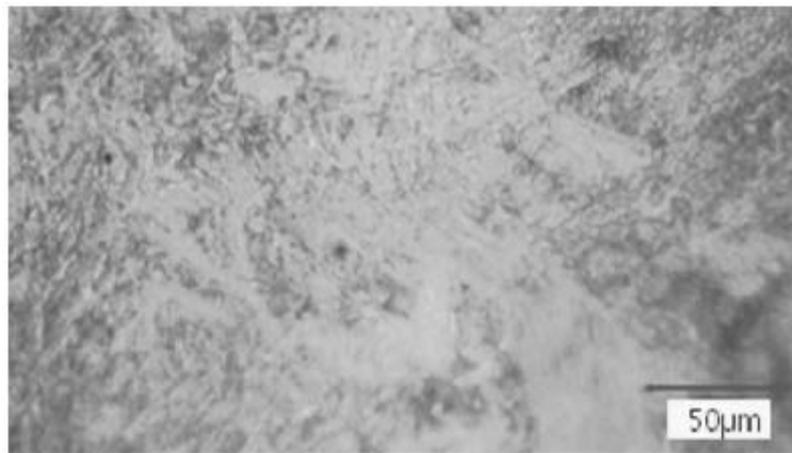


Figura 13: Micrografia de parte da linha de solda relativa ao modelo de ondas da Figura 11.b.
Fonte: KIM ET AL, 2009.

2.4. DEFEITOS E DESCONTINUIDADES

Existem dois tipos de descontinuidades: Mecânica e metalúrgica. Os defeitos na junta soldada são os grandes responsáveis pela falha do trilho e, como abordado a seguir, possuem relação direta com as variáveis do processo de soldagem por centelhamento.

2.5. DESCONTINUIDADES MECÂNICAS

Esse tipo de defeito pode ser facilmente identificado pela inspeção visual, geralmente decorre de um desalinhamento das peças a unir.

Por exemplo, se duas peças, com mesmas dimensões, não estiverem alinhadas verticalmente uma parte da superfície a soldar não será envolvida na soldagem. Após o recalque a superfície não envolvida irá se sobrepor à outra parte, este processo é conhecido como encavalamento. Caso essa peça encavalada ainda seja laminada o material sobreposto será dobrado sobre as superfícies da junta, resultando em arestas e em pontos acumuladores de tensão. Peças de seções transversais diferentes sofrem encavalamento inevitavelmente, devendo a área sobreposta ser removida. Caso as peças estejam desalinhadas lateralmente a área envolvida pela solda será menor e não apresentará as propriedades mecânicas que teria em situação de alinhamento. O desalinhamento das peças também pode ser angular, que provoca um centelhamento e recalque irregulares. (DOMINGUES, 2013)

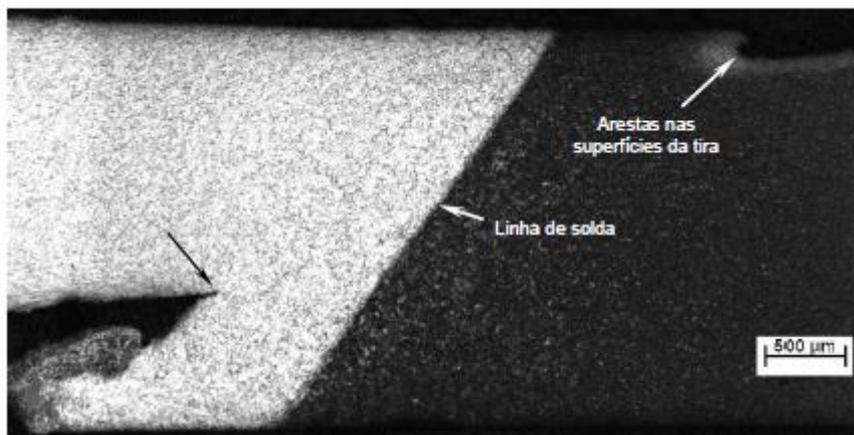


Figura 14: Aspecto microscópico de uma junta com “encavalamento”, após raspagem e laminação a frio.
Fonte: DOMINGUES, 2013.

Em qualquer modalidade de descontinuidade mecânica o centelhamento e o recalque ocorrerão de forma irregular, o que pode provocar defeitos na junta soldada. Além disso, caso o material sobreposto seja dobrado pela laminação ou removido em excesso pela raspagem, aparecerão pontos concentradores de tensão.

2.6. DESCONTINUIDADES METALÚRGICAS

2.6.1. *FLAT SPOTS*/PENETRADORES

Ambos são planos de formato irregular na superfície de fratura da seção transversal da interface de solda contendo uma composição química modificada. Esse plano de fratura na superfície é chamado penetrador quando a região de composição química modificada se estende para uma superfície livre do metal base e não se limita à seção transversal da área da junta. Já quando a região de composição química modificada está totalmente contida na seção transversal da área da junta o plano de fratura é denominado *flat spot*. (SULLIVAN; SAVAGE, 1971)

Ainda de acordo com Sullivan e Savage (1971) a formação dessa área de composição química modificada acontece durante a soldagem. Durante o centelhamento inúmeros curtos-circuitos são formados através do contato metálico entre as protuberâncias das superfícies das peças, formando pontes do contato que permitem a passagem de corrente elétrica. Devido ao curto-circuito há um rápido aumento da corrente, que aquece essas pontes de contato acima de seu ponto de fusão, promovendo a ejeção de material. Após a expulsão da ponte de contato a corrente tende a cair bruscamente, entretanto a indutância do transformador impede que isso ocorra. Além do impacto da expulsão das pontes, uma parte do calor gerado durante essa expulsão e durante o subsequente intervalo de decaimento de corrente é transferido para a interface de centelhamento, criando crateras preenchidas por um filme líquido. A composição química desse filme líquido nas crateras é influenciada pela difusão dos solutos presentes no metal base e pela reação com os gases da atmosfera. O tamanho e profundidade das crateras depende da área da seção transversal da ponte de contato que está sendo expelida. Durante o recalque, o filme líquido nas crateras mais profundas não conseguem sair da interface de solda, se solidifica e, ao ser plasticamente deformada, produz uma fina região de composição química modificada. Quando uma carga é aplicada essa região fina tende a sofrer uma fratura frágil, essa fratura possui uma característica marcante, que é o aspecto plano de sua superfície.



Figura 15: Superfície de fratura devido a um *flat spot*.
Fonte: RÄSÄNEN, MARTIKAINEN, 2011.

A superfície de fratura frágil no *flat spot* é identificada como uma região de coloração escura em relação à superfície de fratura dúctil do metal base, essa coloração escura se deve à presença de ondulações na zona de fratura do *flat spot*, bem como a presença de partículas sólidas segregadas. (RÄSÄNEN, MARTIKAINEN, 2011)

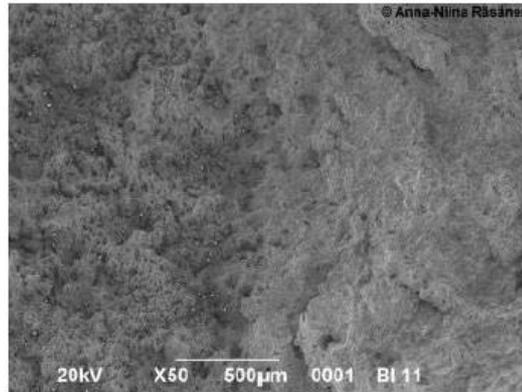


Figura 16: Superfície de fratura do *flat spot* (esquerda) e do metal base (direita).
Fonte: RÄSÄNEN, MARTIKAINEN, 2011.

Uma vista mais detalhada sobre a superfície de fratura de um *flat spot* em um aço composto de 0.20%C, 0.28%Si, 1.33%Mn permite uma melhor compreensão sobre a microestrutura em questão. Os *flat spots* consistem em pequenas escórias sólidas, contendo elevada quantidade de oxigênio, manganês, silício, alumínio, flúor e titânio. Na figura abaixo as partículas de escória de maior tamanho são mostradas na cor branca para diferenciação em relação às partículas de escória menores. (RÄSÄNEN, MARTIKAINEN, 2011)

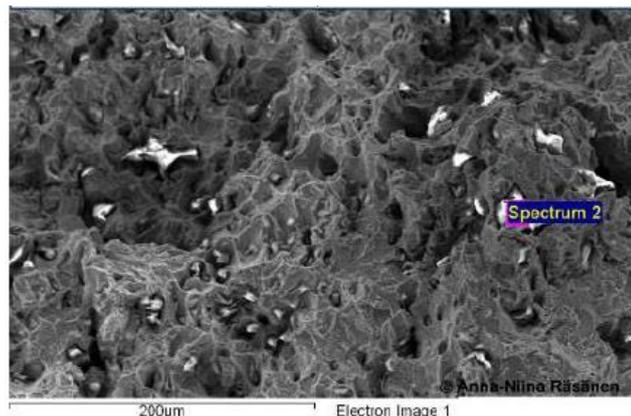


Figura 17: Vista detalhada da superfície de fratura do *flat spot* mostrando as partículas de escória maiores (em branco) e menores (cor escura).
Fonte: RÄSÄNEN, MARTIKAINEN, 2011.

Minimizar a indutância do secundário do transformador pode reduzir a chance de formação de *flat spots* e penetradores, pois permitirá que a corrente flutue rapidamente, permitindo tanto expulsar as pontes mais rapidamente quanto a redução mais rápida da corrente após a ejeção de material. (SULLIVAN; SAVAGE, 1971)

2.6.2. ÓXIDOS

Os óxidos são formados nas superfícies em contato das peças devido à reação do metal aquecido com o oxigênio atmosférico. Essa reação deve ser evitada, pois se os óxidos forem aprisionados na linha de solda a nucleação de trincas será ser facilitada. (DOMINGUES, 2013)

Como a soldagem por centelhamento não utiliza gás de proteção a reação com o oxigênio é inevitável, por isso os óxidos devem ser completamente expulsos da junta durante o recalque. De acordo com Ichyama, Saito e Nishi (1971) citados por Domingues (2013) os óxidos predominantes são o MnO (ponto de fusão de 1850°C) e o SiO₂ (ponto de fusão de 1723°C). Embora o aço possa atingir temperaturas superiores ao seu ponto de fusão durante a soldagem, esses óxidos que são formados adquirem uma alta viscosidade e por isso são difíceis de serem solubilizados e expulsos da junta.

Ichiyama, Kodama (2007) propuseram o índice Feq para aços C-Mn e microligados. Tal índice representa a tendência de diminuição da ductilidade de juntas soldadas de acordo com a concentração de C, Si, Mn e Al na composição da liga. Quanto maior o índice Feq, maior será a quantidade de óxidos formados e maior o endurecimento do aço. Dentre os elementos citados, o C é o que mais contribui para o endurecimento, já o Si, Mn e Al são os responsáveis pela formação de óxidos na solda.

As inclusões de óxidos podem apresentar uma maior ou menor dispersão, provavelmente sendo influenciadas pela força de recalque, e também podem variar em relação ao tamanho de grupos de inclusões. Pequenos óxidos individuais não oferecem grande risco de fratura, entretanto as áreas contendo grandes grupos de escórias de óxidos podem sofrer fraturas severas mesmo quando submetidas a pequenos ângulos de flexão. (RÄSÄNEN, MARTIKAINEN, 2011).

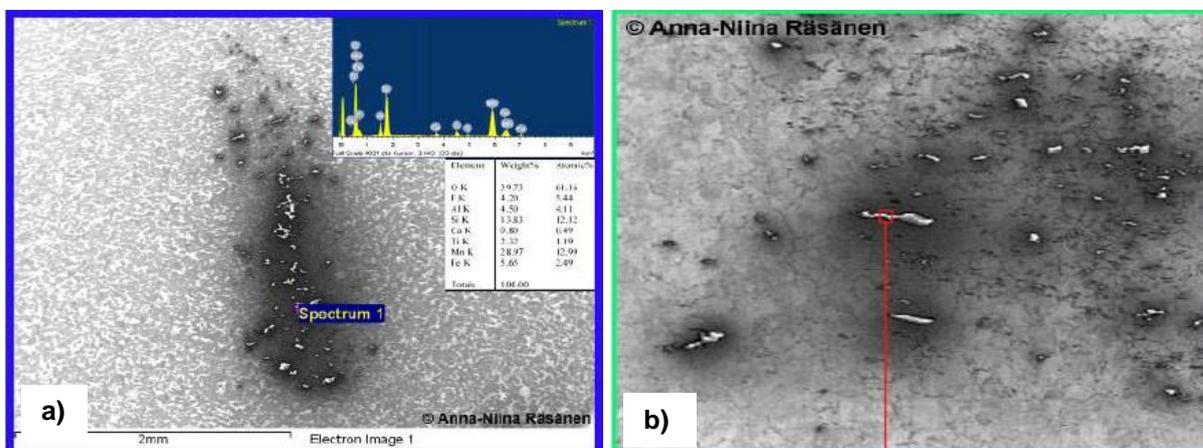


Figura 18: a) e b) Dispersões típicas das inclusões de óxidos.
Fonte: Adaptado de RÄSÄNEN, MARTIKAINEN, 2011.

De acordo com Räsänen e Martikainen (2011), em um aço composto de 0.20%C, 0.28%Si, 1.33%Mn, a composição dos óxidos apresenta grande quantidade de manganês, silício, alumínio, flúor e titânio. Entretanto, ao que parece, a composição do aço não tem efeito significativo na formação dos óxidos. Räsänen e Martikainen (2011) estudaram 3 tipos de aços, com composições químicas mostradas na figura abaixo, e os elementos oxidados são, independentemente de sua quantidade na composição química do aço, manganês, silício, alumínio e titânio.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	Ti	B
Espécime 1	0.20	0.28	1.33	<0.01	<0.01	0.03	0.04	...	...
Espécime 2	0.22	0.07	1.00	<0.01	<0.01	0.03	0.03	0.03	<0.01
Espécime 3	0.80	0.24	0.70	0.02	<0.01	0.09	0.03	0.01	...

Figura 19: Composição química dos elementos.
Fonte: Adaptado de RÄSÄNEN, MARTIKAINEN, 2011.

Uma alta tensão de centelhamento sempre será sucedida pela formação de crateras e, conseqüentemente, aumenta-se o risco de surgimento de *flat spots*, penetradores e óxidos mesmo aumentando a força de recalque. Em aços de baixo carbono costuma-se observar a formação de áreas de segregação de carbono em torno dos *flat spots* e também em torno dos óxidos, essas áreas de segregação de carbono possuem melhores propriedades mecânicas em relação à tração, flexão e dureza que os óxidos e *flat spots*.

2.6.3. DESCARBONETAÇÃO

No centelhamento, onde geralmente não se usa gás de proteção, aços de mais alto teor de carbono podem perder carbono a partir de reações com o ar livre da atmosfera. Caso o metal que sofreu descarbonetação não seja totalmente expulso no recalque, este aparece como pontos moles na região da solda. (GOMES FILHO, 2007)

2.6.4. AMACIAMENTO DA ZONA AFETADA PELO CALOR

O amaciamento da ZAC é a redução de dureza em uma região específica ou, até mesmo, de toda a ZAC devido à modificação da microestrutura pelo ciclo térmico da soldagem. Como é uma área de dureza reduzida, ao se aplicar uma carga na peça a tendência é que ela falhe na região onde houve o amaciamento. Em aços *dual phase*, de microestrutura ferrita e martensita o amaciamento da ZAC está associado ao revenimento da martensita. (DOMINGUES, 2013)

Durante o centelhamento pode ocorrer a queima dos elementos de liga e também a descarbonetação. Com a diminuição do conteúdo de carbono e elementos de liga que conferem dureza ao metal, a consequência é a diminuição da dureza nessa região, reduzindo também a resistência da região a deformações/trincas. (X. ZHAO ET AL, 2015)

Arabaci et al (2007) associou o amaciamento da zona afetada pelo calor dos aços C1030 e X40CrMoV5 1 com o aumento do calor fornecido à junta e a diminuição da taxa de resfriamento, o que provocou um crescimento de tamanho de grão e da quantidade dos grãos de ferrita.

O amaciamento também pode ser causado pelo crescimento grosseiro de grãos, como pode ser observado na Figura 20.a, que é a microestrutura de um aço ASTM A529-Classe 50. Além do aumento no tamanho dos grãos, pode ocorrer presença da ferrita nos contornos dos grãos de perlita, diminuindo tanto a dureza quanto a resistência nessa região. Na Figura 20.b, uma micrografia da zona afetada pelo calor de um aço ASTM A529-Classe 50 que não sofreu amaciamento, nota-se um maior refinamento dos grãos, além de se apresentarem distribuídos de forma mais homogênea devido à maior força de recalque. (C.W. ZIEMIAN ET AL., 2012)

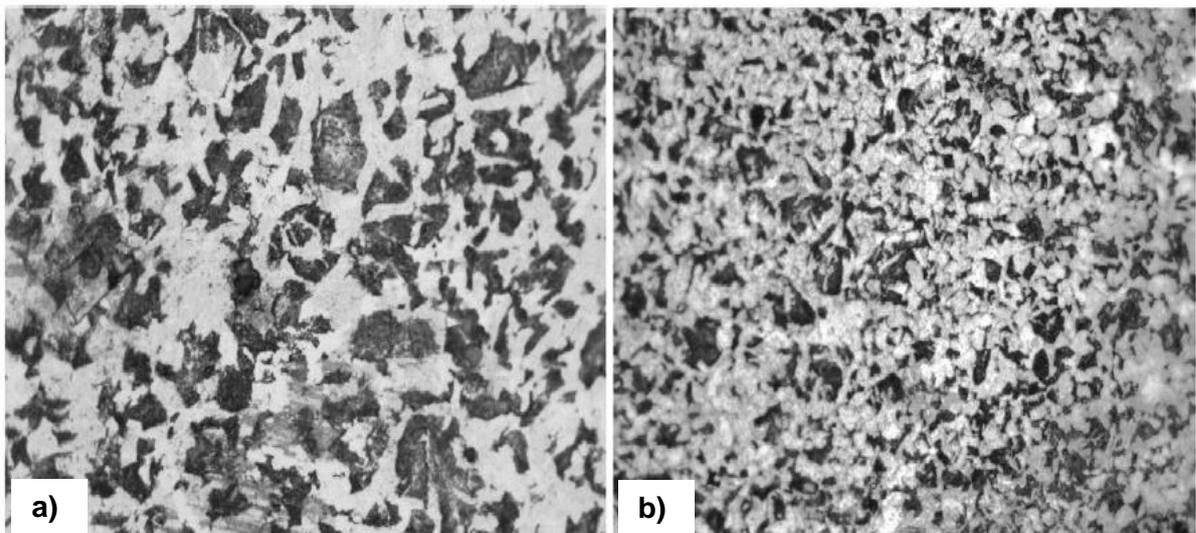


Figura 20: a) Zona afetada pelo calor que apresentou amaciamento, aço ASTM A529-Classe 50. b) Zona afetada pelo calor sem amaciamento, aço ASTM A529-Classe 50.

Fonte: Adaptado de C.W. Ziemian et al., 2012.

2.6.5. SUPERAQUECIMENTO DOS MORDENTES

É um defeito ocasionado pelo superaquecimento local do metal base na interface de contato entre o mordente de fixação e o metal base. O superaquecimento é causado por uma alta resistência de contato. Pode-se evitar este defeito através da preparação das superfícies do

mordente e do metal base que estarão em contato, como por exemplo a remoção da camada superficial e oxidadas das superfícies. (GOMES FILHO, 2007)

2.6.6. METAL FUNDIDO

Durante o centelhamento forma-se metal fundido nas superfícies a serem soldadas, devendo ser completamente expelido durante o recalque. Entretanto, se partes de metal fundido ficarem retidas na solda, sua microestrutura apresentará uma área heterogênea, caracterizada pela presença de uma região de metal solidificado. Essa região pode conter pequenas trincas de contração e ser de ductilidade menor que o metal soldado. (GOMES FILHO, 2007)

2.7 FRATURA E FALHA POR FADIGA

A maioria dos danos aos componentes do veículo e dos trilhos é provocado por altas forças de impacto. Irregularidades na superfície da roda e do trilho são as principais fontes de impactos severos. As juntas soldadas também podem ser uma fonte de severas cargas de impacto, pois representam uma descontinuidade na superfície de rolamento do trilho devido às variações nas características do material (resistência, dureza e microestrutura) e devido ao desalinhamento das partes do trilho a serem soldadas. Além disso, a junta soldada pode conter descontinuidades metalúrgicas e áreas com altas tensões residuais. Todos estes fatores são combinados para produzir uma elevada carga de impacto entre a roda e o trilho. Os aumentos de carga de impacto são propensos a gerar falha por fadiga das juntas soldadas além de acelerar a deterioração dos componentes da via. (XIAO ET AL, 2010)

Abe et al (1994), citado por Xiao et al (2010), investigou as irregularidades superficiais da junta soldada de um trilho, onde representou o crescimento das irregularidades na superfície dessa junta como uma função da quantidade de toneladas que passavam por ela.

As fraturas tendem a ocorrer durante os períodos de baixas temperaturas, que são responsáveis por consideráveis tensões de tração longitudinais térmicas, tais tensões, associadas com as tensões residuais no trilho após a soldagem contribuem para a falha do trilho. (H. STONE ET AL, 2015)

Mutton e Alvarez (2004), citado por Xiao et al (2010), apresentaram os modos de falha em soldas feitas por aluminotermia, sob elevadas cargas de eixo. Além disso estudaram experimentalmente qual a influência do perfil longitudinal da solda e da velocidade do trem na

carga de impacto dinâmico e na deterioração da estrutura do trilho adjacente à junta soldada. Com base em medições, uma relação aproximadamente linear foi encontrada entre o aumento da velocidade do trem e o aumento do fator de impacto dinâmico que ocorre na junta soldada.

2.7.1 CARACTERÍSTICAS DA FALHA POR FADIGA

A superfície de fratura na alma do trilho de alta resistência apresenta uma região plana e brilhante que reflete mais intensamente a luz. Essa região plana localiza-se no lado interno da via, que é onde as rodas do trem exercem um esforço maior sobre a estrutura. (GODEFROID ET AL, 2014)

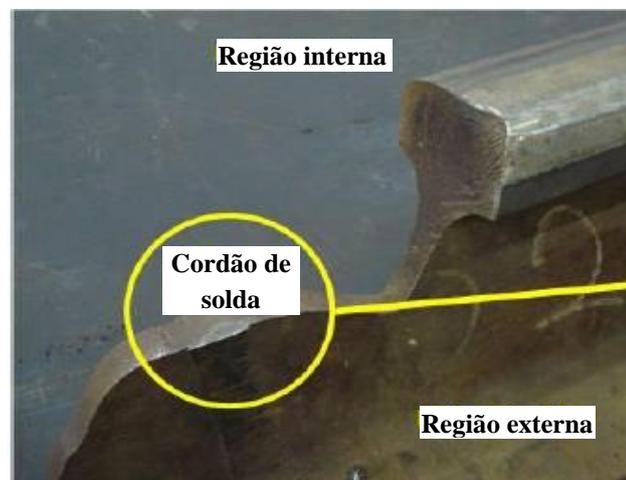


Figura 21: Superfície de fratura.
Fonte: Adaptado de GODEFROID ET AL, 2014.

Na região soldada é possível observar 3 superfícies planas que refletem mais intensamente a luz:



Figura 22: Regiões de nucleação e crescimento de trinca.
Fonte: Adaptado de GODEFROID ET AL, 2014.

A trinca se iniciou em uma região da junta soldada na qual existia um degrau na rebarba da solda, o que se caracteriza como um concentrador de tensões e é responsável pelo crescimento estável da trinca até $1/3$ da espessura da alma e o subsequente crescimento instável da mesma até a fratura do trilho.

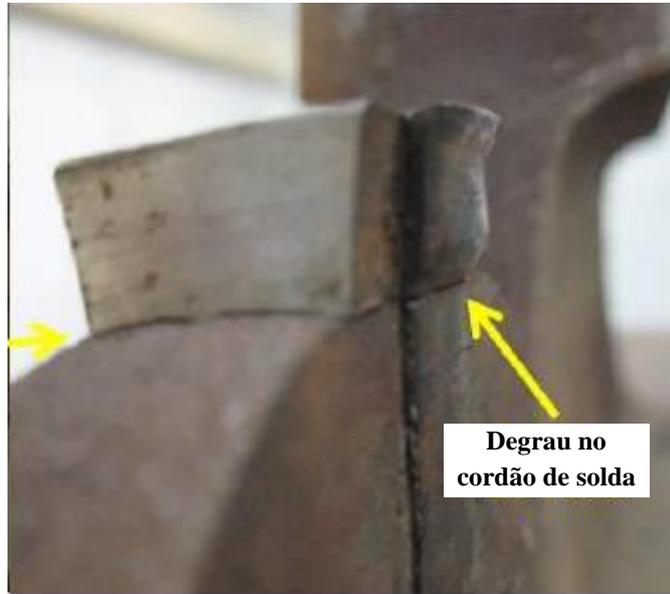


Figura 23: Presença de degrau na rebarba de cordão de solda, ponto concentrador de tensão.
Fonte: Adaptado de GODEFROID ET AL, 2014.

Na região central da figura acima a área de nucleação e crescimento de trinca é de quase $1/3$ da espessura da alma. Marcas de sargento podem ser observadas do lado direito e esquerdo da região soldada, isso é uma evidência de um crescimento instável da trinca em uma longa extensão, tendo como consequência uma fratura frágil. (GODEFROID ET AL, 2014)

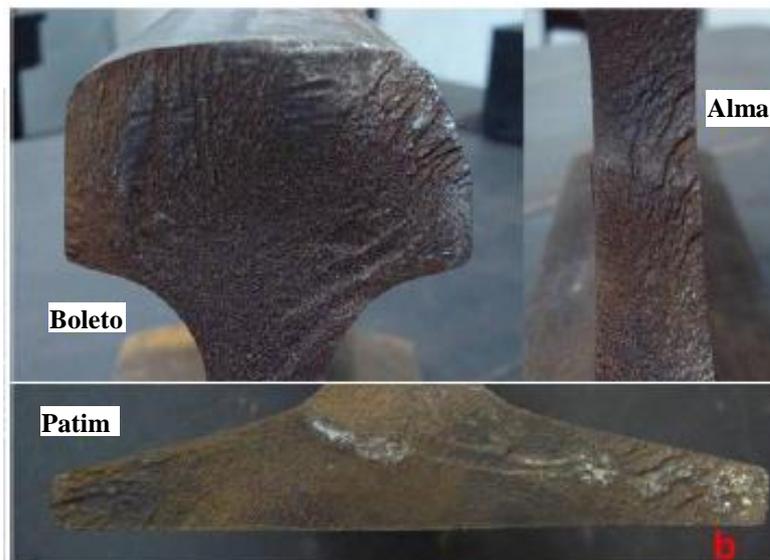


Figura 24: Regiões com fratura frágil (marcas de sargento), na alma, boleto e patim do trilho.
Fonte: Adaptado de GODEFROID ET AL, 2014.

A microestrutura do metal base é constituída basicamente de perlita. Quanto mais grosseira é a perlita maior é a reflexão de luz, predominando cores mais claras. Perlita mais refinada apresenta uma coloração mais escura pois refletem menos luz.

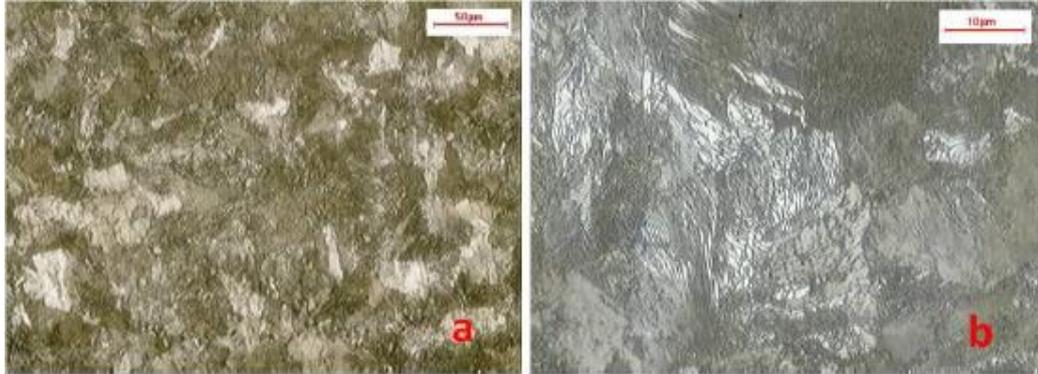


Figura 25: Micrografia do metal base.
Fonte: GODEFROID ET AL, 2014.

Na região afetada pelo calor observa-se na microestrutura a perlita fragmentada (difusão do Fe_3C e desintegração parcial das lamelas de cementita) devido à grande absorção de calor nessa área durante a soldagem.

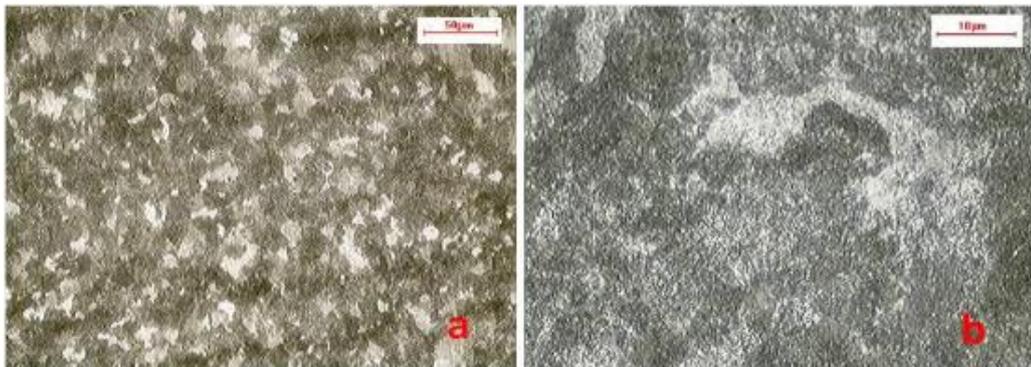


Figura 26: Microestrutura da zona afetada pelo calor.
Fonte: GODEFROID ET AL, 2014.

No cordão de solda a microestrutura é composta de perlita de grãos grosseiros.

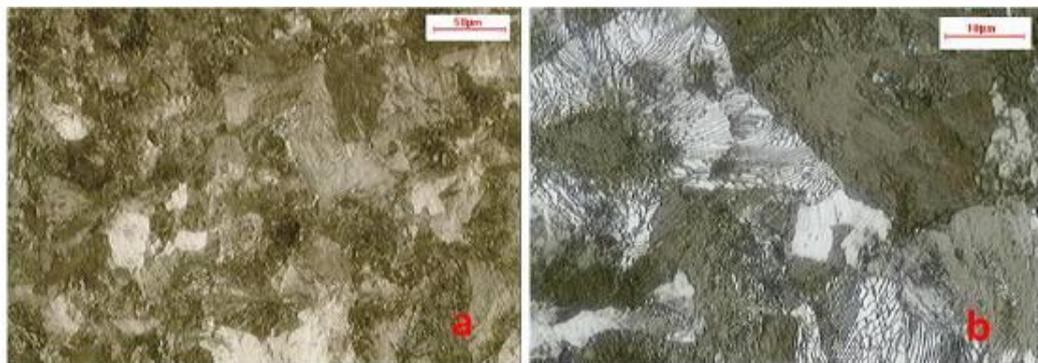


Figura 27: Microestrutura do cordão de solda.
Fonte: GODEFROID ET AL, 2014.

Na linha central a microestrutura é composta de perlita e ferrita proeutetóide. Os grãos de ferrita localizam-se nos contornos dos grãos de perlita, indicando uma descarbonetação local.

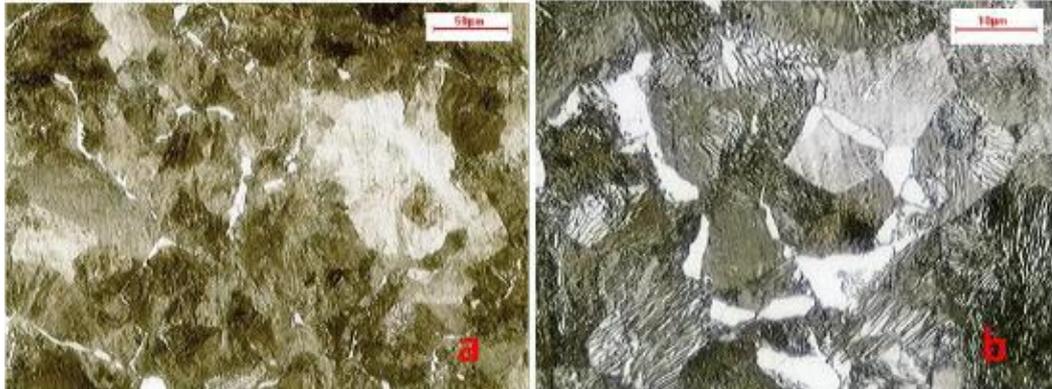


Figura 28: Microestrutura da linha central.
Fonte: GODEFROID ET AL, 2014.

A figura abaixo mostra um diagrama com as durezas Brinell no metal base, cordão de solda e zona afetada pelo calor:

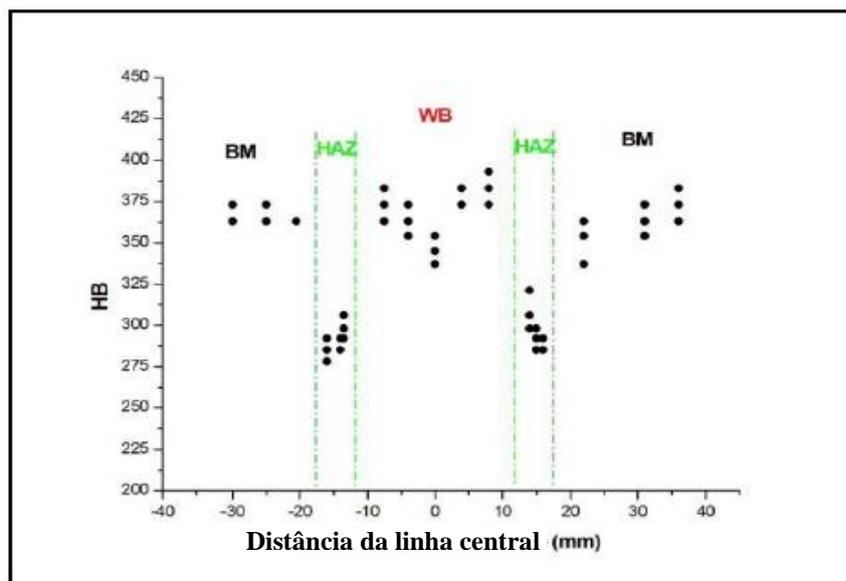


Figura 29: Dados da dureza Brinell.
Fonte: Adaptado de GODEFROID ET AL, 2014.

Os valores de dureza do metal base e do cordão de solda são bem parecidos, pois ambos possuem microestrutura composta de perlita, com pouca diferença de tamanho de grãos. Na linha central os valores de dureza apresentaram uma pequena diminuição, o que pode ser explicado pela presença de ferrita proeutetóide na microestrutura. Já na zona afetada pelo calor observa-se uma grande diminuição dos valores de dureza, que pode ser justificado pela fragmentação da perlita nessa região, apresentando uma maior propensão a falhas. (GODEFROID ET AL, 2014)

Ainda de acordo com Godefroid et al (2014), a falha por fadiga em um trilho de alta resistência está relacionada a um carregamento cíclico e à nucleação de trincas em regiões com concentração de tensão, como o cordão de solda, estrias de acabamento e rebarbas da solda. A trinca cresce estavelmente até um tamanho crítico e após o trilho ser submetido a uma sobrecarga ela apresenta um crescimento instável, levando o trilho a sofrer uma fratura frágil.

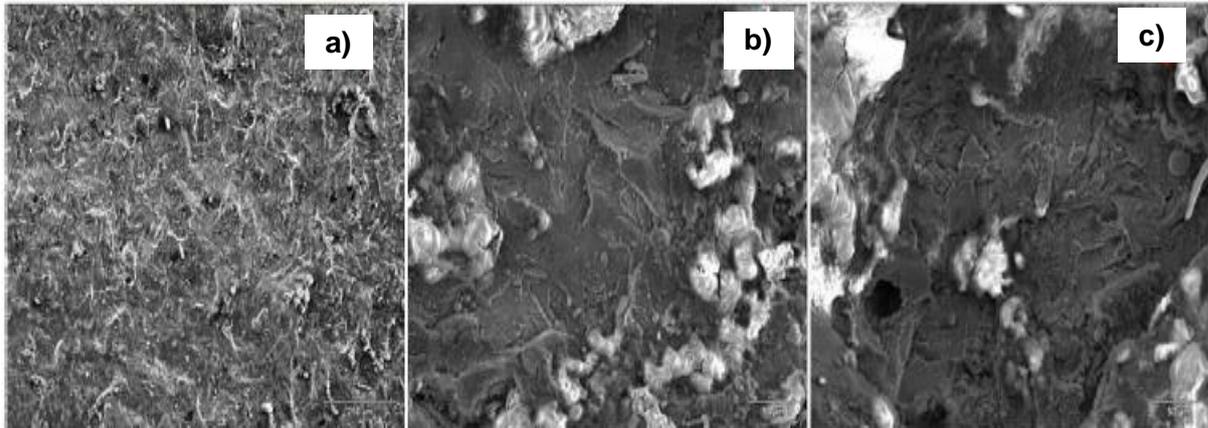


Figura 30: a) Crescimento da trinca por fadiga; b) Área de transição; c) Área de fratura frágil.
Fonte: GODEFROID ET AL, 2014.

2.8. CAUSAS DA FALHA POR FADIGA

2.8.1. METAL FUNDIDO NA SOLDA

O trilho representado na Figura 31, que operou por um longo tempo (o que pode ser confirmado pelas áreas escuras da figura, que são regiões oxidadas), fraturou por fadiga. Após uma análise da microestrutura da superfície de falha, que ocorreu na junta soldada, percebeu-se a presença de uma microestrutura de metal fundido na região #2 (canto superior esquerdo da alma e parte do boleto).

Após uma análise espectral foi identificado que o elemento Fe era o metal fundido responsável pela formação de uma estrutura de solidificação anormal na microestrutura da superfície de falha. (X. YU ET AL, 2015)



Figura 31: Superfície da junta soldada que falhou por fadiga.
Fonte: Adaptado de X. YU ET AL, 2015.

A Figura 32 mostra a microestrutura da região #2, onde é possível observar uma anormalidade, que é estrutura de solidificação de ferro. É nessa região que se iniciou a trinca. Essa heterogeneidade na microestrutura do metal soldado é responsável pela diminuição das forças de ligação das interfaces entre a área de ferro solidificado e o metal soldado em comparação com a estrutura perlita-ferrita esperada para este trilho, facilitando a formação de trincas durante uma sobrecarga. Esse defeito de estrutura de solidificação do ferro foi causado pelo processo de recalque. A escolha equivocada das variáveis de tal processo não garantiu que o ferro fundido fosse completamente expulso das interfaces a serem soldadas, consequentemente a parte fundida que ficou retida irá se solidificar para formar a estrutura representada na Figura 32. (X. YU ET AL, 2015)

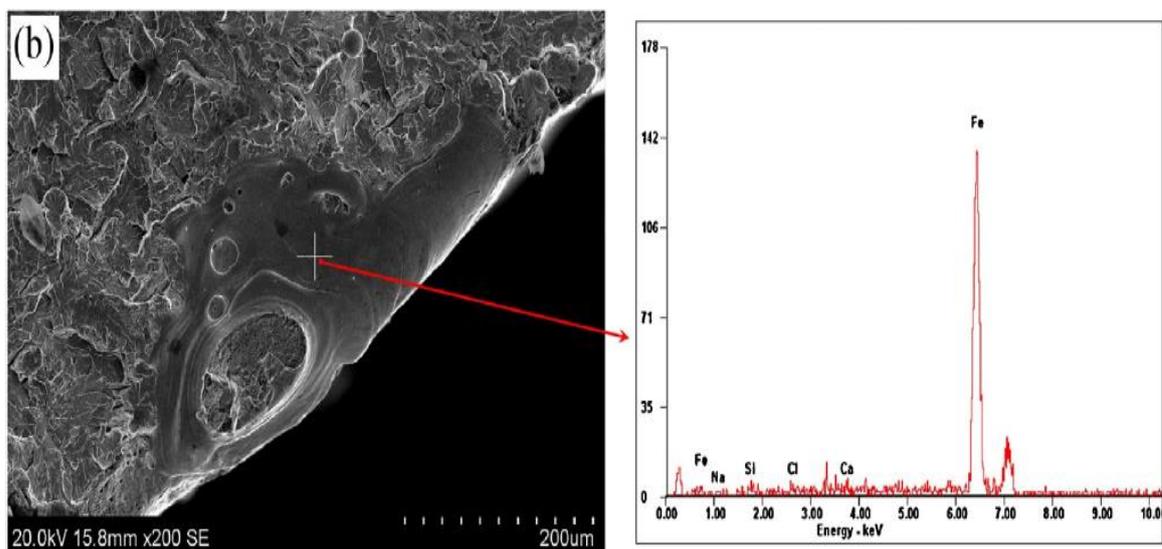


Figura 32: Microestrutura de região #2, mostrando uma estrutura de solidificação anormal, composta de ferro.
Fonte: X. YU ET AL, 2015.

2.8.2. FORMAÇÃO DE LEDEBURITA

Em aços hipereutetóides, com mais de 0,86% de carbono, trincas se originam no centro da alma e em uma região na qual se formou um filme líquido muito rico em carbono, resultando em uma estrutura de ledeburita.

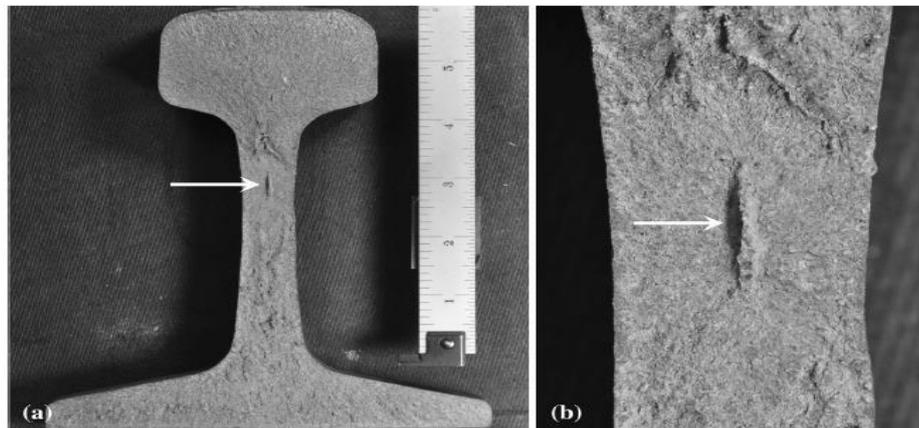


Figura 33: Trinca em um trilho hipereutetóide.
Fonte: H. STONE ET AL, 2015.

Esse rico filme líquido de carbono é formado durante o pré-aquecimento e centelhamento. Os ciclos de rápido aquecimento e resfriamento favorecem a segregação durante a solidificação, o que permite um enriquecimento de carbono localizado. Como consequência, a temperatura de fusão do metal é reduzida, permitindo a penetração do filme líquido no metal base. Durante o resfriamento esse líquido rico em carbono se transforma na ledeburita, que é uma mistura de austenita e cementita. Dando seguimento ao resfriamento a austenita se transforma em perlita, resultando em uma cadeia de glóbulos de perlita sobre um fundo de cementita. Essa cadeia de cementita fornece um caminho contínuo para o movimento de discordâncias e a propagação de trincas. (H. STONE ET AL, 2015)

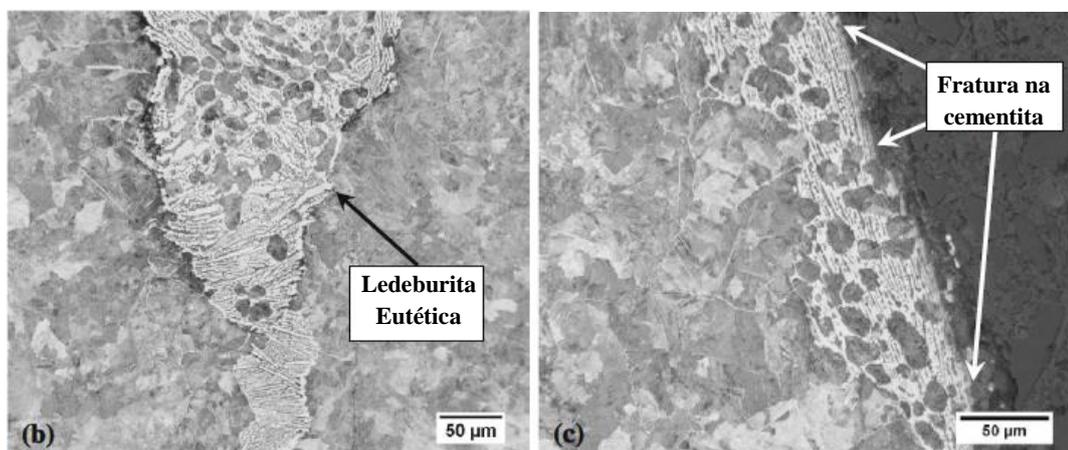


Figura 34: Ledeburita e a rede de cementita responsável por diminuir a dureza local.
Fonte: Adaptado de H. STONE ET AL, 2015.

2.8.3. FRATURA TRANSGRANULAR, GRAFITIZAÇÃO E CORROSÃO

X. Zhao et al (2015) analisou o mecanismo de fratura por fadiga de um aço U75V, amplamente utilizado na fabricação de trilhos, soldado por centelhamento.

Composição Química (% de peso) do trilho de aço U75V

Composição	C	Si	Mn	P	S	Nb	Al	V
Porcentagem	0.79	0.56	0.90	0.12	0.08	0.02	0.03	0.55

Figura 35: Composição química do aço U75V.
Fonte: Adaptado de X. ZHAO ET AL, 2015.

A microestrutura do aço U75V caracteriza-se basicamente por perlita lamelar grosseira, com tamanho de grão não-uniforme e um espaçamento desigual entre as camadas, além de uma pequena quantidade de ferrita.

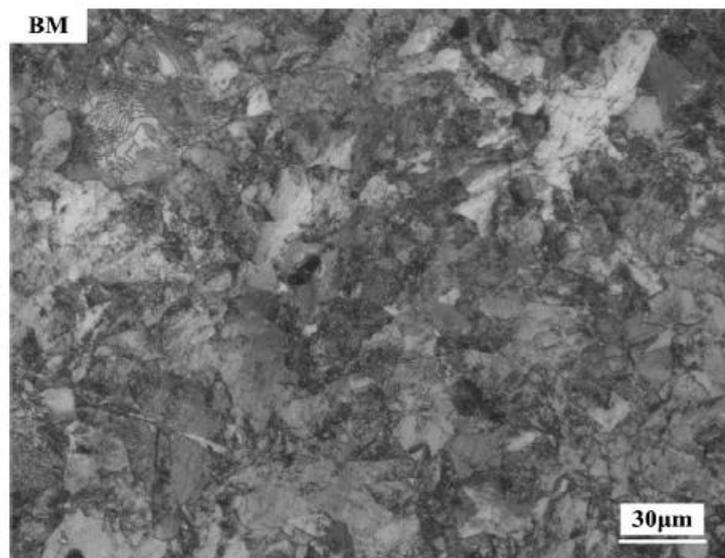


Figura 36: Microestrutura do aço U75V.
Fonte: X. ZHAO ET AL, 2015.

A Figura 37 mostra os parâmetros utilizados pelos processos de soldagem por centelhamento do referido aço, a principal diferença entre eles é a força de recalque.

Parâmetros dos dois processos de soldagem					
Processo de soldagem	Voltagem/V	Curso de centelhamento/mm	Pressão de recalque/MPa	Curso de recalque/mm	Velocidade de centelhamento/mm/s
(I)	4.42	7.5	13	2.5	0.18
(II)	4.40	7.5	25	2.5	0.20

Figura 37: Parâmetros dos processos de soldagem em um aço U75V.
Fonte: Adaptado de X. ZHAO ET AL, 2015.

Sob a condição de processo de solda (I), o valor de dureza da zona afetada pelo calor em ambos os lados do centro da solda é mais elevada do que a do metal base. A dureza mais elevada situa-se na zona de superaquecimento, causada pela formação de martensita. O valor da dureza do centro de solda diminui em comparação com a zona de superaquecimento, caracterizando uma região de amaciamento. Sob a condição de processo de solda (II), o valor da dureza da zona afetada pelo calor em ambos os lados do centro da solda é também maior do que a do metal base. A maior dureza situa-se na zona de superaquecimento, como resultado de um refinamento maior de grãos e uma pequena quantidade de martensita. O valor da dureza não diminui significativamente no centro da solda, indicando que não houve amaciamento.

O amaciamento na interface de solda foi causado durante o centelhamento através da queima dos elementos de liga e pela descarbonetação. Com a diminuição do conteúdo de carbono e elementos de liga a consequência é a diminuição da dureza nessa região e também da resistência da região a deformações e trincas.

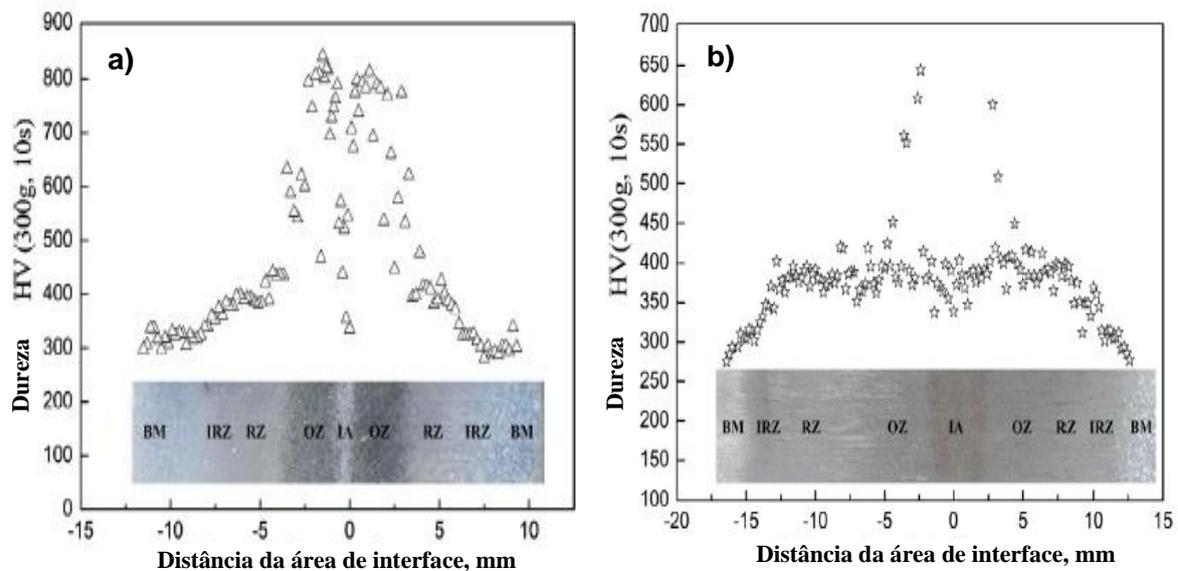


Figura 38: a) Processo de Solda I, com amaciamento da ZAC em um aço U75V. b) Processo de Solda II, sem amaciamento da ZAC em um aço U75V.

Fonte: Adaptado de X. ZHAO ET AL, 2015.

A região da junta que sofreu amaciamento apresentará maior desgaste por abrasão durante o uso da ferrovia. Essa abrasão desigual é responsável por causar uma depressão, ou concavidade, na junta soldada, gerando uma irregularidade na superfície do trilho. As principais consequências dessa irregularidade são a deterioração do estado de tensão e redução da vida de serviço da junta, além de afetar negativamente a segurança e o conforto durante a condução do trem. A partir da Figura 38.a observa-se que a área de interface é muito estreita. A microestrutura da área de interface é composta por grãos grosseiros de ferrita e perlita. A microestrutura da zona de superaquecimento consiste em martensita, responsável pelo aumento

de dureza nessa região, e grafita livre. A grafita destrói a continuidade da matriz, reduz o teor de carbono em solução sólida, e afeta seriamente o desempenho da junta, especialmente em relação à tenacidade, resistência à fadiga e resistência à alta temperatura, o que pode ocasionar uma fratura frágil. A microestrutura da zona de recristalização é perlita lamelar e ferrita reticular. A zona de recristalização é caracterizada pela diminuição do tamanho de grão e do espaçamento entre as camadas de perlita. Para a zona de recristalização incompleta destaca-se a formação de perlita, misturada com uma pequena quantidade de ferrita.

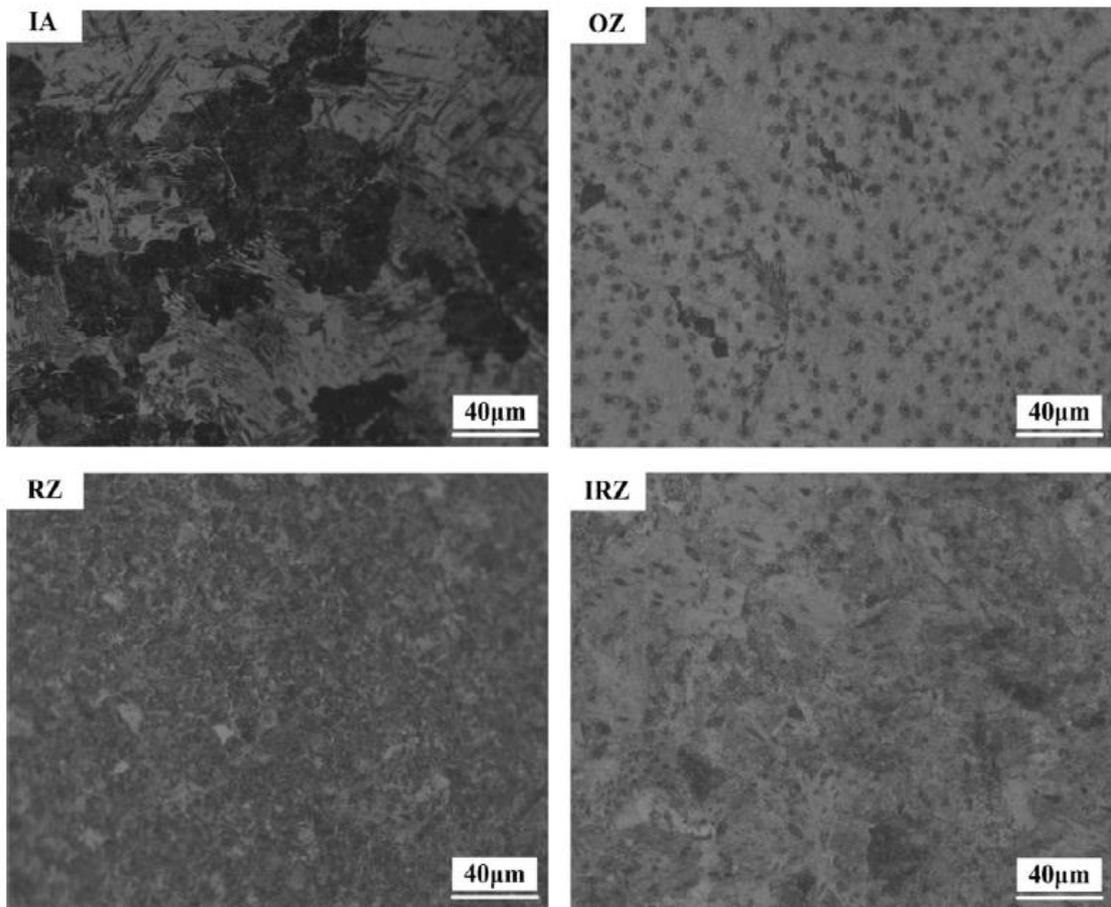


Figura 39: Microestrutura processo de solda I.
Fonte: X. ZHAO ET AL, 2015

Na Figura 38.b a área de interface da junta soldada pelo processo (II) é maior que a da soldada pelo processo (I), devido ao fato de a força de recalque no processo (II) ser maior. A microestrutura da área de interface é a mesma que a do metal base (perlita + ferrita), porém com grãos mais refinados em relação ao processo (I). A microestrutura da região superaquecida é basicamente ferrita (cor mais clara) e perlita (cor mais escura), além de uma pequena quantidade de martensita (também nas áreas mais claras) responsável pela alta dureza observada nessa região. A microestrutura da zona de recristalização e da zona de recristalização incompleta é semelhante à da junta de soldada pelo processo (I).

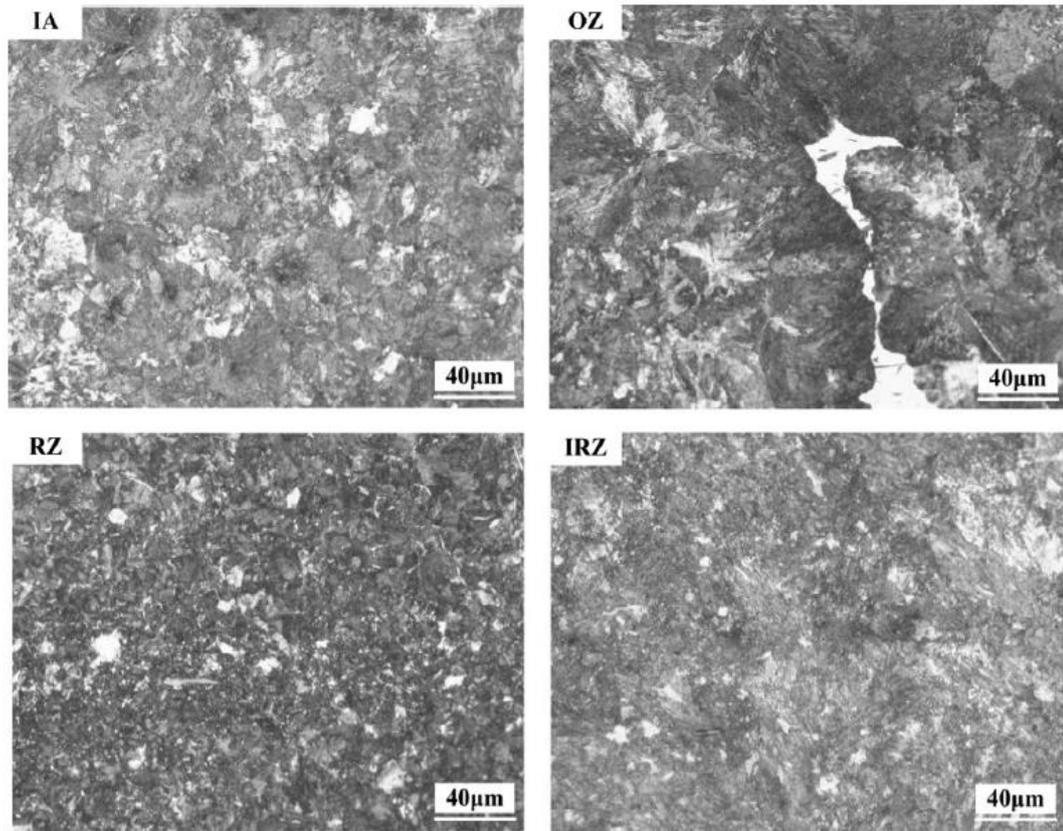


Figura 40: Microestrutura processo de solda II.
Fonte: X. ZHAO ET AL, 2015.

Pode ser visto a partir da Figura 41 que a curva em S-N das juntas soldadas pelo processo (II) é maior que a das juntas soldadas pelo processo (I), o que indica que o desempenho em fadiga das juntas soldadas por centelhamento é determinado principalmente pela força de recalque. É possível observar também o efeito combinado de corrosão e fadiga sobre a curva S-N.

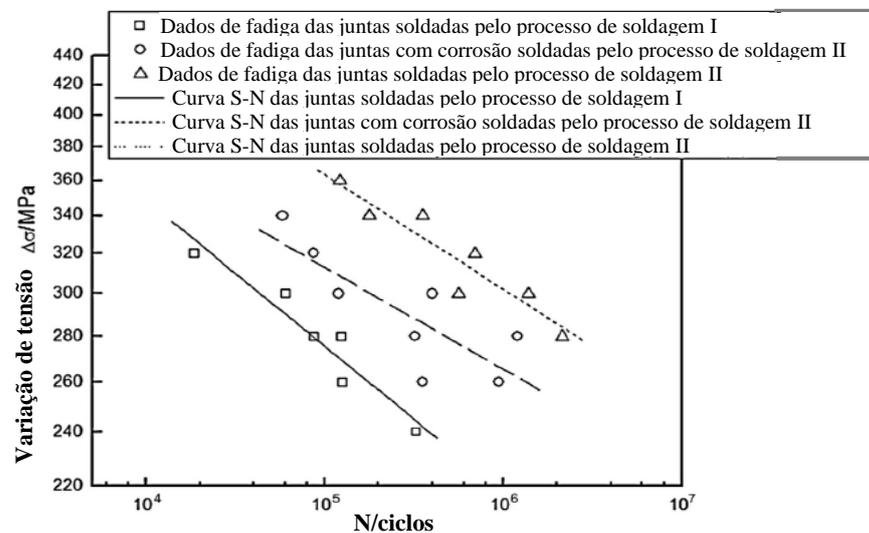


Figura 41: Curvas S-N das juntas soldadas.
Fonte: Adaptado de X. ZHAO ET AL, 2015.

Na Figura 42 nota-se a extensão da região oxidada:

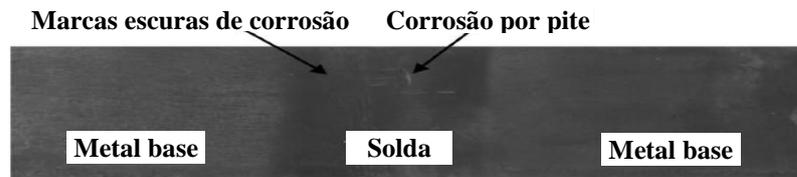


Figura 42: Superfície oxidada.
Fonte: Adaptado de X. ZHAO ET AL, 2015

A Figura 43 mostra a superfície de fratura da região oxidada, uma maior ampliação da área de nucleação da trinca permite observar a presença de marcas de corrosão.

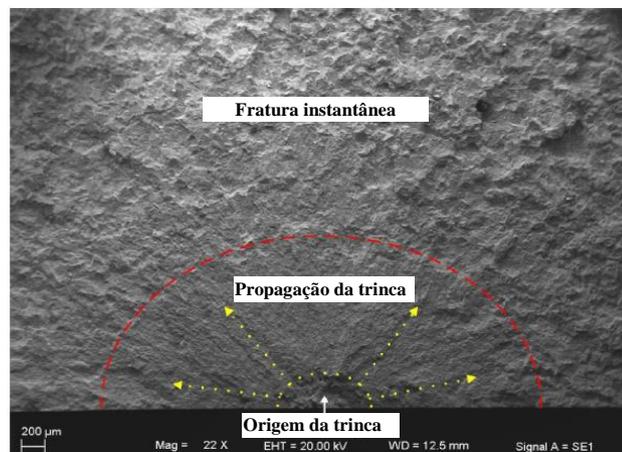


Figura 43: Superfície de fratura da região oxidada.
Fonte: Adaptado de X. ZHAO ET AL, 2015).

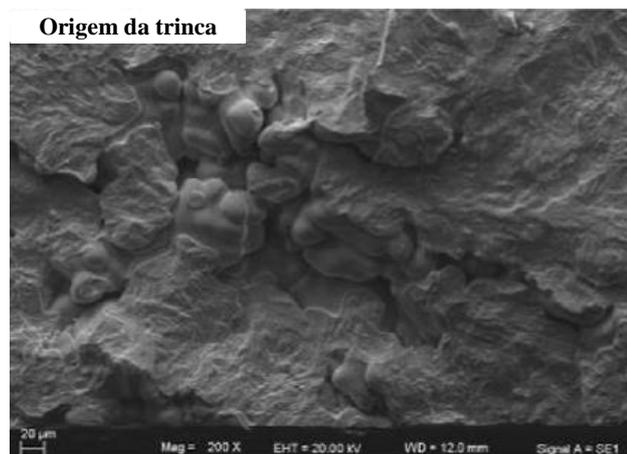


Figura 44: Origem da trinca devido à oxidação.
Fonte: Adaptado de X. ZHAO ET AL, 2015.

A Figura 44 mostra a região de nucleação da trinca nas juntas soldadas pelo processo (I), nota-se que essa região apresentou um modo de fratura intergranular e transgranular, que é relativamente raro. Na interface de solda a microestrutura apresenta um crescimento de grãos grosseiros, que diminuem a resistência e dureza da interface. Como a região de contorno dos

grãos fica enfraquecida a nucleação de trincas é favorecida nessas áreas. (X. ZHAO ET AL, 2015)

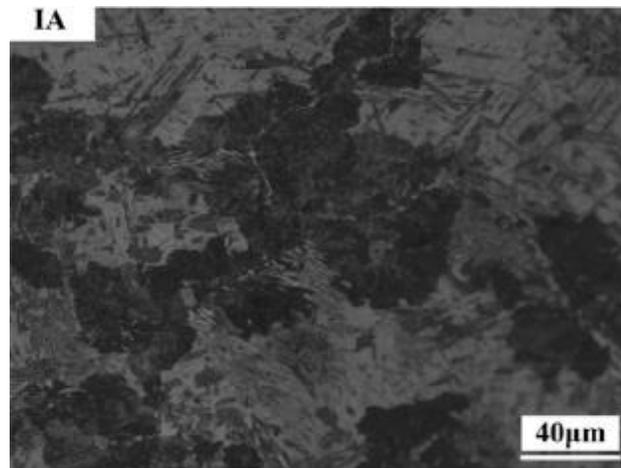


Figura 45: Crescimento grosseiro de grãos na interface de solda.
Fonte: X. ZHAO ET AL, 2015.

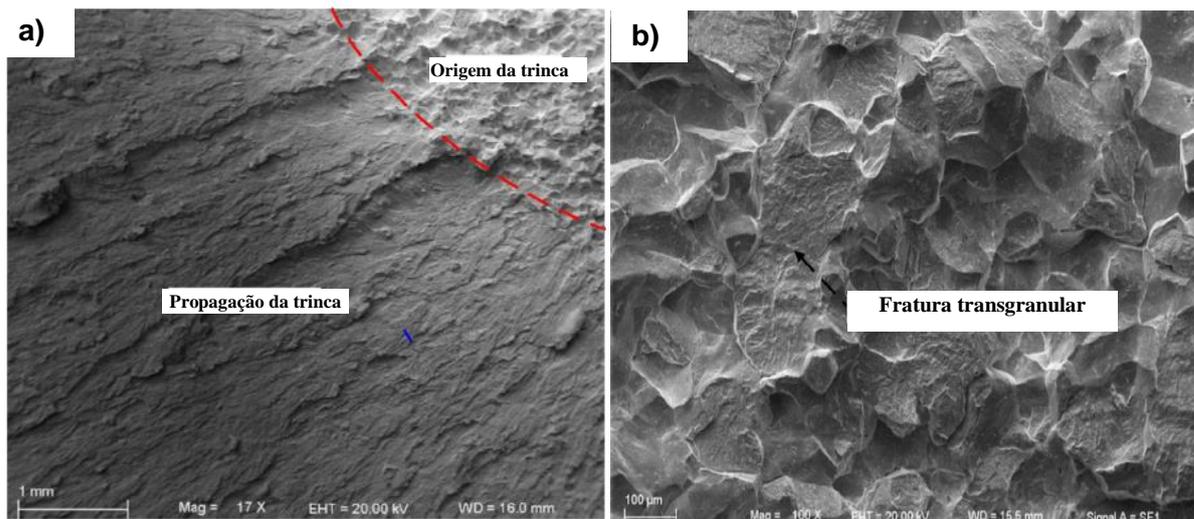


Figura 46: a) Região de nucleação de trinca nas juntas soldadas pelo processo (I). b) Ampliação da região de nucleação da trinca.

Fonte: Adaptado de X. ZHAO ET AL, 2015.

Na região de propagação da trinca foi observada uma inclusão, composta de O, Fe e Al. A existência de óxidos na superfície da fratura se deve a uma baixa pressão de recalque, que foi insuficiente para expulsar todo o óxido formado na soldagem. A presença de inclusões de óxidos podem promover a nucleação e propagação de trincas, reduzindo a vida em fadiga do trilho. O aumento da pressão de recalque melhora a resistência e homogeneidade da junta soldada, pois expulsa o metal quente fundido, reduzindo a temperatura da zona de solda, permitindo um crescimento mais refinado de grão, além de evitar o amaciamento da zona afetada pelo calor, portanto a vida em fadiga das juntas soldadas pelo processo (I) é menor. (X. ZHAO ET AL, 2015)

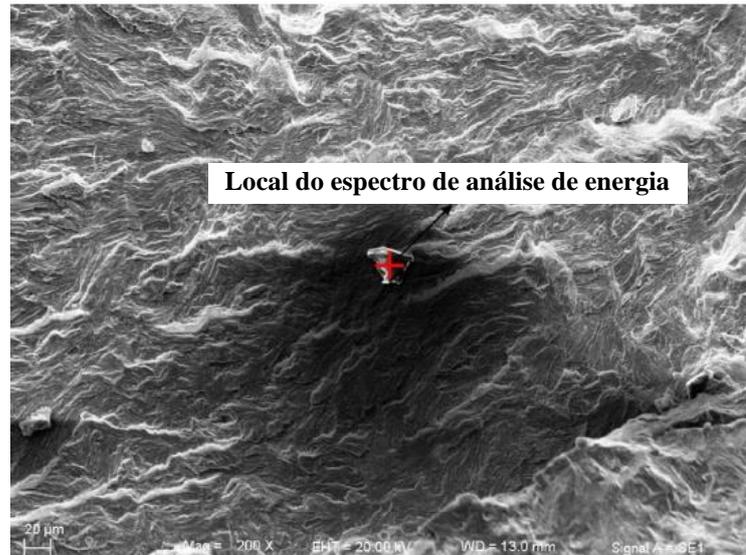


Figura 47: Região de propagação da trinca.
Fonte: Adaptado de X. ZHAO ET AL, 2015.

A Figura 48 mostra a região de nucleação de trincas por fadiga para as juntas soldadas pelo processo (II). Verificou-se que o lugar onde a trinca se inicia contém vários defeitos como inclusões e defeitos de superfície. Esta região de nucleação de trincas por fadiga não apresenta o modo de fratura transgranular, porque a posição da fratura por fadiga na junta soldada pelo processo (II) localiza-se no metal base. O aumento da força de recalque faz com que a interface de solda não seja um ponto crítico.

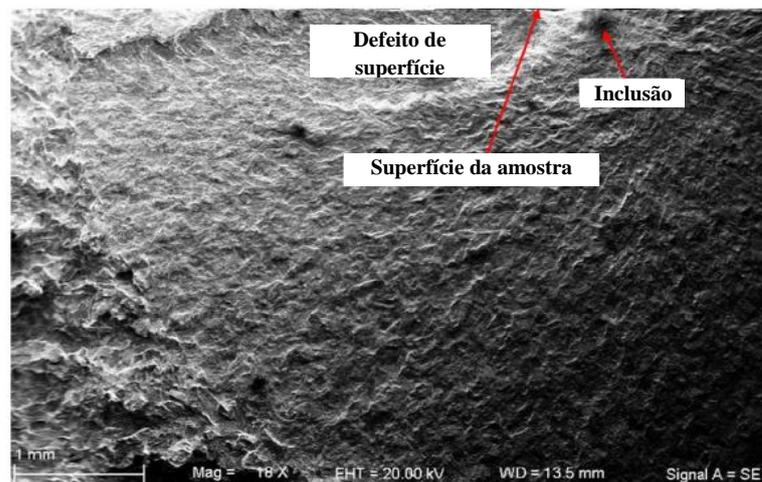


Figura 48: Região de nucleação de trinca nas juntas soldadas pelo processo (II).
Fonte: Adaptado de X. ZHAO ET AL, 2015.

Os resultados da análise de fratura por fadiga indicam que o aumento da força de recalque melhora a resistência da junta soldada por centelhamento, devido ao fato de a maior força de recalque expulsar o metal fundido, reduzir a temperatura da zona de solda e zona superaquecida, além de melhorar a microestrutura da zona de interface.

2.9. O MÉTODO DE TAGUCHI

O método de Taguchi tem como objetivo melhorar as características do processo ou de um produto, minimizando as variações do produto final, através da identificação e ajuste dos seus fatores controláveis. Ao ajustar os fatores no seu nível ótimo, os produtos podem ser fabricados de maneira a que se tornem mais robustos a eventuais mudanças que possam ocorrer e que tenham natureza incontrolável, por exemplo condições ambientais, variação de temperatura, etc. (CORREIA e CARDOZA, 2011)

O método de Taguchi propõe a determinação da “função perda” do produto e sua otimização por meio da implementação de técnicas de base estatística. Essas análises permitem identificar os parâmetros ótimos de projetos ou processos que minimizam ou até mesmo eliminam as influências de fatores que possam perturbar o desempenho do produto. (PHADKE, 1989)

De acordo com Ross (1991), a engenharia robusta caracteriza-se por melhorar as características do produto e do seu processo, minimizando os fatores responsáveis por provocar uma variação do produto final. Tais fatores são classificados como fatores de controle e fatores de ruído. Fatores de controle são aqueles cujas características são facilmente alteradas ou controladas, como tipo de material, tempo de ciclo, temperatura de molde, etc. Para cada um desses fatores há a possibilidade de se obter diversos valores, os quais são chamados de níveis. Já os fatores de ruído são aqueles cujo controle das características é muito difícil, caro e até impossível, como por exemplo umidade do ar, temperatura ambiente, corrosão, operação das máquinas e equipamentos, podendo, entretanto, influenciar no desempenho do sistema. Dessa forma, os fatores de controle e ruído resultam em uma variabilidade (perturbação) na função do produto e/ou do processo. (ROSS, 1991; SIMPSON, 2000)

Segundo Montgomery (2009), um planejamento fatorial deve estudar todas as combinações dos níveis de todos os fatores em cada rodada completa de experimento. Os experimentos fatoriais fracionados são utilizados para reduzir o número de testes, pois projetos de engenharia apresentam fatores em demasia, de forma que os custos e a quantidade de fatores pode tornar os experimentos inviáveis. Por esta razão Taguchi desenvolveu configurações especiais de experimentos fracionados, chamados de arranjos ortogonais, visando determinar o número mínimo de experimentos para um determinado número de fatores. Tais arranjos ortogonais são identificados pela letra “L” seguida de um número que indica a quantidade de experimentos, por exemplo, o arranjo ortogonal L4 necessita de 4 experimentos e permite a utilização de dois níveis para cada fator.

A Figura 49 fornece exemplos típicos de arranjos ortogonais, existem listas completas destes arranjos na literatura, como por exemplo em Phadke (1989). A seleção do arranjo mais adequado ao planejamento do experimento é feita com base na quantidade de fatores e interações que se deseja estudar (SIMPSON, 2000; ROY, 2010)

Arranjo Ortogonal	Número de Ensaios	Número de Níveis	Número Máximo de Fatores
L4	4	2	3
L8	8	2	7
L9	9	3	4
L12	12	2	11
L16	16	2	15
L18	18	3	8
L27	27	3	13
L32	32	2	31

Figura 49: Exemplo de arranjo ortogonal
Fonte: ROSS,1991.

De acordo com Guedes (1996), o seguinte arranjo ortogonal foi proposto por Taguchi (1989): um planejamento dos fatores ou parâmetros do experimento consistindo de duas partes - uma matriz dos fatores de controle (arranjo interno ou "inner array") e outra dos fatores de ruído (arranjo externo ou "outer array"). O conjunto dos fatores de controle do experimento são representados nas colunas da matriz arranjo interno e suas linhas representam os diferentes níveis dos fatores. Já as colunas da matriz arranjo externo representam o conjunto de fatores de ruído do experimento e suas linhas representam os diferentes níveis destes fatores. A Figura 50 mostra uma combinação das matrizes de arranjo interno e externo, representando um planejamento de parâmetro completo. Para cada rodada do experimento, a matriz dos fatores de controle é cruzada com todas as colunas da matriz de fatores de ruído, e o número total de elementos será o produto do número de linhas da matriz arranjo interno pelo número de linhas da matriz arranjo externo. As matrizes dos fatores são construídas a partir de arranjos ortogonais. (GUEDES, 1996)

Teste	Matriz dos Fatores de Controle				Matriz dos Fatores de Ruído			Característica Funcional	Estatística de Performance
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	N ₁	N ₂	N ₃		
1	1	1	1	1	→ 1	→ 1	→ 1	→ Y ₁	S/N ₁
					→ 1	→ 2	→ 2	→ Y ₂	
					→ 2	→ 1	→ 2	→ Y ₃	
					→ 2	→ 2	→ 1	→ Y ₄	
2	1	2	2	2	.	.	.	.	.
3	1	3	3	3	.	.	.	.	.
4	2	1	2	3	.	.	.	.	.
5	2	2	3	1	.	.	.	.	.
6	2	3	1	2	.	.	.	.	.
7	3	1	3	2	.	.	.	.	.
8	3	2	1	3	.	.	.	.	.
9	3	3	2	1	→ 1	→ 1	→ 1	→ Y ₁	S/N ₂
					→ 1	→ 2	→ 2	→ Y ₂	
					→ 2	→ 1	→ 2	→ Y ₃	
					→ 2	→ 2	→ 1	→ Y ₄	

Figura 50: Exemplo de um Planejamento de Fatores do Experimento
Fonte: GUEDES, 1996.

O método de Taguchi propõe que se analise a resposta média para cada combinação no arranjo interno, e que a variabilidade seja analisada escolhendo uma razão sinal-ruído (S/N) apropriada. Três padrões de razões S/N são amplamente empregadas: (PHADKE, 1989)

- 1) Nominal melhor (S/N_T): usada quando se deseja reduzir a variabilidade em torno de um valor nominal, em que o valor desejado deverá ser o mais próximo possível do seu valor nominal indicado ou especificado:

$$SN_T = 10 \cdot \log \left(\frac{\bar{y}^2}{S^2} \right) \quad (1)$$

- 2) Quanto maior melhor (S/N_L): usada quando se deseja maximizar os resultados, quanto maior for a variável resposta, melhor será o desempenho de um dado sistema:

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

- 3) Quanto menor melhor (S/N_S): usada quando se deseja minimizar os resultados, quanto menor for a variável resposta, melhor será o desempenho do sistema:

$$SN_S = -10 \cdot \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (3)$$

Assim, segundo Simpson (2000), uma vez que todas as razões S/N foram calculadas para cada execução de um experimento, Taguchi defende uma abordagem gráfica para analisar os dados. Na abordagem gráfica, as relações S/N e as respostas médias são plotadas para cada fator em relação a cada um de seus níveis. Os gráficos são então examinados para "escolher o vencedor", ou seja, escolher o nível de fator que melhor maximize S/N e, conforme o caso, maximize ou minimize a média.

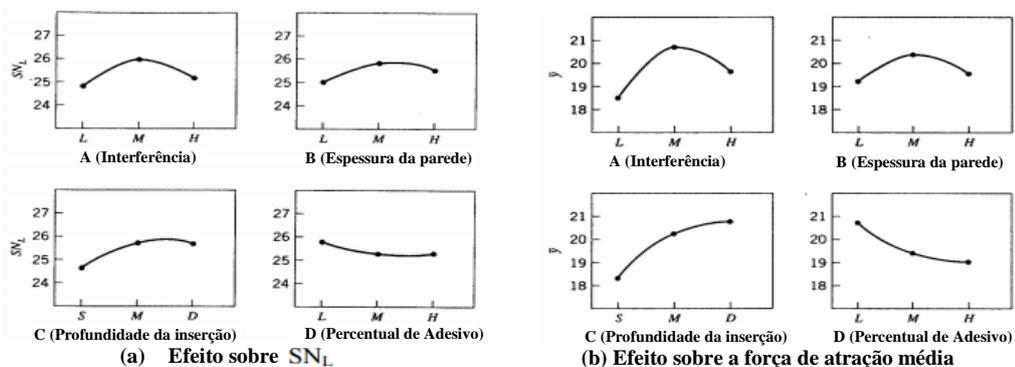


Figura 51: Efeito dos fatores de controle.

Fonte: Adaptado de SIMPSON,2000.

Moita (2007) propôs as seguintes etapas para a aplicação do Método de Taguchi:

- 1- O método Taguchi se inicia com a determinação do problema ou objetivo do experimento.
- 2- O segundo passo no método Taguchi é determinar qual a resposta a ser otimizada. A resposta é a característica cuja variação tem um efeito crítico na qualidade final do produto. É a variável de saída a ser estudada. Deve-se então decidir qual a característica de qualidade (nominal melhor, quanto maior melhor e quanto menor melhor) melhor se adapta à resposta escolhida e ao estudo em questão.
- 3- O próximo passo é a identificação dos fatores de ruído que possam ter um impacto negativo na qualidade do processo ou produto.
- 4- O quarto passo é a identificação dos fatores de controle que têm efeitos significativos na resposta escolhida. Os níveis para cada fator de controle devem ser escolhidos neste passo. O número de níveis, associados aos seus valores, para cada fator de controle definem os ensaios a serem realizados.
- 5- O próximo passo é a escolha do arranjo ortogonal, ou matriz de experimento, e a definição do procedimento de análise de dados. A matriz escolhida deve satisfazer o número de graus de liberdade suficiente para os parâmetros e respectivos níveis em estudo. Por exemplo, para estudar quatro parâmetros a três níveis cada, cada parâmetro tem dois graus de liberdade. Desta forma torna-se necessário a utilização de uma matriz L9, com oito graus de liberdade.
- 6- O próximo passo é a realização dos ensaios determinados pela matriz de arranjos ortogonais e o registro de todos os resultados obtidos no experimento. O experimento é realizado executando-se o conjunto completo de configurações de fatores de ruído em cada combinação de configuração de fator de controle (em cada rodada de experimento).
- 7- Depois de realizados os ensaios, determina-se a configuração ótima. Para analisar os resultados, o método Taguchi utiliza uma medida estatística chamada quociente de sinal de ruído (S/N). A obtenção dos valores do sinal de ruído está dependente da qualidade de característica desejada no projeto (nominal melhor, quanto maior melhor e quanto menor melhor). O quociente de sinal/ruído (S/N) só é utilizado quando o planejamento de ensaios é realizado com repetições. Esta medida permite não só encontrar os fatores de controle que permitam maximizar, minimizar ou centrar o

resultado num valor alvo, dependendo da qualidade de característica escolhida, como também escolher a condição mais robusta, ou seja, a que perante variações de fatores de ruído apresente melhores resultados.

- 8- O próximo passo é a aplicação da análise de variância. Esta é uma ferramenta estatística usada para interpretar resultados experimentais. A análise de variância permite que se conheça qual a importância de cada fator na variação de qualidade do produto ou processo.
- 9- Após ser encontrada a condição ótima e de prever a resposta para essa mesma condição, deverá ser realizado um ensaio de confirmação. Após a realização de todos os passos, se os resultados forem satisfatórios, ou seja, caso se verifique uma melhoria no processo, termina a análise com o método Taguchi. Caso os resultados não estejam dentro do esperado deve-se repetir todo o processo com diferentes desenhos experimentais.

Até então, o método de Taguchi foi abordado de forma preliminar, sendo introduzidos alguns conceitos básicos acerca dessa metodologia de experimento. Entretanto, no Capítulo 4: O Planejamento de Experimento, este assunto será novamente debatido, contudo de modo mais aprofundado.

3. MATERIAIS

Neste experimento foram utilizados 2 tipos de trilho:

- Tipo I: Trilho ferroviário com menos de 1,0% de teor de carbono na composição química, do tipo DHH, ou *Deep Head Hardened* (boleto endurecido profundamente) com dureza de 370 HB. Foram utilizados 17 trilhos;
- Tipo II: 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 17 trilhos.

As soldas foram realizadas por uma máquina de soldagem por centelhamento com as seguintes características:

- 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 para medir temperaturas de até 1100 °C, um equipamento de corte de trilhos por abrasão e um sistema de ultrassom manual.



Figura 52: Equipamento de corte de trilho por abrasão.
Fonte: Próprio autor.

4. O PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTO

Alguns conceitos sobre o método de Taguchi em planejamentos de experimentos já foram abordados na Revisão Bibliográfica, mas nesta seção será realizada uma análise mais minuciosa sobre este método a fim de proporcionar um sólido embasamento teórico para o planejamento de experimentos desenvolvido pela equipe de pesquisa. Este quarto capítulo foi inteiramente baseado no livro de Antony e Kaye (2000).

Cabe à equipe de pesquisa estudar o problema em questão e estabelecer os objetivos do experimento, formulando, dessa forma, as hipóteses que serão avaliadas pelo experimento. O planejamento de experimentos feito de forma incorreta pode resultar na obtenção de informações inválidas, caracterizando-se como inconclusivo. O primeiro passo na construção de um planejamento experimental é a determinação dos objetivos, que, para o presente trabalho, são:

1. Determinar quais variáveis do processo de centelhamento mais influenciam a qualidade da junta.
2. Determinar os níveis das variáveis que assegurem uma junta soldada sem defeitos.

O tamanho das unidades experimentais foram fixados em 200 mm, 100 mm à direita da linha de solda e 100 mm à esquerda. Este valor foi estabelecido com base nos conhecimentos teóricos e práticos da equipe e está de acordo com as recomendações da *American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association* (AREMA, 1999), que estabelece um tamanho mínimo de 152.4 mm para uma amostra de trilho que será submetida a ensaios mecânicos como, por exemplo, o de dureza.

As características de um processo que podem ser alteradas são denominadas fatores de controle ou variáveis independentes. Essas variáveis, ou fatores, podem apresentar divisões, denominadas níveis. Uma condição imposta, ou conjunto de condições, cujo efeito se deseja avaliar é chamada de tratamento. Algumas características, entretanto, não podem ser alteradas e variam de acordo com os fatores independentes, sendo chamadas de respostas. Além disso, quando o efeito de um fator sobre a variável de saída, ou resposta, depende do nível de outro fator, significa que existe uma interação entre esses eles. Em processos de manufatura complexos, as interações apresentam um papel importante e devem ser estudadas durante o experimento. Atualmente os experimentos fatoriais são os mais apropriados para este tipo de estudo, no qual todos os fatores são variados simultaneamente. Experimentos fatoriais podem ser de dois tipos:

1. Fatorial completo: Permite estudar todas as combinações de fatores em seus níveis, entretanto, em muitos casos, requer uma quantidade proibitiva de rodadas de experimentos e os custos de sua execução são demasiadamente elevados.
2. Fatorial fracionado: Utiliza-se apenas uma parte do tamanho total do experimento, ou seja, é necessário sacrificar informações e interações entre alguns fatores devido à limitação de tempo e recursos para a realização do experimento.

Quando se tem um número muito grande de fatores ou níveis, as combinações aumentam muito, demandando uma grande quantidade de tempo, recursos materiais, financeiros etc., o que inviabilizaria a realização do experimento. O método de Taguchi, discutido na seção 2.9, possibilita que um experimento com um número muito grande de fatores e níveis possa ser realizado. Observa-se que ao optar-se por um experimento fatorial fracionado, pode-se obter ou não estimativas confiáveis e independentes sobre os fatores principais e as interações, sendo necessário um conhecimento muito amplo sobre o processo a ser estudado e habilidades estatísticas para contornar este problema.

Além disso, por ter de abrir mão de algumas combinações e interações, é necessário um grande conhecimento sobre o processo de soldagem por centelhamento a fim de assegurar que as interações excluídas são aquelas que não apresentem efeitos significativos sobre a junta soldada. O projeto de experimentos fatorial fracionado desenvolvido por Taguchi baseia-se na construção de arranjos ortogonais, que são matrizes de números arranjados em linhas e colunas.

Cada linha representa os níveis dos fatores em um dado experimento e cada coluna representa um fator específico cuja influência na variável de resposta se deseja medir. Os arranjos ortogonais possuem uma propriedade de equilíbrio em que cada configuração de fator ocorre o mesmo número de vezes para cada um dos demais fatores do experimento. Por exemplo, conforme observa-se na Tabela 1, o fator A possui 2 níveis (1 e 2), e em sua coluna o nível 1 teve duas ocorrências, o que implica na ocorrência do nível 1 por duas vezes na coluna do fator B.

Tabela 1: Exemplo de arranjo ortogonal equilibrado.

<i>Número da rodada</i>	<i>Fator A</i>	<i>Fator B</i>
1	1	1
2	1	2
3	2	1
4	2	2

Fonte: Adaptado de ANTONY; KAYE (2000).

Além da soma dos códigos (+1 e -1) em cada coluna de fatores ser igual a 0, é necessário que a soma dos produtos de cada par de variável seja igual a 0, como se observa no exemplo da Tabela 2.

Tabela 2: Segundo exemplo de arranjo ortogonal equilibrado.

Número da Rodada	Tempo (min)	Temperatura (°C)	Produção
1	-1	-1	114
2	+1	-1	124
3	-1	+1	108
4	+1	+1	102

Fonte: Adaptado de ANTONY; KAYE (2000).

Arranjos ortogonais são representados pela seguinte notação:

$$L_a(b)^c$$

Onde a é o número de rodadas de experimentos, b o número de níveis de cada fator, e c o número de colunas (indicando o número de fatores que podem ser estudados) e a notação “L” indica que se trata de um arranjo ortogonal. Experimentos com dois fatores são os mais utilizados pela indústria devido à complexidade inerente ao projeto de experimentos e análise matemática dos resultados quando se utiliza três ou mais fatores. Entretanto, selecionar um arranjo ortogonal padrão não é uma tarefa simples, devendo-se seguir alguns passos. Primeiramente é necessário calcular o número total de graus de liberdade dos efeitos principais e interações, a seguir compara-se o total desses graus de liberdade com os graus de liberdade dos arranjos ortogonais, devendo-se escolher aquele com o número de graus de liberdade mais próximo, porém maior ou igual, do requerido pelo experimento.

Em estatística, grau de liberdade é o número de observações que podem ser variadas independentemente umas das outras, retratando o número de comparações verdadeiras e independentes que podem ser feitas em um conjunto de dados. No projeto de experimentos, o número de graus de liberdade de um fator é igual ao número de níveis do fator menos um. Se um fator possui dois níveis, logo o número de graus de liberdade será um. Para um arranjo ortogonal, temos que o número de graus de liberdade é igual ao número de rodadas de experimento menos um. Para utilizar um arranjo ortogonal padrão, o número de graus de liberdade do arranjo ortogonal deve ser maior ou igual ao número total de graus de liberdade associados com os fatores. Além disso é importante definir que o número de graus de liberdade

de uma interação é igual ao produto entre os graus de liberdade de cada um dos fatores individuais envolvidos na interação.

Ao escolher variáveis independentes que não possuem relação direta com as variáveis de resposta, ou que as influenciem muito pouco, o resultado do experimento fornecerá informações de pouca utilidade, caracterizando-se como inconclusivo. Ou seja, esta é uma das principais etapas do planejamento de experimentos e exige um amplo conhecimento do processo estudado e de todas as suas variáveis. Parte importante da seleção de fatores e interações a serem estudados no processo, de acordo com Taguchi, é a realização de reuniões em pequenos grupos formados por pessoas com grande entendimento do processo em questão e também de estatística.

Todos os envolvidos devem opinar acerca dos fatores que considerem importantes, expondo para o grupo suas razões para determinada escolha. Nenhum fator ou interação deve ser rejeitado de imediato, somente após todos terem se manifestado. Isso é importante pois muitas vezes a visão do pesquisador está correta, mas seu entendimento possui uma perspectiva limitada. Expondo as ideias perante o grupo, todos os membros envolvidos no experimento conseguem atingir um entendimento comum do processo em estudo.

Cada possível fator deve ser criticamente examinado ao término da reunião a fim de selecionar aqueles que farão parte do experimento. No presente estudo, o histórico de falhas em trilhos, o conhecimento prévio acerca do processo de soldagem por centelhamento bem como sobre a metalurgia de solda, nortearam a escolha dos fatores de controle e seus níveis. Para justificar a escolha das variáveis do presente experimento bem como seus respectivos níveis deve-se levar em consideração:

1. A soldagem por centelhamento é dividida, conforme amplamente discutido no Capítulo 2, em pré-aquecimento, centelhamento e recalque.
2. O procedimento de soldagem utilizado pela empresa permite a configuração da etapa de pré-aquecimento e de recalque.

As variáveis do pré-aquecimento que podem ser alteradas na máquina são a quantidade de pulso e a corrente de pulso. Os níveis inferior e superior são os valores mínimo e máximo, respectivamente, que podem ser configurados na máquina. 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. O valor máximo da corrente durante o pulso corresponde à variável corrente de pulso.

As principais variáveis do recalque são a força e distância de recalque, mas apenas a força pode ser alterada no equipamento, de forma que a distância de recalque alcançada será função do gradiente de temperatura resultante do centelhamento e da força de recalque utilizada, ou seja, é uma variável de resposta. O nível inferior e superior da força de recalque foi baseado no procedimento de soldagem habitual adotado pela empresa. A influência da força de recalque sobre a microestrutura e propriedades mecânicas do trilho foi extensivamente discutida na Revisão Bibliográfica, de maneira que este efeito não poderia ser excluído do experimento.

O carbono equivalente, que é uma medida do teor de carbono de uma liga de aço, foi o último fator escolhido pois a empresa utiliza trilhos de dois fornecedores e suas características se encontram no capítulo 3, os níveis inferior e superior representam o teor de carbono de cada tipo de trilho. A Tabela 3 apresenta os fatores de controle escolhidos e seus respectivos níveis. A inclusão dos fatores de ruído no experimento o tornaria impraticável para o ambiente industrial, pois elevaria demasiadamente o número de rodadas do experimento e, conseqüentemente, o número de amostras. Portanto, os fatores de ruído não serão utilizados no presente experimento.

Tabela 3: Níveis das variáveis.

FATORES	NIVEL INFERIOR	NIVEL SUPERIOR
CORRENTE DE PULSO	60 KA	80 KA
QUANTIDADE DE PULSOS	8	13
FORÇA DE RECALQUE	550 KN	650 KN
CARBONO EQUIVALENTE	DHH(<1,0%)	UHC(>1,2%)

Fonte: Próprio autor.

Em relação aos fatores de resposta, suas escolhas seguiram o mesmo método utilizado na definição das variáveis de controle. De acordo com o conhecimento da equipe de pesquisa acerca da metalurgia da soldagem e baseando-se na literatura existente, como por exemplo em Marques (2011), *American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association* (AREMA, 1999) e *American Welding Society* (2013) alguns dos fatores mais relevantes para caracterização de uma junta soldada são:

1. Dureza: Será levantado o perfil de dureza da junta.
2. Zona Termicamente Afetada (ZTA): Será medido o comprimento da ZTA.
3. Resistência à tração e limite de escoamento: Serão obtidos por ensaio de tração.
4. Microestrutura: Composição micro estrutural e tamanho de grão.
5. Carga de fratura: Obtida através de ensaio flexão.

Todos os fatores de resposta foram abordados na Revisão Bibliográfica, onde se encontram imagens e descrições de microestruturas, a relação da microestrutura com o perfil de dureza do trilho e sua consequente influência nas propriedades mecânicas do mesmo. Portanto, mediante a leitura da Revisão Bibliográfica, é possível assimilar a influência de cada uma das variáveis de saída acima mencionadas no que tange à ocorrência de trincas e defeitos internos. Vale destacar que as respostas devem permitir a medição da qualidade do processo ou produto, além de serem simples de medir, condições que são atendidas pelos fatores selecionados.

Ao escolher mais de uma resposta de interesse é importante ressaltar que é possível que a configuração de fatores que resultem em melhoria de uma resposta pode resultar na degradação de outra resposta, a fim de atenuar estes efeitos é importante identificar um fator que afeta uma característica de saída mas não outras. Caso, ao final do experimento, a equipe se depare com esta situação, Antony e Kaye (2000) recomendam priorizar as respostas de acordo com os seguintes critérios:

1. Qualidade;
2. Economia de recursos;
3. Facilidade de configuração dos fatores.

Selecionar as respostas corretas a serem medidas definirão o sucesso do experimento, pois selecionar as características erradas para serem mensuradas ou então selecionar respostas muito difíceis ou até impossíveis de serem medidas tornarão o experimento inconclusivo.

O arranjo ortogonal que permite o estudo de quatro fatores de controle, cada um com dois níveis, é o L_8 , que possui oito linhas e sete colunas. Quatro dessas colunas serão, portanto, reservadas para os fatores de controle e as 3 restantes serão destinadas às interações. Os graus de liberdade de cada fator desse experimento é igual a um, e como as interações envolvem fatores com apenas um grau de liberdade cada, temos que cada interação também possui um único grau de liberdade, resultando assim em um experimento com 7 graus de liberdade. O arranjo ortogonal L_8 possui exatamente 7 graus de liberdade, se mostrando adequado à realização deste estudo.

A fim de facilitar atribuição de fatores e suas interações entre as colunas de um arranjo ortogonal, Taguchi desenvolveu uma ferramenta gráfica denominada gráfico linear, composto por pontos e linhas. Um ponto representa um fator principal e a linha que conecta dois pontos representa a interação entre os fatores correspondentes. Cada ponto e cada linha possui uma coluna distinta associada a eles no arranjo ortogonal. Tanto os modelos de arranjos ortogonais quanto os de gráficos lineares a eles relacionados são encontrados na literatura.

Para um arranjo ortogonal L_8 um gráfico linear padrão é mostrado na Figura 53:

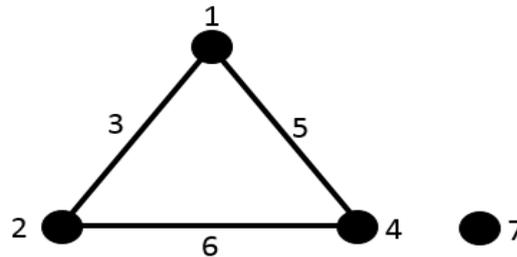


Figura 53: Gráfico Linear para o arranjo ortogonal L_8 .
Fonte: ANTONY; KAYE (2000).

O gráfico linear acima mostra que os efeitos principais a serem estudados devem ser atribuídos às colunas 1, 2, 4 e 7 do arranjo ortogonal e as colunas 3, 5 e 6 representam os efeitos das interações que podem ser estudados utilizando este modelo. O grande problema destes gráficos lineares é que eles não fornecem relações completas entre fatores ou interações, ou seja, os gráficos lineares não são capazes de mostrar a interação entre cada par de colunas do arranjo ortogonal. Desta forma é possível que um experimento não seja capaz de determinar o verdadeiro efeito de um fator ou suas interações com outros fatores.

Uma forma de resolver esse problema é através de tabelas triangulares. As tabelas triangulares fornecem informações sobre as interações das várias colunas do arranjo ortogonal e também são encontradas na literatura. Uma tabela triangular para um arranjo ortogonal L_8 é mostrada na Tabela 4.

Tabela 4: Tabela triangular para o arranjo ortogonal L_8 .

Coluna	Coluna						
	1	2	3	4	5	6	7
1	[1]	3	2	5	4	7	6
2		[2]	1	6	7	4	5
3			[3]	7	6	5	4
4				[4]	1	2	3
5					[5]	3	2
6						[6]	1
7							[7]

Fonte: Adaptado de ANTONY; KAYE (2000).

A tabela acima deve ser interpretada da seguinte maneira: considerando a coluna 4, o primeiro elemento é o 5, que é a interação entre as colunas 1 e 4 no arranjo ortogonal. O segundo elemento da coluna 4 é o 6, que é a interação entre as colunas 2 e 4 e assim sucessivamente. Uma informação de grande importância é que é possível observar através da tabela triangular acima, que a coluna 7 é também a interação entre as colunas 2 e 5, 1 e 6, 3 e 4. Essa informação não pode ser obtida através do gráfico linear e mostra que a atribuição dos fatores à cada coluna do arranjo ortogonal deve ser feita com muita cautela, pois matematicamente a interação entre

as colunas 1 e 2 sempre será a 3, independentemente se o fator 1 é a corrente de pulso e 2 a força de recalque, ou se o fator 1 é a quantidade de pulso e 2 a corrente de pulso.

Portanto, exige-se um amplo conhecimento do processo para saber quais as interações são de interesse e é necessário um amplo conhecimento estatístico para atribuir corretamente as variáveis no arranjo ortogonal de modo a assegurar o estudo das interações de interesse, que no presente trabalho serão:

1. Corrente de pulso x Quantidade de pulso;
2. Corrente de pulso x Força de recalque;
3. Quantidade de pulso x Força de recalque.

As interações acima serão estudadas para os dois níveis de carbono equivalente, assim, de acordo com o gráfico linear escolhido para este experimento (Figura 53), será possível estudar todas as interações entre os demais fatores para cada tipo de trilho, desde que o carbono equivalente seja atribuído à coluna 7. Logo, as atribuições dos fatores e interações entre as colunas do arranjo ortogonal devem obedecer à seguinte ordem:

1. Corrente de pulso (Fator Principal)
2. Quantidade de pulso (Fator Principal)
3. Corrente de pulso x Quantidade de pulso (Interação)
4. Força de recalque (Fator Principal)
5. Corrente de pulso x Força de recalque (Interação)
6. Quantidade de pulso x Força de recalque (Interação)
7. Carbono Equivalente (Fator Principal)

A figura abaixo representa o arranjo ortogonal L_8 construído para este trabalho, respeitando-se o princípio de equilíbrio dos arranjos ortogonais e a atribuição das colunas conforme determinado acima.

Rodada	FATORES E INTERAÇÕES							RESPOSTAS			
	1	2	3	4	5	6	7	Y1	Y2	Y3	Y4
1	-	-	-	-	-	-	-				
2	-	-	-	+	+	+	+				
3	-	+	+	-	-	+	+				
4	-	+	+	+	+	-	-				
5	+	-	+	-	+	-	+				
6	+	-	+	+	-	+	-				
7	+	+	-	-	+	+	-				
8	+	+	-	+	-	-	+				

Figura 54: Arranjo ortogonal L_8 do experimento.

Fonte: Próprio autor.

Deverão ser realizadas quatro replicações para cada condição de configuração dos fatores. Existe uma diferença entre repetição e replicação. Na repetição a rodada do experimento deve ser repetida antes de prosseguir para a próxima rodada no planejamento do experimento, por exemplo, se a sequência de experiências é 3, 1, 4 e 2, então a rodada 3 deve ser executada duas vezes seguida, logo após a rodada 1 deve ser executada duas vezes seguidas e assim por diante. Já na replicação todas as rodadas do experimento são feitas em ordem aleatória. A replicação possui resultados com mais informação que os obtidos com a repetição, pois a replicação detém a variação nos resultados devido à configuração física do experimento, reduzindo o efeito de fatores indesejáveis induzidos no experimento, mas aumentando seu custo. O número de graus de liberdade em experimentos com replicação ou repetição é igual ao resultado da multiplicação entre o número de repetições e o número de experimentos, subtraído de um.

Além da repetição ou replicação, a aleatorização também possui papel essencial em um experimento. Em ambientes industriais sempre existem fatores como problemas com flutuações na rede de energia, erros do operador, além de outros fatores externos como umidade, vibração, etc. que podem influenciar no resultado, mas não estão incluídos no planejamento de experimentos porque são muito difíceis de se controlar ou são desconhecidos. Uma maneira simples de reduzir o efeito prejudicial desses fatores é através do uso da aleatorização. Com a utilização deste conceito, todos estes efeitos podem ser igualmente distribuídos entre todas as combinações de tratamentos do experimento. Ou seja, todos os níveis de um fator possuem a mesma chance de serem afetados por fontes externas de variação.

Entretanto, pode ser completamente impraticável aplicar o conceito de aleatoriedade na indústria, devendo-se, nestes casos, optar-se pela aleatorização restrita, que fornece proteção contra fontes externas e sem impor dificuldades que inviabilizam a realização do experimento. No caso deste experimento, por exemplo, seria inviável inserir dois trilhos de alto carbono na linha de produção para em seguida introduzir dois trilhos de baixo carbono para serem soldados. Demandaria muito tempo e muito trabalho manual para substituição dos trilhos. Dessa forma optou-se por inserir todos os 16 trilhos de baixo carbono e aleatorizar as rodadas de experimentos entre estes trilhos. Após a soldagem dos 16 trilhos do Tipo I será adotado o mesmo procedimento com os trilhos do Tipo II: As rodadas de experimentos serão sorteadas e executadas conforme o planejamento estabelecido, caracterizando-se, dessa forma como uma aleatorização restrita.

A ordem aleatória, obtida através de sorteio, segundo a qual as soldagens foram realizadas está representada na Tabelas 5 (para trilhos do Tipo I) e Tabela 6 (para trilhos do Tipo II). A construção dessas tabelas é muito útil para o acompanhamento do experimento.

Tabela 5: Planejamento de Experimento Para o Trilho TIPO I.

PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTO PARA O TRILHO TIPO I			
RODADA DO EXPERIMENTO	CORRENTE DE PULSO	QUANTIDADE DE PULSO	FORÇA DE RECALQUE
SOLDA 1	-	-	-
SOLDA 2	-	+	+
SOLDA 3	+	-	+
SOLDA 4	+	+	-
SOLDA 5	+	-	+
SOLDA 6	+	+	-
SOLDA 7	-	+	+
SOLDA 8	-	-	-
SOLDA 9	+	-	+
SOLDA 10	+	+	-
SOLDA 11	-	-	-
SOLDA 12	-	+	+
SOLDA 13	-	-	-
SOLDA 14	+	+	-
SOLDA 15	+	-	+
SOLDA 16	-	+	+

Fonte: Próprio autor.

Tabela 6: Planejamento de Experimentos Para o Trilho TIPO II.

PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTO PARA O TRILHO TIPO II			
RODADA DO EXPERIMENTO	CORRENTE DE PULSO	QUANTIDADE DE PULSO	FORÇA DE RECALQUE
SOLDA 1	-	-	+
SOLDA 2	-	+	-
SOLDA 3	+	-	-
SOLDA 4	+	+	+
SOLDA 5	+	-	-
SOLDA 6	-	-	+
SOLDA 7	-	+	-
SOLDA 8	+	+	+
SOLDA 9	-	+	-
SOLDA 10	+	+	+
SOLDA 11	+	-	-
SOLDA 12	-	-	+
SOLDA 13	-	+	-
SOLDA 14	-	-	+
SOLDA 15	+	+	+
SOLDA 16	+	-	-

Fonte: Próprio autor.

4.1. ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DAS RESPOSTAS DO EXPERIMENTO

Para iniciar a análise e interpretação dos dados no método de Taguchi, os fatores devem ser expressos não por seus valores mas por códigos indicando um nível alto e baixo, por exemplo +1 e -1. Antes de se calcular o efeito principal de um fator deve-se assegurar que o arranjo ortogonal está balanceado ou equilibrado.

O efeito principal de um fator pode ser medido através da equação:

$$\text{Efeito do fator} = \text{Média das respostas no nível alto} - \text{Média das respostas no nível baixo} \quad (4)$$

O sinal desse resultado dirá a direção do efeito, ou seja, se a resposta será crescente ou decrescente. Se o sinal é positivo, significa que a resposta média no nível alto é maior que a resposta média no nível baixo. Os efeitos dos fatores principais são representados graficamente como se observa na figura abaixo:

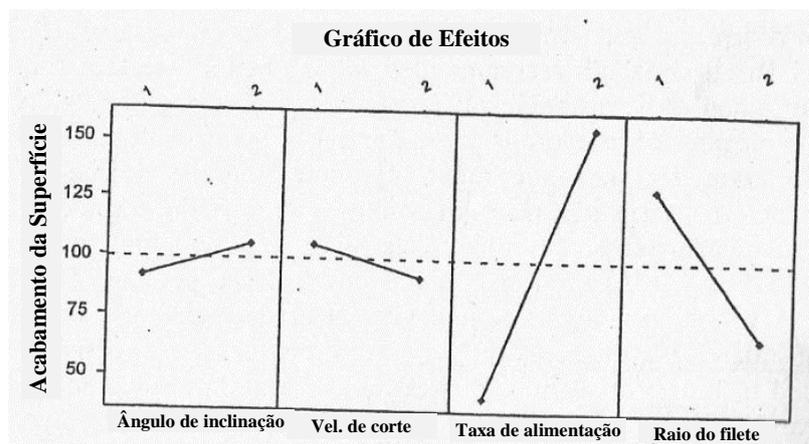


Figura 55: Efeitos dos fatores representados graficamente.

Fonte: Adaptado de ANTONY; KAYE (2000).

Caso o efeito de um fator sobre a resposta seja o mesmo sob diferentes níveis de um outro fator então não há interação entre eles. Entretanto caso o nível de um fator A interfira no efeito de fator B na resposta, então há interação entre eles e o efeito desta interação pode ser calculado pela equação:

$$\text{Efeito da interação} = (1/2) * (\text{Efeito de A no nível alto de B} - \text{Efeito de A no nível baixo de B}) \quad (5)$$

Outra forma de encontrar o efeito da interação é multiplicando as colunas, codificadas em +1 e -1, dos fatores A e B por exemplo. Após obter a coluna da interação basta calcular a média das respostas nos níveis alto e baixo da coluna AB. A diferença entre essas médias resultam no efeito da interação entre esses fatores. Os efeitos das interações também são

representados graficamente. Nesse caso, os valores das respostas (ou média das respostas, caso haja replicações) são plotados para cada nível de combinação entre os fatores. Um gráfico de interação apresenta os valores médios das respostas em cada nível de interação dos fatores. Se as linhas são paralelas não há interação entre os fatores, mas se elas se cruzarem significa que existe interação entre eles, como se observa na Figura 56.

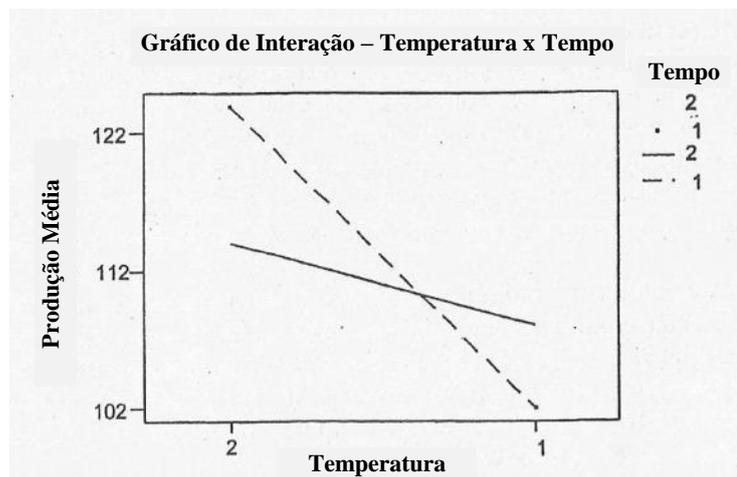


Figura 56: Gráfico de interação entre 2 fatores.
Fonte: Adaptado de ANTONY; KAYE (2000).

Tabela 7: Tabela da interação representada na Figura 56.

Temperatura (Te)	Tempo (Ti)	Te x Ti	Produção
1	1	1	102
1	2	2	108
2	1	2	124
2	2	1	114

Fonte: Adaptado de ANTONY; KAYE (2000).

Após os efeitos dos fatores principais e das interações serem estimados, o próximo passo é determinar quais desses efeitos são estatisticamente significantes. A principal ferramenta analítica para esta etapa é a análise de variância (ANOVA). A Anova, no contexto de experimentos com arranjos ortogonais, é muito útil para subdividir a variação total em variação devido aos efeitos principais, aos efeitos das interações e devido ao erro. Os resultados são então dispostos na Tabela Anova, que geralmente possui os seguintes elementos:

1. Origem da variação: Representa os componentes como efeitos principais, efeitos de interação, efeitos do erro que contribuem para a variância total.
2. Soma de Quadrados: A soma dos quadrados representa uma medida de variação ou desvio da média. A soma dos quadrados devido aos efeitos principais e de interação é uma medida da variabilidade causada pelos fatores ou suas interações.

3. Graus de liberdade: Os graus de liberdade dos fatores e interações já foi definido anteriormente. Além deles, 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.
4. Média de quadrados: É obtida dividindo a soma de quadrados pelo número de graus de liberdade associados aos efeitos do fator.
5. 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. Para arranjos ortogonais com fatores de dois níveis, um grau de liberdade é sempre igual à unidade (1) e o outro dependerá do número de graus de liberdade do erro. Dados estes dois parâmetros e um nível de significância, é possível obter o valor crítico de F à partir de tabelas disponíveis na literatura. O nível de significância representa a probabilidade do efeito observado ser devido puramente ao acaso, ou seja, é o risco de dizer que um fator é significativo, quando na verdade ele não é. Em projetos de experimentos este valor geralmente é de 1% ou 5%, o que significa que o nível de confiança do efeito de um fator ser estatisticamente significativo é de 99% ou 95%, respectivamente. Um fator é considerado estatisticamente significativo se o valor do F calculado for maior que o valor do F crítico.
6. Contribuição percentual: Mede a contribuição real da variação percentual de um fator sobre a variação total.

Um exemplo de tabela ANOVA pode ser visualizado na figura a seguir:

Tabela 8: Exemplo 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
Erro Combinado	35	0.42	0.012	—	6.92
Total	39	6.79	—	—	100

Os valores tabelados do F-crítico são: $F_{0.05,1,35} = 4.13$ and $F_{0.01,1,35} = 7.44$.

Fonte: Adaptado de ANTONY; KAYE (2000).

Quando se realizam repetições ou replicações deve-se proceder a análise da razão sinal-ruído, mesmo que não seja utilizado um arranjo com as condições de ruído, conforme discutido na Revisão Bibliográfica. O objetivo dessa análise é determinar a melhor configuração do fator de controle que diminuirá o efeito dos fatores de ruído no processo. A escolha da configuração ótima do fator de controle que é menos sensível a fatores de ruído é facilitada quando se utiliza a análise da razão sinal-ruído. Deve-se escolher entre uma das razões sinal-ruído que melhor se adaptem à característica de qualidade desejada. Como por exemplo, se o objetivo de um experimento é reduzir os efeitos de um desbalanceamento, deve-se utilizar a característica de qualidade “Quanto menor, melhor”. Cada uma dessas características de qualidade possuem uma forma de cálculo, conforme abordado também na Revisão Bibliográfica. Após encontrar os valores da razão sinal-ruído desejada e apresentá-los em uma tabela, conforme a Tabela 9, deve-se calcular os efeitos dos fatores principais e das interações baseados nesses valores encontrados. O cálculo desses efeitos é análogo ao cálculo da resposta média, descrito anteriormente.

Tabela 9: Exemplo de tabela com os valores da razão sinal-ruído (SNR).

Número da Rodada	SNR
1	4.39
2	1.16
3	6.16
4	-3.33
5	-2.431
6	0.228
7	-3.73
8	5.90

Fonte: Adaptado de ANTONY; KAYE (2000).

Após encontrar os efeitos dos fatores procede-se com a análise de variância sobre a razão sinal-ruído. A ANOVA para a razão sinal-ruído é muito similar à análise de variância para respostas sem repetições ou replicações. Como a razão sinal-ruído representa uma única medida de performance, é necessário uma técnica de agrupamento de efeitos com pouca significância para se obter adequados graus de liberdade para o erro. Deve-se agrupar esses fatores até que o número de graus de liberdade do erro seja aproximadamente a metade do total de graus de liberdade, já que sem variância de erro não é possível calcular o valor da estatística F. Após a análise de variância sobre a razão sinal-ruído, será possível identificar os efeitos dos fatores que possuem uma influência significativa no valor médio da razão sinal-ruído e posteriormente reduzir a variação.

A última etapa da análise de dados é a determinação da configuração ótima dos parâmetros do processo e estimar a resposta sob esta condição. Para determinar a configuração ótima deve-se seguir os seguintes passos:

1. Construir a tabela de resposta média, que mostra as médias dos valores das respostas nos níveis alto e baixo para cada fator.
2. Construir a tabela com os valores médios da razão sinal-ruído nos níveis alto e baixo para cada fator.
3. Construir a tabela ANOVA para a resposta média e para a razão sinal-ruído para determinar quais desses efeitos são estatisticamente significantes.
4. Após identificar quais fatores são significantes, obter a melhor configuração de fatores baseada na tabela de resposta média.
5. Determinar a melhor configuração dos fatores baseada na tabela dos valores médios da razão sinal-ruído.
6. Selecionar os níveis dos fatores insignificantes visando economia e conveniência.

Para se obter um valor estimado da resposta sob as condições ótimas utilizam-se apenas os fatores e interações significativas, ou seja, os fatores ou interações que não são estatisticamente significativos não são levados em consideração para encontrar a equação de estimativa da resposta. Por exemplo, em um experimento com três fatores A, B e C, com dois níveis cada, a análise de variância para resposta média e razão sinal ruído mostrou que os fatores A e C são estatisticamente significantes. Supondo que o objetivo de tal experimento fosse maximizar a resposta e o nível ótimo da configuração dos fatores seja A (nível alto), B (nível baixo) e C (nível alto). Logo a resposta estimada será baseada apenas nos fatores A e C, sendo encontrada pela seguinte equação:

$$\hat{\mu} = \bar{T} + (\text{nível ótimo do fator A} - \bar{T}) + (\text{nível ótimo do fator C} - \bar{T}) \quad (6)$$

Onde $\hat{\mu}$ é o valor estimado da resposta, \bar{T} é a média entre todas as respostas do experimento. Nesse exemplo, seja A_1 o nível baixo do fator A e A_2 seja o nível alto, então a resposta estimada é:

$$\hat{\mu} = \bar{T} + (A_2 - \bar{T}) + (C_2 - \bar{T})$$

$$\hat{\mu} = A_2 + C_2 - \bar{T}$$

Se desejarmos estimar o SNR, então devemos substituir $\hat{\mu}$ por $S\hat{N}R$ e \bar{T} será a média entre todos os valores calculados da razão sinal-ruído (SNR). Entretanto, suponhamos nesse exemplo que a interação AC é significativa para o experimento. Neste caso é importante identificar a melhor combinação da interação AC. Considerando que entre as interações A_1C_1 , A_1C_2 , A_2C_1 e A_2C_2 a melhor combinação seja A_2C_2 , então a equação para estimar a resposta deve ser modificada:

$$\hat{\mu} = \bar{T} + (A_2 - \bar{T}) + (C_2 - \bar{T}) + [(A_2C_2 - \bar{T}) - (A_2 - \bar{T}) - (C_2 - \bar{T})]$$

$$\hat{\mu} = A_2C_2$$

Por fim deve-se encontrar o intervalo de confiança onde o resultado estimado é válido, vale ressaltar que níveis de confiança muito altos resultam em intervalos de confiança muito estreitos. O valor do intervalo de confiança é dado por:

$$CI = \pm \sqrt{\frac{F(\text{nível de confiança}, 1, \text{graus de liberdade do erro}) \times \text{Variância do erro}}{N_e}} \quad (7)$$

Onde $F(\text{nível de confiança}, 1, \text{graus de liberdade do erro})$ é o valor de tabela da estatística F em função do nível de confiança (geralmente 95% ou 99%), dos graus de liberdade do numerador (igual a 1 para experimentos com dois níveis) e dos graus de liberdade do erro. N_e é o número efetivo de replicações, dado pela fórmula:

$$N_e = \frac{\text{Número total de respostas medidas (ou número de valores SNR calculados)}}{1 + \text{graus de liberdade dos fatores usados na equação}} \quad (8)$$

Idealmente, deve-se realizar um experimento de confirmação que é usado para verificar se a configuração ótima dos fatores ou interações encontrada fornece resultados próximos daqueles previstos pela equação de resposta estimada. No caso do projeto Cátedra Roda-Trilho não estão previstos os experimentos de confirmação, ficando como sugestão sua realização em etapas futuras do projeto.

5. REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO

As soldas foram realizadas na cidade de São Luís (MA), no recém inaugurado estaleiro de soldas da empresa. Todo o processo de alteração das variáveis de solda foi supervisionado pela equipe de pesquisa, assegurando o cumprimento das condições planejadas para cada rodada do experimento. É importante frisar que no processo de fabricação usual da empresa são soldados 10 trilhos de 24 m cada, totalizando 9 soldagens por centelhamento para cada trecho de 240 m de trilho. Para este experimento, excepcionalmente, fabricou-se um trecho de 408 m de trilho, totalizando 16 soldas em 17 trilhos.

No trilho Tipo I utiliza-se um processo resfriamento com duração de 60 segundos logo após a soldagem por centelhamento, apesar de não ser escopo desta fase do projeto, foram coletados dados a respeito do uso do resfriamento da junta. A intenção inicial era medir a temperatura da solda logo após o recalque, com o trilho ainda na máquina de soldagem, e medir a temperatura após a etapa de resfriamento. Entretanto a temperatura após o recalque ultrapassava o limite de medição do pirômetro, como consequência a junta soldada teve sua temperatura medida ao sair da máquina de solda e ao final do processo de resfriamento. Estas medições se encontram na Tabela 10, mas podem ser utilizadas apenas como instrumento de identificação de possíveis fatores ou procedimentos que devem ser estudados, entendidos ou aprimorados. Isto se deve ao fato de ter havido uma variabilidade excessivamente grande no processo de medição dos tempos e temperaturas da próxima tabela, invalidando estes dados para utilização em um estudo estatístico.

Tabela 10: Resultados das medições dos tempos de resfriamento das soldas do trilho Tipo I.

Solda	Tempo até Início do resfriamento [s]	Temperatura Antes do Resfriamento [°C]	Temperatura Após Resfriamento [°C]
1	1:32	890	688
2	1:30	933	765
3	1:25	860	690
4	5:36	956	700
5	1:53	845	653
6	1:26	998	880
7	1:33	893	836
8	1:24	876	730
9	1:54	884	792
10	1:23	1041	921
11	1:42	822	641
12	1:40	855	749
13	1:49	830	643
14	2:45	920	750
15	1:26	854	736
16	3:45	785	629

Fonte: Próprio autor.

Com todas as 16 soldas no trilho Tipo I realizadas o próximo passo é o corte das amostras. Inicialmente, com o trilho parado na linha de fabricação e as juntas já a temperatura ambiente, utilizou-se um marcador industrial para identificar cada amostra através da inscrição de um código no patim do trilho. Esse código era composto pela letra D, simbolizando o trilho do tipo DHH, e o número da solda, de acordo com a Tabela 5. Por fim, o trilho foi recuado em direção ao aparelho de corte por abrasão, que era operado por dois funcionários.

O procedimento de corte foi simples: com o trilho parado os operadores utilizavam uma trena para medir o tamanho da amostra definido no planejamento de experimento e marcavam com um giz os locais de corte (100 mm à direita e 100 mm à esquerda da linha de solda). Um funcionário era responsável por ligar e desligar o aparelho enquanto o outro procedia os cortes, este processo está ilustrado na Figura 57.

Devido ao fato de o posicionamento do aparelho de corte não ser muito preciso houve uma variação no tamanho das amostras, de modo que a menor peça mediu aproximadamente 170 mm e a maior mediu cerca de 220 mm, ambas acima do limite estabelecido pela norma AREMA (1999). Após o corte de cada junta soldada, as amostras foram separadas na ordem de corte, conforme a Figura 58, e os trilhos retornavam ao início da linha de produção para serem retirados.



Figura 57: Procedimento de corte de trilhos por abrasão.
Fonte: Próprio autor.



Figura 58: Amostras do trilho Tipo I separadas.
Fonte: Próprio autor.

De acordo com o procedimento de soldagem da empresa, os trilhos de alto carbono não sofrem processo de resfriamento, essa é a única diferença das condições de soldagem entre os dois tipos de trilho deste experimento, os níveis dos parâmetros não sofreram alterações e apenas a sequência das soldas foi modificada, conforme estipulado na Tabela 6, com o intuito de garantir a aleatoriedade restrita do experimento. O ideal seria utilizar ou não o resfriamento em ambos os tipos de trilho, variando-se apenas o teor de carbono, entretanto o objetivo primário dessa pesquisa não é alterar o procedimento de soldagem da empresa, mas sim estabelecer a melhor configuração de soldagem para trilhos de diferentes teor de carbono. Dessa forma, a equipe de pesquisa decidiu empregar as condições habituais de fabricação no estaleiro de solda.

5.1. RESPOSTAS DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

A execução dos ensaios para obtenção das respostas do planejamento não é objeto desse trabalho. Será feita apenas uma descrição dos ensaios que deverão ser executados nos corpos de prova já soldados. Todas as informações e especificações a seguir foram retiradas da norma AREMA (1999), volume 1 “*Track*”, em seu capítulo 4 “*Rail*”, parte 2 “*Specifications*”.

1. Perfil De Dureza: De acordo com a AREMA (1999), os valores de dureza devem obtidos através de ensaios de dureza descritos pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM), utilizando o método Brinell (ASTM E10 *Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials*), Rockwell (ASTM E18 *Standard Test Method for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials*) ou Vickers (ASTM E92 *Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials*). Os fragmentos de trilhos que serão testados devem possuir no mínimo 152.4 mm. Nenhuma solda deve possuir valores de dureza superiores à 400 BHN ou 43 HRC, além disso a dureza na junta deve situar-se no limite de ± 30 BHN ou ± 5 HRC em relação à dureza do metal base (que para trilhos de alta resistência deve ser no mínimo de 341 BHN), medida no boleto do trilho. Os testes de dureza devem ser realizados 5 mm abaixo da superfície de rolamento dos trilhos, ao longo da seção vertical longitudinal. Os intervalos de medição devem ser de 3.175 mm, com a linha de solda sendo o ponto central, estendendo-se até o metal base. Já a *American Welding Society* (AWS), em seu documento *Recommended Practices For The Welding Of Rails And Related Rail Components For Use By Rail Vehicles*

(2013), especifica que para trilhos com composição química padrão (dureza mínima de 300 BHN), o valor máximo de dureza na junta deve ser de 410 BHN, com desvios de +40 BHN/-60 BHN. Para trilhos de alta resistência (dureza mínima de 341 BHN), a AWS (2013) estabelece o valor máximo de dureza na junta de 415 BHN, com desvios de +60 BHN/-80 BHN. A AWS (2013) ainda recomenda que os testes de dureza sejam feitos 3.2 mm abaixo da superfície de rolamento e que os espaços entre as medições sejam de 6 mm, conforme ilustrado na figura abaixo.

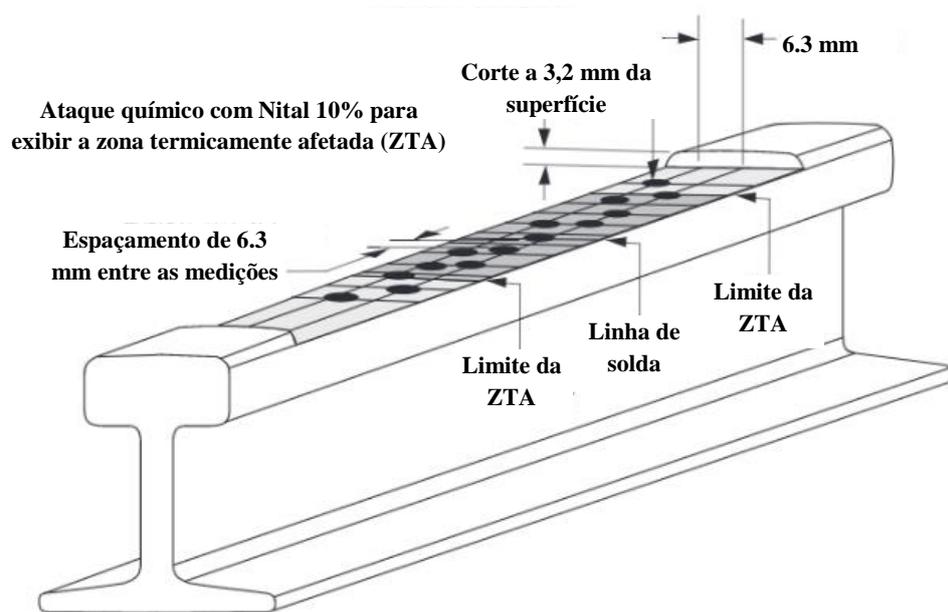


Figura 59: Amostra de trilho que será submetido ao ensaio de dureza.
Fonte: Adaptado de *American Welding Society D15.2/D15.2M (2013)*.

2. Comprimento Da Zona Termicamente Afetada (Macrografia): A superfície do trilho sofrerá ataque químico, revelando a Zona Afetada Termicamente e permitindo sua medição através de um paquímetro. Para possibilitar a medição dessa resposta as amostras de trilho serão cortadas longitudinalmente, conforme figura a seguir. A *American Welding Society (2013)* recomenda que o ataque químico na superfície do trilho seja feito com o Nital 10% (Ácido Nítrico + Álcool Etílico).

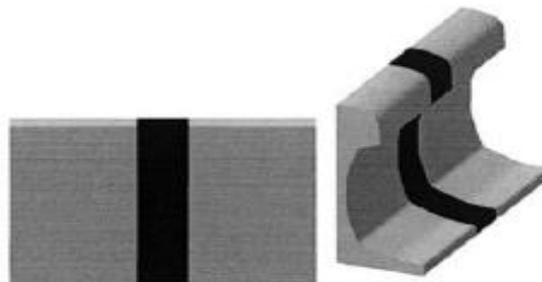


Figura 60: Corte longitudinal da amostra de trilho.
Fonte: MANSOURI; MONSHI, 2004.

3. Propriedades Mecânicas: Serão obtidas por Ensaio de Tração, cujo objetivo é fornecer dados relativos à capacidade de um sólido de suportar solicitações aplicadas a uma estrutura. De acordo com a AREMA (1999) estes testes devem ser conduzidos obedecendo-se a ASTM A370 (*Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*) e as amostras devem possuir um diâmetro de 12.7 mm. Além disso, a resistência à tração de um trilho de alta resistência deve ser no mínimo 170 ksi (1172.11 Mpa).
4. Microestrutura: Será medida através da utilização de micrografias da região soldada, através de um tratamento de imagens será possível mensurar o comprimento das zonas de crescimento de grão e de recristalização. Segundo a AREMA (1999) a microestrutura desejada é composta 100% por perlita. A micrografia deve ser preparada por procedimentos padrão de metalografia, como descritos pela ASTM E3-11 (*Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*).
5. Ensaio de Flexão: Segundo a norma AREMA (1999), as soldas em trilhos de 300 BHN de dureza devem possuir módulo de ruptura de 827 Mpa e deflexão de 25 mm. Já os trilhos de alta resistência, com 341 BHN de dureza, devem possuir módulo de ruptura de ruptura de 862 Mpa e deflexão de 19 mm. O ensaio deve ser conduzido conforme a figura abaixo:

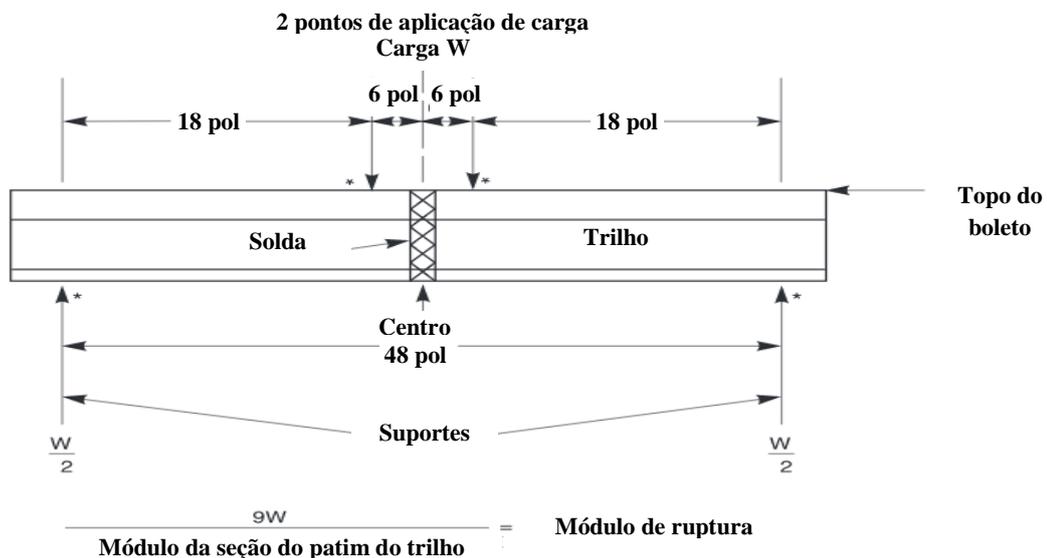


Figura 61: Montagem do ensaio de flexão.
Fonte: Adaptado de AREMA (1999).

A distância entre os suportes da base deve ser de 1200 mm. A carga deve ser aplicada no bolete do trilho em dois pontos de carregamento com 300 mm de distância. Além disso a carga deve ser aplicada no centro da montagem até que o trilho fracture ou atinja uma deflexão de 100 mm, o que ocorrer primeiro.

4. Corrente de recalque: Fornece o calor para que o metal não se solidifique antes de ser expulso da junta. Não é possível configurar esta etapa. Tempo de duração média de 1.3 segundo e seu valor de pico corresponde, em média, a 65 kA.
5. Recalque: Já discutido na Revisão Bibliográfica. O tempo e o curso dependem da força de recalque e também das etapas anteriores. A seta A na figura 62 indica a força de recalque máxima, que é variável que pode ser configurada nesta etapa.

A Figura 63 representa o gráfico típico de corrente elétrica, as regiões com coloração diferente (duas na cor branca e três na cor verde) significam as 5 etapas diferentes, conforme descrito anteriormente. Na etapa 2, Pré-aquecimento, é possível identificar as variáveis Quantidade de Pulso (indicada pela seta A) e Corrente de Pulso (indicada pela seta B). Genericamente, podemos considerar que cada retângulo é um pulso (8 pulsos no exemplo da figura abaixo) e sua altura é a corrente de pulso.

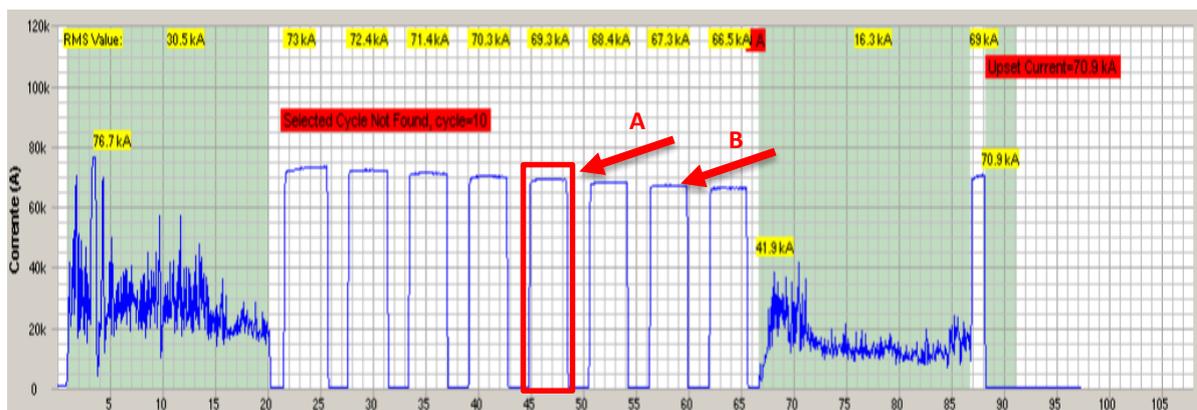


Figura 63: Gráfico de corrente elétrica.
Fonte: Software da máquina de soldagem.

Por fim, a Figura 64 exemplifica o gráfico de curso, em milímetros, percorrido pela mesa móvel da máquina durante o processo de soldagem. A seta A nessa gravura aponta para o curso de recalque, que apesar de não ser uma variável de resposta, permite-nos extrair algumas conclusões preliminares, que serão expostas a seguir.

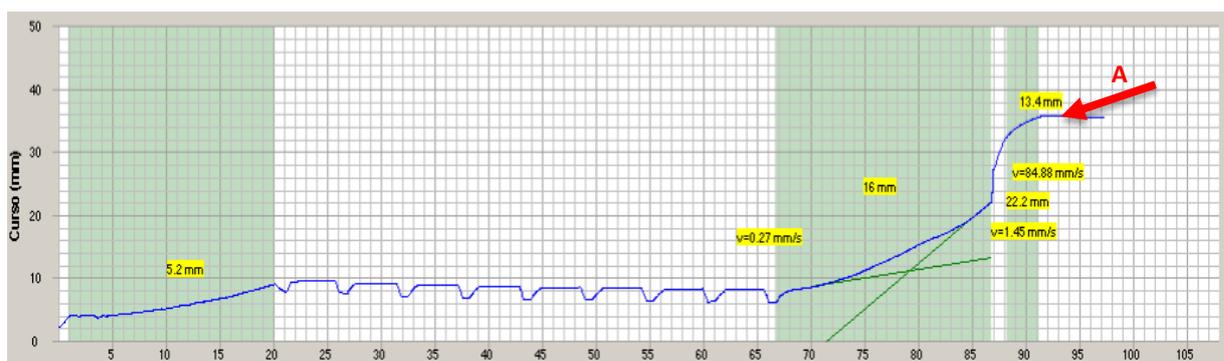


Figura 64: Gráfico de deslocamento.
Fonte: Software da máquina de soldagem.

A tabela abaixo sintetiza os resultados obtidos após a realização das 16 soldas do trilho Tipo 1 (na ordem em que foram executadas).

Tabela 11: Resultados das soldagens do trilho Tipo I.

Caracterização	Pré-Aquecimento			Centelhamento			Recalque			Solda Final		
	Número de Ciclos	Tempo [s]	Corrente Valor rms [kA]	Tempo [s]	Curso [mm]	Corrente Valor rms [kA]	Tempo [s]	Curso [mm]	Velocidade [mm/s]	Força Valor Médio [kN]	Tempo [s]	Curso [mm]
1	.	29,63	.	20,1	16,0	16,3	4,44	13,4	84,9	.	1 min 35 sec	31,8
2	+	47,83	.	18,2	16,7	14,2	3,80	18,9	99,5	+	2 min 00 sec	37,3
3	.	29,27	+	20,2	15,9	16,1	4,45	14,3	94,6	+	1 min 34 sec	32,7
4	+	50,58	+	18,7	16,2	14,8	3,22	18,9	92,0	.	2 min 01 sec	37,2
replicação solda 3	.	29,58	+	20,1	16,0	15,1	4,43	14,1	83,2	+	1 min 35 sec	32,5
replicação solda 4	+	46,68	+	17,5	16,5	16,9	2,32	18,9	107,4	.	1 min 59 sec	37,5
replicação solda 2	+	48,74	.	20,4	15,5	16,5	4,41	16,7	85,0	+	2 min 04 sec	35,1
replicação solda 1	.	29,58	.	21,2	15,7	16,8	4,46	12,5	75,7	.	1 min 36 sec	30,9
replicação solda 3	.	29,38	+	19,7	16,1	15,9	4,46	15,3	80,8	+	1 min 35 sec	33,7
replicação solda 4	+	47,14	+	17,8	16,6	15,6	2,38	18,8	108,0	.	1 min 59 sec	37,2
replicação solda 1	.	30,04	.	21,3	15,3	17,3	4,45	11,9	76,7	.	1 min 37 sec	30,2
replicação solda 2	+	49,19	.	20,4	14,9	16,5	4,45	16,2	93,5	+	2 min 06 sec	34,5
replicação solda 1	.	30,96	.	21,1	14,5	17,4	4,43	11,9	75,7	.	1 min 37 sec	30,2
replicação solda 4	+	47,13	+	18,5	16,6	15,1	2,25	18,8	102,9	.	2 min 01 sec	37,2
replicação solda 3	.	29,44	+	19,6	16,1	15,5	4,46	15,6	100,1	+	1 min 36 sec	34,0
replicação solda 2	+	49,44	.	19,9	15,4	16,1	4,45	16,9	88,6	+	2 min 03 sec	35,4

Fonte: Próprio autor.

Os resultados acima baseiam-se nos relatórios de solda fornecidos pelo computador da máquina de soldagem, tratando-se, portanto, de medidas precisas. As discussões que se seguem baseiam-se apenas na interpretação dos dados apresentados na tabela anterior de acordo com as informações reunidas na revisão da literatura, devendo ser confirmadas ou refutadas de acordo com a análise estatística nos trabalhos subsequentes.

6.2 EFEITO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM NA PRODUTIVIDADE DO PROCESSO E ADEQUAÇÃO À NORMA AREMA (1999)

Discute-se nesta seção apenas a produtividade em função da variação dos parâmetros de entrada. No entanto, a qualidade da junta soldada pode ser maior para configurações de parâmetros de entrada com menor produtividade, de forma que a escolha da melhor configuração dos parâmetros dependerá de qual variável de resposta deverá ser maximizada. Para melhor entendimento, as abreviações dos fatores Número de Ciclo= NC, Corrente= C e Força= F foram adotadas.

A Figura 65 mostra os valores dos cursos de recalque alcançados para cada condição de soldagem. As soldas com os fatores no menor nível, ou seja a condição da solda 1 (NC= -, C= - e F= -), obtiveram os menores cursos de recalque. A norma AREMA (1999) para especificações de qualidade de trilhos soldados por centelhamento, em seu volume 1, capítulo 4, parte 2, estabelece o limite mínimo de 12.7 mm de curso de recalque, de forma que 3 replicações da solda 1 ficaram abaixo desse limite.

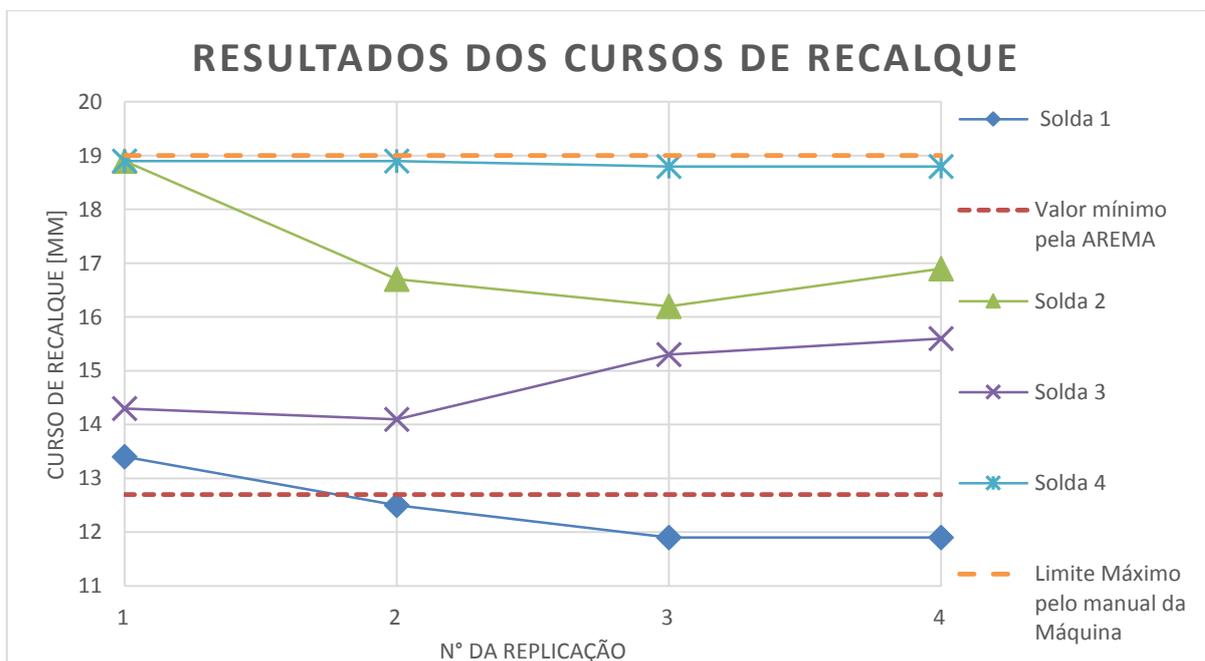


Figura 65: Resultados dos cursos de recalque.
Fonte: Próprio autor.

Já na Figura 66, estão representados a soma dos cursos de centelhamento e recalque, que é uma medida indicativa do consumo de material durante o processo de soldagem. Os menores cursos de centelhamento + recalque pertencem à condição de solda 1 (NC= -, C= - e F= -), o que significa que essa é a condição com o menor consumo de material, mas seu curso de recalque não ficou acima do limite mínimo estabelecido pela norma AREMA (1999). A

condição de soldagem 4 (NC= +, C= +, F= -) é a que apresenta o maior curso de centelhamento + recalque, conseqüentemente é configuração com o maior consumo de material, sendo assim a menos econômica. Observa-se ainda, que a condição da solda 3 consome menos material que a configuração da solda 2.

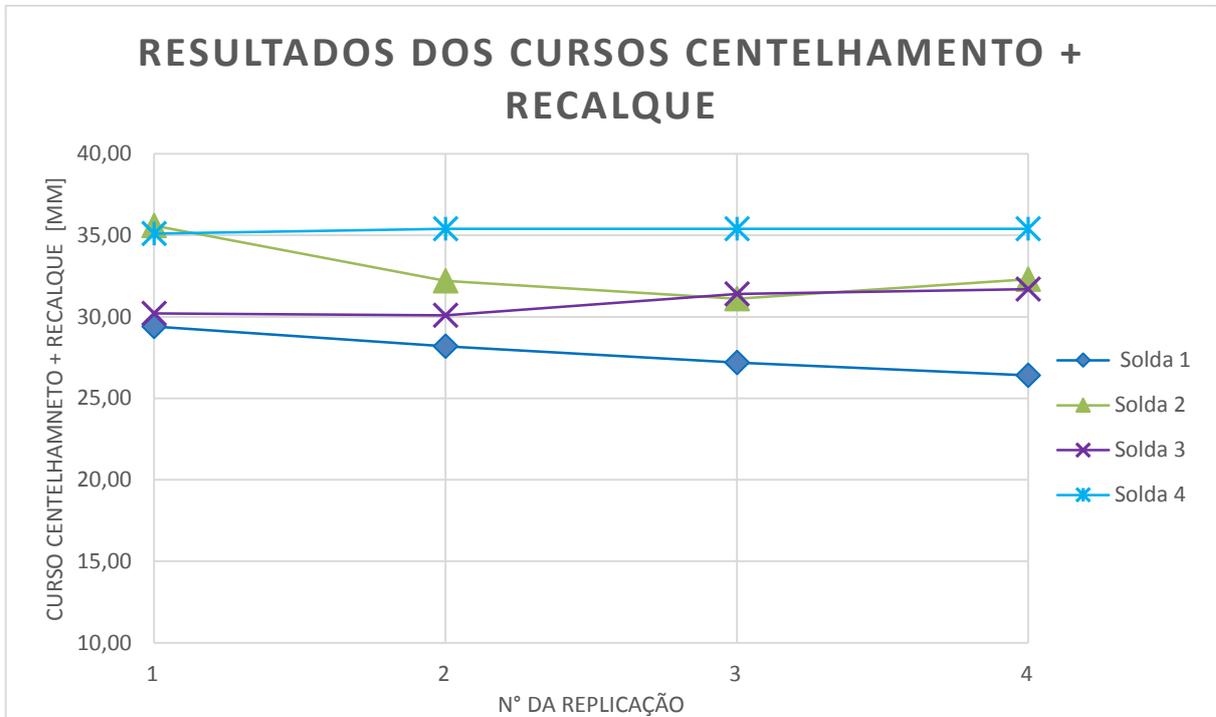


Figura 66: Resultados dos cursos de centelhamento + recalque.
Fonte: Próprio autor.

Na Figura 67 os valores das velocidades médias de recalque são apresentados. A soldagem com a maior velocidade de recalque pertence à condição 4 (NC= +, C= +, F= -), ao passo que a menor velocidade pertence à condição 1 (NC= -, C= -, F= -). Conforme exposto na Revisão Bibliográfica, Gomes Filho (2007) enuncia que uma maior velocidade de recalque significa menor chance de solidificação de óxidos na interface de solda, reduzindo a probabilidade de aparecimento de defeitos do tipo inclusão. Isso é um indício de que, em relação ao defeito de inclusão na junta, a solda 4 é a que possui a menor chance de ocorrência, já a solda 1 possui a maior chance de ocorrência desse tipo de defeito.

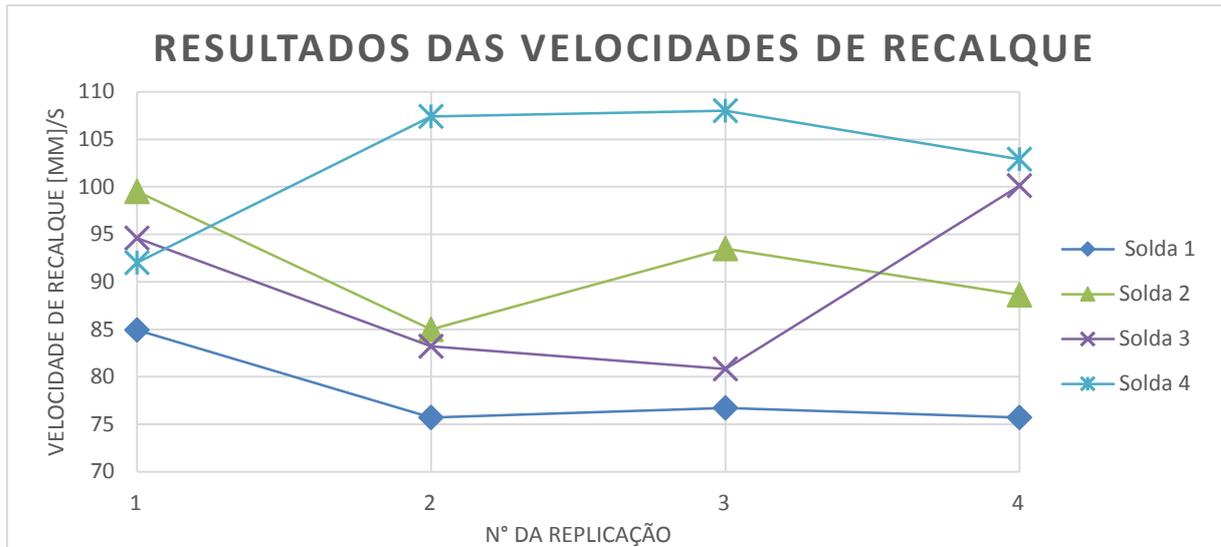


Figura 67: Resultados das velocidades de recalque.
Fonte: Próprio autor.

Os tempos totais de solda são exibidos na Figura 68. O maior tempo de soldagem se deu para a configuração da solda 2 (NC= +, C= -, F= +), quanto maior o tempo de soldagem menor é a produtividade. O menor tempo de soldagem foi da configuração de soldagem 3 (NC= -, C= +, F= +). Como o curso de recalque se enquadra na norma AREMA, esta solda apresentou a maior produtividade.

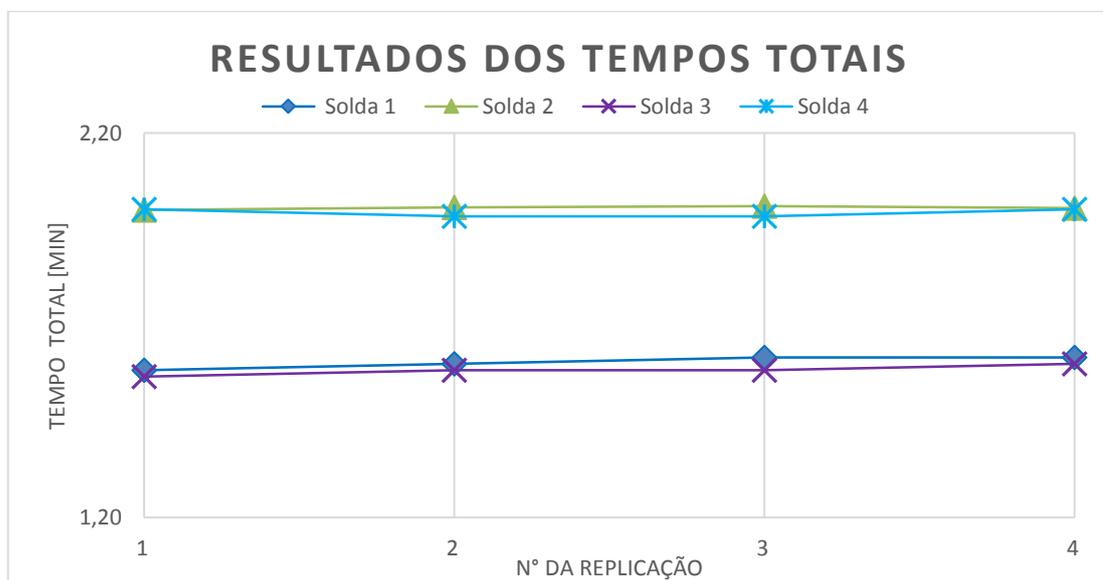


Figura 68: Resultados dos tempos totais.
Fonte: Próprio autor.

A média do tempo total das condições de solda 1, 2, 3 e 4 são respectivamente 1.6 min, 2.01 min, 1.58 min e 1.99 min. Na fabricação de trilhos longos soldados (TLS) são utilizados 10 trilhos e, portanto, 9 soldas, ou seja, o tempo de fabricação de uma unidade de TLS é, respectivamente, 14.4 min, 18.09 min, 14.22 min, 17.91 min. Considerando que a máquina

trabalhe 24 horas por dia, durante um mês de serviço (22 dias) teríamos a seguinte capacidade de produção: 2200, 1751, 2228 e 1768 unidades. A condição de solda 3 possibilita um aumento de produtividade de 27% em relação à condição 2, de 26% em relação à condição 4 e de 1.3% em relação à condição 1 (que não alcançou o valor mínimo de curso de recalque estabelecido pela AREMA).

Também foi possível observar alguns indícios relativos à influência dos fatores e interações sobre a junta soldada. Para a análise descrita a seguir considerou-se que a corrente e tempo de centelhamento foram uniformes, já que os gráficos de corrente (Figura 69) e tempo de centelhamento (Figura 70) se mostram com pouca variação entre as replicações, exibindo uma diferença máxima de 13.2% entre os valores da corrente de centelhamento e de 12.9% entre os tempos de centelhamento. Dessa forma, foi o pré-aquecimento que exerceu influência sobre o recalque. Além dessa consideração, o artigo de Ziemian et al (2012), que já foi abordado durante a revisão bibliográfica, foi novamente aplicado a fim de reforçar as análises a seguir. Na referida publicação, Ziemian et al (2012), associou o curso de recalque com a quantidade e severidade de defeitos na junta, como inclusões e óxidos. Segundo os autores, uma maior distância de recalque significa uma maior capacidade de expelir óxidos e inclusões indesejadas. Outra conclusão importante do artigo é em relação à condição que maximiza o curso de recalque, de acordo com Ziemian et al (2012), a maior distância de recalque ocorre para uma configuração com os níveis altos das variáveis responsáveis por fornecer calor à peça soldada.

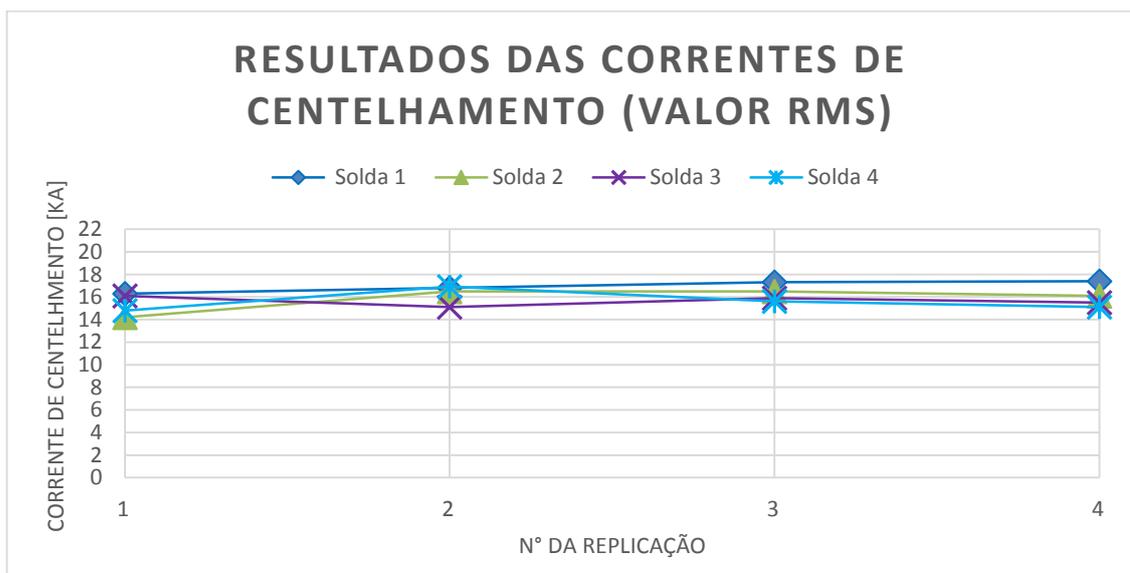


Figura 69: Resultados das correntes de centelhamento (Valor RMS).

Fonte: Próprio autor.

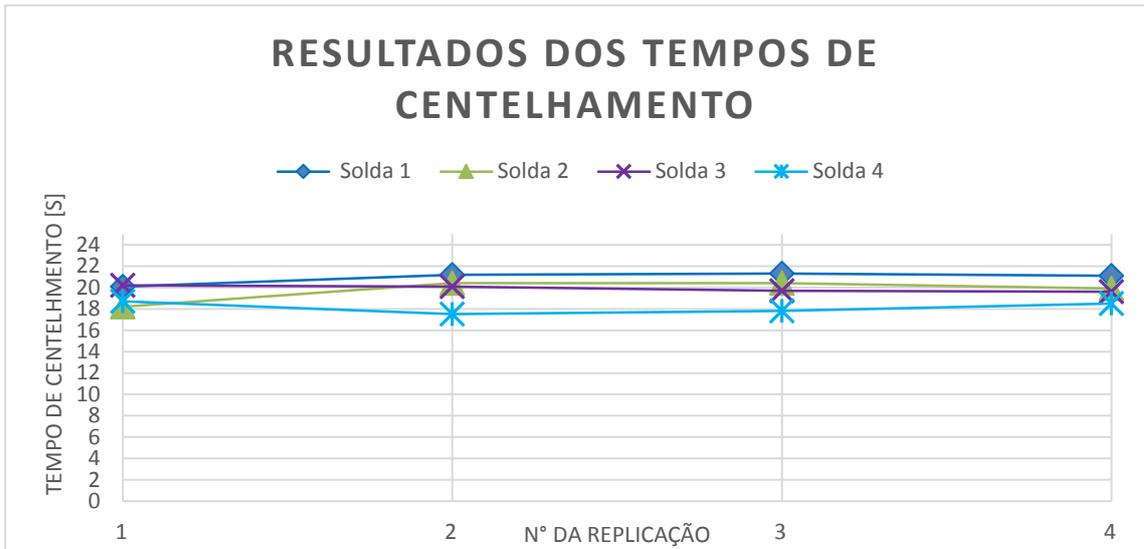


Figura 70: Resultados dos tempos de centelhamento.
Fonte: Próprio autor.

Os maiores valores do curso de recalque, segundo a Figura 65, são para a condição de solda 4 (NC= +, C= + e F= -), o que está de acordo com o artigo de Ziemian et al (2012). No artigo as variáveis responsáveis pelo fornecimento de calor foram a corrente de recalque e o centelhamento. No presente trabalho as variáveis responsáveis por fornecer calor aos trilhos são: a corrente de pulso e o número de ciclos, o centelhamento (considerado uniforme entre as amostras) e a corrente de recalque, que foi uniforme para todas as soldagens de acordo com a Figura 72, com variação máxima de 4.5% entre os valores de corrente. A Figura 71 mostra que os tempos de corrente de recalque também foram constantes, com variação máxima de apenas 2.3 % entre os tempos.

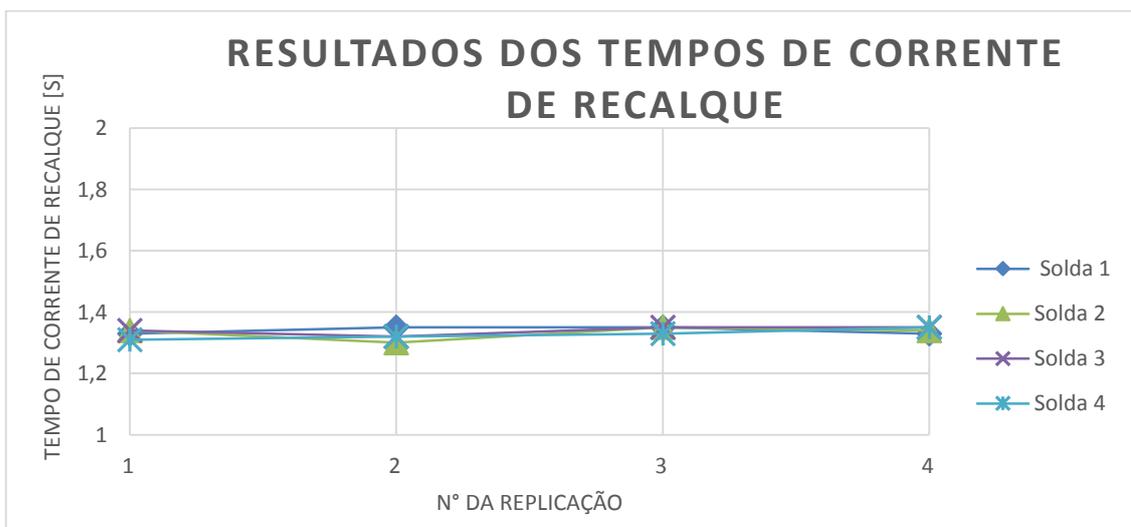


Figura 71: Resultados dos tempos de corrente de recalque.
Fonte: Próprio autor.

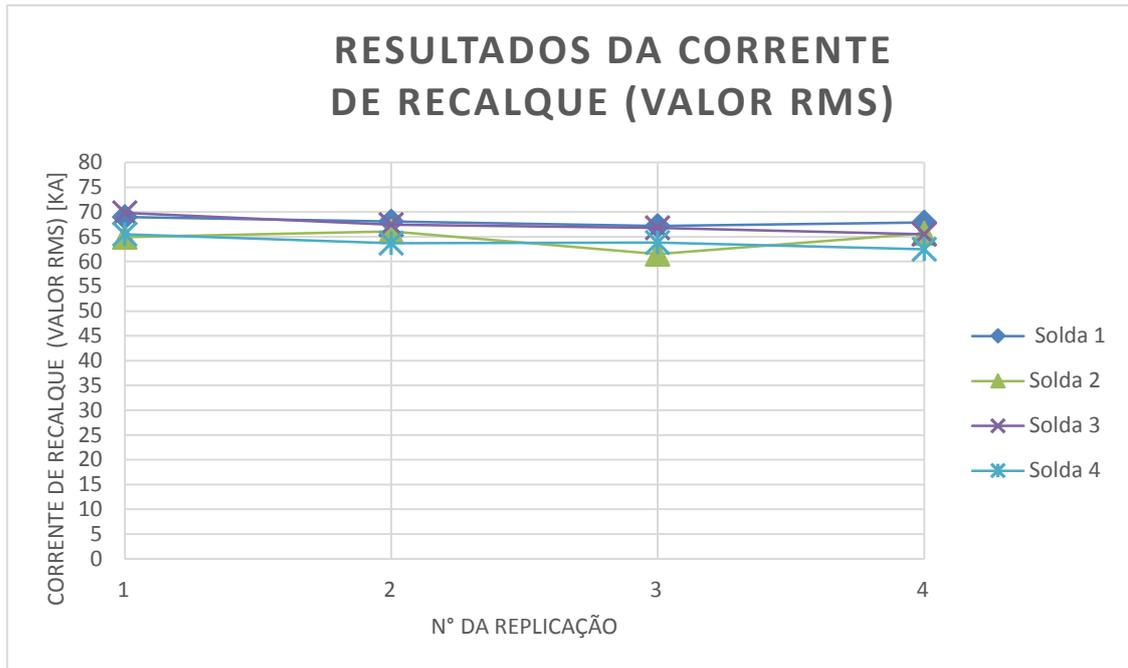


Figura 72: Resultados da corrente de recalque (Valor RMS).
Fonte: Próprio autor.

Apesar de empregar uma força de recalque menor, condição da solda 4 (NC= +, C=+ e F= -) possui um curso de recalque maior que a condição da solda 2 (NC= +, C= - e F= +). Isso é um indício que a interação entre os fatores NC e C possui mais influência no curso de recalque que a própria força de recalque.

Já era esperado que as condições com nível superior de quantidade de pulso possuísem tempo de solda mais elevado, mas além do tempo observa-se que nas condições da solda 2 (NC= +, C= - e F= +) o curso de recalque é superior à condição da solda 3 (NC= -, C= + e F= +). Ou seja, comparando duas condições onde a força de recalque permaneceu no nível alto, temos um indício que o número de ciclos, ou quantidade de pulso, exerce maior influência sobre o curso de recalque que a corrente de pulso.

6.3 ATRIBUIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE QUALIDADE ÀS RESPOSTAS DO EXPERIMENTO

A discussão se dá quanto à atribuição das características de qualidade entre as respostas do experimento, a saber: Quanto maior melhor; Quanto menor, melhor; No alvo, melhor. Essa etapa é parte essencial do método de Taguchi e o processo de seleção dessas características poderá envolver a realização de seminários entre os membros da equipe a fim de garantir a

escolha correta. Abaixo se encontra uma discussão preliminar a respeito desse assunto, podendo indicar um caminho a ser explorado pelos próximos trabalhos de conclusão de curso.

Comprimento da ZTA: A característica de qualidade será do tipo quanto menor, melhor. Conforme abordado na Revisão Bibliográfica, a zona afetada pelo calor pode ser dividida em regiões, das quais pode-se destacar a região de crescimento de grãos. De acordo com Marques (2011), essa é a região do metal base mais próxima da solda e que foi submetida a temperaturas entre cerca de 1200°C e a temperatura de fusão. Nesta situação a estrutura austenítica sofre um grande crescimento de grão, que dependerá do tipo de aço e da energia da soldagem, de modo que quanto maior a energia do processo, mais grosseira será a granulação. O aumento do tamanho do grão da austenita dificulta sua transformação durante o resfriamento, aumentando a temperabilidade do aço. Esse processo pode ser acentuado em aço de maior teor de carbono e com maior velocidade de resfriamento, favorecendo a formação de estruturas martensíticas, caracterizadas por serem muito frágeis e reduzirem a tenacidade e ductilidade do material. Além disso a ferrita apresenta uma morfologia em placas. De modo geral essa região caracteriza-se por uma estrutura grosseira e tende a ser a mais problemática da zona termicamente afetada, podendo apresentar baixa tenacidade e ser um local preferencial para a formação de trincas. Portanto quanto menor a região afetada pelo calor, menor será a região de crescimento de grãos, reduzindo o risco de nucleação de trincas.

Limite de resistência à tração e limite de escoamento: A característica de qualidade será do tipo quanto maior, melhor. Segundo Callister (2008), a maioria das estruturas é projetada para assegurar que ocorrerá apenas deformação elástica quando uma tensão é aplicada. Uma estrutura ou componente que se deformou plasticamente, ou que sofreu uma mudança permanente na forma, pode não ser capaz de atender às exigências de seu uso. É necessário, então, conhecer o nível de tensão no qual a deformação plástica inicia-se, ou onde ocorre o escoamento. O ensaio de tração fornecerá não só o limite de escoamento como também o limite de resistência à tração, possibilitando a caracterização do material quanto à sua tenacidade, ductilidade e resiliência. Portanto quanto maior for o limite de escoamento, maior será a tensão suportada pelo trilho sem que ocorra deformação plástica, ou seja, um maior volume de carga poderá ser transportado sem comprometer a segurança da ferrovia.

Carga de fratura: Será obtida pelo módulo de ruptura do trilho, encontrado por meio do ensaio de flexão. De acordo com Souza (1984), é o valor máximo da tensão de tração nas fibras extremas inferiores do corpo de prova durante o ensaio. Ainda de acordo com Souza (1984), o módulo de ruptura pode ser relacionado com o limite de resistência do material. Logo, quanto maior for a tensão de tração suportada, maior será a carga por eixo que um trilho poderá ser

submetido, permitindo uma maior capacidade de transporte. Portanto, a característica de qualidade do tipo “Quanto maior, melhor” pode ser adotada para essa resposta.

Dureza: Essa é uma resposta complexa pois não se trata de uma medida isolada, mas sim de um perfil de dureza, caracterizar esse perfil não será tarefa fácil. Conforme abordado na Revisão Bibliográfica, a junta soldada está sujeita a ocorrência do amaciamento, e o ensaio de dureza permitirá verificar a ocorrência ou não deste defeito bem como se os limites de dureza estabelecidos pela norma AREMA foram obedecidos. Callister (2008), enuncia que tanto o limite de resistência à tração como a dureza são indicadores da resistência de um metal à deformação plástica. Mas uma dureza muito alta resultará em uma junta frágil. O ideal é que a dureza seja a mesma do metal base, mas isso é impossível, ela irá se alterar na região soldada. Dureza menor implica ocorrência de amaciamento, dureza maior significa uma junta mais frágil. Logo a característica de qualidade mais indicada seria “No alvo, melhor”, mas qual valor seria o alvo? A dureza do metal base não poderia ser pois é um valor que nunca será atingido, talvez a metade do limite estabelecido pela AREMA, de + 30 BHN sobre a dureza do metal base.

Microestrutura: Outra resposta de difícil caracterização. Ainda não está definido o método de obtenção das imagens das zonas de crescimento de grão e de recristalização, nem se serão feitas nos laboratórios da Universidade Federal de Juiz de Fora ou da Universidade de São Paulo. Uma definição da característica de qualidade iria se tornar simples caso a característica micro estrutural avaliada fosse o tamanho dos grãos, nesse caso Callister (2008) estabelece que a diminuição do tamanho de grãos proporciona um aumento da dureza, e portanto quanto menor o tamanho de grão melhores serão as propriedades mecânicas. A característica do tipo “Quanto menor, melhor” seria mais indicada nesse caso em específico.

7. CONCLUSÃO

A partir do exposto no capítulo anterior, nota-se que mesmo sem os resultados das medições das respostas do experimento em mãos foi possível extrair importantes conclusões acerca do consumo de material, produtividade e adequação à norma AREMA, apenas através da análise das informações disponíveis nos relatórios de solda gerados pelo software da máquina de soldagem. A seguir se encontram resumidos os principais resultados alcançados com este trabalho:

- Economia de material: A solda 4 é a condição com maior consumo de material e, conseqüentemente, a menos econômica. A solda 1 apresentou os menores valores de consumo de material e, portanto, é a condição mais econômica.
- Adequação à norma AREMA: A solda 1, entretanto, não alcançou o limite de curso de recalque mínimo estabelecido pela norma AREMA (1999). As demais soldas superaram este limite.
- Produtividade: Com base nos tempos totais de soldagem, pode-se afirmar que a solda 3 é a condição que fornece a maior produtividade dentre as demais: Aumento de 27% em relação à solda 2, de 26% em relação à solda 4 e de 1.3% em relação à solda 1.
- Outra conclusão obtida através da análise das velocidades de recalque é que a solda 4 possui menor chance de ocorrência de defeito do tipo inclusão na junta, ao passo que a maior chance de ocorrência pertence à solda 1.

Por fim, este trabalho se propôs a concentrar uma sólida e diversificada referência bibliográfica sobre a soldagem por centelhamento e o planejamento experimental, contribuindo como uma fonte inicial para um bom entendimento do referido procedimento além de nortear as próximas etapas do projeto Cátedra Roda-Trilho através das discussões propostas no capítulo anterior.

8. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Este trabalho foi limitado pelo tempo disponível para sua conclusão e o tempo necessário para envio das amostras aos laboratórios da Universidade Federal de Juiz de Fora, por isso se restringiu a discorrer apenas sobre aspectos teóricos, devendo servir como base de conhecimento e consulta para a confecção dos seguintes Trabalhos de Conclusão de Curso:

- Obter a relação dos níveis das variáveis com a qualidade da solda em trilha Tipo I soldado por centelhamento.
- Obter a relação dos níveis das variáveis com a qualidade da solda em trilha Tipo II soldado por centelhamento.
- Levantamento do perfil de dureza de trilha Tipo I soldado por centelhamento.
- Levantamento do perfil de dureza de trilha Tipo II soldado por centelhamento.
- Análise de macrografia de trilha Tipo I soldado por centelhamento.
- Análise de macrografia de trilha Tipo II soldado por centelhamento.
- Análise de micrografia de trilha Tipo I soldado por centelhamento.
- Análise de micrografia de trilha Tipo II soldado por centelhamento.
- Propriedades mecânicas de trilhos Tipo I soldados por centelhamento.
- Propriedades mecânicas de trilhos Tipo II soldados por centelhamento.
- Realizar um experimento de confirmação dos resultados, após obter a configuração ótima e prever a resposta sob estas condições.
- Caso o número de fatores significativos para o experimento seja um número reduzido, Antony e Kaye (2000) recomendam que seja realizado um experimento fatorial completo para melhor compreender os efeitos de tais fatores sobre o processo estudado.

Os trabalhos acima fazem parte dos entregáveis do projeto Cátedra Roda-Trilho, entretanto existe ainda muito conhecimento a ser gerado sobre a soldagem por centelhamento, como por exemplo a influência do modelo de centelhamento na microestrutura da junta e a viabilidade da utilização de gases inertes como proteção durante a soldagem de trilhos de alto teor de carbono.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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. **Recommended Practices For The Welding Of Rails And Related Rail Components For Use By Rail Vehicles**. AWS, 3. Ed., 2013, 66 p.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding Handbook**. AWS, vol.3, cap. 3, 9. Ed.,2007, 34 p.

ANTONY, J.; KAYE, M. **Experimental Quality: A Strategic Approach to Achieve and Improve Quality**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2000. 254 p.

ARABACI, U.; ÇETİNKAYA, C.; AKAY, A. **An investigation of effects of upsetting current time and normalization heat treatment on mechanical properties of X40CrMoV5 1 and C1030 steels joined by flash butt welding**. Elsevier - Materials and Design 28, 2007, p.2351–2360.

CALLISTER, W. D., Jr. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Livros Técnicos e Científicos, 7. Ed 2008, 705 p.

CORREIA, E.A.S.; CARDOZA, J.A.S. **Planejamento de experimentos no processo produtivo utilizando o método Taguchi**. Gestão da Produção, Operações e Sistemas, n. 1, p. 55-66, 2011.

DOMINGUES, N. **Soldabilidade por Centelhamento do Aço Dual Phase 780**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia UFMG. 2013.

FUJII, M. ET AL. **Rail Flash-Butt Welding Technology**. JFE TECHNICAL REPORT, n. 20, p.159-163, 2015.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Editora Atlas, 1991.

GODEFROID, L.B.; FARIA, G.L.; CÂNDIDO, L.C.; VIANA, T.G. **Fatigue failure of a flash butt welded rail**. Elsevier - Procedia Materials Science 3, 2014 , p.1896 – 1901.

GOMES 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 bimetalica**. 2007. 45f. Dissertação de Mestrado (Tecnologia em Metalurgia) - USP, São Paulo, 2007.

GUANGWEN, X. ET AL. **Track dynamic behavior at rail welds at high speed**. Acta Mechanica Sinica, Heidelberg, v. 26, n. 3, p. 449-465, 2010.

GUEDES, TEREZINHA APARECIDA. **Procedimentos De Otimização No Planejamento e Controle Da Qualidade De Produtos e Processos**. Tese (doutorado). Universidade Federal De Santa Catarina, Departamento De Engenharia De Produção E Sistemas, 1996.

ICHIYAMA, Y.; KODAMA, S. **Flash-Butt Welding of High Strength Steels**, Nippon Steel Technical Report, No. 95, 2007.

KIM, D.C.; SO, W.J.; KANG, M.J.. **Effect of flash butt welding parameters on weld quality of mooring chain**, International Scientific Journal, v. 38, n.2, p.112-117,2009.

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.

MIGUEL, P. A. C. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.

MOITA, NUNO FILIPE VITAL CURATES. **Implementação do método Taguchi e análise de experiências na fase de testes de moldes para injeção de plásticos**. Tese (mestrado). Universidade Técnica de Lisboa, Instituto superior técnico, 2007.

MONTGOMERY, D.C. **Design and Analysis of experiments**. 7. Ed. John Wiley and Sons, Inc, 2009.

PHADKE, M.S. **Quality Engineering Using Robust Design**. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1989.

RÄSÄNEN, A.N.; MARTIKAINEN, J. **Experimental review of metallurgical flash weld defects in welded joints: essence of flat spots, penetrators and oxide inclusions**. Science and Technology of Welding and Joining, v. 16, n.6, p.471-476, 2011.

ROSS, P.J. **Aplicação das técnicas Taguchi na engenharia da qualidade**. São Paulo: Makron, McGraw-Hill, 1991.

ROY, R.K. **A primer on the Taguchi Method, 2nd Edition**. New York: Van Nostrand Reinholdm 2010.

SIMPSON, T.W.; WYSK, R.A.; NIEBEL, B.W., COHEN, P.H. **Manufacturing Processes: Integrated Product and Process Design**, McGraw Hill, New York, 2000.

SOUZA, S.A. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos: Fundamentos teóricos e práticos**. 5ª.Ed, São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1984, 286p.

STONE, D.H.; IWAND, H.C.; KRISTAN, J.; LEHNHOFF, G.R. **Flash Butt Rail Weld Vertical Fractures**. J Fail. Anal. and Preven. 15, 2015, p.33-38

SULLIVAN, J.F.; SAVAGE, W.F. **Effect of Phase Control During Flashing on Flash Weld Defects**. Welding Journal 50 (5), 1971, p.213-221.

XIAO, G.; XIAO, X; GUO, J.; WEN, Z.; JIN, X. **Track dynamic behavior at rail welds at high speed**, Springer - Acta Mechanica Sinica, n.26, 2010, p.449-465.

YU, X.; FENG, L.; QIN, S.; ZHANG, Y.; HE, Y. **Fracture analysis of U71Mn rail flash-butt welding joint**. Elsevier- Case Studies in Engineering Failure Analysis 4, 2015, p.20–25.

ZHANG, F.; LV, B.; HU, B.; LI, Y. **Flash butt welding of high manganese steel crossing and carbon steel rail**. Elsevier - Materials Science and Engineering A 454–455, 2007, p.288–292.

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, 2015, p.26–38.

ZIEMIAN, C.W; SHARMA, M.M; WHALEY, D.E. **Effects of flashing and upset sequences on microstructure, hardness, and tensile properties of welded structural steel joints**. Elsevier - Materials and Design 33, 2012, p.175–184.

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 autoral¹ e criminais previstas no Código Penal², além das cominações administrativas e acadêmicas que poderão resultar em reprovação no Trabalho de Conclusão de Curso.

Juiz de Fora, ____ de _____ de 20__.

NOME LEGÍVEL DO ALUNO (A)

Matrícula

ASSINATURA

CPF

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

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