

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

BRUNO SABADINI VICENTE

**PROPOSTA DE ESPECIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM POR
CENTELHAMENTO DE TRILHOS FERROVIÁRIOS**

JUIZ DE FORA

2017

BRUNO SABADINI VICENTE

**PROPOSTA DE ESPECIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM POR
CENTELHAMENTO DE TRILHOS FERROVIÁRIOS**

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

Orientador: Doutor em Engenharia Mecânica. Moisés Luiz Lagares Junior

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)

Vicente, Bruno Sabadini.

Proposta de Especificação de Procedimento de Soldagem por Centelhamento de Trilhos Ferroviários / Bruno Sabadini Vicente. -- 2017.

71 f.

Orientador: Moisés Luiz Lagares Junior

Coorientador: Luiz Henrique Dias Alves

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

1. Especificação de Procedimento de Soldagem. 2. Soldagem por Centelhamento. 3. Flash Butt Welding. 4. Relação Causa e Efeito. I. Lagares Junior, Moisés Luiz , orient. II. Alves, Luiz Henrique Dias, coorient. III. Título.

BRUNO SABADINI VICENTE

**PROPOSTA DE ESPECIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM POR
CENTELHAMENTO DE TRILHOS FERROVIÁRIOS**

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

Aprovado em 19 de Junho de 2017.

BANCA EXAMINADORA

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

Doutor em Engenharia Mecânica, Luiz Henrique Dias Alves (Co-orientador)
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, Brasil

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

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não poderia ser concluído sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto minha homenagem:

Aos meus pais, Dalmo e Ana Laura, por todo o apoio, confiança e força em todos os momentos da minha vida.

Às minhas irmãs, Marcela e Laila.

Aos grandes amigos que me acompanharam durante toda essa jornada na faculdade e me deram força para sempre continuar em frente.

Aos professores Moises Lagares e Luiz Henrique Alves pela oportunidade de fazer parte deste grande projeto.

À empresa Vale pela oportunidade dada a Universidade Federal de Juiz de Fora de participar do projeto CÁTEDRA RODA TRILHO.

RESUMO

No presente estudo realizou-se uma revisão bibliográfica do processo de soldagem topo a topo por centelhamento, também conhecido como *Flash Butt Welding*, e uma proposta de especificação de procedimento para o mesmo. O estudo primeiramente objetivou o entendimento das minúcias desse processo de soldagem a fim de se identificar os possíveis causadores das principais discontinuidades presentes no mesmo. Foram levantados todos os principais parâmetros de entrada e também as anomalias mais frequentemente encontradas no método em questão. A partir dessas informações foi então estudado o efeito que cada variável possui sobre tais falhas, de modo a facilitar a descoberta da origem das discontinuidades com o propósito de se aperfeiçoar a intensidade de cada parâmetro até então utilizado. Para isso propõe-se o uso da especificação e do registro de qualificação de procedimento de soldagem como critério de determinação de causa e efeito, respectivamente, das discontinuidades presentes em tal processo. Este trabalho também tem como finalidade servir de base teórica ao entendimento da soldagem por centelhamento, para dar continuidade ao projeto Catedra Roda-Trilho, desenvolvido pela Universidade Federal de Juiz de Fora com o apoio da empresa Vale S.A.

Palavras-chave: Soldagem por centelhamento, Especificação de Soldagem, Causa e efeito.

ABSTRACT

The present study performs the bibliographical review and a process specification proposal for flash butt welding process, a process of welding by electrical resistance. The study aim at understanding the details of the welding process in order to identify the possible causes of the main discontinuities present in the welding operation. All major input parameters were raised as well as the most frequent anomalies found in the method in question. From these information it was then studied the effect that each variable has on such failures, in order to discover the reason why they happen and then improve the inlet parameters used nowadays. For this, it is proposed to use the specification and registration of welding procedure qualification as a criterion for determining cause and effect, respectively, of the discontinuities present in such process. This work also aims to serve as a base for flash butt welding understanding, to help to continue the Catedra Roda-Trilho project development, which is led by the company Vale S.A in partnership with the Federal University of Juiz de Fora.

Keywords: Flash butt welding, Welding Specification, Cause and effect.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Componentes da via permanente	19
Figura 2: Desenho esquemático de um perfil de trilho ferroviário e suas partes	21
Figura 3: Contato das irregularidades superficiais	23
Figura 4: Etapas da Soldagem de topo por centelhamento.....	23
Figura 5: Tensões residuais (N/mm ²) na seção do trilho após o resfriamento	24
Figura 6: Tensões residuais no trilho após o processo de soldagem por centelhamento.....	25
Figura 7: Diagrama esquemático das regiões microestruturais formadas após o processo de soldagem por centelhamento	26
Figura 8: Variação do crescimento de grãos. (a) Centro da solda, (b) 6 mm do centro da solda e (c) 9 mm do centro da solda	27
Figura 9: Microestrutura da região de recristalização da área de solda (Região 2).....	27
Figura 10: Microestrutura da área de transição entre as Regiões 1 e 2	28
Figura 11: Microestrutura da região parcialmente transformada (Região 3)	28
Figura 12: Distribuição da dureza pela seção vertical do trilho soldado por FBW.....	29
Figura 13: Diagrama esquemático de um ciclo de soldagem por centelhamento	31
Figura 14: Ciclo de soldagem por centelhamento	32
Figura 15: Diminuição da dureza com o tempo de revenimento.....	35
Figura 16: Esquema de junta soldada com desalinhamento	40
Figura 17: Aspecto microscópico de uma junta com “encavalamento”, após raspagem e laminação a frio	41
Figura 18: Agrupamento de óxidos na linha de soldagem	43
Figura 19: Fratura frágil no flat spot (Imagem a Esquerda) e fratura dúctil no material de base (Imagem a Direita).....	46
Figura 20: Flat spot localizado em fratura, corpo de prova sujeito ao teste de flexão	46
Figura 21: Aspecto esquemático das regiões de fratura	48
Figura 22: (a) Defeitos Internos, (b) Deslizamentos de planos e (c) Defeitos superficiais	48
Figura 23: Tolerâncias dimensionais de curvaturas de trilhos submetidos a solda por centelhamento	53
Figura 24: Tolerância dimensional para desalinhamento vertical de trilhos soldados por centelhamento.....	54
Figura 25: Tolerância dimensional para desalinhamento horizontal de trilhos soldados por centelhamento	54

Figura 26: Disposição das cargas para o teste de flexão lento para determinação da tensão de ruptura.....	58
Figura 27: EPS proposta	66
Figura 28: RQPS proposta.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química, Trilhos UIC 60	25
Tabela 2: Composição química, AREMA	50
Tabela 3: Especificações de produção dos trilhos, limites de dureza, AREMA	50
Tabela 4: Especificações de produção dos trilhos, limites de tensões.....	51
Tabela 5: Limites dimensionais da seção dos trilhos	51
Tabela 6: Requerimentos de Solda, AREMA.....	57
Tabela 7: Frequência de testes, AREMA	58
Tabela 8: Efeitos das variáveis do processo na solda por centelhamento	64

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

Al – Elemento Químico Alumínio

C - Elemento Químico Carbono;

°C - Unidade de Medida de Temperatura (Graus Celsius);

Cr - Elemento Químico Cromo;

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes;

EPS – Especificação de Procedimento de Soldagem

FBW – *Flash Butt Welding*

Fe - Elemento Químico Ferro;

HB - Hardness Brinell;

m - Unidade de Medida de Comprimento, metro

Mn - Elemento Químico Manganês;

Mo - Elemento Químico Molibdênio;

Ni - Elemento Químico Níquel;

P – Elemento Químico Fósforo

RQPS – Registro de Qualificação de Procedimento de Soldagem

S - Elemento Químico Enxofre;

Si - Elemento Químico Silício;

UFJF - Universidade Federal de Juiz de Fora

USP - Universidade de São Paulo;

V - Elemento Químico Vanádio;

W - Elemento Químico Tungstênio;

ZAC – Zona Afetada pelo Calor

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	JUSTIFICATIVA	15
1.2	OBJETIVO	16
1.2.1	Objetivo Geral	16
1.2.2	Objetivo Específico	16
1.3	METODOLOGIA	16
1.4	ESCOPO	17
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2	REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	18
2.2	VIA PERMANENTE	19
2.3	TRILHOS	20
2.4	PROCESSO DE SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA	21
2.5	PRINCÍPIOS DA SOLDAGEM A TOPO POR CENTELHAMENTO	22
2.6	CARACTERÍSTICAS METALÚRGICAS DA SOLDA POR CENTELHAMENTO	24
2.7	ETAPAS DO PROCESSO DE SOLDAGEM POR CENTELHAMENTO	30
2.7.1	Pré-aquecimento	32
2.7.2	Centelhamento	33
2.7.3	Recalque	34
2.7.4	Revenimento	34
2.8	VARIÁVEIS DO PROCESSO	36
2.8.1	Variáveis de centelhamento	36
2.8.2	Variáveis de recalque	38
2.9	DESCONTINUIDADES EM JUNTAS SOLDADAS POR CENTELHAMENTO	40
2.9.1	Descontinuidades Mecânicas	40
2.9.2	Descontinuidades Metalúrgicas	42

2.10	FALHA POR FADIGA.	48
2.11	SOLDAGEM POR CENTELHAMENTO DE ACORDO COM A NORMA AREMA.	49
2.11.1	Especificações dos Trilhos.	49
2.11.2	Especificação para fabricação de trilhos contínuos soldados	52
2.11.3	Especificações de qualidade para Flash Butt Welding.	55
2.12	ESPECIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM.	59
3	DISCUSSÃO.	60
3.1	RELAÇÃO CAUSA E EFEITO NAS ETAPAS DO PROCESSO DE SOLDAGEM POR CENTELHAMENTO	60
3.1.1	Pré-aquecimento	60
3.1.2	Centelhamento.	61
3.1.3	Recalque.	62
3.2	PROPOSTA DE ESPECIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM.	64
4	CONCLUSÃO.	68
	REFERÊNCIAS	69

1 INTRODUÇÃO

A Universidade de São Paulo tem trabalhado sistematicamente, com o apoio da empresa Vale S.A., desde o ano de 2014 no desenvolvimento do projeto Cátedra Roda-Trilho, que visa interiorizar no Brasil o conhecimento sobre o sistema roda trilho. O conhecimento gerado a partir desse projeto objetiva a formação de pessoas, o melhor entendimento dos processos empregados e dos materiais envolvidos no sistema roda-trilho, no desenvolvimento de novos materiais e desenvolvimento de novos processos, na gestão da manutenção e controle dos ativos e na segurança operacional.

No ano de 2016 a Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF – ingressou o time de pesquisa do projeto com a proposta de “Caracterização e modelagem estatística preditiva das soldas e regiões afetadas pela solda de trilhos”. O projeto tem por objetivo estudar os processos de soldagem de trilhos empregados, fazer a caracterização completa das juntas soldadas para os diversos tipos de trilhos utilizados no transporte ferroviário e propor um modelo matemático para prever os níveis que as principais variáveis devem assumir para se obter as propriedades desejadas.

O projeto Cátedra Roda-Trilho será dividido em três fases, sendo esta a primeira. O objetivo agora será a realização de uma revisão geral dos processos de soldagem de trilhos por aluminotermia e por centelhamento, sendo levantados todos os parâmetros de soldagem empregados atualmente e a relação causa-efeito sobre a junta soldada. O presente trabalho irá focar a solda por centelhamento (*Flash Butt Welding*), a descrição de seu processo, os princípios de funcionamento e as principais discontinuidades mecânicas e metalúrgicas na região da solda, assim como a causa de seu surgimento, e a proposta e elaboração de uma Especificação de procedimento de Soldagem. Essa é uma entrega parcial do projeto sob a responsabilidade da UFJF.

Na segunda etapa será feita a caracterização completa dessas juntas, compreendendo verificação microestrutural, área de diluição, composição química, dureza, propriedades mecânicas e sanidade interna. Na terceira etapa será elaborado o um modelo matemático para cada processo de soldagem que possibilitará prever os níveis que as principais variáveis devem assumir para se obter as propriedades desejadas.

Esta caracterização é fundamental para dar subsídios teóricos e práticos para um melhor ajuste e controle dos processos de soldagem empregados, uma vez que este é o ponto de maior ocorrência de falhas nos trilhos.

Para o desenvolvimento do estudo foram realizados ensaios de soldagem por centelhamento com diversos parâmetros de entrada, na área do Estaleiro de Soldas da Estrada de Ferro Carajás – EFC, em São Luiz do Maranhão. Os experimentos foram acompanhados pela equipe de projetos da UFJF com o apoio dos funcionários da empresa em questão no estaleiro de soldas. O processo de soldagem por centelhamento na empresa é feito com a Máquina de Soldar Trilhos GAAS 80/580, que será mostrada mais detalhadamente em momento oportuno.

Assim sendo, este trabalho enfocará no estudo das etapas do processo de soldagem de topo por centelhamento, relação causa e efeito de suas variáveis de entrada, elaboração de uma especificação de procedimento de soldagem (EPS) e de um registro de qualificação de procedimento de soldagem (RQPS) e também em padrões de soldagem que devem ser seguidos de acordo com a norma AREMA; servindo então de base para a continuidade dos estudos e desenvolvimento do projeto Catedra Roda-Trilho.

1.1 JUSTIFICATIVA

Este trabalho compõe uma das partes do projeto Catedra Roda-Trilho sob a responsabilidade da UFJF com sua proposta de caracterização das soldas e regiões afetadas pela solda dos diversos trilhos empregados no transporte ferroviário. O projeto se justifica devido a pouca literatura existente sobre trilhos soldados pelo processo de centelhamento, sendo esta uma região crítica onde se concentram as maiores probabilidades de falhas pertinentes às inconsistências do processo.

Durante uma visita à Estrada de Ferro Carajás (EFC) constatou-se grande número de falhas nas regiões soldadas ou termicamente afetadas pelas soldas, essas falhas podem significar perdas tremendas para o ativo da empresa, o que realça a importância desse estudo sobre suas operações, que depende fortemente do transporte da matéria prima para a consecução de seu objetivo final.

A correta manutenção dos trilhos afeta diretamente as operações da empresa, como dito. Ademais, há expectativa de aumento de carga por eixo dos vagões para os próximos anos, assim como o aumento da frequência de trânsito nas ferrovias, desse modo é esperado que a taxa de desgaste e fratura dos trilhos aumentem, sendo fundamental a otimização dos processos de soldagem a fim de evitar possíveis prejuízos ou descontinuidades operacionais.

1.2 OBJETIVO

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral determinar os níveis ideais de cada uma das variáveis de entrada do processo de soldagem a topo por centelhamento os quais assegurarão uma menor probabilidade de surgimento de defeitos ou falhas na solda final.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desse trabalho são:

- A aquisição de informações críticas sobre o processo de soldagem a topo por centelhamento.
- O detalhamento das descontinuidades típicas desse tipo de solda e seus possíveis causadores.
- Apontar melhorias no processo que podem influenciar positivamente no resultado final da solda.
- Expor as exigências da norma AREMA quanto à soldagem e microestrutura de trilhos.
- Propor uma Especificação de Procedimento de Soldagem para a solda por centelhamento de trilhos ferroviários.
- Propor um Registro de Qualificação de Procedimento de Soldagem para soldas por centelhamento de trilhos ferroviários.

1.3 METODOLOGIA

O desenvolvimento deste trabalho contou primeiramente com o processo de revisão bibliográfica, no qual foi feito um levantamento de informações concretas a respeito do processo de soldagem por centelhamento. A pesquisa bibliográfica e documental contou principalmente com artigos científicos, que formaram a base teórica do estudo.

A etapa seguinte contou com o levantamento, por meio de observações e realização de ensaios em campo, dos procedimentos de soldagem adotados por uma empresa com atuação no setor ferroviário. A empresa utiliza uma máquina de solda onde o processo é realizado, foram levantados dados referente a maquina utilizada pela empresa, de maneira a auxiliar o

desenvolvimento da especificação de procedimento de soldagem. Além disso, todas as etapas da soldagem por centelhamento serão devidamente explicadas a fim de se obter uma relação de cada uma das variáveis de entrada com a qualidade final da solda.

Posteriormente houve a fase de experimentação a partir de parâmetros de soldagem pré-determinados a fim de se observar os resultados obtidos, por análises estruturais, dos trilhos soldados finais. Esta última etapa, análise estrutural, infelizmente não fará parte deste trabalho devido ao fator tempo, tais análises demandariam um tempo substancial para serem concluídas e por este motivo a pesquisa deverá ser continuada por outrem.

1.4 ESCOPO

Este trabalho se trata de um levantamento bibliográfico das principais variáveis e discontinuidades do processo de soldagem por centelhamento. Conta com a proposta e elaboração de uma Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS) para soldagem de trilhos ferroviários por centelhamento, a fim de que seja aplicada na produção de juntas soldadas por esse procedimento.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo 1 é realizada uma introdução sobre o projeto Cátedra Roda Trilho, abordando sua importância e as propostas do projeto. Também é falado os objetivos deste trabalho em particular e do projeto como um todo.

Durante o capítulo 2 é discutido detalhadamente as etapas do processo de soldagem por centelhamento. São expostos todos os principais parâmetros de entrada que fundamentam o processo e sua importância. Também são mencionadas as principais discontinuidades mecânicas e metalúrgicas encontradas nesse tipo de soldagem. Além disso, discorre-se sobre o uso e importância da utilização de especificação de procedimento de soldagem (EPS) para a melhora na qualidade e o estabelecimento de padrões de soldagem.

O capítulo 3 faz uma ligação das variáveis de entrada com as possíveis discontinuidades, servindo de base para a proposição de uma EPS e de uma RQPS. Essas atuam como determinação de causas e efeitos, respectivamente, com as possíveis irregularidades.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O Brasil, sendo um país continental, possui grande capacidade de utilização de transporte ferroviário, porém, ainda não está usufruindo de seu integral potencial quanto às vantagens comparativas desse tipo de transporte frente a outros modais. Apesar de a participação desse tipo de transporte ainda ser muito pequena no país quando comparada a países desenvolvidos, esse potencial vem sendo, a cada dia mais, objeto de exploração para o escoamento de mercadorias e até mesmo de pessoas pelo território nacional. (BELLINI, L. P, 2016)

O desenvolvimento industrial das últimas décadas exige grande quantidade de matéria prima para a elaboração dos produtos industrializados. Sendo o Brasil um grande produtor e fornecedor de *commodities*, as empresas Brasileiras têm investido no desenvolvimento tecnológico a fim de conseguir cumprir com a grande demanda no transporte ferroviário. Maior volume de carga, em menos tempo e com mais segurança, esse é o objetivo a ser alcançado pelas ferrovias de carga ao redor do globo, e aqui não seria diferente. Baseado nesse contexto, o aumento da carga por eixo é uma das principais alternativas para conseguir suprir a demanda crescente por tais *commodities*, como o minério de ferro e a bauxita. (MAIS, 2017)

A fim de superar, técnica e economicamente, problemas operacionais e atingir metas de produtividade compatíveis com as das melhores empresas deste ramo no mundo, as ferrovias *Heavy Haul* Brasileiras – que são três, a saber: Estrada de Ferro Vitória e Minas (EFVM), Estrada de Ferro Carajás (EFC) e MRS Logística, todas com capacidade superior a 27 toneladas de carga por eixo – vêm realizando grandes investimentos. A companhia Vale, por exemplo, tem trabalhado sistematicamente de forma a evoluir a eficiência de seu transporte, aumentando a carga por eixo para 32,5 toneladas. A busca pelo aprimoramento é constante, como informa Eduardo Bartolomeu, diretor de operações da Logística da Vale: “O nosso truque tem limite de 35 toneladas por eixo. Então nós temos como frente tentar carregar o máximo possível até 35 toneladas sem prejudicar a via, sem prejudicar a segurança operacional. Todos os esforços da área de desenvolvimento estão voltados para utilizar o máximo possível do vagão. Qual é o *drive* de uma ferrovia *heavy haul*? Aumentar a carga por eixo, a segurança operacional, a estabilidade”. (MAIS, 2017)

Para utilizar o máximo possível que os vagões e locomotivas têm a oferecer é necessário que haja boas condições de operação, garantindo assim a segurança operacional. Nesse contexto entra a importância estrutural das linhas férreas, os custos com superestrutura da via permanente contemplam a provisão de orçamento para a manutenção do subleito, lastro, dormentes, trilhos, fixações, sinalização, telecomunicação, instalações elétricas, passagens em nível, estrutura para as estações, além de equipes de manutenção, que garantem o seu adequado funcionamento a fim de não ocorrerem paradas inusitadas ou falhas que poderiam levar a péssimas consequências, como perda de ativos e danos ambientais. (SGAVIOLI, F. 2012)

Uma das grandes causas de interrupções de operação e de acidentes ferroviários é causada pela descontinuidade das linhas férreas devido a defeitos estruturais, como as trincas, que podem levar a fratura do trilho causando danos irreparáveis. Devido ao fato de o processo de soldagem alterar a microestrutura do material de base, quando da etapa de aquecimento das partes a serem soldadas, esta área do trilho se torna mais propícia a falhas. Por esta razão o estudo nesta região em particular do trilho se torna tão importante, devido à tendência de possíveis falhas nela ocorrerem, sendo assim, a otimização desses processos é de grande interesse para o setor ferroviário.

2.2 VIA PERMANENTE

As ferrovias são compostas de diversos subsistemas essenciais para seu funcionamento dentre os quais se destaca a via permanente. Apresentado na Figura 1, a via permanente é a denominação utilizada para o conjunto de camadas e de elementos que possibilitam a passagem de trens. Seus componentes, apresentados na figura 1, são divididos em dois grupos: a infra-estrutura e a superestrutura. (DNIT, 2008)

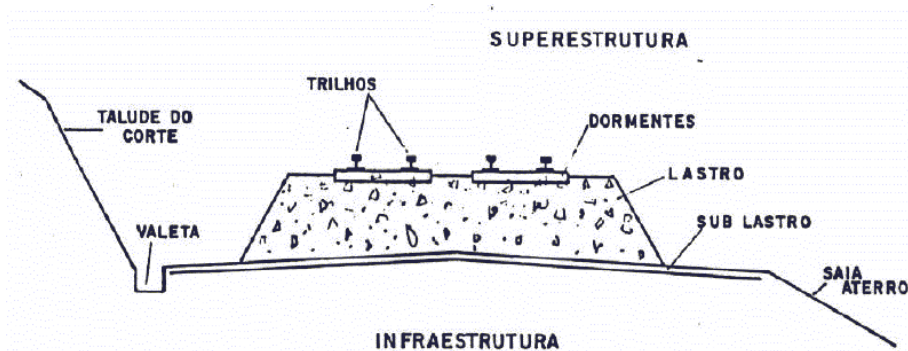


Figura 1 – Componentes da via permanente.
(Fonte: DNIT, 2008)

A infraestrutura é composta pela camada inferior de terraplanagem, chamada subleito ou plataforma e pelo complexo de obras destinadas a suportar a superestrutura, é composta das obras de pontes, viadutos, aterros, cortes, túneis, drenagem, sublastro, subleito, etc.

A superestrutura é a parte da via permanente que recebe os impactos diretos da carga, cujos principais elementos construtivos são os trilhos, dormentes e o lastro. Elementos esses sujeitos à ação de degradação provocada pela circulação dos veículos e de deterioração por ataque do meio ambiente.

A bitola constitui a principal característica de uma via permanente ferroviária. Ela é definida como a distância entre as faces internas dos trilhos da via. Segundo o DNIT (2008), no Brasil, as principais bitolas utilizadas são:

- Métrica: 1000 mm
- Larga: 1600 mm
- Mista: 1600 / 1000 mm

2.3 TRILHOS

O trilho é o elemento da superestrutura que constitui a superfície de rolamento e o dispositivo guia para as rodas dos veículos. Funcionam como viga contínua e transferem as solicitações das rodas para os dormentes. Os trilhos devem possuir algumas características mecânicas e metalúrgicas básicas a fim de desempenhar seu papel: (SCHNEIDER E. L, 2005)

- Altos limites de escoamento e de resistência aliados a uma boa tenacidade;
- Resistência ao desgaste, alta dureza e resistência à fadiga;
- Alta tenacidade à fratura e resistência à propagação de trincas pré-existentes;
- Soldabilidade adequada e baixa susceptibilidade a fragilização pelo hidrogênio.

A rigidez dos trilhos deve ser adequada para que essas funções sejam realizadas sem que ocorram deflexões excessivas entre os dormentes. Defeitos e descontinuidades nos trilhos são prejudiciais e podem levar a efeitos dinâmicos indesejáveis à via permanente e vibração nos veículos. Os principais limitantes da vida útil dos trilhos são: o desgaste, devido ao contato metal-metal que ocorre entre roda e trilho, e a fadiga causada pelo carregamento cíclico, que pode levar a sua ruptura. (DNIT, 2008)

A sua forma atual é denominada como sendo do tipo *Vignole*. Esse perfil favorece a resistência à flexão, pois devido a sua geometria há maior concentração de massa do trilho nos pontos onde as tensões normais são maiores, otimizando o uso do material. O trilho é

composto pelo boleto, alma e patim. A Figura 2 mostra um desenho esquemático de um trilho ferroviário e as partes que o compõe. (SCHNEIDER E. L., 2005)

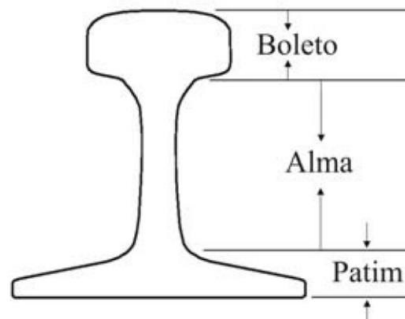


Figura 2 – Desenho esquemático de um perfil de trilho ferroviário e suas partes.
(Fonte: DNIT, 2008)

2.4 PROCESSO DE SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA

O processo de soldagem por resistência consiste na junção de duas partes através da geração de calor, ocasionada pela resistência à passagem de uma alta intensidade de corrente elétrica através do contato das mesmas, conciliada com a aplicação de uma determinada pressão nas superfícies a serem unidas. Neste tipo de soldagem as peças são aquecidas por efeito Joule, ocorrendo fusão localizada do material na região de contato das partes. (BRANDI, S. D., 1995)

A energia térmica total gerada durante o procedimento de soldagem por resistência elétrica pode ser calculado pela lei de Joule, de acordo com a equação a seguir:

$$Q = \frac{1}{J} \int_0^t I^2 R_T dt$$

Onde:

Q = Energia térmica total (J)

J = 1/4,185 cal

I = Corrente elétrica de soldagem (A)

R_T = Resistência elétrica total do conjunto (Ω)

dt = intervalo de tempo de passagem da corrente (s)

Para o cálculo da Resistência elétrica total do conjunto deve ser considerado o somatório de todas as resistências à circulação de corrente elétrica entre os dois eletrodos, conectados ao secundário do transformador. Isso inclui as resistências de contato dos eletrodos à peça, as resistências de cada uma das peças e a resistência de contato entre as partes, sendo esta última a mais importante, devido ao fato de ser neste local que se formará a geração de calor.

O processo de soldagem por resistência pode ser dividido em dois grupos, a saber:

- Soldagem por Superposição.
- Soldagem topo-a-topo.

O enfoque deste trabalho será dado à soldagem topo-a-topo, mais especificamente a soldagem de topo por centelhamento, que é uma das espécies desse gênero. Este tipo de solda é amplamente utilizado para a junção de trilhos, correntes, aros de rodas automotivas, entre outras aplicações.

2.5 PRINCÍPIOS DA SOLDAGEM TOPO-A-TOPO POR CENTELHAMENTO

Na Soldagem topo-a-topo por centelhamento (*Flash Butt Welding – FBW*), as extremidades das duas partes a serem soldadas são fixadas através de mordentes-eletrodos, que são conectados ao circuito elétrico secundário de um transformador de soldagem por resistência. Durante a operação, um dos mordentes-eletrodos permanece estático enquanto o outro se move, realizando movimentos na direção axial de acordo com os parâmetros impostos pelo operador. Ao se iniciar o processo de soldagem, o mordente móvel se afasta a uma distancia pré-determinada (normalmente na escala milimétrica) e a diferença de potencial é então aplicada às peças, enquanto a parte móvel avança em direção a fixa. No momento em que o contato entre as peças acontece, inicia-se então um fluxo de corrente através das irregularidades superficiais das partes, como demonstrado na Figura 3, gerando descargas elétricas através de curtos circuitos e fazendo com que essas áreas superficiais sofram aquecimento resistivo. Este aquecimento é dado por efeito Joule, atingindo elevadas temperaturas, até o ponto de fusão do material. (MODENESI, P. J., 2006)

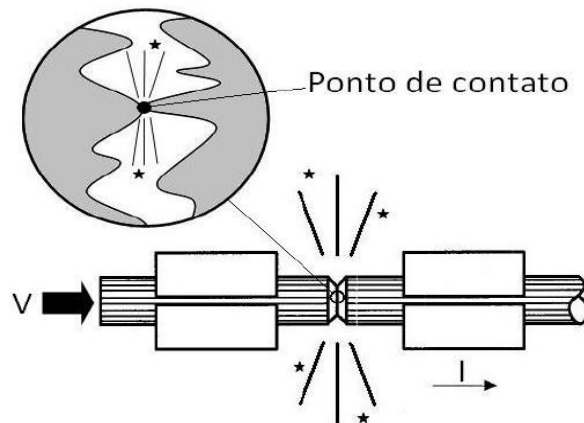


Figura 3 – Contato das irregularidades superficiais
(Fonte: DOMINGUES, N. 2013)

Ressalta-se que uma parte do material fundido é repelida durante o aquecimento devido a efeitos magnéticos, oriundos da alta intensidade de corrente elétrica, para este fenômeno dá-se o nome de centelhamento. Por fim, é aplicado o recalque, que é uma força exercida de modo a comprimir as partes uma contra a outra. Durante esse processo expulsa-se parte do metal de base fundido, o que garante a eliminação de impurezas e irregularidades. A resistência mecânica da junta soldada fica comparável com a do metal base, devido ao coalescimento das superfícies oriunda das ligações interatômicas estabelecidas. (FILHO, O.G., 2007)

A Figura 4 representa de forma genérica as etapas do processo de soldagem por centelhamento, as quais serão detalhadamente explicadas ao longo deste trabalho.

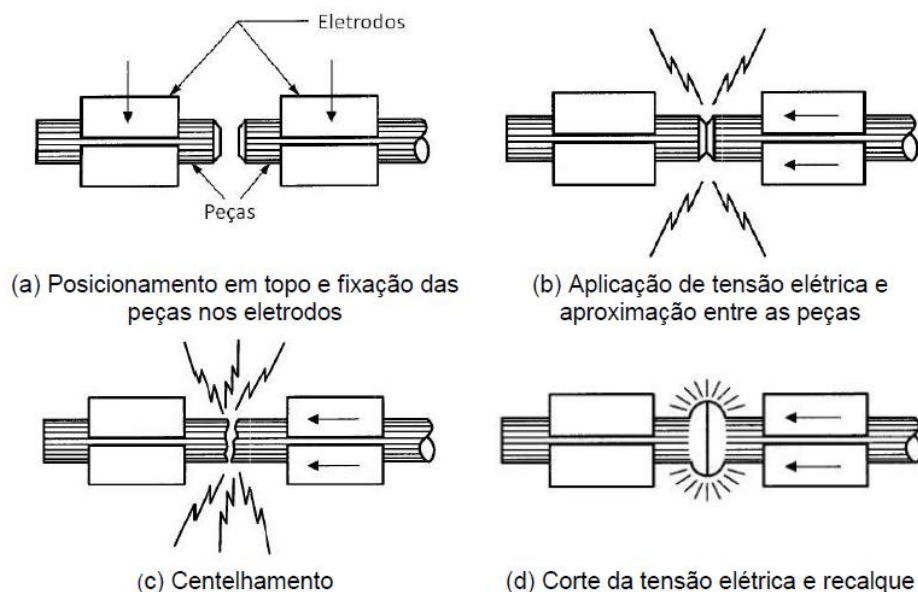


Figura 4 – Etapas básicas da soldagem de topo por centelhamento.
(Fonte: DOMINGUES, N. 2013)

2.6 CARACTERÍSTICAS METALÚRGICAS DA SOLDA POR CENTELHAMENTO

As propriedades físicas e metalúrgicas do metal base dependem exclusivamente da microestrutura do material. Uma vez que as soldas a topo por centelhamento são realizadas sem nenhum metal de adição e devem possuir as mesmas características do metal de base, no recalque, a orientação dos grãos é modificada o quê pode gerar algum efeito na sua resistência mecânica.

Durante o processo de produção de trilhos ferroviários diferentes taxas de resfriamento são obtidas em cada uma das partes dos trilhos, havendo a formação de tensões residuais, como mostra a Figura 5, e consequentes distorções e empenamentos dos mesmos, até que se atinja a temperatura ambiente. (MANSOURI, H., 2004)

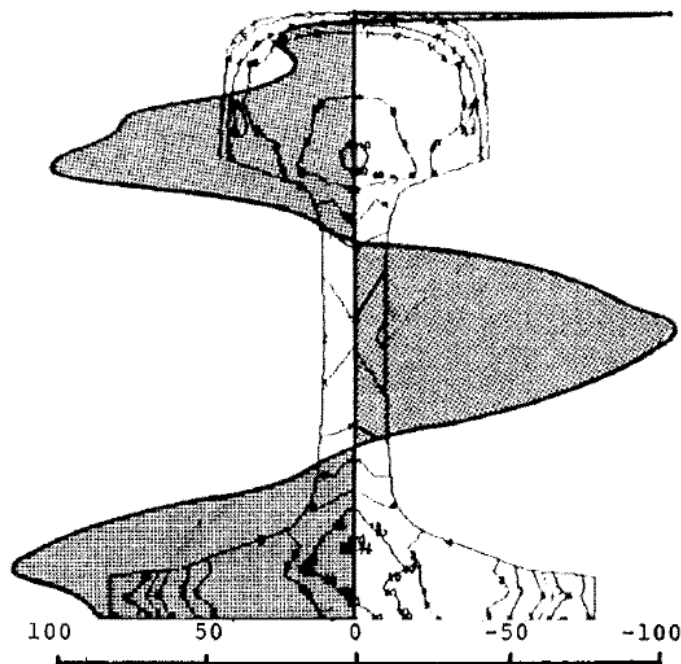


Figura 5 – Tensões residuais (N/mm²) na seção do trilho após o resfriamento
(Fonte: MANSOURI, H. 2004)

Esses empenamentos não são desejáveis, pois geram desalinhamento dos trilhos, sendo os trilhos submetidos a uma etapa de alinhamento através de rolos, que o deformam plasticamente na direção vertical, em ambos os sentidos, diversas vezes, até que no final do procedimento se obtenha o trilho alinhado.

Segundo Mansouri (2004), durante o processo de soldagem por centelhamento, devido ao aumento de temperatura nas extremidades a serem soldada – ZAC – e consequente resfriamento, há a formação de novas tensões residuais, como mostra a Figura 6.

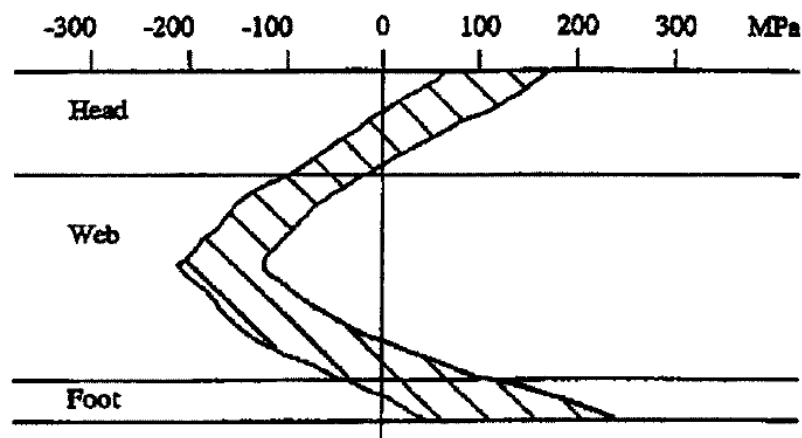


Figura 6 – Tensões residuais no trilho após o processo de soldagem por centelhamento.
(Fonte: MANSOURI, H. 2004)

Observa-se que as tensões residuais na seção transversal dos trilhos são praticamente opostas quando comparadas o metal de base com a região da solda. No primeiro caso observamos que após o resfriamento e alinhamento os trilhos possuem tensões de tração no Boleto e no Patim e de compressão na região da Alma, porém, após o processo de soldagem obtêm-se tensões de compressão no Boleto e no Patim e de tração na Alma, na região afetada pela solda. Essa característica de compressão no boleto e no patim é benéfica, uma vez que inibiria possíveis falhas superficiais por fadiga nessa região. Já na região da alma, a tensão de tração aumenta a probabilidade de ocorrência de falha, assim como sua propagação, sendo, portanto, essa região de especial interesse durante o procedimento de modo a se desenvolver métodos a fim de eliminar ou reduzir essas tensões. (MANSOURI, H., 2004)

A fim de se reconhecer a microestrutura da região afetada pelas soldas obtidas através do processo de centelhamento, Mansouri realizou experimentos em trilhos, tipo UIC 60, cuja composição química é mostrada na tabela 1 e, a partir desses, analisando a microestrutura do metal, subdividiu a área afetada pela solda em três diferentes regiões, conforme ilustrado na figura 7, cada uma dessas regiões é mais bem detalhada adiante.

Tabela 1 – Composição química trilhos UIC 60

Composto	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni
% Peso	0,59	1,09	0,27	0,01	0,008	0,02	0,01

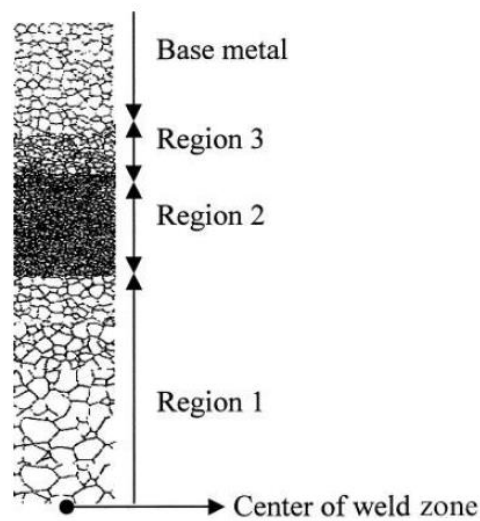
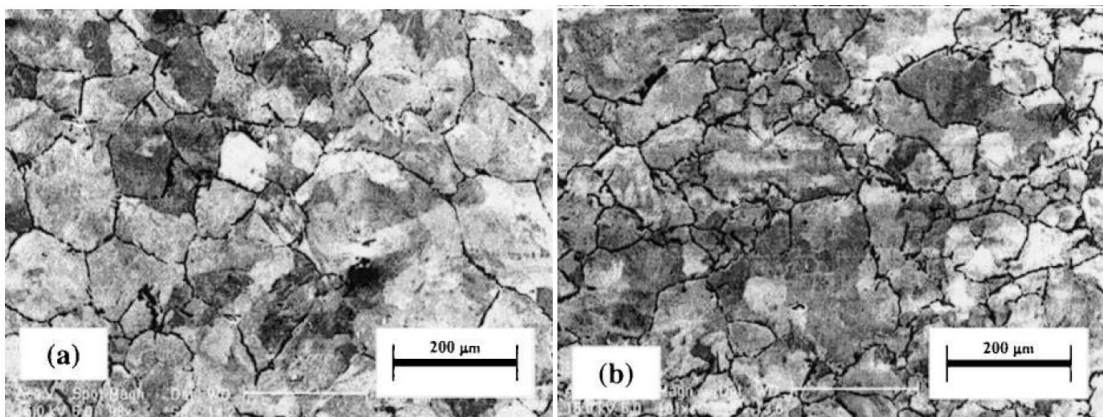


Figura 7 – Diagrama esquemático das regiões microestruturais formadas após o processo de soldagem por centelhamento. (Fonte: MANSOURI, H. 2004)

a) Região 1: Crescimento de grão

Esta região é adjacente ao centro da solda, com extensão de aproximadamente 20 mm, segundo Mansouri. Durante o processo de soldagem, esta representa a área submetida às maiores temperaturas, havendo considerável crescimento de grãos. De acordo com a escala da norma ASTM o tamanho dos grãos nessa região chegam a cinco. Sua microestrutura inclui Perlita e Ferrita. As figuras 8 (a), (b) e (c), demonstram a variação do crescimento de grãos nessa região com o afastamento do centro de solda, a figura 8 (a) é a microestrutura no centro da solda, a figura 8 (b) em um ponto a 6 mm do centro da solda e a figura 8 (c) em um ponto a 9 mm do centro da solda.



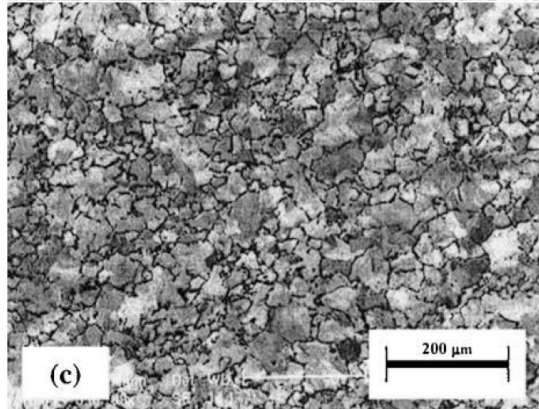


Figura 8 – Variação do crescimento de grãos. (a) Centro da solda, (b) 6 mm do centro da solda e (c) 9 mm do centro da solda

(Fonte: MANSOURI, H. 2004)

b) Região 2: Recristalização

Esta é a região situada após a região 1, tem uma extensão de cerca de 13 mm. Na microestrutura desta área encontra-se perlita e ferrita, como mostrado na Figura 9. Na área de transição entre as regiões 1 e 2 há uma mistura de grão finos e grossos, de baixa espessura, a Figura 10 representa essa área de transição.

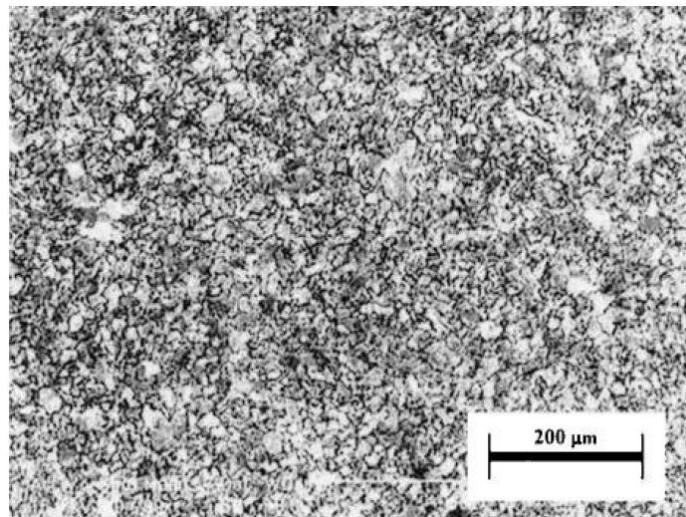


Figura 9 – Microestrutura da região de recristalização da área de solda (Região 2).

(Fonte: MANSOURI, H. 2004)

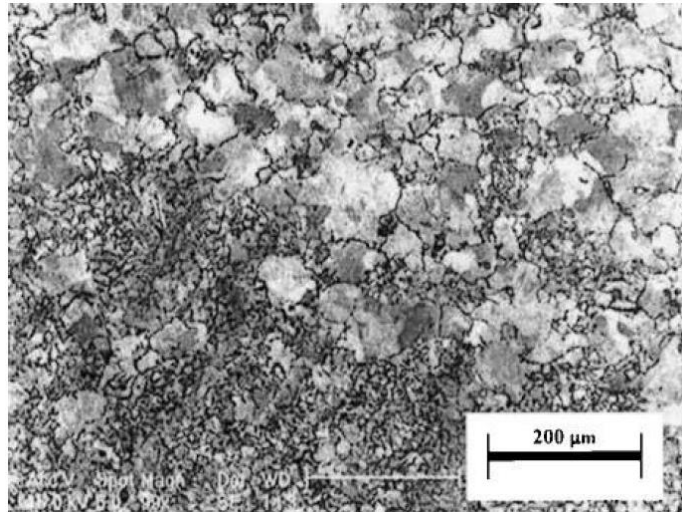


Figura 10 – Microestrutura da área de transição entre as Regiões 1 e 2.
(Fonte: MANSOURI, H. 2004)

c) Região 3: Região parcialmente transformada

Esta é a região mais externa da zona afetada pelo calor. Nessa área há a formação de pequenos grãos de ferrita entre os grãos de perlita presentes inicialmente, a figura 11 a seguir representa sua microestrutura. Há de se ressaltar que o tamanho de grãos observados nessa região é o mesmo dos grãos do metal de base, sendo que a única diferença entre essa região e o metal de base é o surgimento de grãos de ferrita no interior das perlitas iniciais.

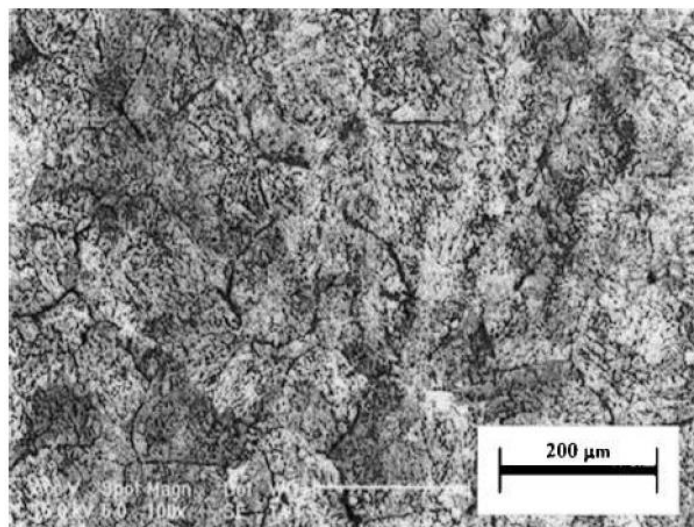


Figura 11 – Microestrutura da região parcialmente transformada (Região 3).
(Fonte: MANSOURI, H. 2004)

A microestrutura das regiões mostradas acima é formada pela combinação perlita-ferrita. Observa-se que a ferrita ocupa cerca de 5 a 10% da microestrutura e reveste quase todos os contornos de grãos da perlita, com exceção da região 3, na qual os grãos de ferrita se encontram no interior dos grãos de perlita. Há de se destacar também que devido à natureza da soldagem topo a topo por centelhamento, todos os grãos formados são proporcionais quanto a sua dimensão, possuindo dimensões iguais em todos os sentidos (*equiaxed*) e que não há efeitos metalúrgicos indesejáveis como a solidificação com crescimento dendrítico. (MANSOURI, H., 2004)

Um fato que há de ser ressaltado é de a dureza do trilho após o processo de solda ser superior na região da alma do trilho do que no patim e no boleto. Uma vez que a razão entre a área superficial lateral e o volume é maior na alma do que no boleto e no patim, a taxa de resfriamento daquela região é mais elevada que a taxa de resfriamento dessas. A figura 12 demonstra a variação dos valores de dureza para o trilho ensaiado por Mansouri, no eixo vertical observa-se valores de dureza Brinell e no eixo horizontal a distância em relação a cabeça do mesmo.

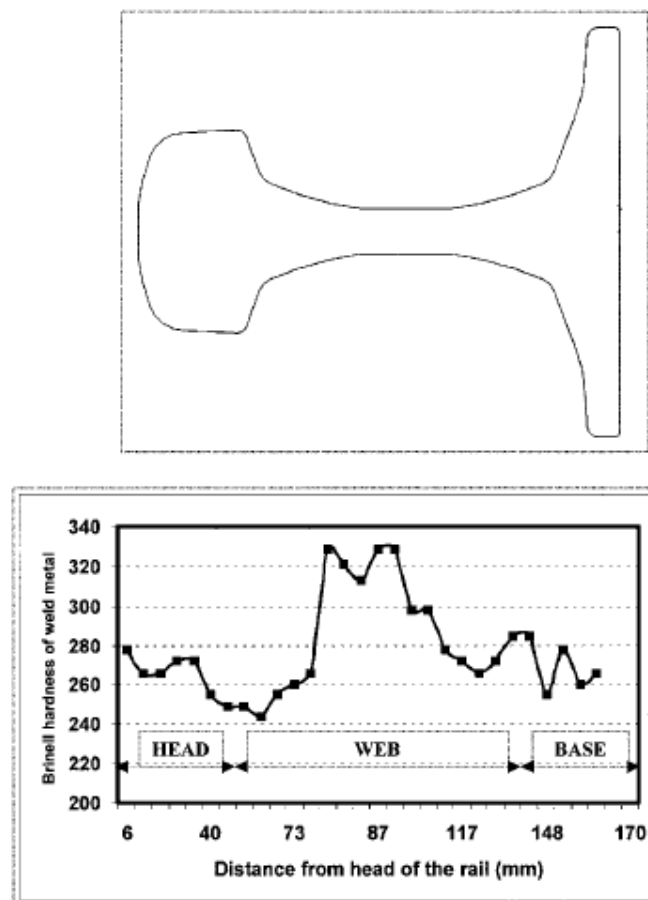


Figura 12 – Distribuição da dureza pela seção vertical do trilho soldado por FBW (Fonte: MANSOURI, H. 2004)

Como foi observado, o processo de soldagem topo a topo gera grandes diferenças metalúrgicas desde a linha de centro da solda, região mais quente, até a área mais distante atingida pelo gradiente de temperatura – Zona termicamente afetada pelo calor (ZAC). Muitas vezes o esfriamento da peça ocorre em velocidades relativamente altas, gerando um aumento no endurecimento da mesma. Em relação à microestrutura do material, se torna mais grossa à medida que se avança em direção à linha central da solda, podendo ter pequenas extensões no caso de aços com baixa temperabilidade e maiores extensões em aços de mais elevadas temperabilidade. (MADEIRA, R.P, 2010)

Se o aço a ser soldado pelo processo de centelhamento for temperável, consideráveis diferenças de dureza serão produzidas na ZAC, sendo recomendado tratamento térmico pós-soldagem se uma dureza uniforme for desejada.

Os fatores que afetam diretamente a microestrutura da ZAC em um processo de centelhamento são:

- A temperatura máxima atingida;
- A taxa de resfriamento;
- A temperabilidade do aço;
- O trabalho mecânico realizado durante o recalque.

2.7 ETAPAS DO PROCESSO DE SOLDAGEM POR CENTELHAMENTO

O processo de *Flash Butt Welding* (FBW), por centelhamento, pode ser dividido em três estágios;

- Pré-aquecimento;
- Centelhamento;
- Recalque.

Ressaltando-se ainda a necessidade do processo de revenimento ao final da soldagem, que não faz parte do processo em si, mas é vastamente utilizado para garantir uma melhor qualidade estrutural da solda e de toda a zona afetada pelo calor (ZAC).

A Figura 13 representa um ciclo de soldagem por centelhamento, onde se observa o comportamento das principais variáveis do processo com o tempo, como a variação da corrente elétrica e o movimento de avanço da parte móvel durante o procedimento. (SAVAGE, W.F., 1962)

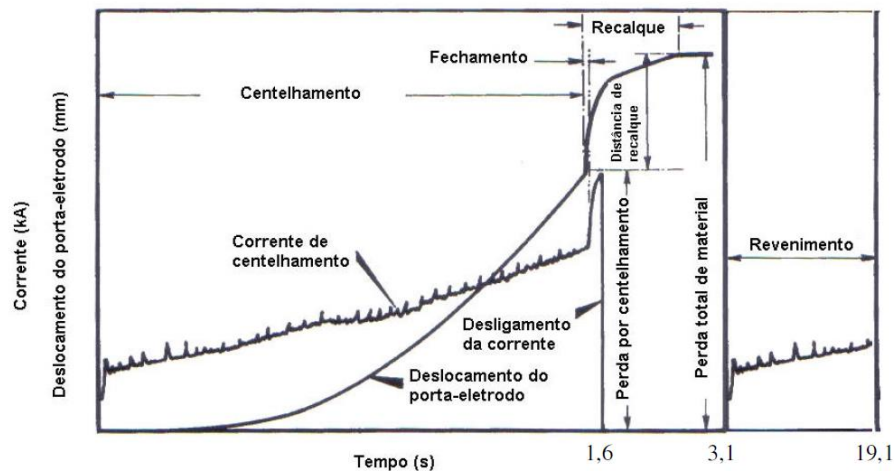


Figura 13 – Diagrama esquemático de um ciclo de soldagem por centelhamento
(Fonte: SAVAGE, W. F. 1962)

Cada uma das principais etapas do processo de soldagem topo-a-topo por centelhamento será mais bem explicada a seguir. O conhecimento das minúcias do procedimento é desejável a fim de que se torne possível, através de análises e experimentações, observar relações de causa e efeito de cada uma das etapas do procedimento com o resultado final da solda adquirida, buscando a otimização do processo.

Na figura 14 encontram-se, como forma de exemplificação, informações sobre a pressão exercida entre as partes a serem soldadas, a corrente elétrica e o deslocamento da garra móvel em cada uma das etapas do processo, para uma solda específica. A fase mais a esquerda, até o tempo de 18 segundos, se caracteriza pelo alinhamento das peças, durante o tempo de 18 a 70 segundos ocorre a etapa de pré-aquecimento, seguido pelo centelhamento de 70 a 95 segundos, o recalque de 95 a 102 segundos e finalmente o tratamento térmico, com duração de 30 segundos. Os valores apresentados na figura 14 são peculiares ao caso da soldagem realizada, não sendo abrangentes a qualquer caso. Estes gráficos foram retirados do manual de soldagem da máquina GAAS 80/580, do fabricante Schlatter e representam de forma bem clara cada uma das etapas do procedimento e o comportamento das principais variáveis do processo, corrente elétrica, força e deslocamento. (MANUAL, 2011)

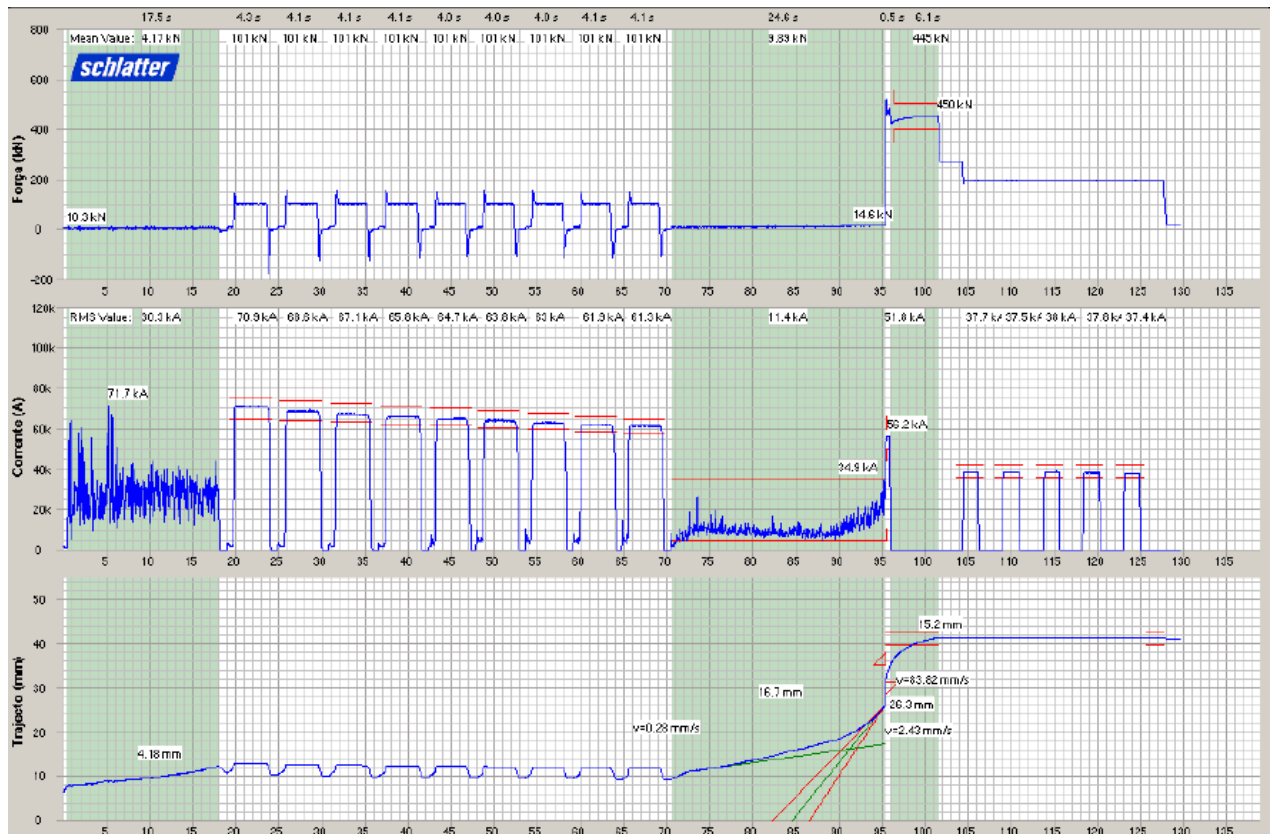


Figura 14 – Ciclo de soldagem por centelhamento
(Fonte: MANUAL, 2011)

2.7.1 Pré-aquecimento

Segundo Modenesi P. J. (2000), define-se como temperatura de pré-aquecimento a temperatura inicial em que toda a peça, ou a parte desta onde a solda será realizada, é mantida antes do início da operação. O preaquecimento das partes é obtido com a realização de movimentos oscilatórios, de afastamento e aproximação, das superfícies a serem soldadas. A etapa de aproximação permite a circulação de uma corrente elétrica, que aquece a peça, seguida de um afastamento que cessa o fluxo de corrente, devido à baixa diferença de potencial aplicada. Este ciclo é realizado repetidas vezes, até que se obtenha a temperatura desejada de pré-aquecimento. (FILHO, O.G., 2007)

O pré-aquecimento é um processo resistivo (Efeito Joule), no qual o calor é gerado pela resistência à passagem de corrente elétrica pelas chapas. Para que ele ocorra deve haver uma pressão mínima para que haja contato entre as partes, porém não o suficiente para ocorrer o processo de centelhamento prematuro e consequente junção das partes. O contato entre as peças deve ser mantido por um período curto de tempo, a fim de se evitar sobreaquecimento localizado. Por esse motivo o processo é feito em ciclos, mantendo as peças unidas por

pequenos intervalos de tempo, afastando-as e aproximando-as novamente, permitindo com que o calor gerado seja difundido pelas peças. (FILHO, O.G., 2007)

A necessidade ou não da realização do pré-aquecimento depende de alguns fatores, como o teor de carbono e outros elementos de liga no metal a ser soldado. É indicado esse procedimento se as partes soldadas apresentarem baixa ductilidade ou dureza muito alta. Além da composição química, a rigidez da junta a ser soldada também influencia a necessidade de sua realização ou não.

Logo, a necessidade de pré-aquecimento aumenta com os seguintes fatores:

- Teor de carbono no metal de base;
- Teor de ligas do metal de base;
- Temperatura inicial;
- Tamanho da peça;
- Velocidade de soldagem.

2.7.2 Centelhamento

O processo de centelhamento ocorre continuamente com a aproximação das partes até que as saliências entrem em contato e sejam formadas pontes, provocando o fechamento do circuito, fusão localizada, ejeção de metal fundido e geração de descargas elétricas. A passagem da corrente elétrica, pelos contatos formados pelas irregularidades superficiais das partes, gera forças eletromagnéticas que atuam na junta soldada e ejetam as partículas de metal fundido, podendo ocorrer ruptura completa da ponte, resultando em abertura do circuito elétrico naquela localidade, formando-se arcos elétricos que impactam as superfícies, sendo cessados quando da mudança de polaridade do circuito ou da interrupção da tensão elétrica. Neste momento, o ciclo de formação de pontes de contato seguida da geração de arcos elétricos é reiniciado. O processo é repetido continuamente até que uma pequena extensão longitudinal de cada uma das extremidades atinja a temperatura de desejada, de maneira uniforme.

A etapa do centelhamento influencia na temperatura adquirida nas extremidades a serem soldadas antes do processo de recalque. Diversas faixas e parâmetros de temperatura podem ser adquiridos com diferentes combinações de variáveis de centelhamento, sendo que a ideal é uma combinação que proporcione uma distribuição uniforme de temperatura nas

interfaces da junta, em um tempo mínimo e com a menor perda de material durante o processo. (SAVAGE, W.F., 1962)

Para se produzir uma junta soldada com boa resistência é desejável que se tenha uma distribuição de temperatura uniforme através da junta. A distribuição da temperatura que existe nas interfaces adjacentes da junta de topo no momento do recalque é obtida através das variáveis de centelhamento.

Para o processo de soldagem topo a topo, as principais variáveis de centelhamento são:

- Modelo de Centelhamento
- Distancia dos mordentes
- Tensão de Centelhamento.

Cada uma destas variáveis será mais bem detalhada adiante.

2.7.3 Recalque

O processo de recalque, representado na Figura 4 (D), se dá após o centelhamento, quando as extremidades das peças já estão à temperatura necessária ao processo. Nesta etapa ocorre então a compressão das partes, uma contra a outra, objetivando a eliminação do material excedente e das possíveis impurezas da soldagem, realizando, após solidificação, a fixação das extremidades a serem soldadas.

Nesta etapa do processo pode-se citar como variáveis:

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

Cada uma dessas variáveis será mais bem detalhada adiante.

2.7.4 Revenimento

O revenimento não é considerado como parte do processo de soldagem a topo por centelhamento. Mas devido a sua importância e vasta aplicação como tratamento térmico pós-soldagem é de interesse o seu maior entendimento, assim como as relações causa e efeito provenientes desse tratamento térmico.

O processo consiste na aplicação, durante um intervalo de tempo, de uma corrente elétrica através da junta soldada. Isso provoca o aquecimento da ZAC, com o objetivo de restaurar sua microestrutura e suas propriedades mecânicas, aliviando possíveis tensões residuais provenientes da soldagem, as quais são uma das principais causas de falha em FBW. É importante ressaltar que o revenimento pós-soldagem é efetuado abaixo da zona de temperatura crítica, onde há a transformação de ferrita a austenita.

O revenimento é amplamente usado para redução da, muitas vezes, elevada dureza do material, adquirida durante o processo de soldagem. Essa redução é proporcional ao tempo de permanência da corrente elétrica através da junta soldada, sendo que a maior diferença é notada nos primeiros minutos do tratamento térmico. A figura 15 detalha a variação da dureza de uma junta soldada com o tempo de aplicação do revenimento para um aço com teor de carbono de 0,35%. Nota-se que nos primeiros minutos de processo há grande variação de dureza do material e que após certo tempo de aplicação essa variação diminui muito, tornando-se inviável para aplicações práticas. (FILHO, O. G. 2007)

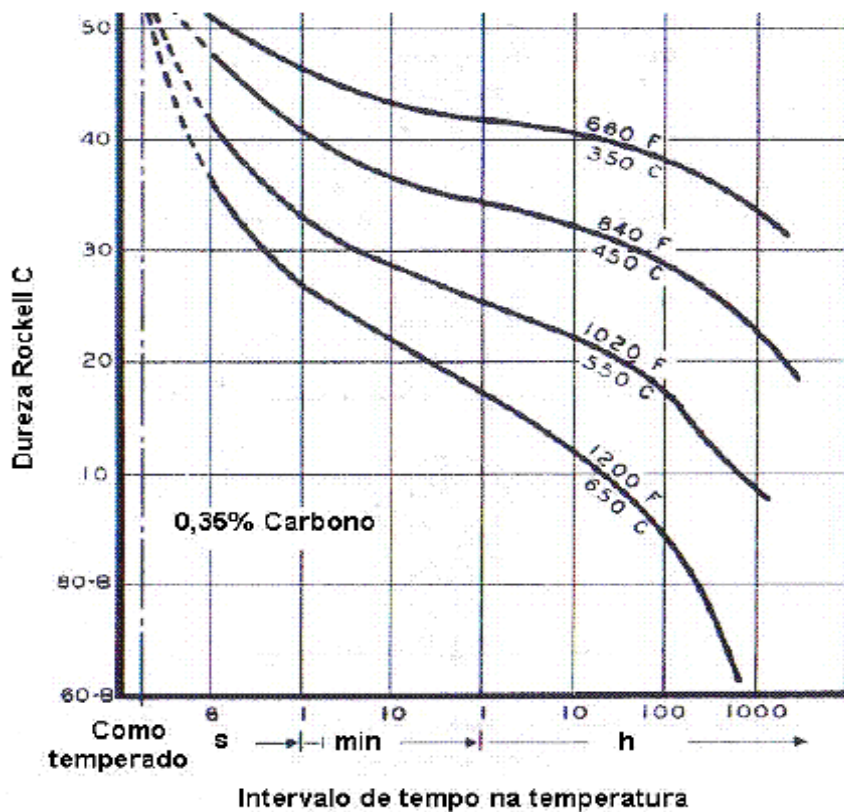


Figura 15 – Diminuição da dureza com o tempo de revenimento.
(Fonte: FILHO, O. G. 2007)

2.8 VARIÁVEIS DO PROCESSO

2.8.1 Variáveis de centelhamento

a) *Modelo de Centelhamento*

A trajetória do eletrodo, ou da mesa móvel da máquina de soldagem, também denominada modelo de centelhamento, é um dos principais influenciadores da distribuição de temperaturas, da quantidade de material consumido no centelhamento e, conseqüentemente, da integridade das juntas. (WELDING HANDBOOK, 1980)

O centelhamento pode ser obtido de três formas distintas;

- Centelhamento Linear – Oscilações com velocidade constante;
- Centelhamento Parabólico – Oscilações com aceleração constante;
- Centelhamento cúbico – Oscilações com aumento constante da aceleração.

Cada um destes tipos de centelhamento resulta em um diferente gradiente de temperatura nas extremidades a serem soldadas e também na quantidade de material repellido/perdido durante o processo. Em regra, quanto maior a velocidade, ou a taxa de aceleração, maior será o gradiente de temperatura adquirido. O processo de centelhamento parabólico produz gradientes de temperatura mais íngremes do que os de centelhamento linear quando consideramos a mesma perda de material e o mesmo tempo de centelhamento. (SAVAGE, W.F., 1962)

Nos modelos lineares, cujos eletrodos são aproximados em velocidade constante, o tempo de centelhamento normalmente é grande, levando a um maior consumo de material até que a temperatura desejada seja adquirida. Conseqüentemente, uma distribuição de temperatura mais uniforme na região de solda é obtida. Esse modelo é normalmente empregado em peças com maiores seções, que requeiram maior força de recalque, o que só é possível com uma extensa zona de metal aquecido. (DOMINGUES, N., 2013)

Os modelos parabólicos, por conseqüente, são mais empregados em peças de menor seção. A interface de união das partes atinge rapidamente a temperatura desejada, sendo que a extensão da zona aquecida é menor que no modelo linear. Como resultado, o gradiente de temperatura é maior. (DOMINGUES, N., 2013)

A escolha apropriada de um modelo de centelhamento é fundamental para a obtenção da forma da curva de distribuição de temperatura desejada. Conseqüentemente, os parâmetros

do processo de recalque são dependentes do modo de centelhamento, uma vez que a resistência ao escoamento do metal na compressão é sensível à temperatura. Na prática, usualmente, o início do processo se dá com velocidades baixas e constantes, para iniciar o processo com a peça ainda fria, e em seguida transforma-se no método parabólico. (SAVAGE, W.F., 1962)

b) Distância dos mordentes

Outro fator que gera oscilações no gradiente de temperatura das superfícies a serem soldadas é à distância de fixação dos mordentes até as suas extremidades. Esta distância, juntamente com a área da seção transversal, influencia a distribuição de calor na região da solda. Em regra, quanto maior for esta distância, melhor será a distribuição de calor na superfície, dependendo do grau de difusividade térmica do material. Analogamente, quanto menor for a distância e maior a área da seção transversal, maior será o gradiente de temperatura da junta. (SAVAGE, W.F., 1962)

A respeito do grau de difusividade térmica do material é importante ressaltar que quanto maior for esse grau, mais sensível este material será a distância dos mordentes. O grau de difusividade térmica também está relacionado com a perda de material durante o centelhamento. Sendo que menor difusividade térmica gera maior perda de material, uma vez que ocorre fundição localizada de material, sendo possível que este material seja repellido pela força magnética gerada pela corrente. (SAVAGE, W.F., 1962)

Segundo Gomes Filho (2007), a distância dos eletrodos à superfície das peças influencia no gradiente de temperatura em cada uma das partes, de modo que se essa distância for diferente em cada uma das partes poderá ocorrer diferenças de temperatura em suas superfícies e conseqüente encavalamento das junta soldada quando ocorrer a aplicação da força de recalque.

c) Tensão elétrica de centelhamento

Essa variável é controlada a partir da tensão elétrica no circuito secundário e pela duração de sua aplicação que, combinadas, influencia na quantidade e distribuição de calor gerado ao longo da extensão das peças. A variação da temperatura da junta a ser soldada é proporcional à intensidade da corrente elétrica, que depende diretamente da tensão, uma vez que o fluxo de corrente é o causador do efeito joule.

A Tensão elétrica deve ser a menor possível que seja capaz de provocar o processo de centelhamento durante o movimento oscilatório. Normalmente esta diferença de potencial varia de 2 a 16 Volts, não sendo esta suficiente para manter um arco elétrico entre as extremidades. Logo, só há fluxo de corrente quando há contato entre as irregularidades das duas extremidades. (SULLIVAN, J.F. 1971)

A aplicação de tensão elétrica acima da necessária para a fusão do metal resulta em maior quantidade de material fundido, como esse material fundido normalmente é repellido das superfícies das partes, não será observada influência significativa na distribuição de temperatura ao longo das extensões das peças. Portanto, a tensão elétrica não influencia na distribuição de temperatura na superfície a ser soldada. A principal influência da tensão elétrica é em relação às superfícies. Tensões mais baixas são capazes de produzir superfícies mais lisas pelo processo de centelhamento, a forma de onda, porém, deve ser completamente senoidal, ou o mais próximo possível. (SULLIVAN, J.F. 1971)

2.8.2 Variáveis de recalque

a) *Corrente de Recalque*

Em relação às características elétricas é importante salientar que 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, U. 2007)

A corrente elétrica pode ser mantida durante um determinado tempo após o início do recalque (*upset current*), isso gera um aumento da temperatura da junta soldada em um curto intervalo de tempo. Esse processo garante que a temperatura do material de base se mantenha acima de sua temperatura de fusão durante o recalque, garantindo a necessidade de menores forças de recalque durante esse processo e a eliminação de impurezas. Porém, o uso do *upset current* pode trazer algumas desvantagens, como um maior avanço no recalque, com consequente maior perda de material, e um aumento na zona afetada pelo calor.

Usualmente, há a cessão do fluxo de corrente com o início do processo de recalque. Deve-se atentar que ao se desligar o transformador antes do processo de recalque definitivamente começar, pode haver a solidificação precipitada e irregular do material de base, principalmente para pequenas áreas transversais. E caso a cessão da corrente ocorra

muito tempo após o processo de recalque, pode haver um superaquecimento, com fundição e altas influências na zona termicamente afetada, devido ao curto-circuito.

b) Força de recalque

A intensidade da força exercida durante esse processo dependerá das características do metal de base utilizado, como o limite de escoamento, e da área da seção a ser soldada. Em geral, pressões entre 70 a 84 MPa são necessárias para recalcar aço-carbono comuns. Enquanto para aços inoxidáveis a pressão necessária fica em torno de 138 a 207 MPa. Materiais com boa resistência mecânica em altas temperaturas exigem maior força de recalque. (AMERICAN WELDING SOCIETY, 1991)

Forças de recalque muito baixas podem reter um filme líquido de metal contendo óxidos, conseqüentemente podendo ocasionar inclusões ou rechupes ao se solidificarem, sendo pontos concentradores de tensão. Além disso, uma força de recalque adequada pode beneficiar a microestrutura da zona fundida uma vez que a deformação plástica e temperatura adequada propiciam o refinamento de grãos de perlita e uma distribuição homogênea desses grãos, resultando em um aumento de dureza. (ZIEMIAN, C. W. 2012)

c) Distância de Recalque

Em relação à extensão do recalque, assume-se que um avanço com dimensão da metade da maior espessura da seção transversal seja suficiente para expelir qualquer impureza no interior desta. Porém, algumas ligas requerem distância de até 1,25 vezes a espessura de sua seção, para definitiva expulsão dos óxidos e impurezas. (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1971).

d) Velocidade de recalque

Em relação à velocidade, o processo de recalque se divide em duas etapas distintas. A parte inicial do processo, primeira etapa, é realizada em alta velocidade e representa cerca de 50 a 80% do mesmo. Com a continuidade do recalque há o aumento da resistência do material de base, o que reduz a velocidade de avanço do porta-eletrodo, sendo esta etapa caracterizada pela baixa e quase constante taxa de velocidade, dependendo da distribuição de temperatura e

da pressão. São desejáveis velocidades mais altas de recalque, uma vez que estas resultam em menos defeitos em relação a velocidades baixas. (FILHO, O. G. 2007)

2.9 DESCONTINUIDADES EM JUNTAS SOLDADAS POR CENTELHAMENTO

Segundo Domingues (2013), as descontinuidades em juntas soldadas por centelhamento podem ser classificadas de acordo com sua origem em dois tipos, descontinuidades mecânicas e metalúrgicas. A seguir serão demonstradas as descontinuidades mais relevantes para o estudo do processo de soldagem por centelhamento.

2.9.1 Descontinuidades Mecânicas

As descontinuidades mecânicas são oriundas, geralmente, do desalinhamento entre as partes a serem soldadas e de irregularidades no acabamento das soldas. Esse tipo de descontinuidade pode ser detectado visualmente, por inspeção da solda. O desalinhamento pode ser vertical, lateral ou angular. (DOMINGUES, N. 2013)

a) Desalinhamentos Vertical e Lateral

Com o desalinhamento vertical, e/ou lateral, parte da peça não é envolvida no processo de soldagem, com o início do recalque essa região não envolvida tende a se sobrepor à outra parte e a junta apresenta a descontinuidade. Outro fator causador desse tipo de descontinuidade é a formação de gradientes de temperaturas distintos em cada peça, isso faz com que as peças deslizem uma sobre a outra com a aplicação da força de recalque. A Figura 16 demonstra esse processo de desalinhamento, também denominada encavalamento. (ASM Vol 06)

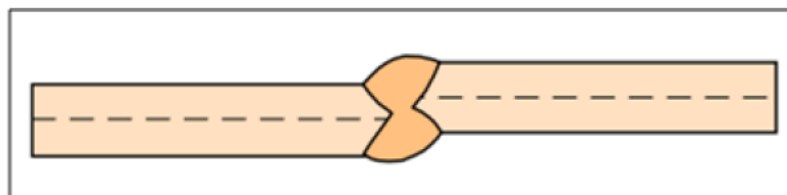


Figura 16 – Esquema de junta soldada com desalinhamento
(Fonte: DOMINGUES, N. 2013)

Uma vez encavalada, se a junta passar pelo processo de laminação será propício o surgimento de arestas, a partir do dobramento desse material sobreposto. Essas arestas formadas na superfície da peça se tornarão futuros concentradores de tensões, quando da aplicação de esforços mecânicos, atuando como nucleadoras de trincas. A figura 17 demonstra o aspecto de uma junta soldada com encavalamento após raspagem e laminação a frio. (DOMINGUES, N. 2013)

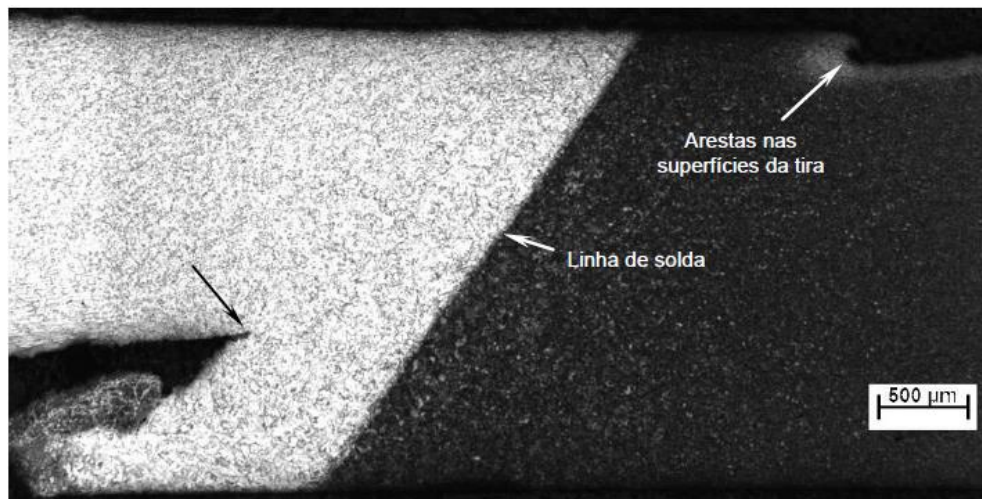


Figura 17 – Aspecto microscópico de uma junta com “encavalamento”, após raspagem e laminação a frio. (Fonte: DOMINGUES, N. 2013)

b) Desalinhamento Angular

Neste tipo de desalinhamento há uma inclinação relativa entre as peças a serem soldadas, de modo que o centelhamento não se desenvolva de maneira uniforme ao longo das superfícies em contato. Os diferentes gradientes de temperatura provocam uma força de recalque não uniformemente distribuída nas superfícies da seção, comprometendo a junta.

Além disso, as discontinuidades mecânicas também podem ser provocadas pelas operações de acabamento da solda. Um exemplo é a raspagem, que deve ser feita de maneira a margear a junta soldada, havendo sobra de material ou se este for removido em excesso poderá prejudicar a integridade da junta. (DOMINGUES, N. 2013)

2.9.2 Descontinuidades Metalúrgicas

a) Óxidos e outras Inclusões

Os óxidos são formados devido a reações do metal aquecido com o oxigênio atmosférico que ocorrem nas superfícies das partes a serem soldadas, por este motivo normalmente estão situados na linha central da junta soldada ou nas extremidades da mesma.

Segundo Ichiyama, quanto maiores forem os teores de Si, Mn e Al no aço maior será a propensão de formação de óxidos refratários de elevado ponto de fusão na junta. Os óxidos predominantes são o MnO e o SiO₂ (pontos de fusão, respectivamente, de 1850°C e 1723°C), os quais são difíceis de serem solubilizados e expulsos da junta devido à alta viscosidade que adquirem ao fundir. (ICHYAMA, Y. 1971)

Este fenômeno deve ser evitado, uma vez que a ocorrência de óxidos aprisionados na linha de solda é responsável pela nucleação de trincas. Portanto deve-se controlar a reação das superfícies com o oxigênio ou, se não possível este controle, os óxidos oriundos de tais reações devem ser expelidos da junta durante o processo de recalque. Este último é o caso da solda por centelhamento, por esta não utilizar de gases de proteção durante a soldagem, é inevitável a formação de óxidos, devendo esses ser expulsos durante o processo de recalque. (DOMINGUES, N. 2013)

De acordo com Riecanisky e Lucas, o processo de recalque não é capaz de eliminar todos os óxidos presentes na junta. Seus estudos demonstraram que durante esse processo parte dos óxidos é dispersa pela junta soldada. (RIECANSKY, V. 1974), Rasanen e Martikainen demonstraram ainda que os óxidos são divididos em grupos, de acordo com seu tamanho, sendo que óxidos isolados e de pequenas dimensões não oferecem risco à fratura, quando submetidos a testes de flexão, porém, agrupamentos com grande número de óxidos demonstraram-se muito sensíveis quando submetidos a tal experimento. A figura 18 a seguir demonstra um agrupamento de óxidos na linha de soldagem oriunda de um processo de solda por centelhamento. (RASANEN, A. N. 2011)

Peçanha em seus estudos conclui que as inclusões que mais contribuem para a ocorrência de cavidades são os óxidos de alumínio. Embora este defeito seja recuperável, quando ele ocorre com grande frequência, há perda de produtividade. (PEÇANHA, R. M., 1999).

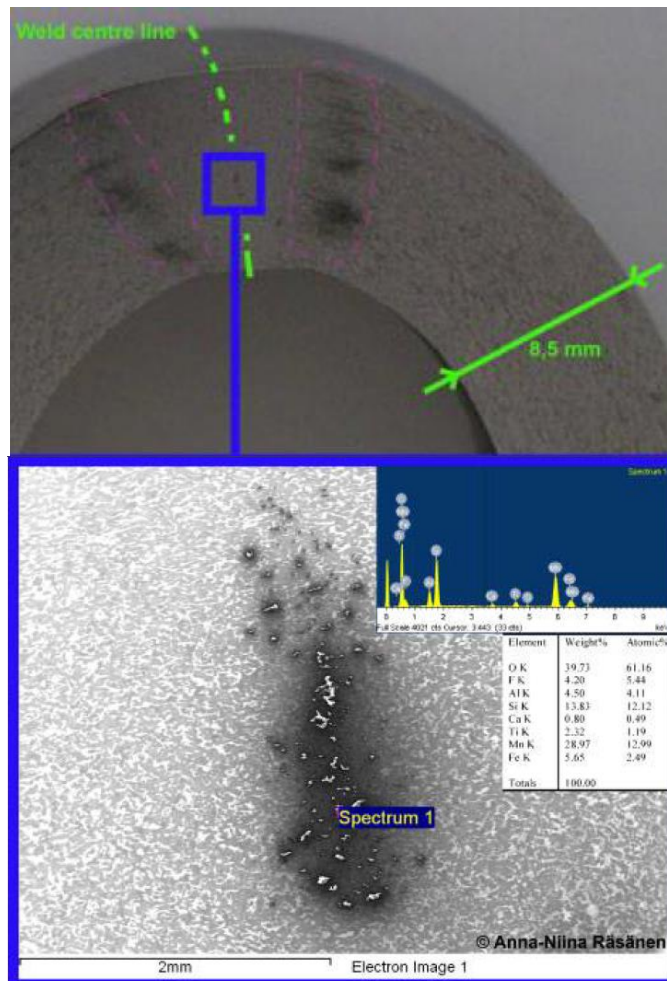


Figura 18 – Agrupamento de óxidos na linha de soldagem
(Fonte: RASANEN, A. N. 2011)

Conforme Cunha, na fase final do centelhamento, as faces da junta ficam cobertas com uma fina camada de metal fundido, que no caso dos aços, esta entre 0,1 a 0,2 mm de espessura. Ainda segundo ele, existe a formação de um filme de óxidos de alumínio, silício e manganês líquidos nesta camada. Essa camada de óxido é formada devido a três situações:

- Se durante a fase final do centelhamento, houver a formação de uma camada de óxido de baixo ponto de fusão como, por exemplo, óxido de ferro;
- Se em aços que contêm teores mais elevados de silício ou alumínio houver a presença de óxidos refratários;
- Ou se houver um rápido resfriamento das faces no final do centelhamento e a camada não pôde ser totalmente retirada no recalque.

Segundo Natal, a presença de inclusões e seu tamanho médio tem influência direta na tenacidade dos aços. Quanto maior o número e tamanho de inclusões, menor o valor de tenacidade.

b) *Porosidades*

São geradas quando a pressão é insuficiente para eliminar todas as crateras formadas durante o centelhamento, pode ocorrer, por exemplo, quando as juntas a serem soldadas são muito grandes para a máquina de solda. (BRACARENSE, A.Q., 2000)

Energias muito elevadas no processo de centelhamento também podem originar porosidade, isso se dá devido ao surgimento de grandes crateras oriundas da expulsão de metal fundido. Quando as peças a serem soldadas forem de grande extensão é aconselhável fazer um pequeno chanfro, de modo que o centelhamento dê início no centro da seção transversal. Isso ajuda a evitar a retenção de partículas sólidas na solda. (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2011)

c) *Metal fundido na solda*

Durante o processo de centelhamento certa quantidade de metal fundido é formada nas superfícies a serem soldadas e devem ser expelidas do interior da junta durante o recalque, fazendo com que a área da solda se mantenha em uma condição homogênea. Entretanto, muitas vezes esse metal fundido não é expelido da junta, ficando retido em seu interior. Sua retenção pode ser prejudicial uma vez que durante sua solidificação, e conseqüente contração, há a possibilidade de surgimento de trincas. Além disso, há o fato de sua ductilidade ser menor do que a do metal soldado, por esses motivos sua presença deve ser evitada ou reduzida ao máximo. (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2007)

d) *Descarbonetação*

Durante o processo de soldagem por centelhamento, há uma redistribuição das impurezas e carbono entre as fases líquida e sólida na superfície das juntas a serem soldadas. Devido à distribuição de carbono da fase sólida para a fase líquida, há diminuição de concentração desse elemento no metal sólido vizinho ao metal fundido. Durante o recalque, quando o metal fundido é expulso, a região vizinha fica com menor concentração de carbono, formando assim a banda branca ou zona descarbonetada, com um valor de dureza mais baixo. A descarbonetação está diretamente ligada ao aumento da temperatura, a um maior tempo de aquecimento e a uma quantidade de carbono no metal base acima de 0,2%. (NATAL, Y.D. 1988)

Portanto, esse fenômeno consiste na perda de carbono de tais metais devido ao processo de soldagem, especialmente nos casos onde a mesma é realizada ao ar livre, sem a utilização de gases de proteção, e há a retenção desses metais com níveis de carbono mais baixos no interior da junta soldada. Essa retenção é caracterizada pelo surgimento de zonas de pontos moles, devido ao baixo teor de carbono. (FILHO, O. G. 2007)

Riecansky e Lucas (1974) estudaram o fenômeno em experimentos realizados em grades seções de aço soldadas por centelhamento. Após a soldagem, a junta foi cortada e foram encontradas faixas brilhantes, que caracterizam a descarbonetação. De acordo com os autores, a variação química afeta as propriedades mecânicas da junta. Em especial, como dito, a variação dos níveis de carbono variam a dureza e a ductilidade. Ainda segundo os autores, essas faixas descarbonetadas têm predominantemente a presença de ferrita e tratamentos térmicos de altas temperaturas são prováveis de eliminar essas faixas, descontinuidades.

Essa descontinuidade aparece em uma estreita faixa ao longo da interface de solda em aços carbono. Segundo Natal (1988), essa descontinuidade só irá influenciar a solda se existir em excesso. Essa banda branca é susceptível ao ataque químico apresentando coloração mais clara, já que possui diferente coloração química do metal base. (NATAL, Y.D. 1988)

e) *Flat spots / Penetradores*

Outros defeitos de origem metalúrgica são flat spots e penetradores. Ambos se apresentam como planos de formato irregular na superfície de fratura da interface de solda, com composição química modificada. Durante o processo de centelhamento ocorre o contato das irregularidades superficiais das partes, permitindo a passagem de uma alta densidade de corrente. Esse curto circuito promove a fusão e ejeção de partículas resultantes da formação dessas pontes de contatos e do impacto dos arcos elétricos. A ejeção dessas partículas geram pequenas cavidades nas superfícies, possibilitando a entrada de oxigênio e outros contaminantes atmosféricos, reagindo com a superfície aquecida da cavidade, alterando sua composição química. Durante o processo de recalque, muitas vezes, não é possível expelir todo o material contaminado, especialmente os que se encontram nas regiões mais internas, sendo que esses se solidificam na junta. Quando submetidos a esforços, essas peças tendem a se fraturar nessas regiões, apresentando uma fratura frágil, com um aspecto plano das superfícies que sofreram a falha. (SULLIVAN, J. F. 1971)

A diferença entre flat spots e penetradores se dá pela sua posição na peça. Flat spots são inteiramente localizados na seção onde ocorreu a solda, ou seja, a modificação química

resultante do procedimento está inteiramente localizada na seção da solda. Os penetradores, por sua vez, se caracterizam quando essa modificação química ocorrida durante a soldagem se estende para uma superfície livre da peça, não somente em sua seção.

A área de flat spots é caracterizada por uma região plana, frágil e de coloração mais escura, onde estão presentes as partículas sólidas segregadas, ao lado da fratura dúctil do material de base, essa variação da composição química pode ser observada na figura 19 a seguir. Esse tipo de descontinuidade é mais bem observado quando sujeito a tensões de flexão. A figura 20 demonstra uma fratura, obtida por um teste de tensão, localizada em um flat spot. (RASANEN, A. N. 2011)

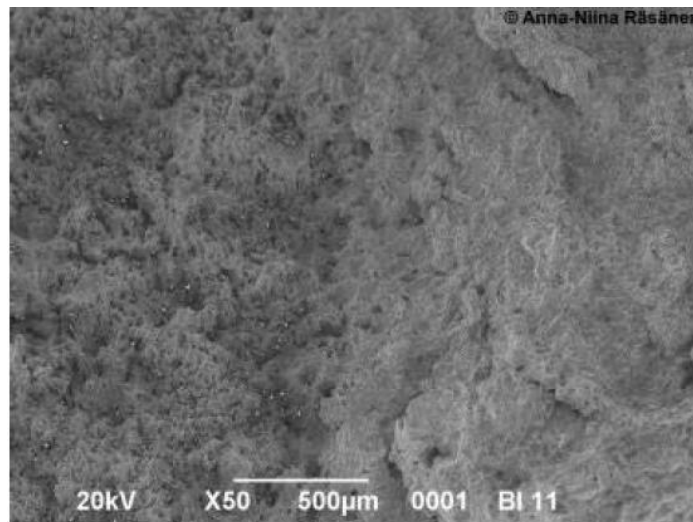


Figura 19 – Fratura frágil no flat spot (Esquerda) e fratura dúctil no material de base (direita).
(Fonte: RASANEN, A. N. 2011)



Figura 20 – Flat spot localizado em fratura, corpo de prova sujeito ao teste de flexão.
(Fonte: RASANEN, A. N. 2011)

f) *Trincas*

As trincas podem ser classificadas em dois tipos, trincas a quente e trincas a frio.

– *Trincas a quente*

As ligas que possuem baixa ductilidade em uma faixa de temperatura abaixo do ponto de fusão podem ser suscetíveis a rachaduras a quente. Tais ligas são mais difíceis de soldar por centelhamento, mas podem ser soldadas se utilizadas condições de soldagem favoráveis.

Em tal operação, é provável o surgimento de rachaduras que são superficiais o suficiente para serem removidas durante o processo de usinagem do material repellido pelo recalque. Para evitar o surgimento de tais discontinuidades é importante uma coordenação precisa da cessão da corrente elétrica e do movimento de recalque, além disso, a junta deve se encontrar sob uma compressão moderada durante o resfriamento.

– *Trincas a frio*

O calor insuficiente ou o excesso de deslocamento durante o recalque pode fazer com que parte do metal frio seja submetido a forças de compressão. A trinca normalmente ocorre transversalmente à linha de solda. O uso de taxa de resfriamento mais lenta, assim como tratamentos térmicos pós-soldagem, são capazes de aliviar tensões residuais que podem causar rachaduras sob cargas de serviço. Podem ocorrer interna ou externamente nas juntas.

Segundo Peçanha, trincas são divisões finitas bidimensionais que podem ocorrer na zona de fusão, ZAC ou metal base. As trincas situadas na zona de fusão são trincas de solidificação visíveis microscopicamente e trincas intergranulares. (PEÇANHA, R. M.1999)

g) *Sobreaquecimento dos mordentes*

São discontinuidades geradas por sobreaquecimento localizado no material de base a ser soldado, na região de contato dos eletrodos com a peça. Esse tipo de discontinuidade pode ser evitado mantendo-se as superfícies das peças e dos eletrodos limpas e bem posicionadas para que haja um bom fluxo de corrente por toda a área de contato entre as partes.

2.10 FALHA POR FADIGA

A maioria das falhas encontradas em trilhos, e também em máquinas em geral, se dá devido a variação da intensidade das cargas no tempo. Essas falhas normalmente ocorrem em níveis de tensões significativamente inferiores aos valores da resistência ao escoamento dos materiais. Assim, uma vez que os trilhos estão sujeitos a um carregamento dinâmico, com o deslocamento das rodas que supostam a carga dos vagões e das locomotivas sobre eles, é comum a ocorrência de fraturas por fadiga nos mesmos. (FALHA, 2017)

O processo de falha por fadiga pode ser dividido em três ciclos: nucleação de trincas, propagação de trincas e ruptura final. A superfície do material fraturado por fadiga apresenta claramente cada uma dessas três regiões características de sua propagação, como mostrado na Figura 21. A nucleação de trincas, causadoras das falhas por fadiga, pode ser iniciada, como representado na Figura 22, em locais de alta concentração de tensão, como interfaces de uma inclusão, deslizamentos de planos produzindo extrusões e intrusões, defeitos na superfície livre do material, entre outros. (FALHA, 2017)

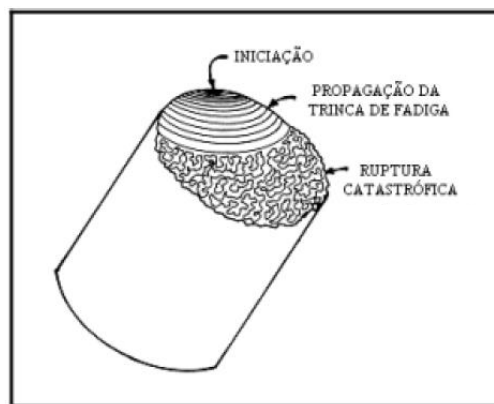


Figura 21 – Aspecto esquemático das regiões de fratura
(Fonte: FALHA. 2017)

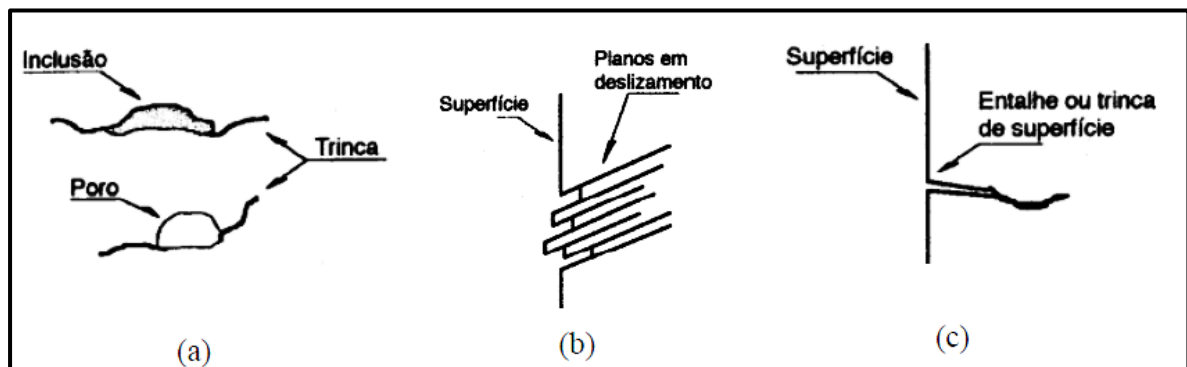


Figura 22 – (a) Defeitos Internos, (b) Deslizamentos de planos e (c) Defeitos superficiais.
(Fonte: FALHA. 2017)

Segundo Ribeiro, H. V. (2011), a vida em fadiga de uma estrutura qualquer é dependente da nucleação de trincas e da propagação das mesmas, sendo influenciada por diversos fatores como o estado estrutural do material, suas propriedades mecânicas, razão de carga, frequência, etc. Entretanto sabemos que a região da solda, diferente do material de base, possui uma estrutura mais propícia ao surgimento de falhas devido às alterações metalúrgicas sofrida, sendo, portanto, de grande importância o entendimento dos principais agentes responsáveis pelo seu surgimento a fim de eliminá-los ou evitar seu aparecimento.

Os principais causadores das falhas por fadiga produzidos no processo de solda são: porosidade, inclusões de escórias, fusão incompleta e mordeduras. O surgimento desses podem influenciar significativamente a vida em fadiga, pois eles conduzem a uma concentração de tensão severa e, portanto, aceleram o crescimento de trincas por fadiga. (RIBEIRO, H. V. 2011)

2.11 SOLDAGEM POR CENTELHAMENTO DE ACORDO COM A NORMA AREMA

2.11.1 Especificações dos trilhos

a) *Especificações metalúrgicas dos trilhos*

Essas especificações cobrem trilhos de aço que pesam pelo menos 115 lb/yd (57kg/m). De acordo com a norma AREMA, a composição química dos trilhos deve estar dentro dos limites impostos pela tabela X, demonstrada a seguir.

Tabela 2 – Composição química. Fonte: AREMA. (Adaptada pelo autor)

Elemento	Análise química, porcentagem do peso		Análise do Produto, porcentagem do peso Tolerância além dos limites especificados		
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	
Carbono	0,74	0,84	0,04	0,04	
Manganês	0,80	1,10	0,06	0,06	
Fósforo	-	0,035	-	0,008	
Enxofre	-	0,037	-	0,008	
Silício	0,10	0,60	0,02	0,05	
Níquel		*			
Cromo		*			
Molibdênio		*			
Vanádio		*			
* Os limites do manganês e dos elementos residuais podem ser variados pelo fornecedor para que seja atingido os requerimentos quanto a propriedades mecânica, como segue.					
Manganês		Níquel	Cromo	Molibdênio	Vanádio
Mínimo	Máximo	Máximo	Máximo	Máximo	Máximo
0,60	0,79	0,25	0,50	0,10	0,03
1,11	1,25	0,25	0,50	0,10	0,03

b) *Propriedades mecânicas dos trilhos*

Os trilhos devem ser produzidos conforme especificados pelo comprador, com os limites estabelecidos, quanto à dureza, pela tabela 2 e, quanto aos limites de resistência ao escoamento e à tração, pela tabela 3.

Tabela 3 – Especificações de produção dos trilhos, limites de dureza. Fonte: AREMA. Adaptado pelo Autor

Tipo de Trilho	Dureza Brinell, HB	
	Mínimo	Máximo
Trilho Padrão	300	-
Trilho de alta resistência (tratamento térmico)	341	388 *
* Pode ser excedido desde que uma microestrutura completamente perlítica seja mantida		

Tabela 4 – Especificações de produção dos trilhos, limites de tensões. Fonte: AREMA. Adaptado pelo Autor

Descrição	Trilho Padrão	Trilho de Alta Resistência
Resistência ao Escoamento, ksi, mínimo	70	110
Resistência à Tração, ksi, mínimo	140	170
Alongamento em 2 polegadas, porcentagem, mínimo	9	10

c) *Seção dos trilhos*

As seções dos trilhos devem, de acordo com o modelo especificado pelo comprador, estar dentro dos limites dimensionais apresentados na tabela 4.

Tabela 5 – Limites dimensionais da seção dos trilhos. Fonte: AREMA. Adaptado pelo Autor

Descrição	Polegadas			
	Trilho		Trilhos de Manutenção	
	Mais	Menos	Mais	Menos
Altura do trilho (medido a 1 pé da extremidade)	0,04	0,015	0,04	0,015
Largura da cabeça do trilho (medida a 1 pé da extremidade)	0,03	0,03	0,015	0,015
Espessura da alma	0,04	0,02	0,04	0,02
Assimetria da cabeça em relação à base	0,06	0,06	0,03	0,03
Largura da base	0,05	0,05	0,03	0,03
Altura da flange	0,025	0,015	0,015	0,015
Obs 1: A concavidade da base não deve exceder 0,010 polegadas. Convexidade não é permitida				
Obs 2: Nenhuma variação será permitida nas dimensões que afetem o ajuste das barras.				
Obs 3: Todos as 4 extremidades da base dos trilhos devem ter os raios de acordo com o exigido $\pm 1/32$ polegadas				
Obs 4: O raio da cabeça deve estar dentro do limite de ± 2 polegadas				

d) *Classificação Superficial*

Serão aceitos os trilhos que não contenham imperfeições de superfície, em número ou características que, a juízo do comprador, os torne impróprios para usos reconhecidos.

▪ **Marcas quentes**

Os trilhos com marcas quentes tais como cisalhamento, crostas, poços ou arranhões quentes maiores que 0,020 polegadas de profundidade devem ser rejeitados.

Os trilhos com marcas de guia na cabeça com profundidade superior a 0,020 polegadas (0,5mm) ou com espessura superior a 0,062 polegadas (1,5mm) devem ser rejeitados

- Arranhões frios

Os trilhos com arranhões a frio longitudinais, formados abaixo de 700 graus F, com mais de 36 polegadas (91cm) de comprimento e/ou 0,010 polegada (0,25mm) de profundidade devem ser rejeitados.

- Protuberâncias

Trilhos com qualquer protuberância de excesso de metal que se estende a partir de sua superfície devem ser rejeitados se a saliência afetar o encaixe da barra de articulação ou se causar desalinhamento maior que 1/16 polegadas (1,6mm) lateralmente.

Trilhos com qualquer protuberância na alma com altura maior que 1/16 polegadas (1,6mm) e área maior que 1/2 polegadas quadradas (322 mm²) devem ser rejeitados.

Nenhuma protuberância de excesso de metal deve ser aceita se sua ocorrência for na cabeça ou na base do mesmo.

2.11.2 Especificações para fabricação de trilhos contínuos soldados

Os requisitos recomendados pela norma AREMA são destinados para aplicação quanto à produção de trilhos contínuos novos para linhas de serviços principais. Os trilhos devem estar de acordo com a edição mais atualizada das especificações AREMA para trilhos de aço.

Todos os trilhos destinados à soldagem devem ser anteriormente examinados. Trilhos que não se enquadrarem nas seguintes especificações devem ser rejeitados.

I. Requerimentos quanto ao alinhamento de trilhos novos recebidos:

- Desvios de linha lateral (horizontal) em qualquer direção em suas extremidades não podem exceder uma coordenada média máxima de 0,03 polegadas (0,762mm) em 3 pés (91,2cm), utilizando uma borda reta, e 0,023 polegadas (0,5842mm) em 18 polegadas (45,72cm), como demonstrado na Figura X (a) a seguir.

- A elevação uniforme da superfície nas extremidades do trilho não deve exceder uma coordenada máxima de 0,025 polegadas (0,635mm) em 36 polegadas (91,44cm) de comprimento do trilho e de 0,025 polegadas (0,635mm) em 18 polegadas (45,72cm), como mostrado na Figura X (b).
- Trilhos cujas superfícies tenham curvaturas descendentes, a partir do centro às extremidades, não devem ser aceitos.

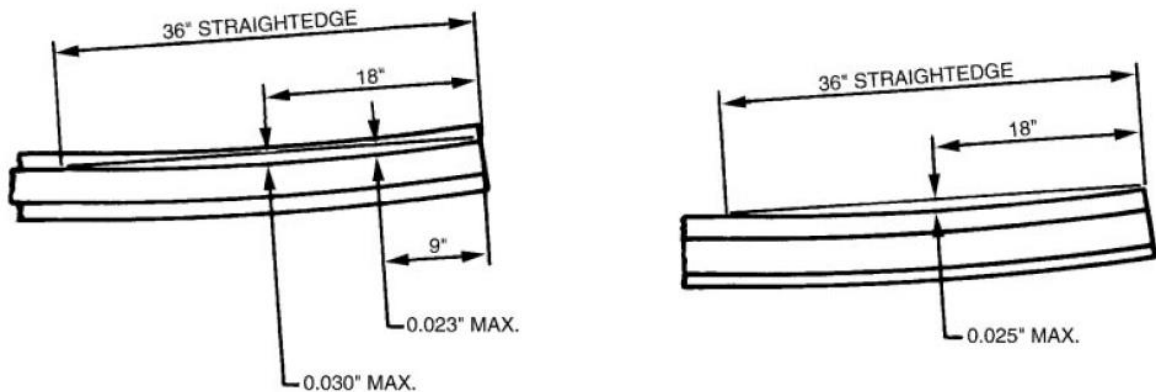


Figura 23 – Tolerâncias dimensionais de curvaturas de trilhos submetidos a solda por centelhamento.
(a) Limites de curvaturas laterais. (b) Limites de curvaturas de elevação

II. Requerimento quanto ao alinhamento do trilho na máquina de solda.

- O alinhamento deve ser realizado na cabeça do mesmo.
- O alinhamento vertical deve proporcionar uma superfície plana de rolamento. Qualquer diferença de altura dos trilhos deve estar na base.
- O alinhamento horizontal deve ser feito de tal forma que qualquer diferença na largura das cabeças de trilhos novos deve ser dividida igualmente em ambos os lados da cabeça do mesmo. O alinhamento horizontal deve ser feito de tal maneira que as almas estejam alinhadas e qualquer diferença de largura nas cabeças deverá ser ajustada por esmerilhamento.
- Desalinhamentos horizontais não devem exceder 0,040 polegadas (1,016mm) na cabeça e/ou 0,125 polegadas (3,175mm) na base.

III. Exigências quanto aos desalinhamentos superficiais gerados pela solda.

- O deslocamento vertical combinado e a curvatura do boleto à temperatura ambiente não devem exceder 0,060 polegadas (1,524mm) para cima, conforme mostrado na Figura 24 (a).
- Não é permitido curvatura para baixo da linha das extremidades, como mostrado na Figura 24 (b).

- A tolerância à soldadura a quente na estação de inspeção varia e deve ser estabelecida pela prática.

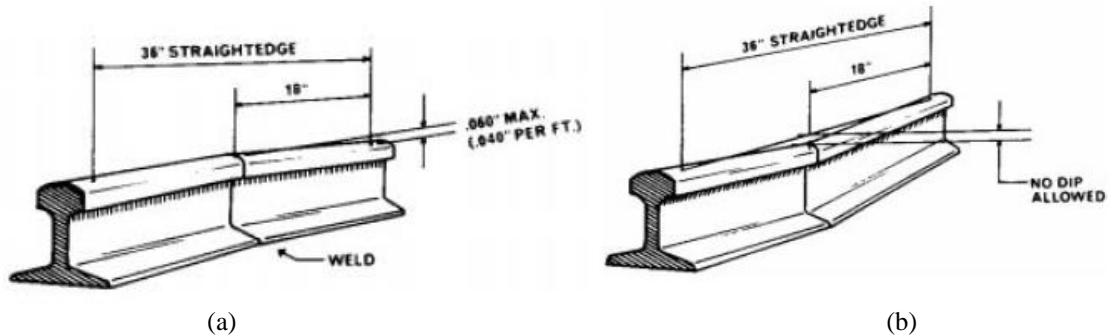


Figura 24 – Tolerância dimensional para desalinhamento vertical de trilhos soldados por centelhamento. (a) Limite para desalinhamento com curva ascendente e (b) Não admitido desalinhamento com curva descendente, do centro às extremidades.

IV. Tolerância de desalinhamento lateral.

- O deslocamento horizontal e a curvatura de torção horizontal à temperatura ambiente não devem exceder 0,060 polegadas (1,524mm), conforme mostrado na Figura Y.

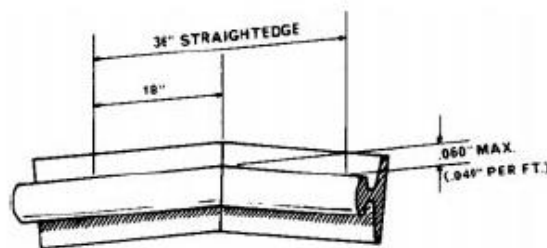


Figura 25 – Tolerância dimensional para desalinhamento horizontal de trilhos soldados por centelhamento

- V. Devem ser permitidos desvios de acabamento não superiores, em módulo, a 0,005 polegadas (0,127mm) da seção principal da superfície da cabeça do trilho.
- VI. As laterais dos trilhos devem ser terminadas a $\pm 0,010$ polegadas (0,0254mm) da seção oposta. A base do trilho deve ser terminada dentro de 0,010 polegadas (0,0254mm) do trilho mais baixo.
- VII. A área da alma (parte inferior da cabeça, alma e parte superior da base) deve ser finalizada com limite máximo de desalinhamento de 1/8 polegadas (3.175mm) em seu contorno. Irregularidades devem ser eliminadas no processo de acabamento.
- VIII. Todos os entalhes causados por condições de deslocamento ou trilhos torcidos devem ser eliminados por esmerilhamento para homogeneizar as variações.

- IX. Todas as aletas originadas devido ao esmerilhamento e/ou resistência ao corte devem ser removidas antes da inspeção final.
- X. Todas as soldaduras que sofreram indicação de falha durante a inspeção de partículas magnéticas devem ser rejeitadas.
- XI. Todos os trilhos utilizados no processo de soldagem por centelhamento (FBW) que apresentarem evidências de queima pelos eletrodos devem ser rejeitados.
- XII. Todas as soldaduras de topo por centelhamento (FBW) devem ser soldadas até pelo menos o ponto de recusa para deformações plásticas e ter no mínimo uma polegada de recalque, mantendo uma polegada como padrão.
- XIII. Se o processo de centelhamento durante o FBW for interrompido, devido a mau funcionamento ou por alguma razão externa, com menos de ½ polegada (12,7mm) de distância de centelhamento remanescente antes do recalque, os trilhos devem ser desconectados e o processo de centelhamento deve ser iniciado novamente.
- XIV. Sempre que possível o esmerilhamento deve ser feito após a soldagem, em uma temperatura elevada. Deve-se tomar cuidado quando o esmerilhamento é feito à temperatura ambiente.
- XV. Quando são feitos cortes irregulares nos trilhos a serem soldados por FBW deve-se pré-aquecer as superfícies antes do processo de centelhamento, a fim que se obtenha um centelhamento uniforme nas extremidades a serem soldadas.
- XVI. Quando um trilho é cortado por chama deve-se efetuar o processo de soldagem o mais rápido possível, de preferência a não exceder 15 minutos do corte, para então evitar a formação de fissuras térmicas profundas nas faces terminais do trilho cortado. Se isso não puder ser feito, quando for soldado as extremidades dos trilhos deverão ser cortadas um mínimo de 6 polegadas (15,24cm) antes de ser soldada.
- XVII. Recomenda-se que uma prensa de alinhamento seja incluída na linha de produção de soldagem para evitar empenamentos indesejáveis, como os citados nos parágrafos II, III e IV.
- XVIII. Recomenda-se que sejam monitorados e gravados os parâmetros de soldagem diários significativos.

2.11.3 Especificações de qualidade para flash butt welding

Esta especificação abrange as propriedades mecânicas, tolerâncias dimensionais e procedimentos de teste necessários para garantir a qualidade das soldas de topo por

centelhamento de todos os trilhos fabricados de acordo com as especificações atuais da norma AREMA. O seguinte destina-se a cobrir a qualificação inicial do processo e garantia de qualidade dos requisitos e procedimentos de rotina.

a) Requerimentos

I. Integridade da Junta

- A ligação entre as duas extremidades do trilho não deve conter mais do que 28,5 mm (1 1/8 polegadas) de descontinuidade.

II. Critérios de Dureza

- Nenhuma solda deve ter valores de dureza maiores que 400 BHN ou 43 Rc.
- A dureza dentro da solda deve situar-se dentro de ± 30 BHN pontos ou ± 5 Rc da dureza da cabeça do trilho, exceto na linha central descarbonetada e no bordo esferoidizado (cementita) da zona afetada pelo calor.

III. Tolerâncias dimensionais

- Todas as soldas deve satisfazer a norma AREMA para a fabricação de trilhos soldados contínuo, item 2.11.2.

IV. Microestrutura

- A microestrutura desejada é 100% perlita. Quando a martensita não temperada ocorre, a prática de soldagem deve ser alterada para passar o teste de flexão.
- Nenhuma queima de eletrodo é permitida (sem martensita, sem metal deslocado e sem transferência de cobre no contato de eletrodo).

V. Teste de flexão lento

- Todas as soldas devem atender ou exceder os requisitos apropriados mostrados na Tabela Z a seguir.

Tabela 6 – Requerimentos de Solda. Fonte: AREMA. Adaptado pelo Autor

Categoria	Módulo de Ruptura (psi)	Deflexão (Polegadas)
Carbono macio (248 BHN min)	100000	1,5
Carbono padrão (300 BHN min)	120000	1,0
Alta resistência (341 BHN min)	125000	0,75

VI. Critérios de aceitação Macroetch

- A linha de soldagem deve ser perpendicular à direção de rolamento do trilho e não deve possuir qualquer área de ataque ácido excessivo.

b) *Procedimentos*

I. Integridade da Junta

- A integridade da junta deve ser determinada a partir das faces de fratura das amostras de teste de flexão.

II. Critérios de dureza

- Os valores de dureza, Rc ou equivalente, devem ser medidos 5mm abaixo da superfície de rolamento, na seção longitudinal vertical a intervalos de 1/8 polegada (3,175mm). Toda a zona soldada do trilho deve ser testada. A medição central deve ser localizada na linha de ligação da solda.

III. Microestrutura

- Se não houver regiões questionáveis, a avaliação da microestrutura é dispensável.
- A avaliação de microestrutura deve ser preparada por procedimento metalográfico padrão para revelar martensita.

IV. Teste de flexão

- Os ensaios de flexão devem ser conduzidos como mostrado na figura X a seguir.
- Um suporte externo deve ser capaz de compensar qualquer desalinhamento na base.

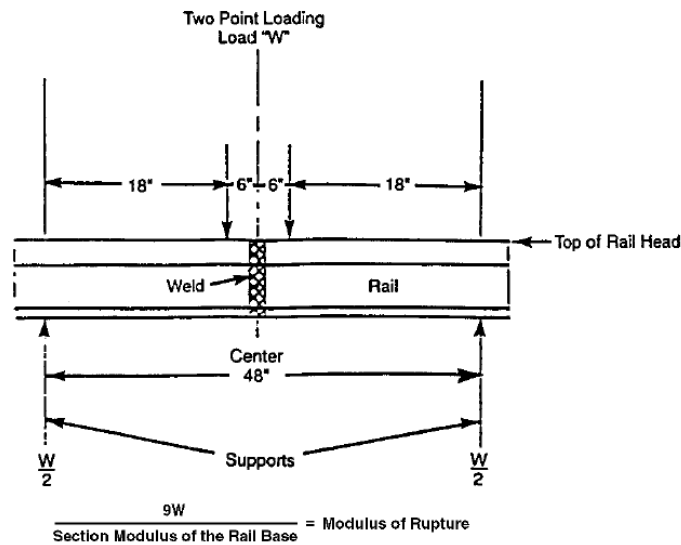


Figura 26 – Disposição das cargas para o teste de flexão lento para determinação da tensão de ruptura

V. Frequência dos testes

- De acordo com a norma AREMA, as soldas devem ser testadas de acordo com as frequências encontradas na Tabela Y a seguir, sempre que o tipo de trilho, seu tamanho ou seu fabricante for alterado.

Tabela 7 – Frequência de testes. Fonte: AREMA. Adaptado pelo Autor

Teste	Qualificação inicial	Garantia de Qualidade
Integridade da Junta	1	1 por ano + Sempre que o comprador especificar
Macroestrutura	1	2 por ano + Sempre que o comprador especificar
Dureza	1	1 por ano + Sempre que o comprador especificar
Microestrutura	De acordo com a necessidade	De acordo com a necessidade
Dimensões	Toda solda	Toda solda
Teste de Flexão	1	1 por ano + Sempre que o comprador especificar

2.12 ESPECIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM

A Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS) é um documento no qual os valores permitidos de diversas variáveis do processo estão registrados para serem adotados, pelo soldador ou operador de soldagem, durante a fabricação de uma dada junta soldada.

Este documento deve atender aos requisitos do código de qualificação, deve conter todas as variáveis essenciais e, quando requerido, variáveis suplementares para ao processo da soldagem especificada.

Para que possa ser utilizada na produção, uma EPS deve ser antes qualificada. Para isso, amostras adequadas devem ser preparadas e soldadas de acordo com a EPS. Corpos de prova devem ser retirados dessas amostras e testados ou examinados, os resultados desses devem então ser avaliados e, com base nos requerimentos estabelecidos pela norma ou projeto, o procedimento deve ser aprovado ou rejeitado, nesse último caso podendo ser convenientemente modificado e testado novamente. (MODENESI, P. J. 2005)

Como testes que podem ser requeridos para a qualificação de uma EPS pode-se citar:

- Ensaio de tração
- Ensaio de impacto
- Ensaio de dureza
- Ensaio de dobramento
- Macrografia
- Micrografia
- Testes de corrosão

Os resultados dos testes devem ser adequadamente colocados em um Registro de Qualificação de Procedimento de Soldagem (RQPS) o qual deve ser referido pela EPS, servindo como atestado de sua adequação aos critérios de aceitação estabelecidos. Após sua qualificação, cópias da EPS já qualificada devem ser encaminhadas para o setor de produção que o deve seguir no desenvolvimento das soldagens.

3 DISCUSSÃO

A seguir será discutido os efeitos das variáveis, citadas anteriormente, do processo de soldagem sobre a junta e também diversas irregularidades presente nesse tipo de solda com os respectivos causadores dessas imperfeições no resultado final da mesma. Também será exposto a proposta de especificação de processo de soldagem (EPS), assim como o registro de qualificação de procedimento de soldagem (RQPS). A intenção é, de uma forma simples, esclarecer o motivo do surgimento de certas falhas e de evitar seu surgimento em processos futuros.

3.1 RELAÇÃO CAUSA E EFEITO NAS ETAPAS DO PROCESSO DE SOLDAGEM POR CENTELHAMENTO

3.1.1 Pré-aquecimento

Explicado o processo de pré-aquecimento anteriormente, vamos agora entender os efeitos que esse procedimento causa nas características finais da junta soldada, assim como os efeitos sobre as demais etapas do processo.

Ao se executar soldas sem pré-aquecimento, ou com pré-aquecimento insuficiente, há um resfriamento muito rápido da zona afetada pelo calor – ZAC – resultando em uma microestrutura martensítica com elevada dureza, como se tivesse sido temperado. O pré-aquecimento causa uma diminuição na velocidade de resfriamento da junta soldada e é usado em soldagem principalmente com o intuito de reduzir a velocidade de resfriamento da zona termicamente afetada pelo calor, obtendo-se microestruturas mais dúcteis e, conseqüentemente, menos suscetíveis ao surgimento de trincas. Ademais, também propicia a eliminação de tensões residuais decorrentes do processo de resfriamento pós-soldagem. (DOMINGUES, N., 2013)

Além disso, o calor gerado previamente pelo pré-aquecimento facilita o início e a sustentação do centelhamento, a tensão elétrica requerida para manter o centelhamento pode ser diminuída e o material consumido será menor.

Resumidamente, o pré-aquecimento é capaz de reduzir:

- O risco de surgimento de trincas;
- As tensões residuais
- A dureza na zona termicamente afetada (ZTA)

3.1.2 Centelhamento

a) *Modelo de Centelhamento*

O modelo de centelhamento é um dos principais influenciadores da distribuição de temperaturas e da quantidade de material consumido no centelhamento. Em regra, quanto maior a velocidade, ou a taxa de aceleração, maior será o gradiente de temperatura atingido.

Peças com áreas de seções transversais grandes normalmente são soldadas com modelos de centelhamento em velocidade constante, no qual o tempo de centelhamento é relativamente grande, levando a um maior consumo de material até que se atinja a temperatura desejada.

A escolha de um modelo de centelhamento inadequado pode levar a diferentes gradientes de temperatura nas partes e consequente encavalamento da solda no momento de recalque. Além disso, pode influenciar na economicidade de material, uma vez que certos modelos consomem mais material que outros.

Outro fator importante que se relaciona ao modelo de centelhamento é o surgimento de áreas com baixo nível de carbono (descarbonetação), esse fenômeno é mais propício a acontecer quando o metal fica sujeito a altas temperaturas por uma quantidade de tempo maior, sendo, portanto, diretamente relacionado ao modelo de centelhamento. Esse fenômeno é caracterizado por regiões brilhantes no interior da junta soldada, os quais possuem valores de dureza e ductilidade reduzidos, e apresentam coloração mais clara quando sujeitas a ataques químicos. Seu surgimento pode ser eliminado com adequado tratamento térmico.

b) *Distância dos mordentes*

Foi dito que, segundo Gomes Filho, a distância dos eletrodos à superfície das peças influencia no gradiente de temperatura em cada uma das partes. Observa-se aqui a importância de um adequado posicionamento dos mordentes à peça, de maneira a obter-se uma distribuição uniforme de temperatura, prevenindo possíveis encavalamentos durante o processo de recalque devido a diferentes gradientes de temperatura em cada uma das partes.

c) *Tensão de centelhamento*

Tensões acima da necessária para o processo de centelhamento não influencia significativamente a distribuição de temperatura, porém, aumentará a quantidade de material repelido durante o recalque, gerando perda desnecessária de material.

Tensões mais baixas são capazes de produzir superfícies mais limpas. Além disso, a indutância apresenta um papel importante na formação de inclusões na junta soldada. Indutância mais baixa durante o centelhamento ajuda a coibir a contaminação das superfícies, prevenindo flat spots, penetradores e óxidos na junta.

d) *Corrente de centelhamento*

Corrente com valores muito elevados provocam o aumento do tamanho das crateras que são formadas durante o processo de centelhamento, aumentando a probabilidade de retenção de óxidos, inclusões e porosidades no interior das mesmas.

Além disso, Sullivan e Savage, em seus estudos, apresentaram propostas para a diminuição da incidência de flat spots e penetradores nas juntas soldadas por centelhamento. De acordo com eles, tais descontinuidades podem ser evitadas ao se diminuir a indutância do secundário do transformador do equipamento de soldagem, pois assim, a corrente elétrica será capaz de variar rapidamente, tanto para expelir os materiais dos novos contatos formados pelas irregularidades mais rapidamente quanto pela diminuição da corrente após a ejeção do material. (RASANEN, A. N. 2011)

3.1.3 Recalque

Na soldagem por centelhamento, o processo de recalque é o maior responsável pela eliminação de impurezas contidas na junta. Sua função, portanto, além de promover a junção das partes, é de eliminar parte do material das superfícies de solda.

a) *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)

A corrente elétrica mantida durante um determinado tempo após o início do recalque (*upset current*) gera um aumento da temperatura da junta soldada, em um curto intervalo de tempo. Isso garante que a temperatura do material de base se mantenha acima de sua temperatura de fusão durante o recalque, assegurando a eliminação de impurezas. Porém, o uso do *upset current* pode trazer algumas desvantagens, como um maior avanço no recalque, com conseqüente maior perda de material, e um aumento na zona afetada pelo calor.

b) Força de recalque

Forças de recalque insuficientes podem não ser capazes de eliminar impurezas, retendo um filme líquido de metal contendo óxidos, podendo ocasionar inclusões ao se solidificarem.

Uma força de recalque adequada pode beneficiar a microestrutura da zona fundida uma vez que a deformação plástica e temperatura adequada propiciam o refinamento de grãos de perlita e uma distribuição homogênea desses grãos, resultando em uma elevação da dureza.

c) Avanço de recalque

Materiais que tendem a formar óxidos refratários e nitretos, por reação com a atmosfera, exigem maior quantidade de recalque e maior velocidade de início de acionamento do recalque. Para materiais com segregação, quando soldado com recalque excessivo, pode haver reorientação de sua estrutura (transversalmente à direção de laminação) e ocorre perda de ductibilidade. (MADEIRA, R. P. 2010)

As descontinuidades na estrutura da solda aumentam à medida que a distância de recalque e o produto “Tempo de centelhamento x Distância de recalque” diminui. (ZIEMIAN C. W. 2012)

Com a análise desses diversos parâmetros e o levantamento dos possíveis efeitos causados através do dimensionamento desses, segue uma tabela que relaciona de forma simplificada o que o excesso ou a insuficiência de cada parâmetro pode gerar no resultado final da solda.

Tabela 8 – Efeitos das variáveis do processo na solda por centelhamento

		Excessivo	Insuficiente
Tensão		Formação de crateras maiores durante o centelhamento, aumentando a possibilidade de ocorrência de porosidades, inclusões e metal fundido na junta.	Tendência de não atingir temperatura ideal para o recalque; o metal pode não atingir a plasticidade ideal para o processo.
Corrente	Centelhamento	Ocorrência de metal fundido na junta soldada; Deformação excessiva e perda de material no recalque.	Surgimento de trincas longitudinais na região de solda; Inclusões e óxidos poderão não ser adequadamente expelidos da junta.
	Recalque	Aumento dos grãos de ferrita em quantidade e tamanho; Redução na dureza do material; Maior avanço de recalque.	Metal pode começar a se solidificar antes do recalque.
Força de Recalque		Tendência de perda de material; Linhas de fluxo perpendiculares ao metal de base.	Falha para expelir o metal fundido e óxidos da junta; surgimento de porosidades, vazios.
Tempo de centelhamento		Aumento do consumo de material; Aumento da probabilidade de surgimento de área descabonetadas.	Metal pode não atingir a temperatura ideal para o recalque; surgimento de trincas longitudinais com a aplicação da força.
Distância dos Mordentes		Aumento da zona afetada pelo calor.	Altos gradientes de temperatura.

3.2 PROPOSTA DE ESPECIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM

Algumas normas de soldagem, como a ASME seção IX para vasos de pressão, exigem a confecção de uma Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS). Esta especificação é um procedimento escrito para orientar o soldador, ou o operador de soldagem, na produção de soldas dentro dos requisitos exigidos pela norma adotada. Além da EPS, o Registro de Qualificação de Procedimento de Soldagem (RQPS) é outro documento exigido pela norma e que contém os dados monitorados da solda executada em um corpo de prova, de acordo com a

EPS correspondente. Este documento também contém os resultados dos ensaios feitos no corpo de prova (tração, dureza, flexão, macrografia etc).

A norma AREMA (adotada para trilhos ferroviários) não exige tal documentação. Desta forma, uma EPS é proposta a fim de servir como um procedimento de soldagem a ser implementado e seguido. Esta especificação foi inspirada no formulário apresentado no Welding Handbook, nona edição, volume 3, “Welding Processes, Part 2”, capítulo 3, e na norma ASME, seção IX. A Fig. 27 mostra a EPS proposta enquanto a Fig. 28 mostra a RQPS. O detalhamento de cada campo é feito a seguir.

Este processo visa demonstrar que, através do procedimento proposto, soldas adequadas, de acordo com os requisitos impostos por normas, possam ser obtidas. Além disso permite uniformizar e manter registro das condições especificadas de soldagem para controle do processo e eventual determinação de causas de falha.

- Quadro “Características do trilho”

Estes parâmetros são de reconhecimento do tipo de trilho a ser soldado, uma vez que podem haver variações metalúrgicas em modelos de trilhos distintos.

- Quadro “Dados Geométricos”

Neste quadro encontramos valores dimensionais do posicionamento do trilho na máquina. Esses valores influenciam no gradiente de temperatura adquirido durante o procedimento e na possibilidade de surgimento de queimaduras localizadas no mordente dos eletrodos. Portanto, esses valores auxiliarão no rastreamento de algumas possíveis imperfeições no processo de soldagem.

- Quadro “Variáveis adotadas pelo Operador”

Estas variáveis são controláveis pelo operador no momento de preparação da máquina para a soldagem.

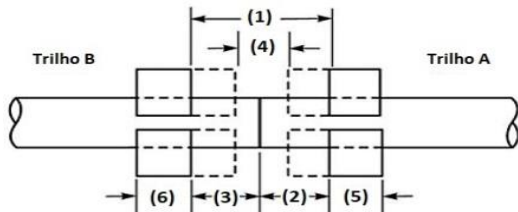
- Quadro “Dados de Operação”

Este quadro é uma forma de controle do trilho consumido durante a soldagem. Além disso, a quantidade de material expelido durante o recalque também influencia diretamente a eliminação das impurezas da solda sendo, portanto, uma importante variável a ser observada.

E.P.S	ESPECIFICAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM SOLDAGEM DE TRILHOS POR CENTELHAMENTO	N°.
-------	--	-----

Operador: _____

Tipo de Trilho: _____ Data: ___/___/___



Dados Geométricos [mm]	
1. Distância inicial entre mordentes	
2. Extensão livre inicial (Trilho A)	
3. Extensão livre inicial (Trilho B)	
4. Distância final entre mordentes	
5. Comprimento de Contato (Trilho A)	
6. Comprimento de Contato (Trilho B)	

Dados de Operação [mm]	Mín.	Máx.
Material consumido (Total)		
Distância de Recalque		
Total de material perdido		

Características do Trilho	
Área [mm ²]	
Resistência ao escoamento [MPa]	
Resistência à tração [MPa]	

Variáveis Adotadas pelo Operador	Mín.	Máx.
Número de Ciclos (Pré-aquecimento)		
Corrente de pré-aquecimento [kA]		
Força de Recalque [kN]		
Corrente (kA)		
Início do Pré-aquecimento		
Fim do pré-aquecimento		
Início da corrente de recalque		
Fim da corrente de recalque		
Fim do recalque		
Início do pós-aquecimento		

	Pré-aquecimento	Centelhamento Inicial	Centelhamento Final	Recalque
Tempo [s]				
Tensão [V]				
Distância [mm]				
Força [kN]				
Corrente [kA]				

Comentários: _____

Testes de Qualidade	Observações:
Tensão: _____	
Teste de Flexão: _____	
Dureza: _____	
Macro: _____	

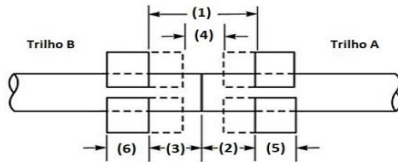
Figura 27 – EPS proposta. Fonte: AWS. Adaptado pelo Autor

R.Q.P.S	REGISTRO DE QUALIFICAÇÃO DE PROCEDIMENTO SOLDAGEM DE TRILHOS POR CENTELHAMENTO	N°.
---------	---	-----

Operador: _____

Tipo de Trilho: _____

Data: ___/___/___



Dados Geométricos [mm]	
1. Distância inicial entre mordentes	
2. Extensão livre inicial (Trilho A)	
3. Extensão livre inicial (Trilho B)	
4. Distância final entre mordentes	
5. Comprimento de Contato (Trilho A)	
6. Comprimento de Contato (Trilho B)	

Dados de Operação [mm]	
Material consumido (Total)	
Distância de Recalque	
Total de material perdido	

Características do Trilho	
Área [mm ²]	
Resistência ao escoamento [MPa]	
Resistência à tração [MPa]	

Variáveis Adotadas pelo Operador	
Número de Ciclos (Pré-aquecimento)	
Corrente de pré-aquecimento [kA]	
Força de Recalque [kN]	
Corrente (kA)	
Início do Pré-aquecimento [s]	
Fim do pré-aquecimento [s]	
Início da corrente de recalque [s]	
Fim da corrente de recalque [s]	
Fim do recalque [s]	
Início do pós-aquecimento [s]	

	Pré-aquecimento	Centelhamento Inicial	Centelhamento Final	Recalque
Tempo [s]				
Tensão [V]				
Distância [mm]				
Força [kN]				
Corrente [kA]				

ENSAIOS						
Flexão	N° C.P.	Área (mm ²)	Carga (kN)	Tensão (MPa)	Local da Fratura	Laudo

Perfil de Dureza															
Ponto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Dureza [HB]															
Ponto	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Dureza [HB]															

Macrografia															

Micrografia															
Composto															
Concentração															
Análise Química	% C	% Mn	% Si	% Cr	% Mo	% Ni	% P	% S	% Cu	% _	% _	% _	% _	% _	% _

Figura 28 – RQPS proposta. Fonte: Próprio Autor

4 CONCLUSÃO

A qualidade da junta soldada pelo processo de centelhamento é influenciada pelos diversos parâmetros citados neste estudo. Essa vasta gama de variáveis deve ser controlada a fim de se obter as especificações desejadas na solda, como a redução de distorções, tensões residuais e porosidade, ou o aumento da resistência mecânica e da tenacidade. Este controle é complexo devido às alterações metalúrgicas que ocorrem durante e após o centelhamento, de acordo com os níveis de calor gerado nas interfaces de soldagem.

O entendimento da relação causa e efeito dessas variáveis é de grande importância para o aperfeiçoamento da técnica de soldagem por centelhamento. Neste trabalho foi visto que a escolha certa destas variáveis podem gerar aumento de produtividade, economicidade e segurança operacional dos trilhos soldados com esse processo.

Esses fatores realçam a importância da qualificação e utilização de uma Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS) para a soldagem de trilhos ferroviários por centelhamento, garantindo assim uma padronização de procedimento com a utilização de parâmetros adequados à produção de juntas soldadas.

Este trabalho se propôs a fornecer uma referência teórica sobre os principais parâmetros de entrada da solda por centelhamento e os efeitos de tais no resultado final do procedimento, além da proposição de utilização de EPS no processo de soldagem por centelhamento, servindo de base e referência para a continuidade do projeto Cátedra Roda-Trilho, desenvolvido em uma parceria na qual a Universidade Federal de Juiz de Fora faz parte.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Welding Fundamentals and Processes**. In: Metals Handbook – Volume 06A, 2011. Pag. 448-455.

AMERICAN WELDING SOCIETY, **Flash en Upset Welding**. **Welding Handbook**, Nona edição, Volume 3, 2007. Pag. 73-104.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **Flash Upset, and Percussion Welding**. In: Welding Handbook – Eighth Edition – Volume 2 – Welding Processes, 1991.

ARABACI, U. et al. Technical report: **An investigation of effects of upsetting current time and normalization heat treatment on mechanical properties of X40CrMoV5 1 and Ç1030 steel joined by flash butt welding**. ScienceDirect, 2006.

ASME IX, **2004 ASME BOILER & PRESSURE VESSEL CODE, AN INTERNATIONAL CODE**, IX, Welding and brazing qualification, 2004.

BELLINI, L. P. e LUCAS, C. G., **A importância da revitalização de transporte ferroviário de carga para o desenvolvimento da economia brasileira**. XXXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção, João Pessoa – PB, Outubro, 2016.

BRACARENSE, A. Q. **Processo de Soldagem por Resistência**. Monografia (Bacharelado em Metalurgia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2000.

BRANDI, S.D. **Soldagem por Resistência**. IN: Soldagem – processos e metalurgia. Editora Edgard Bluncher Ltda, 1995, pag.217-242.

DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte, **Manual de custos de infraestrutura de transportes**, Volume 5 – Custos unit'arios de referência para obras ferroviárias, SICRO 3, 2008.

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

FALHA por fadiga. ASME. Disponível em <<http://www.asme.eng.br/falha-por-fadiga>> Acessado em 19/04/2017.

FILHO, O.G., **Influência da corrente elétrica, da força de recalque e do tratamento térmico de revenimento na soldagem topo-a-topo por centelhamento de serras de fira bimetalicas**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

ICHYAMA, Y.; SAITO, T.; NISHI, T.; “Influence of Base Metal Chemical Composition on Flash Butt Weld Interface Quality”; Welding Research Supplement; p. 213-221; May 197).

MADEIRA, R. P. **Utilização do Ensaio Erichsen para a Avaliação do Desempenho de Juntas Soldadas**. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

MAIS Toneladas por Eixo. **Revista Ferroviária**. São Paulo, 2005. Disponível em: <<http://www.revistaferroviaria.com.br/index.asp?InCdMateria=2349&InCdEditoria=6>>. Acessado em 11/04/2017.

MANSOURI, H. e MONSHI, A. **Microstructure and residual stress variations in weld zone of flash-butt welded railroads**. Science and Technology of Welding and Joining, Vol.9, 2004, pag. 237-245.

MANUAL de Operação para Instalação de Solda de Trilhos, Fabricante Schlatter. Tipo: GAAS 80/580. No: 2653.30982. 2011.

MODENESI, P.J., **Normas e Qualificação em Soldagem – Soldagem I**, Adaptado e atualizado de texto escrito pelo Prof. Michael D. Hayes, UFMG, 2005.

MODENESI, P.J.; MARQUES, P.V. **Introdução aos Processos de Soldagem**, Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Metalúrgica de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.

NATAL, Y. D. **Soldabilidade dos aços alcamados ao alumínio na soldagem a topo por centelhamento**. XIV Encontro Nacional de Tecnologia de Soldagem, 1988.

PEÇANHA, R.M. **Avaliação de um aço conformável e um aço microligado ao nióbio submetidos a soldagem a topo por centelhamento na produção de rodas automotivas**. Trabalho de dissertação, EEIMVR, UFF, 70p, 1999.

RASANEN, A. N. e 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, Vol 16, 2011, pag. 471-477.

RIBEIRO, H. V.; **Estudo da propagação de trinca por fadiga em um aço de alta resistência e baixa liga após o processo de soldagem por centelhamento**. Universidade de São Paulo, 2011.

RIECANSKY, V. e LUCAS, W. **Formation and significance of weld line defects in flash welded mild steel tube and bar**, Weld. Int., 1974. Pag. 1–27.

SAVAGE, W.F. **Flash Welding – Process Variables and Weld Properties**. Welding Journal, March 1962.

SAVAGE, W.F. **Flash Welding – The Process and Applications**. Welding Journal, March 1962, pag. 227-237.

SCHENEIDER, E. L., **Análise da vida remanescente de trilhos com defeitos transversais desgastados em serviço**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
SGAVIOLI, F. et al. **Análise do custo do ciclo de vida do lastro ferroviário na estrada de ferro Vitória Minas**. Vale S.A., 2012

SULLIVAN, J.F.; SAVAGE, W.F., **Effect of Phase Control During Flashing on Flash Weld Defects**. Weld Research Supplement, 1971.

WELDING HANDBOOK – Vol. 3 – Resistance and Solid-State Welding and Other Joining Process – 7^a Ed. – AWS – 1980

ZIEMIAN, C. W. et al. Effects of flashing and upset sequences on microstructure, hardness, and tensile properties of welded structural steel joints. Buckenell University, Department of Mechanical Engineering, USA, 2012.