

Universidade Federal de Juiz de Fora
Faculdade de Engenharia
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica

Daniel Macedo Pereira

**Estudo de um modelo numérico de soldagem de trilho ferroviário:
Análise térmica**

Juiz de Fora

2017

Daniel Macedo Pereira

**Estudo de um modelo numérico de soldagem de trilho ferroviário:
Análise térmica**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Moisés Luiz Lagares Júnior

Juiz de Fora

2017

Pereira, Daniel Macedo.

Estudo de um modelo numérico de soldagem de trilho ferroviário:
Análise térmica / Daniel Macedo Pereira. – 2017.

35 f. : il.

Orientador: Moisés Luiz Lagares Júnior

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Juiz de Fora,
Faculdade de Engenharia. Curso de Graduação em Engenharia Mecânica,
2017.

1. Soldagem por centelhamento. 2. Método dos elementos finitos. 3.
Trilho ferroviário. 4. Distribuição de Temperatura. I. Lagares Júnior,
Moisés Luiz, orient. II. Título.

Daniel Macedo Pereira

**Estudo de um modelo numérico de soldagem de trilho ferroviário:
Análise térmica**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Aprovada em: 10/11/2017

BANCA EXAMINADORA

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

Professor Filipe Fernandes de Paula
Universidade Federal de Juiz de Fora

Eng. Luiz Phelipe Sotero

Dedico este trabalho à minha mãe, Cecília, ao meu pai Henrique e ao meu irmão Cristiano, que sempre me apoiaram e me incentivaram durante toda a minha vida

AGRADECIMENTOS

À minha família, por estar sempre ao meu lado durante toda essa caminhada, dando todo suporte necessário.

Aos meus amigos, por estarem sempre presentes nos bons e maus momentos e principalmente por nunca me deixarem desistir.

Aos meu grande amigo Luiz Phelipe, que sem a sua ajuda nada disso seria possível.

Ao meu orientador, Moisés, pelo apoio e confiança depositado em mim.

Agradeço a todos que de alguma forma me ajudaram a terminar este importante ciclo da minha vida.

RESUMO

Palavras-chave: Soldagem por centelhamento. Método dos elementos finitos. Trilho ferroviário. Distribuição de Temperatura.

A soldagem por centelhamento é um processo amplamente utilizada em estaleiros de solda, para a fabricação de trilhos longos soldados. Um outro local amplamente utilizado é no campo, uma vez que esse processo tem uma qualidade superior em comparação ao processo aluminotérmico, normalmente empregado. A literatura disponível sobre os parâmetros do processo de soldagem por centelhamento é escassa e pouco precisa, em comparação com outros processos como por exemplo o MIG e o TIG. Com isso, este trabalho visa comparar a distribuição de temperatura no trilho de duas maneiras distintas: uma é com o eletrodo na alma do trilho e a outra é com o eletrodo no boleto e patim. Essa mudança na posição do eletrodo faz com que tenhamos diferentes resultados nas duas maneiras. O estudo foi realizado através de simulação numérica pelo método dos elementos finitos (MEF) com o auxílio de programas computacionais específicos.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Exemplo das formas de transferência de calor.	15
Figura 2.2 – Máquinas para soldagem por centelhamento.	22
Figura 2.3 – Ilustração da peça antes e depois da malha.	24
Figura 2.4 – Etapa de pós-processamento de uma análise estrutural.	25
Figura 3.1 – Especificações da geometria do trilho para simulação.	27
Figura 3.2 – Geometria dos trilhos para simulação 3D.	28
Figura 3.3 – Malha realizada nos trilhos para simulação 3D.	28
Figura 4.1 – Distribuição de temperatura na simulação 3D.	30
Figura 4.2 – Comparação do resultado experimental e de simulação.	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Parâmetros gerais do processo de soldagem por centelhamento.	19
Tabela 3.1 – Composição química do aço do trilho.	29
Tabela 3.2 – Condições de operação com os eletrodos na alma.	29
Tabela 3.3 – Condições de operação com os eletrodos no boleto e patim.	29

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANTT	<i>Agência Nacional de Transportes Terrestres</i>
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
CAD	<i>Computer Aided Desing</i>
UIC	<i>International Union of Railway</i>
ZTA	<i>Zona Termicamente Afetada</i>
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
MEF	<i>Método dos Elementos Finitos</i>
RFBSA	<i>Rede Ferroviária Federal S/A</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
3D	<i>Três dimensões</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

\dot{E}_{acu}	Energia térmica acumulada
\dot{E}_{ent}	Energia térmica que entra
\dot{E}_{sai}	Energia térmica que sai
\dot{E}_g	Energia gerada
k	Coefficiente de condução de calor
T	Temperatura
T_1	Temperatura no ponto inicial
T_2	Temperatura no ponto final
L	Comprimento total do condutor térmico
L	Comprimento total do condutor térmico
q_x''	Taxa de transferência de calor
T_s	Temperatura da superfície do sólido
T_∞	Temperatura do fluido que envolve a superfície
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção
q_{conv}''	Taxa de transferência de calor por convecção
q_{rad}''	Taxa de calor transmitido por radiação
s	Constante de radiação do material
σ	Absortividade térmica
T_{viz}	Temperatura do ambiente ao redor
m	Massa do componente
C_p	Calor Específico do Material
T_{final}	Temperatura final
$T_{inicial}$	Temperatura inicial

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Apresentação	12
1.2	Formulação do problema	13
1.3	Objetivos	13
1.3.1	Objetivo geral	13
1.3.2	Objetivos específicos	13
1.4	Justificativa	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1	Transferência de Calor	14
2.1.1	Condução	14
2.1.2	Convecção	14
2.1.3	Radiação	15
2.2	Conservação de Energia	16
2.3	Equação da Difusão de Calor	16
2.4	Soldagem por Centelhamento	17
2.4.1	Pré-aquecimento	17
2.4.2	Centelhamento	18
2.4.3	Recalque	18
2.4.4	Resfriamento e Raspagem	18
2.4.5	Parâmetros do processo de soldagem por centelhamento	19
2.4.5.1	Área da seção transversal das peças	19
2.4.5.2	Tensão elétrica	19
2.4.5.3	Corrente e potência	20
2.4.5.4	Velocidade de Compressão	20
2.4.5.5	Força de Recalque	21
2.4.5.6	Distância de Recalque	21
2.4.6	Equipamento de Soldagem por Centelhamento	21
2.4.7	Zona Termicamente Afetada	22
2.4.7.1	Região de Crescimento de Grão	22
2.4.7.2	Região de Refino de Grão	23
2.4.7.3	Região Intercrítica	23
2.5	Método dos Elementos Finitos	23
2.5.1	Pré-processamento	24
2.5.2	Processamento	24
2.5.3	Pós-processamento	25

2.5.4	Método de Crank-Nicolson	25
2.5.5	Programa Computacional utilizado nas análises	26
3	METODOLOGIA	27
3.1	Geometria e malha	27
3.2	Propriedades do material	28
3.3	Análise térmica	29
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
5	CONCLUSÃO	32
	REFERÊNCIAS	33

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

A construção das primeiras ferrovias no país, remonta ao ano de 1854, implantada por Irineu Evangelista de Souza, também conhecido como Barão de Mauá, estimulada inicialmente por capitais privados nacionais e estrangeiros, visando principalmente o transporte da produção agrícola e do minério, vindo do interior em direção aos centros urbanos e principalmente aos portos, com o intuito da exportação.

Com o passar dos anos, as ferrovias foram crescendo até que em 1940, com o Governo Vargas, o governo passou a nacionalizar as ferrovias com capital estrangeiro, estatizando-as, com a intenção de evitar que algumas delas viessem à falência. Nesta mesma época, o setor de transportes no Brasil priorizou o modal rodoviário em detrimento de todos os outros, afetando diretamente as ferrovias.

Em 1956, o governo elaborou um estudo mostrando que os déficits proporcionados pelas empresas do setor ferroviário, representavam mais de 10% da receita da União. Para tentar solucionar o problema, o governo criou a Rede Ferroviária Federal S/A (RFFSA), uma empresa estatal, reunindo todas as outras empresas do setor ferroviário, com o objetivo de reduzir os déficits, modernizar a operação e aumentar a produção.

Os objetivos propostos pelo governo à RFFSA não foram atingidos e ela acabou sofrendo grandes cortes no orçamento devido a diversas crises que o país passou. Com isso, em 1997 a RFFSA foi dividida em várias concessões e privatizada. Desde o momento em que foi privatizada, até os dias atuais, o volume de minério de ferro e carvão cresceu 82% e de outras cargas o aumento foi de 67% (ANTT,2017).

Com o aumento da carga transportada, na mesma quantidade de trilhos (atualmente o Brasil possui cerca de 30000 km sendo utilizados), temos uma propensão muito maior destes trilhos a sofrerem falhas. Para manter o transporte ferroviário como um meio que seja competitivo frente aos outros, temos que reduzir o tempo parado dos trens. Neste sentido, muitos dos problemas encontrados nos trilhos são solucionados pelo processo de soldagem por centelhamento, que já se provou ser um método rápido e eficaz.

O processo de soldagem por centelhamento remonta ao século XX, desde esta época até os dias atuais, o processo tem evoluído, bem como os materiais utilizados e as peças. Com o passar do tempo, diversas empresas do ramo ferroviário tem empregado este processo devido às suas vantagens em relação aos demais para a união de trilhos, em substituição ao parafusamento (método que era utilizado anteriormente para união dos trilhos). Algumas das vantagens em relação aos outros métodos de união dos trilhos são a velocidade, qualidade, prevenção do aparecimento de trica, dentre outros.

1.2 Formulação do problema

A literatura existente que demonstra que em soldagens de trilhos com o eletrodo na alma quando comparadas com as soldagem com o eletrodo no boleto e patim o aquecimento maior geralmente se dá nas bordas externas do trilho, ou seja, de uma forma geral a distribuição de aquecimento da seção transversal da junta soldada não é uniforme. Desta forma, este trabalho tem o intuito de estudar as diferenças que ocorrem nos dois casos citados.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo a comparação, através de um meio alternativo, dos fenômenos que ocorrem durante o processo de soldagem por centelhamento variando a posição dos eletrodos, um com os eletrodos posicionados na alma do trilho e a outra com os eletrodos posicionados no boleto e patim. Portanto através de métodos numéricos computacionais, foi implementado um modelo que simula as condições intrínsecas ao processo, no que diz respeito ao aquecimento dos trilhos, além disso, foi variada a posição do eletrodo, para que com o auxílio de softwares possamos comparar esses resultados.

1.3.2 Objetivos específicos

Para este trabalho, os objetivos específicos inicialmente definidos são:

- Buscar a literatura necessária para o entendimento dos fenômenos físicos que acontecem no processo de soldagem por centelhamento;
- Entender como é o funcionamento básico de máquinas de soldagem por centelhamento utilizadas na soldagem de trilhos;
- Implementar as físicas que envolvem o aquecimento dos trilhos na soldagem por centelhamento, em um software;
- Comparar os resultados obtidos na simulação de soldagem por centelhamento com as duas posições diferentes do eletrodo.

1.4 Justificativa

Devido à falta de literatura sobre assunto e da grande dificuldade que envolve o processo, tais como o preço dos equipamentos que realizam a soldagem por centelhamento, o presente trabalho mostra-se uma ferramenta útil para auxiliar um melhor entendimento sobre o tema.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Transferência de Calor

Desde a descoberta do fogo, a transferência de calor têm feito parte da vida da humanidade, trazendo inúmeros benefícios e revolucionando a vida das pessoas até os dias de hoje. A transferência de calor é a energia térmica em movimento, ocasionada por uma diferença de temperaturas no espaço. Logo, sempre que existir uma diferença de temperatura em um meio, necessariamente acarretará em uma transferência de calor (INCROPERA, 2008). Existem basicamente 3 formas de transferência de calor, que serão detalhadas nas subseções que seguem.

2.1.1 Condução

A condução é uma forma de transferência de calor, em que ocorre o fluxo de energia das partículas com mais energia para outras partículas com nível energético menor (INCROPERA, 2008). Temperaturas mais altas estão associadas às energias moleculares mais altas, e o choque entre moléculas vizinhas, fenômeno que ocorre constantemente, causa uma transferência de energia das moléculas mais energéticas para as menos energéticas. Na presença de um gradiente de temperatura, existe transferência de energia por condução. A equação 2.1, também conhecida como lei de Fourier representa matematicamente da forma mais básica, como ocorre a condução de calor unidirecional em meios com diferentes temperaturas, onde q_x'' é o fluxo de calor transmitido, k é o coeficiente de condução de calor, T é a temperatura, e x é a direção e ponto no qual ocorre o fluxo de calor no domínio.

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} = -k \frac{T_2 - T_1}{L} = -k \frac{\Delta T}{L} \quad (2.1)$$

2.1.2 Convecção

A convecção é um modo de transferência de calor que abrange materiais sólidos e fluidos, em que ocorre geralmente dois mecanismos de transmissão, a condução de calor entre a superfície do sólido e as moléculas de fluido que estão em contato direto com esta superfície, e do movimento global ou macroscópico do fluido (INCROPERA, 2008). O movimento que o fluido faz está relacionado ao fato de que em um determinado tempo, um grande número de moléculas está se movendo coletivamente, ou em bloco, o que é uma particularidade dos fluidos. Esse movimento, seja natural ou forçado por mecanismos como ventiladores ou bombas, em conjunto com a presença de um gradiente de temperatura entre o material sólido e o fluido, contribui para a transferência de calor entre os domínios.

A equação 2.2, representa de forma matematicamente simplificada, como é dado a transferência de calor por convecção, onde h é o coeficiente de transferência de calor por

convecção, T_s é a temperatura da superfície do sólido, e T_∞ é a temperatura do fluido que envolve sua superfície.

$$q''_{conv} = -h(T_s - T_\infty) \quad (2.2)$$

2.1.3 Radiação

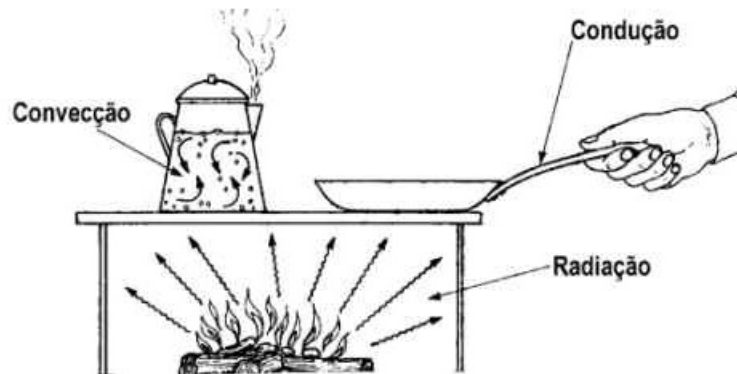
A radiação térmica é um tipo de energia na qual a matéria que se encontra em uma temperatura diferente de zero emite. Essa emissão é atribuída a mudanças nas configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas que compõem a matéria (INCROPERA, 2008). Essa energia é transportada por meio de ondas eletromagnéticas, logo diferentemente da transmissão de calor por condução e convecção, não precisa de um meio material para que haja a transferência de energia. Assim o fluxo térmico emitido por uma superfície radiante depende de sua energia térmica, e da área que delimita sua geometria.

Da mesma forma que uma superfície emite radiação, ela pode também receber essa energia de outra superfície radiante, e aumentar dessa forma sua energia térmica. A taxa líquida de transferência de calor por radiação é dado pela equação 2.3, onde s é a constante referente à propriedade radiante do material, ou seja, sua capacidade de emitir radiação, T_s é a temperatura da superfície, σ é a capacidade de absorver radiação de outras fontes, e T_{viz} é a temperatura do ambiente ao redor, bem como das superfícies de outros corpos que o rodeiam.

$$q''_{rad} = s\sigma(T_s^4 - T_{viz}^4) \quad (2.3)$$

A figura 2.1 traz os três tipos de transferência de calor explicado.

Figura 2.1 – Exemplo das formas de transferência de calor.



Fonte: UFPR, (2017).

2.2 Conservação de Energia

A taxa de aumento da quantidade de energia térmica e mecânica acumulada em um volume de controle, deve ser igual à taxa na qual as energias térmica e mecânica entram no volume de controle, menos a taxa na qual as energias térmica e mecânica deixam o volume, mais a taxa na qual a energia térmica é gerada no interior do volume de controle (INCROPERA, 2008). No caso em que a energia mecânica pode ser desprezada, os cálculos são simplificados em energia térmica que entra \dot{E}_{ent} , energia térmica que sai \dot{E}_{sai} , energia gerada \dot{E}_g , e o acúmulo de energia \dot{E}_{acu} que possa acontecer. Dessa forma, a energia em um volume de controle em regime de transferência de calor em função do tempo, pode ser expressa como na equação 2.4.

$$\dot{E}_{acu} = \dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sai} + \dot{E}_g \quad (2.4)$$

Todas as formas de transferência e geração de calor citadas, causam aumento ou diminuição da energia total presentes nos domínios da energia acumulada (\dot{E}_{acu}), quando estes não estão sujeitos à um regime permanente. Consequentemente existe variação na temperatura de qualquer um dos corpos em regime de transferência de calor. O valor absoluto da nova temperatura assumida por algum corpo, depende de inúmeras variáveis, e principalmente das propriedades térmicas do material, e da quantidade de energia que foi absorvida ou liberada. A equação 2.5, simplifica a relação entre a quantidade líquida de calor trocado em um domínio, com a mudança na sua temperatura, onde $T_{inicial}$ é a temperatura inicial do corpo, T_{final} é a sua temperatura final após o processo, m é a massa do componente, e C_p o calor específico do material que o compõe (INCROPERA, 2008).

$$q_{tot} = \dot{E}_{acum} = mC_p(T_{final} - T_{inicial}) \quad (2.5)$$

2.3 Equação da Difusão de Calor

Uns dos principais objetivos de analisar a condução de calor é demonstrar como ocorre a sua distribuição de acordo com o meio em que ela está. Inicialmente, é definido um volume de controle diferencial, em seguida são identificados como ocorre as transferências de energia que são o alvo do estudo e posteriormente são equações das taxas de transferência de calor são substituídas. O resultado disso é uma equação diferencial que fornece a distribuição de temperatura no meio inicialmente proposto, com as devidas condições de contornos especificadas.

A equação da difusão de calor, também conhecida como equação do calor, demonstra as ferramentas necessárias para a analisar a condução de calor. A partir da sua resolução,

temos uma a distribuição de temperatura em função do tempo $T(x, y, z)$ (INCROPERA, 2008). Em coordenadas cartesianas, a equação da difusão é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.6)$$

Essa equação descreve a condição física de conservação de energia, onde cada uma das partes da esquerda da equação relacionam o fluxo de calor para o interior do volume de controle na respectiva direção x, y, z . Portanto essa equação demonstra que a soma das taxas de energia por condução em cada uma das coordenadas para o interior do volume de controle, somada com a taxa volumétrica de geração de energia, é igual a taxa de energia acumulada no interior do volume de controle (INCROPERA, 2008).

2.4 Soldagem por Centelhamento

O processo de soldagem por centelhamento remonta ao século XX (MILLER, 2017), desde esta época até os dias atuais, o processo tem evoluído, bem como os materiais utilizados e as peças. Com o passar do tempo, diversas empresas do ramo ferroviário tem empregado este processo devido as suas vantagens em relação aos demais para a união de trilhos, em substituição ao parafusamento (método que era utilizado anteriormente para união dos trilhos).

Em comparação com outros processos utilizados na soldagem de trilhos, a soldagem por centelhamento é considerado um processo rápido, de qualidade, previne o aparecimento de trincas e etc. Porém a sua implementação é complexa e demanda grande conhecimento das variáveis relacionadas ao processo. A soldagem por centelhamento é dividida basicamente em quatro grandes etapas (LIENERT, 2011): pré-aquecimento, centelhamento, recalque, resfriagem e raspagem.

2.4.1 Pré-aquecimento

A principal função desta etapa é eliminar as trincas que podem ocorrer durante o resfriamento da peça. Isto acontece através da redução das tensões residuais. Quando ocorre a formação das trincas, a vida útil dos trilhos é reduzida, por este motivo elas devem ser evitadas (LIENERT, 2011).

O pré-aquecimento acontece quando as peças a serem soldadas são colocadas na posição topo-a-topo e posicionadas junto ao trilho. Em seguida, são instalados eletrodos aos trilhos. Com a energização deste, damos início a etapa de pré-aquecimento (FUJII, NAKANOWATARI, NARIAI, 2015).

Após a energização do eletrodo, é realizado um movimento oscilatório de aproximação e afastamento das partes. Este movimento é o causador de faíscas vindas do curto

circuito gerado a partir das irregularidades das faces do material que estão postas em contato. Depois que acontece a fusão dos pontos que estão em contato, eles são expelidos para fora da região soldada, isto faz com que ocorra um aquecimento da região a ser soldada, tornando a peça apta a etapa de centelhamento (FUJII, NAKANOWATARI, NARIAI, 2015).

2.4.2 Centelhamento

O objetivo desta etapa é elevar até a temperatura de fusão o material a ser unido, distribuindo de maneira mais uniforme o calor gerado em torno da junta, além da remoção de impurezas que possam existir nas juntas. Esta remoção das impurezas é outro elemento que ajuda a proteger o material de possíveis trincas.

Esta etapa acontece o aquecimento por dois motivos: pelo efeito joule e também pelas altas temperaturas dos arcos elétricos gerados no centelhamento. Os movimentos oscilatórios continuam mas as fusões pontuais que ocorriam nas faces das peças, descritas na etapa anterior, aumentam consideravelmente devido ao arco elétrico (LIENERT, 2011).

Os eletrodos tem papel importante nesta etapa pois é através deles que ocorre a força magnética responsável por expelir para fora da área de soldagem algumas partes do material que vai sendo fundido. Quando ocorre essa expulsão do material soldado, eles está incandescente e no formato de centelhas, isso que caracteriza e acaba dando nome a este processo de soldagem.

2.4.3 Recalque

Esta é a etapa em que as peças estão a temperaturas próximas ao ponto de fusão do material dos trilhos, no qual a região em que vai ocorrer o contato está pronta para receber o recalque. A tensão elétrica aplicada anteriormente é desligada e os trilhos são pressionados um contra o outro em um curto espaço de tempo, expelindo o metal líquido entre as partes (LIENERT, 2011). Isto faz com que as impurezas e porosidades geradas na etapa de centelhamento sejam eliminadas, garantindo assim uma qualidade ao processo (FUJII, NAKA- NOWATARI, NARIAI, 2015).

2.4.4 Resfriamento e Raspagem

Depois da etapa de recalque, as peças continuam em altas temperaturas e dependendo da peça usada no processo e do material que a constitui, uma opção pode ser realizar um resfriamento controlado ou um pós-aquecimento, a fim de melhorar as propriedades mecânicas da junta. Uma vez escolhido o tipo de resfriamento, temos posteriormente a isso a raspagem, na qual todo o material excedente da junta é retirado, fazendo com que o trilho volte ao seu aspecto original e deixando-o apto a ser utilizado nas ferrovias (LIENERT, 2011).

Se tratando de trilhos ferroviários, o procedimento de raspagem é necessário, visto que as condições de trabalho do trilho, em relação a sua resistência mecânica e de interação com as rodas são adversas. Para outros procedimentos que não exigem um acabamento, a etapa de raspagem pode ser descartada.

2.4.5 Parâmetros do processo de soldagem por centelhamento

Para um procedimento com resultados satisfatórios é necessário o controle dos parâmetros do processo de soldagem, portanto é necessário o conhecimento dos principais componentes que influenciam nos resultados do processo, de maneira que se possa maximizar o desempenho da máquina utilizada. Os parâmetros gerais do processo estão listados na tabela e são detalhados mais à frente (GOMES, 2007)

Tabela 2.1 – Parâmetros gerais do processo de soldagem por centelhamento.

Dimensionais	Elétricos	Temporais	Força
Área da seção transversal	Tensão/Corrente/	Tempo de:	
Área de contato (eletrodos)	Potência de:	Pré-aquecimento	Força de:
Abertura inicial e final	Pré-aquecimento	Centelhamento	Pré-
Extensão inicial e final	Centelhamento	Corrente de recalque	aquecimento
Trajectoria do eletrodo	Recalque	Recalque	Recalque
Comprimento de recalque	Pós-aquecimento	Pós-aquecimento	
	Frequência		

2.4.5.1 Área da seção transversal das peças

A área da seção transversal das partes em contato está ligada diretamente com outros parâmetros, portanto devemos ser muito cuidados ao escolher os parâmetros elétricos de entrada para que o calor gerado seja coerente com a área da seção em questão. Geralmente, segundo a lei de Ohm, quanto maior a área da seção transversal, maior a potência necessária para manter a mesma densidade de corrente na seção, pois é necessário maior valor absoluto da corrente total, para que o calor gerado por unidade de área seja suficiente para promover o aquecimento da junta de forma uniforme até o ponto de fusão do metal (GOMES, 2007).

2.4.5.2 Tensão elétrica

Um parâmetro que normalmente é controlado em valores que variam entre 2 a 16V é a tensão elétrica. Essa faixa de tensão permite que ocorra o centelhamento em pequenos pontos e saliências presentes nas superfícies, pontos estes nos quais a alta corrente flui e provoca o centelhamento (GOMES, 2007).

É possível realizar o ajuste da tensão desejada no procedimento proposto através de controles. Para cada etapa específica, é necessário ajustar a tensão ideal, sempre levando

em consideração todas as outras variáveis, para que o processo ocorra da melhor maneira possível.

2.4.5.3 Corrente e potência

A corrente é um parâmetro extremamente importante na soldagem por centelhamento. O fluxo de corrente entre os trilhos e entre as superfícies de contato, é responsável pelo aquecimento da junta soldada, e quanto maior o valor da corrente conseqüentemente maior o calor gerado. A corrente elétrica deve ser analisada em conjunto com a densidade de corrente, devido a ela estar associada a área da seção transversal do trilho, o que pode influenciar na quantidade total de corrente necessária para um aquecimento que consiga suprir as necessidades de geração de calor na junta soldada.

A densidade de corrente necessária para a soldagem de peças de mesmo material, geralmente possui um valor com mesma ordem de grandeza para diferentes áreas transversais, e para que seja possível o controle da corrente de acordo com cada peça, é necessário ajustar a tensão elétrica para que a corrente total assuma um valor que mantenha a densidade de corrente nos valores requeridos para o processo. A densidade de corrente deve ser alta suficientemente para que o calor gerado seja capaz de elevar a temperatura das peças até um patamar em que seja possível realizar o recalque, mas, ao mesmo tempo, ela deve ser baixa o suficiente para que não seja gerado um centelhamento de má qualidade, afim de evitar crateras que acumulam metal oxidado, que possam vir a prejudicar a qualidade final da junta soldada (GOMES, 2007).

2.4.5.4 Velocidade de Compressão

O recalque ocorre após o centelhamento, nesta etapa, uma força de compressão é exercida de uma peça contra outra. A força absoluta, assim como a velocidade com que é aplicada interferem na qualidade da solda. Normalmente quanto maior a taxa de compressão, melhor a solda, pois uma grande aceleração e velocidade dos porta eletrodos permite que todas as impurezas e óxidos presentes na junta, sejam expulsas antes que ocorra sua solidificação. Geralmente, a maior velocidade de aproximação ocorre no início do recalque, devido à fluidez do material expulso inicialmente, essa velocidade prolonga-se em até 80% do deslocamento total dos porta-eletrodos.

Após essa fase, a velocidade de compressão assume valores mais baixos, pois nessa etapa do recalque, a compressão é realizada sobre uma camada com temperatura mais baixa, e conseqüentemente com valores mais altos de resistência à compressão e ao cisalhamento (GOMES, 2007).

2.4.5.5 Força de Recalque

Para que seja vencida a resistência do material, a força de recalque deve estar alta o suficiente para transpor essa barreira, causando assim uma deformação plástica do material e unindo as peças. Um ponto de atenção levantado pela *American Welding Society* (AWS) é que se a força de recalque for muito alta, isto pode causar uma expulsão exagerada de material, prejudicando assim as características mecânicas da junta.

2.4.5.6 Distância de Recalque

A distância total percorrida pelos porta eletrodos, no sentido de unir as peças, é conhecida como distância de recalque. Este valor varia de acordo com a área da seção transversal das partes, assim como o material em que é feito.

Aços de alta resistência normalmente possuem maiores valores de resistividade elétrica, o que gera um aumento do calor dissipado no processo e maior quantidade de região afetada pelo calor. Portanto, é formada uma maior camada de aço fundido, o que necessita de maior distância de recalque, para expulsar essa camada extra de aço fundido e de óxidos que naturalmente são gerados em maior intensidade quando esse fenômeno ocorre. De maneira similar, em aço de baixa resistividade elétrica, não é necessário uma grande distância de recalque, já que não é necessário expulsar uma quantidade muito grande de material na junta soldada.

A área da seção transversal deve ser levado em consideração principalmente pela necessidade de que toda a superfície das duas peças sejam completamente pressionadas uma contra a outra, precisando estar em um valor em que todo o metal fundido presente no interior da peça seja expulso, garantindo a homogeneidade da junta em toda a seção transversal do trilho (GOMES, 2007).

2.4.6 Equipamento de Soldagem por Centelhamento

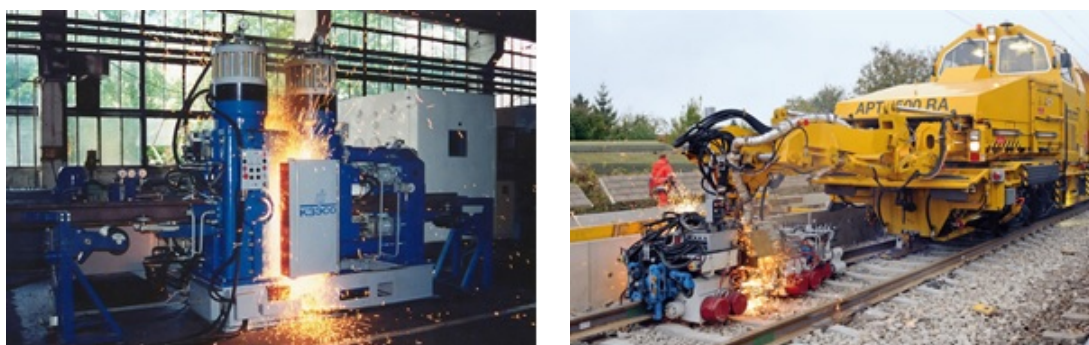
As aplicações dos equipamentos usados na soldagem por centelhamento são variados tais como a soldagem de serra de fita, trilhos ferroviários, entre outros.

Nas empresas em que utilizam o processo de soldagem por centelhamento com o objetivo de unir os trilhos ferroviários, existem diferenças entre as máquinas de soldagem. Essa variação pode ocorrer devido a infraestrutura disponível no local, condição do trilho, condição de trabalho dentre outros.

Na figura 2.2, são mostrados dois equipamentos de soldagem por centelhamento diferentes, onde a figura 2.2.a refere-se à máquina de soldagem normalmente empregadas em estaleiros de produção de trilhos longos soldados. Esse tipo de equipamento é geralmente de grande porte devido a disponibilidade de espaço em estaleiros. Na maioria dos casos

são equipamentos de corrente contínua, e possuem um maior controle dos parâmetros que governam a soldagem por centelhamento.

Figura 2.2 – Máquinas para soldagem por centelhamento.



(a) Máquina para soldagem em estaleiros.

(b) Máquina para soldagem em campo.

Fonte: K and G Machinery PTY LTD (2017) e Taringa (2017) respectivamente.

A figura 2.2.b temos uma máquina de soldagem por centelhamento utilizada em campo. Para esse caso, devido à dificuldade de transporte e de acesso à energia elétrica, os equipamentos são menores, mais leves, e com menores possibilidades de controle dos parâmetros de soldagem, além de precisarem de um gerador elétrico integrado ao sistema. Além disso, são equipamentos que utilizam a corrente alternada.

2.4.7 Zona Termicamente Afetada

Assim como ocorre em outros processos, na soldagem por centelhamento acontece o acúmulo de gradiente térmico entorno da região onde o metal foi fundido. Alguns dos parâmetros que influenciam diretamente nesse gradiente são temperatura da zona de aço fundido e a velocidade de soldagem (FORTES, 2004). A ZTA é subdividida basicamente em três grandes regiões, são elas: região de crescimento de grão, de refino de grão e intercrítica.

2.4.7.1 Região de Crescimento de Grão

Essa área da ZTA é considerada a mais crítica, e sua microestrutura depende do teor de carbono e elementos na liga, tamanho do grão austenítico, e da velocidade de resfriamento (FORTES, 2004). A temperatura varia rapidamente entre a pontos de fusão do metal até ao seu resfriamento, isso faz com que a têmpera do material nessa região, torne-se austenítica, podendo conter durante o seu resfriamento martensita. Esses elementos podem ocasionar problemas relacionados ao aumento da dureza e redução da tenacidade.

2.4.7.2 Região de Refino de Grão

Essa é a região onde ocorre o menor aquecimento de grão, portanto não é ocasiona muitos problemas. Por mais que essa região consiga atingir uma temperatura acima da temperatura necessária para sua transformação, ela não chega a atingir a região austenítica, sendo constituída por ferrita e perlita (FORTES, 2004).

2.4.7.3 Região Intercrítica

Assim como a região de refino de grão, ela também não atinge elevadas temperaturas, sendo inclusive menores do que a de refino, isso faz com que as mudanças na microestrutura do material sejam cada vez menos perceptíveis (FORTES, 2004).

2.5 Método dos Elementos Finitos

Na engenharia, os métodos numéricos se mostram cada vez mais presentes na resolução de problemas complexos, que muitas vezes são de extrema dificuldade de resolução por meios analíticos. Com o objetivo de resolver esses problemas complexos, diversos softwares vêm sendo desenvolvidos, tornando possível resolver algumas questões que eram praticamente impossíveis de se resolver com os métodos tradicionais, contribuindo assim com o desenvolvimento de novas tecnologias e ajudando a sociedade em resolver algumas questões de otimização.

Conseqüentemente a essa utilização, diversos métodos numéricos foram surgindo, a diferença básica entre eles era o tipo de estudo que era feito e implementado computacionalmente. Dentre os métodos para a engenharia, o método mais conhecido e utilizado atualmente, é o método dos elementos finitos, pois seu uso engloba diversos tipos de análises e físicas do problema em questão.

O desenvolvimento do Método dos Elementos Finitos (MEF), tem sua origem no século XVIII, através do matemático Gauss, ele propôs a utilização de funções de aproximação para solução de problemas matemáticos. Durante vários anos, alguns matemáticos desenvolveram técnicas para a solução de diversos problemas, porém a tecnologia que eles dispunham na época era bastante limitada, o que acabou dificultando a sua aplicação e popularização. A partir de 1950, com os avanços tecnológicos e a criação do computador, foi possível a realização de sistemas de equações complexas, facilitando o uso do MEF.

Podemos definir o MEF como um método matemático, no qual um meio contínuo é discretizado em elementos que mantém as propriedades de quem os originou. Esses elementos são descritos por equações diferenciais e resolvidos por modelos matemáticos para que sejam obtidos alguns resultados (MELCOLIAN, 2014).

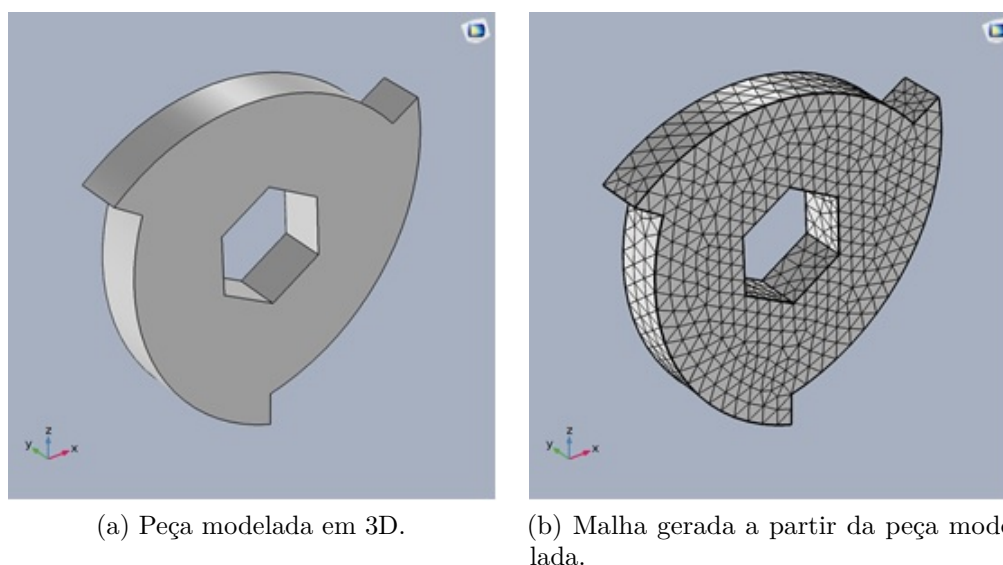
O processo de resolução de um problema através do método dos elementos finitos é composto por três grandes etapas, são elas: pré-processamento, processamento e pós-

processamento.

2.5.1 Pré-processamento

Esta é a etapa onde ocorre a preparação do modelo que será analisado. Primeiramente, o modelo é modelado com a ajuda de ambiente gráfico (CAD). Após isto, ocorre a discretização em pequenos elementos gerando assim a malha (KIM, SANKAR, 2008). A figura 2.3 ilustra uma peça antes e depois da geração da malha. Feito isto são aplicadas as formulações dos elementos através das equações que irão reger a física necessária para a análise, tais como a definição do material, temperatura, carregamento, tensão elétrica dentre outros. Finalizando esta etapa, atribuímos as equações matemáticas que envolvem os elementos a cada elemento e fazemos com que qualquer perturbação que ocorra nela, seja transmitida para os elementos seguintes. Isto faz com que uma variação aplicada a um único elemento, seja transmitida para peça como um todo.

Figura 2.3 – Ilustração da peça antes e depois da malha.



Fonte: Adaptado de SOTERO, Luiz Phelipe (2017).

2.5.2 Processamento

Nesta etapa, acontece a resolução das equações que envolvem os elementos. Isto ocorre devido as equações fornecidas aos elementos no pré-processamento, bem com alguns parâmetros de entrada. O software é encarregado de processar todas essas informações e retornar os resultados obtidos com essa simulação.

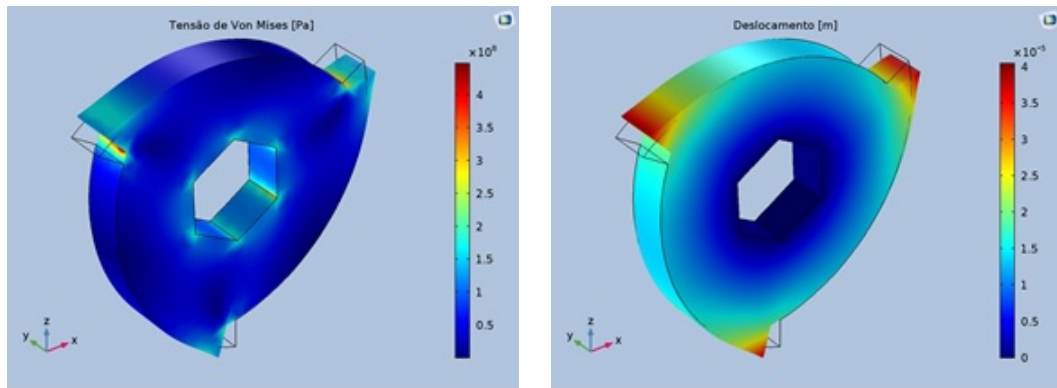
Os softwares empregados para a realização destes cálculos, usam diversos princípios matemáticos tais como o Método da Eliminação de Gauss, métodos iterativos diversos, entre outros. Dependendo da análise que é feita, bem como a precisão determinada para

os resultados e o refinamento da malha empregada, o tempo empregado nessa etapa de processamento pode variar de alguns segundos para várias horas, sendo assim, parâmetros importante para serem levados em consideração no momento de analisar a viabilidade de se fazer a simulação (COMSOL, 2017).

2.5.3 Pós-processamento

Por fim, os resultados obtidos são usados para realizar as análises desejadas. Gráficos, animações e etc. podem ser utilizados para demonstrar o resultado de forma prática. Geralmente em softwares comerciais de MEF, as informações estão disponibilizadas de maneira adequada a fim de facilitar as análises que o usuário deseja fazer. A figura 2.4 demonstra a etapa de pós-processamento realizada a partir da figura 2.3.

Figura 2.4 – Etapa de pós-processamento de uma análise estrutural.



(a) Diagrama de tensão de Von Mises.

(b) Diagrama de Deslocamento.

Fonte: Adaptado de SOTERO, Luiz Phelipe (2017).

2.5.4 Método de Crank-Nicolson

O método numérico particularmente empregado para resolução da equação da difusão é o método de Crank-Nicolson, ele baseia-se na regra trapezoidal e na resolução das equações diferenciais parciais por aproximação (CRANK,1947). Dada equação de calor em uma única direção, com as condições de contorno mostradas na equação 2.7.

$$\begin{aligned}
 \frac{du}{dt} &= c \frac{d^2u}{dx^2}, 0 < x < 1, t > 0 \\
 u(t, 0) &= 0 \\
 u(t, 1) &= 0 \\
 u(0, x) &= f(x)
 \end{aligned}
 \tag{2.7}$$

Utilizando diferenças finitas progressivas e regressivas para resolver o problema, temos o método explícito e implícito nas equações 2.8 e 2.9 respectivamente.

$$\frac{w_{i,j+1} - w_{i,j}}{\Delta t} = \frac{c}{(\Delta x)^2} [w_{i-1,j} - 2w_{i,j} + w_{i+1,j}] \quad (2.8)$$

$$\frac{w_{i,j+1} - w_{i,j}}{\Delta t} = \frac{c}{(\Delta x)^2} [w_{i-1,j+1} - 2w_{i,j+1} + w_{i+1,j+1}] \quad (2.9)$$

Pelo método de Crank-Nicolson, é calculado a média entre as equações 2.8 e 2.9, portanto, organizando os termos parecidos e usando as condições de contorno dada, temos a solução de forma matricial dada pela equação 2.10.

$$\left(I + \frac{\lambda}{2} A \right) \vec{w}^{(j+1)} = \left(I - \frac{\lambda}{2} A \right) \vec{w}^{(j)}, \quad j \geq 0 \quad (2.10)$$

2.5.5 Programa Computacional utilizado nas análises

O software utilizado é uma plataforma multipropósito baseada em métodos numéricos avançados para modelar e simular problemas físicos (COMSOL, 2017).

É um software que tem por objetivo a utilização do MEF e de Crank-Nicolson, para a resolução de análises lineares e não-lineares. A partir de uma combinação de geometria da peça, um material definido para esta geometria e algumas condições iniciais, podemos ter vários resultados distintos.

O programa já embarca diversas ferramentas para análises por elementos finitos, como modelador geométrico de peças; gerador de malha e outras ferramentas de pré-processamento; processadores para resolução das equações matemáticas; e por fim inúmeras ferramentas de pós-processamento. Facilitando assim todo o processo de implementação de um modelo numérico computacional que represente com precisão fenômenos que ocorrem na realidade.

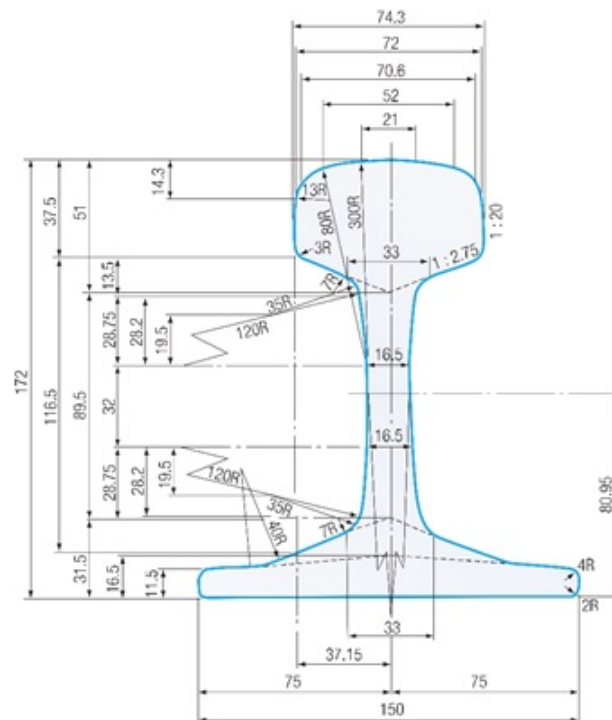
3 METODOLOGIA

A literatura em que este estudo baseia-se foi o trabalho publicado por SOTERO (2017) no qual este valida um modelo numérico computacional, comparando os resultados obtidos na simulação com os resultados obtidos na prática. Este trabalho utiliza o modelo feito e validado por ele, modifica alguns parâmetros referentes a geometria do trilho para que possa ser utilizado também como forma de obter os resultados que ocorrem quando alteramos a posição dos eletrodos colocando-os no bolete e patim do trilho e compara a distribuição de temperatura existente nos dois modos. Para isto, o trabalho baseia-se em condições reais do ambiente, propriedades geométricas de um trilho real e no estado de operação das duas condições da máquina de soldagem. Na simulação do modelo numérico computacional, o programa utilizado foi definido a partir de parâmetros como sua praticidade, flexibilidade e uma comparação de melhor eficácia dos dois modelos, visto que no artigo de SOTERO (2017) ele também utilizou este mesmo programa para realizar a sua simulação.

3.1 Geometria e malha

Para realizar a simulação, foram feitas basicamente duas geometrias, ambas em 3D. A geometria do trilho soldado foram baseados em dimensões padrões utilizados no experimento prático UIC-60 (*International Union of Railway*), retirados do catálogo de um fabricante (JFE CORPORATION, 2017), conforme é mostrado na figura 3.1.

Figura 3.1 – Especificações da geometria do trilho para simulação.



A posição do eletrodo foi definido com base no artigo de Mansouri, H., Monshi, A. (2004). Posterior a especificação da geometria, foram feitas duas simulações conforme mostrado na figura 3.2 e a geração da malha. A malha foi definida para que os pontos de maior interesse nos estudos, tenham maior quantidade de nós, para assim obtermos um resultado mais preciso. O tipo de malha usado foi a tetraédrica, sendo realizado com base em um algoritmo do próprio software. Na figura 3.3 podemos verificar o resultado das malhas.

Figura 3.2 – Geometria dos trilhos para simulação 3D.

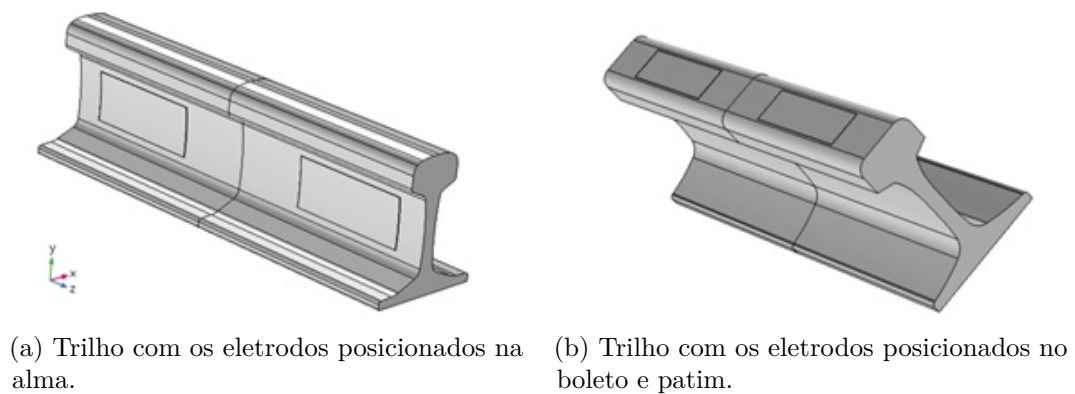
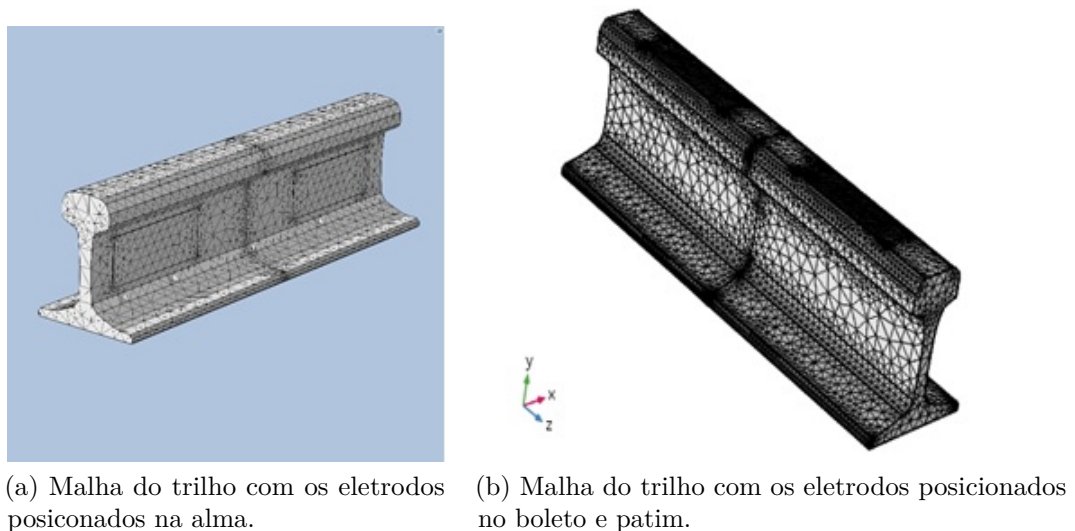


Figura 3.3 – Malha realizada nos trilhos para simulação 3D.



3.2 Propriedades do material

Os principais elementos constituintes do trilho ferroviário são mostrados na Tabela 3.1, que foram usados para fazer as análises físicas da simulação. O aço escolhido que mais se aproxima das propriedades químicas especificadas foi o aço American Iron and Steel Institute 1070 (AISI-1070).

Tabela 3.1 – Composição química do aço do trilho.

C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni
0.59	1.09	0.27	0.01	0.008	0.02	0.01

3.3 Análise térmica

O objetivo da análise foi definir como ocorre a distribuição de temperatura em todo o trilho, o domínio do tempo foi definido em 20 segundos que é um tempo considerado normal para a soldagem por centelhamento. Adicionalmente, temos a geração do campo de temperatura resultante do efeito Joule, possuindo grande concentração na região onde localiza-se a junta.

Como temos que levar em consideração a perda de calor por convecção e por radiação térmica, com o intuito do modelo ser o mais fidedigno possível, foram estruturadas duas simulações uma com os eletrodos na alma do trilho e outra com os eletrodos no patim e boleto. Todos os parâmetros usados nessas simulações são descritos nas tabelas 3.2 e 3.3.

Tabela 3.2 – Condições de operação com os eletrodos na alma.

f (Hz)	I (A)	Ddp (V)	h (W/m²K)	T (K)	s	σ
50	395 a 20000	6	30	293.15	0.8	5.66

Tabela 3.3 – Condições de operação com os eletrodos no boleto e patim.

f (Hz)	I (A)	Ddp (V)	h (W/m²K)	T (K)	s	σ
50	15000	6	30	293.15	0.8	5.66

Com os dados das tabelas 3.2 e 3.3, além das equações 3.1 e 3.2, foram realizadas os cálculos da perda de calor por radiação e convecção térmica

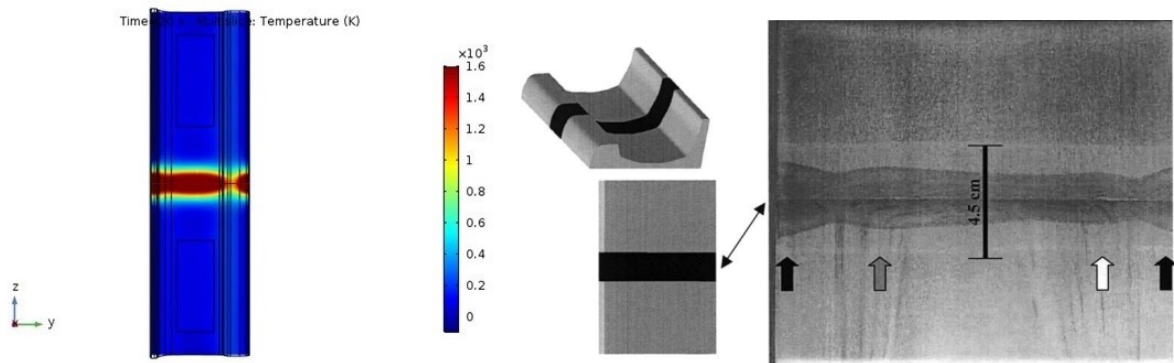
$$q_{conv}'' = h(T_s^4 - T_\infty^4) \quad (3.1)$$

$$q_{rad}'' = s\sigma(T_s^4 - T_{viz}^4) \quad (3.2)$$

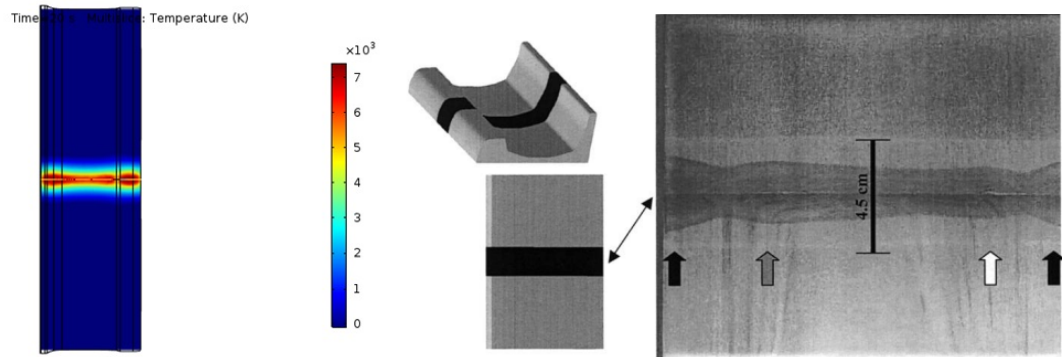
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a simulação, os resultados obtidos da distribuição de temperatura no trilho são demonstrados na figura 4.1.a e 4.1.c. Esses resultados tem caráter apenas qualitativos, uma vez que o modelo numérico computacional desenvolvido neste trabalho ainda carece de maiores estudos e detalhamento para se tornar um modelo completo a fim de simular com maior exatidão o que ocorre na prática.

Figura 4.1 – Distribuição de temperatura na simulação 3D.



(a) Distribuição de temperatura na soldagem (b) Distribuição de temperatura na soldagem experimental com os eletrodos posicionados na alma.



(c) Distribuição de temperatura na soldagem (d) Distribuição de temperatura na soldagem experimental com os eletrodos posicionados no bolete e patim.

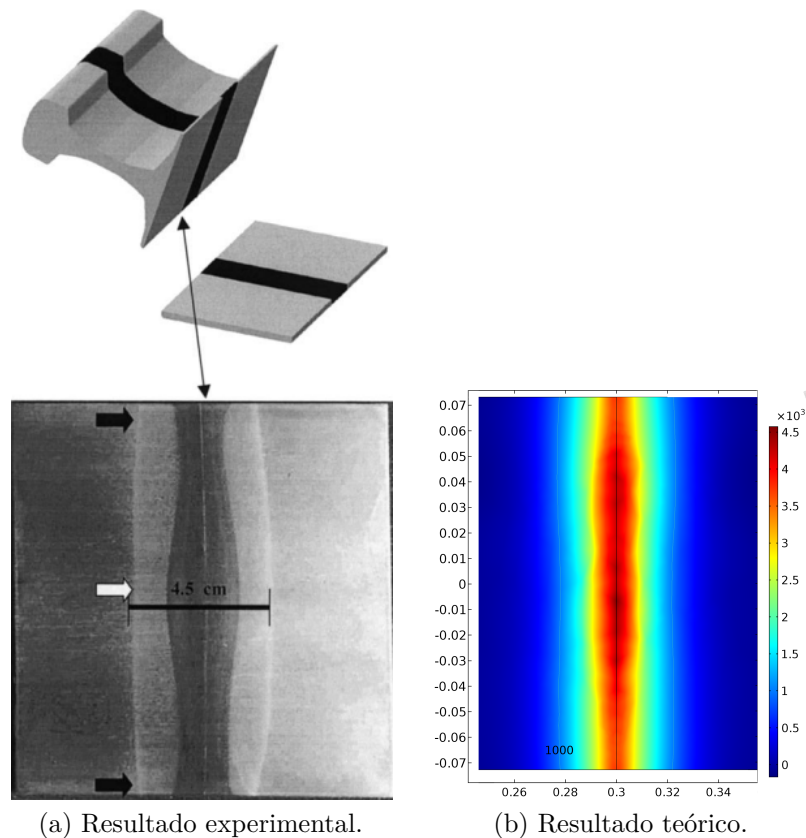
Inicialmente podemos comparar o resultado da simulação com os resultados obtidos no experimento de Mansouri, H., Monshi, A. (2004) Figura 4.1.b e Figura 4.1.d. Analisando os resultados, podemos perceber que apesar do modelo numérico computacional não conter todas as informações necessárias para realizar uma simulação que consiga reproduzir todas as condições de operação, ele se assemelha muito, no que diz respeito a forma como a distribuição de temperatura ocorre nos trilhos.

Pelas imagens, podemos verificar que existem regiões em ambos os casos, onde a concentração de geração de calor é maior. Apesar do modelo numérico ter o intuito de realizar uma comparação qualitativa, podemos notar uma diferença de temperatura máxima que obtemos nos dois casos. Enquanto na simulação com os eletrodos posicionados

na alma temos uma temperatura de pico menor, o modelo indica uma temperatura maior para o caso dos eletrodos no boleto e patim do trilho.

O resultado da ZTA pode ser melhor visualizado quando comparando novamente com o experimento de Mansouri, H., Monshi, A. (2004) na Figura 4.2 em que obteve uma extensão total de aproximadamente $4,5\text{cm}$, que é a extensão na qual temos uma divisão bem clara entre a ZTA, e o material do trilho pouco afetado pela geração de calor. Nos resultados da simulação, temos uma grande diferença de cores, ocasionando também uma clara divisão entre uma área de grande geração de calor no modelo computacional, e uma área muito pouco afetada pelo aquecimento, tal área é a ZTA,.

Figura 4.2 – Comparação do resultado experimental e de simulação.



5 CONCLUSÃO

Analisando os resultados obtidos com essas simulações, podemos observar que o modelo numérico computacional desenvolvido, apesar de não ser completo o bastante para cobrir tudo o que acontece de fato, de maneira qualitativa, se aproxima bastante do que ocorre na prática. Isto indica que o modelo tem um bom comportamento e se for aprimorado com os estudos necessários, pode convergir para simulações cada vez mais próximas do que acontece na prática.

Outro ponto que podemos destacar é a temperatura atingida com os dois modelos. No primeiro modelo, com os eletrodos posicionados na alma do trilho ferroviário, obtivemos temperaturas menores quando comparadas as atingidas no segundo modelo com os eletrodos posicionados no boleto e patim do trilho. Esse fenômeno pode ser explicado em partes pelo modelo não conter todas as físicas necessárias para realizar a simulação com precisão tais como propriedades inerentes aos materiais usados como por exemplo o calor latente de fusão, que absorve grande quantidade de energia sem que a temperatura do material sofra alguma alteração, ou até mesmo propriedades magnéticas dentre outras.

De maneira geral, os objetivos inicialmente propostos para este trabalho de conclusão de curso foram obtidos. As simulações propostas inicialmente foram realizadas, um estudo comparando as distribuições de temperaturas ao longo do trilho na soldagem com o eletrodo na alma e a soldagem com os eletrodos posicionados no boleto e patim conseguiram se aproximar bastante do que ocorre na prática, demonstrando assim a qualidade do modelo numérico computacional desenvolvido.

Partindo dessas considerações e do que o trabalho de SOTERO (2017) demonstrou, alguns estudos ainda são necessários para um maior domínio do assunto e do modelo numérico computacional, sendo que alguns deles estão listados abaixo.

- Implementar ao modelo numérico computacional as físicas necessárias (magnética, elétrica, entre outras) para uma maior acurácia dos resultados;
- Adicionar ao modelo numérico computacional realizado a etapa de recalque do processo de soldagem;
- Estudar as propriedades eletromagnéticas do aço conforme aumenta a variação de temperatura;

REFERÊNCIAS

JFE CORPORATION. **RAIL**. Disponível em: <<http://www.jfe-steel.co.jp/en/products/shapes/catalog/d1e-001.pdf>> Acesso em: 07 Ago. 2017

ANTT. **Agência Nacional de Transportes Terrestres**. Disponível em: <<http://www.antt.gov.br/>> Acesso em: 10 Ago. 2017

COMSOL Multiphysics®. **Multiphysics Cyclopedia: The Joule Heating Effect**. Disponível em: <<https://br.comsol.com/multiphysics/the-joule-heating-effect>>. Acesso em: 20 Jul. 2017

INCROPERA, Frank et al. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. ed. 6ª. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

MILLER. **The History of Welding**. Disponível em: <<https://www.millerwelds.com/resources/article-library/the-history-of-welding>>. Acesso em: 03 Ago. 2017.

LIENERT, Thomas et al.. **ASM Handbook: Welding Fundamentals and Process**. Vol. 06A. Ohio: ASM International. 2011.

GOMES, Omar. **Influência da corrente elétrica, da força de recalque e do tratamento térmico de revenimento na soldagem topo-a-topo por centelhamento de serras de fita bimetálica**. Tese(Mestrado). Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007.

SOTERO, Luiz Phelipe. **Implementação de um modelo numérico computacional para simulação do processo de soldagem por centelhamento aplicado a trilhos ferroviários: Análise termo-eletromagnética**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Departamento de Engenharia de Produção e Mecânica, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2017.

FORTES, Cleber. **Apostila de Metalurgia da Soldagem**. ESAB BR. Jan, 2004.

MANSOURI, H., MONSHI, A.. Microstructure and residual stress variations

in weld zone of flash-butt welded railroads, **Science and Technology of Welding and Joining**, Majlessi-Irã, Vol. 9, No. 3, pp 237-245, 2004.

KIM, Nam-Ho; SANKAR, Bhavani , **Introduction to Finite Element Analysis and Design**, ed. 1º, Nova Jersey: John Wiley & Sons Inc, p. 432, 2008.

MELCONIAN, Marcos. **Modelagem Numérica e Computacional com Similitude e Elementos Finitos: Desenvolvimento de Equação Preditiva para o Cálculo da Força de Retenção em Freios de Estampagem**. ed. 1ª. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2014.

FUJII, Mitsuru; NAKANOWATARI, Hiroaki; NARIAI, Kiyoshi. Rail Flash-Butt Welding Technology. **JFE Technical Report**, Tokio, No. 20, pp 109-113, Mar, 2015.

CRANK, J. and Nicolson. **A practical method for numerical evaluation of solutions of partial differential equations of the heat-conduction type**. Proc. Camb, Phil Soc., v43, 1947.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA FACULDADE DE ENGENHARIA

Termo de Declaração de Autenticidade de Autoria

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

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

Declaro, por fim, ter total conhecimento e compreensão das punições decorrentes da prática de plágio, através das sanções civis previstas na lei do direito autoral¹ e criminais previstas no Código Penal², além das cominações administrativas e acadêmicas que poderão resultar em reprovação no Trabalho de Conclusão de Curso.

Juiz de Fora, 10 de Novembro de 2017.

Daniel Macedo Pereira – Discente
Matrícula: 201265093AM – CPF: 029.437.845-67

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

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