

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

Luiz Phelipe Sotero

**Implementação de um modelo numérico computacional para simulação do
processo de soldagem por centelhamento aplicado a trilhos ferroviários:
Análise termo-eletromagnética**

Juiz de Fora

2017

Luiz Phelipe Sotero

**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 apresentado
ao Colegiado do Curso de Graduação em En-
genharia Mecânica da Universidade Federal
de Juiz de Fora, como requisito parcial para
obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Moisés Luiz Lagares Júnior

Coorientador: Leonardo Goliatt da Fonseca

Juiz de Fora

2017

Sotero, Luiz Phelipe.

Implementação de um modelo numérico computacional para simulação do processo de soldagem por centelhamento aplicado a trilhos ferroviários: Análise termo-eletromagnética / Luiz Phelipe Sotero. – 2017.

66 f. : il.

Orientador: Moisés Luiz Lagares Júnior

Coorientador: Leonardo Goliatt da Fonseca

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. Densidade de corrente elétrica. 5. Frequência elétrica. I. Lagares Júnior, Moisés Luiz, orient. II. Fonseca, Leonardo Goliatt da, coorient. III. Título.

Luiz Phelipe Sotero

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 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: 21/06/2017

BANCA EXAMINADORA

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

Professor Dr. Leonardo Goliatt da Fonseca
Universidade Federal de Juiz de Fora

Professor Dr. Alexandre Abrahão Cury
Universidade Federal de Juiz de Fora

Dedico este trabalho à minha mãe Rosângela de Fátima, e ao meu padrasto Lindomar de Faria, que sempre acreditaram e investiram em um futuro melhor para mim. Aos meus avós, Dianda de Fátima e Marco Antônio Gonçalves, que sempre me deram apoio emocional e exemplo de vida, que sem dúvida contribuíram para eu ser quem eu sou.

AGRADECIMENTOS

À Deus, que me deu o dom da vida e a oportunidade de batalhar pela conquista dos meus sonhos.

À minha querida e amada mãe, pois somente ela sabe o quanto esta caminhada foi difícil, e sem o apoio e amor incondicional dela, nada disso seria possível.

Ao meu padrasto que sempre me apoiou e incentivou a continuar estudando e ter algo melhor para mim.

Aos meus irmãos, que sempre foram a base que me dava forças, e recarregava minhas energias para continuar a cada semana de estudo.

Aos meus avós, que sempre me apoiaram, e a todo o momento ajudaram a continuar nessa difícil jornada.

À minha amada namorada e futura esposa Luciana Silva, que desde o início me deu forças e incentivo para seguir nos estudos, sempre acreditou no meu potencial e fez de tudo para eu também acreditar e não desistir.

Aos meus tios, que sempre que possível me deram apoio financeiro como incentivo para continuar estudando.

Ao meu professor orientador Moisés Lagares, e ao meu coorientador Leonardo Goliatt, pela atenção, apoio, e confiança em meu trabalho, que sem dúvida foram essenciais para sua boa execução.

Ao professor da banca examinadora, Prof. Dr. Alexandre Cury, pela paciência e tempo gasto com a leitura e avaliação deste trabalho, colaborando e enriquecendo-o com suas observações.

À Thaís Rossi Lopes Soares, pelo apoio e instrução para a realização deste trabalho.

À VALE e à UFJF, em especial ao departamento de Mecânica Aplicada e Computacional (MAC) e ao Departamento de Engenharia Mecânica, pelo auxílio financeiro e de infraestrutura fornecidos durante o trabalho.

Agradeço à todos que me ajudaram à completar essa difícil jornada da minha vida.

*"Deixe o futuro dizer a verdade, e avaliar
cada um de acordo com seus trabalhos e
suas conquistas."
Nikola Tesla.*

RESUMO

Palavras-chave: Soldagem por centelhamento. Método dos elementos finitos. Trilho ferroviário. Densidade de corrente elétrica. Frequência elétrica.

O processo de soldagem por Centelhamento é largamente utilizado em estaleiros de solda, para a união de trilhos ferroviários para fabricação dos Trilhos Longos Soldados (TLS). Mesmo a soldagem em campo, que tradicionalmente é realizada pelo processo aluminotérmico, vem sendo substituída pelo Centelhamento, devido a qualidade superior deste tipo de união. No entanto, a literatura disponível sobre a relação entre os parâmetros deste método e a qualidade da junta soldada, não é abrangente e precisa como a de outros processos convencionais. Desta forma, este trabalho estuda os efeitos que a distribuição da corrente ao longo do perfil do trilho, gera no campo de calor produzido por efeito Joule, bem como a Zona Termicamente Afetada (ZTA). O estudo é realizado via simulação numérica pelo método dos elementos finitos (MEF). A distribuição de corrente é numericamente calculada, considerando situações onde o equipamento de soldagem utiliza corrente contínua e alternada. No caso de corrente alternada, são avaliados os efeitos para várias frequências de alimentação distintas. O campo de temperatura resultante é comparado com resultados experimentais da literatura, confirmando as diferentes áreas observadas da zona de fusão e da Zona Termicamente Afetada, além de demonstrar os motivos pelos quais a densidade de corrente na seção da junta soldada não é uniforme. Por fim, sugere-se uma diferente forma de analisar os parâmetros para esse processo, e abre-se a possibilidade de uma nova linha de pesquisas para a otimização deste tipo de soldagem.

ABSTRACT

Keywords: Flash butt welding. Finite element method. Rail track. Density of electric current. Electrical frequency.

The flash butt welding process is widely used in welding rail service centre, in the union of rails for the manufacture of long welded rails (LWR). Even welding in situ, which is traditionally performed by the aluminothermic process, has been replaced by flash butt welding, due to the superior quality of this type of joint. However, the available literature on the relationship between the parameters of this method, and the quality of the welded joint, is not comprehensive and precise as other processes conventional. In this way, this work studies the effects that the current distribution along the cross rail section generates in the field of heat produced by Joule effect, as well as the Thermally Affected Zone (TAZ). The study is carried out by numerical simulation by the finite element method (FEM). The current distribution is numerically calculated, considering situations where the welding equipment uses alternating and direct current. In the case of alternating current, the effects are evaluated for several different frequencies. The resulting temperature field is compared with experimental results from the bibliography, confirming the different areas observed in the melting zone, and the Thermal Affected Zone, in addition is demonstrated the reasons why the current density in the welded joint section is not uniform. It is suggested a different way to the parameters be considered for this process, and opens the possibility of a new line of research for the optimization of this type of welding.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Representação gráfica do efeito pelicular em um condutor cilíndrico submetido à corrente alternada.	23
Figura 2.2 – Exemplo prático das 3 formas de transferência de calor.	25
Figura 2.3 – Principais estágios do processo de soldagem por centelhamento.	29
Figura 2.4 – Gráfico de variação dos parâmetros de um ciclo de soldagem por centelhamento.	30
Figura 2.5 – Desenho esquemático de um equipamento de soldagem por centelhamento.	33
Figura 2.6 – Máquinas para soldagem por centelhamento.	34
Figura 2.7 – Gráficos ferro carbono e posição da microestrutura do aço.	35
Figura 2.8 – Representação gráfica da zona termicamente afetada na soldagem por centelhamento.	36
Figura 2.9 – Representação gráfica da etapa de pré-processamento da geometria e malha de um domínio.	38
Figura 2.10 – Representação gráfica da etapa de pós-processamento de uma análise estrutural.	40
Figura 3.1 – Propriedades geométricas do trilho UIC-60.	44
Figura 3.2 – Malhas geradas para as análises.	45
Figura 3.3 – Gráfico de propriedades em função da temperatura.	46
Figura 4.1 – Diagrama de potencial elétrico V no trilho.	52
Figura 4.2 – Diagrama de distribuição de corrente A/m^2 inicial.	53
Figura 4.3 – Diagrama de campo magnético T na seção do trilho.	53
Figura 4.4 – Diagrama da redistribuição da densidade de corrente A/m^2 fluente na seção do trilho.	53
Figura 4.5 – Resultados experimentais de Mansouri, H., Monshi, A. (2004), e numéricos de temperatura K para o corte longitudinal do trilho.	55
Figura 4.6 – Resultados experimentais de Mansouri, H., Monshi, A. (2004), e numéricos de temperatura K para o corte longitudinal do boleto.	55
Figura 4.7 – Resultados experimentais de Mansouri, H., Monshi, A. (2004), e numéricos de temperatura K para o corte longitudinal da alma.	56
Figura 4.8 – Resultados experimentais de Mansouri, H., Monshi, A. (2004), e numéricos de temperatura K para o corte longitudinal do patim.	57
Figura 4.9 – Resultados experimentais de Mansouri, H., Monshi, A. (2004), e numéricos de temperatura K para a ZTA.	58
Figura 4.10 – Diagrama da distribuição da densidade de corrente A/m^2 na seção transversal da junta soldada do trilho para diferentes frequências.	59
Figura 4.11 – Variação da densidade de corrente com a frequência para vários pontos da seção do trilho.	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Parâmetros gerais do processo de soldagem por centelhamento.	31
Tabela 3.1 – Composição química do aço do trilho.	44
Tabela 3.2 – Propriedades dos materiais das análises.	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
DDP	Diferença de Potencial Elétrico
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MEF	Método dos Elementos Finitos
MIG	<i>Metal Inerte Gas</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
TLS	Trilhos Longos Soldados
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora
UIC	<i>International Union of Railway</i>
ZTA	Zona Termicamente Afetada
2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões

LISTA DE SÍMBOLOS

U	Energia potencial
q	Carga elétrica
E	Campo elétrico
V	Potencial Elétrico
ΔV	Diferença de potencial elétrico entre os pontos 0 e 1
V_0	Potencial elétrico no ponto 0
V_1	Potencial elétrico no ponto 1
U_0	Energia potencial elétrica no ponto 0
U_1	Energia potencial elétrica no ponto 1
ΔU	Diferença de energia potencial elétrico entre os pontos 0 e 1
i	Corrente elétrica
J	Densidade de corrente elétrica
A	Área da seção transversal do condutor
R	Resistência elétrica
l	Comprimento total do condutor
ρ	Resistividade elétrica
P	Potência
B	Campo magnético
$I_{interno}$	Corrente total que atravessa o interior do contorno da região integrada
Φ_B	Fluxo magnético
μ_0	Permeabilidade magnética no vácuo
t	Tempo
q_x''	Taxa de transferência de calor
k	Coefficiente de condução de calor
T	Temperatura

T_1	Temperatura no ponto inicial
T_2	Temperatura no ponto final
x	Direção e ponto no qual a transferência de calor unidimensional ocorre
ΔT	Diferença de temperatura entre o ponto inicial e o final
L	Comprimento total do condutor térmico
q_{conv}''	Taxa de transferência de calor por convecção
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção
T_s	Temperatura da superfície do sólido
T_∞	Temperatura do fluido ao redor da superfície
T_{viz}	Temperatura do ambiente ao redor da superfície
q_{rad}''	Taxa de transferência de calor por radiação
ϵ	Emissividade térmica
σ	Absortividade térmica
q_g	Energia interna gerada por unidade de volume
E_g	Energia interna gerada
V_{corpo}	Volume do corpo
\dot{E}_{acu}	Energia térmica acumulada
\dot{E}_{ent}	Energia térmica que entra
\dot{E}_{sai}	Energia térmica que sai
q_{tot}	Quantidade total de calor trocado
m	Massa total do corpo
C_p	Calor específico à pressão constante
$T_{inicial}$	Temperatura inicial do corpo
T_{final}	Temperatura final do corpo
μ_r	Permeabilidade magnética relativa
ϵ_r	Permissividade elétrica relativa

J_e	Densidade de corrente externa
w	Frequência angular
A	Potencial magnético
H	Campo magnetizante
E_{Tot}	Energia total gerada por efeito Joule
m	Massa do trilho
Vol	Volume do trilho
P_{Tot}	Potência total gerada por efeito Joule
$P_{Tot,vol}$	Potência total por unidade de volume
$P_{Tot,mas}$	Potência total por unidade de massa
ρ_{dens}	Densidade do aço
$I_{Tot,cont}$	Corrente total em corrente contínua
$I_{Tot,alter}$	Corrente total em corrente alternada
P	Potência
I	Corrente total

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Apresentação	16
1.2	Formulação do problema	16
1.3	Objetivos	17
1.3.1	Objetivo geral	17
1.3.2	Objetivos específicos	17
1.4	Justificativa	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	Eletromagnetismo	19
2.1.1	Efeito Joule	20
2.1.2	Indução Eletromagnética	21
2.1.2.1	Efeito Pelicular	22
2.1.2.2	Ferromagnetismo	23
2.2	Transferência de Calor	23
2.2.1	Condução	24
2.2.2	Convecção	24
2.2.3	Radiação	25
2.2.4	Geração de Calor	25
2.2.5	Conservação da Energia	26
2.3	Soldagem por Centelhamento	26
2.3.1	Pré-aquecimento	27
2.3.2	Centelhamento	28
2.3.3	Recalque	28
2.3.4	Resfriamento e Raspagem	29
2.3.5	Parâmetros do processo de soldagem por centelhamento	30
2.3.5.1	Área da seção transversal das peças	31
2.3.5.2	Tensão elétrica	31
2.3.5.3	Corrente e potência	31
2.3.5.4	Velocidade de Compressão	32
2.3.5.5	Força de Recalque	32
2.3.5.6	Distância de Recalque	32
2.3.6	Equipamentos de Soldagem por Centelhamento	33
2.3.7	Zona Termicamente Afetada	34
2.3.7.1	Região de crescimento de grão (A)	35
2.3.7.2	Região de refino de grão (B)	36

2.3.7.3	Região intercrítica (C)	36
2.4	Método dos Elementos Finitos	36
2.4.1	Pré-processamento	38
2.4.1.1	Geração da malha do domínio	38
2.4.1.2	Formulação dos elementos	38
2.4.1.3	Montagem	39
2.4.2	Processamento	39
2.4.3	Pós-processamento	39
3	METODOLOGIA	41
3.1	Histórico de desenvolvimento	41
3.2	Validação do método computacional com o experimental	43
3.2.1	Condições de operação da máquina	43
3.2.2	Geometria e malha	43
3.2.3	Propriedades dos materiais	44
3.2.4	Etapas das análises	46
3.2.4.1	Análise elétrica inicial	47
3.2.4.2	Análise magnética	47
3.2.4.3	Análise termoeletrica	48
3.2.4.4	Análise térmica final	49
3.2.4.5	Variação da frequência	51
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1	Validação e comparação do método computacional com o experimental .	52
4.2	Zona Termicamente Afetada	56
4.3	Variação da frequência da corrente	58
5	CONCLUSÃO	61
	REFERÊNCIAS	63

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

Constantemente, as empresas buscam aumento da qualidade de seus produtos e serviços, aliando-os à redução de custos e, conseqüente, o aumento de competitividade no mercado. No ramo ferroviário não é diferente e muitas empresas encontraram no processo de soldagem por centelhamento uma forma de otimizar muitos pontos falhos que envolvem a soldagem de trilhos ferroviários, tanto em campo, quanto em estaleiros.

A soldagem por centelhamento é um processo no qual se promove a união de duas ou mais peças a fim de se obter um único corpo ao final do procedimento. Desde sua criação, esse processo tem sido cada vez mais adotado devido à suas inúmeras vantagens como alta velocidade de soldagem e qualidade superior, em comparação aos meios convencionais como o processo aluminotérmico, em casos específicos de soldagem topo-a-topo, como é o caso de trilhos ferroviários.

1.2 Formulação do problema

Diferentemente dos métodos de soldagem convencionais, com maiores campos de aplicação como os processos MIG-MAG (*Metal Inert Gas - Metal Active Gas*) e TIG (*Tungsten Inert Gas*), o processo de soldagem por centelhamento é um procedimento de fabricação muito específico, utilizados praticamente somente para soldagens topo-a-topo, e conseqüentemente existem poucas literaturas que estudam profundamente os fenômenos físicos que ocorrem durante o procedimento. Logo, existe uma grande necessidade de se entender como tudo ocorre, já que a tecnologia que envolve as máquinas existentes são guardadas pelas empresas que as fabricam.

Além disso, existem literaturas como o artigo de Mansouri, H., Monshi, A. (2004), que demonstram que em soldagens de trilhos realizadas em campo, 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. Mesmo o autor tendo levantado hipóteses acerca do que aconteceu, não se tem comprovação matemática das suas afirmações, sendo extremamente interessante entender esse fenômeno, para futuras melhorias.

Existe também a necessidade de se conhecer a diferença na qualidade da solda, quando se utiliza corrente contínua e alternada, bem como quando se aplica frequências variadas, já que em cada caso temos uma ocasião mais adequada de uso para solda de trilhos, de modo a permitir possíveis futuras otimizações no processo.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo maior, a busca por um meio alternativo de análise dos fenômenos que ocorrem durante o processo de soldagem por centelhamento, que seja mais rápido e de maior facilidade de ser implementado várias vezes, quando comparado aos procedimentos experimentais. Assim através de métodos numérico computacionais, deseja-se implementar um modelo que recrie as condições do processo, no que diz respeito ao aquecimento dos trilhos, com o auxílio de softwares comerciais, que seja ao mesmo tempo confiável e de fácil trabalho, permitindo futuras pesquisas acerca do processo de soldagem por centelhamento, sem a necessidade de altos custos com experimentos práticos e maquinário específicos do processo.

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 algum software comercial que utilize o método dos elementos finitos;
- Implementar modelos que simulem máquinas que trabalham tanto com corrente alternada quanto com corrente contínua;
- Entender o porquê de o aquecimento do trilho ter maior intensidade em suas bordas externas em no artigo de Mansouri, H., Monshi, A. (2004);
- Análise da influência da variação da frequência de alimentação elétrica no aquecimento do trilho;
- Realizar uma análise acerca da zona termicamente afetada que envolve a soldagem por centelhamento.

1.4 Justificativa

Diante das dificuldades de entendimento do processo de soldagem por centelhamento, e da falta de literatura acerca do assunto, a empresa VALE procurou professores da

Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) para desenvolver uma linha de pesquisa sobre este processo. Mas um grande problema de estudo desse procedimento, é o altíssimo preço das máquinas que a realizam em trilhos ferroviários, que inviabilizam a repetição do método ainda dentro da universidade.

Além disso a etapa de aquecimento dos trilhos é uma das mais importantes do processo, já que é a que fornece calor para que as peças atinjam temperaturas suficientes para que seja realizado a conformação mecânica pela etapa de recalque, unindo-as. Diante disso, o presente trabalho demonstra ser um grande aliado ao domínio completo da tecnologia que envolve todo o processo de soldagem por centelhamento, objetivo final das pesquisas até aqui realizadas, e que continuarão sendo feitas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Eletromagnetismo

A partir da descoberta da eletricidade, a humanidade se desenvolveu como nunca havia se desenvolvido antes, sendo assim alvo de várias pesquisas para um melhor entendimento de como ocorrem os fenômenos eletromagnéticos, a fim de usá-los a nosso favor.

Segundo Halliday (2012), a energia potencial U por unidade de carga q , num campo elétrico E , é chamada de potencial elétrico V , e a diferença de potencial elétrico ΔV , entre dois pontos quaisquer num campo elétrico é igual à diferença de energia potencial por unidade de carga entre dois pontos, ou matematicamente exemplificando:

$$\Delta V = V_1 - V_0 = \frac{U_1}{q} - \frac{U_0}{q} = \frac{\Delta U}{q} \quad (2.1)$$

Quando uma diferença de potencial elétrico aplicado em um corpo condutor, existe o movimento de carga do maior para o menor potencial. Tal fenômeno é chamado de corrente elétrica i , que é definido, como sendo a quantidade de carga que atravessa uma seção por intervalo de tempo (HALLIDAY, 2012).

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (2.2)$$

Algumas vezes estamos mais interessados na corrente total que atravessa a seção transversal de um condutor. Outras, a informação da quantidade de corrente i que atravessa um condutor, por cada unidade de área A é mais interessante ao estudo feito. Assim, podemos introduzir uma nova variável; a densidade de corrente J . O conhecimento da densidade de corrente se mostra muito mais interessante em inúmeros problemas de engenharia, pois conseguimos estimar a corrente que atravessa cada ponto da seção e, assim, definir os efeitos que essa corrente ocasionará em tal ponto (HALLIDAY, 2012).

$$J = \frac{i}{A} \quad (2.3)$$

Segundo a lei de Ohm, a corrente elétrica que flui em um condutor é diretamente proporcional à diferença de potencial elétrico (DDP) aplicada ao dispositivo, e a razão entre essa DDP e a corrente que flui, é igual à uma constante, chamada de resistência elétrica R do corpo. Esta propriedade geralmente é dependente de diversas variáveis, tendo como principais as características geométricas do corpo, que inclui a área da seção transversal do condutor A , a respectiva distância l entre os potenciais elétricos aplicados, e ainda da resistividade elétrica ρ do material que o compõe (HALLIDAY, 2012).

$$R = \frac{\Delta V}{i} = \frac{\rho l}{A} \quad (2.4)$$

Caso a diferença de potencial ΔV não seja o foco, e sim o campo elétrico E , é possível calcular a densidade de corrente de outra forma, como sendo função da resistividade do material do condutor e do campo elétrico (SEARS, 2009).

$$J = \frac{E}{\rho} \quad (2.5)$$

A equação 2.5 é muito útil em alguns casos, quando se tem somente o valor e a distribuição do campo elétrico ao longo da seção do condutor e de sua extensão, o que acontece muito em análises numéricas por elementos finitos.

2.1.1 Efeito Joule

O efeito Joule (também conhecido como aquecimento resistivo ou ôhmico) descreve o processo no qual a energia de uma corrente elétrica é convertida em calor à medida que flui através de uma resistência. Quando a corrente elétrica flui em um corpo condutor, sendo ele sólido ou líquido, a energia elétrica é convertida em calor através de perdas resistivas no material. O calor é gerado em nível atômico, quando os elétrons de condução transferem energia para os átomos do condutor por meio de colisões (COMSOL, 2017).

O efeito Joule pode atuar de forma desejada ou indesejada em um projeto. Quando é interessante aproveitar seu efeito, o calor gerado no condutor pela passagem de corrente, pode aquecer o ambiente em seu entorno, como a resistência de chuveiro elétrico, que aquece a água corrente quando esta atravessa sua tubulação. Porém muitas vezes, o efeito Joule é prejudicial ao projeto, causando efeitos como gasto desnecessário de energia elétrica, superaquecimento do condutor, e até sua fusão.

Em condutores Ôhmicos, ou seja que seguem a lei de Ohm, a dissipação de calor devido à resistividade elétrica segue a relação de potência em circuitos resistivos, onde o decréscimo de energia potencial elétrica é acompanhada da transformação desta energia para alguma outra forma, no caso, térmica. Assim, a potência P associada à essa dissipação de energia na forma de calor, é definido como sendo a variação de energia potencial no tempo, chegando até a equação 2.6 (SEARS, 2009):

$$P = \frac{dU}{dt} = i\Delta V = Ri^2 = \frac{\Delta V^2}{R} \quad (2.6)$$

Muitos materiais não seguem efetivamente a lei de Ohm, mas essa lei pode servir de base para muitos cálculos e aproximações a fim de se prever com certo nível exatidão o comportamento que o material possui na realidade, quando submetido à circunstâncias específicas. Um exemplo da mudança dos valores da equação 2.6, é a grande alteração do

valor da resistividade elétrica do material com o aumento da temperatura do corpo, o que inevitavelmente acontece devido ao aquecimento por efeito Joule (SEARS, 2009).

2.1.2 Indução Eletromagnética

Pelas leis de Biot-Savart e de Ampère, sabemos que cargas elétricas em movimento (corrente) fluindo por um condutor geram um campo magnético B . A intensidade desse campo gerado depende diretamente da proporção dessa corrente, e da distância que o ponto analisado está das cargas em movimento. Logo, uma variação da corrente que atravessa um condutor conseqüentemente causa uma mudança no campo magnético gerado (HALLIDAY, 2012).

$$\oint \vec{B} dl = \mu_0 I_{interno} \quad (2.7)$$

Segundo a Lei de Faraday em conjunto com a Lei de Lenz, ou lei de indução magnética, uma variação de corrente em uma espira ou um fio A, provoca uma mudança de campo e fluxo magnético que induz um campo elétrico, e conseqüentemente uma corrente na direção oposta em uma espira ou fio adjacente B (SEARS, 2009). O mesmo pode acontecer pelo movimento de um em relação ao outro.

$$\oint E ds = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (2.8)$$

Mas o que não é particularmente intuitivo, é que se uma corrente variável no fio A, pode causar um campo magnético variável, e que a mudança desse campo pode induzir uma corrente na direção oposta em um fio B adjacente, então esse campo magnético variável também pode induzir uma corrente no sentido oposto do mesmo fio A. Esta é a natureza fundamental da indutância.

Considerando o fio A, e supondo que a corrente no fio A suba de repente. No primeiro instante de tempo, há um campo magnético variável em torno de A que induz uma corrente na direção inversa do mesmo fio A, que cancela a corrente original. A variação líquida da corrente em A é zero. No instante seguinte, o campo magnético que varia em torno de A começa a decair ligeiramente, e uma pequena quantidade de corrente líquida começa a fluir, já que o efeito de indução diminui. No instante seguinte, o campo magnético em mudança diminui um pouco mais, e um pouco mais de corrente líquida começa a fluir. Este processo continua durante instantes de tempo sucessivos até que a corrente total esteja fluindo ao longo do fio (BROOKS, 2009).

Dessa forma, supondo que no meio do processo a corrente original de repente muda de direção. Dessa vez, o processo reinicia, porém no sentido oposto. Toda vez que a corrente original muda de direção, o processo recomeça no sentido inverso. O número de

vezes que a corrente original muda de direção cada segundo é a frequência da corrente. Se a frequência é alta o suficiente, a corrente nunca chega a fluir em toda a seção transversal do fio A homogeneamente (BROOKS, 2009).

Devido à uma geração de reatância indutiva, ocasionado pela auto-indutância do condutor, existe uma resistência maior ao fluxo de corrente elétrica (CIRCUIT GLOBE, 2017), porém, essa resistência não é homogênea em toda a seção transversal do fio. Em corrente alternada, a diferença na reatância indutiva no condutor varia tendo o valor máximo em seu centro, e mínimo nas bordas. Assim, durante o período de tempo em que o campo magnético está variando, a corrente tende a fluir onde o reatância indutiva é mais fraca. Dessa forma, a corrente flui com maior intensidade em pontos mais distantes do centro do fio, ou seja, ao longo da sua superfície externa. Este fenômeno é chamado de efeito Pelicular, ou *Skin Effect* (Brokks, 2009).

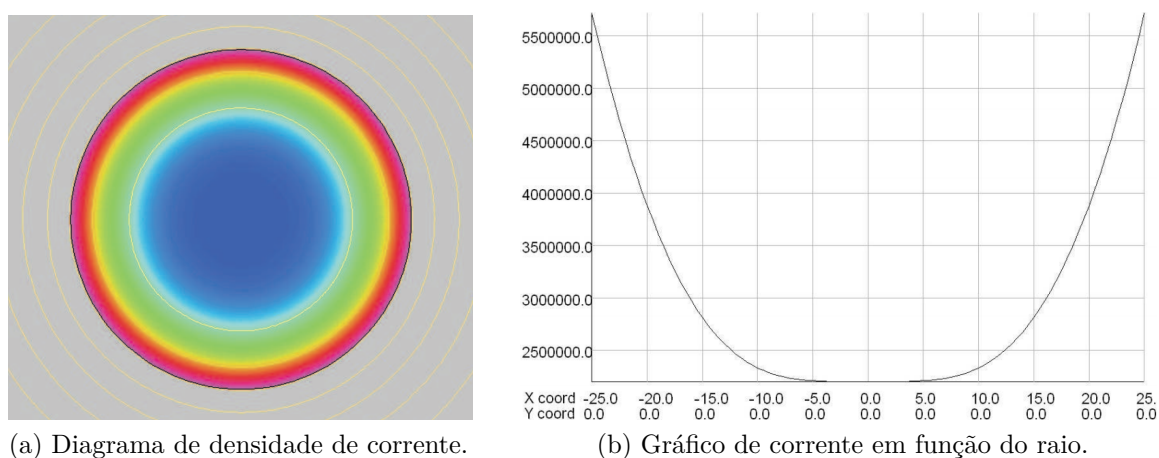
2.1.2.1 Efeito Pelicular

Segundo Robert (2000), quando uma corrente elétrica constante atravessa um condutor homogêneo, de considerável seção transversal, ela se distribui de forma uniforme nesta seção. O que não ocorre quando a corrente é alternada, pois neste caso, esta não se distribui uniformemente e a distribuição de corrente depende da frequência do campo elétrico, da condutividade elétrica, das dimensões e da forma geométrica do condutor. Quando o condutor é de seção transversal circular a densidade de corrente varia ao longo do raio, tendo valor máximo na superfície e mínima sobre o eixo. Essa concentração de corrente próxima da superfície do condutor chama-se efeito pelicular ou efeito Kelvin em homenagem a Lord Kelvin, por sua contribuição em pesquisas deste efeito em condutores cilíndricos. O efeito pelicular apresenta interesse técnico e também acadêmico, e por isso tem sido alvo de vários estudos com o objetivo de entender melhor esse fenômeno.

Devido à grande dificuldade dos cálculos envolvendo o efeito pelicular, alguns modelos já foram criados, de forma a prever o comportamento da distribuição da corrente na seção transversal de condutores de algumas formas geométricas mais comuns, quando submetidos à corrente alternada. Porém, segundo Robert (2000) este cálculo só é considerado mais simples, em dois tipos de geometria, em seções circulares, e retangulares de comprimento infinito. Para qualquer geometria diferente dos citados, principalmente em geometrias mais complexas, o cálculo do efeito pelicular se torna possível somente por meios numéricos. Um exemplo do efeito pelicular em um condutor cilíndrico pode ser visualizado na figura 2.1, onde foi aplicado uma densidade de corrente de $3 \times 10^6 A/m^2$, em uma frequência de $50Hz$.

Em muitos casos o efeito pelicular é um fenômeno prejudicial ao projeto de engenharia realizado, um exemplo disso é a condução elétrica por fios de transmissão, onde temos uma maior concentração de corrente fluindo pelas bordas do condutor. Dessa forma,

Figura 2.1 – Representação gráfica do efeito pelicular em um condutor cilíndrico submetido à corrente alternada.



Fonte: Grecocini, Madescu, Mot, (2010).

existe uma área efetiva de passagem de corrente elétrica menor, quando comparado com circuitos de corrente contínua, acarretando um aumento da resistência total do fio. Isso gera mais perdas por efeito Joule, gerando também um aquecimento não uniforme ao longo da seção.

2.1.2.2 Ferromagnetismo

Segundo Sears (2009), o ferromagnetismo é uma classe de materiais, no qual, "fortes interações entre os momentos magnéticos atômicos, produzem um alinhamento interno em certas regiões, chamadas domínios magnéticos, que existem mesmo na ausência de um campo magnético".

Dessa forma, quando existe um campo magnético externo, esses domínios ficam orientados paralelamente à esse campo. Assim, devido ao alto valor de momento magnético interno do domínio, podendo ser da ordem dos milhares de magnetons de Bohr, os torques gerados alinham o campo magnético externo aos domínios, de forma que os efeitos do campo magnético externo são extremamente intensificados, quando comparado à um material não ferromagnético como o cobre. Materiais ferromagnéticos, como o ferro e vários outros que o possuem em sua composição, geralmente são utilizados em aplicações no qual se deseja obter o máximo efeito do campo magnético possível, induzido por alguma corrente externa, como em eletroímãs e transformadores.

2.2 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 et al., 2008). Existem basicamente 3 formas de transferência de calor, que serão detalhadas nas subseções que seguem.

2.2.1 Condução

Segundo Incropera et al. (2008), a condução é uma forma de transferência de calor, em que ocorre a transmissão de energia das partículas mais energéticas para as menos energéticas, devido às interações entre partículas. 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 2.9, 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 a taxa 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.

$$q''_x = -k \frac{dT}{dx} = -k \frac{T_2 - T_1}{L} = -k \frac{\Delta T}{L} \quad (2.9)$$

2.2.2 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 et al., 2008). Esse movimento do fluido está associado ao fato de que em um instante qualquer, um grande número de moléculas está se movendo coletivamente, ou como agregado, 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 2.10, 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.

$$q''_{conv} = h(T_s - T_\infty) \quad (2.10)$$

2.2.3 Radiação

Segundo Incropera et al. (2008), radiação térmica é a energia emitida pela matéria que se encontra em uma temperatura não nula. Essa emissão é atribuída a mudanças nas configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas que compõem a matéria. 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 2.11, onde ϵ 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 constante referente à propriedade de absorção do material, ou seja, sua 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.

$$q''_{rad} = \epsilon\sigma(T_s^4 - T_{viz}^4) \quad (2.11)$$

A figura 2.2 traz exemplos de nosso cotidiano que podem exemplificar muito bem o que é cada tipo de meio de transferência de calor explicado.

Figura 2.2 – Exemplo prático das 3 formas de transferência de calor.



Fonte: Adaptado de Engineering News (2017).

2.2.4 Geração de Calor

Existem diversos fenômenos que podem acarretar em uma geração ou absorção de calor internamente ao corpo. Reações químicas e nucleares são bons exemplos de

geração de calor interno. Para o presente trabalho, o tipo de geração de calor que deve ter maior atenção, é a geração por efeito Joule, que ocorre devido à efeitos elétricos, também podendo ser por fenômenos magnéticos. Como tal fenômeno ocorre dentro de um volume de controle, o efeito é proporcional ao volume do corpo, sendo especificado em função da energia gerada E_g por unidade de volume V_{corpo} (INCROPERA et al., 2008).

$$q_g = \frac{dE_g}{dV_{corpo}} \quad (2.12)$$

2.2.5 Conservação da Energia

Segundo Incropera et al. (2008), a taxa de aumento da quantidade de energia térmica e mecânica acumulada (armazenada) 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. 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 2.13.

$$\dot{E}_{acu} = \dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sai} + \dot{E}_g \quad (2.13)$$

Todas as formas de transferência e geração de calor citadas, causam aumento ou diminuição da energia total presente nos domínios \dot{E}_{acu} , quando estes não estão sujeitos à um regime permanente. Conseqüentemente 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 2.14, 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 et al., 2008).

$$q_{tot} = E_{acu} = mC_p(T_{final} - T_{inicial}) \quad (2.14)$$

2.3 Soldagem por Centelhamento

Os primeiros indícios da utilização da soldagem por centelhamento, datam do início do século XX (MILLER, 2017), pouco tempo após ser patenteado nos Estados Unidos. A partir dessa época, o método começou a ser conhecido de forma mais similar à como

é utilizada atualmente. Desde então, essa tecnologia tem se aprimorado cada vez mais, permitindo a soldagem de diversos tipos de peças e materiais. Atualmente esse processo têm se mostrado extremamente vantajoso, na soldagem topo-a-topo (MECHANICAL ENGINEERING, 2017), e diversas empresas do ramo ferroviário têm escolhido a soldagem por centelhamento para a união de trilhos, para a construção de trilhos longos soldados, tanto em campo quanto em estaleiros.

A soldagem por centelhamento é um processo considerado rápido quando comparado à outros métodos de soldagem de trilhos, mas sua implementação prática é de extrema complexidade e demanda grande conhecimento para o entendimento das variáveis que controlam os resultados do processo.

A soldagem por centelhamento é um método dividido basicamente em 4 etapas (LIENERT, 2011), e cada etapa é de suma importância para se obter resultados satisfatórios ao final do processo:

- Pré aquecimento;
- Centelhamento;
- Recalque;
- Resfriamento e raspagem.

2.3.1 Pré-aquecimento

O pré aquecimento é a etapa de preparação das peças a serem soldadas. Sua principal função é a de redução de tensões residuais, e consequente eliminação de trincas, que podem ser geradas durante o resfriamento das peças, bem como evitar o aumento da dureza na zona termicamente afetada. O aparecimento de trincas em juntas soldadas de trilhos ferroviários deve sempre ser evitadas, pois a sua formação reduz drasticamente a vida útil dos trilhos, acarretando em altos e frequentes custos com manutenção (LIENERT, 2011).

Inicialmente as peças são posicionadas na posição topo-a-topo, e presas por garras que fixam os trilhos na posição ideal para a soldagem. Feito isso, os eletrodos são conectados aos trilhos, cada eletrodo com um potencial elétrico em contato com cada trilho. Após ser energizados os eletrodos, se inicia o pré aquecimento (FUJII, NAKANOWATARI, NARIAI, 2015).

No pré aquecimento é realizado movimentos oscilatórios de aproximação, contato e afastamento das partes. Esse movimento faz com que seja gerado faiscamentos provenientes do curto circuito entre as irregularidades das faces postas em contato, e consequente aparecimento de corrente elétrica. À medida que os primeiros contatos vão acontecendo,

estes pontos se fundem e são expelidos em altas temperaturas para fora da região soldada. Assim os primeiros faiscamentos em conjunto com o efeito Joule, causam um aquecimento moderado da região do entorno das faces a serem unidas, e tornam as peças aptas a iniciarem o centelhamento propriamente dito pela uniformização das faces e melhoria nas sua irregularidades mais grosseiras, além de propiciar maior tendência de início e continuidade do centelhamento (FUJII, NAKANOWATARI, NARIAI, 2015).

2.3.2 Centelhamento

O Centelhamento é uma das principais etapas, sendo a responsável por elevar a temperatura dos metais a serem unidos até próximo de seu respectivo ponto de fusão, distribuindo da forma mais uniforme possível o calor gerado e conseqüente uniformização do campo de temperatura em torno da junta. Outra importante função da etapa de centelhamento é a remoção de impurezas que possam existir nas juntas, impedindo a inclusão de elementos que causem fragilidade e possíveis trincas.

Nessa etapa, temos o aquecimento causado pelo efeito Joule em conjunto com o aumento de temperatura proveniente das altas temperaturas dos arcos elétricos gerados no centelhamento, que é a principal fonte de calor do processo. Nesse estágio os movimentos oscilatórios continuam, porém a fusão de pontos das faces em fase de união se torna mais acentuado pela formação de intensos arcos elétricos. Os arcos são gerados devido à baixa pressão de contato entre as peças, e pelos contatos serem em poucos pontos, ocasionando em uma grande densidade de corrente elétrica, e que libera uma enorme quantidade de calor nas peças a serem unidas e as torna suscetíveis ao recalque (LIENERT, 2011).

Devido à forças magnéticas causadas pela corrente elétrica que flui entre os eletrodos, a medida que pequenas partes de material vai sendo fundido, é expelido para fora da área de soldagem com aparência incandescente, essas centelhas geradas dão nome ao processo, já que esse é uma particularidade desse tipo de soldagem.

2.3.3 Recalque

A etapa de recalque é a etapa em que as peças estão a temperaturas bem próximas ao ponto de fusão do material dos trilhos, no qual a região de contato está relativamente macia e pronta para ser recalçada. Dessa forma é desligado a tensão elétrica aplicada anteriormente e as garras de fixação dos trilhos, os pressionam um contra o outro em um curto espaço de tempo, expelindo o metal líquido e pastoso da interface entre as partes (LIENERT, 2011).

Esse procedimento elimina as porosidades, impurezas e óxidos gerados durante o centelhamento, e realiza a união das partes por conformação mecânica (FUJII, NAKANOWATARI, NARIAI, 2015).

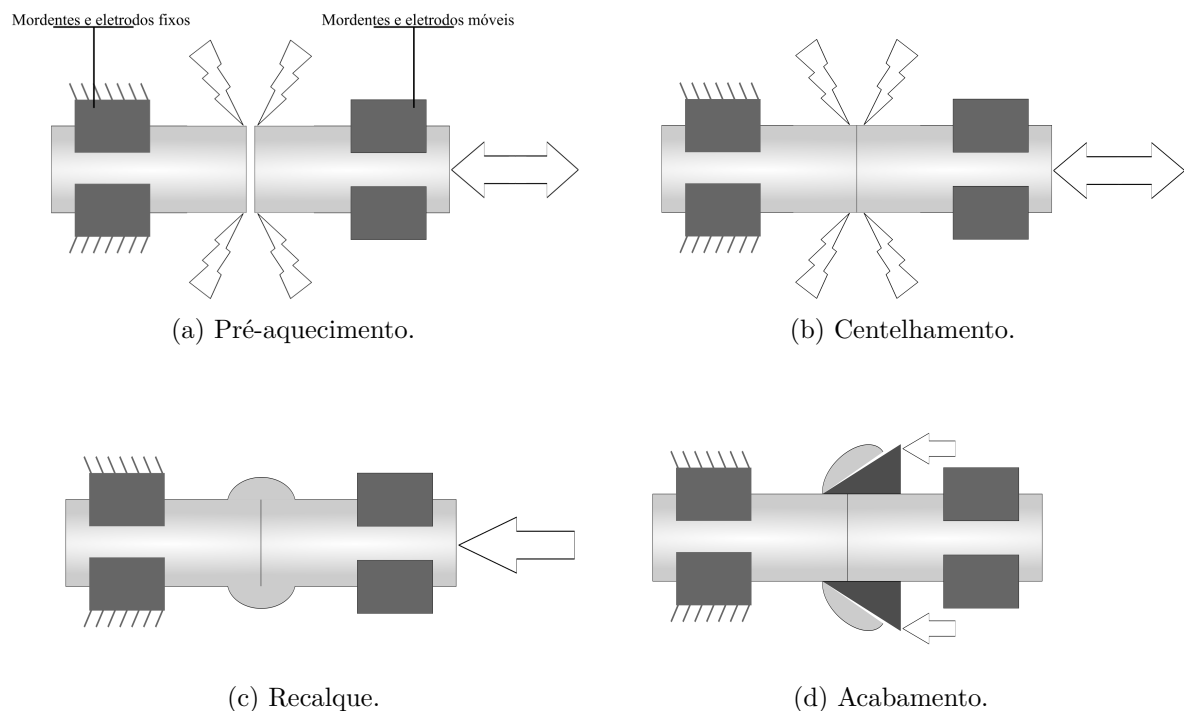
2.3.4 Resfriamento e Raspagem

Após ser realizado o recalque, as peças ainda estão à altas temperaturas, e dependendo do tipo de material e peça utilizada no processo, pode se optar por realizar um resfriamento controlado, ou até mesmo um pós-aquecimento para tratar termicamente a junta, e melhorar suas propriedades mecânicas. Independente do tipo de resfriamento escolhido, pouco tempo após a aplicação do recalque é realizado a etapa de raspagem, no qual todo o material excedente na junta é retirado, devolvendo o aspecto original do trilho, e o tornando apto a ser utilizado em ferrovias (LIENERT, 2011).

Quando a soldagem não exige acabamento, a etapa de raspagem pode ser descartada, mas em caso de trilhos, esse procedimento é extremamente necessário devido às condições de trabalho do trilho, no que diz respeito às suas necessidades de resistência mecânica e de interação com as rodas do trem.

Todas as etapas básicas descritas podem ser mostradas de forma esquemática na figura 2.3.

Figura 2.3 – Principais estágios do processo de soldagem por centelhamento.



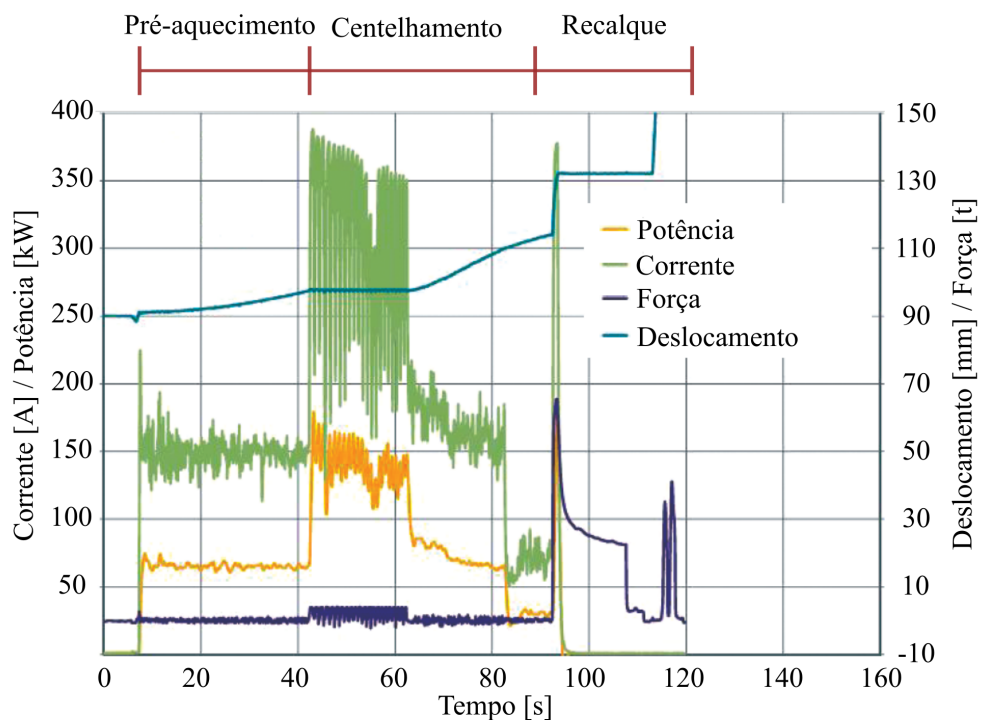
Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando a figura 2.4, é possível identificar como as principais variáveis do processo de soldagem por centelhamento se comportam durante todo o procedimento. Verifica-se na etapa de pré-aquecimento a variação periódica da potência, corrente e força de compressão, mostrando o movimento oscilatório já descrito em conjunto com valores de corrente e potência mais baixos que no processo de centelhamento propriamente dito.

Na etapa de centelhamento percebe-se o grande aumento dos valores de corrente, potência e força de contato entre as partes. O alto valor de potência dissipada nesse estágio, confirma que essa é a etapa de maior liberação de calor, e conseqüente aquecimento nas peças e principalmente da junta soldada.

No recalque vemos que em um curto espaço de tempo existe uma grande força de compressão e deslocamento das garras, demonstrando a união das partes e a expulsão de material para fora da junta soldada. Além disso verifica-se também que além de não haver mais movimentos cíclicos, toda a corrente elétrica é desligada para que o processo ocorra.

Figura 2.4 – Gráfico de variação dos parâmetros de um ciclo de soldagem por centelhamento.



Fonte: Adaptado de Fujii, Nakanowatari, Nariai (2005).

2.3.5 Parâmetros do processo de soldagem por centelhamento

O controle dos parâmetros de qualquer processo de soldagem, é de extrema importância para um procedimento com resultados satisfatórios. Assim se faz necessário conhecer os principais parâmetros que influenciam diretamente nos resultados do processo de soldagem por centelhamento, de forma que seja possível extrair o melhor desempenho da máquina utilizada, sempre buscando a redução de custos em conjunto com o aumento da qualidade necessária à junta. Os parâmetros gerais do processo podem ser listados na tabela 2.1, e os principais 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		

2.3.5.1 Área da seção transversal das peças

A área da seção transversal das partes em contato interfere diretamente em outros parâmetros, logo deve se ter muito cuidado ao escolher os parâmetros elétricos de entrada para que o calor gerado seja coerente com a área da seção em questão. Em geral, devido à resistência elétrica do trilho, seguindo 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).

2.3.5.2 Tensão elétrica

A tensão elétrica é um parâmetro que deve ser controlado em um valor geralmente baixo, entre 2 e 16V. Mesmo essa faixa de tensão permite que ocorra o centelhamento em pequenos pontos e saliências presentes nas superfícies, por onde a alta corrente flui e provoca o centelhamento (GOMES, 2007).

Através de controles, é possível realizar a ajustagem da tensão que será utilizada no procedimento. Para cada estágio, é necessário configurar a tensão ideal, de acordo com as particularidades de cada um, sempre levando em consideração todas as outras variáveis, de forma que o processo ocorra da melhor forma possível.

2.3.5.3 Corrente e potência

A corrente é um parâmetro extremamente importante na soldagem por centelhamento. O fluxo de corrente entre os trilhos e principalmente entre as superfícies de contato, é responsável pelo aquecimento da junta soldada, e quanto maior o valor da corrente, maior também o calor gerado. A corrente elétrica deve ser analisada em conjunto com a densidade de corrente, pois esta leva em consideração a área da seção transversal do trilho, o que pode influenciar muito 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 o suficiente para que o calor gerado seja capaz de elevar a temperatura das peças até um valor e que seja possível realizar o recalque, e baixa o suficiente para que não seja gerado um centelhamento de má qualidade, e evitar crateras que acumulam metal oxidado, que possam vir a prejudicar a qualidade final da junta soldada (GOMES, 2007).

2.3.5.4 Velocidade de Compressão

Após o centelhamento é realizado o recalque, onde é exercido uma grande força de compressão de uma peça contra a outra. O valor absoluto da força de recalque, bem como a velocidade com que é aplicada, interferem diretamente na qualidade da junta soldada. Geralmente, quanto maior a taxa de compressão, melhor a qualidade da 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. De modo geral, a maior velocidade de aproximação ocorre no início do recalque. Devido à fluidez do material expulso inicialmente, essa grande velocidade inicial 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).

2.3.5.5 Força de Recalque

A força de recalque deve estar em um valor alto o suficiente para que seja vencido a resistência do material, causando sua deformação plástica, e unindo as peças. Porém, a *American Welding Society* (AWS), considera que uma força de recalque muito alta pode ocasionar em expulsão exagerada de material, podendo prejudicar as características mecânicas da junta, principalmente a tornando pouco resistente à fadiga. Para aços-carbonos comuns, geralmente a tensão de compressão possui um valor entre 70 e 85 MPa, variando de acordo a porcentagem de cada elemento na liga, entre outros fatores.

2.3.5.6 Distância de Recalque

A distância de recalque, é a distância total percorrida pelos porta eletrodos, no sentido de união das peças. Seu valor pode variar de acordo com a área da seção transversal das partes, bem como do tipo de material que as compõem.

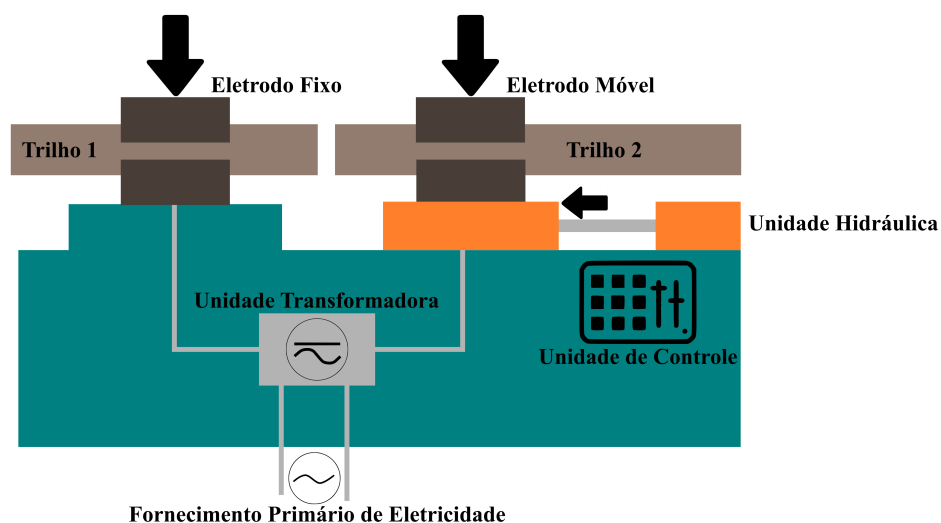
Aços de alta resistência geralmente possuem maiores valores de resistividade elétrica, o que conseqüentemente aumenta o calor dissipado no processo, e gera maior quantidade de região afetada pelo calor. Assim, é formada uma maior camada de aço fundido, o que necessita de maior distância de recalque, para expulsar essa camada extra de aço fundido e de óxidos que naturalmente são gerados em maior intensidade quando esse fenômeno ocorre. Da mesma forma, 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 extrudado para fora, garantindo a homogeneidade da junta em toda a seção transversal do trilho (GOMES, 2007).

2.3.6 Equipamentos de Soldagem por Centelhamento

Para a realização do processo de soldagem por centelhamento, já existem máquinas disponíveis no mercado, mesmo essa tecnologia não sendo muito difundida para o público que não está inserido dentro das empresas fabricantes dos equipamentos. Suas aplicações são variadas, indo desde soldagem de serras de fita, até trilhos ferroviários, e para cada tipo de peça, material, e das condições de trabalho, cada máquina pode possuir formas construtivas diferentes, que as tornam aptas a realizarem a soldagem dentro dos requisitos necessários (FUJII, NAKANOWATARI, NARIAI, 2015) e (LIENERT, 2011). A figura 2.5, mostra os componentes principais que compõem uma máquina de soldagem por centelhamento .

Figura 2.5 – Desenho esquemático de um equipamento de soldagem por centelhamento.

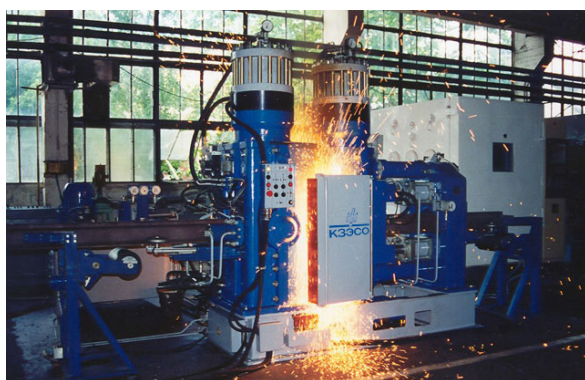


Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o ambiente das grandes empresas de logística, que utilizam o processo para a soldagem de trilhos ferroviários, também existem grandes diferenças entre máquinas de soldagem, onde essas variações também se dão pelas condições de trabalho, da infraestrutura disponível onde a solda é realizada, e das condições geométricas dos trilhos.

Na figura 2.6, são apresentados dois equipamentos de soldagem por centelhamento diferentes, onde a figura 2.6.a refere-se à máquina de soldagem geralmente utilizada em estaleiros de produção de trilhos longos soldados. Esse tipo de equipamento geralmente é de grande porte, e devido a alta disponibilidade de espaço em estaleiros, não é necessário, a utilização de equipamentos compactos e leves. Geralmente essas máquinas operam em corrente contínua, e possuem um maior controle dos parâmetros que governam a soldagem por centelhamento.

Figura 2.6 – 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 2.6.b exibe uma máquina de soldagem por centelhamento utilizada em campo. Nesse caso, devido à dificuldade de transporte e de acesso à energia elétrica proveniente da rede pública de distribuição, muitas vezes esses equipamentos são mais compactos, leves, e com menores possibilidades de controle dos parâmetros de soldagem, além de precisarem de um gerador elétrico integrado ao sistema. Uma importantíssima particularidade deste tipo de máquina, tal que será um dos objetos de estudo desse trabalho, é a utilização de corrente alternada, o que causa modificações nas etapas de pré-aquecimento e centelhamento, e que por isso devem assumir parâmetros diferentes para a soldagem quando comparado ao procedimento realizado em estaleiros.

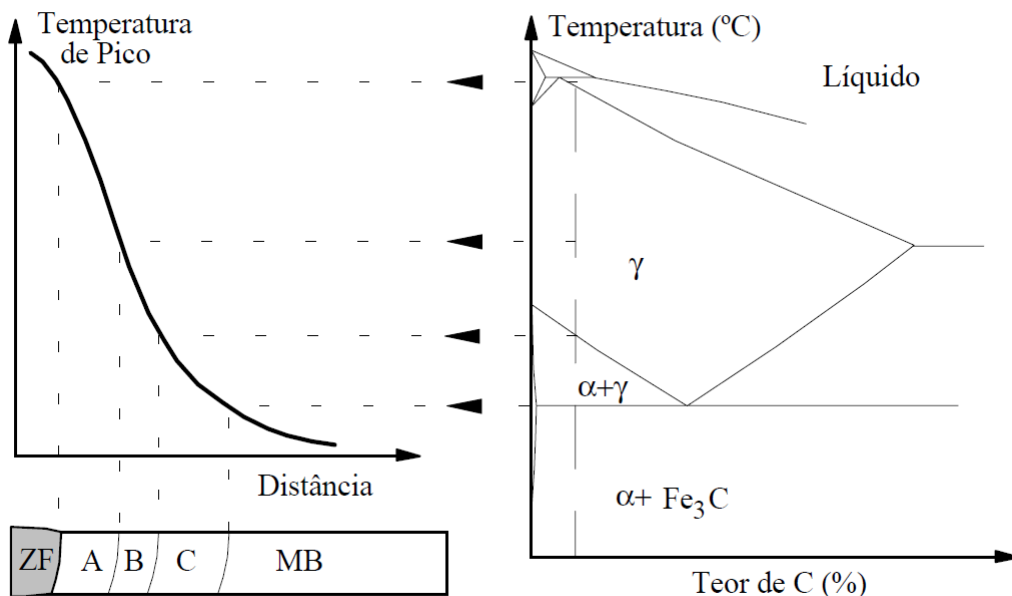
2.3.7 Zona Termicamente Afetada

Em qualquer procedimento de soldagem, existe o acúmulo de gradiente térmico no entorno da região onde o metal foi fundido. Na soldagem por centelhamento, essa difusão de calor é fortemente influenciada pela temperatura da zona de aço fundido, e

pela velocidade de soldagem. Segundo Fortes (2004), soldagens com alta potência e alta velocidade reduzem o gradiente térmico.

A ZTA é composta basicamente por 3 partes, variando da zona de fusão de metal, até a área menos afetada pelo aquecimento durante a soldagem. A figura 2.7, apresenta gráficos que apesar de não serem específicos da soldagem por centelhamento, exemplificam muito bem as 3 regiões citadas:

Figura 2.7 – Gráficos ferro carbono e posição da microestrutura do aço.



Fonte: Adaptado de ASM Treinamentos (2017).

2.3.7.1 Região de crescimento de grão (A)

Em pontos próximos à linha de divisão entre a zona de aço fundido, e zona de aço não fundido, a temperatura aumenta rapidamente até valores próximos da fusão do metal, e também esfria de forma muito rápida. Esse fenômeno pode acarretar na têmpera do material nessa região, onde durante o aquecimento, ela se torna austenítica, podendo vir a conter martensita quando esfria, um componente relativamente duro. Além disso, essa região acaba por desenvolver grãos grosseiros. 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). Os principais problemas relacionados à essa região, são a elevação da dureza e redução da tenacidade, tornando-a sujeito à trincas.

2.3.7.2 Região de refino de grão (B)

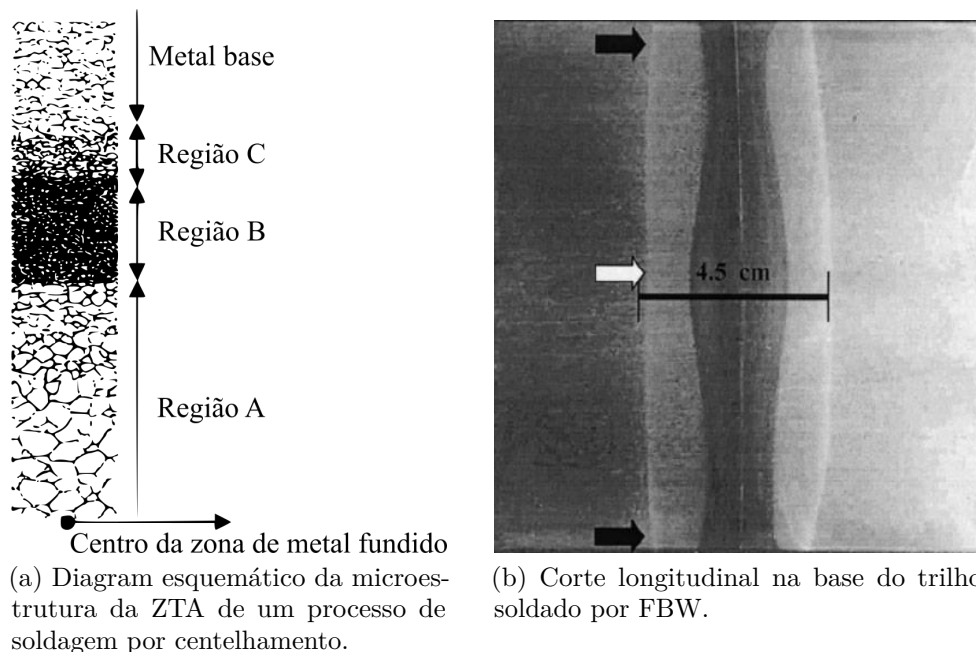
Essa região geralmente não é problemática, sendo caracterizada por ter menor aquecimento que a região de crescimento de grão, em torno de 900 e 1000°C . Mesmo tendo atingido uma temperatura acima da necessária para transformação, não chega a atingir a região austenítica, possuindo então grãos de tamanhos menores constituído por ferrita e perlita (FORTES, 2004).

2.3.7.3 Região intercrítica (C)

Assim como a região de refino de grão, essa parte não é problemática, sendo caracterizada por ser aquecida pouco acima de 727°C . A partir dessa região as mudanças microestruturais são cada vez menos perceptíveis, já que são menos afetadas pelo aquecimento gerado durante a soldagem (FORTES, 2004).

A figura 2.8, exemplifica como fica a zona termicamente afetada de um trilho ferroviário, após ser soldado pela soldagem por centelhamento. Nela podemos visualizar, como varia a microestrutura da ZTA, e ainda podendo ser quantificada em um valor próximo de $4,5\text{cm}$ de comprimento total.

Figura 2.8 – Representação gráfica da zona termicamente afetada na soldagem por centelhamento.



Fonte: Adaptado de Mansouri, Monshi (2004).

2.4 Método dos Elementos Finitos

À medida que a humanidade e as tecnologias se desenvolvem, surgem novos problemas para serem solucionados. Porém, a solução de alguns problemas reais, não são

triviais, e precisam de uma modelagem matemática bem estruturada para que seja possível sua resolução. Dessa forma, há algumas décadas, os métodos numéricos vem sendo cada vez mais utilizados, principalmente com a evolução da computação e da capacidade de processamento dos computadores, o que tornou as análises numéricas realmente viáveis. Possuindo uma ampla possibilidade de áreas de utilização, os métodos numéricos estão cada vez mais presentes no cotidiano dos profissionais, mesmo que de forma indireta (KIM, SANKAR, 2008).

No âmbito da engenharia, independente da área principal de atuação, os métodos numéricos se mostram cada vez mais presentes. Tendo em vista que vários problemas reais são de extrema dificuldade de implementação e resolução por meios analíticos, diversos softwares vêm sendo desenvolvidos para o auxílio e resolução dos problemas de engenharia, tornando possível resolver temas antes quase impossíveis, contribuindo muito para o desenvolvimento de novas tecnologias e otimizações.

Com a grande utilização deste tipo de análise, vários métodos numéricos surgiram, variando de acordo com o tipo de estudo que é feito, e o no caso da engenharia, o tipo de física que será implementada computacionalmente. Dentre os métodos para a engenharia, o método mais conhecido e utilizado atualmente, é o método dos elementos finitos, pois seu uso abrange diversas possibilidades de análises e físicas envolvidas no problema real, com grande precisão dos resultados.

A criação do método dos elementos finito surgiu em meados de 1955, onde engenheiros aeronáuticos o desenvolveu com a finalidade de analisar a distribuição de tensões em asas de aviões. Desde então, vários softwares para implementação do MEF foram desenvolvidos com fins comerciais, como o NASTRAN, desenvolvido pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e o ANSYS, a partir do qual o MEF se popularizou em todo o mundo, e começou a ser utilizado por empresas de tecnologia (WECK, KIM, 2004).

Segundo Melconian (2014), o método dos Elementos Finitos é um método numérico de aproximação de análises de fenômenos físicos que acontecem em meios contínuos, e descritos por meio de equações diferenciais, com determinadas condições de contorno (Problemas de Valor de Contorno), e possíveis condições iniciais.

O MEF se baseia no conceito de discretização do meio contínuo da peça em análise em pequenas partes, chamadas de elementos (KIM, SANKAR, 2008). Assim, um problema extremamente complicado, principalmente em peças de geometria complexa, pode ser simplificado como o somatório de vários problemas calculados em subpartes de cálculos e geometrias mais simples e conhecidas. Assim o modelo é reduzido à um conjunto de equações diferenciais que regem o comportamento físico inserido no domínio em análise.

O processo de resolução por meio do método dos elementos finitos é composto basicamente por 3 etapas, que serão descritas nas subseções que seguem.

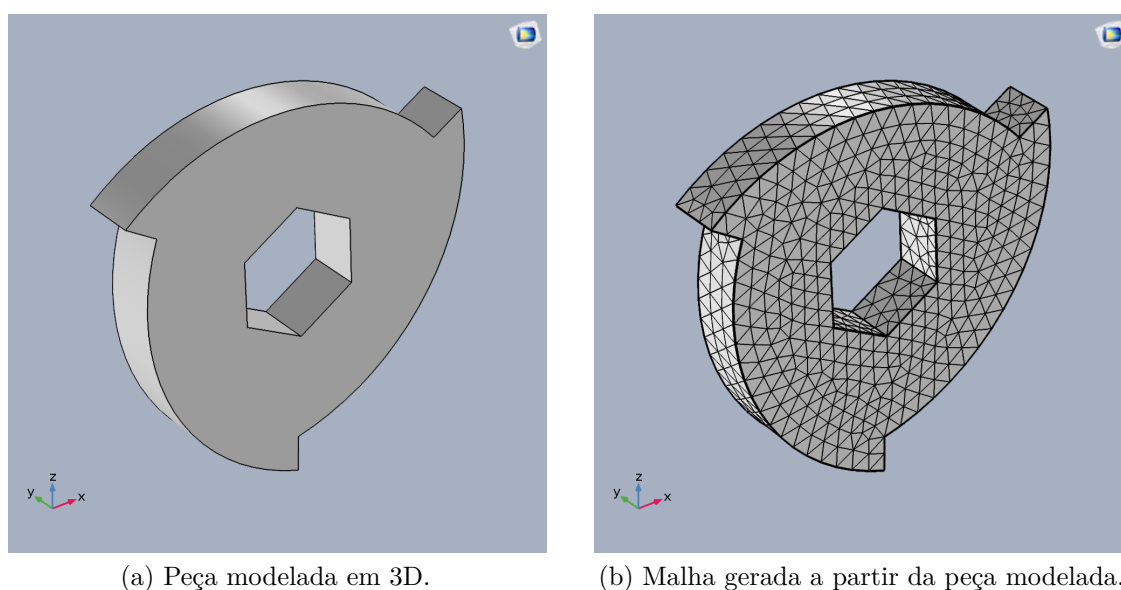
2.4.1 Pré-processamento

A etapa de pré-processamento é o onde se realiza a preparação inicial do modelo para a análise, e é a etapa que exige maior conhecimento teórico sobre as físicas a serem analisadas, e inclui alguns passos importantes.

2.4.1.1 Geração da malha do domínio

Realiza-se a modelagem do domínio que será analisado, onde no caso de softwares comerciais, pode ser feito diretamente no ambiente do programa ou em algum software de desenho assistido por computador (CAD). Feito isso, é realizado a discretização dos domínios em pequenos elementos, gerando a malha (KIM, SANKAR, 2008). Da mesma forma, os softwares comerciais possuem algoritmos sofisticados de geração e adaptação da malha. A figura 2.9, demonstra uma peça antes e depois da geração da malha em três dimensões (3D), no qual o tipo de elemento escolhido foi o elemento tetraédrico.

Figura 2.9 – Representação gráfica da etapa de pré-processamento da geometria e malha de um domínio.



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.4.1.2 Formulação dos elementos

Nessa etapa é realizado a aplicação da formulação dos elementos, por meio de equações, variáveis, e valores absolutos que regem a(s) física(s) que envolvem a análise.

Importantes configurações são definidas nessa etapa, como as propriedades dos materiais no qual os domínios são compostos, as condições de contorno do problema, como fixação e temperatura, as entradas de perturbações externas, como carregamentos, transferência de calor e tensão elétrica, e ainda o tipo e configuração da análise que será

realizada, como no domínio do tempo, da frequência e ainda estacionária, e muitas outras importantes definições para uma correta análise computacional (KIM, SANKAR, 2008).

2.4.1.3 Montagem

A montagem é a etapa que as equações matemáticas são montadas de forma que cada elemento transmita qualquer perturbação em seu domínio para os elementos subsequentes. Assim, qualquer aplicação de condição de contorno ou carregamento terá influência na resposta de todos os elementos presentes no domínio analisado para uma mesma física. Essa etapa é de extrema importância, pois é onde é feita a preparação para a resolução matemática do problema pelo computador (AZEVEDO, 2003).

2.4.2 Processamento

O processamento é a etapa onde ocorre a resolução dos sistemas de equações que envolvem os elementos dos domínios analisados. De acordo com as equações e as entradas fornecidas à análise, o solucionador ou "*solver*", realiza o processamento matemático do sistema de equações, utilizando algoritmos extremamente evoluídos, e assim retorna os resultados da análise. Os algoritmos utilizados em softwares de elementos finitos, utilizam conceituados princípios matemáticos, podendo ser diretos, como pelo método da eliminação de gaus, ou por métodos numéricos iterativos, variando de acordo com o software utilizado e com o tipo de análise que é feita. O processamento é um estágio que pode ser demorado dependendo do tipo de análise que é realizada, da precisão que é requerida dos resultados, da densidade de elementos na malha, entre outros fatores que fazem com que a solução do problema possa levar de alguns segundos à vários dias de processamento pelo computador, sendo dessa forma um importantíssimo fator a ser levado em consideração para a análise de viabilidade de se fazer a ou não a simulação (COMSOL, 2017).

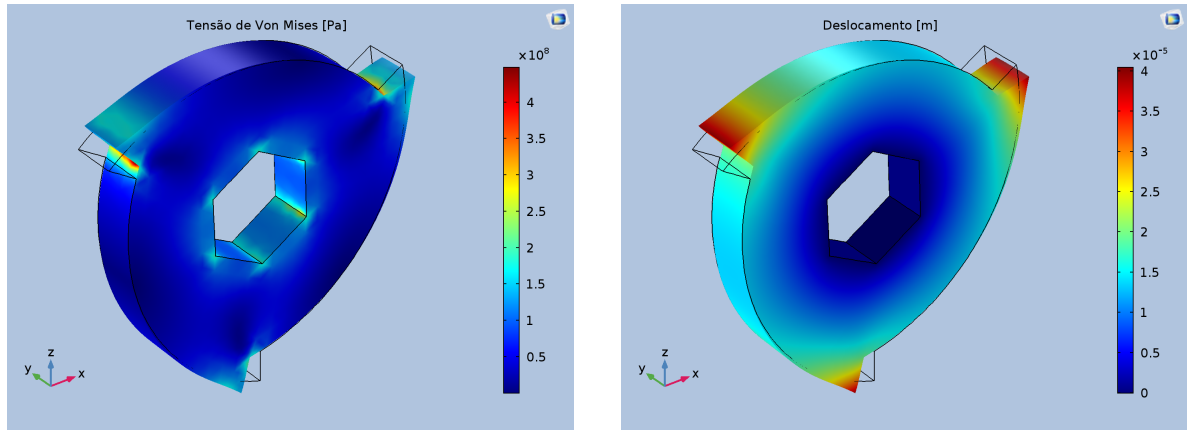
2.4.3 Pós-processamento

A etapa de pós processamento é basicamente o estágio em que os dados que resultaram do processamento são manipulados, com o objetivo de obter as informações mais relevantes da análise realizada.

Em softwares de MEF comerciais, geralmente as informações são bem organizadas e voltadas para os dados mais utilizados em análises comuns, como por exemplo as tensões e deformações em uma análise estrutural, corrente e potencial elétrico em análises elétricas e temperatura em simulações de transferência de calor. Dessa forma, é possível plotar gráficos, gerar imagens e fazer animações de forma extremamente fácil, se comparado à plotagem feita em algoritmo próprio do engenheiro responsável pela análise. Com isso, a interpretação dos dados do estudo se torna mais simples, como na figura 2.10, onde é mostrado duas imagens que exemplificam o pós-processamento, tomando como base uma

simulação estrutural realizada a partir da geometria da peça das imagens da figura 2.9 (KIM, SANKAR, 2008).

Figura 2.10 – Representação gráfica da etapa de pós-processamento de uma análise estrutural.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3 METODOLOGIA

Para a validação do modelo computacional implementado, foi realizado a comparação dos resultados numéricos, com os resultados experimentais presentes na literatura.

A literatura tomada como base para comparações, foi o artigo de Mansouri, H., Monshi, A. (2004), no qual é realizado um estudo microscópico e macroscópico em seções de um trilho ferroviário. As análises feitas nesse estudo, tiveram como objetivo principal, avaliar como é o comportamento da microestrutura de um trilho soldado pelo processo de soldagem por centelhamento. Outro objetivo foi de analisar as tensões residuais que surgem no trilho, devido às alterações termoestruturais que ocorrem durante o processo de soldagem por centelhamento. Para isso, o autor divulgou imagens que mostram o estado final de seções longitudinais do trilho após a soldagem, sendo possível identificar por meio da diferença de coloração ao longo da solda, quais foram os pontos mais afetados pelo calor gerado no processo. Dessa forma, essas imagens foram tomadas como base de comparação, já que o modelo computacional previa de forma aproximada quais pontos do trilho seriam mais atingidos pela geração de calor.

Para isso, procurou-se replicar as condições reais do ambiente, propriedades geométricas do trilho, estado de operação da máquina especificada no artigo, propriedades do material, entre outros importantes fatores que influenciam os resultados da geração de calor em um trilho submetido à soldagem por centelhamento.

Para atingir os objetivos inicialmente estabelecidos, uma metodologia preliminar foi escolhida para se seguir, e à medida que era necessário, foram sendo realizadas mudanças nessa metodologia, de forma a contornar os problemas que surgiram ao longo do trabalho, e assim concluir os objetivos. O primeiro passo do estudo, foi a construção do modelo numérico computacional do processo de soldagem por centelhamento, abrangendo todas as etapas do método. Para isso, várias bibliografias foram escolhidas para servirem de base, e assim se obter a aptidão para iniciar a construção do modelo. Como alguns empecilhos surgiram durante desenvolvimento do modelo, é possível realizar a descrição das dificuldades encontradas, e a solução para os problemas em cada caso, para que fosse possível encontrar uma forma de modelar o problema da melhor maneira possível. Essa descrição será muito útil, principalmente para os próximos trabalhos envolvendo simulação numérica do processo de soldagem por centelhamento, que serão continuidade deste trabalho. Tal histórico é detalhado na subseção que segue.

3.1 Histórico de desenvolvimento

À princípio, optou-se por realizar a tentativa de confeccionar um modelo numérico que representasse todo o procedimento. Dessa forma, foi escolhido o software ABAQUS para que o processo fosse simulado. Ao iniciar os testes, que começaram pela etapa de recalque,

constatou-se que era necessário ter previamente os dados da distribuição de temperatura gerada pelo centelhamento, de forma que toda a deformação causada pelo recalque tivessem valores corretos, já que a propriedade do material diz que a deformação causada, é diretamente dependente da temperatura, principalmente em altas temperaturas, como é o caso da soldagem. Essa necessidade foi identificada principalmente pela divergência que o modelo inicial demonstrava quando era comparado com o experimento prático, que serviria como base de comparação. Identificou-se que este problema se dava pela utilização de uma geração de calor constante que foi configurada na face de contato, simulando o aquecimento, o que geralmente era realizado nas referências bibliográficas encontradas envolvendo a simulação numérica do processo de soldagem por centelhamento.

Dessa forma, optou-se por realizar a simulação do processo de aquecimento por centelhamento, de modo a obter o campo de temperatura final e assim tornar possível uma futura simulação da etapa de recalque da forma correta, representando da melhor forma possível o que ocorre na realidade. Foram implementados alguns modelos preliminares envolvendo a geração de calor devido ao aquecimento por efeito Joule, porém os resultados estavam com enormes diferenças quando comparado com os resultados experimentais. Pela suposição de que o problema estava sendo gerado na parte elétrica do modelo, decidiu-se por estudar mais a fundo esta etapa para posteriormente acoplá-la novamente à etapa térmica.

Devido a algumas limitações do ABAQUS no que diz respeito a simulações elétricas, outro software foi procurado para que as análises fossem realizadas, e depois de várias pesquisas, foi adotado outro software para a estudo. Durante os testes, onde se utilizava corrente contínua, foi possível identificar por meio de algumas bibliografias, que os erros se davam devido ao experimento prático ter sido realizado em campo, no qual era utilizado a corrente alternada. Notou-se que essa diferença de campo de temperatura acontecia devido aos efeitos do fenômeno efeito pelicular, que age de forma a tender que a corrente flua pelas bordas, e dessa forma, promove um maior aquecimento por efeito Joule nessas regiões, que também ocorria no experimento prático.

Como o efeito pelicular ocorre pela variação do campo magnético no tempo devido à variação de corrente, identificou-se a necessidade de se adicionar uma nova física ao trabalho, a física de magnetismo. Assim foi implementado um modelo que considerava a distribuição de corrente na seção do trilho, no domínio da frequência, considerando a corrente alternada do experimento. Dessa forma um modelo numérico mais robusto e preciso foi construído, como é possível visualizar nas seções que seguem.

3.2 Validação do método computacional com o experimental

3.2.1 Condições de operação da máquina

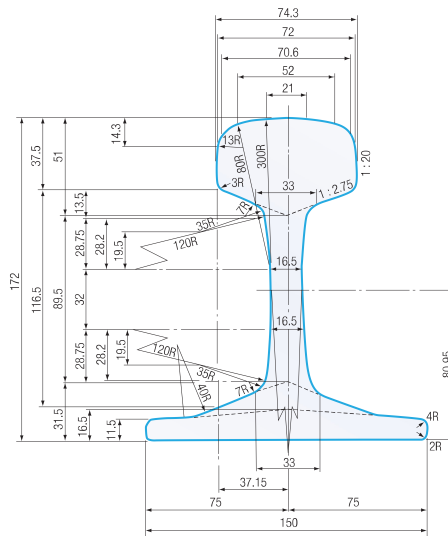
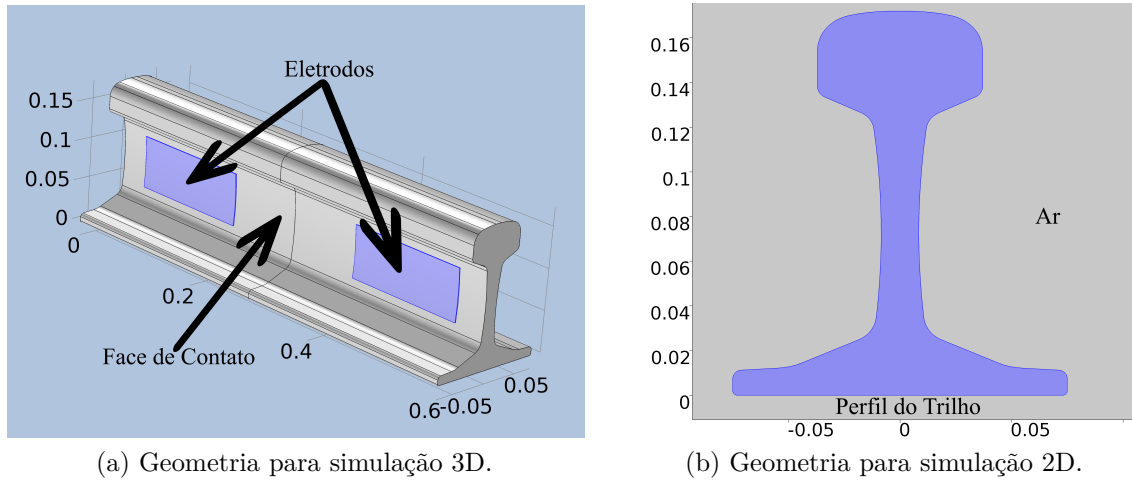
Como foi utilizado uma referência bibliográfica como base de comparação para o modelo computacional confeccionado, foi necessário conhecer as condições de operação no momento em que a solda foi realizada, principalmente no que diz respeito à máquina usada no processo. Dessa forma encontrou-se que o equipamento utilizado foi a K355, que é uma máquina de soldagem por centelhamento, especializada em soldagem de trilhos ferroviários em campo. Essa máquina opera à uma frequência de alimentação de $50Hz$, no qual sua potência máxima é de $150kVA$, para uma corrente total variando entre $395A$ e $20000A$. A tensão utilizada é transformada por um transformador, com primário que varia entre $340V$ a $380V$, podendo ser ajustado, e secundário de aproximadamente $6V$. O tempo exato de centelhamento não foi especificado na bibliografia encontrada para esta máquina, porém de acordo com o gráfico da figura 2.4, que se refere à outra máquina utilizada para o mesmo fim, o tempo de centelhamento intenso é de aproximadamente $20s$. As condições ambientes foram definidas em valores comuns, onde a pressão atmosférica foi de $1atm$, e a temperatura de $20^{\circ}C$.

3.2.2 Geometria e malha

Para a realização das simulações, foram utilizados basicamente duas geometrias, uma para a simulação em 2D, e outra para as simulações em 3D. No caso das simulações em 3D, foi modelado as partes a serem soldadas, e os eletrodos posicionados em seus respectivos locais, referentes ao posicionamento adotado pela máquina utilizada no experimento prático de Mansouri, H., Monshi, A. (2004). Para a simulação em 2D, foi modelado o perfil do trilho, bem como um grande círculo ao redor da seção, com raio de $1m$, representando o domínio do ar, que deve ser considerado na análise de campo magnético. Os dados referentes às medidas da geometria do perfil do trilho foram obtidos a partir das dimensões padrões para o tipo de trilho utilizado no experimento prático, referenciado como *International Union of Railway 60* (UIC-60), retirado do catálogo de um fabricante (JFE CORPORATION, 2017), como é apresentado na figura 3.1, bem como as geometrias utilizadas nas simulações. Para a modelagem 3D, cada trilho possui $300mm$ de comprimento, e a distância média entre os eletrodos é de $360mm$.

Partindo da geometria previamente confeccionada, foi realizado a geração da malha. A malha foi configurada de forma que os pontos nos quais eram de maior interesse, tivessem uma maior densidade de nós, de modo a obter resultados mais precisos. O tipo de malha utilizado foi a malha tetraédrica no modelo 3D, e triangular no 2D. Como resultado, a malha para o modelo 3D teve 16737 elementos, e a malha 2D, teve 8814 elementos. Na figura 3.2, é apresentado como ficou a malha final da geometria dos modelos.

Figura 3.1 – Propriedades geométricas do trilho UIC-60.



(c) Medidas para o trilho UIC-60.

3.2.3 Propriedades dos materiais

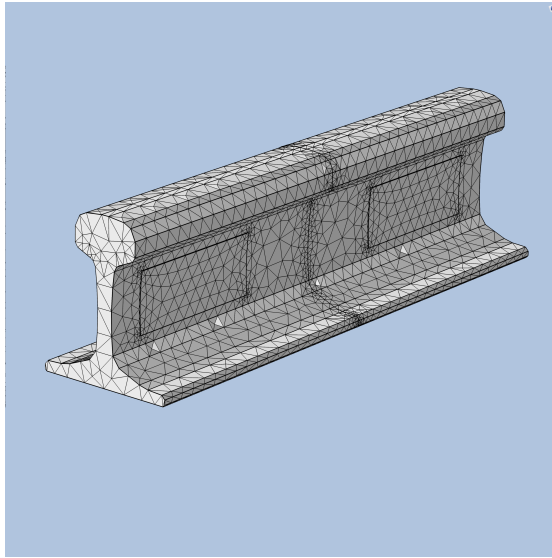
Os materiais utilizados na análise foram o ar que envolve os trilhos, o cobre que compõe os eletrodos, e o aço de alto carbono, que constitui os trilhos. Em cada etapa da simulação, foram usadas algumas das propriedades referentes a(s) física(s) analisada(s) em cada um. O aço que constitui o trilho, que é objeto de maior interesse, possui a composição química detalhada na tabela 3.1, que foi tomada como base para a escolha de suas propriedades físicas.

Tabela 3.1 – Composição química do aço do trilho.

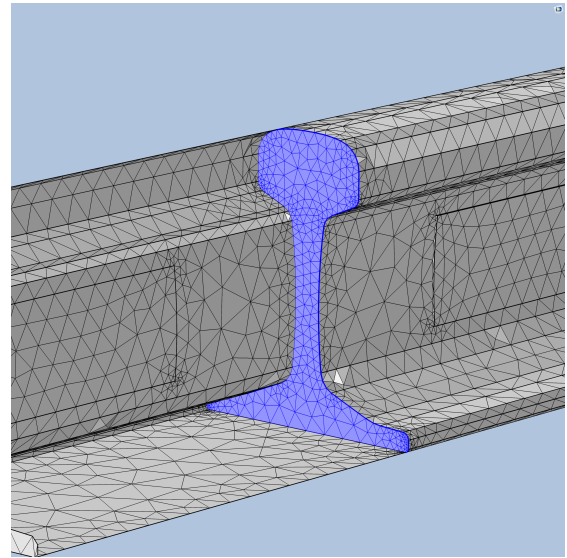
C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni
0.59	1.09	0.27	0.01	0.008	0.02	0.01

As propriedades dos materiais utilizados nos estudos foram obtidas de Matweb (2017), no qual o aço escolhido que mais se aproximava das propriedades químicas es-

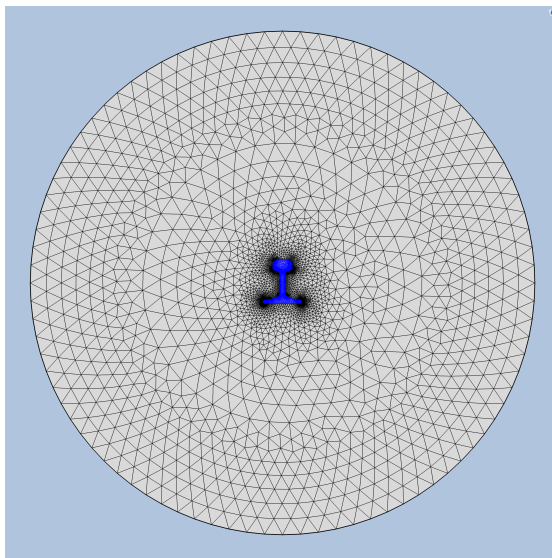
Figura 3.2 – Malhas geradas para as análises.



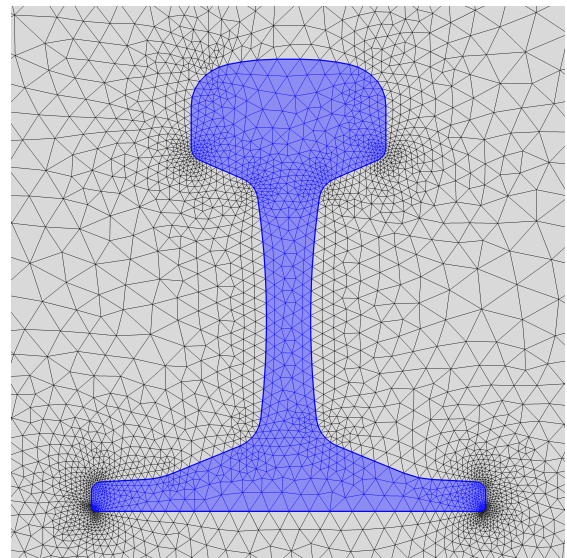
(a) Malha 3D.



(b) Malha 3D com zoom na junta de solda.



(c) Malha 2D.



(d) Malha 2D com zoom no perfil do trilho.

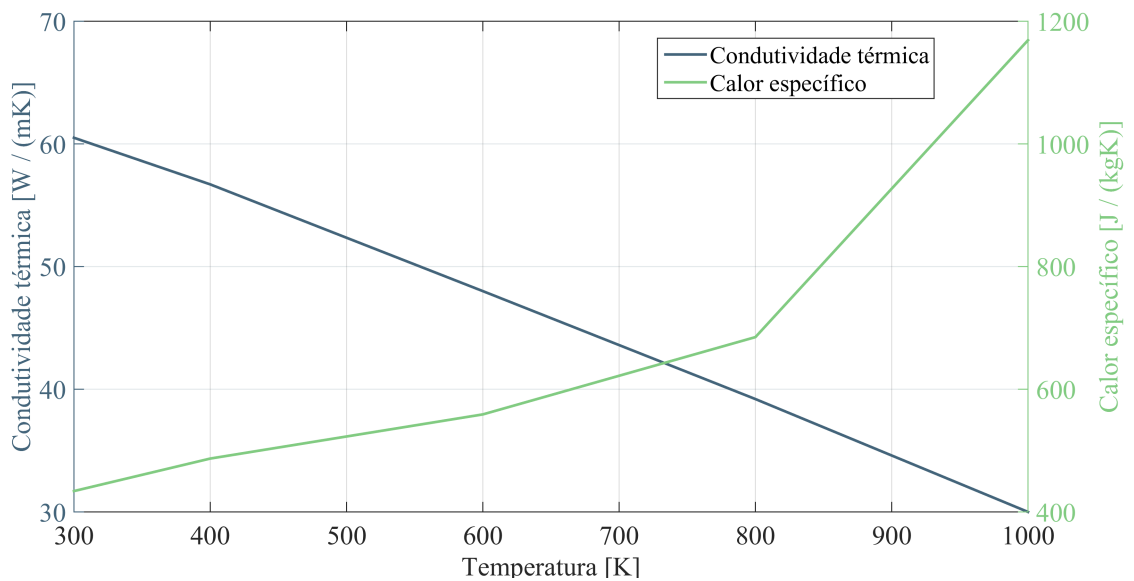
pecificadas, foi o aço *American Iron and Steel Institute 1070* (AISI-1070). Devido à enorme dificuldade em encontrar a propriedade de permeabilidade magnética para o aço inicialmente escolhido, optou-se por utilizar tal propriedade referente ao aço mais próximo, no que se refere à sua composição química, aderindo ao aço *American Society for Testing and Materials A536* (ASTM A536) para se adotar tal propriedade. As propriedades básicas para as análises são apresentadas na tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Propriedades dos materiais das análises.

	$\sigma[S/m]$	ϵ_r	μ_r	$\rho_{dens}[kg/m^3]$	$k[W/(mK)]$	$C_p[J/(kgK)]$
Aço	4,348 E6	1	550	7870,0	$k(T)$	$C_p(T)$
Cobre	5,998 E7	1	1	8700,0	400,00	385
Ar	0	1	1	1,2	0,03	993

Da mesma forma, foi necessário encontrar as propriedades térmicas do aço, de condutividade k e calor específico à pressão constante C_p , quando existe variação de temperatura, já que esta propriedade possui grande influência nos resultados finais. Tais informações puderam ser obtidas de Incropera et al. (2008), e são apresentadas pelo gráfico da figura 3.3 gerado com estes dados, no qual todas as interpolações da simulação foram realizadas de forma linear.

Figura 3.3 – Gráfico de propriedades em função da temperatura.



3.2.4 Etapas das análises

Após ser encontradas novas possibilidades para a implementação do modelo numérico, devido aos empecilhos descritos no histórico de desenvolvimento, um modelo final foi criado. A simulação como um todo foi dividida em 4 análises: um estudo elétrico estacionário em 3D; uma análise magnética em 2D no domínio da frequência; um estudo termoelétrico em 3D no domínio do tempo, e uma análise térmica final em 3D no domínio do tempo. Cada etapa será melhor detalhada nas subseções que seguem.

3.2.4.1 Análise elétrica inicial

A primeira análise realizada, foi uma simulação elétrica estacionária, que teve como objetivo principal, obter a resposta da densidade de corrente que atravessa a seção transversal da junta soldada. Dessa forma, foi aplicado um potencial elétrico de $0V$ nos eletrodos da esquerda, e um potencial de $6V$ nos eletrodos da direita. O potencial elétrico inicial de todo o modelo foi estabelecido como $0V$, e a temperatura inicial de $293,15K$. Todas as faces externas dos componentes foram ajustadas como isolantes elétricos como é mostrado pela equação 3.1, e as equações que regem o comportamento dos elementos são as equações 3.2 e 3.3.

$$\vec{n} \cdot J = 0 \quad (3.1)$$

$$J = \sigma \cdot E + J_e \quad (3.2)$$

$$E = -\Delta V \quad (3.3)$$

Na face de contato entre os trilhos, foi realizado a configuração da resistência de contato. Como a máquina trabalha com corrente de até $20000A$, optou-se por definir em $15000A$, um valor adequado para que a simulação fosse realizada. Dessa forma, foi ajustado o valor da resistência de contato $h_{contato}$, até que a corrente total que flui na seção do trilho chegasse à um valor bem próximo do escolhido, sendo esta verificado por uma integral de superfície que calcula a corrente total na seção da junta a cada teste. Dessa forma, ao final tínhamos a corrente certa, e a correta resistência de contato entre os trilhos, que é um dos principais causadores do aquecimento durante o processo de soldagem por centelhamento, e é representada pela equação 3.4. Logo, o valor final para a resistência de contato encontrada, e utilizada nas etapas seguintes foi de $3,25S/m^2$.

$$\vec{n} \cdot J = h_{contato} \cdot (V_0 - V_1) \quad (3.4)$$

3.2.4.2 Análise magnética

O segundo estudo realizado foi a análise magnética no domínio da frequência. Devido a alguns impedimentos, a melhor forma encontrada para realizar este estudo foi em duas dimensões. Logo, como foi mostrado, a geometria do perfil do trilho, representando a seção da junta soldada, que é a parte mais importante de todo o estudo, foi objeto da análise magnética. Durante os primeiros testes, notou-se que era necessário considerar o ar que envolve a seção do trilho, para que os resultados ficassem mais precisos, logo este também foi considerado na simulação.

As condições para a simulação do modelo foram basicamente a configuração de uma corrente atravessando a seção do trilho no eixo Z; tal corrente que foi o resultado da análise elétrica inicial, ou seja, com valor total de aproximadamente $15000A$. O tipo de análise escolhido foi no domínio da frequência, já que a máquina utilizada no experimento prático opera com corrente alternada de $50Hz$. O objetivo principal dessa análise foi encontrar a redistribuição da corrente inicial, que ocorre devido aos efeitos magnéticos que causam o efeito pelicular, de modo que esse resultado pudesse ser utilizado na análise final. Para isso, a redistribuição da corrente encontrada, foi exportada no formato de um arquivo de texto, que continha todos os valores de corrente para cada ponto da seção da junta soldada do trilho. Segundo a lei de Ampère, as equações que governam o magnetismo na análise, são as equações 3.5, 3.6, 3.7 e 3.8.

$$\Delta \times H = J \quad (3.5)$$

$$B = \Delta \times A \quad (3.6)$$

$$E = -J\omega A \quad (3.7)$$

$$J = \sigma \cdot E + j\omega D \quad (3.8)$$

As bordas externas do círculo que representa o ar recebeu a propriedade de isolamento magnético, como é mostrado na fórmula 3.9.

$$n \times A = 0 \quad (3.9)$$

3.2.4.3 Análise termoelétrica

A terceira parte da simulação, foi a análise termoelétrica em 3D. Nesse estágio, a primeira etapa foi novamente realizada, porém com a adição da física de transferência de calor acoplado à física elétrica. O objetivo final dessa análise, foi encontrar a distribuição de energia produzida em todo o trilho, por efeito Joule, principalmente na junta soldada, que teve as configurações de resistência de contato, definidas na primeira etapa.

Além das condições configuradas na primeira análise referente ao estudo elétrico, foi implementado o acoplamento entre as físicas térmica e elétrica. O tipo de estudo escolhido foi no domínio do tempo. Dessa forma, o tempo de análise foi de 1 segundo em passos de $0,1s$, sendo possível encontrar a energia total gerada por efeito Joule, e conseqüentemente a potência, já que potência é a quantidade de energia total gerada a cada 1 segundo de

tempo decorrido. As equações que regem o estudo térmico, são as equações 3.10 e 3.11, e a temperatura inicial de todo o corpo do trilho foi de $293,15K$.

$$\rho C_p \frac{\delta T}{\delta t} + \rho C_p u \cdot \Delta T + \Delta \cdot (k \Delta T) = Q_e \quad (3.10)$$

$$Q_e = J \cdot E \quad (3.11)$$

As faces externas do modelo foram dotadas de um isolamento térmico, como é apresentado na equação 3.12.

$$-n \cdot q = 0 \quad (3.12)$$

3.2.4.4 Análise térmica final

Após todas as análises preliminares serem feitas, o último estudo foi realizado unindo todos os dados obtidos anteriormente, para um estudo no domínio do tempo, no qual o tempo decorrido na simulação foi de 20 segundos, tempo normal de centelhamento neste tipo de soldagem. O objetivo dessa análise foi a geração do campo de temperatura final, resultante do efeito Joule, que possui grande concentração na região da junta soldada, considerando a distribuição de corrente causada pelo efeito pelicular. Para isso, chegou-se à uma fórmula que correlaciona a potência final de geração de calor com a nova corrente distribuída.

Os dados de saída da terceira análise, referentes à energia total gerada durante um segundo, ou seja a potência, foi dado em função da massa. Como só é possível dar como entrada de potência ao longo do corpo do trilho, a potência em função do volume, uma conversão foi necessária para dar continuidade no estudo. Considerou-se que a energia total E_{tot} no volume Vol do trilho, fosse igual a energia total na massa m . Assim, a potência total no volume $P_{Tot,vol}$, também é igual a potência total na massa $P_{Tot,mas}$, chegando às equações seguintes.

$$P_{Tot,vol} = \frac{P_{Tot}}{Vol} \Rightarrow P_{Tot} = P_{Tot,vol} \cdot Vol \quad (3.13)$$

$$P_{Tot,mas} = \frac{P_{Tot}}{m} \Rightarrow P_{Tot} = P_{Tot,mas} \cdot m \quad (3.14)$$

Unindo as equações 3.13 e 3.14, chegamos à equação 3.15:

$$P_{Tot,vol} \cdot Vol = P_{Tot,mas} \cdot m \Rightarrow P_{Tot,vol} = \frac{P_{Tot,mas} \cdot m}{Vol} \quad (3.15)$$

Como $m/Vol = \rho_{dens}$, podemos substituir na equação 3.15, chegando à equação 3.15, que representa a potência volumétrica em função da potência mássica obtida da terceira análise:

$$P_{Tot,vol} = P_{Tot,mas} \cdot \rho_{dens} \quad (3.16)$$

Tendo definido a equação de geração de potência volumétrica total para o caso da terceira análise, que foi feita em corrente contínua, foi possível realizar outra manipulação da equação de potência, para ajustar seu resultado para o caso de corrente alternada, que possui a redistribuição de corrente obtida na análise magnética.

Como a corrente obtida no estudo elétrico inicial foi utilizada como entrada na análise magnética, a corrente elétrica total que atravessa a seção transversal do trilho em forma de corrente contínua, é exatamente igual à corrente total que flui em corrente alternada, diferenciando somente pela distribuição ao longo da seção.

$$I_{Tot,cont} = I_{Tot,alter} \Rightarrow \frac{I_{Tot,alter}}{I_{Tot,cont}} = 1 \quad (3.17)$$

Considerando que a potência total gerada por efeito Joule, pode ser aproximada pela equação 3.18, e que a corrente total alternada é igual à contínua, pode-se realizar a seguinte operação:

$$P = V \cdot I \Rightarrow P_{Tot} = V \cdot I_{Tot,cont} = V \cdot I_{Tot,cont} \cdot \frac{I_{Tot,alter}}{I_{Tot,cont}} \quad (3.18)$$

Assim, é possível visualizar que quando se multiplica a potência pela corrente alternada, e divide pela contínua, a fração de corrente contínua é retirada da equação, restando a multiplicação pela corrente alternada. Fornecendo à potência, a distribuição de geração de calor de acordo com a distribuição de corrente alternada, mantendo a energia total gerada constante, já que a corrente total que flui em corrente contínua possui o mesmo valor total da corrente alternada, se diferenciando somente na distribuição ao longo da seção. A equação final de potência volumétrica distribuída devido ao efeito Joule causado pela corrente alternada sob as consequências do efeito pelicular, toma a forma da equação 3.19, onde ρ_{dens} e $I_{Tot,cont}$ podem ser considerados constantes, e $I_{Tot,alter}$ e $P_{Tot,mas}$,

são distribuídas ao longo do trilho, de forma tridimensional, encontrados na segunda e terceira análises respectivamente.

$$P_{Tot,vol} = P_{Tot,mas} \cdot \rho_{dens} \cdot \frac{I_{Tot,alter}}{I_{Tot,cont}} \quad (3.19)$$

Para completar a análise térmica final, foi implementado a perda de calor por convecção e por radiação térmica em todas as faces externas das partes, de forma que o modelo representasse da melhor forma possível a realidade. Para a convecção térmica foi utilizado a equação 3.20, e para a radiação, foi usado a equação 3.21. Em ambos os casos, a cada passo de tempo que a simulação foi realizada, os valores de temperatura foram atualizados. A temperatura ambiente adotada foi de $293.15K$, o coeficiente de convecção h , foi de $30W/(m^2K)$, que é um valor comum para o aço sujeito à convecção natural, e a emissividade térmica selecionada, 0.8, que segundo Incropera et al. (2008) também é um valor comum para a superfície do aço que compõe o trilho.

$$q''_{conv} = h(T_s - T_\infty) \quad (3.20)$$

$$q''_{rad} = \epsilon\sigma(T_s^4 - T_{viz}^4) \quad (3.21)$$

Após o último estudo ser realizado, foi gerado o campo de temperatura no trilho resultante do calor por efeito Joule. Assim foi possível dar continuidade ao trabalho e realizar a comparação dos resultados numéricos com os experimentais presentes em Mansouri, H., Monshi, A. (2004).

3.2.4.5 Variação da frequência

Outra parte do trabalho teve a intenção de analisar como se dá a distribuição de corrente na seção do trilho, de acordo com várias frequências de alimentação distintas. Para isso, a análise magnética em duas dimensões no domínio da frequência, foi novamente implementado, porém o estudo foi repetido para as frequências de $5Hz$, $25Hz$, $50Hz$, $500Hz$ e $5000Hz$. Assim foi possível identificar o comportamento da corrente em cada caso, e como a distribuição de corrente é o fator determinante para a determinação da distribuição de aquecimento por efeito Joule, é possível prever o aquecimento em cada condição de operação, e assim elaborar possíveis futuras otimizações para o processo de soldagem por centelhamento. Um gráfico analisando diferentes pontos da seção para cada frequência foi gerado, auxiliando a compreensão dos resultados. Foi comparado também as zonas termicamente afetadas do modelo computacional com o prático, de forma a tentar validar de outra forma o modelo numérico implementado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

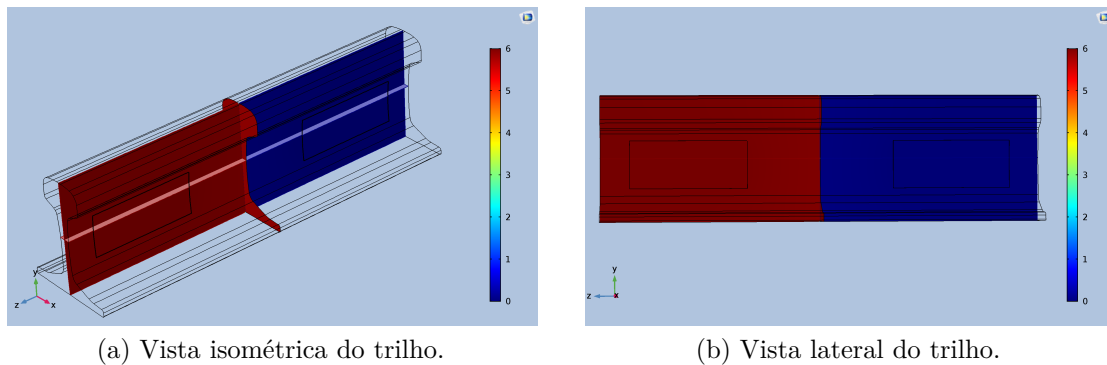
De acordo com a metodologia utilizada, vários resultados puderam ser obtidos com as análises realizadas. Os resultados foram divididos em partes principais, de acordo com as necessidades do estudo:

- Validação e comparação do método computacional com o experimental;
- Análise da Zona Termicamente Afetada.
- Variação da frequência da corrente;

4.1 Validação e comparação do método computacional com o experimental

Para as condições de trabalho da máquina de soldagem por centelhamento utilizada no experimento de Mansouri, H., Monshi, A. (2004), o primeiro resultado encontrado foi a distribuição do campo de potencial elétrico ao longo do trilho a partir do potencial aplicado inicialmente através dos eletrodos, como é apresentado na figura 4.1.

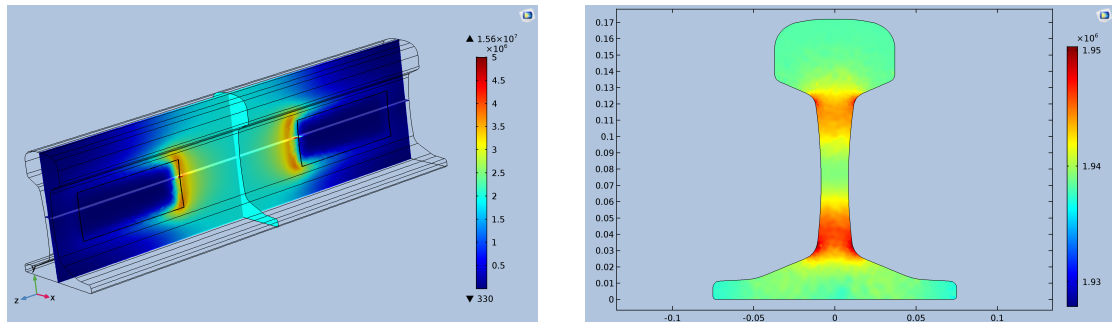
Figura 4.1 – Diagrama de potencial elétrico V no trilho.



O segundo resultado encontrado, foi a distribuição de corrente ao longo do trilho e da seção transversal da junta, mostrado na figura 4.2, ainda considerando o caso de corrente contínua.

Como é mostrado na figura 4.3, o primeiro resultado da segunda análise, foi a distribuição do campo magnético na seção transversal da junta soldada.

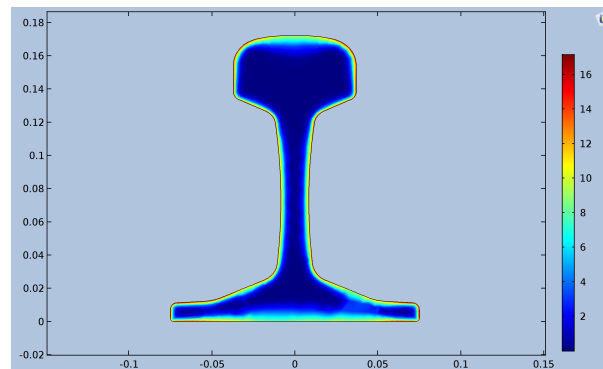
Figura 4.2 – Diagrama de distribuição de corrente A/m^2 inicial.



(a) Vista isométrica do trilho.

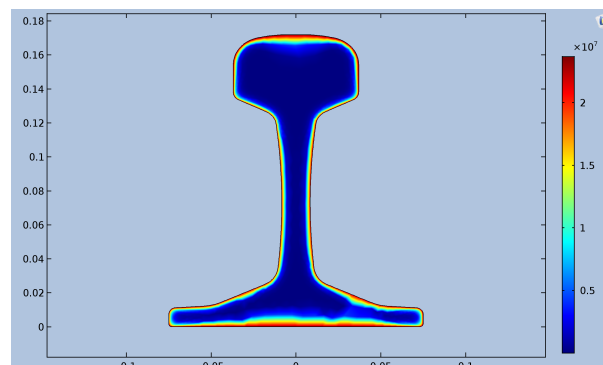
(b) Vista do corte da seção transversal da junta.

Figura 4.3 – Diagrama de campo magnético T na seção do trilho.



Partindo da simulação magnética em função da frequência, foi possível plotar o gráfico da nova distribuição de corrente ao longo do trilho devido às consequências do efeito pelicular. Tal resultado é exibido na figura 4.4.

Figura 4.4 – Diagrama da redistribuição da densidade de corrente A/m^2 fluente na seção do trilho.



Partindo dos resultados até aqui apresentados, é possível identificar que o efeito pelicular possui uma alta influência na distribuição da densidade de corrente na seção transversal do trilho, mesmo submetido a uma frequência consideravelmente baixa. A princípio, isso parecia ser um erro na análise, pois a teoria previa que uma distribuição de corrente com tantas diferenças de valores de um ponto para o outro, só aconteceria

em frequências da ordem dos *kiloHertz* ou *MegaHertz*. Apesar de a teoria deixar bem claro como acontece o efeito pelicular para materiais geralmente utilizados como condutores elétricos, logo possuindo mais estudos acerca deles, para materiais ferrosos o mesmo não acontece, e existe poucas bibliografias que abordam o efeito pelicular nesses materiais quando utilizados como condutores de eletricidade. Dessa forma, verificou-se que o fenômeno de a corrente tender a fluir com muita intensidade pelas bordas, aconteceu devido ao trilho ser composto por aço, que é um material ferromagnético, e possui os efeitos magnéticos extremamente intensificados quando comparamos com materiais não ferromagnéticos como cobre e alumínio às mesmas condições de operação.

Além disso, identificou-se que na análise inicial da distribuição do potencial elétrico, existe uma concentração grande de potencial elétrico em cada trilho, um trilho com uma média de potencial alta, enquanto outro possui baixa média geral de potencial, o que demonstra o grande efeito de isolamento elétrico que o contato de união dos trilhos possui, acarretando na diminuição do valor da corrente total que atravessa o trilho, e consequentemente diminui o valor da densidade de corrente em cada ponto da seção transversal. Esta região também deve ser a de maior aquecimento por efeito Joule, já que é onde se concentra a maior resistência à passagem de corrente elétrica.

Como descrito na metodologia, parte do trabalho foi realizada com o intuito de compará-lo à resultados experimentais para a validação do modelo. Dessa forma as figuras 4.5, 4.6, 4.7, e 4.8, comparam os resultados experimentais presentes em Mansouri, H., Monshi, A. (2004), com os resultados de campo de temperatura em torno da zona de fusão de metal durante a soldagem, obtidos com a simulação computacional.

A partir das resultados da comparação entre o experimento prático e o numérico, é possível identificar que existe uma grande proximidade dos resultados entre ambos. Nas imagens experimentais, vemos que as áreas mais escuras, que foram as mais atingidas pelo aquecimento durante a soldagem, possuem formas bem parecidas com as obtidas pela simulação numérica. Assim, visualiza-se que o modelo representou bem o que acontece na realidade, mesmo que de forma aproximada. É possível visualizar que o aquecimento se dá de forma mais intensa à medida que nos aproximamos das bordas do trilho, o que é esperado, pois como nessa área temos uma maior concentração de corrente fluindo, é natural que também haja maiores consequências do efeito Joule que depende diretamente da corrente.

Na figura 4.5, verificou-se que em ambos os casos, existe duas regiões de menor aquecimento, uma localizada na parte central do boleto e outra no centro do patim. Dessa forma, vemos que mesmo essas duas áreas sendo mais próximas das extremidades superior e inferior da seção do trilho em comparação com a alma, possuem menor aquecimento. Porém como a alma é estreita, ela está como um todo mais próxima da laterais direita e esquerda do trilho, além de possuir menor massa ao seu entorno, podendo ser um fator

Figura 4.5 – Resultados experimentais de Mansouri, H., Monshi, A. (2004), e numéricos de temperatura K para o corte longitudinal do trilho.

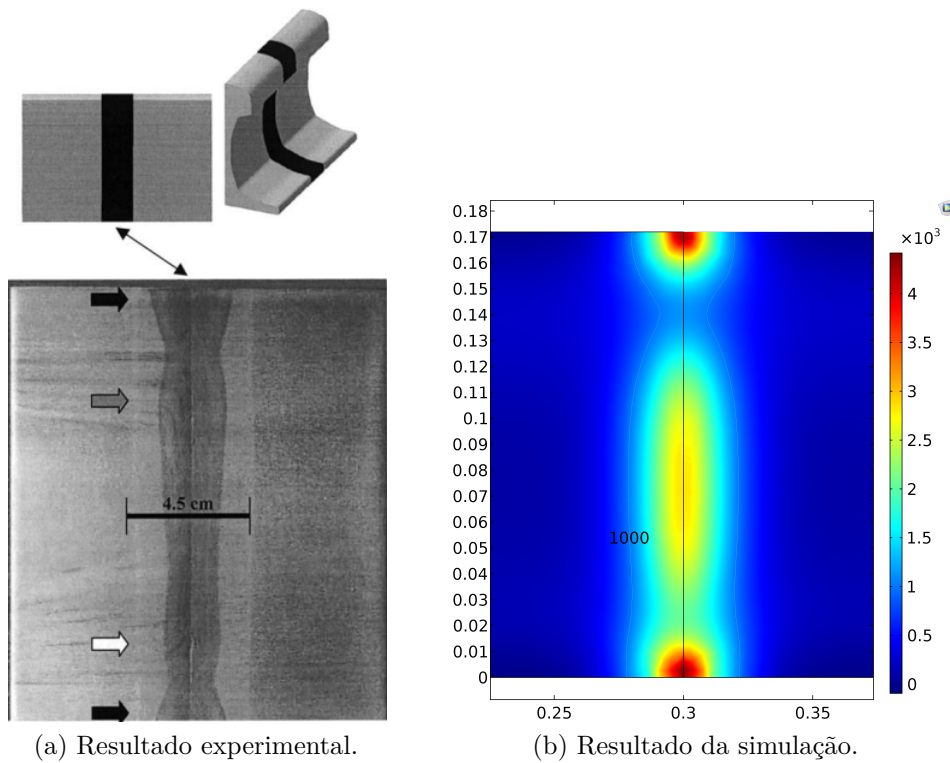
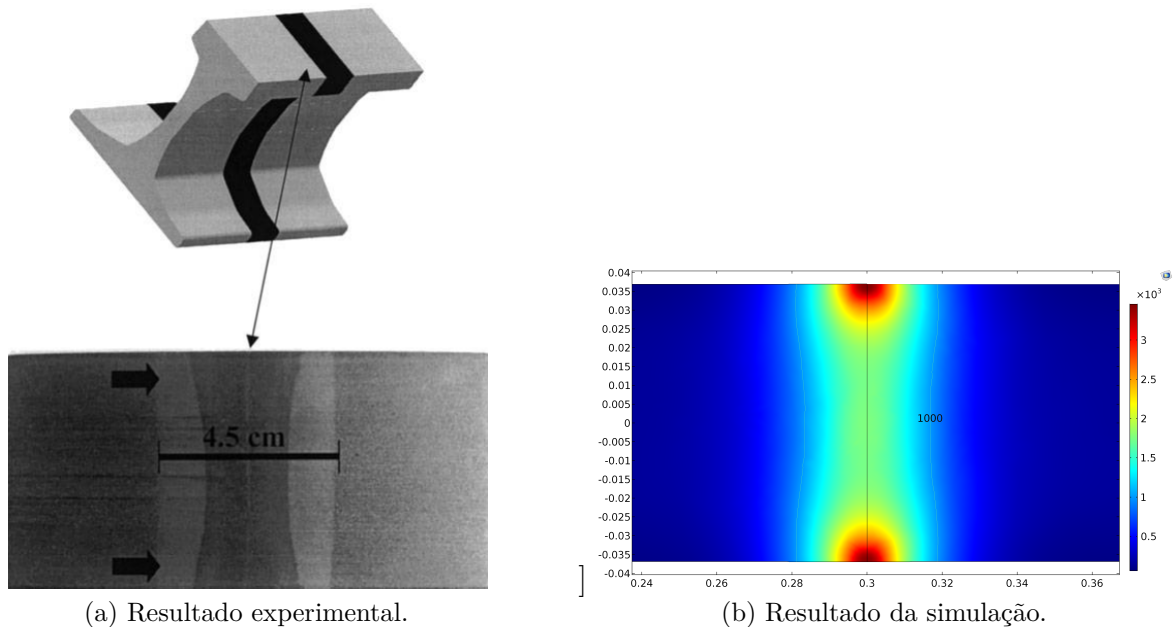


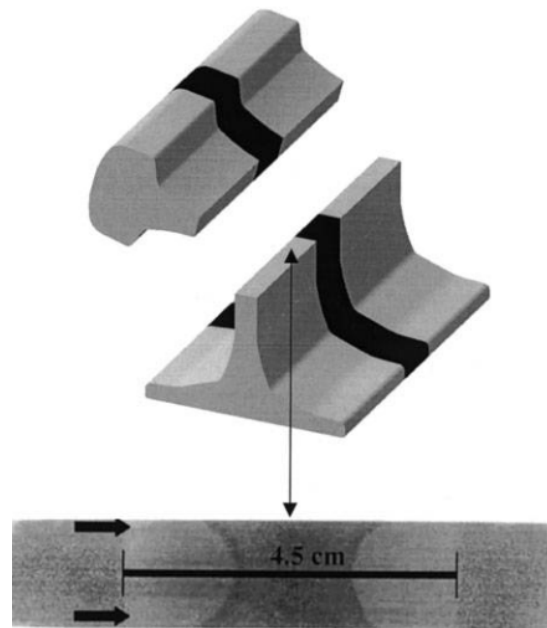
Figura 4.6 – Resultados experimentais de Mansouri, H., Monshi, A. (2004), e numéricos de temperatura K para o corte longitudinal do boleto.



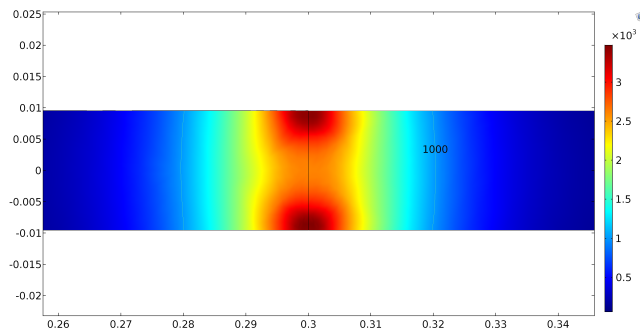
que influenciou muito tanto no resultado experimental quanto no numérico.

Quando se analisa os valores de temperatura obtidos ao final, nota-se que principalmente em pontos próximos à junta de solda, existem temperaturas muito altas, inclusive mais elevadas que a própria temperatura de fusão do material. Acredita-se, que esse fato

Figura 4.7 – Resultados experimentais de Mansouri, H., Monshi, A. (2004), e numéricos de temperatura K para o corte longitudinal da alma.



(a) Resultado experimental.



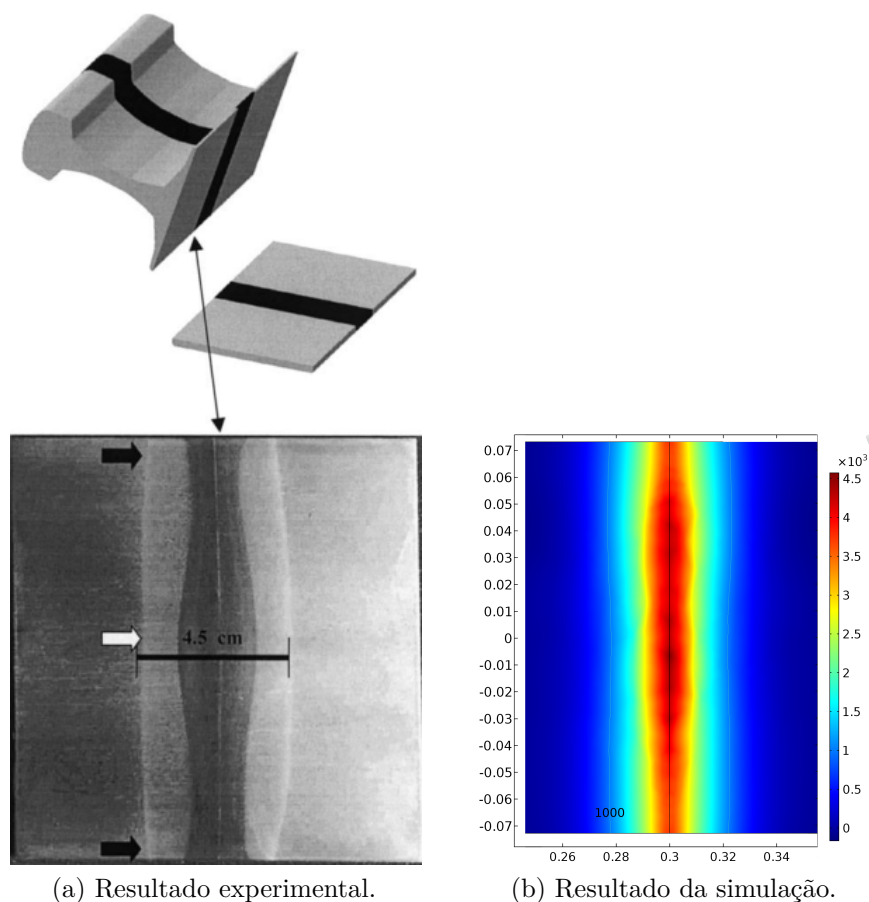
(b) Resultado da simulação.

ocorreu devido às limitações do modelo numérico que não representam com toda fidelidade o que acontece da realidade, no que diz respeito à mudança de fase. Um fator que pode ter influenciado muito é o fenômeno de calor latente de fusão, no qual é absorvido uma enorme quantidade de energia sem que a temperatura do material mude, permanecendo no valor de fusão. Caso esse fenômeno seja implementado em um trabalho futuro, provavelmente as temperaturas encontradas com este estudo, principalmente as mais altas cairão consideravelmente, se aproximando mais do que acontece na realidade. Além desse, outros fatores também devem ser levados em consideração, o que sempre tenderá a se aproximar de um modelo computacional cada vez mais preciso.

4.2 Zona Termicamente Afetada

Com os resultados encontrados, foi possível visualizar como é o comportamento da zona termicamente afetada durante a soldagem por centelhamento. Comparando os

Figura 4.8 – Resultados experimentais de Mansouri, H., Monshi, A. (2004), e numéricos de temperatura K para o corte longitudinal do patim.

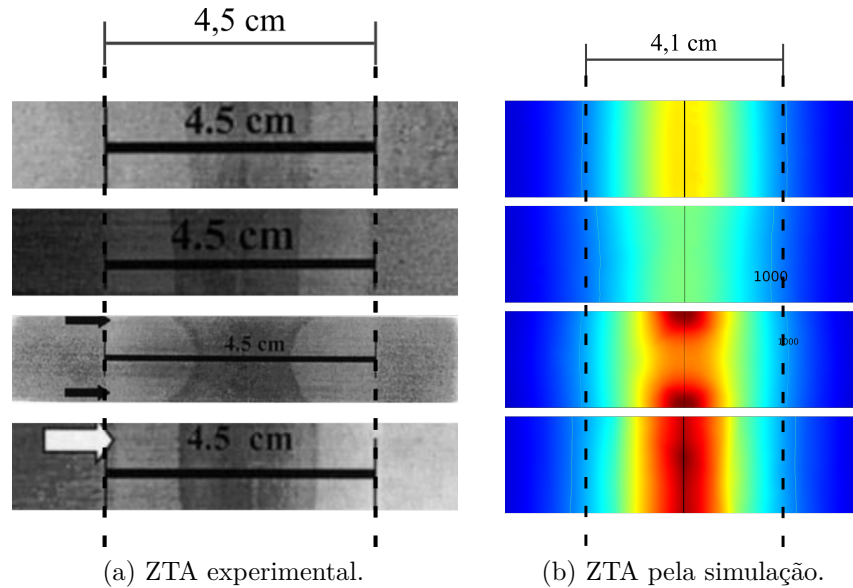


resultados, identificou-se no experimento de Mansouri, H., Monshi, A. (2004) que a ZTA teve uma extensão total de aproximadamente $4,5\text{cm}$, que é a extensão no qual é delimitada por uma grande diferença de coloração, formando uma linha de divisão, entre a ZTA, e o material do trilho pouco afetado pela geração de calor. Da mesma forma, analisando os resultados da simulação, verifica-se também, que existe uma linha de 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, que se inicia a partir de pontos que tiveram um aquecimento acima de aproximadamente 1000K .

A figura 4.9, compara as imagens geradas, e demonstra a ZTA em todos os casos. As figuras foram organizadas na mesma ordem em que foram apresentadas nas figuras 4.5, 4.6, 4.7, e 4.8, tanto no que diz respeito aos resultados experimentais, quanto nos numéricos.

Pelas figuras, vemos que os resultados numéricos apresentam uma extensão de aproximadamente $4,1\text{cm}$, valor bem próximo da ZTA experimental.

Figura 4.9 – Resultados experimentais de Mansouri, H., Monshi, A. (2004), e numéricos de temperatura K para a ZTA.



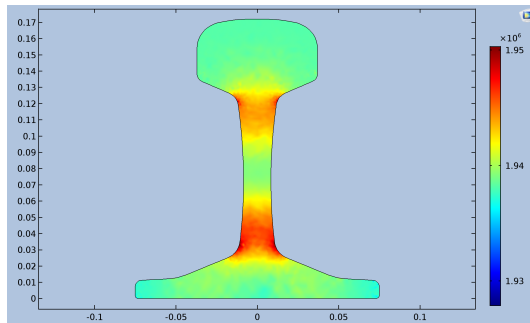
4.3 Variação da frequência da corrente

Como descrito na metodologia, foram realizadas simulações variando a frequência da corrente elétrica, no intuito de entender melhor o comportamento da corrente na seção transversal do trilho devido ao efeito pelicular. Tais imagens são mostradas na figura 4.10.

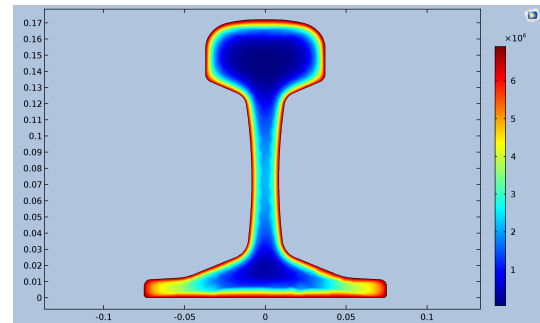
Notou-se que em corrente contínua como era esperado da teoria, a densidade de corrente possuiu valores próximos em diferentes pontos da seção, e com o aumento da frequência de excitação, mais intensificado é o efeito pelicular, ou seja, quanto maior a frequência, maior a concentração de corrente que tende a fluir pelas bordas do trilho, e aparentemente menor é a influência da posição do eletrodo na distribuição de corrente. Mesmo na baixa frequência de $5Hz$ já se nota uma considerável diferença na distribuição de corrente, enquanto que de $25Hz$ para $500Hz$, a diferença é menos nítida, tomando uma distribuição diferente na frequência de $5000Hz$, onde se tem uma alta concentração em certos pontos do perfil.

O gráfico da figura 4.11.b, foi gerado com o intuito de permitir a análise gráfica de como é a variação da densidade de corrente na seção da junta, variando a frequência, em cada um dos pontos destacados na figura 4.11.a. Tais pontos foram posicionados em regiões estratégicas, no qual os pontos 1, 2, 6 e 7 estão à $1mm$ de distância das bordas. Por meio desse gráfico fica nítido a diferença de comportamento da densidade de corrente em cada ponto do trilho. Nos pontos 1, 2, 6 e 7, encontra-se as maiores concentrações de corrente para qualquer frequência analisada, porém em altas frequências visualiza-se que a corrente começa a cair, o que indica que o efeito pelicular assume uma alta intensidade, no qual a corrente começa a se concentrar em uma camada menor que $1mm$. Nos pontos 3 e 5 é possível observar que a densidade de corrente cai à medida que a frequência aumenta,

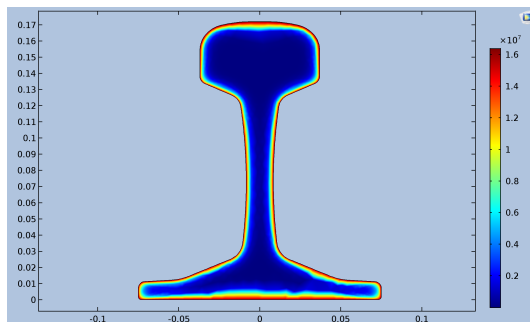
Figura 4.10 – Diagrama da distribuição da densidade de corrente A/m^2 na seção transversal da junta soldada do trilho para diferentes frequências.



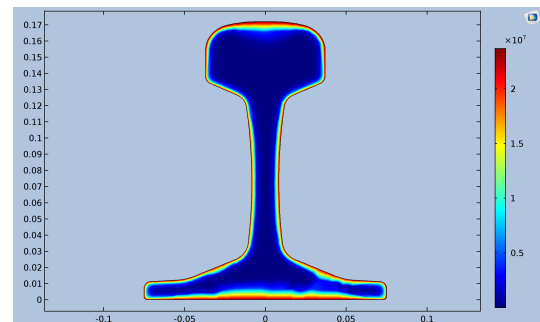
(a) Corrente Contínua.



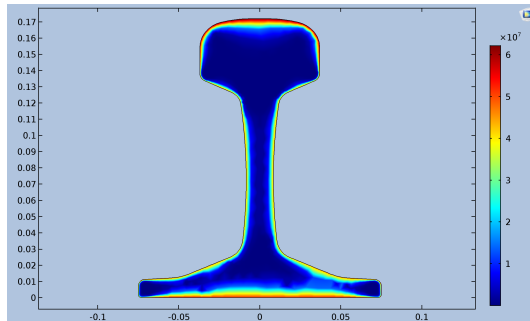
(b) Frequência de 5 Hz.



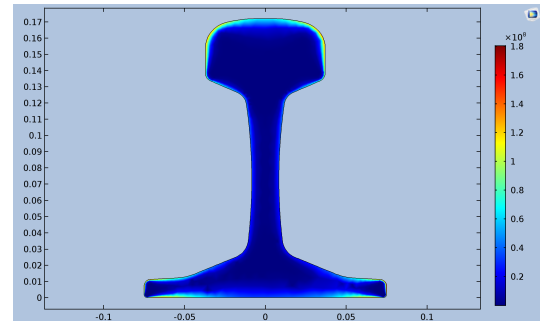
(c) Frequência de 25 Hz.



(d) Frequência de 50 Hz.



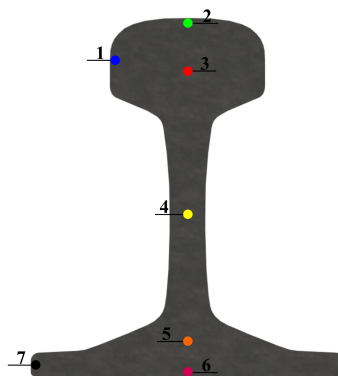
(e) Frequência de 500 Hz.



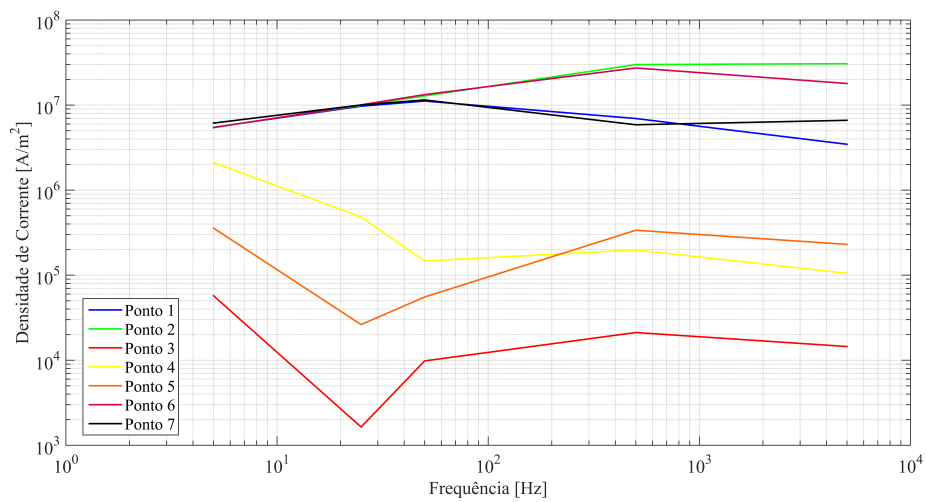
(f) Frequência de 5000 Hz.

e em altas frequências possui um certo aumento, mas ainda com valor muito abaixo dos outros pontos, enquanto que no ponto 4, apesar de a corrente cair, a queda não é tão acentuada em baixas frequências.

Figura 4.11 – Variação da densidade de corrente com a frequência para vários pontos da seção do trilho.



(a) Pontos analisados.



(b) Gráfico de Frequência (Hz) por Densidade de corrente (A/m^2).

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho de conclusão de curso apresentou o desenvolvimento de um modelo numérico computacional a fim de representar a etapa de aquecimento que envolve o processo de soldagem por centelhamento aplicado à trilhos ferroviários.

Avaliando os resultados encontrados ao longo do trabalho, especialmente pela comparação com o experimento prático, podemos considerar que os objetivos propostos inicialmente foram de modo geral alcançados. Isto é, o modelo numérico computacional foi desenvolvido, e consegue representar bem como ocorre a distribuição de corrente e aquecimento ao longo do trilho, principalmente no que diz respeito aos resultados qualitativos, o tornando apto a ser utilizado em próximas pesquisas. Analisando quantitativamente os resultados, vemos que é preciso avançar um pouco mais, já que representar fielmente o que acontece na realidade não é uma tarefa fácil, devido às inúmeras variáveis que envolvem qualquer fenômeno físico real, e que muitas vezes não são passíveis de serem numericamente implementados.

Com relação ao aquecimento dos trilhos durante a soldagem, foi possível esclarecer de forma mais nítida, que em materiais ferromagnéticos como o aço do trilho, temos uma intensificação dos fenômenos magnéticos que acontecem em corrente alternada, o que aumenta a intensidade do efeito pelicular, fazendo que mesmo em baixas frequências, exista uma alta concentração de corrente em alguns pontos do trilho, especialmente em suas bordas externas. Verificou-se também que à medida que a frequência aumenta, o efeito pelicular se intensifica, e mais a corrente tende a fluir pelas bordas, o que conseqüentemente faz com que essa parte tenha maior aquecimento por efeito Joule.

No que diz respeito à ZTA, ficou nítido que tanto na simulação quanto no experimento prático, a região que teve sua microestrutura alterada pelo calor do processo mantêm um valor aproximadamente constante independente de qual posição se analise longitudinalmente a partir da junta soldada, nesse caso possuindo um valor médio de 4,1cm de uma extremidade à outra.

Para corrente contínua, verificou-se que a distribuição também não é homogênea, e depende da posição em que os eletrodos estão posicionados no trilho. Porém essa variação de densidade de corrente é pequena e não gera grandes diferenças de aquecimento em pontos distintos da seção da junta, se comparada à corrente alternada, mas não deve ser desconsiderada.

Uma das maiores dificuldades deste trabalho foi encontrar as propriedades eletromagnéticas para o aço que compõe trilhos ferroviários, já que tais propriedades não são de grande interesse na maioria dos processos que os envolvem e, não são estudados. Sendo assim, esse é um ponto essencial para futuros estudos da soldagem por centelhamento de trilhos em corrente alternada, podendo ser um próximo passo para melhorar os resultados

obtidos com este trabalho.

Através de todo o estudo realizado surgiram evidências de assuntos que necessitam de maior conhecimento para o domínio da tecnologia que envolve a soldagem por centelhamento, podendo ser objetos de futuras pesquisas. As principais estão listadas a seguir:

- Avaliar as propriedades eletromagnética do aço utilizado em trilhos ferroviários, à medida que se varia a temperatura;
- Implementar uma análise numérico computacional estrutural da etapa de recalque do processo de soldagem por centelhamento, partindo dos resultados numéricos encontrados no presente trabalho;
- Realizar uma análise numérica da microestrutura final da região próxima à junta soldada devido aos ciclos térmicos que envolvem a soldagem por centelhamento;
- Fazer a análise numérica das tensões residuais resultantes do processo de soldagem por centelhamento;
- Realizar estudos numéricos sobre o efeito da posição dos eletrodos na solda resultante em processos de corrente contínua e corrente alternada.
- Pesquisa de formas para manter a distribuição de corrente na seção do trilho mais uniforme, quando utilizada a corrente alternada para a soldagem por centelhamento;
- Estudo da influência da rugosidade inicial das faces a serem unidas no resultado do processo de soldagem por centelhamento, e pesquisa de possíveis melhorias.

REFERÊNCIAS

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; KRANE, K. S. **Fundamentos de Física: Eletromagnetismo**. ed. 9^a. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

SEARS, F.; ZEMANSKY, M. W. HD Young, **Física 3: Eletromagnetismo**. ed. 12^a. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2009.

COMSOL Multiphysics[®]. **Multiphysics Cyclopedia: The Joule Heating Effect**. Disponível em: <<https://br.comsol.com/multiphysics/the-joule-heating-effect>>. Acesso em: 02 Mai. 2017

BROOKS, Douglas. Skin Effect. **Ultracad Design, Inc.** 2009.

CIRCUIT GLOBE. **Skin Effect**. Disponível em: <<http://circuitglobe.com/skin-effect.html>>. Acesso em: 02 Mai. 2017

ROBERT, R. Efeito Pelicular. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Curitiba, Vol. 22, No. 2, pp 285-289, Jun, 2000.

GRECOCINI, Marian; MADESCU, Gheorghe; MOT, Martian. Skin Effect Analysis in a Free Space Conductor. **Facta Universitatis, ser.: Elec. Energ.** Timisoara-Romênia, vol. 23, No. 2, pp. 207-215, Ago, 2010.

ENGINEERING NEWS. **Heat Transfer Modes | Methods of Heat Transfer**. Disponível em: <<http://www.theengineeringnews.com/heat-transfer-modes-methods-of-heat-transfer>>. Acesso em: 03 Mai. 2017

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

MECHANICAL ENGINEERING. **Flash Welding Process | Flash Butt Welding of rails | Flash and Upset Welding**. Disponível em: <<http://www.mechanicalengineeringblog.com/3602-flash-welding-process-flash-butt-welding-of-rails-flash-and-upset-welding/>>. Acesso em: 02 Mai. 2017.

MILLER. **The History of Welding**. Disponível em: <<https://www.millerwelds.com/resources/article-library/the-history-of-welding>>. Acesso em: 02 Mai. 2017.

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

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

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.

K AND G MACHINERY PTY LTD. **FLASH BUTT WELDERS**. Disponível em: <<http://www.kandgmachinery.com.au/k1000-depot-flashbutt-welder/>>. Acesso em: 03 Mai. 2017

TARINGA. **Vía y obras: Soldadura de rieles**. Disponível em: <<http://www.taringa.net/posts/info/17763461/Via-y-obras-Soldadura-de-rieles.html>> Acesso em: 03 Mai. 2017

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

ASM TREINAMENTOS. **Características da Zona Termicamente Afetada**. Disponível em: <<http://www.asmtreinamentos.com.br>> Acesso em: 03 Mai. 2017

MANSOURI, H., MONSHI, A.. Microstructure and residual stress variations in weld zone of flash-butt welded railroads, **Science and Technology of Welding and Joining**, Majlessi-Irã, Vol. 9, No. 3, pp 237-245, 2004.

WECK, Olivier; KIM, Yong. **Engineering Design and Rapid Prototyping: Finite Element Method**. MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY (MIT), 2004. Disponível em: <http://web.mit.edu/16.810/www/16.810_L4_CAE.pdf> Acesso em: 03 Mai. 2017

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.

AZEVEDO, Álvaro. **Método dos Elementos Finitos**. ed. 1ª. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2003.

COMSOL Multiphysics®. **Multiphysics Cyclopedia: The Finite Element Method (FEM)**. Disponível em: <<https://br.comsol.com/multiphysics/finite-element-method>>. Acesso em: 04 Mai. 2017

JFE CORPORATION. **RAIL**. Disponível em: <<http://www.jfe-steel.co.jp/en/products/shapes/catalog/d1e-001.pdf>> Acesso em: 26 Mai. 2017

MATWEB. **AISI 1070 Steel, hot rolled, 19-32 mm (0.75-1.25 in) round**. Disponível em: <<http://www.matweb.com>> Acesso em: 27 Mai. 2017



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, 21 de Junho de 2017.

Luiz Phelipe Sotero – Discente
Matrícula: 201271043 – CPF: 120.116.566-05

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.