



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Mestrado - Doutorado

IMPLEMENTAÇÃO DE PADRÕES DE TECIMENTO NA SIMULAÇÃO DE OPERAÇÕES DE SOLDAGEM PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

por

Heitor Abdias da Silva Pereira

Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da
Paraíba para obtenção do título de Mestre

Heitor Abdias da Silva Pereira

**IMPLEMENTAÇÃO DE PADRÕES DE TECIMENTO NA
SIMULAÇÃO DE OPERAÇÕES DE SOLDAGEM PELO MÉTODO
DOS ELEMENTOS FINITOS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PPGEM, da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Cavalcanti Rodrigues

João Pessoa

2019

P436i Pereira, Heitor Abdias da Silva.

Implementação de Padrões de Tecimento na Simulação de
Operações de Soldagem pelo Método dos Elementos Finitos
/ Heitor Abdias da Silva Pereira. - João Pessoa, 2019.

81 f. : il.

Orientação: Marcelo Cavalcanti Rodrigues.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. soldagem com tecimento. 2. modelos de fontes de
calor. 3. método dos elementos finitos. 4.
parametrização do caminho. I. Rodrigues, Marcelo
Cavalcanti. II. Título.

UFPB/BC

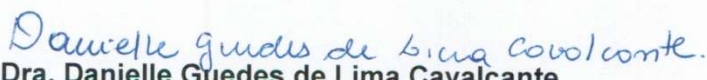
**IMPLEMENTAÇÃO DE PADRÕES DE TECIMENTO NA
SIMULAÇÃO DE OPERAÇÕES DE SOLDAGEM PELO
MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**

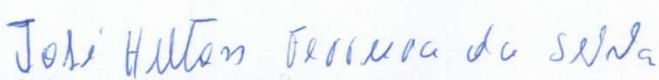
por

HEITOR ABDIAS DA SILVA PEREIRA

Dissertação aprovada em 18 de fevereiro de 2018


Prof. Dr. Marcelo Cavalcanti Rodrigues
Orientador – UFPB


Profa. Dra. Danielle Guedes de Lima Cavalcante
Examinadora Interna - UFPB


Prof. Dr. José Hilton Ferreira da Silva
Examinador Externo – UFPB

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Marcelo Cavalcanti Rodrigues, pela confiança e pelo suporte para a realização deste trabalho.

Aos colegas MSc. Saulo Moretti e Gilsivan Cartaxo, que muito me auxiliaram no desenvolvimento de várias etapas da pesquisa.

Aos meus pais e minha companheira, pelo apoio e compreensão nos momentos mais difíceis.

Aos outros colegas de pesquisa e laboratório, pelas valiosas dicas e discussões.

À CAPES e à UFPB, pela oportunidade e apoio financeiro durante a vigência do programa.

IMPLEMENTAÇÃO DE PADRÕES DE TECIMENTO NA SIMULAÇÃO DE OPERAÇÕES DE SOLDAGEM PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

RESUMO

Um dos fatores mais relevantes quanto ao comportamento adequado de um componente soldado quando em serviço é o seu histórico térmico, haja vista o alto aporte de calor envolvido na união das partes, bem como os defeitos relacionados ao ajuste inadequado dos parâmetros de soldagem. Uma das práticas mais comuns para a obtenção de soldas de alta qualidade, e com maior eficiência, é a realização dos movimentos de tecimento durante o processo, uma vez que podem proporcionar um cordão mais largo, a fusão adequada das bordas da junta, entre outros benefícios. Ainda que métodos numéricos, tais como o Método dos Elementos Finitos – MEF –, sejam amplamente utilizados na simulação de processos de soldagem, os modelos matemáticos das fontes de calor que representam a ação do arco elétrico na peça não abrangem os movimentos de tecimento, sendo, portanto, necessárias modificações na descrição matemática do aquecimento durante a soldagem. Nesse contexto, o presente trabalho propõe a implementação do movimento de tecimento na simulação da soldagem a partir da parametrização do caminho percorrido pela fonte de calor durante a execução dos movimentos, com a realização de dois estudos de caso, nos quais são estabelecidas a comparação entre o método proposto e o método de transformação de coordenadas, mais utilizado atualmente, a partir de dados numéricos e experimentais da literatura, bem como a realização de uma análise experimental para observar o ciclo térmico em pontos de uma chapa soldada. Os resultados mostraram que, apesar de ser um método mais simples que a transformação de coordenadas, a parametrização do caminho é capaz de representar com boa exatidão o movimento de tecimento nas simulações de soldagem, fornecendo assim informações relevantes quanto à distribuição de temperaturas e ao ciclo térmico da soldagem.

Palavras-chave: soldagem com tecimento; modelos de fonte de calor; método dos elementos finitos; parametrização do caminho;

IMPLEMENTATION OF WEAVE PATTERNS IN THE SIMULATION OF WELDING OPERATIONS BY THE FINITE ELEMENT METHOD

ABSTRACT

One of the most relevant factors for the appropriate behavior of a welded component when in service is its thermal history, given the high heat input involved in joining the parts as well as the defects related to the inadequate adjustment of the welding parameters. One of the most common practices to produce high-quality welds, with greater efficiency, is the execution of weaving movements during the process, because they provide a wider weld bead, the proper fusion of the joint edges, and other benefits. Although numerical methods, such as the Finite Element Method – FEM –, are widely used in the simulation of welding processes, the mathematical models of heat sources representing the electric arc action in the welded piece do not cover the weaving motion, and adaptations regarding the mathematical description of the heating during welding are therefore necessary. In this context, the present study proposes the incorporation of the weaving movement in welding simulation based on the parameterization of the path traveled by the heat source during the execution of the movement, with the establishment of two case studies, in which one establishes a comparison between the proposed method and the coordinate transformation method, the most commonly used technique, based on numerical and experimental data from the literature, as well as the realization of an experimental analysis to observe the thermal cycle in points of a welded plate. The results showed that, although it is a simpler method than the coordinate transformation one, the path parameterization is capable of accurately representing the weaving movement in welding simulations, thus providing relevant information regarding the temperature distribution and the thermal cycle of welding.

Keywords: weaving welding; heat source model; finite element method; path parameterization;

SUMÁRIO

CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO	15
1.1 INTRODUÇÃO	15
1.2 OBJETIVOS	16
1.2.1 Objetivos Específicos	17
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	17
CAPÍTULO II: REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 A TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA SOLDAGEM	18
2.2 MODELOS MATEMÁTICOS DE FONTES DE CALOR	20
2.3 O MEF E A SIMULAÇÃO DA SOLDAGEM	24
2.4 O MOVIMENTO DE TECIMENTO E A SIMULAÇÃO DA SOLDAGEM	29
CAPÍTULO III: MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO	33
3.1 A PARAMETRIZAÇÃO DO CAMINHO	33
3.2 PROCEDIMENTO DIRETO	34
3.2.1 Tecimento Oscilatório Simples	35
3.2.2 Tecimento Oscilatório com Mergulho	36
3.2.3 Tecimento em Espiral	37
3.3 PROCEDIMENTO POR FOURIER	38
3.3.1 Tecimento em Onda Triangular	39
3.3.2 Tecimento em Onda Quadrada	41
3.4 PROCEDIMENTO INDIRETO	42
CAPÍTULO IV: ESTUDOS DE CASO	44
4.1 CASO HU <i>et al.</i> (2006)	44
4.2 CASO EXPERIMENTAL	46
CAPÍTULO V: RESULTADOS E CONCLUSÕES	51
5.1 CASO HU <i>et al.</i> (2006)	51
5.2 CASO EXPERIMENTAL	54
5.3 CONCLUSÕES	56

5.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	57
REFERÊNCIAS	58
ANEXO A: CÓDIGOS EM <i>MATLAB</i>	62
A.1 TECIMENTO OSCILATÓRIO COM E SEM MERGULHO	62
A.2 TECIMENTO EM ESPIRAL	63
A.3 TECIMENTO POR FOURIER EM ONDA TRIANGULAR COM E SEM MERGULHO	64
A.4 TECIMENTO POR FOURIER EM ONDA QUADRADA COM E SEM MERGULHO	66
A.5 TECIMENTO PELO PROCEDIMENTO INDIRETO EM MEIA LUA	67
ANEXO B: CÓDIGOS EM <i>APDL</i>	69
B.1 CASO HU <i>et al.</i> (2006)	69
B.2 CASO EXPERIMENTAL	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Parâmetros para simulação do caminho parametrizado.	35
Tabela 4.1 - Parâmetros da soldagem com tecimento de Hu et al. (2006).	46
Tabela 4.2 - Parâmetros da soldagem com tecimento empregados no experimento.	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Esquematização de um processo de soldagem a arco elétrico.	19
Figura 2.2 - Modelos pontual (a) e linear (b) de fonte de calor de Rosenthal (1941).	20
Figura 2.3 - Disco gaussiano de Pavelic et al. (1969).	22
Figura 2.4 - Distribuição duplo-elipsoidal de densidade de potência.	24
Figura 2.5 - Alguns tipos comuns de elementos finitos.	25
Figura 2.6 - Geometria (a) e malhas 3D (b) e 2D (c) correspondentes.	26
Figura 2.7 - Alguns padrões de tecimento.	30
Figura 2.8 - Esquematização do método de transformações de coordenadas.	31
Figura 3.1 - Parâmetros geométricos para a parametrização.	34
Figura 3.2 - Parametrização do tecimento oscilatório simples para a parametrização apresentada.	36
Figura 3.3 - Parametrização do tecimento oscilatório com mergulho para a parametrização apresentada.	37
Figura 3.4 - Parametrização do tecimento em espiral.	38
Figura 3.5 - Parametrização do tecimento em onda triangular para diferentes quantidades de termos na série de Fourier.	39
Figura 3.6 - Parametrização da onda triangular com mergulho para diferentes quantidades de termos na série de Fourier.	40
Figura 3.7 - Parametrização do tecimento em onda quadrada para diferentes quantidades de termos na série de Fourier.	41
Figura 3.8 - Parametrização do tecimento em onda quadrada com mergulho para diferentes quantidades de termos na série de Fourier.	42
Figura 3.9 - Parametrização do padrão em meia-lua pelo procedimento indireto.	43

Figura 4.1 - Geometria (a) e malha utilizada na simulação (b) da chapa soldada por Hu et al. (2006).	45
Figura 4.2 - Propriedades termofísicas do aço 10Ni-5Cr-Mo-V.	45
Figura 4.3 - Geometria (a) e malha utilizada na simulação (b) da chapa soldada.	47
Figura 4.4 - Propriedades termofísicas do aço SAE 1020.	48
Figura 4.5 - Dimensões (a) e posicionamento (b) do limitador de amplitude de tecimento.	49
Figura 4.6 - Posicionamento dos termopares através da superfície inferior da chapa para registro do ciclo térmico.	49
Figura 4.7 - Aparato para medição das temperaturas durante os experimentos.	50
Figura 5.1 - Distribuição de temperaturas na forma de contornos para os instantes 120 s (a), 120.5 s (b) e 121 s (c).	51
Figura 5.2 - Comparação entre os ciclos térmicos obtidos por Hu et al. (2006) experimentalmente e pela transformação de coordenadas e o obtido pela parametrização do caminho.	52
Figura 5.3 - Comparação da distribuição de temperaturas obtidas experimentalmente e com a transformação de coordenadas por Hu et al. (2006), e com o método da parametrização do caminho.	53
Figura 5.4 - Cordões de solda nos corpos de prova 1 (a), 2 (b) e 3 (c) obtidos nos experimentos a partir da soldagem MAG semi-automática, e seção transversal da chapa destacando o cordão de solda (d).	54
Figura 5.5 - Distribuição de temperaturas nos instantes 23 s (a), 23.5 s (b) e 24 s (c).	55
Figura 5.6 - Comparação numérico-experimental do ciclo térmico nos termopares 1 e 2.	55
Figura A.1 - Croqui de um ciclo de tecimento para coleta dos pontos para parametrização indireta.	67

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A	Área
a	Semi-eixo em x da distribuição duplo-elipsoidal
APDL	<i>Ansys Parametric Design Language</i>
b	Semi-eixo em y da distribuição duplo-elipsoidal
C	Coeficiente de concentração de fonte de calor superficial
c	Calor específico
c_1	Semi-eixo frontal em z da distribuição duplo-elipsoidal
c_2	Semi-eixo traseiro em z da distribuição duplo-elipsoidal
d	Diâmetro
f	Frequência de tecimento
f_f	Fator de deposição frontal da distribuição duplo-elipsoidal
f_r	Fator de deposição traseiro da distribuição duplo-elipsoidal
h	Coeficiente convectivo
h_{comb}	Coeficiente convectivo combinado
I	Corrente de soldagem
k	Condutividade térmica
K_0	Função Bessel de tipo 2 e ordem 0
L	Meio período de uma função $2L$ periódica
l	Comprimento de chapa
MEF	Método dos Elementos Finitos
n	Número de termos da série de Fourier
Q	Potência térmica
q''	Fluxo térmico
q_g	Geração volumétrica de calor
r	Distância radial
T	Temperatura
T_∞	Temperatura de fluxo externo
T_0	Temperatura inicial
T_{amb}	Temperatura ambiente
T_s	Temperatura superficial
t	Tempo
U	Tensão de soldagem
v	Velocidade de soldagem
v_x	Componente x da velocidade de soldagem
v_y	Componente y da velocidade de soldagem
w	Espessura de chapa
x	Eixo coordenado

x'	Eixo auxiliar
x''	Eixo auxiliar
x_0	Coordenada x do centro da fonte de calor
y	Eixo coordenado
y'	Eixo auxiliar
y''	Eixo auxiliar
y_0	Coordenada y do centro da fonte de calor
z	Eixo coordenado
z'	Eixo auxiliar
z''	Eixo auxiliar
z_0	Coordenada z do centro da fonte de calor
α	Difusividade térmica
β	Ângulo de tecimento
ε	Emissividade
η	Eficiência do processo de soldagem
ρ	Densidade
σ	Constante de Steffan-Boltzmann
θ	Ângulo de chanfro

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

A soldagem ocupa um lugar proeminente na indústria hoje, sendo o processo de união de metais mais amplamente utilizado na indústria. Tal popularidade pode ser justificada pela versatilidade dos processos, alta qualidade estrutural apresentada pelos componentes soldados, entre outros fatores. Portanto, compreender os efeitos da soldagem é muito importante à garantia da integridade e da ótima operação dos componentes mecânicos (Masubachi, 1980). Nos processos mais comuns de soldagem a arco elétrico, um alto aporte térmico é utilizado para unir duas partes metálicas através da fusão localizada de um metal de adição, ou mesmo do metal de base da peça de trabalho, afetando assim a microestrutura e, conseqüentemente, as propriedades e o seu desempenho em serviço.

A distribuição de temperaturas durante a soldagem é determinante para os resultados e as propriedades obtidas para a junta na união das partes metálicas, tais como formato e composição química do cordão de solda, as dimensões da Zona Termicamente Afetada (ZTA), a presença de defeitos e o nível de tensões residuais. Assim, o estudo dos modelos matemáticos de fontes de calor, utilizados nas análises analíticas e numéricas para representar a ação do arco elétrico na peça durante a soldagem, é crucial à obtenção de informações relevantes quanto a performance de componentes mecânicos, bem como possíveis inconvenientes relacionados à soldagem (Kim e Rhee, 2005). Vários modelos de fontes de calor (Rosenthal, 1941; Pavelic *et al.*, 1969; Krutz e Segerlind, 1978; Goldak *et al.*, 1984) foram introduzidos ao longo dos anos, cada um apresentando aspectos atrativos e limitações em maior ou menor grau, com destaque para o modelo duplo-elipsoidal de densidade de potência, capaz de representar adequadamente o gradiente térmico nas porções frontais e traseiras em relação à posição central de ação do arco elétrico, e, portanto, é considerado um dos modelos mais versáteis e robustos (Goldak *et al.*, 1984).

O movimento de tecimento, por promover maior penetração e um cordão de solda mais largo, pode aumentar a eficiência do processo de soldagem, é amplamente utilizado nas operações de soldagem. No entanto, os modelos das fontes de calor utilizado nas simulações de processos de soldagem englobam apenas o movimento translacional do arco elétrico em sua formulação, sendo então necessários ajustes para que o tecimento seja levado em conta. Tal implementação já foi realizada na simulação de alguns poucos casos (Hu *et al.*, 2006, Chen *et al.*, 2014, Zhan *et. al*, 2017), abrangendo majoritariamente um único padrão de tecimento, com a abordagem conhecida como “transformação de coordenadas”, que, apesar de produzir bons resultados para o padrão que representa, é incapaz de possibilitar a simulação de movimentos mais complexos da fonte de calor que são comumente executados nas operações reais de soldagem.

O método dos elementos finitos tem sido frequentemente usado para simular operações de soldagem visando a análise de distribuições de temperatura (Attarha e Sattari-Far, 2011; Negi e Chattopadhyaya, 2013; Sirivella, 2014), tensões residuais (Cañas *et. al*, 1996; Deng e Murakawa, 2006; Deng e Murakawa, 2008a; Stamenkovic e Vasovic, 2009; Chang *et al.*, 2010; Liu *et al.*, 2015) e distorções (Duan, Vincent e Boitout, 2007; Deng e Murakawa, 2008a; Deng e Murakawa, 2008b), mas quase sempre em processos sem tecimento. Dessa forma, o presente trabalho propõe a modelagem, através da parametrização do caminho, dos padrões de tecimento oscilatório simples, oscilatório com mergulho, em espiral, em onda triangular, em onda triangular com mergulho, em onda quadrada, em onda quadrada com mergulho, e em meia-lua, tendo o modelo duplo-elipsoidal de densidade de potência como referência para fonte de calor, estabelecendo assim um método mais abrangente para implementação do tecimento, inclusive para padrões mais complexos. Além disso, traz também a apresentação de dois estudos de caso, baseado nos resultados experimentais e numéricos apresentados por Hu *et al.* (2006), e em experimentais próprios.

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo estabelecer um método geral para a implementação de padrões de tecimento na simulação de operações de soldagem pelo Método dos Elementos Finitos.

1.2.1. Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo final deste trabalho de pesquisa, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

1. Estabelecer matematicamente o método chamado de “parametrização do caminho” para implementação da soldagem com tecimento em diferentes padrões;
2. Validar o método da parametrização o caminho através de análises numéricas pelo MEF, nas quais são realizadas comparações entre os resultados térmicos observados e dados experimentais e numéricos, obtidos a partir da transformação de coordenadas na implementação do tecimento, documentados na literatura;
3. Realizar uma análise numérico-experimental da soldagem com tecimento, com a comparação dos resultados térmicos obtidos na simulação usando a parametrização o caminho e os dados experimentais coletados;

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está estruturada em 5 capítulos, que apresentam a seguinte estruturação:

Capítulo 2: Traz o referencial teórico necessário à elaboração do trabalho, abordando os temas centrais quanto ao estabelecimento da metodologia de implementação do tecimento nas simulações pelo Método dos Elementos Finitos, quando à realização dos estudos de caso.

Capítulo 3: Faz a descrição propriamente dita da metodologia para implementação dos padrões de tecimento nas simulações pela parametrização do caminho.

Capítulo 4: Contempla os pormenores da realização dos estudos de caso necessários à validação da metodologia, e traz a discussão dos resultados.

Capítulo 5: Discute os principais resultados, conclusões e suas implicações, bem como sugere temas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA SOLDAGEM

A soldagem pode ser definida como o “processo de união entre duas partes metálicas, usando uma fonte de calor, com ou sem aplicação de pressão” (Wainer, 1992), e o resultado da aplicação de um processo de soldagem é a solda. Segundo Masubachi (1980), algumas das principais vantagens que a soldagem oferece em relação a outros processos de união, tais como o uso de rebites ou parafusos, são a alta eficiência da junta, a impermeabilidade a água e ar, a economia de peso, a irrestrrição quanto à espessura e a simplicidade do projeto estrutural, com consequente redução no tempo e nos custos de fabricação. Tais vantagens, aliadas ao desenvolvimento de técnicas para atenuação dos inconvenientes relacionados a soldagem, tais como as distorções e as tensões residuais, contribuem para justificar as razões pelas quais a soldagem se firmou na indústria como principal processo de união de metais, sendo amplamente utilizada na fabricação e recuperação de peças e estruturas.

Dentre as várias formas de soldagem, os processos que utilizam um arco elétrico como fonte de calor são os mais aplicados na indústria. Isso ocorre pois eles apresentam maior versatilidade quanto às possíveis aplicações, bem como simplicidade e a praticidade, se comparados às demais formas de soldagem. Em tal categoria, pode-se destacar os processos de soldagem com eletrodo revestido, TIG, MIG/MAG, arco submerso, entre outros. Apesar das particularidades de cada um, todos se utilizam do mesmo princípio: para alcançar a união de duas partes metálicas, um arco elétrico é estabelecido entre um eletrodo, conectada a uma fonte de energia com características apropriadas para a operação, e as peças, de modo que ocorre o aquecimento localizado da região da junta, fundindo um metal de adição, quando utilizado, e mesmo os metais de base. O arco elétrico então se desloca ao longo da junta, preenchendo-a pela deposição de metal fundido. A Figura 2.1 ilustra o aparato básico envolvido na soldagem a arco elétrico.

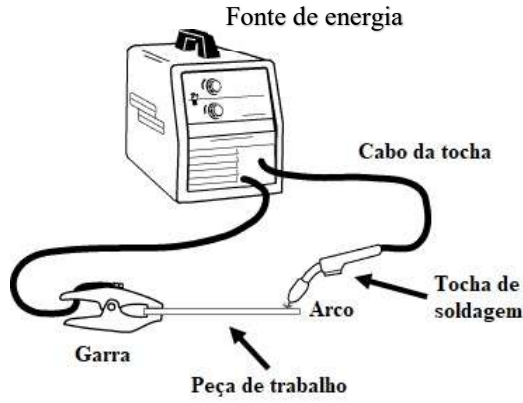


Figura 2.1 - Esquematização de um processo de soldagem a arco elétrico.

Fonte: Autor.

Uma vez que a soldagem produz um gradiente de temperaturas na junta soldada, a transferência de calor por condução, para o interior da peça de trabalho, se faz presente. A Equação 2.1, conhecida como equação do calor, é responsável por descrever a distribuição de temperaturas na peça de trabalho.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2(kT) + q_g \quad (2.1)$$

Nela, T é a temperatura, ρ é a densidade, c é o calor específico, k é a condutividade térmica, ∇^2 é o operador laplaciano e q_g é a geração interna de calor.

O fator mais importante, e que fornece a maior parcela de energia ao processo, é o arco elétrico (Masubachi, 1980). A potência térmica incidente é dada pela Equação 2.2.

$$Q = \eta UI \quad (2.2)$$

Aqui, η é a eficiência do processo, U é a tensão de soldagem e I é a corrente de soldagem. Tal energia é distribuída pela peça de trabalho, seguindo algum dos modelos de fontes de calor, sendo alocada no lugar do termo q_g da Equação 2.1 no caso dos modelos volumétricos.

Além da condução, o calor envolvido na soldagem é dissipado por convecção térmica, conforme Equação 2.3, e por radiação térmica, representada pela Equação 2.4.

$$Q = hA(T_s - T_\infty) \quad (2.3)$$

$$Q = \varepsilon \sigma A (T_s^4 - T_{amb}^4) \quad (2.4)$$

Para a Equação 2.3, h é o coeficiente convectivo, A é a área externa, T_s é a temperatura da superfície externa e T_∞ é a temperatura do fluxo externo. Na Equação 2.4, ε é a emissividade da superfície, σ é a constante de Stefan-Boltzmann e T_{amb} representa a temperatura do ambiente vizinho.

2.2 MODELOS MATEMÁTICOS DE FONTE DE CALOR NA SOLDAGEM

A busca por compreender os fenômenos relacionados à soldagem, principalmente seus inconvenientes, se faz presente desde o início da viabilização prática do processo. Uma das primeiras etapas dessa busca foi a tentativa de formalizar matematicamente o fenômeno térmico da soldagem, descrito fundamentalmente pelas Equação 2.1-2.4. Para que seja obtida uma solução analítica para a Equação 2.1, que forneceria uma função $T: \mathbb{R}^4 \rightarrow \mathbb{R} | (x, y, z, t) \rightarrow T$ que relacionaria a qualquer ponto (x, y, z) da chapa, num dado instante t de ocorrência do fenômeno, sua temperatura T , se faz necessário descrever matematicamente a ação do arco elétrico na peça de trabalho.

O primeiro trabalho relevante nesse sentido foi desenvolvido por Rosenthal (1941), no qual foram apresentadas a fonte de calor pontual, aplicável ao caso de deposição de cordão de solda na superfície de uma chapa grossa, e a fonte de calor linear, para o caso da soldagem em chapas finas com penetração total. A Figura 2.2 traz a ilustração de tais fontes de calor.

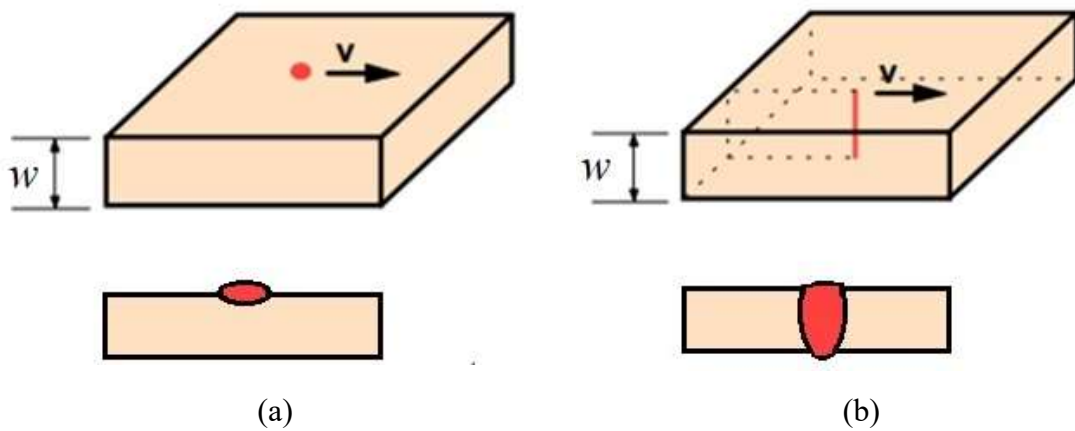


Figura 2.2 – Modelos pontual (a) e linear (b) de fonte de calor de Rosenthal (1941).

Fonte: Adaptado de Modenesi *et al.* (2011).

Rosenthal apresentou soluções analíticas para a Equação 2.1 a partir de tais modelos, para o caso quasi-estacionário, ou seja, com a distribuição de temperaturas sendo invariante para um sistema de coordenadas que se move junto a fonte de calor. Outras considerações para as soluções por ele apresentadas são dimensões geométricas infinitas da chapa, o que remove a necessidade de aplicar condições de contorno às fronteiras, e o estabelecimento de valores médios para as propriedades termofísicas, simplificando o problema pela omissão de não-linearidades de material. As Equações 2.5 e 2.6 são, respectivamente, as soluções para o modelo pontual e o linear, considerando o sistema de eixos com origem na posição da fonte de calor, com ela se movendo na direção x e a espessura da chapa estando alinhada com o eixo z , no sentido de cima para baixo (Modenesi *et al.*, 2011).

$$T(x, y, z) = T_0 + \frac{Q}{2\pi k \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \exp \left[-\frac{v}{2\alpha} \left(x + \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \right) \right] \quad (2.5)$$

$$T(x, y) = T_0 + \frac{Q/w}{2\pi k} \exp \left[-\frac{vx}{2\alpha} \right] K_0 \left[\frac{v \sqrt{x^2 + y^2}}{2\alpha} \right] \quad (2.6)$$

De acordo com Modenesi *et al.* (2011), para tais equações, T_0 é a temperatura inicial da chapa, Q é a potência térmica de entrada, dada pela Equação 2.2, w é a espessura da chapa, v é a velocidade de soldagem, k é a condutividade térmica do material, α é a difusividade térmica, que é função das três propriedades presentes na Equação 2.1 que formula o problema, e K_0 é a função de Bessel modificada de segundo tipo e ordem zero.

A partir das soluções de Rosenthal (1941), pode-se observar que, mesmo para casos em que o modelo matemático da fonte de calor é relativamente simples, soluções analíticas bastante complexas são obtidas. Além disso, muitas hipóteses simplificadoras são aplicadas, o que produz muitos erros. Nas soluções aqui apresentadas, por exemplo, as temperaturas são consideravelmente distorcidas nas regiões próximas do metal de solda e da zona termicamente afetada, proporcionando uma representação fiel apenas nas porções em que as temperaturas atingem 20% do ponto de fusão do material (Goldak, Chakravarti e Bibby, 1984). Em termos práticos, para a obtenção de soluções para a Equação 2.1 modelando processos de soldagem à arco elétrico, dadas certas condições iniciais e de contorno, com bom nível de exatidão, o emprego de métodos numéricos se faz necessário.

Pensando na obtenção de soluções numéricas para o problema, outros autores (Pavelic *et al.*, 1969; Friedman, 1975; Andersson, 1978 ; Krutz e Segerlind, 1978; Goldak, Chakravarti e Bibby, 1984) desenvolveram modelos de fontes de calor mais robustos, que, por melhor representarem a ação do arco elétrico na peça, possibilitam a obtenção de soluções mais exatas que as apresentadas por Rosenthal (1941). A evolução natural para os modelos pontual e linear, com dimensões 0 e 1, respectivamente, são modelos superficiais de fluxo de calor, nos quais supõe-se que o calor fornecido pelo arco elétrico incide numa área da peça de trabalho, logo com dimensão 2, e se comporta de acordo com uma distribuição gaussiana nessa região. O mais utilizado desses modelos é o chamado “disco de Pavelic” (Pavelic, 1969), no qual a região sobre a qual a energia térmica é fornecida é circular, conforme ilustrado na Figura 2.3 e modelado pela Equação 2.7.

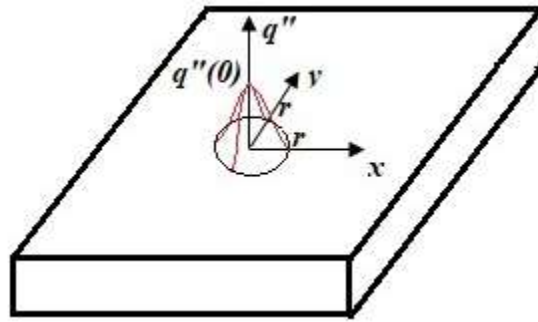


Figura 2.3 - Disco gaussiano de Pavelic *et al.* (1969).

Fonte: Autor.

$$q''(r) = q''(0)\exp[-Cr^2] \quad (2.7)$$

Aqui, o termo $q''(0)$ diz respeito ao fluxo térmico máximo fornecido, que ocorre no ponto de incidência do arco elétrico na peça, r é a distância radial do ponto de incidência sobre a superfície, e C é o coeficiente de concentração do arco elétrico, definido de modo que um fluxo uniforme $q(0)''$ incidente num círculo de diâmetro $d = 2/\sqrt{C}$, que corresponde à largura da região de incidência do arco elétrico sobre a peça de trabalho, está relacionado a uma potência térmica Q , exatamente como descrita na Equação 2.2 (Goldak, Chakravarti e Bibby, 1984). Apesar do disco de Pavelic consistir num avanço em relação aos modelos de Rosenthal (1941), seu modelo, e suas adaptações apresentadas por outros autores – notavelmente Krutz e Segerlind (1978), com a introdução de correlações para levar em conta

as perdas por convecção e radiação que ocorrem na região intermediária entre a tocha de soldagem e a peça, e a escrita da Equação 2.7 em termos de um sistema de coordenadas que se move junto à tocha –, apresentam algumas limitações: o arco elétrico não incide sobre a superfície num formato exatamente circular, e tais modelos, por serem bidimensionais, não levam em conta a ação de penetração do arco elétrico na peça.

Para superar tais limitações, foram introduzidos os chamados modelos de densidade de potência, ou modelos volumétricos de fontes de calor. Para tais, uma função $q: \mathbb{R}^4 \rightarrow \mathbb{R} | (x, y, z, t) \rightarrow q$ relaciona a cada ponto (x, y, z) da peça, em cada instante de tempo t , uma densidade de energia térmica em W/m^3 . Esses modelos podem então ser alocados na Equação 2.1 no termo q_g , atuando como uma geração volumétrica interna de calor. Os principais modelos são o hemisférico, elipsoidal e duplo-elipsoidal, cuja diferença fundamental reside na forma geométrica adotada para o volume da peça de trabalho que fica sob ação direta do arco elétrico durante a soldagem. Respectivamente, essas geometrias são uma semiesfera, um semi-elipsoide e um semi-duplo-elipsoide. Estudos com esses três modelos indicaram que o duplo-elipsoidal consegue retratar com maior acurácia os gradientes de temperatura na porção frontal do ponto de incidência do arco elétrico na peça, consideravelmente mais acentuado, e também na traseira, de aspecto mais suave (Goldak, Chakravarti e Bibby, 1984). Matematicamente, a distribuição duplo-elipsoidal de densidade de potência é descrita por duas expressões, conforme Equação 2.8, sendo uma para a porção frontal e outra para a traseira, uma vez que os semieixos são distintos, sendo essa a característica principal do modelo, e razão pela qual a terminologia “duplo-elipsoidal” é utilizada. Tal constatação pode ser observada na Figura 2.4 que traz a representação do modelo.

$$\begin{cases} q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{abc_1\pi\sqrt{\pi}} e^{\left[-3\left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{(z-vt)^2}{c_1^2}\right)\right]} \\ q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{abc_2\pi\sqrt{\pi}} e^{\left[-3\left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{(z-vt)^2}{c_2^2}\right)\right]} \end{cases} \quad (2.8)$$

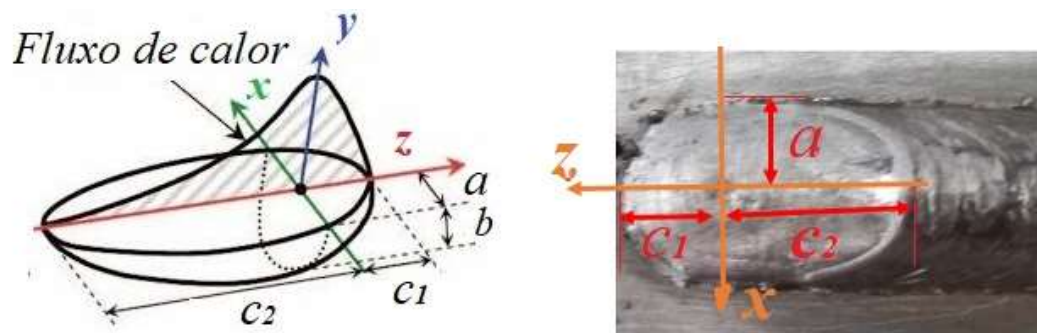


Figura 2.4 - Distribuição duplo-elipsoidal de densidade de potência.

Fonte: Autor.

Para a Equação 2.8, os parâmetros f_f e f_r são frações do calor depositado nas duas porções, com seus valores satisfazendo $f_f + f_r = 2$, Q é a potência de entrada, dada pela Equação 2.2, v é a velocidade translacional de soldagem, e a , b , c_1 e c_2 são os semieixos da distribuição. Trata-se de um dos modelos mais versáteis para fontes de calor na simulação de operações de soldagem (Goldak *et al.*, 2005, Hu *et al.*, 2006, Chen *et al.*, 2010, Chen *et al.*, 2014), principalmente pela já citada característica de representar os gradientes de temperatura da maneira mais apropriada, e, portanto, é utilizado no presente trabalho.

2.3 O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS E A SIMULAÇÃO DA SOLDAGEM

Grande parte dos fenômenos que ocorrem em sistemas de engenharia, nas suas mais variadas disciplinas, são modelados matematicamente por equações diferenciais que, exceto por casos bastante específicos, são de difícil, ou mesmo impossível, solução analítica. Nesses casos, os métodos numéricos adquirem considerável relevância à análise e ao projeto de componentes e sistemas de engenharia, pois permitem a aproximação da solução esperada para o grau de liberdade em torno do qual a equação diferencial original é montada.

Dentre os métodos mais difundidos, o chamado Método dos Elementos Finitos (MEF), por sua versatilidade em lidar com problemas das mais variadas disciplinas, como por exemplo, problemas de análise de estrutural e transferência de calor, passando por acústica e eletromagnetismo, indo até problemas complexos de multifísica e interação fluido-estrutura, tem se estabelecido como referência nos problemas de engenharia nos mais variados casos. Segundo Reddy (2006), o MEF é um método numérico fundamentado na

possibilidade de se substituir a aplicação de uma equação diferencial que governa algum fenômeno físico num domínio de geometria grande e complexa, submetido a condições de contorno genéricas, pela sua aplicação em subdomínios de menor tamanho e complexidade. Esses subdomínios, em termos dos quais a geometria complexa é simplificada, são chamados elementos, dando assim origem ao nome do método, e em sua fronteira estão posicionados os nós, responsáveis pela interligação entre os múltiplos elementos que definem o corpo. Assim como outros métodos numéricos, o MEF fornece uma solução aproximada para as equações diferenciais governantes, que pode ser tão boa quanto a solução exata, que seria obtida a partir da solução analítica de tais equações, dependendo da qualidade da simplificação da geometria do domínio no referido conjunto de elementos, denominado “malha”. A Figura 2.5 traz alguns tipos de elementos muito comuns e a Figura 2.6 mostra um exemplo da simplificação de uma geometria numa malha de elementos finitos.

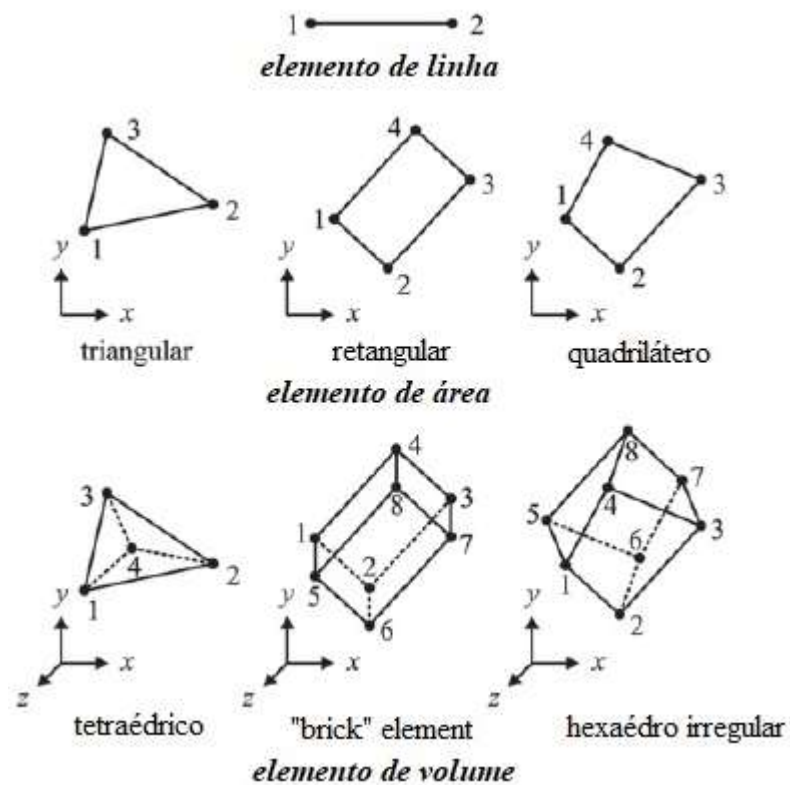


Figura 2.5 - Alguns tipos comuns de elementos finitos.

Fonte: Madenci e Guven (2015).

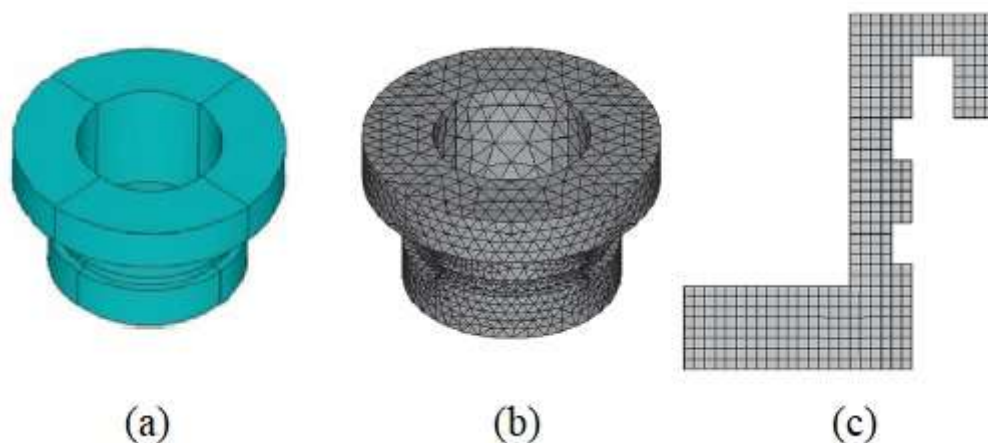


Figura 2.6 - Geometria (a) e malhas 3D (b) e 2D (c) correspondentes.

Fonte: Madenci e Guven (2015).

Segundo Bathe (1982), a definição das propriedades dos materiais que compõe o domínio e o estabelecimento da malha constituem a primeira etapa para a aplicação o MEF. Em seguida, as equações que regem o fenômeno são discretizadas, ou seja, transformadas em um conjunto de equações algébricas, que são resolvidas para cada um dos elementos. No que diz respeito à sistemas contínuos, tal discretização é feita basicamente segundo duas abordagens possíveis: a da matemática variacional, segundo o método de Rayleigh-Ritz, no qual um funcional que representa a energia total do sistema é minimizado para funções interpoladoras específicas de cada elemento, que juntas representam a solução aproximada para o grau de liberdade estudado como uma coleção de funções polinomiais individuais; e a partir do método dos resíduos ponderados, mais notavelmente pelo método de Galerkin, que, ao invés do tratamento integral da formulação variacional, determina os coeficientes dos polinômios interpoladores em cada elemento a partir da substituição direta na equação diferencial governante (Bathe, 1982; Assan, 2002; Reddy, 2006; Madenci e Guven, 2015). O último passo é a montagem dos elementos, possível graças ao compartilhamento dos nós por elementos vizinhos, o que permite que se obtenha a solução para o sistema por completo.

O método dos elementos finitos tem sido freqüentemente usado para simular operações de soldagem visando a análise de distribuições de temperatura (Attarha e Sattari-Far, 2011; Negi e Chattopadhyaya, 2013; Sirivella, 2014), tensões residuais (Cañas et. al, 1996; Deng e Murakawa, 2006; Deng e Murakawa, 2008a; Stamenkovic e Vasovic, 2009; Chang *et al.*, 2010; Liu *et al.*, 2015) e distorções (Duan, Vincent e Boitout, 2007, Deng e Murakawa,

2008a, Deng e Murakawa, 2008b), porque, com a correta caracterização do problema, é capaz de representar a operação de soldagem com ótima acurácia. No entanto, antes de realizar uma análise numérica, os objetivos do estudo devem ser bem definidos, uma vez que a soldagem constitui um fenômeno de multifísica, e essa característica define o tipo de análise a ser realizada.

Os processos de soldagem a arco elétrico envolvem o aquecimento localizado da peça de trabalho, o que caracteriza um problema de transferência de calor. Além disso, o calor fornecido pela fonte de energia tende a causar dilatação térmica nas regiões aquecidas. Se a peça for aquecida uniformemente, e sem restrições à sua dilatação, ela se expandirá uniformemente, mas, uma vez que isso é muito difícil de ser obtido, a não uniformidade do aquecimento faz com que as regiões sob o efeito de temperaturas mais baixas atuem restringindo a dilatação de regiões vizinhas que estão a maiores temperaturas. Então, deformações elásticas e plásticas são desenvolvidas na peça soldada, e, como resultado, tensões internas, também chamadas de tensões residuais (Masubachi, 1980), são estabelecidas, caracterizando, nesse caso, um problema de natureza mecânico-estrutural.

Por outro lado, o ciclo térmico da soldagem, haja vista os altos níveis das temperaturas alcançadas, provoca mudanças de fase na peça de trabalho, o que, por sua vez, é a natureza de um fenômeno microestrutural. Dessa forma, estabelecer bem as informações a serem extraídas das simulações é ponto primordial ao uso dos MEF, pois permite que as considerações apropriadas sejam realizadas, que simplificam a modelagem do problema, mas sem induzir à perda de informações relevantes. Por exemplo, tratando-se de materiais nos quais as propriedades relevantes ao problema não sofram mudanças consideráveis em seus valores devido às mudanças de fase, uma simplificação, a partir do fornecimento de informações acerca da variação das propriedades com a temperatura, pode substituir a consideração das modificações microestruturais envolvidas.

Problemas de multifísica, dentro do contexto do MEF, podem ser resolvidos de duas maneiras, a depender da natureza do problema: a abordagem sequencial, também conhecida como *one-way coupling*, ou a abordagem direta, chamada também de *two-way coupling*. A primeira abordagem é apropriada para problemas em que a dependência das variáveis é muito mais sensível em um único sentido, como no caso do processo de soldagem, onde o nível de tensões residuais é diretamente dependente do histórico de temperaturas, mas o aspecto térmico praticamente não é influenciado pelo estado de tensões. Para tal, duas simulações individuais são realizadas, com os resultados de temperatura da simulação

térmica transiente sendo lançados como carregamento de corpo, ou “body loads”, na simulação estrutural transiente. A segunda abordagem é adequada quando a interdependência entre as físicas envolvidas é sensível nos dois sentidos, como por exemplo na simulação de soldagem por resistência elétrica de aços inoxidáveis ferríticos, cujas propriedades termofísicas, elétricas e mecânicas podem sofrer variações consideráveis devido às mudanças microestruturais (Lindgren, 2007). Nesse caso, as simulações devem levar em conta as quatro disciplinas relevantes aos problemas de soldagem (térmica, elétrica, mecânica e microestrutural), e na modalidade direta, já que a interdependência é pronunciada em todos os sentidos. Para os estudos de caso apresentados, uma vez que apenas o aspecto térmico da soldagem é analisado, na forma de comparação de ciclo térmico e de distribuição de temperaturas, apenas uma simulação térmica-transiente é suficiente para fornecer os detalhes requeridos, não sendo necessário lançar mão do aspecto da multifísica.

Outro ponto importante são as não-linearidades presentes no problema, que devem ser levadas em conta apropriadamente. Existem basicamente três tipos de não linearidades: geométricas, de material e de modificação de estado (Madenci e Guven, 2015). No contexto das geométricas, tem-se as grandes deflexões e rotações, presentes quando um componente experimenta grandes deslocamentos em comparação à sua menor dimensão, de modo que sua posição e/ou dimensões originais mudam consideravelmente. Quanto às não-linearidades de material, deve-se observar a variação das propriedades quanto à estímulos presentes no objeto de estudo, como, por exemplo, os modelos de plasticidade que buscam representar o comportamento de um componente fora do regime elástico, e as representações das propriedades como funções da temperatura. Por sua vez, fenômenos que provocam mudanças abruptas na rigidez de um componente, como problemas que envolvem tipos complexos de contato ou ainda adição de massa ao sistema físico, induzem as não-linearidades de modificações de estado.

Em linhas gerais, para a simulação de processos de soldagem a arco elétrico, em casos em que as restrições e as dimensões do componente permitem altos níveis de distorção, têm-se não-linearidades geométricas presentes, e as opções de *large deformation* precisam ser ativadas no software utilizado. As não-linearidades de material estão envolvidas quando as propriedades termo-físicas são fornecidas como funções da temperatura, e quando objeto de estudo são as tensões residuais induzidas pela operação, que são de natureza plástica e, portanto, necessitam da adoção de um modelo de plasticidade para o diagrama tensão-

deformação do material. Já para processos com o uso de metal de adição, a deposição do cordão de solda induz um problema de não-linearidade de mudança de estado que precisa ser levado em conta. Para tal, a maioria dos pacotes comerciais, inclusive o ANSYS MAPDL, utilizado no presente trabalho, se utiliza da técnica chamada *birth and death element*, que consiste na desativação dos elementos do cordão de solda ao início da simulação, e na ativação no instante apropriado de sua deposição durante a operação. A desativação é obtida através da multiplicação da matriz de rigidez, ou de propriedade equivalente do material, dependendo da disciplina envolvida, por um severo fator de redução, o que é desfeito no momento da ativação (ANSYS, 2013). Na pesquisa aqui apresentada, uma vez que o objeto de estudo é o aspecto térmico da soldagem, as não-linearidades de material pela modelagem como funções da temperatura, estão presentes. As de mudança de estado advém da simulação da deposição do cordão de solda através da técnica supracitada.

2.4 O MOVIMENTO DE TECIMENTO NA SIMULAÇÃO DA SOLDAGEM

O tecimento, também conhecido como trançamento ou oscilação, é o movimento secundário realizado durante a soldagem que consiste na execução de movimentos de tecer a medida que o arco elétrico percorre toda a junta a ser soldada. Esses movimentos são extensivamente praticados, principalmente pela capacidade que têm de proporcionar um cordão de solda mais largo, a correta fusão das paredes do chanfro, uma poça de fusão mais estável fora da posição plana, e a expulsão apropriada dos gases envolvidos no procedimento (Coraini, Kobayashi e Gonçalves, 2011). Diversos padrões de tecimento podem ser realizados, a depender do tipo de operação, da perícia do operador e do resultado desejado, mas, apesar das particularidades de cada padrão, pode-se dizer que os parâmetros principais desse movimento são a amplitude de tecimento e sua frequência. A Figura 2.7 mostra alguns dos padrões de tecimento mais comuns.

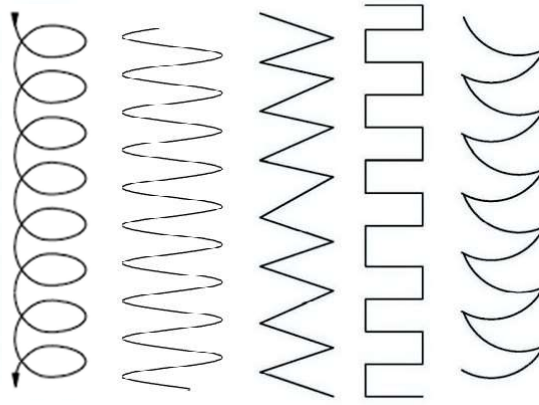


Figura 2.7 - Alguns padrões comuns de tecimento.

Fonte: Adaptado de Santos (2009).

Os modelos das fontes de calor utilizado nas simulações de processos de soldagem englobam apenas o movimento translacional do arco elétrico em sua formulação, ou mesmo movimento nenhum, sendo então necessários ajustes para que o tecimento seja levado em conta. O método mais utilizado para tal, abrangendo majoritariamente um único padrão de tecimento, é chamado de “transformação de coordenadas” (Hu *et al.*, 2006, Chen *et al.*, 2014, Zhan *et. al.*, 2017).

Tal método baseia-se na definição de sistemas de coordenadas auxiliares ao sistema principal que orienta o modelo da fonte de calor, através da aplicação de duas transformações lineares, dadas pelas Equações 2.9 e 2.10, obtidas pela decomposição dos eixos x e z nas direções x' , z' , x'' e z'' , que estão ilustrados na Figura 2.8. Os eixos y , y' e y'' são coincidentes, perpendiculares ao plano do papel, no sentido “para fora”, o que faz com que as transformações lineares apresentadas sejam rotações de $\pi/2 - \beta$ em torno de qualquer um desses eixos, nos sentidos anti-horário e horário, respectivamente. Os eixos z' e z'' definem as direções nas quais a fonte de calor se moverá de modo a executar o tecimento.

$$\begin{cases} x' = x \sin \beta - z \cos \beta \\ y' = y \\ z' = x \cos \beta + z \sin \beta \end{cases} \quad \text{tal que } \beta = \tan^{-1} \left(\frac{v_z}{v_x} \right) \quad (2.9)$$

$$\begin{cases} x'' = x \sin \beta + z \cos \beta \\ y'' = y \\ z'' = -x \cos \beta + z \sin \beta \end{cases} \quad (2.10)$$

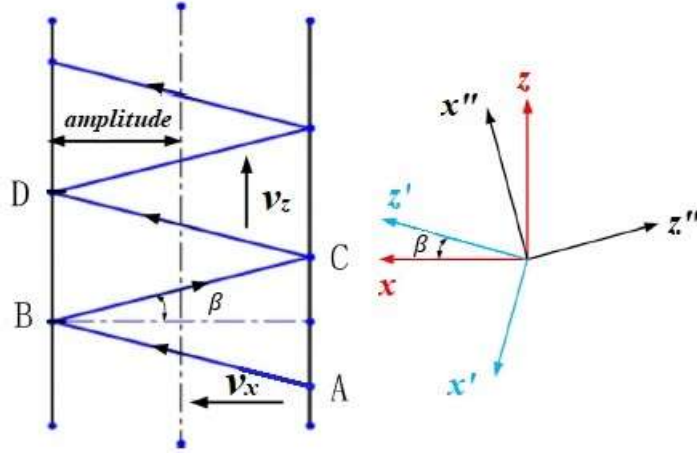


Figura 2.8 - Esquemática do método de transformação de coordenadas.

Fonte: Adaptado de Chen *et al.* (2014).

As transformações lineares são então substituídas no modelo de fonte de calor utilizado, de modo que, caso seja o modelo duplo-elipsoidal, tem-se a necessidade de modificar os semi-eixos a , c_1 e c_2 do duplo-elipsoide que define a fonte de calor pela multiplicação com $\cos \beta$. Como têm-se dois sistemas coordenadas auxiliares, as coordenadas são substituídas duas vezes na Equação 2.8, de modo que quatro equações são necessárias para definir a fonte de calor, como mostram as Equações 2.11 e 2.12.

$$\begin{cases} q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{abc_1\pi\sqrt{\pi}(\cos\beta)^2} e^{\left[-3\left(\frac{(x\sin\beta - z\cos\beta - v_z t)^2}{(a\cos\beta)^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{(x\cos\beta + z\sin\beta - v_x t)^2}{(c_1\cos\beta)^2}\right)\right]} \\ q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{abc_2\pi\sqrt{\pi}(\cos\beta)^2} e^{\left[-3\left(\frac{(x\sin\beta - z\cos\beta - v_z t)^2}{(a\cos\beta)^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{(x\cos\beta + z\sin\beta - v_x t)^2}{(c_2\cos\beta)^2}\right)\right]} \end{cases} \quad (2.11)$$

$$\begin{cases} q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{abc_1\pi\sqrt{\pi}(\cos\beta)^2} e^{\left[-3\left(\frac{(x\sin\beta + z\cos\beta - v_z t)^2}{(a\cos\beta)^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{(-x\cos\beta + z\sin\beta - v_x t)^2}{(c_1\cos\beta)^2}\right)\right]} \\ q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{abc_2\pi\sqrt{\pi}(\cos\beta)^2} e^{\left[-3\left(\frac{(x\sin\beta + z\cos\beta - v_z t)^2}{(a\cos\beta)^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{(-x\cos\beta + z\sin\beta - v_x t)^2}{(c_2\cos\beta)^2}\right)\right]} \end{cases} \quad (2.12)$$

Apesar de tal abordagem produzir bons resultados para o parâmetro que representa, conforme pode ser atestado em Hu *et al.* (2006) e Chen *et al.* (2014), algumas limitações podem ser observadas. Em primeiro lugar, as dificuldades de implementação em rotinas para a simulação, uma vez que muitos termos estão envolvidos nas equações, que são bastante complexas, demandando um elevado número de estruturas condicionais e de repetição. Em segundo lugar, a falta de flexibilidade para implementar outros padrões de tecimento, uma vez que a modelagem matemática restringe o tecimento apenas ao padrão onda triangular, o que torna o método incapaz de modelar padrões mais complexos.

Dessa forma, o presente trabalho busca propor um modelo matemático mais abrangente, capaz de promover a implementação de padrões genéricos de tecimento para a simulação de operações de soldagem com tecimento pelo método dos elementos finitos, independente do padrão utilizado e do modelo de fonte de calor adotado.

CAPÍTULO III

MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO

3.1 PARAMETRIZAÇÃO DO CAMINHO

O método de parametrização do caminho, proposto como uma alternativa ao método de transformação de coordenadas, baseia-se na descrição do percurso do ponto de incidência do arco elétrico na peça de trabalho durante o tecimento, que corresponde ao centro da distribuição duplo-elipsoidal no modelo matemático, como uma curva parametrizada.

Uma curva parametrizada no espaço pode ser definida como uma função contínua que, para cada valor de um parâmetro t definido num intervalo aberto $I = (a, b)$ da reta dos reais, associa um ponto do espaço cujas coordenadas são definidas como funções desse referido parâmetro. Matematicamente, a parametrização é uma função $f: I \in \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^3 \mid t \rightarrow (x_o(t), y_o(t), z_o(t))$. Conhecendo a equação f da curva parametrizada, pode-se fazer a substituição apropriada na Equação 2.8 da distribuição duplo-elipsoidal, de modo a alterar a posição do centro da distribuição, e fazê-la mover-se de acordo com o caminho a ser percorrido pelo arco incidente, dado pela tríade ordenada $(x_o(t), y_o(t), z_o(t))$ de f . Tal substituição é obtida de acordo com a Equação 3.1.

$$\begin{cases} x = x - x_o(t) \\ y = y - y_o(t) \\ z = z - z_o(t) \end{cases} \quad (3.1)$$

A equação que define a distribuição duplo-elipsoidal fica representada de acordo com a Equação 3.2.

$$\begin{cases} q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{abc_1\pi\sqrt{\pi}} e^{\left[-3\left(\frac{(x-x_0(t))^2}{a^2} + \frac{(y-y_0(t))^2}{b^2} + \frac{(z-z_0(t))^2}{c_1^2}\right)\right]} \\ q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{abc_2\pi\sqrt{\pi}} e^{\left[-3\left(\frac{(x-x_0(t))^2}{a^2} + \frac{(y-y_0(t))^2}{b^2} + \frac{(z-z_0(t))^2}{c_2^2}\right)\right]} \end{cases} \quad (3.2)$$

Assim, o objetivo principal da metodologia é obter a função $f(t) = (x_o(t), y_o(t), z_o(t))$ que parametriza o percurso percorrido pelo arco elétrico durante o tecimento. Conforme destacado na seção 2.3, apesar das peculiaridades de cada padrão de tecimento, os principais parâmetros de movimento são a amplitude e a frequência de tecimento. Além desses, alguns parâmetros geométricos da junta são também relevantes quanto ao procedimento de parametrização. A Figura 3.1 mostra os principais parâmetros geométricos para uma junta de chanfro em V, uma das mais comumente encontradas na preparação de chapas para operações de soldagem.

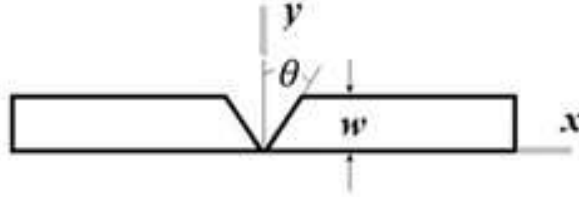


Figura 3.1 – Parâmetros geométricos para a parametrização.

Fonte: Autor.

Diferentes padrões de tecimento apresentam diferentes níveis de complexidade, sendo alguns mais facilmente representados matematicamente por $f(t)$ do que outros. No presente trabalho, três abordagens distintas para a obtenção da parametrização dos padrões de tecimento são propostas, cada uma para um dado nível de complexidade do padrão. Tais abordagens foram chamadas de procedimento direto, por Fourier e indireto.

3.2 PROCEDIMENTO DIRETO

O procedimento direto consiste em obter a função que parametriza a curva que representa o caminho a ser percorrido pelo arco elétrico durante o tecimento a partir de relações matemáticas simples. Apenas alguns padrões bastante simples permitem esse tipo

de parametrização, conforme ilustrado a seguir para o tecimento oscilatório simples, oscilatório com mergulho, e em espiral.

3.2.1 Tecimento Oscilatório Simples

O tecimento oscilatório simples diz respeito ao movimento em “zig-zag” da tocha de soldagem, fixo ao plano superior da chapa. O movimento, segundo o sistema de eixos e os parâmetros estabelecidos na Figura 3.1, é dado pela oscilação na coordenada x segundo uma função sinusoidal de amplitude igual à abertura do chanfro $w \operatorname{tg} \theta$, que de fato é a amplitude do tecimento, e frequência igual à frequência de tecimento f , o avanço na coordenada z correspondendo à translação da tocha de soldagem com velocidade v , tudo isso restrito ao plano superior da chapa de espessura w na coordenada y . A parametrização correspondente a tal movimento está mostrada na Equação 3.3.

$$\begin{cases} x_0(t) = w \operatorname{tg} \theta \operatorname{sen} 2\pi f t \\ y_0(t) = w \\ z_0(t) = vt \end{cases} \quad (3.3)$$

A curva obtida com tal parametrização, para os parâmetros geométricos dados na Tabela 3.1, utilizados a título de exemplo, é exibida na Figura 3.2. Os códigos utilizados para a exibição de todas as parametrizações aqui apresentadas, via MATLAB, estão no Anexo A.

Tabela 3.1 – Parâmetros para simulação do caminho parametrizado.

$w \text{ (m)}$	0,005
$l \text{ (m)}$	0,1
$\theta \text{ (}^\circ\text{)}$	45
$v \text{ (m/s)}$	0,005
$f \text{ (Hz)}$	0,5

Fonte: Autor.

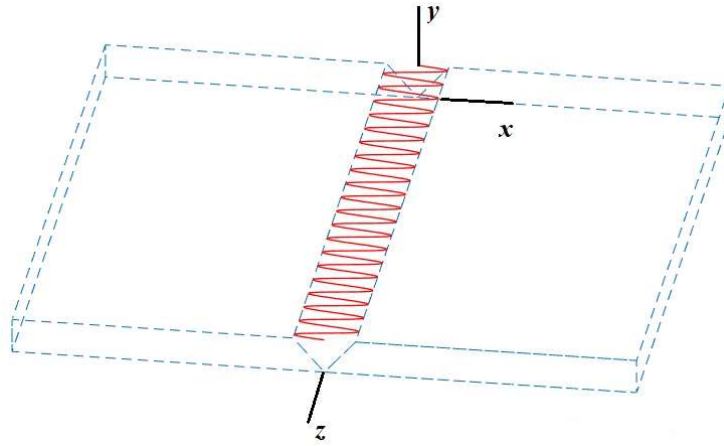


Figura 3.2 – Parametrização do tecimento oscilatório simples para a parametrização apresentada.

Fonte: Autor.

3.2.2 Tecimento Oscilatório com Mergulho

Para implementar o movimento de mergulho ao tecimento oscilatório simples, basta observar que, em comparação à Equação 3.3, a coordenada $y_o(t)$ não mais permanece constante, uma vez que o movimento não está mais restrito a um plano paralelo ao plano coordenado xz . Ao invés disso, a partir da análise da Figura 3.1, pode-se encontrar uma relação entre as coordenadas $x_o(t)$ e $y_o(t)$, a partir da equação da reta que define o chanfro, conforme a Equação 3.4.

$$y = \left| \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) x \right| = |\cot \theta x| \quad (3.4)$$

Uma vez que se tem a relação entre as coordenadas x e y , a Equação 3.3 pode ser reescrita para incluir a mergulho, segundo a Equação 3.5.

$$\begin{cases} x(t) = w \operatorname{tg} \theta \operatorname{sen} 2\pi f t \\ y(t) = \cot \theta x(t) \quad , \text{ para } x > 0 \\ z(t) = vt \end{cases} \quad (3.5)$$

$$\begin{cases} x(t) = w \operatorname{tg} \theta \operatorname{sen} 2\pi f t \\ y(t) = -\cot \theta x(t) \quad , \text{ para } x \leq 0 \\ z(t) = vt \end{cases}$$

A simulação do movimento de tecimento descrito pela Equação 3.5, usando os mesmos parâmetros da Tabela 3.1, está na Figura 3.3.

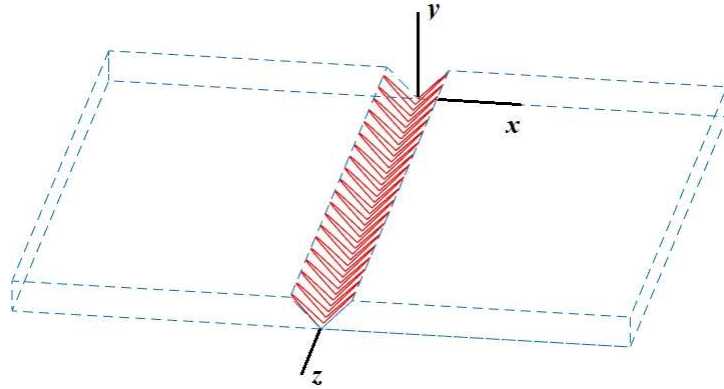


Figura 3.3 – Parametrização do tecimento oscilatório com mergulho para a parametrização apresentada.

Fonte: Autor.

3.2.3 Tecimento em Espiral

O padrão de tecimento em espiral pode ser representado pela equação paramétrica de um círculo no plano $y = w$, cujo ponto central se move ao longo de z com a velocidade igual à velocidade de soldagem. Ou seja, partindo da parametrização padrão do círculo, utilizando a substituição da coordenada z segundo a Equação 3.1, chega-se à Equação 3.6. A parametrização está mostrada na Figura 3.4.

$$\begin{cases} x_0(t) = w \operatorname{tg} \theta \operatorname{sen} 2\pi f t \\ y_0(t) = w \\ z_0(t) = vt + w \operatorname{tg} \theta \cos 2\pi f t \end{cases} \quad (3.6)$$

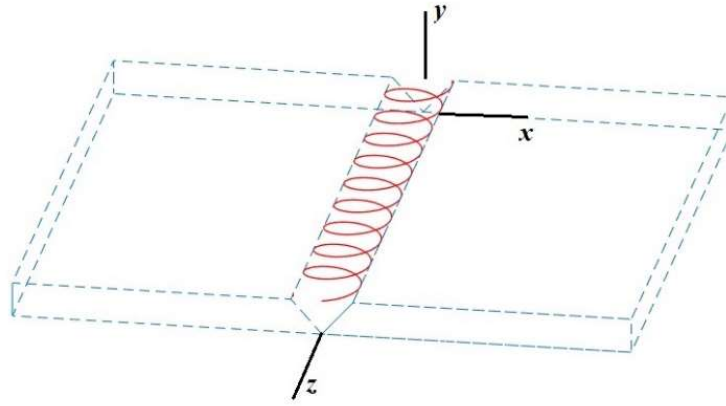


Figura 3.4 – Parametrização do tecido em espiral.

Fonte: Autor.

3.3 PROCEDIMENTO POR FOURIER

Para alguns padrões de tecido, o procedimento direto para parametrização se torna inviável por duas razões principais: dificuldade ou impossibilidade de descrever o movimento a partir de relações matemáticas óbvias, e/ou necessidade de muitas expressões para que o movimento seja representado. Para esses casos, uma alternativa interessante é o emprego da série de Fourier correspondente à função que descreve o padrão na parametrização.

Uma série de Fourier é a representação de uma dada função periódica na forma de uma soma infinita de funções trigonométricas simples. Matematicamente, a Equação 3.7 descreve a série de Fourier de uma função f com período $2L$ (Matos, 2017).

$$\left\{ \begin{array}{l} f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos\left(\frac{n\pi t}{L}\right) + b_n \sin\left(\frac{n\pi t}{L}\right) \right) \\ a_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(t) \cos\left(\frac{n\pi t}{L}\right) dt \\ b_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(t) \sin\left(\frac{n\pi t}{L}\right) dt \end{array} \right. \quad (3.7)$$

Onde n diz respeito ao número de termos levados em conta na série, de modo que, quanto maior for seu valor, mais próxima de f a representação em série fica. Dessa forma, conhecendo a representação em série de um dado padrão, pode-se utilizá-la, com um número apropriado de termos para dar detalhamento o suficiente, para representá-lo. Os casos do tecimento em onda triangular e onda quadrada, ambos com e sem mergulho, são apresentados como exemplos.

3.3.1 Tecimento em Onda Triangular

Utilizando a representação em série de Fourier para a onda triangular, considerando os eixos coordenados da Figura 3.1, com a translação principal do arco elétrico ocorrendo ao longo do eixo z , e a onda presa ao plano $y = w$, paralelo ao plano xz , tem-se a parametrização da Equação 3.8, que fornece o tecimento da Figura 3.5, ilustrado para diferentes números de termos n .

$$\left\{ \begin{array}{l} x_o(t) = \frac{8w \tan\theta}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \text{sen}\left(\frac{n\pi}{2}\right) \frac{\text{sen}(2n\pi ft)}{n^2} \\ y_o(t) = w \\ z_o(t) = vt \end{array} \right. \quad (3.8)$$

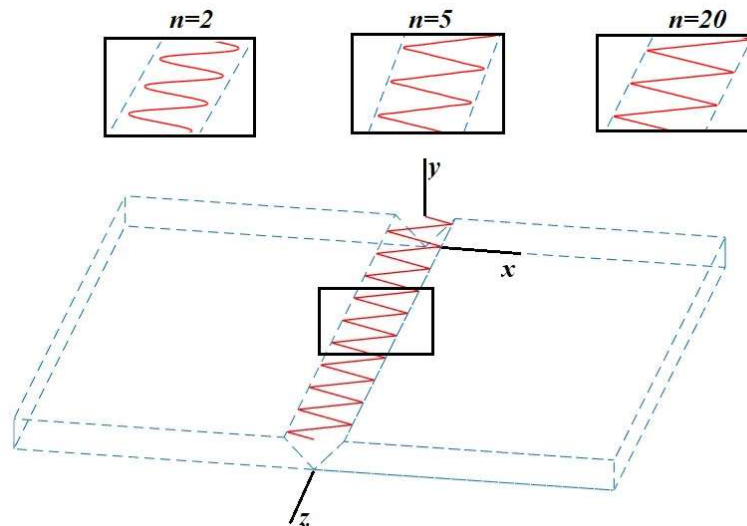


Figura 3.5 – Parametrização do tecimento em onda triangular para diferentes quantidades de termos na série de Fourier.

Fonte: Autor.

Da análise da Figura 3.5 e da Equação 3.8, pode-se observar que o equacionamento para o tecimento oscilatório simples, dado pela Equação 3.3, pode representar o tecimento em onda triangular, desde que com a mesma frequência e amplitude, uma vez que é um dos componentes da série de Fourier dessa parametrização.

Para a implementação do mergulho, pode-se utilizar a mesma relação apresentada na Equação 3.4, de modo que a parametrização é dada pela Equação 3.9.

$$\left\{ \begin{array}{l} x_0(t) = \frac{8w \operatorname{tg} \theta}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi}{2}\right) \frac{\operatorname{sen}(2n\pi f t)}{n^2} \\ y_0(t) = \operatorname{cotg} \theta x(t) \\ z_0(t) = vt \end{array} \right. , \text{ para } x > 0 \quad (3.9)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} x_0(t) = \frac{8w \operatorname{tg} \theta}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi}{2}\right) \frac{\operatorname{sen}(2n\pi f t)}{n^2} \\ y_0(t) = -\operatorname{cotg} \theta x(t) \\ z_0(t) = vt \end{array} \right. , \text{ para } x \leq 0$$

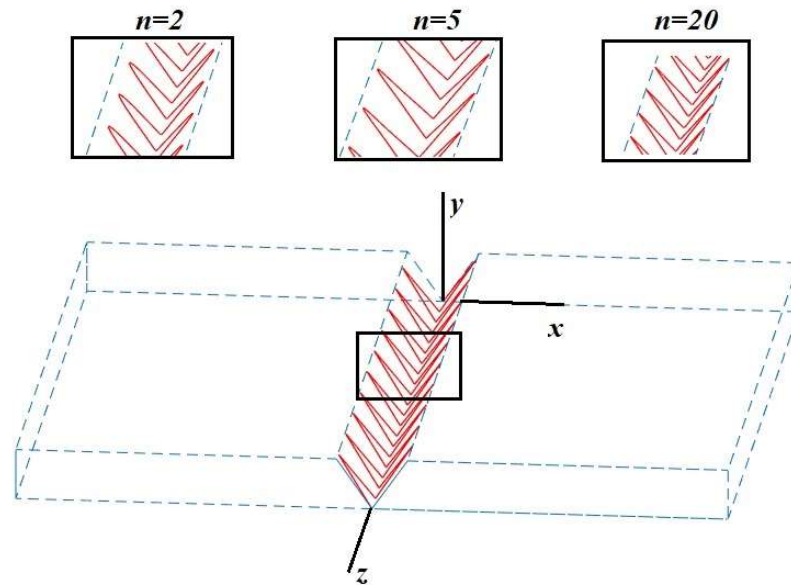


Figura 3.6 – Parametrização da onda triangular com mergulho para diferentes quantidades de termos na série de Fourier.

Fonte: Autor.

3.3.2 Tecimento em Onda Quadrada

Utilizando a representação de Fourier, análogo ao proposto na seção anterior, a parametrização para a onda quadrada é estabelecida pelas Equações 3.10 e 3.11, sem e com mergulho, e exibidas nas Figuras 3.7 e 3.8, respectivamente.

$$\left\{ \begin{array}{l} x_0(t) = \frac{4w \operatorname{tg} \theta}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n-1} \operatorname{sen}((2n-1)2\pi ft) \\ y_0(t) = w \\ z_0(t) = vt \end{array} \right. \quad (3.10)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} x_0(t) = \frac{4w \operatorname{tg} \theta}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n-1} \operatorname{sen}((2n-1)2\pi ft) \\ y_0(t) = \operatorname{cotg} \theta x(t) \\ z_0(t) = vt \end{array} \right. , \text{ para } x > 0 \quad (3.9)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} x_0(t) = \frac{4w \operatorname{tg} \theta}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n-1} \operatorname{sen}((2n-1)2\pi ft) \\ y_0(t) = -\operatorname{cotg} \theta x(t) \\ z_0(t) = vt \end{array} \right. , \text{ para } x \leq 0$$

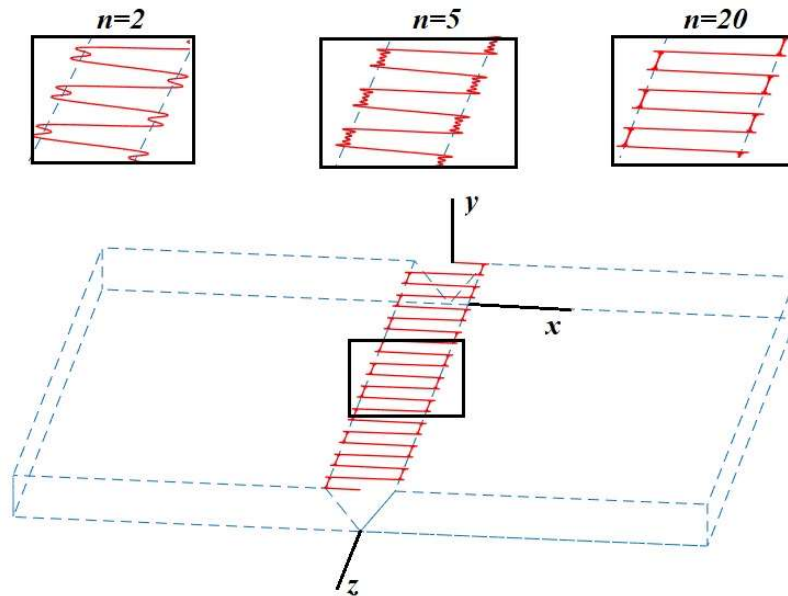


Figura 3.7 – Parametrização do tecimento em onda quadrada para diferentes termos na série de Fourier.

Fonte: Autor.

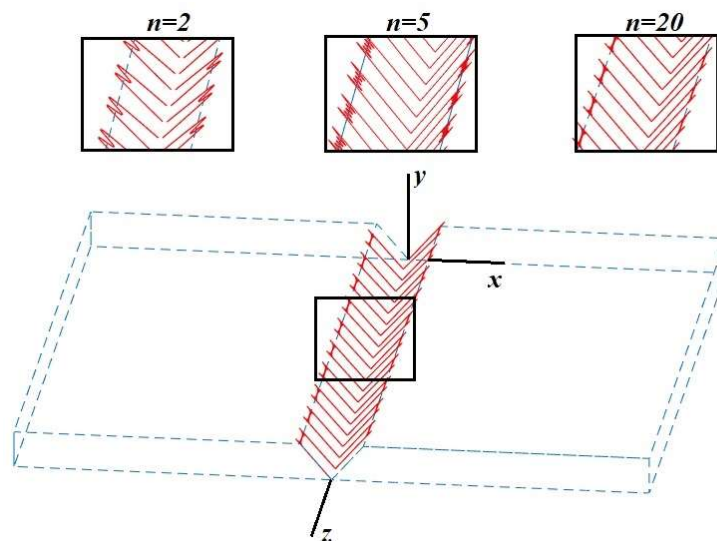


Figura 3.8 – Parametrização do tecimento onda quadrada com mergulho para diferentes termos na série de Fourier.

Fonte: Autor.

3.4 PROCEDIMENTO INDIRETO

Para padrões sem representação matemática simples, e que não tem uma função facilmente descrita por uma série de Fourier, indica-se o aqui descrito procedimento indireto. Ele diz respeito à parametrização da curva do tecimento a partir da utilização de um software de captura de pontos ordenados em um conjunto de eixos determinado na imagem. Pela seleção de múltiplos pontos que fazem parte da curva, o software fornece o par/trio ordenado do ponto, que, ao ser posicionado numa tabela, constitui a curva do tecimento a ser utilizada na simulação pelo MEF como centro da fonte de calor, na forma de um *array* de dados. Como exemplo de tal abordagem, apresenta-se o padrão de tecimento em meia lua, que não possui parametrização nem pelo método direto, tampouco com a ajuda das séries de Fourier.

Desenhou-se um croqui de uma chapa com as dimensões apropriadas em escala, e um caminho representando o tecimento. Em seguida, utilizando o software aberto *GetData Graph Digitalizer*, a partir de uma foto tirada do croqui, definiu-se eixos coordenados e os pontos sobre a curva do tecimento no primeiro ciclo. Utilizando a rotina para plotar a parametrização, produziu-se a repetição do ciclo ao longo da junta, e o resultado obtido está mostrado na Figura 3.9. Todos os códigos, croqui e tabela estão apresentados no Anexo A.

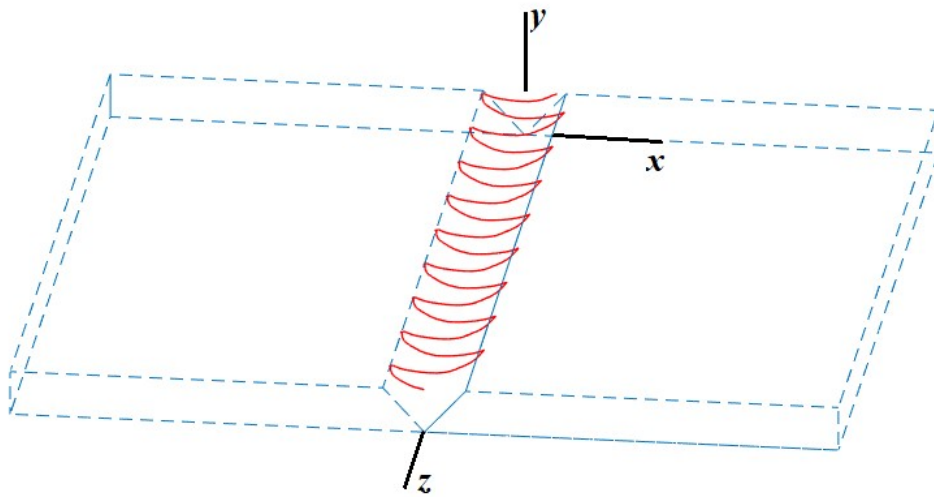


Figura 3.9 – Parametrização do padrão meia-lua pelo procedimento indireto.

Fonte: Autor.

Assim, os três procedimentos propostos permitem a obtenção de padrões de tecimento dos mais variados níveis de complexidade, e, conseqüentemente, a simulação de operações de soldagem com diferentes tipos de tecimento, o que pode fornecer informações valiosas quanto ao ciclo térmico das peças soldadas. No próximo capítulo, serão descritos os estudos de caso realizados no trabalho com o objetivo de validar o método aqui proposto e descrito.

CAPÍTULO IV

ESTUDOS DE CASO

4.1 CASO Hu *et al.* (2006)

Hu *et al.* (2006) desenvolveu um dos trabalhos pioneiros na simulação de operações de soldagem com tecimento, utilizando o método de transformação de coordenadas para implementação. Em seu trabalho, publicado na *Science and Technology of Welding and Joining*, o ciclo térmico de pontos específicos de uma chapa submetida a um processo de soldagem MIG automatizada, com tecimento em onda triangular, foi obtido experimentalmente. Então, eles procederam a comparação de tais resultados com o ciclo térmico obtido numericamente pelo MEF, com o tecimento sendo implementado pelo método da transformação de coordenadas, e boa acurácia foi observada.

A análise realizada por Hu *et al.* (2006) é replicada aqui, com o objetivo de estabelecer a comparação do método de parametrização do caminho, em tecimento oscilatório, de acordo com a metodologia proposta no trabalho, com o método da transformação das coordenadas e os resultados experimentais lá apresentados. O software comercial ANSYS 16 MAPDL foi utilizado para a simulação pelo método dos elementos finitos.

A Figura 4.1 traz a representação da geometria da chapa analisada, com dimensões $300 \times 200 \times 20 \text{ mm}$, bem como a malha utilizada na simulação por elementos finitos. O cordão de solda tem a extensão de 240 mm , tomando lugar a 30 mm de ambas as extremidades da chapa, tendo sido modelado por toda dimensão longitudinal, com a deposição do cordão de solda sendo adequadamente simulada através da técnica *birth and death element*. Destaque para o ponto A, no qual o ciclo térmico é avaliado experimental e numericamente, com o tecimento implementado pela transformação de coordenadas, em Hu *et al.* (2006), e também no qual o ciclo térmico será coletado no presente trabalho, utilizando o método proposto para a simulação. A malha é composta por elementos hexagonais de 8 nós do tipo SOLID70, adequado para esse tipo de simulação (ANSYS, 2013), similares aos

utilizados por Hu *et al.* (2006), com refinamento na região do cordão. Ao todo, ela conta com 24556 elementos, totalizando 31070 nós.

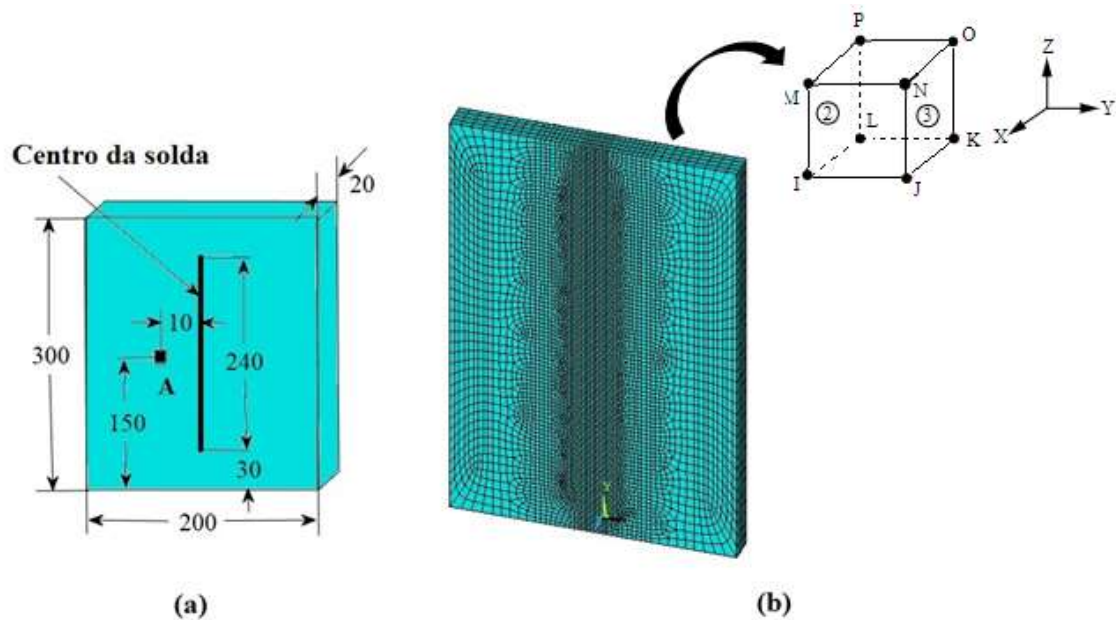


Figura 4.1 – Geometria (a) e malha utilizada na simulação (b) da chapa de Hu *et al.* (2006).

Fonte: Autor.

O material utilizado na chapa por Hu *et al.* (2006) é o aço 10Ni-5Cr-Mo-V, considerado o mesmo do cordão de solda, que tem as propriedades termofísicas com dependência da temperatura apresentadas na Figura 4.2.

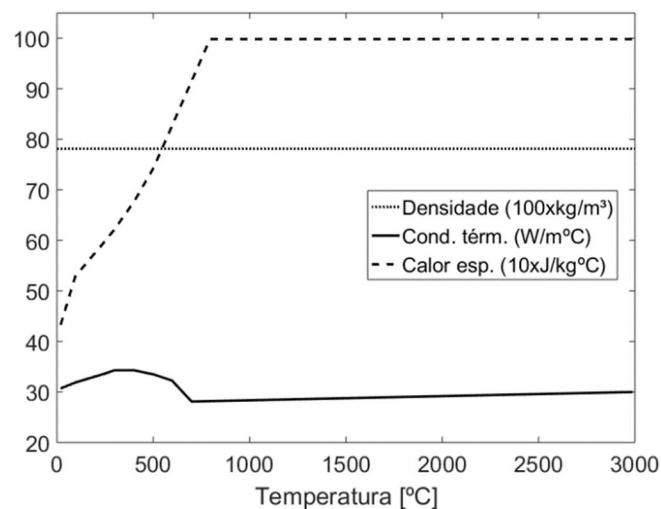


Figura 4.2 – Propriedades termofísicas do aço 10Ni-5Cr-Mo-V.

Fonte: Hu *et al.* (2006).

Os parâmetros de soldagem e de tecimento utilizados por Hu *et al.* (2006) estão representados na Tabela 4.1, seguindo a mesma notação descrita na seção anterior, com $w \operatorname{tg} \theta$ sendo a amplitude de tecimento. Os parâmetros da distribuição duplo-elipsoidal foram os mesmos utilizados por Hu *et al.* (2006).

Tabela 4.1 - Parâmetros da soldagem com tecimento de Hu *et al.* (2006).

U	I	v	η	$w \operatorname{tg} \theta$	f
23 V	150 A	1 mm/s	0,75	10 mm	0,5 Hz

Fonte: Hu *et al.* (2006).

Considerando o comprimento efetivo de 240 mm do cordão de solda, e a velocidade de soldagem de 1 mm/s, tem-se que o processo ocorre no intervalo de 240 s, com todo o tempo adicional, até 600 s, sendo referente ao resfriamento da peça soldada.

Como condições iniciais, tem-se temperatura uniforme em toda a peça, e igual à temperatura ambiente e do fluxo externo, adotada como 0 °C, tal como feito por Hu *et al.* (2006). Como condição de contorno, toma-se o coeficiente convectivo combinado h_{comb} , que engloba os efeitos de convecção e de radiação, dados pelas Equações 2.3 e 2.4, conforme a Equação 4.1.

$$h_{comb} = \frac{\varepsilon \sigma (T^4 - T_{amb}^4)}{T - T_{amb}} + h \quad (4.1)$$

Uma emissividade ε de 0,5 e um coeficiente convectivo h de 20 W/m² °C são adotados. Os dados a serem comparados são a distribuição de temperaturas na linha da superfície externa na seção transversal central da chapa, bem como o ciclo térmico do ponto A dessa linha. Os códigos em APDL para os estudos de caso estão no apêndice B.

4.2 CASO EXPERIMENTAL

Buscando consolidar a validação da metodologia, procedeu-se a realização de uma comparação numérica-experimental própria do ciclo térmico em chapas submetidas à

soldagem com tecimento. Para tal, 3 chapas de aço, com dimensões e malha utilizada na simulação ilustradas na Figura 4.3, foram soldadas pelo processo MAG, utilizando um procedimento semiautomático. Devido dificuldades logísticas, bem como a grande espessura da chapa, o que induziria a necessidade de múltiplos passes para preenchimento da junta, algo que fugia ao escopo do trabalho, optou-se por depositar a solda na superfície superior das chapas, sem abertura de chanfro. Tal consideração não traz empecilho algum, haja vista a versatilidade das simulações numéricas pelo MEF em representar o problema estudado.

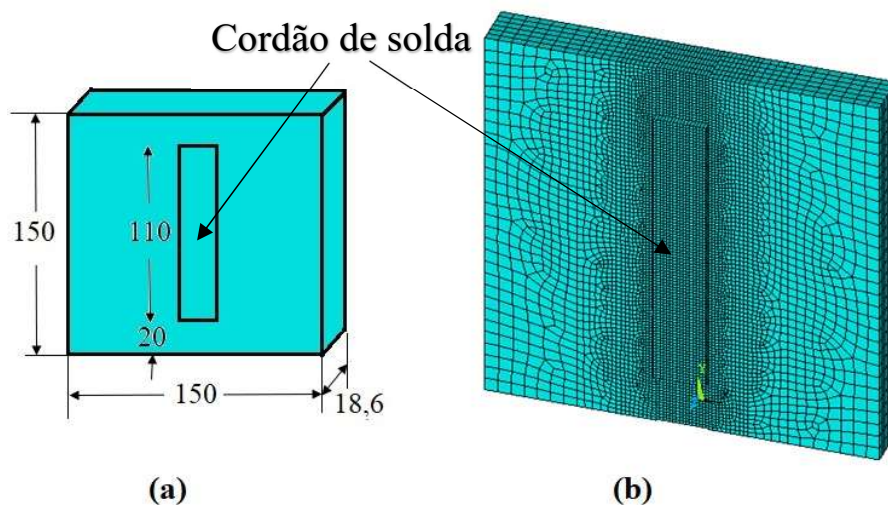


Figura 4.3 – Geometria (a) e malha utilizada na simulação (b) da chapa soldada.

Fonte: Autor.

A malha apresenta 33004 elementos, do mesmo tipo utilizado no estudo de caso anterior, com 42702 nós, e o reforço do cordão, não ilustrado na Figura 4.3, é de 2,9 mm. O material das chapas soldadas foi o aço SAE 1020, cujas propriedades estão ilustradas na Figura 4.4, e os parâmetros de soldagem e tecimento empregados estão presentes na Tabela 4.2. Além disso, o *stickout* estabelecido foi de 15 mm, o gás utilizado foi o x com vazão de 20 l/min, e o metal de adição foi o arame tubular de baixa liga MC-80Ni1, aplicado para obtenção de soldas de alta resistência.

Tabela 4.2 – Parâmetros de soldagem e tecimento empregados no experimento.

U	I	v	η	$w \tan \theta$	f
23 V	180 A	2 mm/s	0,75	10 mm	0,5 Hz

Fonte: Autor.

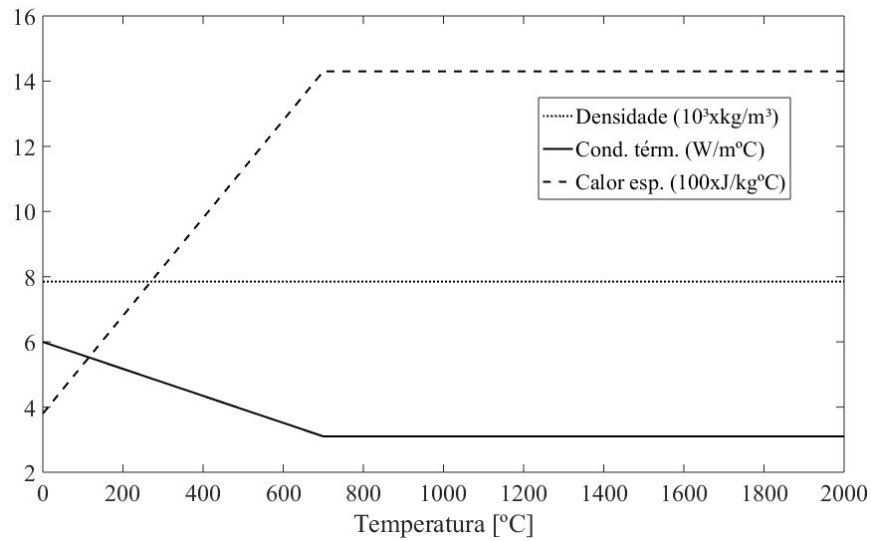


Figura 4.4 – Propriedades termofísicas do aço SAE 1020.

Fonte: Teng *et al.* (2003).

O procedimento é dito semi-automático pois foi utilizada um sistema tartílope para controle da velocidade de avanço, mas o movimento de tecimento no padrão oscilatório foi realizado manualmente com o auxílio de um dispositivo limitador de amplitude, ilustrado na Figura 4.5. Não foi aberto chanfro, e o cordão foi apenas depositado sobre a superfície da chapa. Dois termopares K com leitura feita por Arduino, chamados 1 e 2, foram posicionados a 10 mm e 22 mm de distância do cordão, respectivamente, conforme registra a Figura 4.6, com a ponta distando 5 mm da superfície superior da chapa, com o objetivo de registrar o ciclo térmico desses pontos para comparar com a simulação.

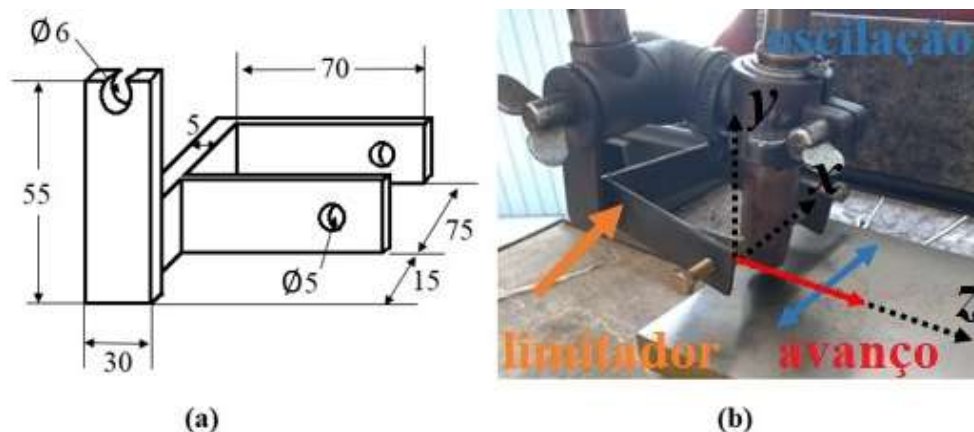


Figura 4.5 – Dimensões (a) e posicionamento (b) do limitador de amplitude de tecimento.

Fonte: Autor.

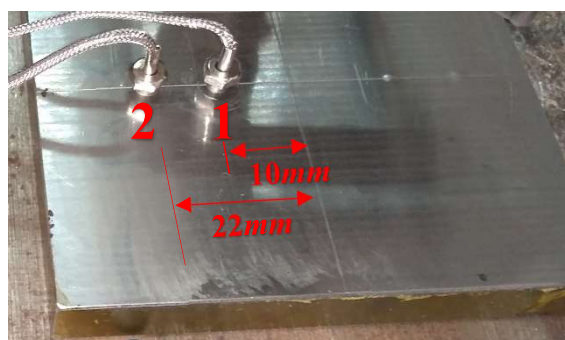


Figura 4.6 – Posicionamento dos termopares 1 e 2 através da superfície inferior da chapa para registro do ciclo térmico.

Fonte: Autor.

A bancada para as medições experimentais está ilustrada na Figura 4.7. Para a simulação, as mesmas condições de contorno utilizadas para o caso Hu *et al.* (2006). Os parâmetros da distribuição duplo-elipsoidal foram $a = c_1 = 8,4 \text{ mm}$, $b = 3 \text{ mm}$ e $c_2 = 12 \text{ mm}$, obtidos a partir da observação da geometria da poça de fusão obtida. Os termos $f_f = 1,4$ e $f_r = 0,6$ foram adotados seguindo o sugerido por Hu *et al.* (2006).

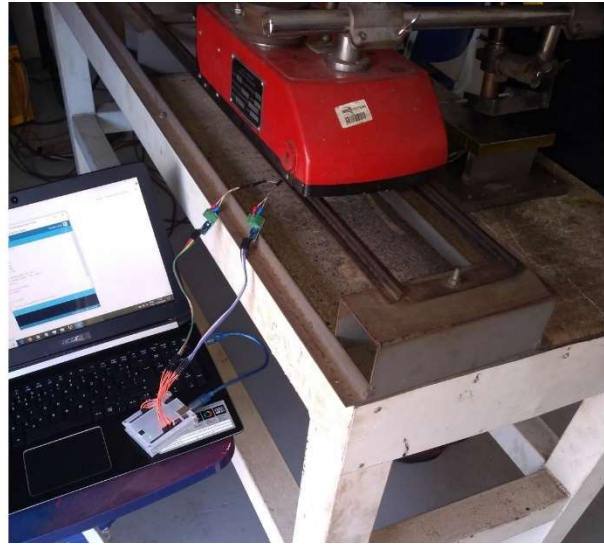
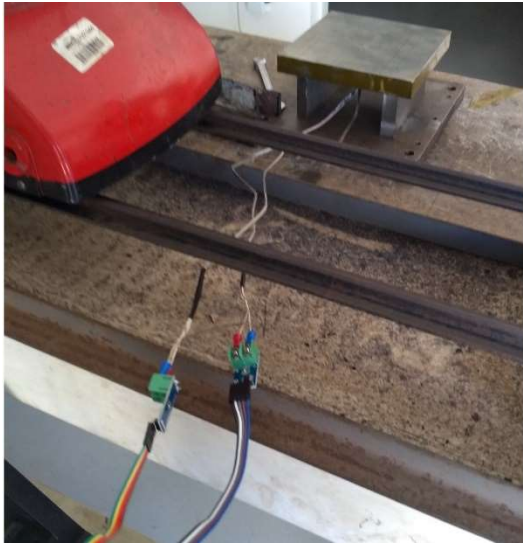


Figura 4.7 – Aparato para medição das temperaturas durante o estudo de caso experimental.

Fonte: Autor.

CAPÍTULO V

RESULTADOS E CONCLUSÕES

5.1 RESULTADOS DO CASO Hu *et al.* (2006)

A Figura 5.1 apresenta a distribuição de temperaturas em contornos para três instantes distintos durante a execução do tecimento, no exato instante em que a fonte de calor passa pela seção transversal central que contém o ponto A, segundo o definido pela Figura 4.1, podendo ser observado o deslocamento da região de máxima temperatura de acordo com o padrão de movimento. A região do cordão sem contornos corresponde aos elementos na condição de desativados, esperando deposição.

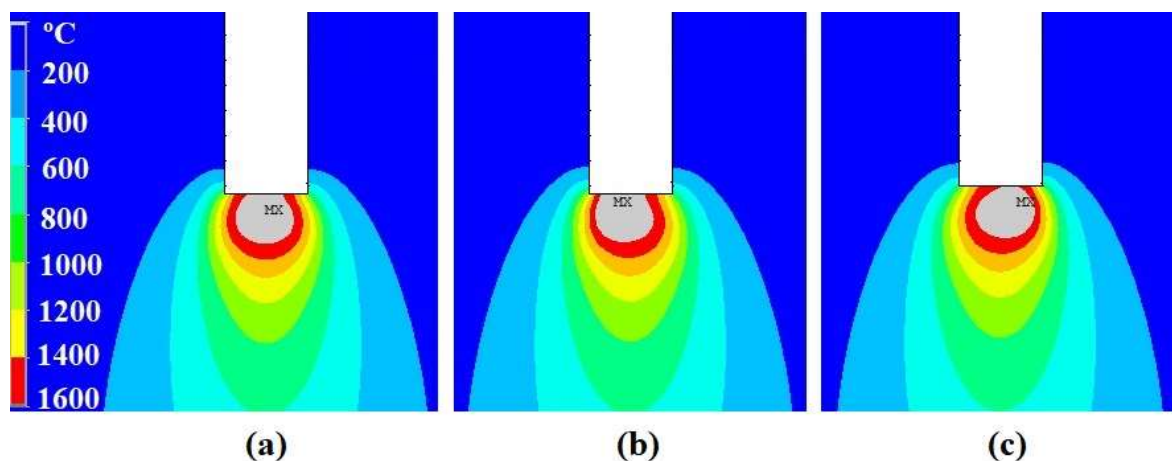


Figura 5.1 – Distribuição de temperaturas na forma de contornos para os instantes 120 s (a), 120.5 s (b) e 121.5 s (c).

Fonte: Autor.

A Figura 5.2 faz a comparação entre o ciclo térmico do ponto A obtido pela parametrização caminho para implementação do tecimento, e os resultados de Hu *et al.* (2006).

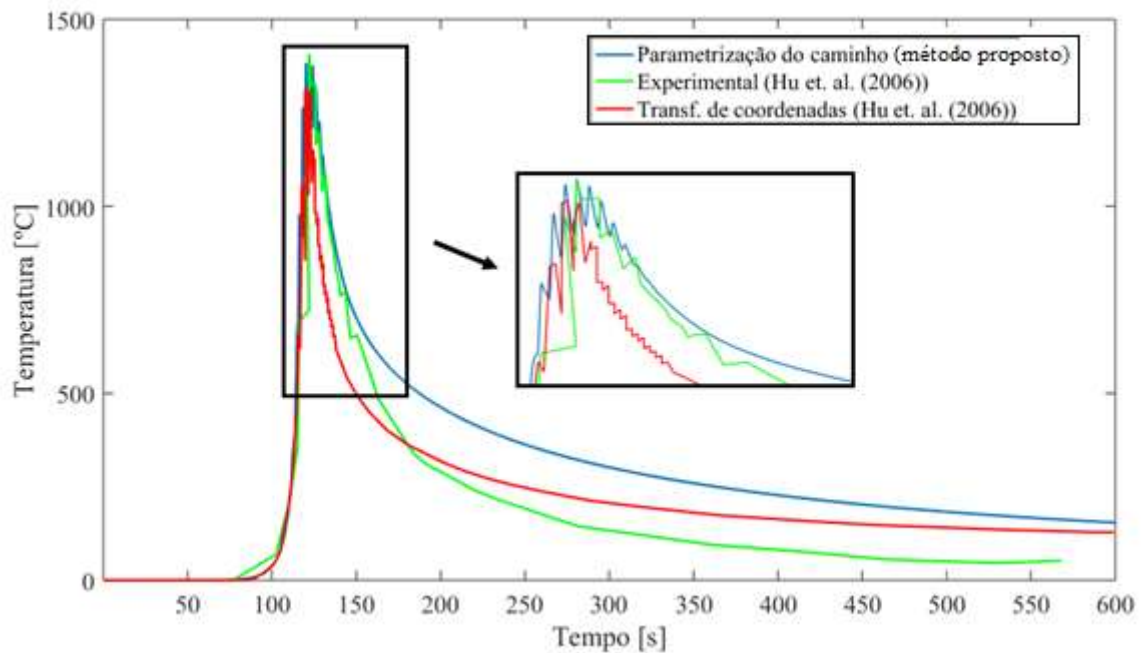


Figura 5.2 - Comparação entre os ciclos térmicos obtidos por Hu *et al.* (2006) experimentalmente e pela transformação de coordenadas e o obtido pela parametrização do caminho.

Fonte: Autor.

Quanto ao ciclo térmico, nos instantes de mais altas temperaturas, o método de parametrização do caminho se comportou de forma mais condizente com os resultados experimentais, tanto quantitativamente – o pico de temperatura experimental e pela simulação com transformação de coordenadas, de acordo com Hu *et al.* (2006), foram de 1363°C e 1315°C, respectivamente, enquanto que pela parametrização do caminho foi de 1383°C, o que significa um erro de aproximadamente 1.47% para mais, no caso da parametrização do caminho, e de 3.5% para menos, no caso da transformação de coordenadas – quanto qualitativamente – a oscilação da temperatura de pico, bem como o instante em que os níveis começam a apresentar queda foram melhor capturados pela parametrização do caminho.

No entanto, na ocasião do resfriamento, apesar da simulação pela transformação de coordenadas acompanhar o resultado experimental de forma mais próxima, ainda que com algum distanciamento, duas considerações são feitas: em primeiro lugar, durante o resfriamento, o arco elétrico não mais atua aquecendo a peça, o que portanto isenta o método de parametrização do caminho quanto a tal diferenciação dos resultados, e em segundo lugar, essa tendência apenas ocorreu em níveis de temperaturas abaixo daqueles nos quais as principais transformações microestruturais são observadas. Portanto, fica bastante evidente a boa caracterização do fenômeno obtida com a parametrização do caminho.

A Figura 5.3 ilustra a distribuição espacial de temperaturas na linha da superfície externa da seção transversal central da chapa, na qual está contido o ponto A, no exato instante em que a fonte de calor passa por ela.

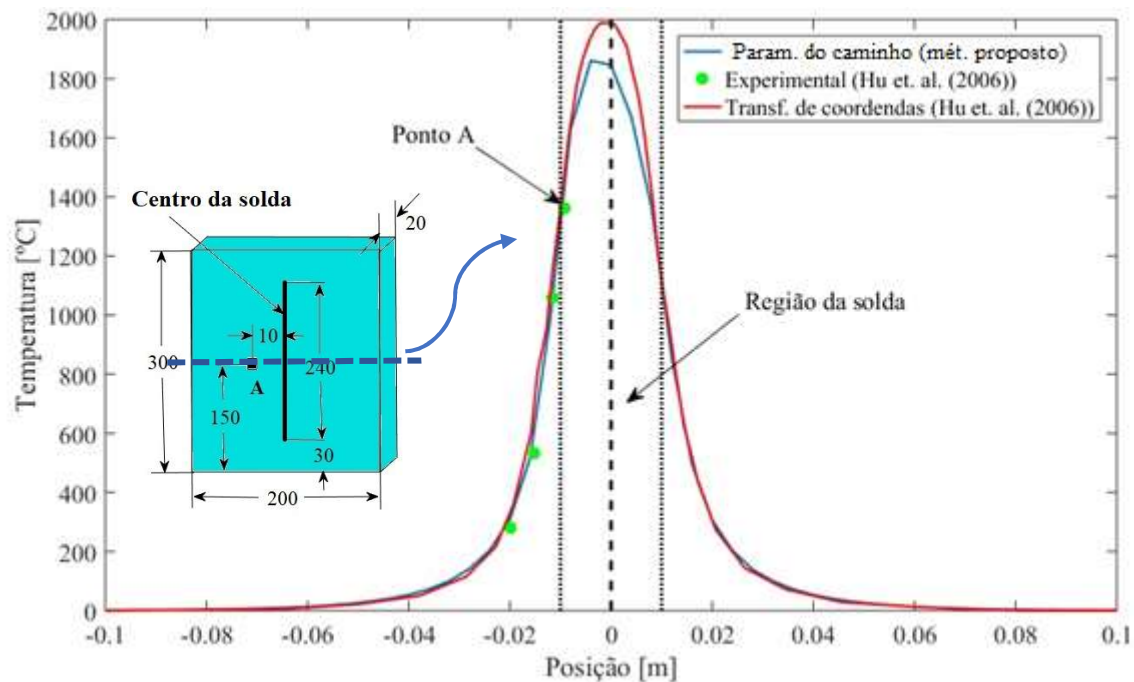


Figura 5.3 - Comparação da distribuição de temperaturas obtidas experimentalmente e com a transformação de coordenadas por Hu *et al.* (2006), e com o método da parametrização do caminho.

Fonte: Autor.

Destaca-se aqui que o nível de temperatura máxima alcançado pela parametrização do caminho foi de 1861°C, enquanto que pela transformação de coordenadas foi bem próximo dos 2000°C, ambas altas o bastante para promover a fusão do aço. Além disso,

houve uma excelente representação, tanto pelo método aqui proposto, quanto pelos resultados numéricos de Hu *et al.* (2006) pela transformação de coordenadas, quando comparados às temperaturas nos 4 pontos experimentais observados, o que ratifica a capacidade do método de parametrização do caminho em representar satisfatoriamente a operação de soldagem com tecimento nas simulações.

5.2 RESULTADOS DO CASO EXPERIMENTAL

O aspecto dos cordões de solda obtidos nas três amostras pela soldagem semi-automática MAG com tecimento, conforme Figura 5.4, permitiu a obtenção dos parâmetros da distribuição duplo-elipsoidal, a partir das medições das dimensões da poça de fusão, tal como sugerido pela Figura 2.4.

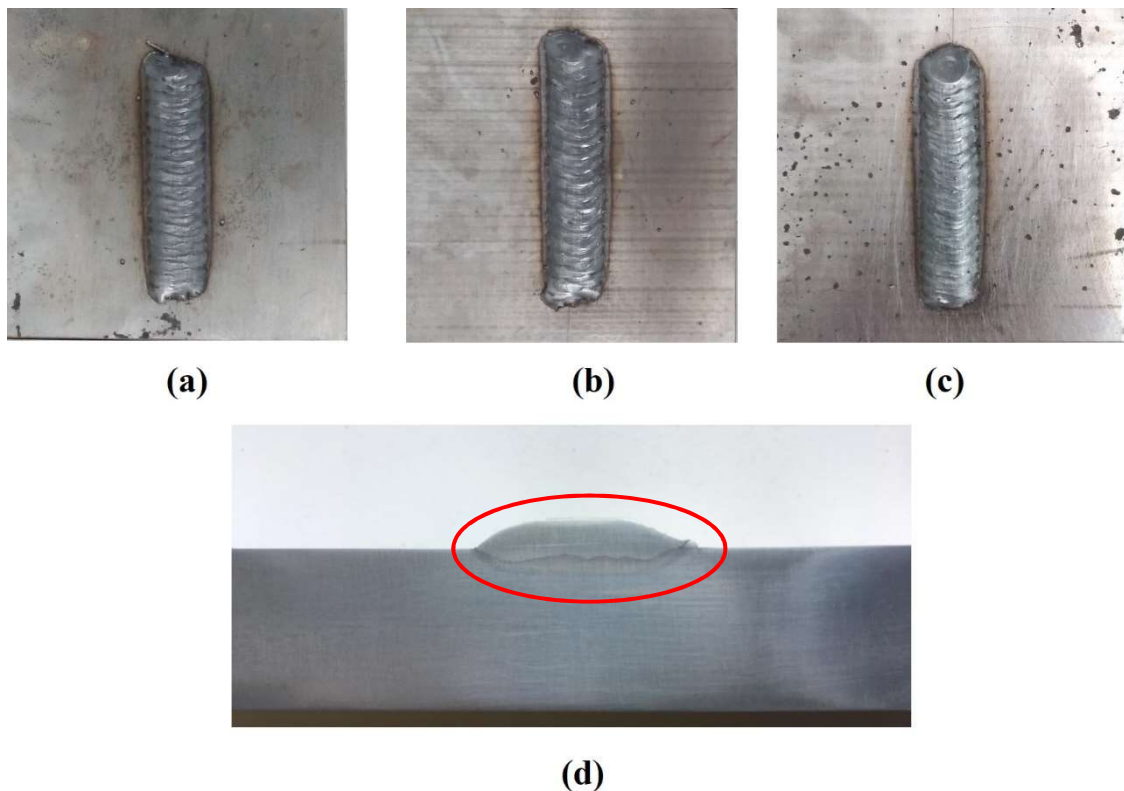


Figura 5.4 – Cordões de solda nos corpos de prova 1 (a), 2 (b) e 3 (c) obtidos nos experimentos a partir da soldagem MAG semiautomática, e seção transversal da chapa destacando o cordão de solda (d).

Fonte: Autor.

A Figura 5.5 ilustra a distribuição de temperaturas para três instantes de tempo durante a simulação soldagem pelo MEF, nos exatos instantes em que a região central do cordão de solda é depositada. É possível observar claramente, pelo gradiente de cores nas regiões a maiores temperaturas, que há de fato o movimento de tecimento sendo realizado pela fonte de calor na simulação, implementado pela parametrização do caminho.

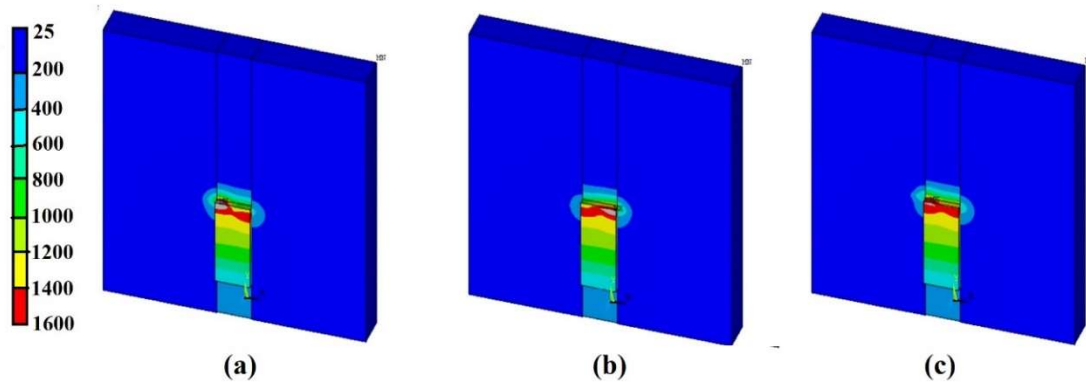


Figura 5.5 – Distribuição de temperaturas nos instantes 23 s (a), 23.5 s (b) e 24 s (c).

Fonte: Autor.

A Figura 5.6 traz a superposição da curva média das medições dos termopares 1 e 2 nas três chapas, com as curvas obtidas numericamente nos mesmos pontos.

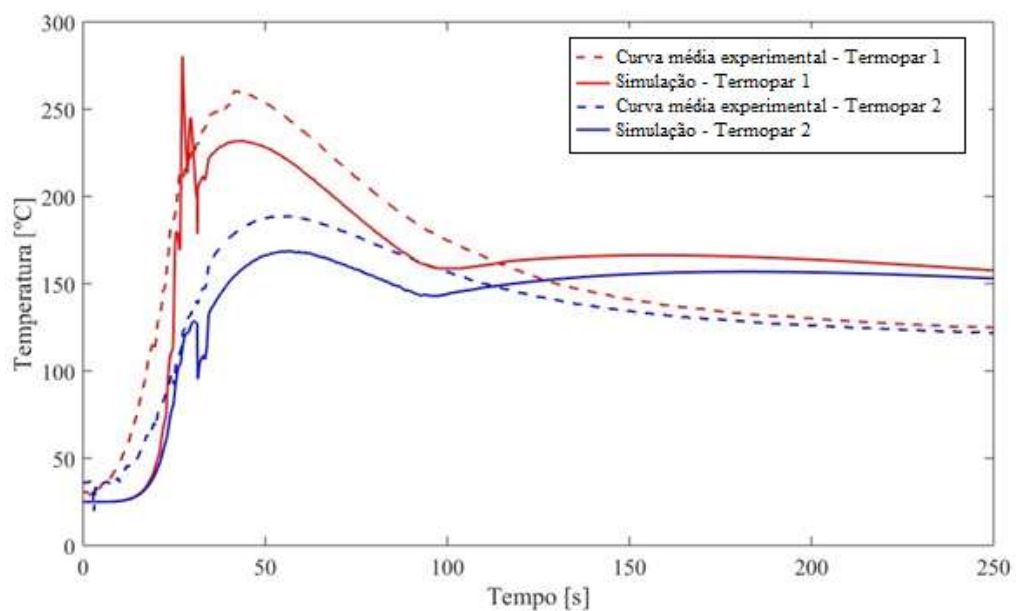


Figura 5.6 – Comparação numérico-experimental do ciclo térmico nos termopares 1 e 2.

Fonte: Autor.

A análise da Figura 5.6 permite observar que, através da simulação, foi possível captar bem as flutuações na temperatura na posição equivalente a do termopar 1, causadas devido à realização do tectimento. Tais flutuações, no entanto, não aparecem na curva experimental, fato que pode ser atribuído à baixa sensibilidade dos termopares, uma vez que, do caso Hu *et al.* (2006), fica bastante claro que tais flutuações se fazem presentes. No caso do termopar 2, conforme é esperado pela maior distância ao cordão de solda, as flutuações são consideravelmente reduzidas na curva obtida pela simulação, e continuam ausentes na curva experimental, possivelmente pelas mesmas razões discutidas anteriormente. Apesar disso, em ambos os casos, durante o período em que o arco elétrico esteve atuante na peça de trabalho, a simulação acompanhou bem os resultados experimentais, com um desvio de aproximadamente 15°C nas temperaturas, ou seja, 5,6% em relação a temperatura máxima obtida experimentalmente.

Após o fim do aquecimento, o modelo numérico apresentou um comportamento ligeiramente distinto do caso experimental, o que novamente não pode ser atribuído ao método de parametrização do caminho, uma vez que a ação do arco elétrico já tinha cessado. As causas podem estar relacionadas à aplicação das condições de contorno, uma vez que não foi possível a determinação exata do comportamento do coeficiente convectivo no caso real, tampouco da emissividade da superfície, de modo que os valores utilizados por Hu *et al.* (2006) para tais parâmetros, conforme discutidos no estudo de caso anterior, foram novamente utilizados nas simulações do caso experimental.

5.3 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que:

a) O método de parametrização de coordenadas foi matematicamente descrito, tendo sido apresentadas a parametrização para 8 padrões de tectimento, incluindo padrões com e sem mergulho, bem como 3 procedimentos distintos que permitem a obtenção de outros tipos de padrões.

b) A validação do modelo foi satisfatoriamente alcançada pelos resultados apresentados no estudo de caso Hu *et al.* (2006), uma vez que ficou comprovada a excelente capacidade de representação do ciclo térmico de um ponto próximo ao cordão de solda

durante a execução da soldagem na simulação, e também da distribuição espacial de temperaturas nos instantes de atuação do arco elétrico sobre a peça.

c) Quanto ao estudo de caso experimental, apesar de alguns inconvenientes quanto à capacidade de aquisição de informações dos equipamentos e dispositivos disponíveis, os resultados da simulação numérica, com o emprego da parametrização do caminho na implementação do tecimento, acompanharam a tendência dos resultados experimentais. Além disso, a simulação com o método proposto foi capaz de capturar as flutuações de temperaturas observadas durante o tecimento, o que corrobora o papel que as simulações podem ocupar como ferramenta de suporte às análises experimentais.

d) De modo geral, o método de parametrização do caminho mostrou-se capaz de representar satisfatoriamente, com bom nível de exatidão, as temperaturas e sua oscilação durante a soldagem com tecimento. Dessa forma, trata-se de um método que tem como principais vantagens a sua maior simplicidade de implementação e sua maior versatilidade em comparação ao método de transformação de coordenadas, o que possibilita a ampliação das aplicações do MEF na simulação de operações de soldagem, e a consequente obtenção de informações relevantes quanto ao aspecto térmico do fenômeno, e a influência do tecimento sobre ele.

5.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para pesquisas futuras, recomenda-se realização da simulação dos demais parâmetros de tecimento aqui propostos através do método de parametrização do caminho, e a comparação dos resultados obtidos com resultados experimentais. Posteriormente, um estudo numérico-experimental sobre o efeito do tipo de padrão tecimento na extensão da Zona Termicamente Afetada e no nível de tensões residuais pode ser bastante valioso.

REFERÊNCIAS

ANDERSSON, B. A. B., Journal of Engineering Materials and Technology, Trans. ASME, v. 100, pp. 356-62, 1978.

ANSYS®, Ansys Theory Reference, ANSYS INC., v. 13, 2013.

ASSAN, A. E., Método dos Elementos Finitos: Primeiros Passos. Editora da Unicamp, 2ed., 2003.

ATTARHA, M.J., SATTARI-FAR, I., Study on welding temperature distribution in thin welded plate through experimental measurements and finite element simulation, Journal of Materials Processing Technology, v.211, issue 4, p. 688-694, 2011.

BATHE, K. J., Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1982.

BONNAUD, E., GUNNARS, J., Three dimensional weld residual stresses simulations of start/stop and weld repair effects. Procedia Engineering, v. 130, pp. 531-543, 2015.

CAÑAS, J., PICÓN, R., PARÍS, F., BLAZQUEZ, A., MARÍN, J. C., A simplified numerical analysis of residual stresses in aluminium welded plates, Computers & Structures, v. 58, n. 1, pp. 59-69, 1996.

CHANG, K., LEE, C. H., PARK, K. T., YOU, Y. J., JOO, B. C., and JANG, G. C., Analysis of Residual Stress in Stainless Steel Pipe Weld Subject to Mechanical Axial Tension Loading, International Journal of Steel Structures, no. 4, pp. 411-418, 2010.

CHEN, Y., HE, Y., CHEN, H., Zhang, H., CHEN, S., Effect of weave frequency and amplitude on temperature field in weaving welding process, International Journal of Advanced Manufacture Technology, n. 75, p. 803-813, 2014.

CORAINI, R., KOBAYASHI, Y., GONÇALVES, G. M. B., Influence of the type of groove, weaving and rolling direction on the angular distortion in robotic GMAW-P aluminium welding, *Sold. Insp.*, vol. 16, n. 2, pp. 123-136, 2011.

DENG, D.; MURAKAWA, H., Numerical simulation of temperature field and residual stress in multi-pass welds in stainless steel pipe and comparison with experimental measurements, *Computational Materials Science*, 37, pp. 269-277, 2006.

DENG, D., MURAKAWA, H., Prediction of welding distortion and residual stress in a thin plate butt-welded joint. *Computational Materials Science*, 43, 353–365, 2008.

DENG, D., MURAKAWA, H., FEM prediction of buckling distortion induced by welding in thin plate panel structures. *Computational Materials Science*, 43, 591–607, 2008.

DUAN, Y. G., VINCENT, Y., BOITOUT, F., *et al.*, Prediction of welding residual distortions of large structures using a local/global approach. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 21, 1700–1706, 2007.

FRIEDMAN, E., *Welding Journal Research Supplement*, Trans ASME, v. 97, pp. 206-13, 1978.

GOLDAK, J., CHAKRAVARTI, A., BIBBY, M., A new finite element model for welding heat sources, *Metallurgical Transactions B*, vol. 15B, pp. 299-305, 1984.

HU, J., YANG, J., FANG, H., LI, G., ZHANG, Y., Numerical simulation on temperature and stress fields of welding with weaving, *Science and Technology of Welding and Joining*, n. 11, p. 358–365, 2006.

KIM, Y., RHEE, S., A study of heat input distribution on the surface during torch weaving in gas metal arc welding, *JSME International Journal*, v.3, n. 48, p. 144-150, 2004.

KRUTZ, G. W., SEGERLIND, L. J., Welding Journal Research Supplement, v. 57, pp. 211s-16s, 1978.

LIU, W., MA, J., KONG, F., LIU, S., KOVACEVIC, R., Numerical Modelling and Experimental Verification of Residual Stress in Autogenous Laser Welding of High-Strength Steel, Lasers Manuf. Mater. Process., v. 2, pp. 24-42, 2015.

MADENCI, E., GUVEN, I., The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS®, 2nd ed., Springer, 2015.

MASUBACHI, K., Analysis of Welded Structures: Residual Stresses, Distortion and their Consequences. 1st ed. Massachusetts: Pergamon Press, 1980.

MATOS, M. P., Séries e Equações Diferenciais, PrenticeHall, 2ª ed., 2017.

MODENESI, Paulo José; MARQUES, Paulo V.; SANTOS, Dagoberto. Introdução a metalurgia da soldagem. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2011.

NEGI, V., CHATTOPADHYAYA, S., Critical Assessment of Temperature Distribution in Submerged Arc Welding Process, Advances in Materials Science and Engineering, October 2013.

PAVELIC, V., TANBAKUCHI, R., UYEHARA, O. A., MYERS, P. S., Experimental and computed temperature histories in Gas Tungsten Arc Welding of thin plates, Welding Journal, vol. 48, n. 7, pp. 295s - 305s, 1969.

RADAJ, D., Design and Analysis of Fatigue Resistant Welded Structures. 1st ed. Abington Publishing: Cambridge UK, 1990.

REDDY, J., An Introduction to the Finite Element Method. 3rd Ed. McGraw-Hill Book Co., 2006.

ROSENTHAL, D., Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting, Weld. J. Res. Supp., 20, 220s, 1941.

SANTOS, F. J., Soldagem de Alumínio: Influência dos parâmetros de pulso na distorção angular, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, Bauru, 2009.

SIRIVELLA, V. B., Investigation on temperature distribution in SAW weld using 2D mesh model, International Journal of Engineering Trends and Technology, v. 18, n. 16, pp. 252-255, 2014.

STAMENKOVIC, D.; VARSOVIC, I., Finite Element Analysis of Residual Stress in Butt Welding Two Similar plates, Scientific Technical Review, Vol 59, No.1, 2009.

TENG, TSO-LIANG., CHANG PENG-HSIANG., AND TSENG WEN-CHENG., Effect of welding sequences on residual stresses,” Computers and Structures, 81, pp. 273-286, 2003.

WAINER, E., Soldagem: Processos e Metalurgia, 2ª Edição, Editora Edgard Blücher, São Paulo, 1992.

ZHAN, X., ZHANG, D., XIANGBO, L., CHEN, J., WEI, Y., ZHOU, J., LIU, R., Comparison between weave bead welding and multi-layer multi-pass welding for thick plate Invar steel, Int. J. Adv. Manuf. Technolo., v. 88, pp. 2211-2225, 2017.

ANEXO A

CÓDIGOS EM *MATLAB*

A.1 TECIMENTO OSCILATÓRIO COM E SEM MERGULHO

```
%%%%%%%% ARQUIVO 'chapa.txt' COM A GEOMETRIA DA CHAPA %%%%%%%%%%
0      0      0
0      1/2    0
1      1/2    0
1      0      0
1      -1/2   0
0      -1/2   0
0      0      0
0      w      w
1      w      w
1      0      0
1      -w     w
0      -w     w
0      0      0
0      -1/2   0
0      -1/2   w
1      -1/2   w
1      -1/2   0
1      -1/2   w
1      -w     w
0      -w     w
0      -1/2   w
0      -w     w
0      0      0
0      w      w
0      1/2    w
0      1/2    0
0      1/2    w
1      1/2    w
1      1/2    0
1      1/2    w
1      w      w

%%%%%%%% CÓDIGO PARA REPRESENTAR PADRÃO OSCILATÓRIO COM E SEM TECIMENTO%%%%%%%%
clc
clear all
```

```

close all

vsoldagem=0.005; %Velocidade de soldagem
f=0.5; %Frequência de tecimento
A=0.005; %Amplitude de tecimento
l=0.1; %Comprimento da chapa para representação
hl=A; %Espessura da chapa=amplitude de tecimento=>teta=45°
teta=atan(A/hl);
tF=l/vsoldagem; %tempo final de soldagem
npt=1000; %Número de pontos para plotagem do caminho
t=0; %tempo
dt=tF/npt; %incremento de tempo
I=zeros(npt+1); %Cria vetor I que acomodará a componente x da paramet.
J=zeros(npt+1); %Cria vetor J que acomodará a componente y da paramet.
K=zeros(npt+1); %Cria vetor K que acomodará a componente z da paramet.

for i=1:1:(npt+1); %Loop que coletará os pontos da parametrização
    a=sin(2*3.14159*f*t); %Função senoidal que promove oscilação em x
    if a>0 %condicional para cobrir o caso em que há mergulho
        x=vsoldagem*t; %coordenada x
        y=A*a; %coordenada y
        z=hl; %coordenada z. OBS.: Para simular mergulho, substituir por
        cot(teta)*y para com mergulho
        I(i)=x; %alocando as coordenadas aos vetores
        J(i)=y;
        K(i)=z;
    end
    if a<=0 %o 'else', para o caso da simulação com mergulho
        x1=vsoldagem*t;
        y1=A*a;
        z1=hl; %substituir por -cot(teta)*y1 para com mergulho;
        I(i)=x1; %alocando coordenadas
        J(i)=y1;
        K(i)=z1;
    end
    t=t+dt;
end

W=load('chapa.txt'); %tabela que contém as linhas da chapa
X=W(:,1); %alocando as coordenadas da chapa
Y=W(:,2);
Z=W(:,3);

figure(1)
plot3(I,J,K,'r');axis([0,0.1,-0.05,0.05,0,0.02]);grid on;hold on; %plotar
o padrão de tecimento
plot3(X,Y,Z); %plotar a chapa na mesma imagem

```

A.2 TECIMENTO EM ESPIRAL

```

clc
clear all
close all

vsoldagem=0.005; %Velocidade de soldagem
f=0.5; %Frequência de tecimento

```

```

A=0.005;      %Amplitude de tecimento
l=0.1; %Comprimento da chapa para representação
hl=A; %Espessura da chapa=amplitude de tecimento=>teta=45°
teta=atan(A/hl);
tF=l/vsoldagem; %tempo final de soldagem
npt=1000; %Número de pontos para plotagem do caminho
t=0; %tempo
dt=tF/npt; %incremento de tempo
I=zeros(npt+1); %Cria vetor I que acomodará a componente x da paramet.
J=zeros(npt+1); %Cria vetor J que acomodará a componente y da paramet.
K=zeros(npt+1); %Cria vetor K que acomodará a componente z da paramet.

for i=1:1:(npt+1); %Loop que coletará os pontos da parametrização
    a=sin(2*3.14159*f*t); %Função senoidal que promove oscilação em x
    if a>0 %condicional para cobrir o caso em que há mergulho
        x=vsoldagem*t+A*cos(2*3.1415*f*t); %coordenada x
        y=A*sin(2*pi*f*t); %A*a; %coordenada y
        z=hl; %coordenada z. OBS.: Para simular mergulho, substituir por
        cot(teta)*y para com mergulho
        I(i)=x; %alocando as coordenadas aos vetores
        J(i)=y;
        K(i)=z;
    end
    if a<=0 %o 'else', para o caso da simulação com mergulho
        x1=vsoldagem*t+A*cos(2*3.1415*f*t);
        y1=A*sin(2*pi*f*t);
        z1=hl; %substituir por -cot(teta)*y1 para com mergulho;
        I(i)=x1; %alocando coordenadas
        J(i)=y1;
        K(i)=z1;
    end
    t=t+dt;
end

W=load('chapa.txt'); %tabela que contém as linhas da chapa
X=W(:,1); %alocando as coordenadas da chapa
Y=W(:,2);
Z=W(:,3);

figure(1)
plot3(I,J,K,'r');axis([0,0.1,-0.05,0.05,0,0.02]);grid on;hold on; %plotar
o padrão de tecimento
plot3(X,Y,Z); %plotar a chapa na mesma imagem

```

A.3 TECIMENTO POR FOURIER EM ONDA TRIANGULAR COM E SEM MERGULHO

```

clc
clear all
close all

vsoldagem=0.005; %Velocidade de soldagem
f=1; %Frequência de tecimento
A=0.005; %Amplitude de tecimento
l=0.1; %Comprimento da chapa para representação

```

```

hl=A; %Espessura da chapa=amplitude de tecimento=>teta=45°
teta=atan(A/hl);
tF=l/vsoldagem; %tempo final de soldagem
npt=1000; %número de pontos para plotagem do caminho
t=0; %tempo inicial
dt=tF/npt; %incremento de tempo

%%% GERAÇÃO DO PADRÃO POR FOURIER %%%%%%%%%%
for i=1:1:1001 %Loop para passagem do tempo
    tv(i)=t; %vetor tempo
    t=t+dt;
end

for n=1:1:20 %Loop para número de termos da série de Fourier
    for k=1:1:1001 %Loop restagatando o vetor tempo
        xv(k)=vsoldagem*tv(k); %coordenada x
        zv(k)=hl; %coordenada z. OBS.: PARA MERGULHO, DESABILITAR
        XX(n,k)=xv(k); %aloca a cordenada x obtida com n termos de
        Fourier na linha n da matriz XX
        if n==1 %Para apenas 1 termo de Fourier
            YY(n,k)=(8*A/3.1415^2)*sin(n*3.1415/2)*(sin(2*3.1415*n*f*tv(k)))/(n^
2); %coordenada y recebe a parametrização
        else %Para mais termos
            YY(n,k)=(8*A/3.1415^2)*sin(n*3.1415/2)*(sin(2*3.1415*n*f*tv(k)))/(n^
2)+YY(n-1,k);%somar com os termos anteriores
        end
        %%%%% NO CASO COM MERGULHO, HABILITAR AS LINHAS ABAIXO
        %%%%%%%%%%
        %if YY(n,k)>0; %sin(2*3.1415*vsoldagem*tv(k))>0;%PARA TECIMENTO
        COM MERGULHO antes era só tv(k), acrescente o vsoldagem
        % zv(n,k)=cot(teta)*YY(n,k);%0.005*sin(2*pi*0.5*tv(k));
        %else
        % zv(n,k)=-cot(teta)*YY(n,k);%-0.005*sin(2*pi*0.5*tv(k));
        %end
    end
end

W=load('chapa.txt'); %Utilizar o arquivo com a geometria da chapa
X=W(:,1);
Y=W(:,2);
Z=W(:,3);

figure(1) %Nos plot abaixo, nos termos YY(n,:) e zv(n,:), n diz respeito
ao número de termos que se quer levar em conta em Fourier
plot3(xv,YY(20,:),zv,'r');axis([0,0.1,-0.05,0.05,0,0.02]);grid on;hold
on; %SEM MERGULHO. PARA MERGULHO, DESABILITE ESTA E HABILITE A LINHA
ABAIXO
%plot3(xv,YY(20,:),zv(20:),'r');axis([0,0.1,-0.05,0.05,0,0.02]);grid
on;hold on;
plot3(X,Y,Z); %plotar a chapa por cima

```

A.4 TECIMENTO POR FOURIER EM ONDA QUADRADA COM E SEM MERGULHO

```

clc
clear all
close all

```

```

vsoldagem=0.005; %Velocidade de soldagem
f=0.5; %Frequência de tecimento
A=0.005; %Amplitude de tecimento
l=0.1; %Comprimento da chapa para representação
hl=A; %Espessura da chapa=amplitude de tecimento=>teta=45°
teta=atan(A/hl);
tF=l/vsoldagem; %tempo final de soldagem
npt=1000; %número de pontos para plotagem do caminho
t=0; %tempo inicial
dt=tF/npt; %incremento de tempo

%%% GERAÇÃO DO PADRÃO POR FOURIER %%%%%%%%%%
for i=1:1:1001 %Loop para passagem do tempo
    tv(i)=t; %vetor tempo
    t=t+dt;
end

for n=1:1:20 %Loop para número de termos da série de Fourier
    for k=1:1:1001 %Loop restagatando o vetor tempo
        xv(k)=vsoldagem*tv(k); %coordenada x
        zv(k)=0.005; %coordenada z. OBS.: PARA MERGULHO, DESABILITAR
        XX(n,k)=xv(k); %aloca a cordenada x obtida com n termos de
Fourier na linha n da matriz XX
        if n==1 %Para apenas 1 termo de Fourier
            YY(n,k)=(4*A/3.1415)*(1/(2*n-1))*sin((2*n-
1)*2*3.1415*f*tv(k)); %coordenada y recebe a parametrização
        else %Para mais termos
            YY(n,k)=(4*A/3.1415)*(1/(2*n-1))*sin((2*n-
1)*2*3.1415*f*tv(k))+YY(n-1,k);%somar com os termos anteriores
        end
        %%%%% NO CASO COM MERGULHO, HABILITAR AS LINHAS ABAIXO
        %%%%%%%%%%
        %if YY(n,k)>0; %sin(2*3.1415*vsoldagem*tv(k))>0;%PARA TECIMENTO
COM MERGULHO antes era só tv(k), acrescentei o vsoldagem
        % zv(n,k)=cot(teta)*YY(n,k);%0.005*sin(2*pi*0.5*tv(k));
        %else
        % zv(n,k)=-cot(teta)*YY(n,k);%-0.005*sin(2*pi*0.5*tv(k));
        %end
    end
end

W=load('chapa.txt'); %Utilizar o arquivo com a geometria da chapa
X=W(:,1);
Y=W(:,2);
Z=W(:,3);

figure(1) %Nos plot abaixo, nos termos YY(n,:) e zv(n,:), n diz respeito
ao número de termos que se quer levar em conta
plot3(xv,YY(20,:),zv,'r');axis([0,0.1,-0.05,0.05,0,0.02]);grid on;hold
on; %SEM MERGULHO. PARA MERGULHO, DESABILITE ESTA E HABILITE A LINHA
ABAIXO
%plot3(xv,YY(20,:),zv(20:),'r');axis([0,0.1,-0.05,0.05,0,0.02]);grid
on;hold on;
plot3(X,Y,Z); %plotar a chapa por cima

```

A.5 TECIMENTO PELO MÉTODO INDIRETO EM MEIA-LUA

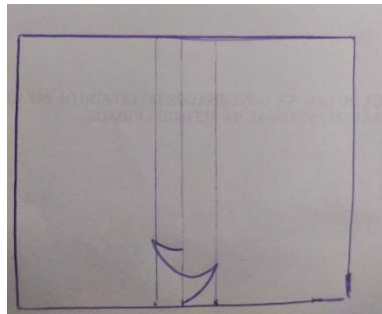


Figura A.1 – Croqui de um ciclo de tecimento para coleta dos pontos para parametrização indireta.

Fonte : Autor.

%%%%%%%%% Arquivo 'meialua.txt' com os pontos coletados para 1 ciclo de tecimento %%%%%%%%%%

```
0      0
0.00127734  6.871016e-004
0.00200033  0.00128059
0.00273935  0.0021282
0.00333377  0.00285712
0.00408881  0.00395885
0.00440205  0.00457743
0.00475536  0.0058313
0.00500413  0.00760179
0.00510866  0.00708518
0.00473097  0.00761851
0.00428916  0.00713536
0.00371077  0.00666057
0.00285921  0.0062025
0.00174249  0.00588821
9.069602e-004  0.00568427
7.944177e-005  0.00560738
-8.766469e-004  0.00566592
-0.00168012  0.00597021
-0.002339  0.0063932
-0.00284527  0.00706196
-0.00347209  0.00799319
-0.00409892  0.00892442
-0.00458114  0.00997436
-0.00492678  0.0110159
-0.00514385  0.0119221
-0.00556197  0.0139885
-0.0050557  0.0133197
-0.00427627  0.0126343
-0.00335223  0.0120675
-0.00214702  0.011611
-0.00106236  0.0114171
```

%%%%%%%%% Código para representação do padrão %%%%%%%%%%

clc

```

clear all
close all

W=load('chapa.txt'); %Mesma geometria utilizada para chapa
X=W(:,1);
Y=W(:,2);
Z=W(:,3);

P=load('meialua.txt'); %carregar o arquivo com os pontos de um ciclo de
tecimento, obtidos no GetData
[m,n]=size(P); %medir o número de pontos coletados (par ordenado x,y)
Ia=zeros(100*m,1); %gerar vetor que acomodará as coordenadas x supondo
100 ciclos de oscilação
Ja=zeros(100*m,1); %y
Ka=zeros(100*m,1); % e z
J=P(:,1); %a linha 1 corresponde ao movimento em y (eixos no matlab são
troçados para visualização em gráfico 3D
I=P(:,2); %a linha 2 é o movimento em x, de avanço da fonte, segundo os
eixos do MATLAB
for j=1:1:(99*m); %tenho o 1º ciclo, repetirei ele 99x
    for k=1:1:m; %pegar os pontos que foram obtidos do croqui para 1
ciclo
        Ia((j-1)*m+k,1)=I(k,1)+(j-1)*0.01142; %duplicá-los, mas no
ciclo seguinte. OBS.: 0.01142 é a distância no sentido longitudinal da
chapa, entre o primeiro ponto do ciclo e o último do ciclo no croqui.
Constitui o OFFSET que cada um dos pontos experimentará
        Ja((j-1)*m+k,1)=J(k,1); %as cordenadas y permanecem
        Ka((j-1)*m+k,1)=0.005; %assim com as z
    end
end
A=[Ia,Ja,Ka]; %O conjunto total de pontos do tecimento, para 100 ciclos
figure(1)
plot3(Ia,Ja,Ka,'r');axis([0,0.1,-0.05,0.05,0,0.02]);grid on;hold on;
%plotar padrão
plot3(X,Y,Z);%plotar a chapa

```

ANEXO B

CÓDIGOS EM *APDL*

B.1 CASO HU *et al.* (2006)

```
/TITLE,Hu_2006

PI=ACOS(-1) !Valor de PI
l=0.3        !Comprimento da chapa
largura=0.2   !largura
hl=0.02       !espessura
w=0.01        !abertura da junta

Tfluido=0     !Condições iniciais e de contorno
cconv=20      !Convecção
emiss=0.2     !Emissividade
boltz=5.67E-8 !Constante

/UNITS,MKS     !Sistema de unidades

!***** 1.Préprocessamento *****
/PREP7
!*****1.1 Geometria*****

ET,1,PLANE55    !Elemento plano que será extrudado
ET,2,SOLID70    !Elemento 3D que resultará da extrusão

K,1,w,0,0       !Pontos que definem a chapa
K,2,(4*w),0,0
K,3,(7*w),0,0
K,4,(largura/2),0,0
K,5,(largura/2),1,0
K,6,(7*w),1,0
K,7,(4*w),1,0
K,8,w,1,0
K,9,-w,1,0
K,10,(-4*w),1,0
K,11,(-7*w),1,0
K,12,(-largura/2),1,0
K,13,(-largura/2),0,0
K,14,(-7*w),0,0
K,15,(-4*w),0,0
```

```

k,16,-w,0,0
K,17,w,0,h1
K,18,(4*w),0,h1
K,19,7*w,0,h1
K,20,(largura/2),0,h1
K,21,(largura/2),1,h1
K,22,7*w,1,h1
K,23,4*w,1,h1
K,24,w,1,h1
K,25,-w,1,h1
K,26,-4*w,1,h1
K,27,(-7*w),1,h1
K,28,(-largura/2),1,h1
k,29,(-largura/2),0,h1
K,30,-7*w,0,h1
K,31,(-4*w),0,h1
K,32,-w,0,h1

```

```

A,1,8,9,16      !Áreas que receberão malha
A,2,7,8,1
A,3,6,7,2
A,4,5,6,3
A,16,9,10,15
A,15,10,11,14
A,14,11,12,13
!/eof

```

!CORDÃO DE SOLDA: ELEMENTOS DO CORDÃO

```

TYPE,1          !tipo 1 bidimensional
ESIZE,w/5       !tamanho
AMESH,1
TYPE,2          !mudar para tipo 2
EXTOPT,ESIZE,4,0, !extrude
EXTOPT,ACLEAR,1
!*
EXTOPT,ATTR,1,0,0
!REAL,_Z3
ESYS,0
VOFFST,1,h1, ,
VSEL,S,,,1      !selecionar o volume do cordão
*GET,eminsolda,ELEM,0,NUM,MIN      !pegar a menor ID de elemento
*GET,emaxsolda,ELEM,0,NUM,MAX      !pegar a maior ID
!/eof

```

!DEMAIS ELEMENTOS com tamanho progressivamente crescente

```

TYPE,1
ESIZE,w/3
ASEL,S,,,2,5,3
AMESH,ALL
ESIZE,w/1.5
ASEL,S,,,3,6,3
AMESH,ALL
ESIZE,w/1.15

```

```

ASEL,S,,,4,7,3
AMESH,ALL
!/eof
TYPE,2
EXTOPT,ESIZE,4,0,
EXTOPT,ACLEAR,1
!*
EXTOPT,ATTR,1,0,0
!REAL,_Z4
ESYS,0
!*
*DO,oo,2,7,1
    ASEL,S,,,oo
    VOFFST,oo,h1, ,
    *IF,oo,EQ,2,THEN
        VSEL,S,,,oo
        ESLV,S
        ESEL,R,LIVE
        *GET,emin,ELEM,0,NUM,MIN
    *ENDIF
*ENDDO
VSEL,ALL
*GET,emax,ELEM,0,NUM,MAX
ALLSEL,ALL,ALL
EPLOT
NUMMRG,ALL, , , ,LOW

n_10=NODE(-0.01,(1/2),h1)    !pegar número dos nós para plotar gráficos
n_20=NODE(-0.02,(1/2),h1)

!/eof
!***** 1.2 material *****
!MP para propriedades constantes
MP,DENS,1,7813    !densidade
MPTEMP,1,0,95,250,300,400,500 !Criação da tabela 1 para temperaturas
MPTEMP,7,700,795,3000

MPDATA,C,1,1,432.7    !Calor específico
MPDATA,C,1,2,529
MPDATA,C,1,3,597.7
MPDATA,C,1,4,621.8
MPDATA,C,1,5,676.8
MPDATA,C,1,6,743.8
MPDATA,C,1,7,915.3
MPDATA,C,1,8,998.3
MPDATA,C,1,9,998.281

MPDATA,KXX,1,1,30.7    !Condutividade térmica
MPDATA,KXX,1,2,31.87
MPDATA,KXX,1,3,33.62
MPDATA,KXX,1,4,34.2951
MPDATA,KXX,1,5,34.2951
MPDATA,KXX,1,6,33.4689

```

```

MPDATA,KXX,1,7,32.2493
MPDATA,KXX,1,8,28.0984
MPDATA,KXX,1,9,29.9869

MP,HF,1,(cconv+emiss*boltz*(Tfluido+0)**3),(emiss*boltz*(Tfluido+0)**2),
(emiss*boltz*(Tfluido+0)),(emiss*boltz) !expressão para convecção
!/eof
!***** 1.4 BOUNDARY *****

ASEL,A,,,13,38,5      !Áreas expostas selecionadas
SFA,ALL,1,CONV,-1,Tfluido !convecção combinada com radiação aplicada

ALLSEL,ALL,ALL      !selecionar tudo
IC,ALL,TEMP,Tfluido      !Temperatura inicial uniforme
!/eof

!***** 2. SOLUÇÃO *****
/SOLU
OUTPR,ALL,LAST      !imprimir tudo para last substep de todos os loadsteps
OUTRES,ALL,LAST
ANTYPE,TRANS      !Tipo da análise: transiente
NROPT,FULL !FULL NEWTON RAPHSON SOLVER; não-linear+birth and death
NLGEOM,ON !Large deformation on
/gst,off !Desativa os gráficos de convergência
TREF,Tfluido      !temperatura de referência

ESEL,S,,,eminsolda,emaxsolda,1      !seleciona elementos do cordão
EKILL,ALL      !os desativa
ESEL,S,LIVE      !seleciona os ativados
EPLLOT      !plota-os

KBC,0      !Cargas em degrau para o step, no Key para transiente
AUTOTS,ON !Automatic time steps

!***** 2.1 Parametros de soldagem *****

I=150      !Parâmetros de soldagem; Corrente
V=23      !Tensão
neta=0.75 !eficiência do processo
Q=neta*V*I !Potência térmica total
vsold=0.001 !Velocidade de soldagem
alpha=0.5 !frequência de tecelagem

a=0.006 !Semieixos de Goldak
b1=0.009
b2=0.013
c=0.006

fF=1      !Parametros de forma de Goldak
fR=1

!***** Prosseguimento *****8
tempo=0      !variável tempo.

```

```

tF=(1-(2*0.03))/vsold !tempo total de soldagem
npt=2400 !número de pontos a serem analisados
dt=tF/npt !incremento de tempo = tempo total/números de pontos;

*DIM,tabelem,ARRAY,emaxsolda,npt+1 !tabela para armazenar elem ativados
!/eof
*DO,jj,1,npt,1 !Fazer o loop1 para o número dos pontos analisados
    tempo=tempo+dt !O incremento é relacionado ao b1
    TIME,tempo
    *DO,kk,eminsolda,emaxsolda,1 !Loop2, interno ao Loop1, para
!simular a ativação dos elementos do cordão
        ESEL,S,ELEM,,kk !Seleciona 1 elemento por vez
        yyy=CENTRY(kk) !Coleta a sua posição central
!no eixo y (de avanço da fonte de calor)
        yw=(vsold*tempo+0.03) !Fonte de calor inicia na
!posição 0.03m
        distance=yyy-yw !Calcula a distância do
!elemento ao centro de ação do arco elétrico
        *IF,yyy,GE,0.03,AND,yyy,LE,1-0.03,THEN
            *IF,distance,GE,0,THEN !Se o elemento
!está à frente
                *IF,distance,LE,(b1/2),THEN !e dentro do
!raio de influência
                    tabelem(kk,jj)=kk !entra na tabela
                    EALIVE,kk !é ativado
                    EPLOT,kk !e plotado
                *ENDIF !finaliza
            *ENDIF !finaliza
        *ENDIF !finaliza
    *ENDDO !finaliza
!simulação de ativação para animação

    *DO,lmn,eminsolda,emaxsolda,1 !transferir os elementos
!ativados para a outra coluna para que eles são sejam considerados
!ativados para o próximo instante
        tabelem(lmn,jj+1)=tabelem(lmn,jj) !transferencia
    *ENDDO !finaliza

    *DO,ii,eminsolda,emax,1 !Outro loop no loop do
!tempo para definir o centro geom de cada elemento e aplicar fonte de
!calor
        ESEL,S,ELEM,,ii !selecionar elemento
        xx=CENTRX(ii) !Coleta a posição central do elemento
        yy=CENTRY(ii)
        zz=CENTRZ(ii)
        y=(vsold*tempo+0.03) !posição da fonte de calor
        *IF,yy,GE,y,THEN !Em outras palavras, se a fonte de
!calor está antes da seção em questão... (quando chega, tau-tempo=0).
            b=b1 !o parâmetro c é o frontal em tau-tempo>0
            f=fF !o fator de forma recebe o da frontal
            !y=vsold*tempo

```

```

*ELSE
    b=b2
    f=fR
    !y=vsold*tempo
*ENDIF
fc=SIN((2*PI*alpha*tempo)-PI/2)
Amp=(6*(SQRT(3))*f*Q)/(a*b*c*PI*(SQRT(PI)))
!Amplitude da distribuição de Goldak
qf=Amp*(EXP(-3*((xx-fc*w)/a)**2))*(EXP(-3*((yy-
y)/b)**2))*(EXP(-3*((zz-hl)/c)**2)) ! (EXP(-3*((zz-fc*hl)/c)**2))
BFE,ii,HGEN,1,qf !Goldak entra como geração de calor
!nos elementos da chapa
*ENDDO
!Finaliza o loop de goldak
ESEL,S,LIVE
EPLLOT
ALLSEL,ALL,ALL !seleciona todos
SOLVE !e resolve
*ENDDO !Finaliza o instante de tempo determinado pelo loop1
SAVE,Hu_thermal,db !Salva o arquivo database

ANTYPE,TRANS !etapa de resfriamento
KBC,0
OUTPR,ALL,ALL
OUTRES,ALL,ALL
ALLSEL,ALL,ALL
BFEDELE,ALL,HGEN
TIME,600
AUTOTS,ON
NSUBS,200,200,80
SOLVE
SAVE,Hu_thermal,db
FINISH

/post26 !produzir os gráficos de temperatura x tempo
nsol,2,n_10,temp,,temp10
nsol,3,n_20,temp,,temp20
store,merge
SAVE,Hu_thermal,db
FINISH

```

B.2 CASO EXPERIMENTAL

```
/TITLE,Experimental
```

```
PI=ACOS(-1) !Constantes
```

```
l=0.15 !Parâmetros da chapa
largura=0.15
hl=0.0186
```

```
w=0.01
re=0.0029
```

```
Tfluido=25 !Condições iniciais e de contorno
cconv=20
emiss=0.4
boltz=5.67E-8
```

```
/UNITS,MKS !Sistema de unidades
```

```
!***** 1.Préprocessamento *****
/PREP7
!TOFFSET,273
!*****1.1 Geometria*****
```

```
ET,1,PLANE55 !PLANE13 multiphysics low order (Plane223 high order)
ET,2,SOLID70 !SOLID5 multiphysics low order (solid226 high order)
```

```
K,1,w,0,0 !Pontos que definem a chapa
K,2,2.5*w,0,0
K,3,(4*w),0,0
K,4,(largura/2),0,0
K,5,(largura/2),1,0
K,6,(4*w),1,0
K,7,2.5*w,1,0
K,8,w,1,0
K,9,-w,1,0
K,10,(-2.5*w),1,0
K,11,(-4*w),1,0
K,12,(-largura/2),1,0
K,13,(-largura/2),0,0
K,14,(-4*w),0,0
K,15,(-2.5*w),0,0
K,16,-w,0,0
```

```
K,17,w,0,h1 !Pontos que definem a chapa
K,18,2.5*w,0,h1
K,19,4*w,0,h1
K,20,(largura/2),0,h1
K,21,(largura/2),1,h1
K,22,4*w,1,h1
K,23,2.5*w,1,h1
K,24,w,1,h1
K,25,-w,1,h1
K,26,-2.5*w,1,h1
K,27,(-4*w),1,h1
K,28,(-largura/2),1,h1
K,29,(-largura/2),0,h1
K,30,-4*w,0,h1
K,31,(-2.5*w),0,h1
K,32,-w,0,h1
```

```

A,1,8,9,16
A,2,7,8,1
A,3,6,7,2
A,4,5,6,3
A,16,9,10,15
A,15,10,11,14
A,14,11,12,13
!/eof

```

!CORDÃO DE SOLDA: ELEMENTOS DO CORDÃO

```

TYPE,1
ESIZE,w/8
AMESH,1
TYPE,2
EXTOPT,ESIZE,4,0,
EXTOPT,ACLEAR,1
!*
EXTOPT,ATTR,1,0,0
!REAL,_Z3
ESYS,0
VOFFST,1,h1+re, ,
VSEL,S,,,1
*GET,eminsolda,ELEM,0,NUM,MIN
*GET,emaxsolda,ELEM,0,NUM,MAX
!/eof

```

!DEMAIS ELEMENTOS

```

TYPE,1
ESIZE,w/5.5
ASEL,S,,,2,5,3
AMESH,ALL
ESIZE,w/3
ASEL,S,,,3,6,3
AMESH,ALL
ESIZE,w/2
ASEL,S,,,4,7,3
AMESH,ALL
!/eof
TYPE,2
EXTOPT,ESIZE,4,0,
EXTOPT,ACLEAR,1
!*
EXTOPT,ATTR,1,0,0
!REAL,_Z4
ESYS,0
!*
*DO,oo,2,7,1
    ASEL,S,,,oo
    VOFFST,oo,h1, ,
    *IF,oo,EQ,2,THEN
        VSEL,S,,,oo
        ESLV,S
        ESEL,R,LIVE
    
```

```

*GET,emin,ELEM,0,NUM,MIN
*ENDIF
*ENDDO
VSEL,ALL
*GET,emax,ELEM,0,NUM,MAX
ALLSEL,ALL,ALL
EPLOT
NUMMRG,ALL,, ,LOW

n_10=NODE(-0.01,(1/2),h1-0.002)
n_22=NODE(-0.022,(1/2),h1-0.002)
n_20a=NODE(-0.02,(1/2),h1-0.015)
n_40a=NODE(-0.04,(1/2),h1-0.015)
!/eof
!***** 1.2 material *****
!MP para propriedades constantes
MP,DENS,1,7813
MPTEMP,1,0,700,1000,1200,1400,1600
MPTEMP,7,1800,2000 !Criação da tabela 1 para temperaturas

MPDATA,C,1,1,380 !Calor específico para as posições na tabela
MPTEMP
MPDATA,C,1,2,1430
MPDATA,C,1,3,1430
MPDATA,C,1,4,1430
MPDATA,C,1,5,1430 !Calor específico para as posições na tabela
MPTEMP
MPDATA,C,1,6,1430
MPDATA,C,1,7,1430
MPDATA,C,1,8,1430

MPDATA,KXX,1,1,60 !Condutividade térmica para as posições na tabela
MPTEMP
MPDATA,KXX,1,2,31
MPDATA,KXX,1,3,31
MPDATA,KXX,1,4,31
MPDATA,KXX,1,5,31 !Condutividade térmica para as posições na tabela
MPTEMP
MPDATA,KXX,1,6,31
MPDATA,KXX,1,7,31
MPDATA,KXX,1,8,31

MP,HF,1,(cconv+emiss*boltz*(Tfluido+0)**3),(emiss*boltz*(Tfluido+0)**2),
(emiss*boltz*(Tfluido+0)),(emiss*boltz) !expressão para convecção
!/eof
!***** 1.4 BOUNDARY *****

!ASEL,S,,,1,7,1 !Areas traseiras... Primeiras criadas para gerar
malha
ASEL,A,,,13,38,5 !Áreas frontais:ÁREA 8, DO CORDÃO, EXCLUIDA, POIS
NÃO É DO METAL DE BASE
!ASEL,A,,,24,41,7 !Áreas laterais

```

```

!ASEL,A,,,10,40,5 !Áreas superiores
!ASEL,A,,,12,41,5 !Áreas inferiores
SFA,ALL,1,CONV,-1,Tfluido !convecção como combinação com radiação
!SFA,ALL,1,CONV,cconv,Tfluido

ALLSEL,ALL,ALL
IC,ALL,TEMP,Tfluido !Temperatura inicial uniforme ao objeto de
estudo
!/eof

!***** 2. SOLUÇÃO *****
/SOLU
OUTPR,ALL,LAST !-2400 !LAST !OUTPUT CONTROLS, ALL RESULTS,
SHOWN TO THE LAST SUBSTEP
OUTRES,ALL,LAST !OUTPUT RESULTS PARA TODOS OS ÚLTIMOS
SUBSTEP DE TODOS OS LOADSTEP
!RESCONTROL,DEFINE,LAST,LAST !CRIA OS ARQUIVOS DE REINÍCIO PARA TODOS OS
ÚLTIMOS SUBSTEPS DOS LOADSTEPS

ANTYPE,TRANS !Tipo da análise: transiente
NROPT,FULL !FULL NEWTON RAPHSON SOLVER
NLGEOM,ON !Large deformation
/gst,off !Desativa os gráficos de convergência
TREF,Tfluido

*DO,abc,eminsolda,emaxsolda,1
    yabc=CENTRY(abc)
    zabc=CENTRZ(abc)
    *IF,zabc,GT,h1,THEN
        EKILL,abc
    *ENDIF
*ENDDO
!ESEL,S,,,eminsolda,emaxsolda,1
!EKILL,ALL
!ESEL,S,LIVE
!EPLT

KBC,0 !Cargas em degrau para o step, no Key para transiente
AUTOTS,ON !Automatic time steps

!***** 2.1 Parametros de soldagem *****

I=190 !Parâmetros de soldagem; Corrente
V=23 !Tensão
neta=0.75 !eficiência do processo
Q=neta*V*I !Potência térmica total
vsold=0.002 !Velocidade de soldagem
alpha=0.5 !frequência de tecelagem

a=0.002 !Semieixos de Goldak
b1=0.003
b2=0.003
c=0.003

```

fF=1.2 !Parametros de forma de Goldak. Ver o paper dele.
 fF para o quadrante da frente, fR para o traseiro, e a soma deve ser 2.
 fR=0.8

```

!***** Prosseguimento *****8
tempo=0                               !variável tempo.
                                     !Número de pontos para definir o incremento de tempo;
tF=(1-0.04)/vsold                   !tempo total de soldagem = Comprimento da
chapa/Velocidade de soldagem
npt=1100
dt=tF/npt                            !incremento de tempo = tempo total/números de pontos;

*DIM,tabelem,ARRAY,emaxsolda,npt+1                               !tabela para armazenar os
elementos do cordão de solda que estão vivos
!/eof
*DO,jj,1,npt,1                    !Fazer o loop para o número dos pontos analisados
                                  tempo=tempo+dt                   !O incremento é relacionado ao b1
                                  TIME,tempo
                                  *D0,kk,eminsolda,emaxsolda,1                   !Loop3, interno ao Loop1, para
simular a ativação dos elementos do cordão que será feita na estrutural.
Usa o contador de número de elementos do cordão;
                                  ESEL,S,ELEM,,kk                   !Seleciona 1 elemento por vez
                                  yyy=CENTRY(kk)                   !Coleta a sua posição central
no eixo y (de avanço da fonte de calor)
                                  zzz=CENTRZ(kk)
                                  yw=vsold*tempo+0.02                   !Fonte de calor inicia na
posição 0.03m
                                  distance=yyy-yw                   !Calcula a distância do
elemento ao centro de ação do arco elétrico
                                  *IF,zzz,GT,h1,THEN
                                      *IF,yyy,GT,0.02,AND,yyy,LT,(1-0.02),THEN
                                          *IF,distance,GT,0,THEN                   !E caso
a distância seja menor que zero
                                                                      *IF,distance,LE,(b1/2),THEN
                                                                                  tabelem(kk,jj)=kk                   !O
elemento entra na tabela dos ativados
                                                                                  EALIVE,kk
                                                                                  EPL0T,kk
                                                                                  *ENDIF
                                                                                  !finaliza
                                                                                  *ENDIF
                                                                                  *ENDIF
                                                                                  *ELSE
                                                                                      tabelem(kk,jj)=kk
                                                                                      !finaliza
                                                                                      *ENDIF
                                                                                      !Caso não seja
o primeiro instante de tempo
                                                                                      *ENDDO
                                                                                      *D0,lmn,eminsolda,emaxsolda,1                   !transferir os elementos
ativados para a outra coluna para que eles são sejam considerados
ativados para o próximo instante
                                                                                      tabelem(lmn,jj+1)=tabelem(lmn,jj)                   !transferencia

```

```

*ENDDO                                !finaliza
*DO,ii,eminsolda,emax,1                !Outro loop no loop do
tempo para definir o centro geom de cada elemento e aplicar fonte de
calor
    ESEL,S,ELEM,,ii
    xx=CENTRX(ii)    !Coleta a posição central do elemento
    yy=CENTRY(ii)
    zz=CENTRZ(ii)
    y=vsold*tempo+0.02
    *GET,evolu,ELEM,ii,VOLU            !Coleta a área para o elemento
em questão (elemento ii) no loop
    *IF,yy,GE,y,THEN !Em outras palavras, se a fonte de
calor está antes da seção em questão... (quando chega, tau-tempo=0).
        b=b1 !o parâmetro c é o frontal em tau-tempo>0
        f=fF !o fator de forma recebe o da frontal
        !y=vsold*tempo
    *ELSE
        b=b2
        f=fR
        !y=vsold*tempo
    *ENDIF
    fc=SIN((2*PI*alpha*tempo)-PI/2)
    Amp=(6*(SQRT(3))*f*Q)/(a*b*c*PI*(SQRT(PI)))
!Amplitude da distribuição de Goldak
    *IF,fc,GT,0,THEN
        qf=Amp*(EXP(-3*((xx-fc*w)/a)**2))*(EXP(-3*((yy-
y)/b)**2))*(EXP(-3*((zz-hl)/c)**2)) ! (EXP(-3*((zz-fc*hl)/c)**2))
    *ELSE
        ! qf=Amp*(EXP(-3*((xx-fc*w)/a)**2))*(EXP(-3*((yy-
y)/b)**2))*(EXP(-3*((zz+fc*hl)/c)**2))
    *ENDIF !O IF é utilizado em caso de simulação com
!mergulho
    BFE,ii,HGEN,1,qf !Goldak entra como geração de calor
nos elementos da chapa
*ENDDO
!Finaliza o loop de goldak
ALLSEL,ALL,ALL !seleciona todos
SOLVE          !e resolve
*ENDDO          !Finaliza o instante de tempo determinado pelo loop1
SAVE,experimental,db !Salva o arquivo database

ANTYPE,TRANS
KBC,1
OUTPR,ALL,ALL
OUTRES,ALL,ALL
ALLSEL,ALL,ALL
BFEDELE,ALL,HGEN
TIME,300
AUTOTS,ON
NSUBS,200,200,100
SOLVE
SAVE,experimental,db
FINISH

```

```
/post26  
nsol,2,n_10,temp,,temp10  
nsol,3,n_22,temp,,temp20  
nsol,4,n_20a,temp,,temp30  
nsol,5,n_40a,temp,,temp40  
store,merge  
SAVE,experimental,db  
FINISH
```