

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DOUGLAS SILVA MARQUES SERRATI

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE PROCESSO DE GOIVAGEM A PLASMA

Uberlândia

2022

DOUGLAS SILVA MARQUES SERRATI

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE PROCESSO DE GOIVAGEM A PLASMA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Louriel Oliveira Vilarinho

Coorientador: Prof. Dr. Douglas Bezerra de Araújo

UBERLÂNDIA

2022

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

S487 Serrati, Douglas Silva Marques, 1997-
2022 Simulação Numérica de Processo de Goivagem a Plasma
[recurso eletrônico] / Douglas Silva Marques Serrati. -
2022.

Orientador: Louriel Oliveira Vilarinho.
Coorientador: Douglas Bezerra de Araújo.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de
Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Mecânica.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.684>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia mecânica. I. Vilarinho, Louriel
Oliveira, 1975-, (Orient.). II. Araújo, Douglas Bezerra
de, 1980-, (Coorient.). III. Universidade Federal de
Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Mecânica. IV.
Título.

CDU: 621

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
 Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
 Telefone: (34) 3239-4282 - www.posgrad.mecanica.ufu.br - secposmec@mecanica.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, nº 604, COPEM				
Data:	14/01/2022	Hora de início:	08:30	Hora de encerramento:	11:40
Matrícula do Discente:	12012EMC003				
Nome do Discente:	Douglas Silva Marques Serrati				
Título do Trabalho:	Simulação Numérica de Processo de Goivagem a Plasma				
Área de concentração:	Materiais e Processos de Fabricação				
Linha de pesquisa:	Processos de Fabricação (Usinagem e Soldagem)				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Estudo da Técnica de Alívio de Tensão por Vibração em Juntas Soldadas				

Reuniu-se por meio de videoconferência a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Professores Doutores: Douglas Bezerra de Araújo - FEMEC/UFU; Solidônio Rodrigues de Carvalho - FEMEC/UFU; Régis Henrique Gonçalves e Silva - UFSC; e Louriel Oliveira Vilarinho - FEMEC/UFU, orientador do candidato. Ressalta-se que os Prof. Louriel Oliveira Vilarinho, Douglas Bezerra de Araújo, Solidônio Rodrigues de Carvalho e o Discente participaram da defesa por meio de videoconferência desde a cidade de Uberlândia/MG, e o Prof. Régis Henrique Gonçalves e Silva desde a cidade de Florianópolis/SC, em atendimento a Portaria nº 36, de 19 de março de 2020, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. Louriel Oliveira Vilarinho, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Louriel Oliveira Vilarinho, Professor(a) do Magistério Superior**, em 14/01/2022, às 11:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Solidonio Rodrigues de Carvalho, Professor(a) do Magistério Superior**, em 14/01/2022, às 11:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Douglas Bezerra de Araujo, Professor(a) do Magistério Superior**, em 14/01/2022, às 11:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Regis Henrique Goncalves e Silva, Usuário Externo**, em 14/01/2022, às 11:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3306124** e o código CRC **7F5EC372**.

AGRADECIMENTOS

A Deus sobre todas as coisas.

Aos meus pais, Deiby e Silene, por me incentivarem e apoiarem incondicionalmente neste longo caminho de aprendizagem e formação profissional.

Aos professores Louriel Oliveira Vilarinho e Douglas Bezerra de Araújo, pela confiança depositada em mim, disposição para ensinar, paciência no meu processo de aprendizagem e pela amizade.

Aos professores, engenheiros, técnicos, soldadores e alunos de iniciação científica do Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem (LAPROSOLDA), que contribuíram para meu desenvolvimento profissional e acadêmico.

À empresa Petróleo Brasileiro S.A (PETROBRAS), pelo apoio financeiro.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), pela oportunidade de cursar o mestrado.

A todos os meus amigos que de certa forma colaboraram e fizeram parte da minha trajetória até aqui.

“Estariamos vivendo em uma simulação de computador?”

(Nick Bostrom)

SERRATI, Douglas Silva Marques. **Simulação Numérica de Processo de Goivagem a Plasma**. 2022. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)– Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022. DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.684>

RESUMO

A goivagem é um processo de remoção de material por fusão e, assim como ocorre na soldagem, devido à quantidade de energia utilizada no processo para subtração de material, ocorrem dilatações e contrações não uniformes no metal base, de forma que as mesmas geram esforços internos na peça goivada. Tais esforços permanecem mesmo após a conclusão do processo, gerando, assim, tensões residuais. Essas, por sua vez, a depender de sua intensidade, podem provocar trincas, que podem inviabilizar o funcionamento pleno do componente. Esses inconvenientes se multiplicam caso sejam necessários vários reparos com goivagens e soldas ao longo do tempo. Assim, ter conhecimento sobre as distorções provocadas pelas tensões térmicas que ocorrem nesse processo é fundamental para antever possíveis contratempos. Dessa forma, foi desenvolvido um método numérico do processo de goivagem a plasma no *software ANSYS Mechanical APDL*, em que, todos os resultados do processo são calculados pelo *software*, com o mínimo de interferência possível. A partir disso, é desenvolvida uma sequência de simulações, cujo principal desafio é obter o rendimento térmico de 85% para o processo de goivagem a plasma por simulação e definir os parâmetros da fonte de calor. A validação do método numérico é realizada pela comparação dos resultados, computacionais e experimentais, que diferiram em 3,2% e 1,4% para a largura e profundidade da seção goivada, respectivamente. É verificada que a zona afetada pelo calor também é semelhante. A partir do modelo validado, é realizada a simulação estrutural onde se observa tensões residuais com baixa intensidade se comparada com os processos de soldagem.

Palavras-chave: Tensões residuais; Distorções; Inovação; Goivagem.

SERRATI, Douglas Silva Marques. **Numerical Simulation of Plasma Gouge Process**. 2022. 96 p. Dissertation (Mater's in Mechanical Engineering) – Federal University of Uberlandia, Uberlandia, 2022. DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.684>

ABSTRACT

Gouging is a process of removing material by fusion and, as in welding, due to the amount of energy used in the process for material subtraction, non-uniform expansions and contractions occur in the base metal, so that they generate internal loads in the gouged piece. Such loads remain even after completion of the process and residual stresses are generated. Depending on their intensity, residual stresses can cause complications such as cracks, which can make the component's full operation unfeasible. These inconveniences are multiplied if several repair with gouging and welding are needed over time. Thus, being aware of the distortions caused by thermal stresses that occur in this process is essential to foresee possible setbacks. Therefore, a numerical method of the plasma gouging process is developed using the software ANSYS Mechanical APDL, in which all the results of the process are calculated by the software, with as little interference as possible. From this, a sequence of simulation is developed, whose main challenge is to obtain a thermal efficiency of 85% for the plasma gouging process by simulation and to define the parameters of the heat source. The validation of the numerical method is performed by comparing the computational and experimental results, which differed by 3.2% and 1.4% for the width and depth of gouged section, respectively. It is found that the heat-affected zone is also similar. From the validated model, a structural simulation is carried out, where residual stresses are observed with low intensity compared to the welding processes.

Keywords: Residual stresses; Distortions; Innovation; Gouging.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparação de Zona Afetada pelo Calor Experimental e de Simulação de Goivagem com Resultados Pré-definidos	19
Figura 2 - Tocha de Goivagem com Eletrodo de Grafite	20
Figura 3 - Tipos de Arco do Processo Plasma	22
Figura 4 - Partes de Uma Tocha Plasma	22
Figura 5 - Distribuição de Energia para Soldagem a Arco	23
Figura 6 - Fluxo de Calor Tridimensional (a) e Bidimensional (b)	24
Figura 7 - Razão de Resfriamento Adimensional em Função da Espessura Adimensional	26
Figura 8 - Influência da Orientação da Chapa na Transferência de Calor	28
Figura 9 - Fontes de Calor Adaptadas para Soldagem a Plasma	33
Figura 10 - Fonte de Calor Gaussiana	33
Figura 11 - Forma da Fonte de Calor Logarítmica	35
Figura 12 - Influência de Parâmetros Operacionais Sobre as Tensões Residuais	36
Figura 13 - Formas de Distorções	37
Figura 14 - Fluxograma para Execução da Metodologia Experimental	39
Figura 15 - Croqui da Placa de Testes para Goivagem com Dimensões em mm	40
Figura 16 - Fonte Powermax1650	40
Figura 17 - Equipamentos da Bancada Experimental	41
Figura 18 - Consumíveis Protegidos para Tocha T100M para Corrente de 60A	41
Figura 19 - Representação da Referência para a Medição da Distância entre Bico e Peça (DBP) e do Ângulo de Ataque (α)	43
Figura 20 - Diagrama de Fluxo Sequencial de Processos de Soldagem Numérica e Processos de Goivagem	46
Figura 21 - Representação das Subdivisões da Chapa	47
Figura 22 - Elementos SOLID70 e SOLID185 (a) e SURF152 e SURF154 (b)	48
Figura 23 - Representação da Malha para Estudo Numérico	50
Figura 24 - Propriedades Mecânicas do Material ASTM A131 EH36	53

Figura 25 - Propriedades Térmicas do Material ASTM A131 EH36	53
Figura 26 - Variação do Coeficiente Convectivo de Troca de Calor	54
Figura 27 - Fonte de Calor Logaritmica	56
Figura 28 - Fixação da Chapa para Simulação Estrutural	58
Figura 29 - Macrografia da Seção Transversal Goivada	60
Figura 30 - Medição da Profundidade da Seção Goivada por Escaneamento 3D	60
Figura 31 - Medição da Largura da Seção Goivada por Escaneamento 3D .	61
Figura 32 - Instabilidade na Eliminação de Elementos na Seção Goivada .	64
Figura 33 - Vista Superior do Comprimento Goivado com Malha com Estabilidade (a) e Instabilidade (b) na Eliminação de Elementos . . .	64
Figura 34 - Campo Térmico da Goivagem	65
Figura 35 - Campo Térmico da Goivagem com Chapa Seccionada ao Meio .	66
Figura 36 - Comparação Entre as Zonas Removidas Obtidas Experimentalmente e por Simulação Numérica para Cada Malha com as Instabilidades Circuladas	67
Figura 37 - Comparação Entre as Zonas Removidas Obtidas Experimentalmente e por Simulação Numérica com a Malha A	69
Figura 38 - Posição de Análise das Tensões Residuais	70
Figura 39 - Vista Superior da Chapa Goivada com Exibição da Distribuição das Tensões Residuais Longitudinal (a) e Transversal (b)	71
Figura 40 - Vista em Perspectiva da Chapa Goivada com Exibição da Distribuição da Tensão Residual Longitudinal	71
Figura 41 - Vista em Perspectiva da Chapa Goivada com Exibição da Distribuição da Tensão Residual Transversal	72
Figura 42 - Tensão Residual Longitudinal no Centro da Região Goivada . .	73
Figura 43 - Tensão Residual Longitudinal ao Lado da Região Goivada . .	73
Figura 44 - Tensão Residual Longitudinal na Superfície Inferior	74
Figura 45 - Variação da Tensão Residual Longitudinal ao Longo da Espessura do Metal Base	75
Figura 46 - Tensão Residual Transversal na Superfície Superior	76
Figura 47 - Tensão Residual Transversal na Superfície Inferior	77
Figura 48 - Variação da Tensão Residual Transversal ao Longo da Espessura	

do Metal Base	78
Figura 49 - Distorção Resultante Sofrida pela Chapa	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Emissividade do Aço Carbono em Relação à Temperatura	30
Tabela 2 - Parâmetros para Remoção de Material por Goivagem	42
Tabela 3 - Dimensões dos Elementos em Diferentes Malhas	49
Tabela 4 - Explicação das Variáveis da Tabela para Determinação do Tamanho dos Elementos	51
Tabela 5 - Modo de Leitura da Tabela de Dimensionamento do Tamanho dos Elementos na Malha	52
Tabela 6 - Tabela de Dimensionamento dos Elementos na Seção Goivada para Todas as Malhas Estudadas (separadas por cor)	63
Tabela 7 - Comparação Entre a Largura e Profundidade da Goivagem Obtidas Experimentalmente e por Simulação Numérica para Cada Malha	68

LISTA DE SÍMBOLOS

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
APDL	<i>Ansys Parametric Design Language</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
c	Calor específico [J/kg·K]
DBP	Distância do bico à peça [mm]
e	Espessura da chapa [m]
\bar{e}	Espessura relativa da chapa [m]
e_s	Espessura da região com malha refinada para goivagem [m]
g	Aceleração gravitacional (9,81 m/s ²)
H	Entalpia [J]
h_c	Coeficiente convectivo de transferência de calor [W/m ² ·K]
k	Coeficiente de condutividade térmica [W/m·K]
K_0	Função de Bessel modificada de segundo tipo e ordem zero
k_f	Condutividade térmica do fluido [W/m·K]
L	Largura da chapa [m]
L_c	Comprimento característico [m]
L_e	Largura da goivagem medida experimentalmente [mm]
L_s	Largura da região com malha refinada para goivagem [m]
N	Número inteiro maior que zero
Nu	Número de Nusselt
P	Profundidade da goivagem medida experimentalmente [mm]
Pr	Número de Prandtl
Q	Potência [W]
Q''	Fluxo de calor [W/m ²]
Q_{cv}''	Fluxo de calor devido a convecção [W/m ²]
r	Distância radial da origem [m]
r_0	Raio variável [m]
Ra	Número de Rayleigh
r_e	Raio externo [m]

r_i	Raio inferior [m]
T	Temperatura [°C]
ΔT	Diferença de temperatura entre as extremidades da chapa [°C]
Δt	Tempo de permanência [s]
T_0	Temperatura inicial [°C]
T_s	Temperatura da superfície em análise [°C]
T_{viz}	Temperatura da vizinhança [°C]
T_∞	Temperatura do fluido suficientemente distante da superfície [°C]
ΔS	Varição de espaço
ZAC	Zona afetada pelo calor
z_e	Coordenadas da superfície do topo da fonte de calor
z_i	Coordenadas da superfície da base da fonte de calor
α	Difusividade térmica do material [m ² /s]
β	Coefficiente de expansão volumétrica [K ⁻¹]
∇T	Gradiente de temperatura [°C]
ε	Emissividade
$\varepsilon^e, \varepsilon^p, \varepsilon^t, \varepsilon_t$	Deformação elástica, plástica, térmica e total
ν	Viscosidade cinemática do fluido [m ² /s]
υ	Velocidade de soldagem [m/s]
ρ	Massa específica [kg/m ³]
σ_s	Constante de Stefan-Boltzmann igual a $5,67 \cdot 10^{-8}$ [W/(m ² ·K ⁴)]
σ_r	Distância radial em relação ao centro da fonte de calor [m]

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivos	16
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 Simulação de Goivagem	18
2.2 Processo de Goivagem	19
2.2.1 Goivagem com Eletrodo Grafite	20
2.2.2 Goivagem com Arco Plasma	21
2.3 Fluxo de Calor na Soldagem	23
2.3.1 Fluxo de Calor Bidimensional e Tridimensional	24
2.4 Transferência de Calor	26
2.4.1 Condução	26
2.4.2 Convecção	27
2.4.3 Radiação	29
2.5 Fonte de Calor	30
2.5.1 Modelos de Fonte de Calor	32
2.5.1.1 Fonte de Calor Gaussiana	33
2.5.1.2 Fonte de Calor Logarítmica	34
2.6 Tensões Residuais	35
2.7 Distorções	37
CAPÍTULO III - METODOLOGIA EXPERIMENTAL	39
3.1 Metal Base	40
3.2 Equipamentos	40
3.3 Goivagem	42
3.4 Análise Macrográfica	43
CAPÍTULO IV - METODOLOGIA COMPUTACIONAL	44
4.1 Procedimento Numérico da Goivagem	44
4.2 Pré-processamento	47
4.2.1 Modelo Geométrico	47
4.2.2 Elementos	48
4.2.3 Construção da Malha	49

4.2.3.1 Método para Dimensionar Elementos da Malha	50
4.2.4 Propriedades do Material	52
4.3 Solução	54
4.3.1 Modelamento Térmico de Soldagem	55
4.3.1.1 Fonte de Calor	55
4.3.2 Modelamento Estrutural de Soldagem	56
4.3.2.1 Fixação da Chapa	57
4.4 Pós-processamento	58
CAPÍTULO V - RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
5.1 Resultados da Metodologia Experimental	59
5.2 Resultados da Metodologia Computacional	61
5.2.1 Simulações Preliminares	61
5.2.2 Estudo de Malha	63
5.2.2.1 Instabilidade na Malha	64
5.2.3 Fonte de Calor	65
5.3 Validação da Simulação Térmica	66
5.4 Simulação Estrutural	69
5.4.1 Tensões Residuais	69
5.4.1.1 Tensão Residual Longitudinal	72
5.4.1.2 Tensão Residual Transversal	76
5.4.2 Deslocamentos	79
CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES	81
6.1 Lógica de Programação	81
6.2 Malha do Modelo Numérico	81
6.3 Fonte de Calor e Rendimento Térmico	82
6.4 Tensões Residuais e Distorções	82
CAPÍTULO VII - TRABALHOS FUTUROS	84
CAPÍTULO VIII - REFERÊNCIAS	85
APÊNDICE A	90
APÊNDICE B	91
APÊNDICE C	93
ANEXO A	95

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A goivagem, que é um processo de corte térmico que remove metal por fusão, é bastante utilizada quando se tem a intenção de remover cordões de solda, ou parte desses, em casos em que alguma descontinuidade for detectada ou, ainda, para a criação de canais para posterior preenchimento com solda.

Por se tratar de um processo térmico de remoção de material, usa-se relativamente grande quantidade de energia e, conseqüentemente, de forma análoga a que ocorre durante a soldagem, são verificadas grandes variações de temperatura no material. Assim, devido ao aquecimento e resfriamento não uniformes, o material goivado enfrenta dilatações e contrações irregulares que, por sua vez, provocam o surgimento de tensões residuais e distorções que podem prejudicar a qualidade e funcionamento da peça goivada.

Outros possíveis problemas que podem ocorrer, seriam as transformações microestruturais no material que passam por soldagem, goivagem e soldagem novamente. Seriam múltiplos ciclos térmicos em regiões do material. Existem estudos experimentais como nos trabalhos de Vega *et. al.* (2008) e Lin *et. al.* (2012), onde estudaram o impacto dos múltiplos reparos nas propriedades mecânicas do material.

Atualmente, diferentes trabalhos tratam do assunto relacionado a simulações térmicas ou estruturais dos processos de soldagem. Entretanto, quando se trata de goivagem, não existem pesquisas que abordem a análise numérica estrutural e quase nenhuma sobre simulação térmica. Por outro lado, existem trabalhos com procedimentos numéricos equivalentes ao da goivagem, como exemplo, o trabalho de Fu *et. al.* (2015) e Saternus *et. al.* (2019), em que simularam via elementos finitos o processo de corte a laser com o desativamento dos elementos que alcançaram a temperatura de fusão.

A simulação em goivagem tem seu desenvolvimento semelhante às simulações de soldagem, onde são utilizados comandos para ativar elementos da malha na região de deposição de material, criando assim, o cordão de solda. Porém, na goivagem esses comandos são utilizados para desativar os elementos com temperatura acima da temperatura de fusão do material, pois esses são removidos pelo processo.

A relação prática existente entre a soldagem e goivagem, e o diferente rumo dos avanços científicos que ambas tomaram em relação às simulações, pode ser justificado pelo fato de que a análise numérica de goivagem é elaborada com mais detalhes. Assim, essa enfrenta maior complexidade no seu desenvolvimento quando comparada às simulações de soldagem.

Hyun *et al.* (2018) desenvolveram em seu trabalho, uma simulação térmica de goivagem, entretanto, para simplificar a programação, modelaram toda a seção que seria removida durante o processo. Dessa forma, a largura e profundidade da goivagem foi pré-determinada e, então, foi necessário apenas impor energia através da fonte de calor. Embora Hyun *et al.* (2018) tenham validado seu resultado computacional a partir de comparação com a zona afetada pelo calor experimental, é importante ressaltar que todo o processo computacional foi controlado. De forma a utilizar os parâmetros de saída, largura e profundidade da zona removida na goivagem, como parâmetros de entrada.

Assim, de forma a tornar as simulações em goivagem mais confiáveis e semelhantes ao que acontece na prática, esse trabalho se desenvolve de forma a não exercer controle sobre as dimensões do material removido pela goivagem na simulação. Ou seja, não serão utilizados os parâmetros de saída como entrada. Dessa forma, são eliminados os elementos do modelo que alcançam a temperatura maior ou igual à temperatura de fusão do material. Consequentemente, os resultados da simulação se tornam totalmente dependentes do tamanho que os elementos assumem na região goivada, pois, como não foi modelada a seção a ser removida, os elementos que permanecem em torno à região goivada, formam “degraus”. Esses devem ser o mais refinado possível para garantir maior fidelidade aos resultados experimentais.

1.1. Objetivos

O objetivo principal desse trabalho é o desenvolvimento de um método numérico, utilizando o *software Ansys Mechanical APDL*, em que se desenvolva a simulação do processo de goivagem a plasma sem que sejam utilizados os parâmetros de saída como entrada.

A partir da lógica construída para o desenvolvimento numérico do processo de goivagem a plasma são obtidos resultados térmicos, como zona afetada pelo calor e largura e profundidade da zona removida durante o processo, que são comparados com os resultados experimentais com o propósito de validar o modelo criado.

Dessa forma, uma posterior simulação estrutural é realizada partindo dos resultados obtidos no estudo térmico. Onde é possível avaliar as tensões residuais e distorções resultantes do processo de goivagem a plasma.

Durante a elaboração da lógica de programação, foi observado, como objetivos secundários, a necessidade de analisar os efeitos da malha nos resultados apresentados, assim como definir o rendimento térmico do processo de goivagem a plasma.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica acerca da goivagem é realizada em um cenário com pouco conteúdo, conforme descrito no Capítulo I. Por esse motivo e devido à grande semelhança desse processo à soldagem, em vários momentos são realizadas analogias a partir de revisão bibliográfica de processos de soldagem.

Logo, com o intuito de elaborar uma metodologia computacional para simulações termo estruturais de goivagem e obter entendimento sobre como as tensões residuais estão dispostas após o procedimento de goivagem, esse capítulo apresenta as revisões bibliográficas realizadas pertinentes ao tema do trabalho.

2.1. Simulação de Goivagem

Com o intuito de analisar como as simulações do processo de goivagem se desenvolvem atualmente, foi realizado um estudo da literatura existente a partir da bibliometria. Essa é uma forma estatística de construir indicadores e verificar a evolução de produção científica acerca de determinado tema.

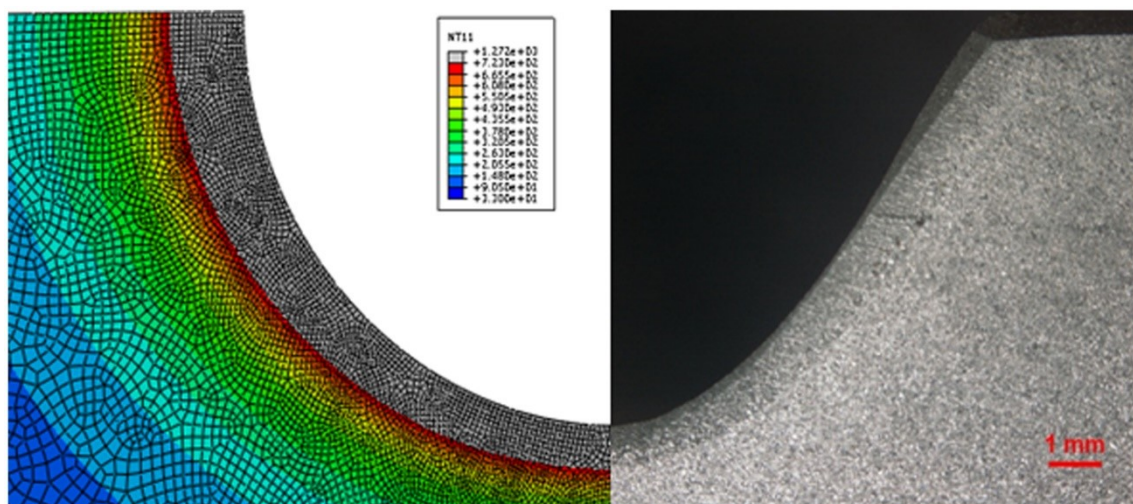
Dessa forma, foi realizada a bibliometria na plataforma *Scopus* em que foram pesquisados dois temas: o primeiro é referente aos trabalhos que abordavam a goivagem, e o segundo sobre os trabalhos de goivagem que faziam uso de simulações computacionais.

Como resultado dessa pesquisa, foi observado que nos últimos dez anos foram publicados 201 trabalhos sobre goivagem. Mas, apenas no trabalho de Hyun *et al.* (2018) foi realizada a simulação térmica e estrutural do processo de goivagem com eletrodo de carbono, e foi apresentada apenas a distorção sofrida pelo metal base. Em nenhum trabalho foi abordada a simulação estrutural com apresentação das tensões residuais.

A simulação da goivagem realizada por Hyun *et al.* (2018) foi totalmente controlada, ou seja, antes mesmo de a simulação ser realizada, os resultados de largura e profundidade da seção goivada já estavam pré-definidos. Dessa forma, ao

aplicar calor e utilizar funções de programação para desativar elementos da malha, foram obtidos os mesmos resultados quando comparado com o experimental, conforme o esperado, haja vista que antes de simular já estava tudo definido. A Figura 1 mostra o resultado encontrado por Hyun *et al.* (2018), em que é possível verificar, através da malha do modelo simulado, que a seção removida no processo foi pré-definida, pois a malha se adapta perfeitamente em torno da seção removida. É válido complementar que não foi utilizada malha adaptativa.

Figura 1 - Comparação de Zona Afetada pelo Calor Experimental e de Simulação de Goivagem com Resultados Pré-definidos



Fonte: Hyun *et al.* (2018).

Embora na Figura 1 as zonas afetadas pelo calor sejam semelhantes, é importante destacar que o resultado reflete todos os parâmetros controlados para tornar a simulação menos complexas e mais rápida.

2.2. Processos de Goivagem

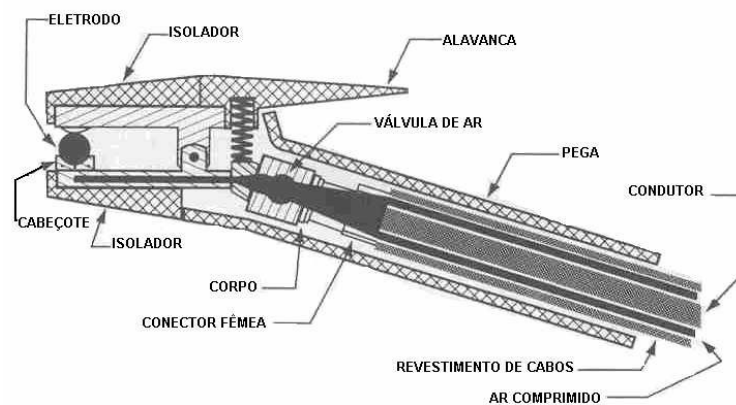
A goivagem é utilizada para remoção de discontinuidades em soldas como, por exemplo, poros, falta de fusão, inclusão de escória e trincas. Também tem seu uso na remoção de dispositivos fixados por solda, desmontagem de estruturas metálicas e na confecção de chanfros para posterior soldagem. Em suma, trata-se, segundo a AWS (2010), de um processo de corte térmico que remove metal por fusão para reparo de soldas ou criação de chanfros ou canais.

O processo de goivagem possui vários métodos de execução como, por exemplo, com maçarico oxiacetileno, com eletrodo de grafite, com eletrodo revestido, a arco plasma, dentre outros métodos que, conforme Marinho (2020), incluem até mesmo os meios mecânicos como usinagem e esmerilhamento. Encontram-se com maior frequência, trabalhos que abordam o uso de goivagem a plasma ou eletrodo de grafite. Como forma de entender melhor esse processo, dois dos métodos mais comuns serão comentados nos tópicos a seguir.

2.2.1. Goivagem com Eletrodo de Grafite

Conforme Neto e Costa (2018), a execução da goivagem com uso de eletrodo de grafite é realizada de forma análoga à goivagem com eletrodos revestidos, cuja diferença se encontra no porta-eletrodo utilizado e que é apresentado na Figura 2. Nesse processo é necessário o uso de ar comprimido para remover o metal líquido a uma pressão de 5,6 ~ 7,0 kgf/cm².

Figura 2 - Tocha de Goivagem com Eletrodo de Grafite



Fonte: Neto e Costa (2018).

Ainda de acordo com Neto e Costa (2018), esse método de goivagem pode ser realizado com corrente alternada ou contínua, cuja aplicação é dependente do metal base e tipo de eletrodo, podendo o eletrodo ser de dois tipos:

- Eletrodo de grafite com revestimento de cobre: o revestimento dá ao eletrodo maior capacidade de conduzir eletricidade. Esse tipo de eletrodo é utilizado em corrente contínua, mas caso a corrente alternada seja impositivamente a que

deve ser utilizada no processo, o revestimento de cobre deve ter em sua composição elementos estabilizadores de arco elétrico.

- Eletrodo nu: são eletrodos de grafite sem revestimento que apresentam maior desgaste se comparado aos eletrodos revestidos por ter menor capacidade de condução da eletricidade. Geralmente é empregado com corrente alternada para reduzir seu desgaste.

2.2.2. Goivagem com Arco Plasma

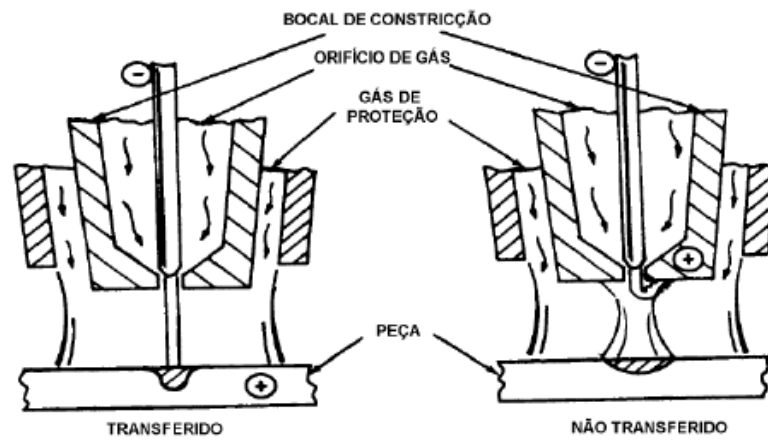
Conforme Tavares (2009), semelhantemente ao princípio de funcionamento do processo de soldagem a arco plasma, a goivagem a plasma remove material pelo aquecimento devido a um arco elétrico estabelecido entre o metal base e o eletrodo, que é denominado arco transferido, ou entre o eletrodo e o bocal constritor da tocha, que é definido como arco não-transferido, conforme mostrado na Figura 3.

A tocha utilizada nesse processo, apresentada ainda na Figura 4, possui uma câmara de gás ao redor do eletrodo e, quando o arco elétrico é estabelecido, esse fluxo de gás pressurizado é aquecido a uma temperatura suficiente para se tornar ionizado, em que tem seu estado mudado para plasma, e passa a conduzir eletricidade.

De acordo com Tavares (2009), o arco elétrico não transferido é gerado entre o eletrodo e o bocal constritor da tocha e é o responsável pela produção contínua de plasma, o qual sai pelo bico de cobre, impulsionado pelo gás pressurizado. É vantajoso o uso desse tipo de arco em materiais não condutores de eletricidade. Já o arco elétrico transferido, que é o mais empregado e seus princípios são como de outros processos de soldagem, é estabelecido entre o eletrodo e o metal base, sendo necessário que a peça seja condutora de eletricidade.

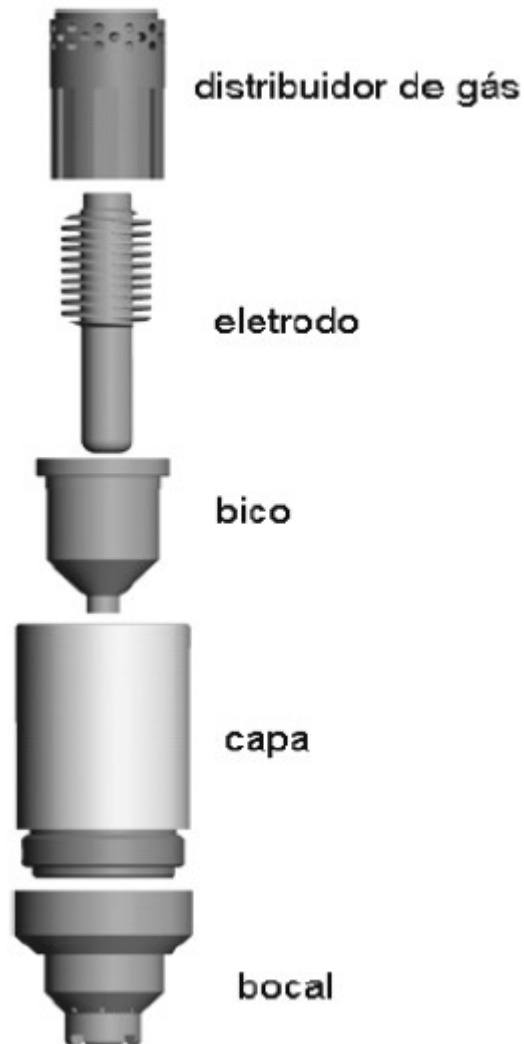
Ainda conforme Tavares (2009), a ignição do arco elétrico pode ocorrer de duas formas: por curto-circuito, onde o bico e o eletrodo estão inicialmente em contato e se distanciam devido à pressão do gás gerando assim uma centelha, ou por alta frequência, que gera o arco piloto a partir de uma alta tensão elétrica em frequências elevadas. O arco-piloto é aquele estabelecido entre o eletrodo e o bocal e tem como objetivo gerar o arco principal, esse estabelecido entre o eletrodo e a peça.

Figura 3 - Tipos de Arco do Processo Plasma



Fonte: Tavares (2009).

Figura 4 - Partes de Uma Tocha Plasma



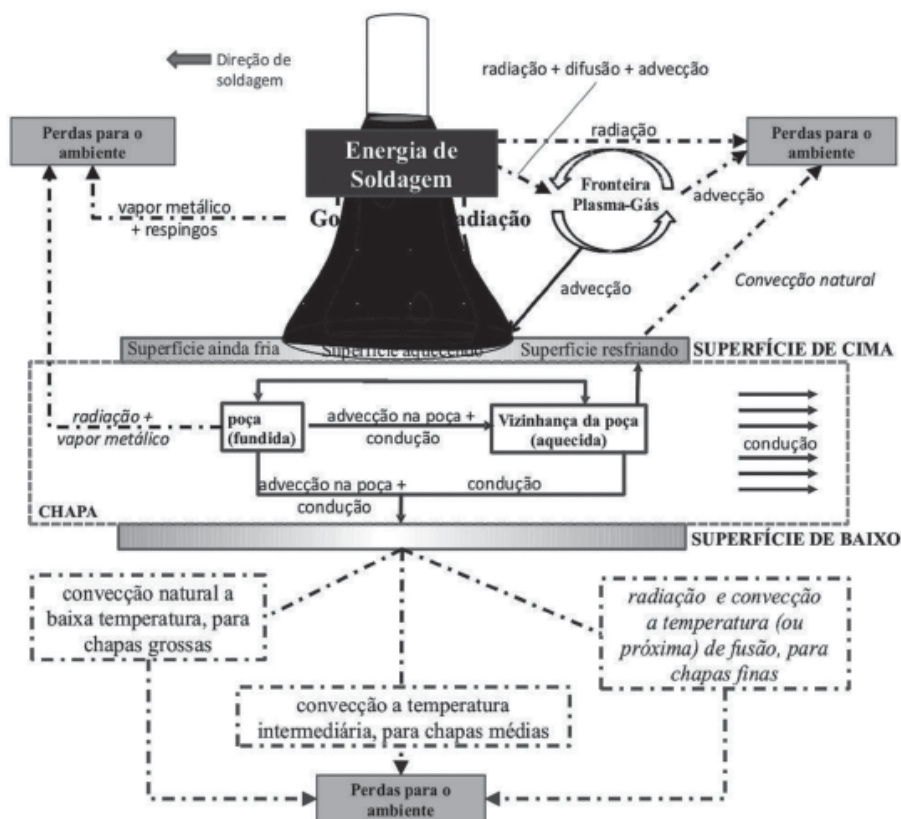
Fonte: Tavares (2009).

2.3. Fluxo de Calor na Soldagem

A goivagem, analogamente à soldagem, impõe grande quantidade de calor localizado em uma pequena área para que o material seja extraído. Em função disso, ocorrem mudanças nas propriedades mecânicas, físicas e químicas, além da concentração de tensões residuais e distorções e, conseqüentemente, a possível propagações de trincas.

Em virtude disso, ter conhecimento de como ocorre o fluxo de calor e as variáveis que o influenciam é fundamental para prognosticar possíveis alterações indesejáveis no produto final. Conforme Scotti, Reis e Liskevych (2012), o balanço térmico de um processo de soldagem a arco tem como entrada a energia imposta pela fonte de calor. É exatamente o mesmo que ocorre na soldagem, em que a goivagem se difere na posição da tocha e, em alguns casos, no uso de ar comprimido. Durante o processo, parte da energia térmica é utilizada para a remoção do material, enquanto outra é dissipada para o ambiente e por condução pelo metal base. Esse esquema de balanço térmico é apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Distribuição de Energia para Soldagem a Arco



Fonte: Scotti, Reis e Liskevych (2012).

2.3.1. Fluxo de Calor Bidimensional e Tridimensional

Rosenthal (1941) descreve duas equações para representar o fluxo de calor em chapas metálicas: a Equação 1 para chapas finas, onde se despreza a condução de calor ao longo da espessura tornando o problema bidimensional, e a Equação 2 para chapas grossas, em que é considerada a transferência de calor através da espessura, sendo esse, tridimensional. A Figura 6 esquematiza como ocorre o fluxo de calor em ambos os casos.

$$T - T_0 = \frac{Q}{2\epsilon\pi k} \exp\left(-\frac{v_x}{2\alpha}\right) K_0\left(\frac{v_r}{2\alpha}\right) \quad (1)$$

$$T - T_0 = \frac{Q}{2\pi k} \left(\frac{1}{r}\right) \exp\left[-\frac{v_s}{2\alpha}(r + x)\right] \quad (2)$$

Onde,

T – Temperatura [°C];

T₀ – Temperatura inicial [°C];

K₀ – Função de Bessel modificada de segundo tipo e ordem zero;

e – Espessura da chapa [m];

r – Distância radial da origem [m];

α – Difusividade térmica do material (k/ρC_p).

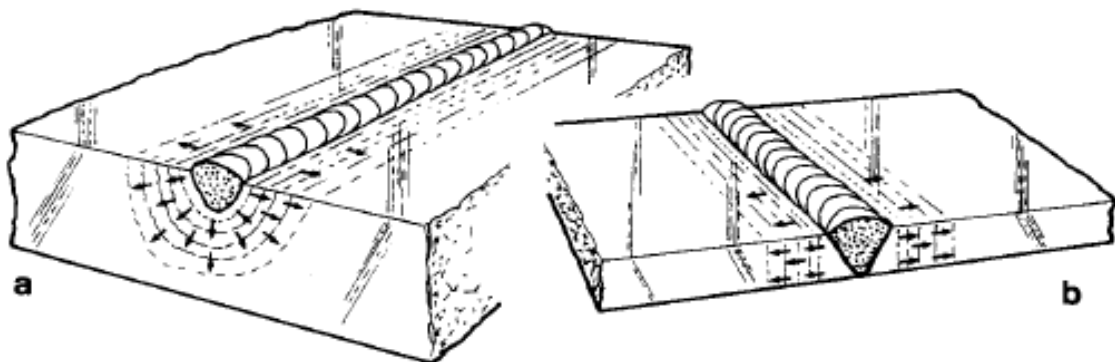


Figura 6 - Fluxo de Calor Tridimensional (a) e bidimensional (b)

Fonte: Adaptado de Sorensen, 1999.

Para Sorensen (1999), é preciso estabelecer um parâmetro que defina quando o modelo bidimensional ou tridimensional deve ser adotado. Analisa-se então, a espessura relativa em relação à taxa de resfriamento. Doravante, as Equações 3 e 4, juntamente com a Figura 7, auxiliam na escolha da dimensão que melhor se adapta para o caso em análise.

$$\bar{e} = e \sqrt{\rho c v (T - T_0)/Q} \quad (3)$$

$$e_{\text{transição}} = e/\bar{e} \quad (4)$$

Onde,

\bar{e} – Espessura relativa da chapa;

ρ – Massa específica [kg/m³];

c – Calor específico [J/kg·K];

v – Velocidade de soldagem [m/s];

Q – Potência [W].

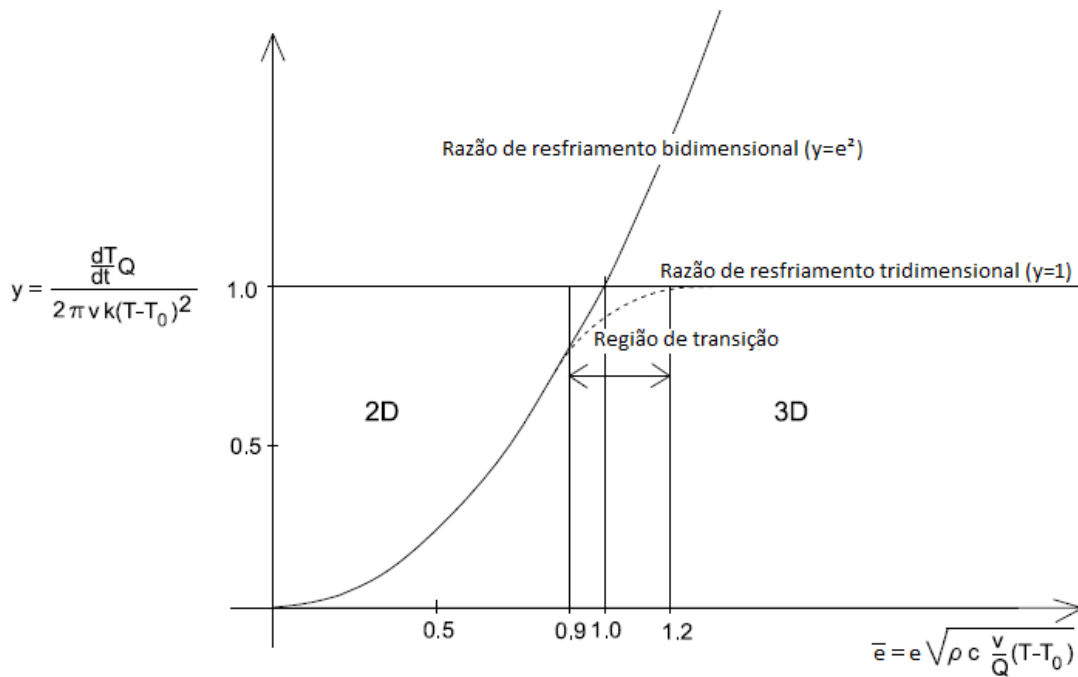
A espessura relativa da chapa determina de forma adimensional um valor que define quando o fluxo de calor deve ser considerado bidimensional ou tridimensional. O cálculo desse, conforme apresentado na Equação 3, leva em consideração as propriedades do material, assim como as temperaturas alcançadas no modelo e a potência utilizada no processo de goivagem a plasma, para esse caso de estudo.

Ao associar as Equações 3 e 4 com o gráfico da Figura 7, define-se as condições para assumir a análise bidimensional quando satisfeita a condição da Equação 5, ou tridimensional quando o requisito da Equação 6 é atendido.

$$e_{\text{transição}} > e_{\text{atual}} \quad \text{ou} \quad \bar{e} \leq 0,9 \quad (5)$$

$$e_{\text{transição}} < e_{\text{atual}} \quad \text{ou} \quad \bar{e} \geq 1,2 \quad (6)$$

Figura 7 - Razão de Resfriamento Adimensional em Função da Espessura Adimensional



Fonte: Sorensen (1999).

2.4. Transferência de Calor

Conforme supracitado, conhecer a forma como o calor proveniente do processo de goivagem se distribui ao longo do metal base, possibilita a análise de tensões residuais e deformidades.

Os fenômenos de transferência de calor envolvidos são a condução, radiação, convecção e calor latente, discutidos nos subtópicos a seguir.

2.4.1. Condução

Condução é a transferência de calor que ocorre no metal base, das partículas mais energéticas para as menos energéticas, segundo Çengel e Ghajar (2012). O fluxo de calor por condução (Q''_{cd}) é calculado, conforme Equação 7, a partir de seções transversais ao cordão de solda, levando em consideração as diferenças de temperatura no metal base e o coeficiente de condutividade térmica, que é uma propriedade do material e é termicamente dependente.

$$Q''_{cd} = k\Delta T/L \quad (7)$$

Onde,

k – Coeficiente de condutividade térmica [W/(m·K)];

ΔT – Diferença de temperatura entre as extremidades da chapa [°C];

L – Largura da chapa [m].

2.4.2. Convecção

Convecção é o nome dado à transferência de calor que ocorre entre uma superfície e um fluido que, de acordo com Incropera *et al.* (2008), acontece através de dois fenômenos: o primeiro é a advecção, ou movimentação macroscópica do fluido, que faz com que haja a transferência de energia devido ao deslocamento de grandes quantidades de moléculas, associado ao gradiente de temperatura. Simultaneamente ocorre a agitação molecular aleatória, conhecida como difusão, é o segundo fenômeno presente na convecção, a qual faz com que a transferência de calor total seja devida a superposição da difusão à movimentação macroscópica.

Conforme é definida a transferência de calor por convecção por Incropera *et al.* (2008) o fluxo de calor devido a convecção (Q''_{cv}) é governado pela temperatura do fluido suficientemente distante da superfície (T_∞), temperatura da superfície em análise (T_s), e o coeficiente convectivo de transferência de calor (h_c), conforme Equação 8.

$$Q''_{cv} = h_c (T_s - T_\infty) \quad (8)$$

Entre as variáveis envolvidas no cálculo do fluxo de calor por convecção para a simulação numérica, é necessário informar apenas o coeficiente convectivo e a temperatura ambiente, pois os demais parâmetros são provenientes dos cálculos realizados pelo *software*.

Por não existir trabalhos publicados sobre análise numérica de goivagem, foi consultada a literatura acerca de simulações computacionais de soldagem para verificar como é avaliado o coeficiente de convecção. Percebe-se então, que o coeficiente de convecção é admitido como constante durante todo o tempo, o que é um dos fatores que justificam a diferença entre os resultados obtidos experimentalmente e computacionalmente. Teixeira, Araújo e Cunda (2014)

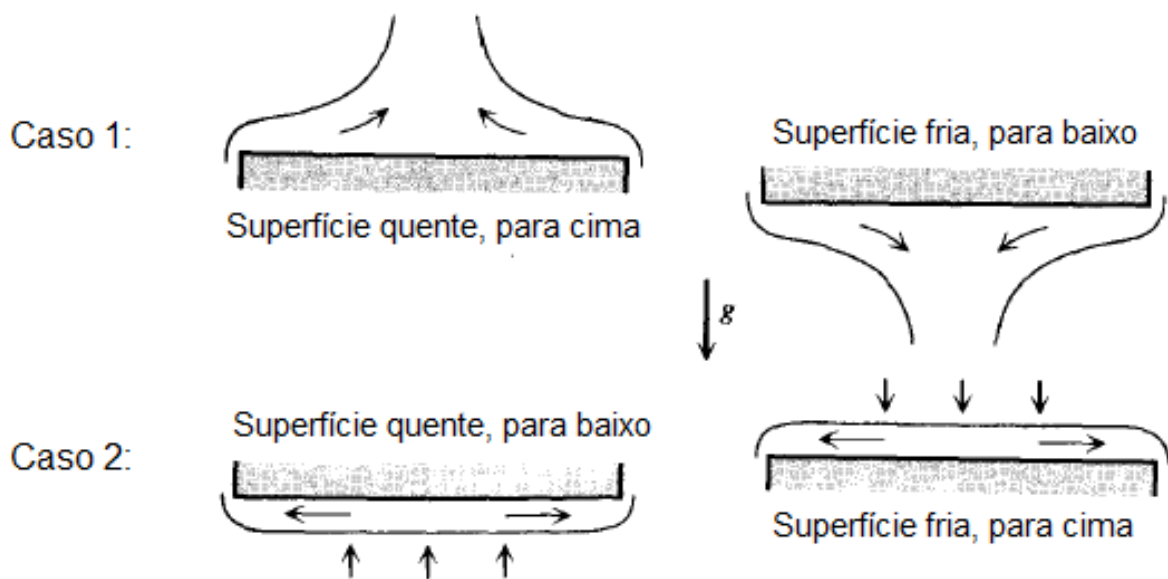
realizaram seu estudo utilizando o valor de 20 W/m²K para esse parâmetro; já Farias (2015), empregou essa variável como sendo 10 W/m²K; outros autores como Teng *et al.* (2001), e Gery, Long e Maropoulos (2005) propuseram que esse coeficiente deve ser igual a 15 W/m²K. Logo, a partir da revisão bibliográfica realizada, encontra-se valores distintos em trabalhos de diferentes autores, mas majoritariamente compreendidos entre 10 e 25 W/m²K.

Alternativamente, com o propósito de descrever o fluxo variável de calor, Çengel e Ghajar (2012) e Bergman *et al.* (2014), recomendam o uso da relação existente entre o coeficiente de convecção, o comprimento característico (L_c) que é a razão entre a área e o perímetro e a condutividade térmica do fluido (k_f), conhecida como número de Nusselt (Nu), expressa na Equação 9.

$$Nu = h_c L_c / k_f \quad (9)$$

Çengel e Ghajar (2012) utilizam de outra correlação para informar o número de Nusselt na Equação 9, essa relação é dependente da orientação da chapa durante a goivagem, conforme Figura 8, e do número de Rayleigh (R_a) de acordo com as Equações 10 e 11.

Figura 8 - Influência da Orientação da Chapa na Transferência de Calor



Fonte: Adaptado de Çengel e Ghajar (2012)

Para o primeiro caso, o número de Nusselt é:

$$\text{Nu} = \begin{cases} 0,54 R_a^{1/4} & \text{se } R_a < 10^7 \\ 0,15 R_a^{1/3} & \text{se } 10^7 < R_a < 10^9 \end{cases} \quad (10)$$

A relação para o segundo caso é:

$$\text{Nu} = 0,27 R_a^{1/4} \quad \text{se } 10^5 < R_a < 10^{10} \quad (11)$$

O número de Rayleigh, conforme Çengel e Ghajar (2012), é o produto entre as forças de flutuação das difusividades térmicas e de quantidade de movimento, representado pela Equação 12.

$$R_a = g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3 P_r / \nu^2 \quad (12)$$

Onde,

g – Aceleração gravitacional (9,81 m/s²);

β – Coeficiente de expansão volumétrica [K⁻¹];

ν – Viscosidade cinemática do fluido [m²/s];

P_r – Número de Prandtl.

Os parâmetros k_f , ν e P_r são tabelados, e assim como β , são avaliados na temperatura média entre a temperatura da superfície e a temperatura do fluido, também denominada como temperatura ambiente.

A tabela com as propriedades do ar a uma atmosfera de pressão é apresentada no Anexo A.

2.4.3. Radiação

Para Incropera *et al.* (2008), a radiação ocorre através de ondas eletromagnéticas a partir de superfícies que não estão em contato e sem a

necessidade de um meio natural entre elas. O fluxo de calor por radiação (Q''_{rad}) é quantificado pela Equação 13.

$$Q''_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma_s (T_S^4 - T_{\text{viz}}^4) \quad (13)$$

Onde,

ε – emissividade;

σ_s – constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{C}^4$);

T_s – temperatura da superfície em análise [$^{\circ}\text{C}$];

T_{viz} – temperatura da vizinhança [$^{\circ}\text{C}$].

A Equação 13 indica que, além da diferença de temperatura entre as superfícies, a emissividade é uma variável necessária para quantificar essa forma de transferência de calor. Essa é descrita, por Touloukian e DeWitt (1970), como sendo uma medida da eficiência na qual um material emite energia em relação à superfície de um radiador ideal. Ao realizar medições desse parâmetro em diferentes temperaturas para um aço carbono, Touloukian e DeWitt (1970), obtiveram os resultados apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Emissividade do Aço Carbono em Relação à Temperatura

Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]	ε
602	0,809
624	0,822
727	0,725
764	0,852
826	0,782
887	0,754
943	0,799
1132	0,791

Fonte: Touloukian e DeWitt (1970).

2.5. Fonte de Calor

O arco-elétrico estabelecido entre o metal base e o eletrodo pode assumir diferentes formas geométricas dependendo do processo de goivagem adotado e dos

parâmetros que são empregados. A fonte de calor é uma região de intenso aporte térmico para que ocorra a remoção de material por fusão. Compreender a fonte de calor é o primeiro passo para o desenvolvimento de uma análise analítica direta da goivagem.

A modelagem da fonte de calor possibilita o conhecimento dos gradientes de temperatura no metal base durante e após a execução da goivagem. Conforme Araújo (2012), para a soldagem de um dado material, a forma com que o calor é distribuído pode interferir em parâmetros como a dimensão da zona de fusão, zona termicamente afetada, microestrutura, tensões residuais, distorções e várias outras características. A pretexto disso, é importante compreender primeiramente, a fonte de calor para se obter simulações e análises corretas.

Pham (2013) descreve que o comportamento fundamental da taxa de transferência de calor linear é dado pela Equação 14.

$$Q'' = -k \nabla T \quad (14)$$

Onde,

Q'' – Fluxo de calor [W/m^2];

k – Coeficiente de condutividade térmica [$W/(m \cdot K)$];

∇T – Gradiente de temperatura [$^{\circ}C$].

Partindo dessa equação, modelos de fonte de calor móvel foram inicialmente desenvolvidas por Rosenthal (1941), com algumas simplificações:

- Propriedades do material são constantes;
- Fonte de calor é pontual;
- Fluxo de calor estacionário;
- Calor gerado pelo efeito joule é negligenciado;
- Não há perda de calor na superfície da peça;
- Não é considerada a convecção na poça de fusão.

Conforme Sorensen (1999), as simplificações de Rosenthal fazem com que sejam impossíveis as análises do início e fim da soldagem, pois são regiões de regime transiente. Ao iniciar o processo, a temperatura ao redor da fonte de calor que está

sendo imposta continua subindo, e ao finalizar, interrompendo a imposição de calor, a temperatura cai. Já a seção entre as sobreditas é conhecida como *quasi-estática* e pode ser analisada em conformidade com o proposto por Rosenthal (1941), por apresentar uma distribuição de temperatura estacionária em um sistema de coordenadas que se move junto com a fonte de calor.

Mesmo analisando a região *quasi-estática*, considerar que as propriedades do material não são termicamente dependentes e que a fonte de calor é pontual ao invés de distribuída em uma área ou volume, podem trazer divergências entre o calculado e observado.

Desde então, objetivando sempre atingir a maior confiabilidade das análises dos processos de soldagem, vários modelos de fonte de calor foram desenvolvidos para se adaptarem aos mais variados processos. Esses serão abordados nos subtópicos a seguir.

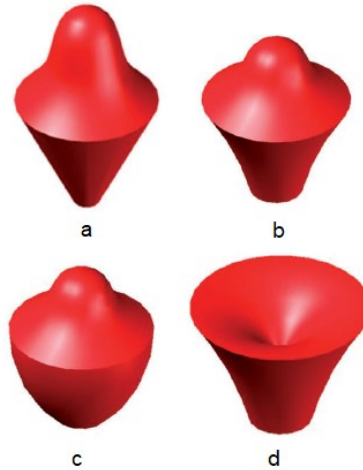
2.5.1. Modelos de Fonte de Calor

A forma que a fonte de calor assume está diretamente associada ao processo e parâmetros que serão empregados. O trabalho sobre soldagem a plasma, desenvolvido por Dhinakaran, Shanmugam e Sankaranarayananamy (2015), demonstra como são vastos os modelos de fonte de calor e como podem ser adaptados para a análise desejada ao criarem quatro possíveis fontes de calor para solucionar o mesmo caso. São essas exibidas na Figura 9, e são adequadas para a forma (a) gaussiana cônica tridimensional, (b) gaussiana cônica tridimensional modificada, (c) gaussiana parabólica e (d) *quasi-estacionária*.

Em meio ao grande número de possibilidades que a forma de uma fonte de calor pode assumir, observa-se uma certa repetição nas geometrias que são base para o desenvolvimento de modelos únicos. Kou e Wang (1986) em suas análises perceberam que a forma gaussiana apresenta bons resultados para a análises do processo *Gas-shielded Tungsten Arc Welding* (GTAW). O mesmo é observado por Wu, Wang e Zhang (2006), que designam brevemente a fonte gaussiana para ocasiões em que há pouca penetração, e fontes do tipo elipsoidal para situações em que se observa penetrações maiores. À vista disso, vários modelos são provenientes da forma gaussiana, sendo que a tradicional é apresentada no Subtópico 2.6.1.1 e

outra comumente utilizada em simulações de soldagem a plasma é apresentada no Subtópico 2.6.1.2.

Figura 9 - Fontes de Calor Adaptadas para Soldagem a Plasma

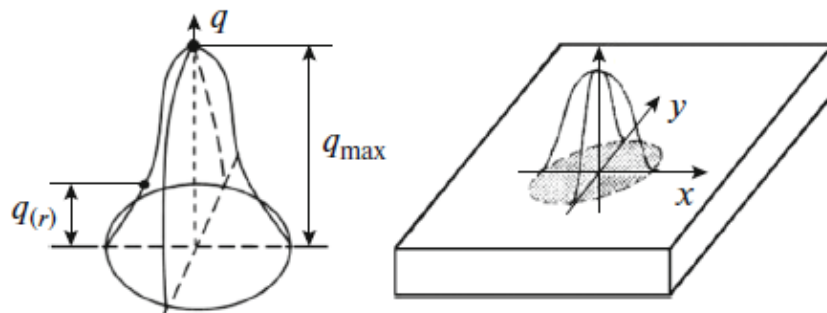


Fonte: Adaptado de Dhinakaran, Shanmugam e Sankaranarayanan (2015).

2.5.1.1. Fonte de Calor Gaussiana

A fonte de calor gaussiana foi uma das primeiras desenvolvidas e é a mais utilizada devido a sua simplicidade e grande semelhança com o arco elétrico estabelecido na maioria dos processos de soldagem. Foi baseado nesse modelo que o trabalho de Dhinakaran, Shanmugam e Sankaranarayanan (2015), variou entre os tipos de fontes de calor para a soldagem a plasma. O modelo da fonte gaussiana é mostrado na Figura 10.

Figura 10 - Fonte de Calor Gaussiana



Fonte: Dehkordi, Anaraki e Shahani (2019).

Com geometria simples e matematicamente descrita na Equação 15, essa fonte possui ampla utilização, como por exemplo, na análise da soldagem por feixe de

elétrons realizada por Rouquette, Guo e Masson (2007), e até mesmo no estudo de Teixeira, Araújo e Cunda (2014) que verificaram a distribuição de calor dessa fonte pelo processo de soldagem *Tungsten Inert Gas* (TIG).

$$Q'' = (Q/2\pi\sigma_r^2) \exp\left(-r^2/2\sigma_r^2\right) \quad (15)$$

Onde Q'' é o fluxo de calor na superfície no raio r , e σ_r é a distância radial em relação ao centro da fonte de calor.

2.5.1.2. Fonte de Calor Logarítmica

Fonte de calor logarítmica é uma variação da forma gaussiana, cujo objetivo é adaptá-la para ser utilizada em simulações de soldagem a plasma, conforme literatura a ser descrita nesse tópico. A abordagem dessa fonte de calor se torna importante nesse trabalho devido à sua aplicação, pois o caso de estudo é sobre o processo de goivagem também é a plasma, mesmo que haja parâmetros significativamente diferentes quando comparado com a soldagem a plasma.

A fonte de calor logarítmica foi utilizada em trabalhos de simulação de soldagem a plasma por Dhinakaran, Shanmugam e Sankaranarayananamy (2015), que também afirmaram ser aplicável para os casos de soldagem a laser e por feixe de elétrons, também foi usada na simulação de soldagem laser por Shahabad *et al.* (2020). Tavares (2009) escrutinou, experimentalmente, que a zona fundida da soldagem a plasma assumia o aspecto logarítmico. A forma que a fonte de calor logarítmica assume é apresentada na Figura 11.

O equacionamento que descreve a distribuição de calor inicia-se no cálculo do raio variável (r_0), que pode ser descrito conforme Equação 16.

$$r_0 = a \ln(z) + b \quad (16)$$

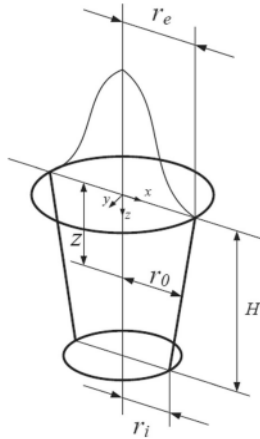
Onde as variáveis a e b representam simplificações das Equações 17 e 18, respectivamente.

$$a = (r_e - r_i) / (\ln(z_e) - \ln(z_i)) \quad (17)$$

$$b = (r_i \ln(z_e) - r_e \ln(z_i)) / (\ln(z_e) - \ln(z_i)) \quad (18)$$

Em que r_e é o raio superior, r_i é o raio inferior da fonte de calor, enquanto que z_e e z_i são as coordenadas da superfície do topo e da base da fonte, respectivamente.

Figura 11 - Forma da Fonte de Calor Logarítmica



Fonte: Shahabad *et al.* (2020).

Por conseguinte, a distribuição da intensidade da energia imposta no sistema é dada pela Equação 19. Onde r representa a raiz quadrada da somatória do quadrado das coordenadas do ponto em análise, e Q é o calor total imposto.

$$Q'' = Q \exp\left(-3r^2/r_0^2\right) \quad (19)$$

2.6. Tensões Residuais

A *American Welding Society* (2010) caracteriza a tensão residual como sendo aquela presente em uma junta soldada ou metal base que está livre de esforços externos e gradientes térmicos. Já para Araújo (2012), as tensões presentes durante o processo de soldagem e resfriamento também são classificadas como residuais. Essas tensões influenciam na resistência mecânica e no funcionamento da peça ou estrutura soldada, podendo até mesmo contribuir para o surgimento de trincas.

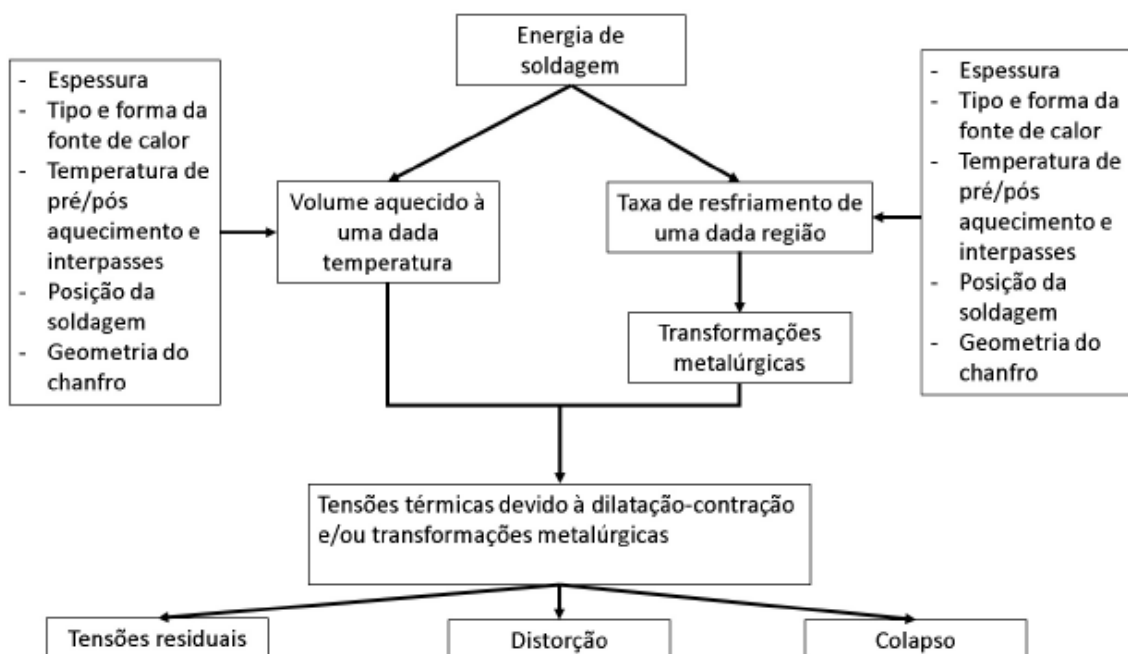
Macherauch (1977) afirma que as tensões residuais de soldagem têm suas origens no resfriamento superficial mais intenso, na contração durante o resfriamento de regiões diferentemente aquecidas e plastificadas durante a soldagem, bem como transformações de fase. Ademais, outros fatores operacionais podem influenciar na intensidade com que essas tensões residuais surgirão.

Ao revisar sobre a influência dos parâmetros operacionais sobre as tensões residuais devido a soldagem, Mishchenko e Scotti (2018) concluíram que a literatura apresenta resultados antagônicos nas tentativas de definir, quantificar, e até mesmo qualificar, o efeito separado de cada fator operacional sobre a geração de tensões residuais, seja através de análises computacionais ou experimentais. Com a finalidade de oferecer uma visão geral sobre a influência dos vários parâmetros envolvidos no processo de soldagem, foi proposto por Mishchenko e Scotti (2018) o diagrama da Figura 12.

Gurova, Quaranta e Estefen (2006) ressaltam que quando a estrutura soldada não possui rigidez suficiente, ocorrem distorções, ou até mesmo o colapso, com o objetivo de aliviar as tensões residuais. Isso também é mostrado na Figura 12.

Devido ao alto calor que é imposto em um processo de soldagem e a distribuição não uniforme de temperatura, as tensões residuais no metal base estarão dispostas de forma transversal, longitudinal e transversal normal ao plano da chapa. A forma como essas tensões estão dispostas e a sua intensidade ainda não são conhecidas para a goivagem.

Figura 12 - Influência de Parâmetros Operacionais Sobre as Tensões Residuais



Fonte: Mishchenko e Scotti (2018).

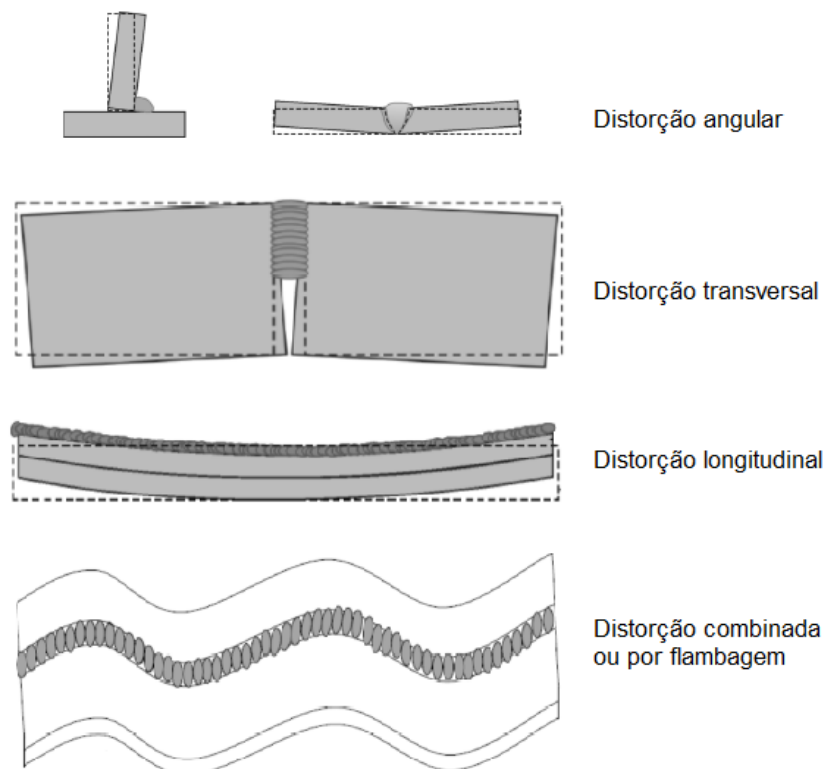
2.7. Distorções

Distorções são alterações geométricas permanentes no metal base soldado que ocorrem sob influência de tensões térmicas, com o objetivo de aliviar os esforços durante a soldagem e/ou resfriamento.

Entende-se por tensões térmicas, em consonância com a AWS (2010), como sendo a tensão no material resultante da distribuição não uniforme de temperatura ou diferentes expansões térmicas, ou seja, durante a soldagem e resfriamento, as tensões existentes no metal base são do tipo térmica. Quando o material atinge a temperatura ambiente, essas tensões passam a ser denominadas como residuais, pois não existem mais cargas externas ou distribuição não uniforme de temperatura atuando no metal base.

Conforme Kalyankar e Shah (2018), as distorções provocadas pelo processo de soldagem podem ser do tipo angular, transversal, longitudinal ou combinada. A Figura 13 exemplifica cada uma dessas formas, em que espera-se observar o mesmo resultado devido a goivagem.

Figura 13 - Formas de Distorções



Fonte: Adaptado de Kalyankar e Shah (2018).

À vista do exposto, pode-se afirmar que as distorções e tensões residuais são provenientes de tensões térmicas. Entretanto, para autores como Araújo (2012) e Farias (2015), as distorções são consequências das tensões residuais, pois consideram as tensões térmicas como sendo, também, residuais.

Diversos fatores exercem influência na geração e intensidade das distorções, conforme diagrama da Figura 12 apresentado por Mishchenko e Scotti (2018). Em razão disso, Deng *et al.* (2013) afirmaram a dificuldade de prever de forma exata como ocorrerão essas distorções, entretanto, Deng *et al.* (2013) colocam em evidência três parâmetros que afetam significativamente esse fenômeno, são elas: as dimensões e os aspectos geométricos da peça soldada, as propriedades termomecânicas do material e o processo de soldagem utilizado, em que pode ser feita uma analogia aos processos de goivagem.

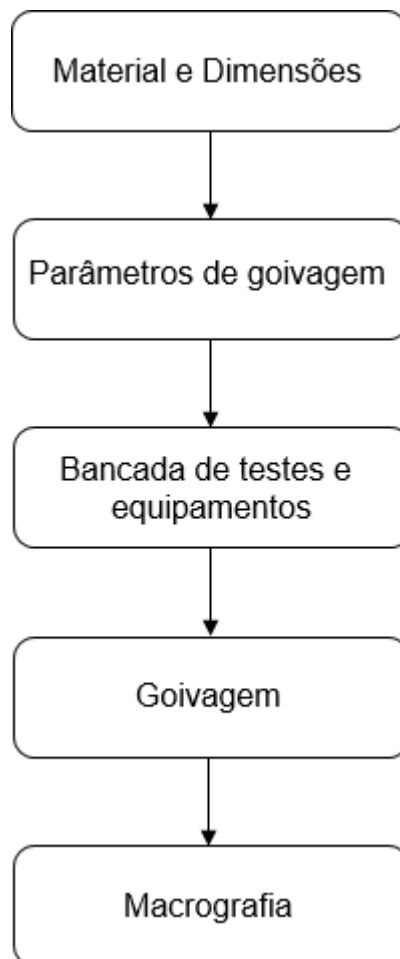
CAPÍTULO III

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Experimentalmente, o trabalho se desenvolve de forma simples e objetiva, cujos detalhes são apresentados no decorrer desse capítulo. Porquanto o objetivo principal desse estudo é o desenvolvimento de um método numérico para simular o processo de goivagem, contudo, sabe-se que a validação dos resultados computacionais com trabalho experimental é de extrema e indispensável importância para que a simulação desenvolvida tenha significância em suas aplicações.

A sequência de execução da metodologia experimental segue o fluxograma da Figura 14.

Figura 14 - Fluxograma para Execução da Metodologia Experimental

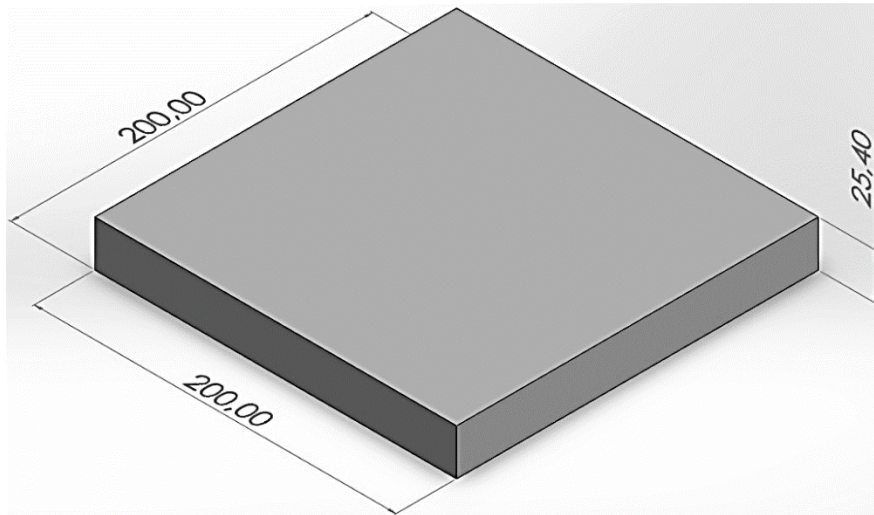


Fonte: Autoria própria.

3.1. Metal Base

Nesse trabalho foi utilizada uma chapa do material ASTM A131 EH36, cuja disponibilidade no laboratório era nas dimensões de 200 x 200 x 25,4 mm. O croqui da chapa a ser goivada é apresentado na Figura 15.

Figura 15 - Croqui da Placa de Testes para Goivagem com Dimensões em mm



Fonte: Autoria própria.

3.2. Equipamentos

Para a execução da goivagem, é utilizada a fonte Powermax1650 da fabricante HyperTherm, conforme mostrado na Figura 16.

Figura 16 - Fonte Powermax1650



Fonte: HyperTherm (2021).

Para a execução da goivagem, é utilizada a mesa de coordenadas XY para automatização desse processo e, conseqüentemente, melhor controle e precisão dos parâmetros analisados. A Figura 17 apresenta a bancada experimental para esse estudo.

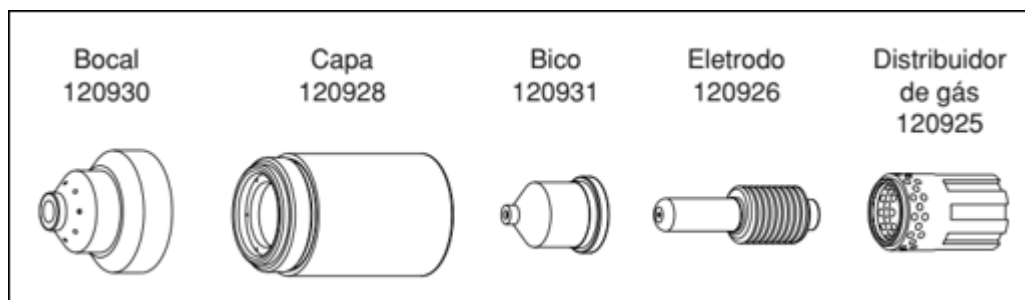
Figura 17 - Equipamentos da Bancada Experimental



Fonte: Autoria própria.

A tocha utilizada é a T100M MATCH TECH ASSY 25, cujos consumíveis, exibidos na Figura 18, são da mesma fabricante.

Figura 18 - Consumíveis Protegidos para Tocha T100M para Corrente de 60A



Fonte: HyperTherm (2022)

Após a realização da goivagem e macrografia, foi realizado o escaneamento da chapa goivada com o equipamento 3D AMETEK Handyscan 307 para obter as dimensões, largura e profundidade da seção goivada.

3.3. Goivagem

No processo de goivagem, os parâmetros que influenciam efetivamente na remoção de material são a corrente, velocidade de deslocamento da tocha, distância do bico à peça (DBP), ângulo de ataque da tocha e pressão do gás, além do tipo e dimensões do bico de corte da tocha.

Dentre os parâmetros do processo, o bocal da tocha disponível no laboratório para a realização da goivagem é correspondente com a corrente de 60A, cujo diâmetro e comprimento desse é igual a 8 mm e 42 mm, respectivamente.

É definida que a goivagem deve ser realizada sem oscilação, visto que essa será utilizada para validação de um novo método de simulação, de forma a ser simplificada para evitar que tenha muitas variáveis interferindo nos resultados do estudo numérico. A partir disso, é determinado que o item 3 da bancada de testes da Figura 17, não deve ser utilizado.

As demais variáveis foram ajustadas conforme os parâmetros de corte fornecidos pelo manual do fabricante, haja vista que não são sugeridos parâmetros para goivagem. Isso indica valores de velocidade de acordo com a corrente utilizada e com a espessura a ser cortada, mantendo a DBP, ângulo de ataque e pressão do gás constantes.

Os parâmetros ajustados para o processo são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros para Remoção de Material por Goivagem

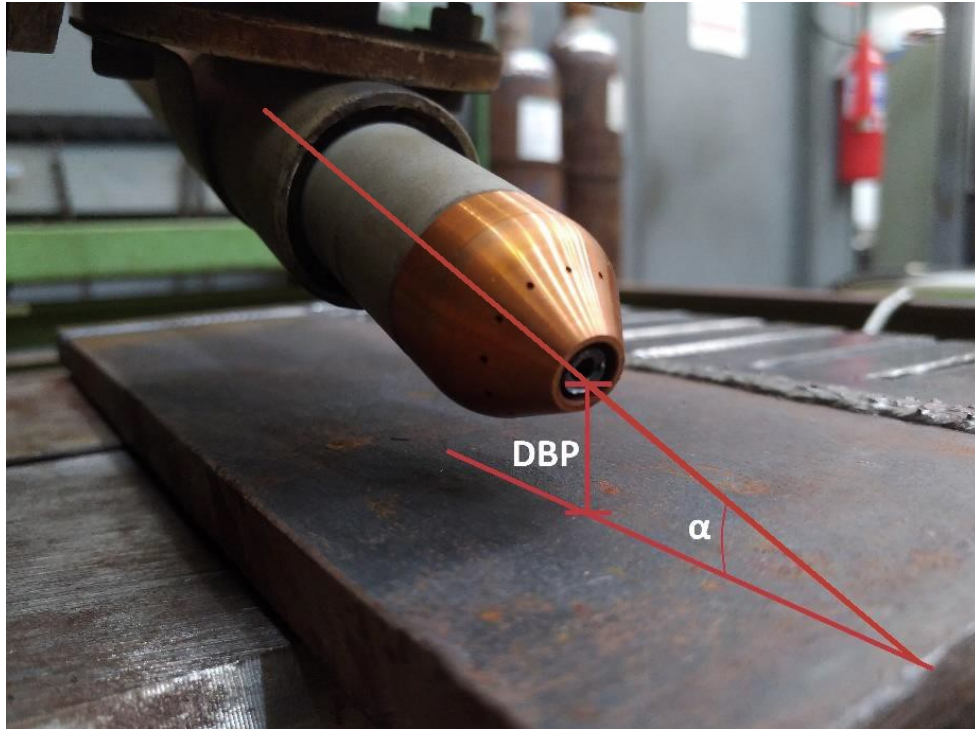
Pressão do ar [psi]	DBP [mm]	Ângulo de ataque [°]	Corrente [A]	Velocidade de goivagem [mm/s]
55	1,5	45	60	5,1

Fonte: Autoria própria.

Para definir o método de medição da DBP, essa foi tomada como sendo a distância entre a região inferior do orifício constritor e a superfície da placa de teste, a

qual foi referência para a medição do ângulo de ataque da tocha (α), conforme apresentado na Figura 19.

Figura 19 - Representação da Referência para a Medição da Distância entre Bico e Peça (DBP) e do Ângulo de Ataque (α)



Fonte: Autoria própria.

Durante a goivagem, a chapa foi fixada por dois sargentos em cada lado da chapa.

3.4. Análise Macrográfica

Após a goivagem, é realizada a macrografotografia da seção transversal goivada. Faz-se uso da serra fita para realizar um corte transversal a 25 mm do final da goivagem. A superfície resultante é preparada por lixamento e então, atacadas em solução contendo 4% de ácido nítrico P.A. 65% em álcool etílico (Nital).

A macrografia é realizada pois é através dela que os resultados computacionais serão validados. É possível comparar a largura, profundidade, zona removida pela goivagem e zona afetada pelo calor, cujas medições são realizadas através do escaneamento da peça.

CAPÍTULO IV

METODOLOGIA COMPUTACIONAL

Apesar da simulação dos processos de soldagem já ser conhecida e bastante difundida, antagonicamente a goivagem possui um trabalho publicado com uma abordagem que representa incorretamente o processo. Assim como na soldagem, a simulação de goivagem é composta por um acoplamento de diversos tipos de análises ou subdomínios. Simplificando, pode-se dividir em três tipos diferentes de análise: a primeira é a análise térmica, que inclui os campos de temperatura, fluxo de calor, ciclos térmicos, geometria de poça de fusão entre outros; a segunda é a análise estrutural, que inclui as distorções, tensões residuais e outras; já a terceira é a metalúrgica, que corresponde à microestrutura, transformações microestruturais, dureza e diversos tipos de trincas.

A simulação desenvolvida nesse trabalho é do tipo termo estrutural e faz uso do *software Ansys Mechanical APDL* e passa por três níveis fundamentais, que são o pré-processamento, a solução e o pós-processamento, os quais serão abordados nos tópicos desse capítulo.

4.1. Procedimento Numérico da Goivagem

Nos modelos numéricos, o calor imposto em processos de goivagem ou soldagem são aplicados pelas fontes de calor que impõe um fluxo de calor nos nós da malha a cada “*step*”, ou seja, em um determinado intervalo de tempo (Δt). O valor do Δt para a aplicação de calor é calculado em função da velocidade de translação da soldagem ou goivagem (v), que nesse trabalho é igual a 5,1 mm/s, e do tamanho dos elementos (d_n), que é varia de 0,2 a 0,6 mm com a finalidade de estudo de convergência de malha. O cálculo do Δt é mostrado na Equação 20.

$$\Delta t = \frac{\Delta S}{v} = \frac{d_n}{v} \quad (20)$$

Onde Δt é o tempo de permanência da fonte de calor nos nós em cada *step*, ΔS é a variação de espaço (a variação de espaço seria a distância entre nós), v é a velocidade de soldagem, d_n é a distância entre os nós.

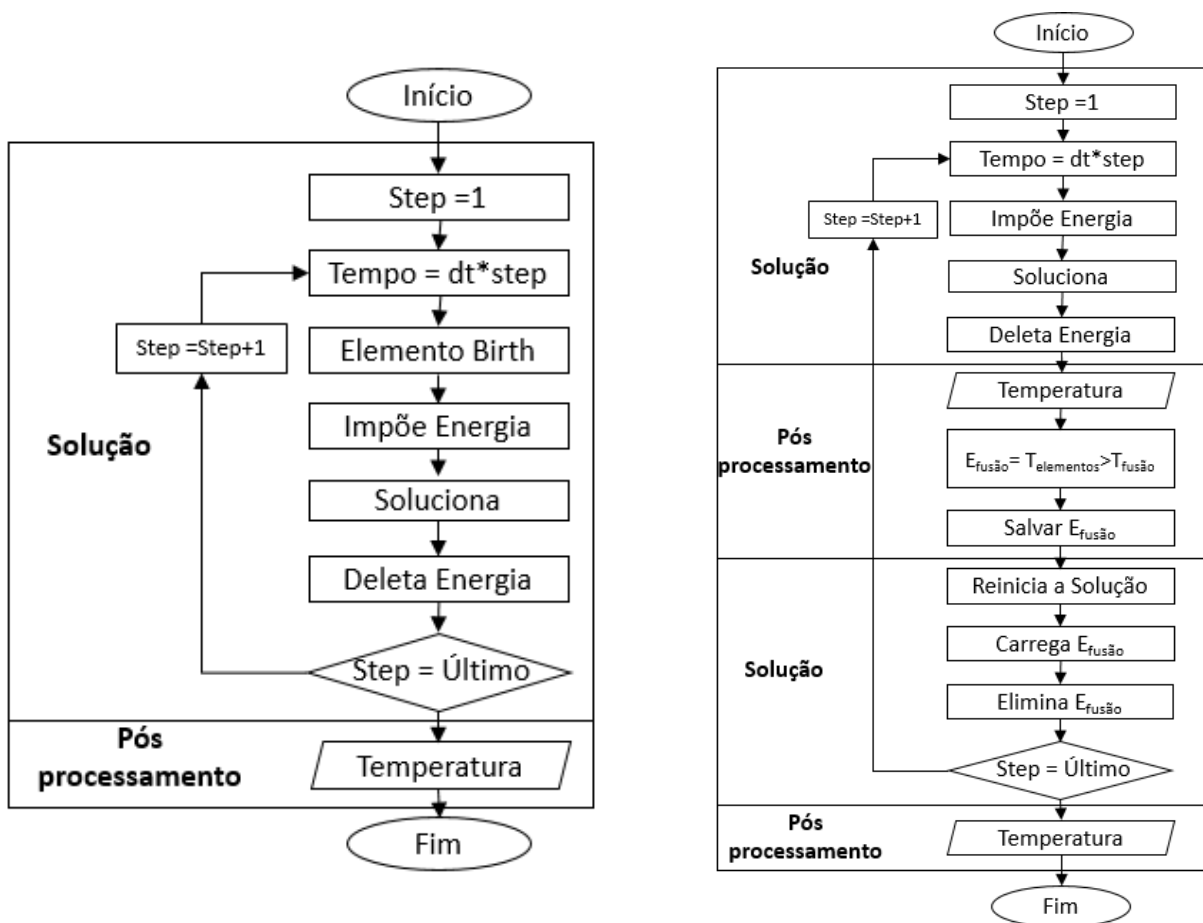
Para a simulação do processo de goivagem foram utilizado algoritmos semelhantes ao dos processos de soldagem, porém, além da solução térmica tradicional, é feito o desaparecimento do material que foi fundido pela fonte de calor. Para isso, foi utilizada a técnica dos elementos “*birth and death*”. Esta técnica não consiste apenas no surgimento ou desaparecimento dos elementos, mas sim na mudança de propriedades desta malha, isto significa que, a matriz rigidez desta técnica de elementos finitos recebe um valor muito pequeno, sendo 10^{-6} como padrão do software Ansys®. No caso de transferência de calor, a matriz rigidez é a condutividade térmica. Para este trabalho, a condição de “*death*” dos elementos é a temperatura de fusão do material igual a 1500°C (temperatura de fusão do aço). Entretanto, este tipo de análise não é tão trivial assim, isto porque, como é necessário saber a temperatura em cada *step*, o algoritmo precisa sair da solução em cada *step* e ir para o pós-processamento para o monitoramento da temperatura em toda a malha, depois voltar para a solução para continuar a análise. Além disso, como a região onde a fonte está sendo aplicada alcança altas temperaturas, ela seria a primeira a ser desativada, e não poderia continuar a aplicar calor em elementos mortos. Como a condutividade é praticamente zero, a temperatura subiria demasiadamente. Então, para contornar esse problema da simulação, a região da próxima aplicação de calor é novamente revivida. A sequência do processo completo está descrita abaixo:

1. Seleciona-se os nós da localização em que se queira aplicar o calor;
2. Salvar os elementos que possuem estes nós selecionados em um arquivo externo ao software;
3. Aplicar o calor nos nós pela equação das fontes de calor por um determinado Δt calculado pela Equação 20;
4. Sair da solução e entrar no pós-processamento para aquisição da temperatura em toda a malha;
5. Identifica-se quais são os elementos que atingiram as temperaturas acima de 1450°C ;
6. Salvar estes elementos em um outro arquivo externo ao software;

7. Desativa-se estes elementos que ultrapassaram a temperatura de 1450°C com o comando EKILL;
8. Retorna-se para a solução e aplica o ANTYPE "restart", que seria o recálculo da solução, agora com os elementos mortos;
9. Reativar os elementos da fonte de calor salvos no item 2 com o comando EALIVE;
10. Movimenta-se a fonte para os nós da frente na direção da goivagem;
11. Recomeça o processo a partir do item 1.

A Figura 20 faz uma comparação de fluxograma entre a solução de um processo de soldagem e o processo de goivagem utilizada neste trabalho.

Figura 20 - Diagrama de Fluxo Sequencial de Processos de Soldagem Numérica e Processos de Goivagem



(a) Simulação de soldagem

(b) Simulação de goivagem

Fonte: Autoria própria.

4.2. Pré-processamento

O pré-processamento é a etapa em que são inseridos todos os parâmetros, sejam eles geométricos, de soldagem, propriedades do material ou outro. De ora em diante, prepara-se o modelo para que na etapa seguinte sejam definidas as condições de contorno.

4.2.1. Modelo Geométrico

Computacionalmente, é desenhada a chapa em que será realizada a goivagem. A representação da chapa é subdividida em três regiões, que são a região goivada, a região de transição e o restante da chapa, conforme Figura 21. Essa divisão é realizada pois a malha da região de goivagem é muito mais refinada que o restante da chapa e, por isso, é necessária uma região de transição para minimizar as possíveis distorções na malha de alguma região. Portanto, a seção de transição tem a função de conectar os elementos de duas regiões com diferentes malhas através de uma malha do tipo não estruturada.

Observa-se também que o modelo simulado é simétrico e, por isso, apenas metade da chapa é modelada. Assim, objetiva-se ganhar tempo e reduzir o uso de memória no computador.

Figura 21 - Representação das Subdivisões da Chapa



Fonte: Autoria própria.

4.2.2. Elementos

As simulações termo estruturais são na verdade duas simulações, sendo que a estrutural é a sequência da térmica. Desse modo, é necessário adaptar o tipo de elemento de acordo com a análise.

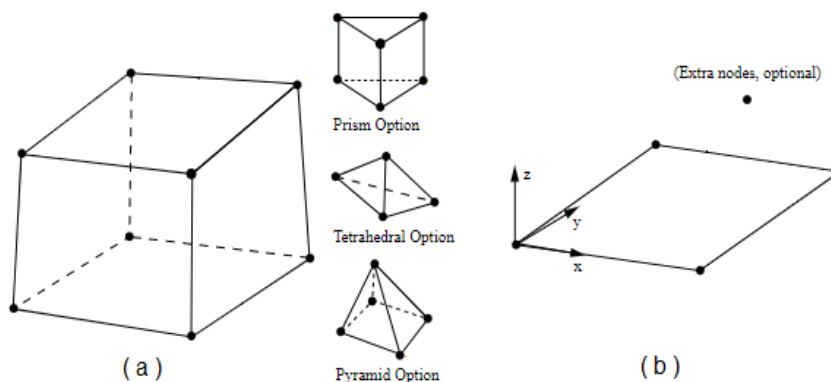
Na análise térmica é utilizado o elemento SOLID70, que possui oito nós e seu único grau de liberdade é a temperatura. O equivalente desse elemento na simulação estrutural é o SOLID185, que possui a mesma forma do SOLID70, mas com três graus de liberdade que são referentes à translação nas direções x, y e z do sistema de coordenadas cartesianas, que permitem os cálculos de tensão e deformação.

No entanto, há uma limitação do *software* que não permite que ocorra vários carregamentos através do elemento SOLID70, como a transferência de calor por convecção e radiação simultaneamente, em razão disso, sobrepõe-se a esse o elemento SURF152. Dessa maneira, é possível que ocorram convecção e radiação na superfície do modelo concomitantemente. A transferência de calor por radiação é realizada entre os elementos SURF152 sobrepostos na superfície externa do modelo e um nó criado exclusivamente para representar o meio.

Quando a simulação encaminha para a sua parte estrutural, o elemento SURF152 é modificado para SURF154, que possui a mesma forma, mas esse por sua vez, permite que vários carregamentos ocorram na superfície em que está sobreposto e não é mais necessário o nó extra que havia sido criado para a transferência de calor por radiação.

Todos esses elementos são visualizados na Figura 22.

Figura 22 - Elementos SOLID70 e SOLID185 (a) e SURF152 e SURF154 (b)



Fonte: Adaptado de ANSYS®.

4.2.3. Construção da Malha

A construção da malha é a etapa mais importante do pré-processamento, pois é nela que será determinado o número de nós do modelo. Isso é crucial porque o tempo de processamento e o tamanho dos arquivos da simulação estão diretamente relacionados com a quantidade de nós.

Durante o processo de geração de malha é importante prezar não apenas pela quantidade de nós, mas também pelo aspecto que os elementos assumem, pois deve-se evitar que se distorçam muito.

Em uma simulação térmica, elementos com aspectos ruins dificilmente causam a divergência da análise, pois há apenas a transferência de calor entre os nós, entretanto, na análise estrutural um elemento de malha ruim pode ser responsável pela divergência do modelo ou por provocar uma resposta pontual ruim.

Por não existir trabalhos que descrevam a simulação em goivagem, desconhece-se as características que uma malha de tal estudo numérico deva assumir. Sabe-se a partir de Araújo (2012), que em uma simulação de soldagem, o ideal é que os elementos da malha na região de aplicação de calor tenham tamanho menor ou igual a um milímetro. Posto isso, são desenvolvidas várias simulações com o intuito de investigar os efeitos da malha nos resultados obtidos. O tamanho dos elementos em cada região da chapa nas diferentes malhas é apresentado na Tabela 3.

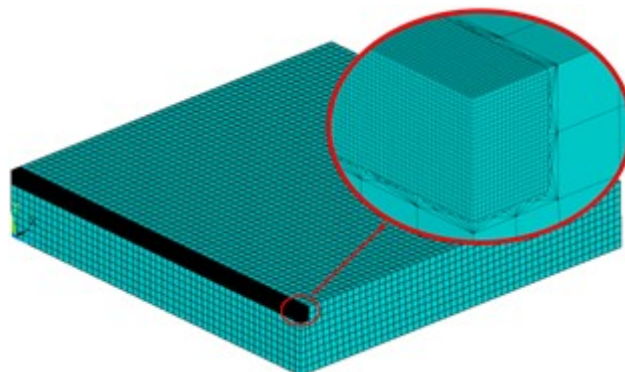
Tabela 3 - Dimensões dos Elementos em Diferentes Malhas

Malha	Tamanho do Elemento [mm]		
	Região de Goivagem	Região de Transição	Restante da Chapa
A	0,2	1,0	2,0
B	0,3	1,0	2,0
C	0,4	1,0	2,0
D	0,5	1,0	2,0
E	0,6	1,0	2,0

Fonte: Autoria própria.

A princípio é utilizada a malha A por essa ser a mais refinada, e logicamente, ser a menos provável de apresentar problemas de convergência. Essa malha possui um total de 501.265 elementos e 446.240 nós e é apresentada na Figura 23.

Figura 23 - Representação da Malha para Estudo Numérico



Fonte: Autoria própria.

A variação no tamanho dos elementos na região de goivagem visa comparar os resultados obtidos em cada condição com os resultados experimentais, verificar a influência nos resultados e a relação do tamanho dos elementos com as dimensões do modelo. Esses resultados são apresentados no Tópico 5.3 do capítulo de resultados.

4.2.3.1. Método para Dimensionar Elementos da Malha

Durante a realização de simulações teste de goivagem, foi observado que as dimensões da seção removida durante o processo estavam diretamente conectadas ao tamanho dos elementos na malha, sendo que muitas vezes, a razão entre esses resultados e o tamanho do elemento é um número inteiro. Dessa forma, foi desenvolvido um método para determinar, antes de executar a simulação, se a malha escolhida é capaz de apresentar um resultado próximo ao medido experimentalmente.

Esse método consiste em prever os resultados que serão obtidos computacionalmente, a partir da relação entre a dimensão da região refinada da malha e os resultados, largura e profundidade, obtidos experimentalmente. A partir disso é possível antever as dimensões da seção removida numericamente pelo processo de goivagem.

Esse método consiste em relacionar as dimensões da região refinada da malha e os resultados experimentais, de forma a obter a relação de número de linhas e colunas de elementos que serão removidos durante a goivagem e, a partir disso, ter ciência dos possíveis resultados que podem ser apresentados pela simulação de goivagem.

É importante ressaltar que não são levados em consideração os parâmetros operacionais da goivagem, por isso, esse método é eficiente quando aplicado a modelos numéricos já ajustados, com o objetivo de obter resultados que se aproximem mais do empírico.

Assim, é criada uma tabela para que objetive-se idealmente/computacionalmente, resultados iguais aos experimentais. Para isso, são adotadas as seguintes variáveis:

e_s – Espessura da região com malha refinada para a goivagem;

L_s – Largura da região com malha refinada para a goivagem;

P – Profundidade da goivagem medida experimentalmente;

L_e – Largura da goivagem medida experimentalmente;

N – Número inteiro maior que zero.

A partir de simulações teste realizadas anteriormente, a dimensão da largura (L_s) e espessura (e_s) foram escolhidas de forma a garantir que a razão entre esses e o tamanho do elemento seja igual a um número inteiro. Dessa forma L_s e e_s são iguais a 3,6 e 4,8 mm, respectivamente, pois, quando divididos pelo tamanho dos elementos na Tabela 3, resultam em um número inteiro, com exceção da malha D. É importante destacar que o caso em estudo é simétrico em relação à L_s . Esses valores também foram escolhidos de forma a serem maiores que os medidos experimentalmente, para garantir que a simulação ocorra livremente.

A partir disso são criadas relações matemáticas que vão compor a tabela dessa metodologia, que é explicada na Tabela 4.

Tabela 4 - Explicação das Variáveis da Tabela para Determinação do Tamanho dos Elementos

N	L_s / N	e_s / N	$L_e / (L_s / N)$	$P / (e_s / N)$
Número de linhas ou colunas da malha	Tamanho do elemento para que a malha tenha N linhas	Tamanho do elemento para que a malha tenha N colunas	Número de linhas de elementos removidos na goivagem	Número de colunas de elementos removidos na goivagem

Fonte: Autoria própria.

A forma de realizar a leitura das informações na Tabela 4 é mostrada na Tabela 5, onde a malha A é usada como exemplo, em que a sequência para verificar se

determinado tamanho de elemento é apropriado ou não, deve seguir o seguinte passo a passo:

1. Procurar na quarta coluna um número inteiro;
2. Deslocar para a esquerda até a segunda coluna, na mesma linha do item 1, e verificar o tamanho que o elemento da malha deve ter;
3. Procurar na terceira coluna o mesmo tamanho de elemento para a malha;
4. Deslocar para a direita até a última coluna, na mesma linha do item 3, e verificar se é encontrado um número inteiro também;

Tabela 5 - Modo de Leitura da Tabela de Dimensionamento do Tamanho dos Elementos na Malha

N	Ls / N	es / N	Le / (Ls / N)	P / (es / N)
1	3,600	4,800	0,889	0,917
2	1,800	2,400	1,778	1,833
.
.
.
18	0,200	0,267	16,000	16,500
.
.
.
24	0,150	0,200	21,333	22,000

Fonte: Autoria própria.

A análise da Tabela 5 significa que ao usar uma malha com tamanho de elemento igual a 0,2 mm na região refinada, com uma simulação já validada, durante a goivagem serão eliminadas 16 das 18 linhas de elementos, enquanto que, em relação às colunas de elementos serão eliminadas 22 das 24.

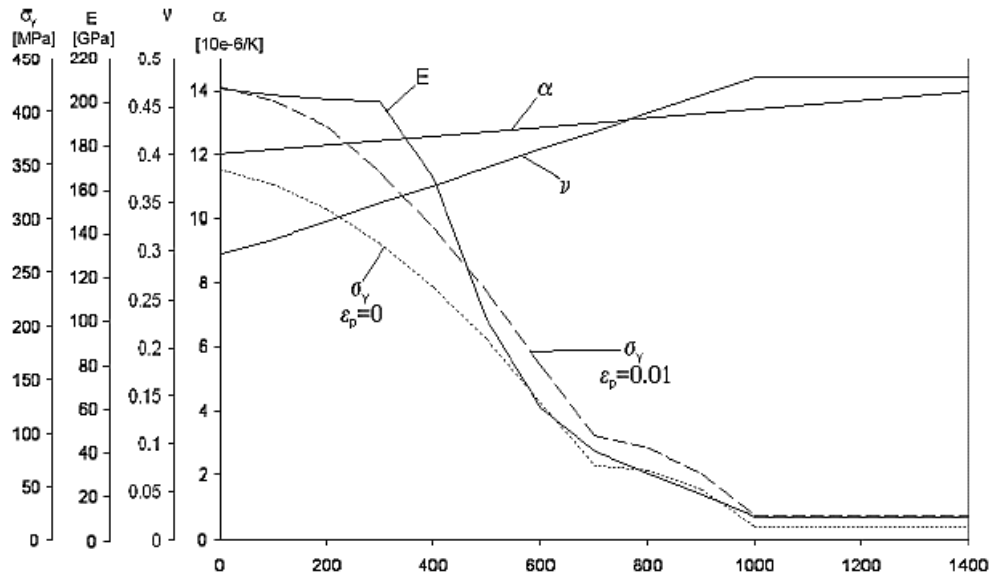
4.2.4. Propriedades do Material

Por se tratar de uma simulação de goivagem, é necessário que as propriedades do material variem com a temperatura, para que o modelo numérico seja mais fiel ao real.

As propriedades que são necessárias na análise térmica, são a condutividade térmica (k), o calor específico (c) e a massa específica (ρ), enquanto que na simulação

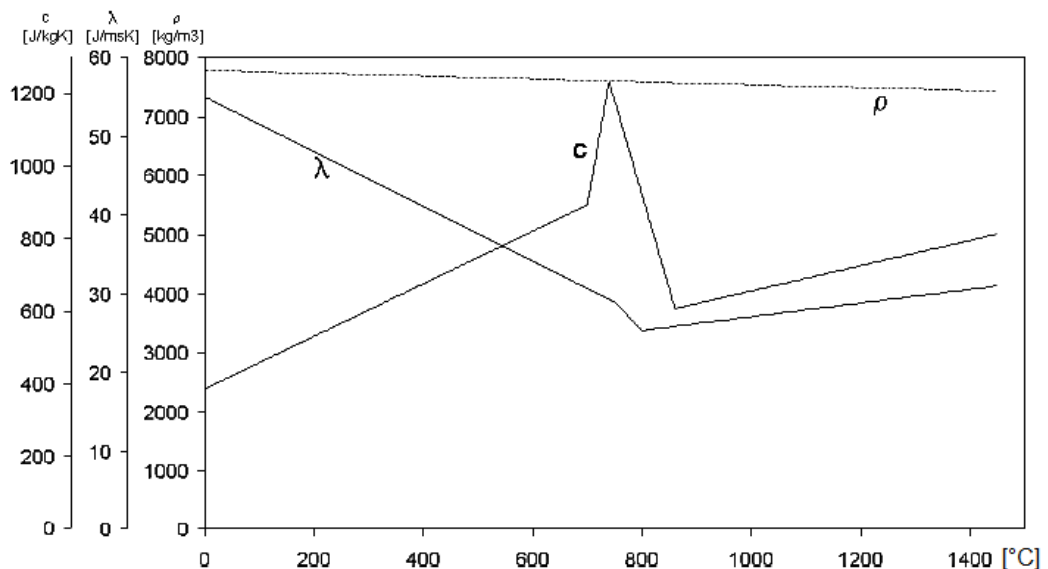
estrutural, é preciso informar a massa específica, expansão térmica (α), coeficiente de Poisson (ν) e módulo de elasticidade (E). Todos esses parâmetros são avaliados em diferentes temperaturas conforme apresentados nas Figuras 24 e 25, de acordo com o trabalho desenvolvido por Pilipenko (2011).

Figura 24 - Propriedades Mecânicas do Material ASTM A131 EH36



Fonte: Pilipenko (2011).

Figura 25 - Propriedades Térmicas do Material ASTM A131 EH36



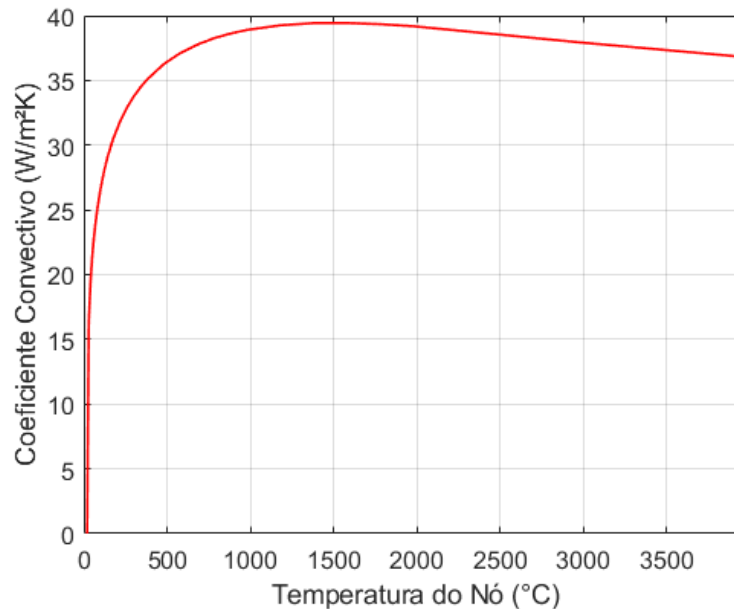
Fonte: Pilipenko (2011).

Dois outros dados, a emissividade e o coeficiente de troca de calor por convecção, são parâmetros de entrada na simulação térmica. Dado que a

emissividade para o aço carbono, assume os valores descritos na Tabela 1 do Tópico 2.5.2, conforme os estudos de Touloukian e DeWitt (1970).

O coeficiente convectivo deve ser calculado conforme as correlações apresentadas no Tópico 2.5.3. É importante destacar que esse coeficiente é determinado, pois é conhecido que esse parâmetro varia com a temperatura, sendo que cada nó na malha durante a simulação assumirá diferentes temperaturas em cada momento. Assim, essa avaliação é realizada com o intuito de obter o coeficiente convectivo de troca de calor local naquele instante da análise. Um exemplo de cálculo é desenvolvido no Apêndice A. A estimativa desse coeficiente, que é utilizada na simulação, é apresentada graficamente na Figura 26.

Figura 26 - Variação do Coeficiente Convectivo de Troca de Calor



Fonte: Autoria própria.

4.3. Solução

Nesta etapa do desenvolvimento da programação da análise numérica, são estabelecidas as condições de contorno, assim como realizada a goivagem e o resfriamento, porém, só é possível fazer a leitura dos resultados no pós-processamento.

A simulação termoestrutural, que compreende as análises térmica e estrutural, é solucionada de forma transiente e estática, respectivamente. Para que isso seja possível, os resultados térmicos são utilizados como esforços na avaliação estrutural.

4.3.1. Modelamento Térmico de Soldagem

Durante o processo de soldagem, o campo de temperatura é governado pela equação de condutividade de calor, sem levar em consideração as mudanças de fase, dada pela Equação 21:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho(T) c(T) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (21)$$

Onde,

k – Condutividade térmica do material [W/(m·K)];

ρ – Massa específica [kg/m³];

c – Calor específico [J/kg·K].

As condições de contorno termodinâmicas aplicadas nas superfícies externas das chapas na simulação são as transferências de calor por convecção e radiação, cujas equações que descrevem ambos os comportamentos já foram apresentadas, sendo essas as Equações 9 e 13, respectivamente, além do gráfico da Figura 26.

É importante ressaltar que neste trabalho, na contramão do que é tradicional, são adotados coeficientes de convecção e radiação termicamente dependentes, de acordo com a revisão bibliográfica dos Tópicos 2.5.2 e 2.5.3.

Foi verificado no Apêndice B que o fluxo de calor para o caso em estudo se comporta de forma 3D, com desenvolvimento dos cálculos conforme revisão bibliográfica do Tópico 2.4.1.

Além disso, outra principal condição de contorno na simulação térmica de soldagem é a fonte de calor.

4.3.1.1. Fonte de Calor

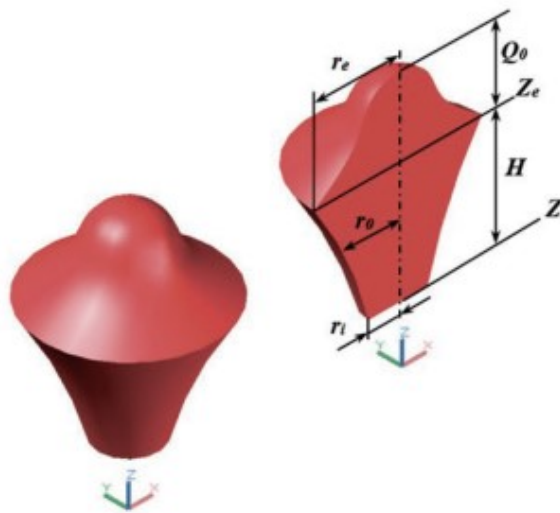
Em conformidade com a revisão bibliográfica realizada no Tópico 2.6, a fonte de calor a ser utilizada para o desenvolvimento desse trabalho é do tipo logarítmica.

Essa fonte de calor é uma derivação da fonte gaussiana que varia seu raio de forma logarítmica ao longo da espessura da chapa. Essa fonte foi demonstrada no

trabalho sobre soldagem a plasma de Dhinakaran, Shanmugam e Sankaranarayanan (2015). A sua forma é exibida na Figura 27.

Os parâmetros da fonte de calor mostrados na Figura 27 e o rendimento térmico, que não possuem embasamento literário, são ajustados a partir de uma série de simulações e iterações realizadas, cuja finalidade é determinar essas variáveis como corretas quando a zona removida e a ZAC numérica se aproximam daquela observada experimentalmente. Esse método de cálculo também foi realizado por Teixeira, Araújo e Cunda (2014), em que definiram esses parâmetros a partir de um conjunto de simulações computacionais.

Figura 27 - Fonte de Calor Logarítmica



Fonte: Dhinakaran, Shanmugam e Sankaranarayanan (2015).

Reforçando que independentemente da forma que a fonte assume, a imposição de calor na simulação depende do uso da técnica *element birth and death*. Essa metodologia é utilizada pois os elementos com temperatura acima da temperatura de fusão devem ser eliminados, mas ao mesmo tempo deve-se garantir a existência dos elementos onde a fonte de calor será aplicada. A não existência de elementos na região onde o calor deve ser aplicado implica em divergência da simulação térmica.

4.3.2. Modelamento Estrutural de Soldagem

Com a finalidade de calcular as tensões residuais e distorções do processo de goivagem, é necessário fazer o acoplamento térmico-estrutural, ou seja, utilizar os

resultados da análise térmica, que é o histórico da distribuição de temperatura em cada instante, e admiti-los como esforços na simulação estrutural.

Para a análise estrutural numérica do processo de soldagem, a deformação total que ocorre durante o processo é decomposta em três componentes, conforme Equação 4.3.

$$\varepsilon_t = \varepsilon^e + \varepsilon^p + \varepsilon^t \quad (23)$$

Onde,

ε_t – Deformação total;

ε^e – Deformação elástica;

ε^p – Deformação plástica;

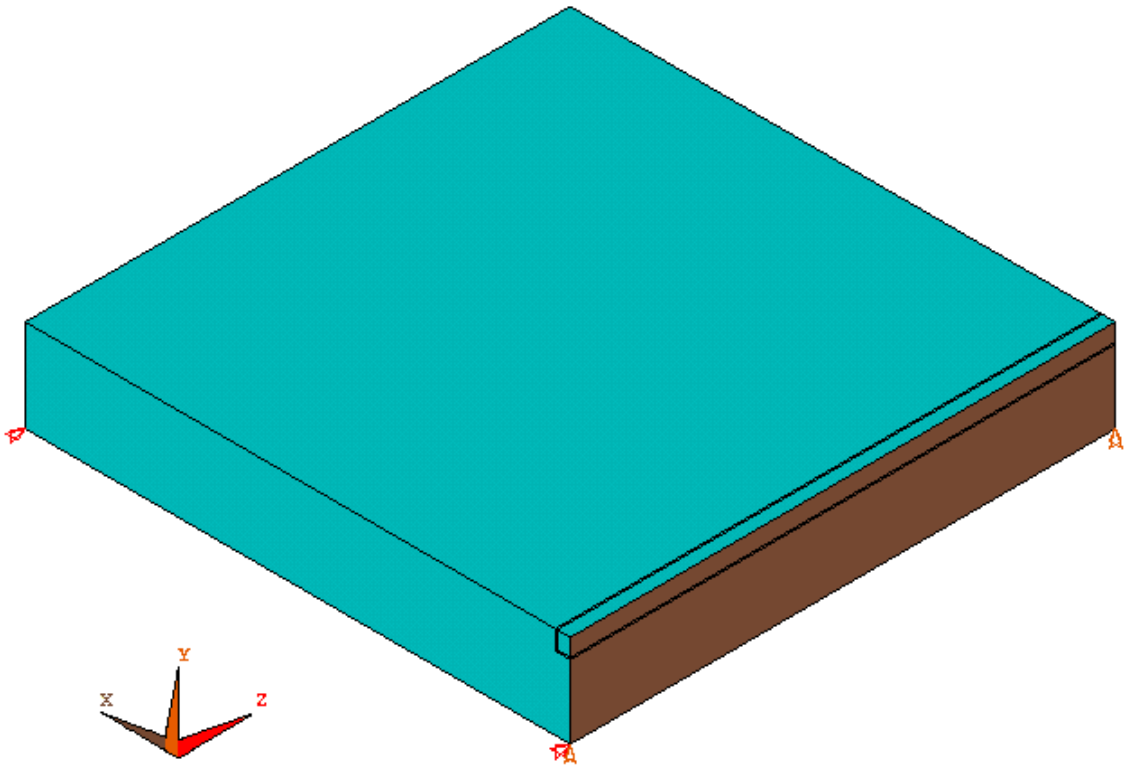
ε^t – Deformação térmica.

A deformação elástica é modelada utilizando a lei de Hooke, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson. Com relação à deformação plástica, o modelo de plasticidade é empregado com o limite de escoamento do material. E a deformação térmica é calculada com o coeficiente de expansão térmica do material. É importante salientar que todas essas propriedades variam juntamente com a temperatura. A partir do exposto, são calculadas as deformações nas chapas, assim como as tensões residuais.

4.3.2.1. Fixação da Chapa

O travamento da chapa exerce muita influência nos resultados de uma simulação termoestrutural, podendo essa ser responsável pela minimização ou maximização da intensidade das tensões residuais e deslocamentos, influenciando até mesmo na forma como são distribuídas. Com o intuito de descrever o comportamento da chapa goivada, essa foi deixada o mais livre possível, de forma a ser travada apenas para garantir que não se moverá ao longo dos eixos quando aplicados os esforços térmicos, a chapa está livre para se deformar. Esse esquema de travamento é apresentado na Figura 28, onde é possível observar que a face marrom está totalmente impedida de se mover na direção do eixo x, devido ao modelo simulado ser simétrico e a face em marrom ser o plano de simetria.

Figura 28 - Fixação da Chapa para Simulação Estrutural



Fonte: Autoria própria.

4.4. Pós-processamento

Essa é a última etapa da análise numérica, cuja função é visualizar, avaliar e exportar os resultados das simulações. É importante destacar que todos os resultados são obtidos a nível nodal, ou seja, são analisados nos nós da malha, mesmo que o *software* permita visualizá-los graficamente a nível elementar.

Nas simulações térmicas de soldagem, o *software* salva a temperatura em cada nó, o gradiente e o fluxo térmico. Já nas simulações estruturais, são salvos os deslocamentos, energia, critérios de falha, tensões residuais, além de deformações total, plásticas, elásticas, térmica.

Devido ao elevado número de nós do modelo simulado nesse trabalho, foi limitado o que deveria ser salvo em todas as análises desenvolvidas. Sendo que na simulação térmica foi armazenada apenas a temperatura, enquanto que na simulação estrutural foram salvas as distorções e tensões residuais, com o intuito de apresentar melhorias na memória gasta no computador pelas simulações e cumprir o objetivo de avaliar as tensões residuais e distorções provenientes do processo de goivagem.

CAPÍTULO V

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados da avaliação, experimental e computacional, da goivagem, assim como a comparação entre elas. Além disso, também são apresentados os resultados das etapas que foram concluídas ao longo do estudo, cuja finalidade era certificar-se acerca daquilo que estava sendo realizado. Essas etapas são referentes ao uso de diferentes tamanhos de elementos na malha da região goivada, determinação do rendimento térmico da goivagem e uso da tabela para determinar o tamanho dos elementos.

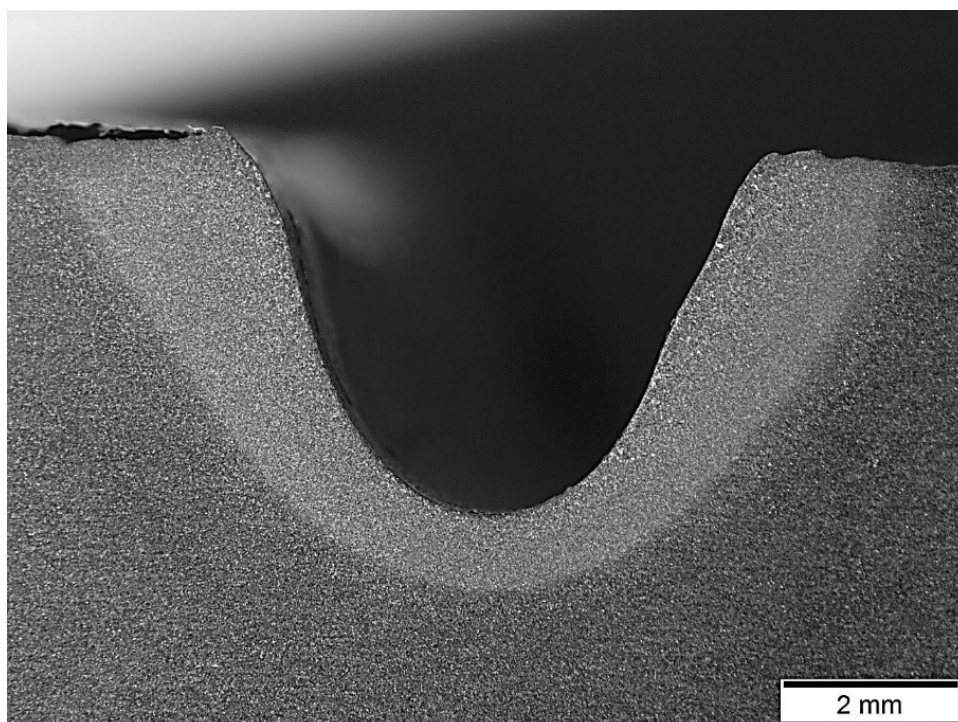
5.1. Resultados da Metodologia Experimental

A goivagem foi realizada com parâmetros do processo ajustados conforme mostrado na Tabela 2. Em seguida, a tensão média medida foi igual a 35,9 V. Com posse desses dados é possível calcular a potência utilizada nesse processo de goivagem, que é o produto da corrente, tensão e rendimento térmico da goivagem.

É a partir do cálculo da potência que, computacionalmente, se encontra o valor do rendimento térmico desse processo de goivagem, pois são conhecidos os parâmetros operacionais do processo e as dimensões da seção goivada. Dessa forma, são realizadas várias simulações para ajustar o valor correto de rendimento térmico que faça com que os resultados computacionais sejam o mais fidedigno possível. Em que foi assumida uma temperatura de fusão de 1450°C e desconsidera a vaporização.

Além desses dados, também foi feita a macrografia da seção transversal goivada, com amostra retirada a 25 mm do final da goivagem. Sendo que essa é apresentada na Figura 29 e é a partir dela que a simulação computacional é validada, ao comparar a largura e profundidade da seção de material removido e a zona afetada pelo calor (ZAC).

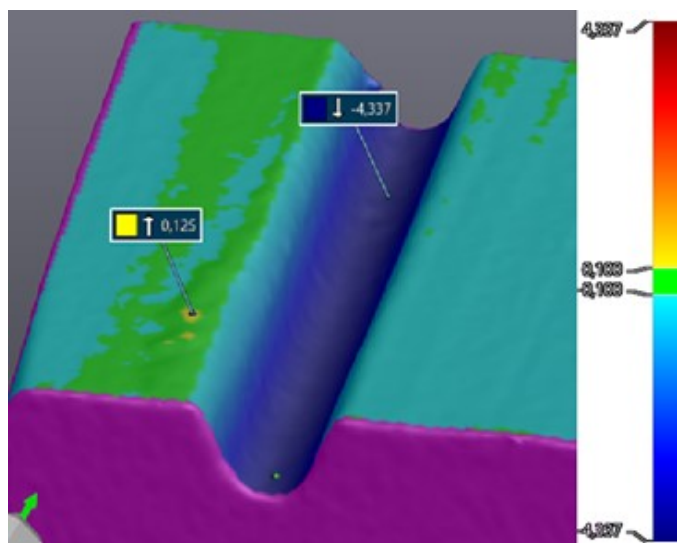
Figura 29 - Macrografia da Seção Transversal Goivada



Fonte: Autoria própria.

Para determinar as dimensões da seção goivada, foi realizado o escaneamento 3D da amostra submetida à metalografia. Em relação à profundidade, por apresentar uniformidade ao longo da amostra, como pode ser observado no mapa de cores da Figura 30, foi adotada a medida de maior profundidade, sendo essa igual a 4,34 mm.

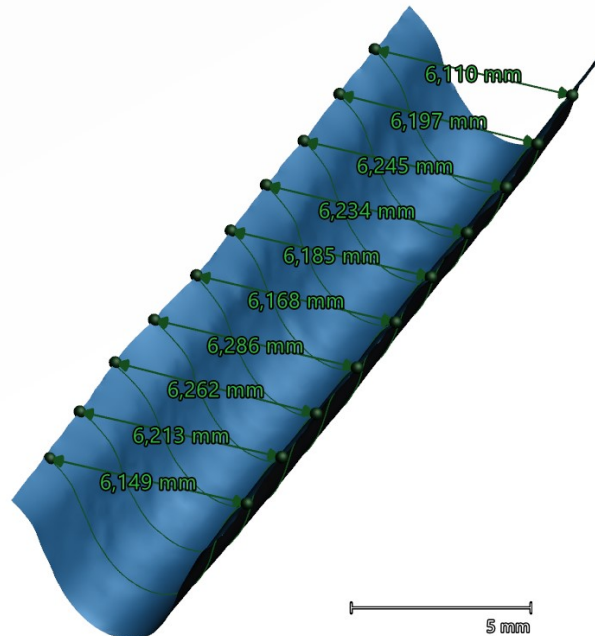
Figura 30 - Medição da Profundidade da Seção Goivada por Escaneamento 3D



Fonte: Autoria própria.

Já a largura goivada apresentou variações ao longo do comprimento e, por isso, foi realizada a medição em dez seções ao longo da goivagem e foi adotado um valor médio igual a 6,20 mm, conforme apresentado na Figura 31.

Figura 31 - Medição da Largura da Seção Goivada por Escaneamento 3D



Fonte: Autoria própria.

Observando as Figuras 30 e 31, é possível verificar que tanto a profundidade quanto a largura da retirada de material pelo processo de goivagem não tem uma variação muito pronunciada ao longo do comprimento analisado, ou seja, o processo de retirada de material ocorreu de forma uniforme e estável ao longo do comprimento da chapa.

5.2. Resultados da Metodologia Computacional

Os resultados obtidos durante o desenvolvimento numérico do trabalho são apresentados nessa seção.

5.2.1. Simulações Preliminares

Por se tratar de um método novo de simulação e por inicialmente não ter conhecimento de todas as etapas que eram necessárias para realizar tal estudo

numérico para o processo de goivagem, foram realizadas simulações com modelo reduzido para entender e acertar a física do processo e o desdobramento lógico de programação. Nessa etapa de desenvolvimento, por tentativa e erro, foram desenvolvidas 53 simulações com metodologias equivocadas de realização da goivagem. Apenas na 54ª simulação da lógica de programação desenvolvida que fisicamente o programa se tornou coerente com aquilo que é observado experimentalmente.

A partir de uma lógica de programação coerente, conforme apresentada no Tópico 4.1, foi necessário entender qual a influência que o tamanho dos elementos na malha exercia sobre os resultados. Para isso, foram realizadas algumas simulações, cuja situação observada será detalhada no Tópico 5.2.2.

Posteriormente, foi necessária a realização de um outro conjunto de simulações com objetivo de ajustar o rendimento térmico do processo de goivagem. Mas, diferentemente do que ocorre na soldagem, o metal fundido na goivagem é removido e, por isso, espera-se obter um rendimento térmico baixo seguindo a mesma lógica utilizada para a soldagem. Assim, as simulações foram realizadas variando o valor do rendimento térmico até que os resultados, largura e profundidade da goivagem, se aproximassem o máximo possível daqueles observados experimentalmente. Foi obtido como resultado que o rendimento térmico é equivalente a 15%.

Entende-se, fundamentado no baixo rendimento térmico encontrado, que esse não traduz de fato o rendimento térmico do processo. Sendo que, a partir disso, a interpretação desse parâmetro pode diferir entre os processos que se assemelham à soldagem. Na goivagem encontra-se o complementar desse parâmetro e, pode-se, então, concluir que os 15% encontrados são de perdas, em concordância com aquelas apresentadas na Figura 5. Então, o rendimento térmico do processo de goivagem a plasma é de 85%. Como na simulação foi utilizada toda a lógica baseada nos estudos de soldagem, foi utilizado o valor de 15%.

Tendo conhecimento dessas simulações prévias e a importância delas para a continuidade do desenvolvimento desse trabalho, foi então realizada a simulação definitiva. Cujo tempo total gasto para a simulação térmica foi de 48 horas e a simulação estrutural foi de sete dias. Foram gastos, no total, 62,5 GB de memória. É importante lembrar que, conforme abordado no Tópico 4.4, foi limitado o que o

software deveria salvar e com isso, foram economizados aproximadamente 330GB de espaço.

5.2.2. Estudo de Malha

Como foi descrito o método no Tópico 4.2.3, é possível conciliar o tamanho dos elementos da malha com a finalidade de aproximar o resultado dos valores experimentais. Para isso, é preciso utilizar a Tabela 4, cuja forma de utilização foi descrita no Tópico 4.2.3.1.

Para realizar os cálculos necessários para o correto preenchimento da tabela, o valor experimental da profundidade da goivagem foi arredondado para 4,4 mm, enquanto que a largura goivada, por ser simétrica na simulação, foi arredondada para 3,2 mm.

Na Tabela 6 são apresentadas as relações para todas as cinco malhas abordadas nesse trabalho que foram separadas por cores. É importante destacar que a malha D, com tamanho de elemento igual a 0,5 mm, não aparece na Tabela 6 devido a sua lógica de construção, mas isso não significa que essa não pode ser usada.

Tabela 6 - Tabela de Dimensionamento dos Elementos na Seção Goivada para Todas as Malhas Estudadas (separadas por cor)

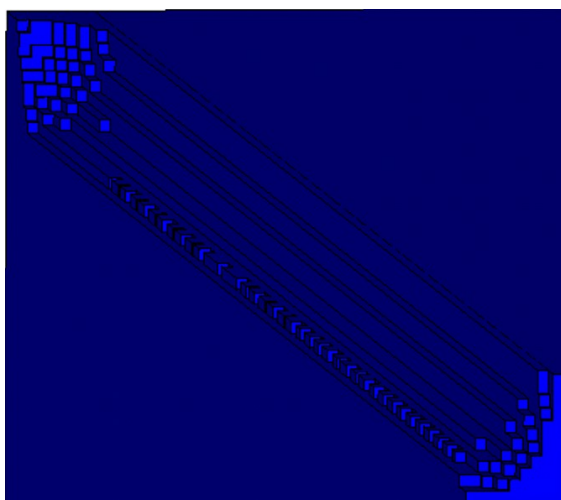
N	Ls / N	es / N	Le / (Ls / N)	P / (es / N)
1	3,600	4,800	0,889	0,917
2	1,800	2,400	1,778	1,833
3	1,200	1,600	2,667	2,750
4	0,900	1,200	3,556	3,667
5	0,720	0,960	4,444	4,583
6	0,600	0,800	5,333	5,500
7	0,514	0,686	6,222	6,417
8	0,450	0,600	7,111	7,333
9	0,400	0,533	8,000	8,250
10	0,360	0,480	8,889	9,167
11	0,327	0,436	9,778	10,083
12	0,300	0,400	10,667	11,000
13	0,277	0,369	11,556	11,917
14	0,257	0,343	12,444	12,833
15	0,240	0,320	13,333	13,750
16	0,225	0,300	14,222	14,667
17	0,212	0,282	15,111	15,583
18	0,200	0,267	16,000	16,500
19	0,189	0,253	16,889	17,417
20	0,180	0,240	17,778	18,333
21	0,171	0,229	18,667	19,250
22	0,164	0,218	19,556	20,167
23	0,157	0,209	20,444	21,083
24	0,150	0,200	21,333	22,000

Fonte: Autoria própria.

5.2.2.1. Instabilidade na Malha

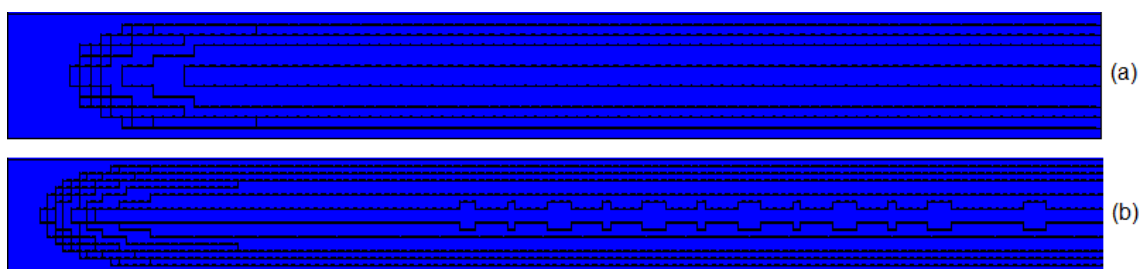
A instabilidade, como vem sendo chamada, refere-se à falta de eliminação de elementos na seção goivada, em que apresenta de forma alternada, elementos ativos e vãos de remoção de material, tornando os resultados incoerentes, conforme apresentado na Figura 32 e o comparativo na Figura 33.

Figura 32 - Instabilidade na Eliminação de Elementos na Seção Goivada



Fonte: Autoria própria.

Figura 33 - Vista Superior do Comprimento Goivado com Malha com Estabilidade (a) e Instabilidade (b) na Eliminação de Elementos



Fonte: Autoria própria.

Essas instabilidades foram observadas nas Malhas B e D, cujos elementos são do tamanho de 0,3 mm e 0,5 mm, respectivamente. A malha D não foi abordada pela Tabela 6 devido a sua lógica de construção. Já a malha B, na Tabela 6, não se enquadra na lógica de interpretação dessa descrita no Tópico 4.2.3.1. Apesar de as malhas B e D não se adaptarem à lógica de construção ou interpretação da Tabela 6, é possível observar que esse não é um fator determinante no surgimento de

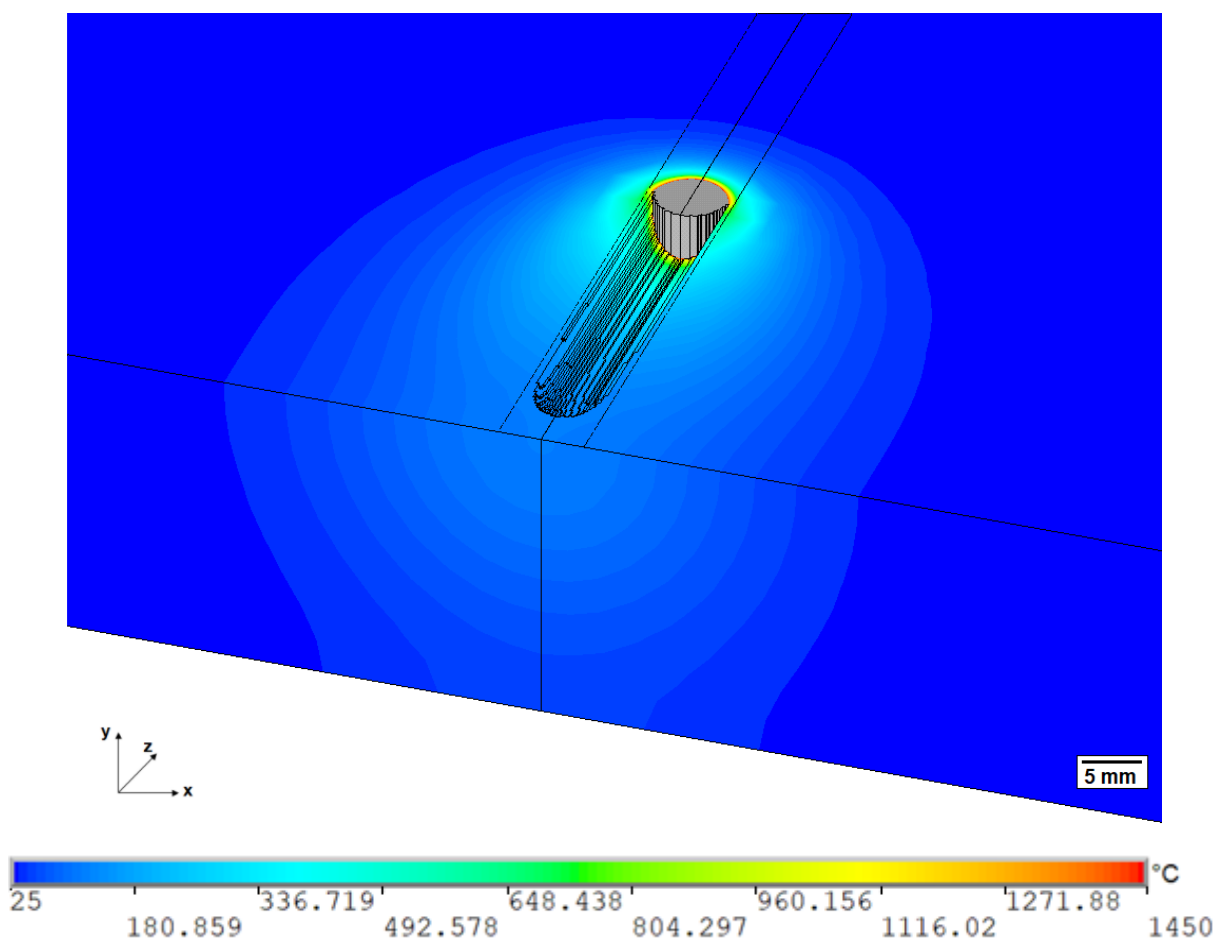
instabilidades, tendo em vista que a malha E apresentou estabilidade mesmo com elementos com tamanho igual a 0,6 mm.

É importante deslindar que essas instabilidades podem desaparecer ao ajustar diferentes parâmetros para a fonte de calor ou para o processo, de forma a concentrar ou dispersar mais calor em uma determinada área, modificando a profundidade e largura da seção goivada. Por esse motivo, foi citado no Tópico e 5.2.2.1, que o uso da Tabela 4 só é aplicável em modelos numéricos já ajustados, uma vez que dessa maneira garante-se que nada mais irá influenciar nos resultados a não ser a dimensão dos elementos.

5.2.3. Fonte de Calor

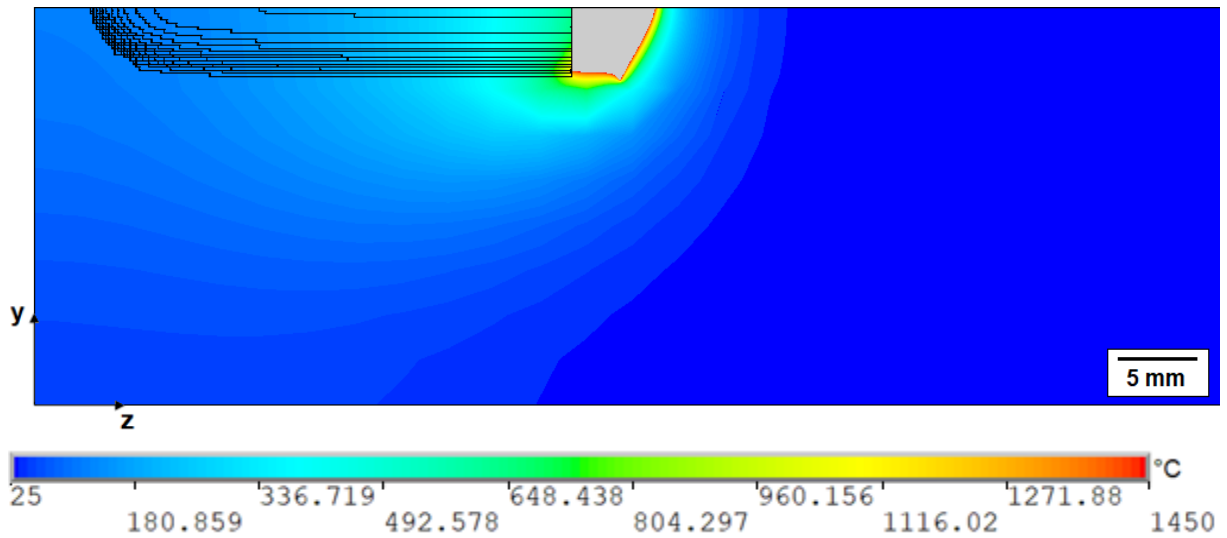
A forma como a fonte de calor se comporta no modelo numérico é apresentada nas Figuras 34 e 35.

Figura 34 - Campo Térmico da Goivagem



Fonte: Autoria própria.

Figura 35 - Campo Térmico da Goivagem com Chapa Seccionada ao Meio



Fonte: Autoria própria.

Por meio da Figura 34 é possível verificar o campo térmico da simulação do processo de goivagem. A região da fonte de calor está representada pela cor cinza, também é possível visualizar a região onde os elementos alcançaram a temperatura de fusão de material e foram desativados, criando assim, a região de retirada de material. Já a Figura 35 mostra o mesmo campo térmico a partir de uma vista lateral de um corte longitudinal ao meio da região goivada, que fornece mais detalhes da fonte de calor.

A partir do conjunto de simulações realizadas com o objetivo de determinar os parâmetros da fonte de calor, conforme descrito no Tópico 4.3.1.1, esses apresentados na Figura 27 assumem valores iguais a 3; 3,7; 0,1 e 4 mm para as variáveis r_e , r_i , z_e e z_i , respectivamente.

5.3. Validação da Simulação Térmica

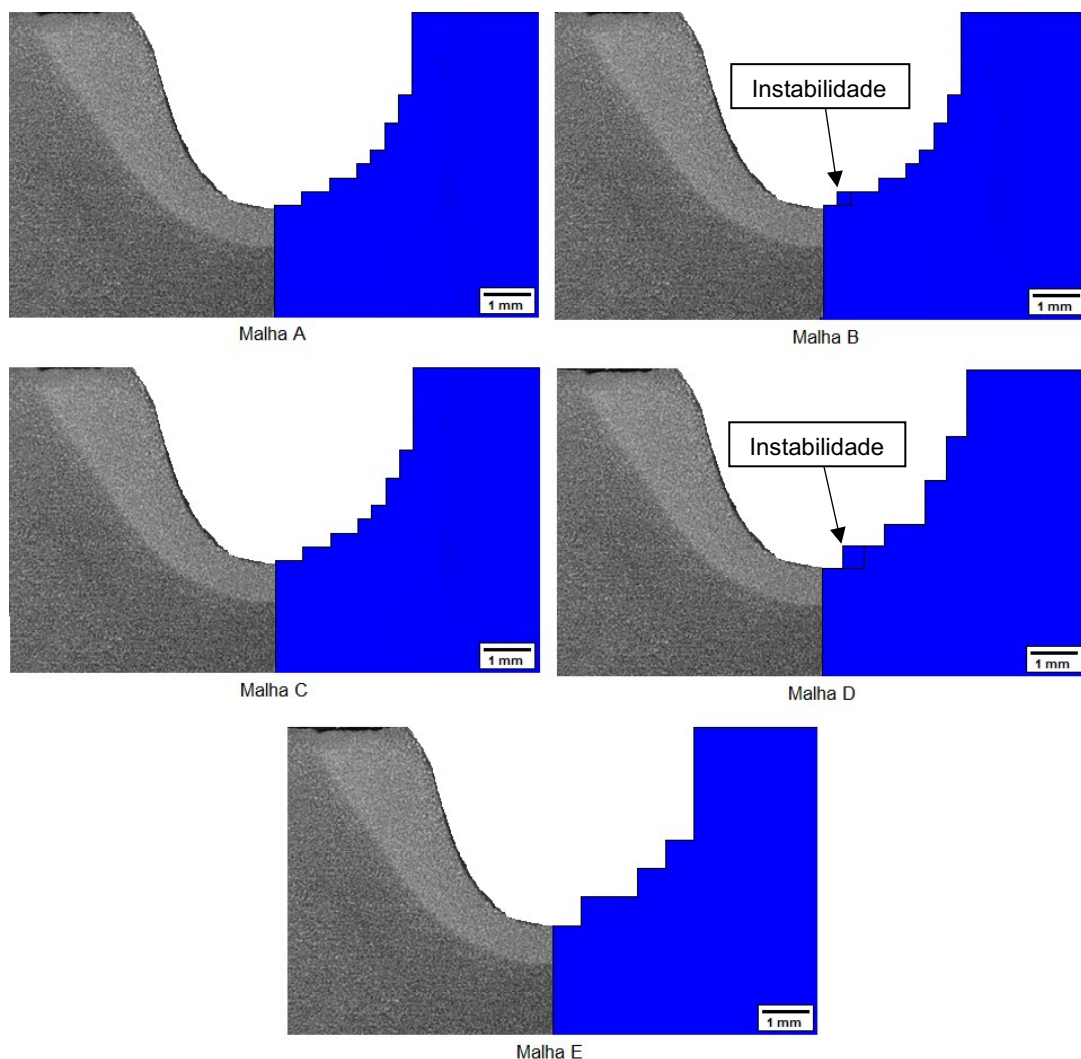
Nos trabalhos de simulações de soldagem, deve-se validar os resultados da simulação térmica antes de realizar a simulação estrutural. Isso se deve ao fato de que, se a análise numérica térmica está correta, conseqüentemente a análise estrutural também estará a partir da observação do trabalho desenvolvido por Pilipenko (2011). Dessa forma, elimina-se a necessidade de validar a simulação estrutural, sendo que os resultados dessa podem ser considerados corretos.

A validação da simulação térmica pode ser feita de duas formas: através de comparação dos ciclos térmicos computacional e experimental, ou por meio de comparação entre as zonas fundidas no caso da soldagem, ou área removida no caso da goivagem.

A partir da Figura 29 da macrografia da seção transversal goivada, pode-se fazer uso da largura, profundidade, zona removida pelo processo de goivagem e zona afetada pelo calor para validar a simulação térmica desenvolvida.

Dessa forma, a Figura 36 traz um comparativo entre a seção transversal goivada e aquelas obtidas computacionalmente com cada uma das cinco malhas. A Tabela 7 detalha os valores, experimental e computacional, da profundidade e largura da seção transversal da goivagem.

Figura 36 - Comparação Entre as Zonas Removidas Obtidas Experimentalmente e por Simulação Numérica para Cada Malha com as Instabilidades Circuladas



Fonte: Autoria própria.

Tabela 7 - Comparação Entre a Largura e Profundidade da Goivagem Obtidas Experimentalmente e por Simulação Numérica para Cada Malha

	Largura [mm]	Profundidade [mm]
Experimental	6,20	4,34
Malha A	6,40	4,40
Malha B	6,00	4,20
Malha C	6,40	4,00
Malha D	6,30	4,32
Malha E	6,00	4,20

Fonte: Autoria própria.

É importante destacar que os “degraus” que são vistos nos resultados da simulação na Figura 36, são provenientes da malha. Como a região removida por goivagem foi calculada pelo *software* durante a simulação, esse automaticamente eliminava os elementos com temperatura acima da temperatura de fusão do material, e assim os elementos adjacentes a esses permaneciam, o que garante essa visualização em forma de “degraus”. Como era esperado, quanto mais refinada for a malha do volume em que ocorre a goivagem, menor será o aspecto de “degrau” e o resultado visual se assemelhará mais ao experimental.

Observa-se na Figura 36 que todas as instabilidades ocorrem no ponto mais baixo da seção goivada que, em conjunto com a Figura 35, é possível afirmar que a protuberância que a fonte de calor possui na parte inferior, juntamente com a dimensão do elemento, são majoritariamente responsáveis por gerar instabilidades.

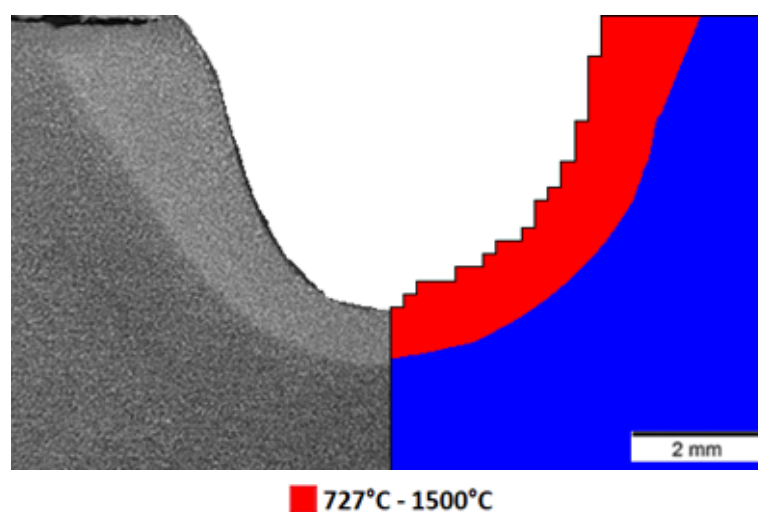
A partir da Tabela 7, pode-se afirmar que a malha D apresentou maior afinidade para o estudo desenvolvido nesse trabalho, pois é aquela que se distancia menos dos resultados experimentais. Todavia, ao analisar a Figura 36, observa-se que a malha D apresentou instabilidades e, por esse motivo, deve ser descartada. Logo, a malha A é aquela com mais proximidade dos resultados experimentais e que mostrou ter uma malha estável, além de que visualmente através da Figura 36, ser a malha que mais se assemelha ao resultado obtido experimentalmente. Portanto, a malha A é a que deve ser usada no desenvolvimento desse trabalho.

Vale realçar que conforme descrito no Tópico 5.2.2, a largura e profundidade experimental da seção goivada foram arredondadas para o correto preenchimento da Tabela 6. Dessa forma, como abordado no Tópico 5.2.2.1 sobre o uso da tabela apenas para modelos já ajustados, nota-se que a malha A atende aos requisitos da

Tabela 6 e obteve-se como resposta valores de largura e profundidade iguais a aqueles arredondados para uso da tabela.

Então a partir da escolha da malha A, é comparada também a zona afetada pelo calor como parte da validação da simulação térmica, a mesma pode ser visualizada na Figura 37, em que é notória a semelhança entre o resultado experimental e computacional.

Figura 37 - Comparação Entre as Zonas Removidas Obtidas Experimentalmente e por Simulação Numérica com a Malha A



Fonte: Autoria própria.

Portanto, pode-se afirmar pela análise dos resultados que a malha A se adaptou corretamente ao modelo, dado que e o comparativo realizado na Figura 37 assegura que o modelo numérico esteja validado.

5.4. Simulação Estrutural

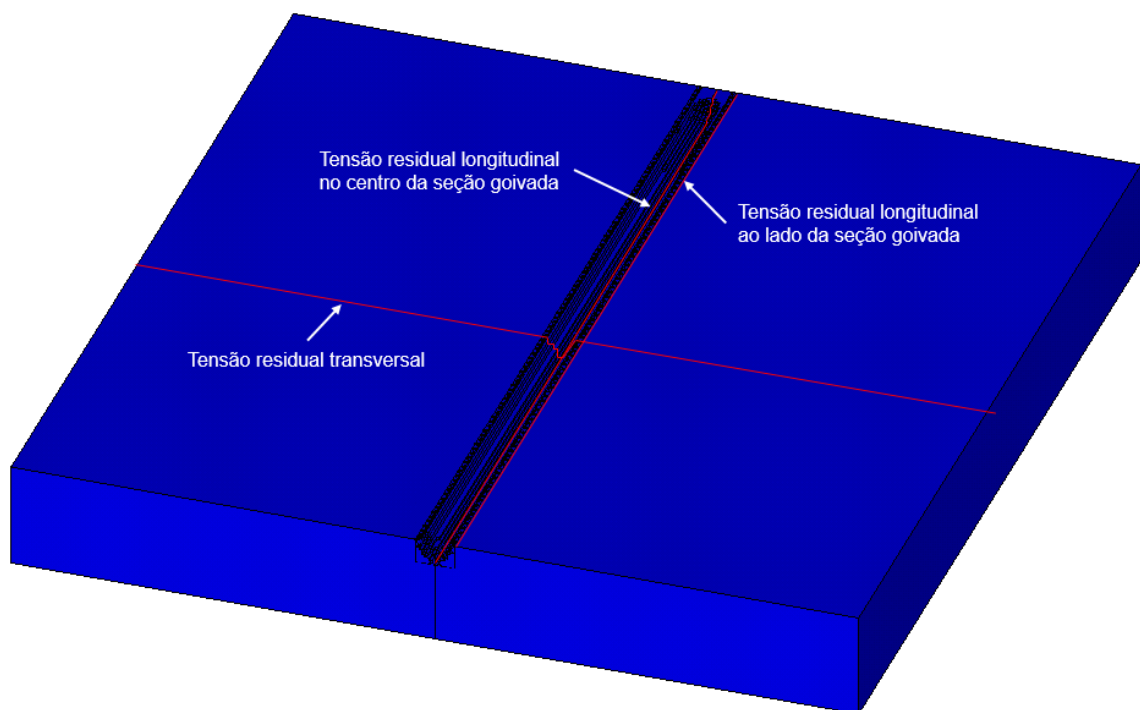
Como supramencionado, a simulação estrutural por ser continuação da análise térmica, automaticamente tem seus resultados legitimados ao validar a simulação térmica a partir de comparações com o resultado experimental.

5.4.1. Tensões Residuais

Não há na literatura trabalhos que descrevam a intensidade ou disposição das tensões residuais provenientes do processo de goivagem. Por se tratar nesse caso

de estudo de uma chapa espessa, é interessante perscrutar a superfície inferior da chapa com o objetivo de descrever com mais detalhes a forma como as tensões atuam no material goivado. Por esse motivo, foram analisadas as tensões residuais nas superfícies superior e inferior da chapa. Em relação às tensões longitudinais, na superfície superior da chapa, essas foram obtidas no centro da região goivada e em uma região na chapa próxima à goivagem. A Figura 38 exibe a posição para análise das tensões residuais.

Figura 38 - Posição de Análise das Tensões Residuais



Fonte: Autoria própria.

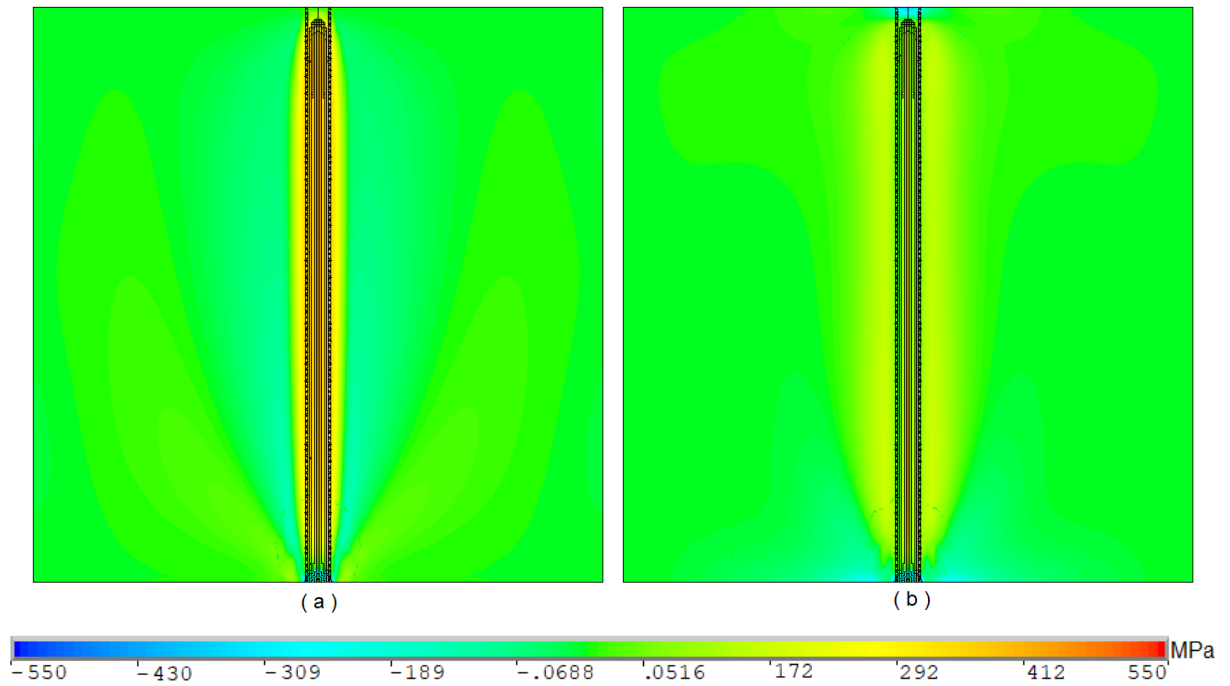
Na superfície inferior, as tensões longitudinal e transversal são obtidas paralelamente às retas do centro da seção goivada e transversal da superfície superior, respectivamente.

Inicialmente são obtidos resultados das tensões que dão uma perspectiva geral da intensidade e disposição dessas. São analisadas de modo análogo ao que é realizado em trabalhos sobre simulações de processos de soldagem, as tensões residuais longitudinal e transversal em relação ao comprimento goivado.

São apresentadas nas Figuras 39, 40 e 41, a forma como as tensões residuais longitudinal e transversal estão dispostas na chapa goivada. Em seguida, são

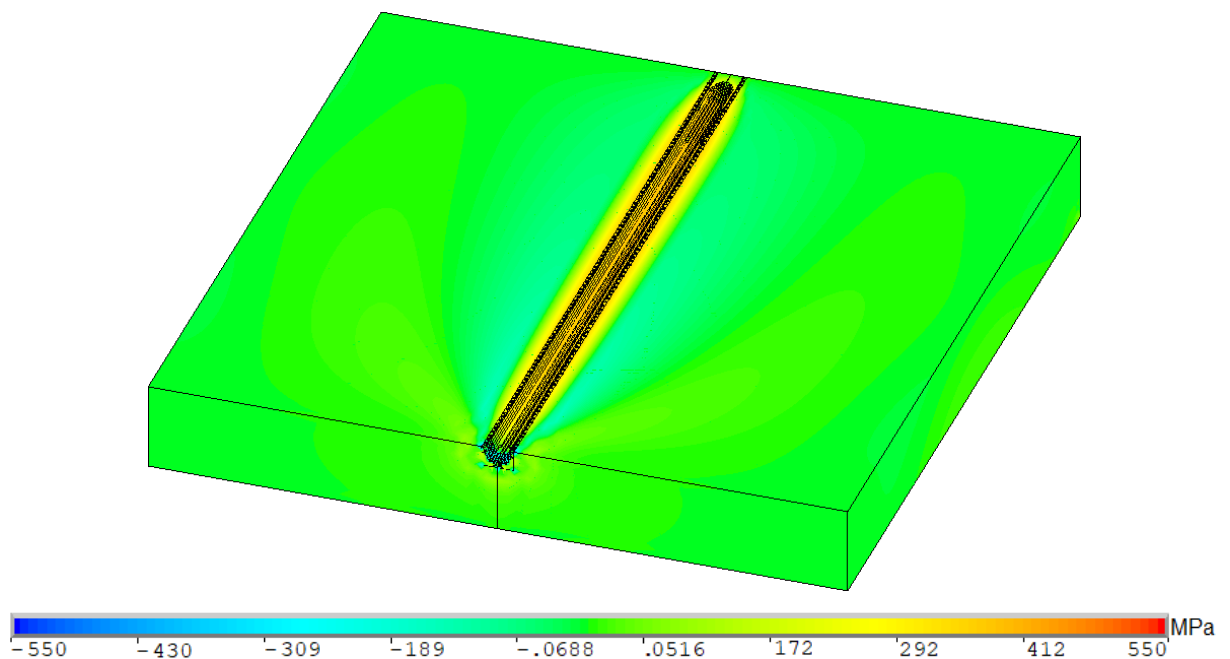
apresentados gráficos que viabilizam analisar essas tensões de maneira mais objetiva.

Figura 39 - Vista Superior da Chapa Goivada com Exibição da Distribuição das Tensões Residuais Longitudinal (a) e transversal (b)



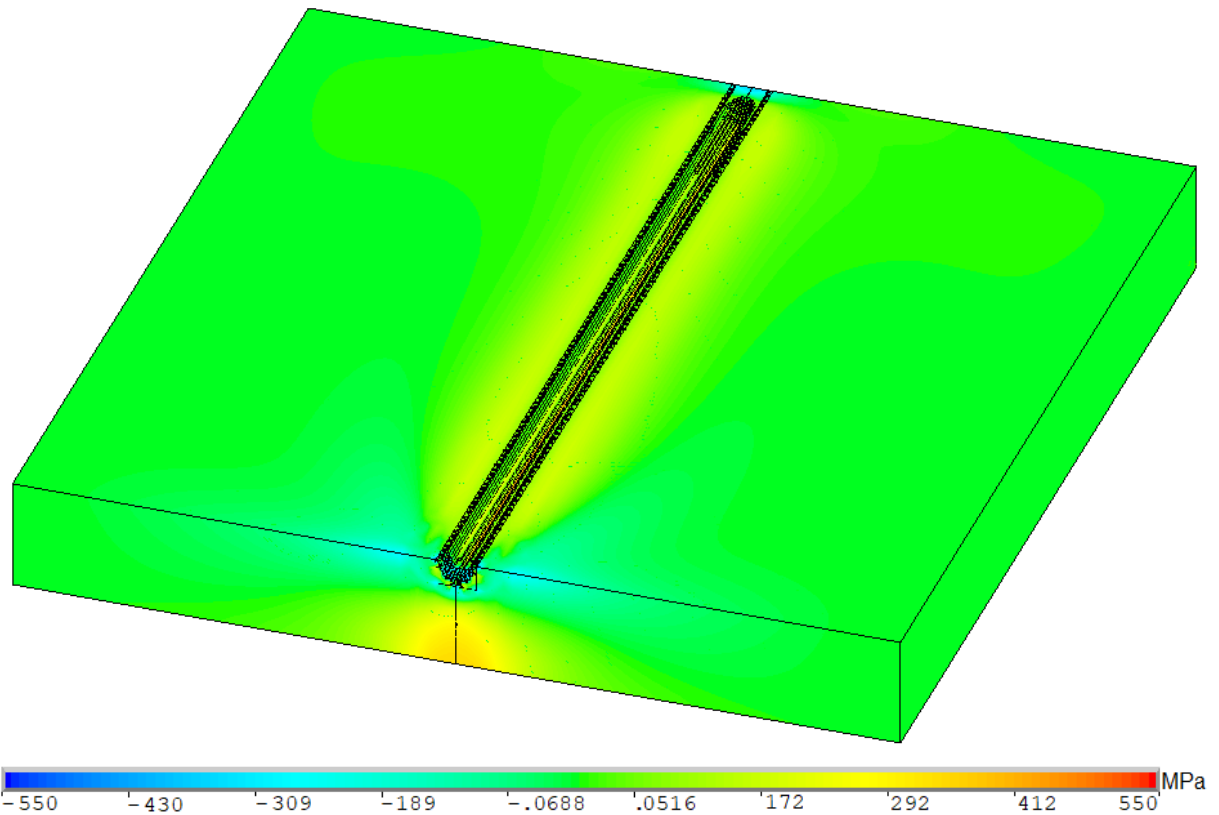
Fonte: Autoria própria.

Figura 40 - Vista em Perspectiva da Chapa Goivada com Exibição da Distribuição da Tensão Residual Longitudinal



Fonte: Autoria própria.

Figura 41 - Vista em Perspectiva da Chapa Goivada com Exibição da Distribuição da Tensão Residual Transversal



Fonte: Autoria própria.

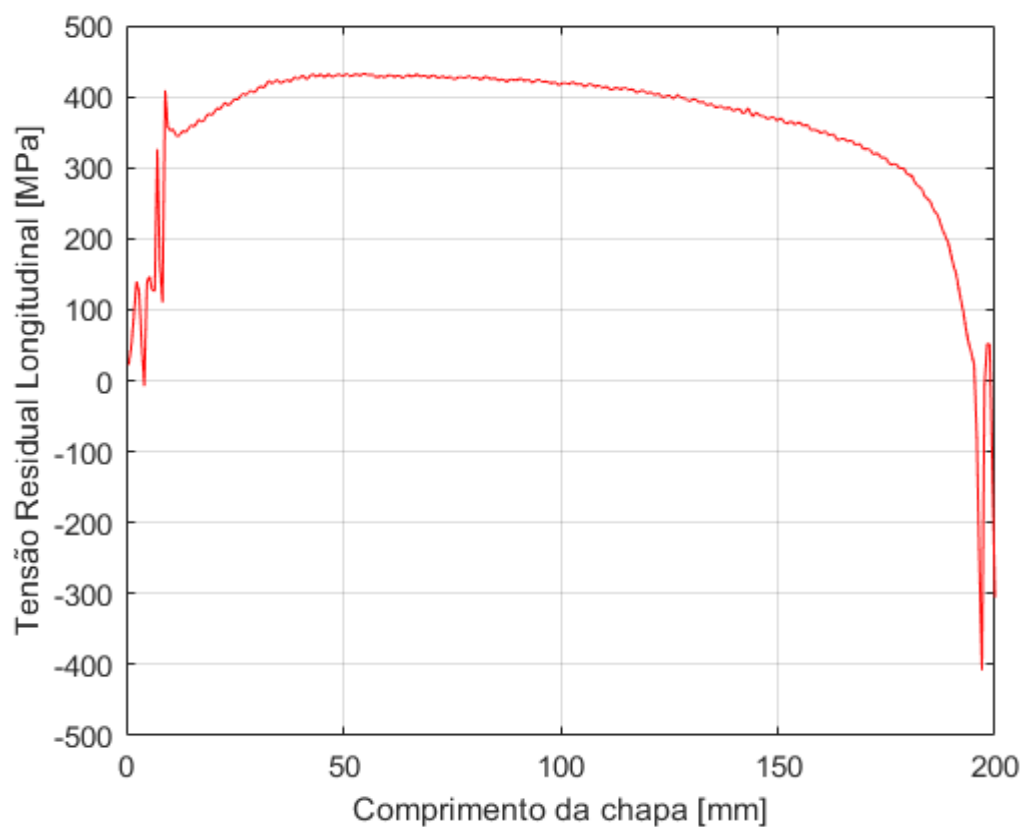
5.4.1.1. Tensão Residual Longitudinal

Primeiramente, é analisada na superfície superior a tensão residual longitudinal no centro da seção goivada e ao lado dessa. Ambas as curvas são apresentadas nas Figuras 42 e 43, respectivamente.

Observa-se que na Figura 42 o início e final do comprimento da chapa apresentam variação acentuadas das tensões, devido às irregularidades geradas na malha ao iniciar e finalizar o processo, que são momentos de regime transiente da fonte de calor. Essas irregularidades podem ser observadas na Figura 38.

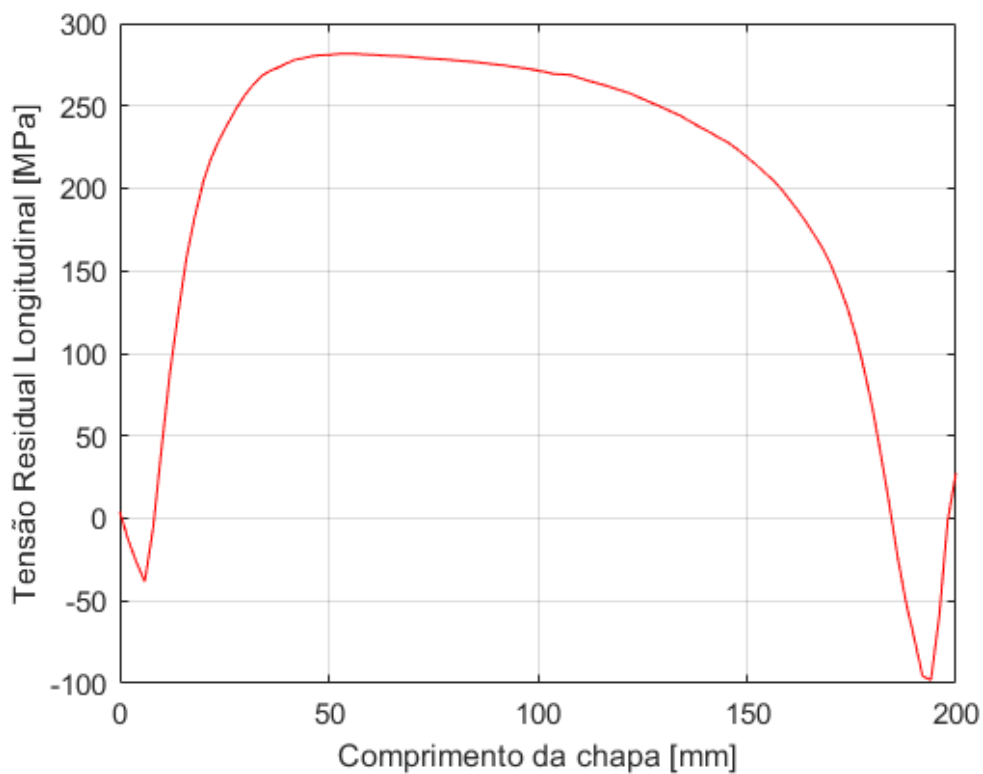
Já na Figura 43, é verificada maior estabilidade das tensões residuais, que é justificada pela presença íntegra de todos os elementos da malha e por estar situada em um local não crítico durante o processo, apresentando distribuição que se assemelha à Figura 42, mas com intensidade inferior.

Figura 42 - Tensão Residual Longitudinal no Centro da Região Goivada



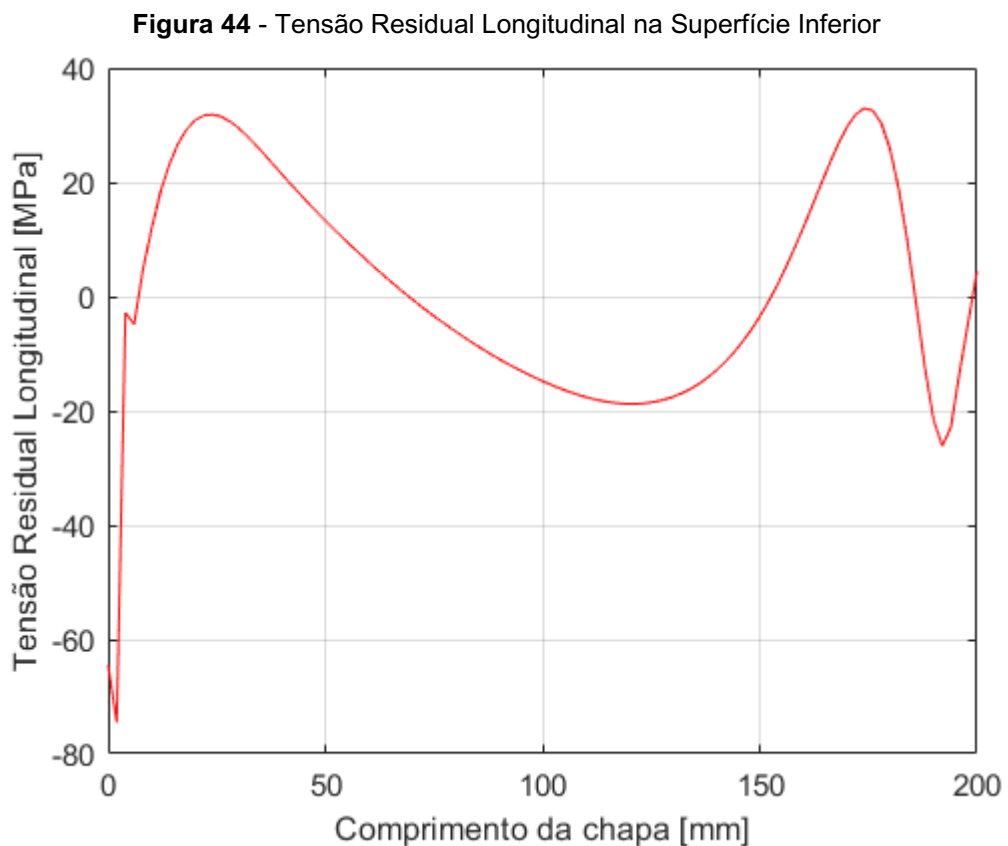
Fonte: Autoria própria.

Figura 43 - Tensão Residual Longitudinal ao Lado da Região Goivada



Fonte: Autoria própria.

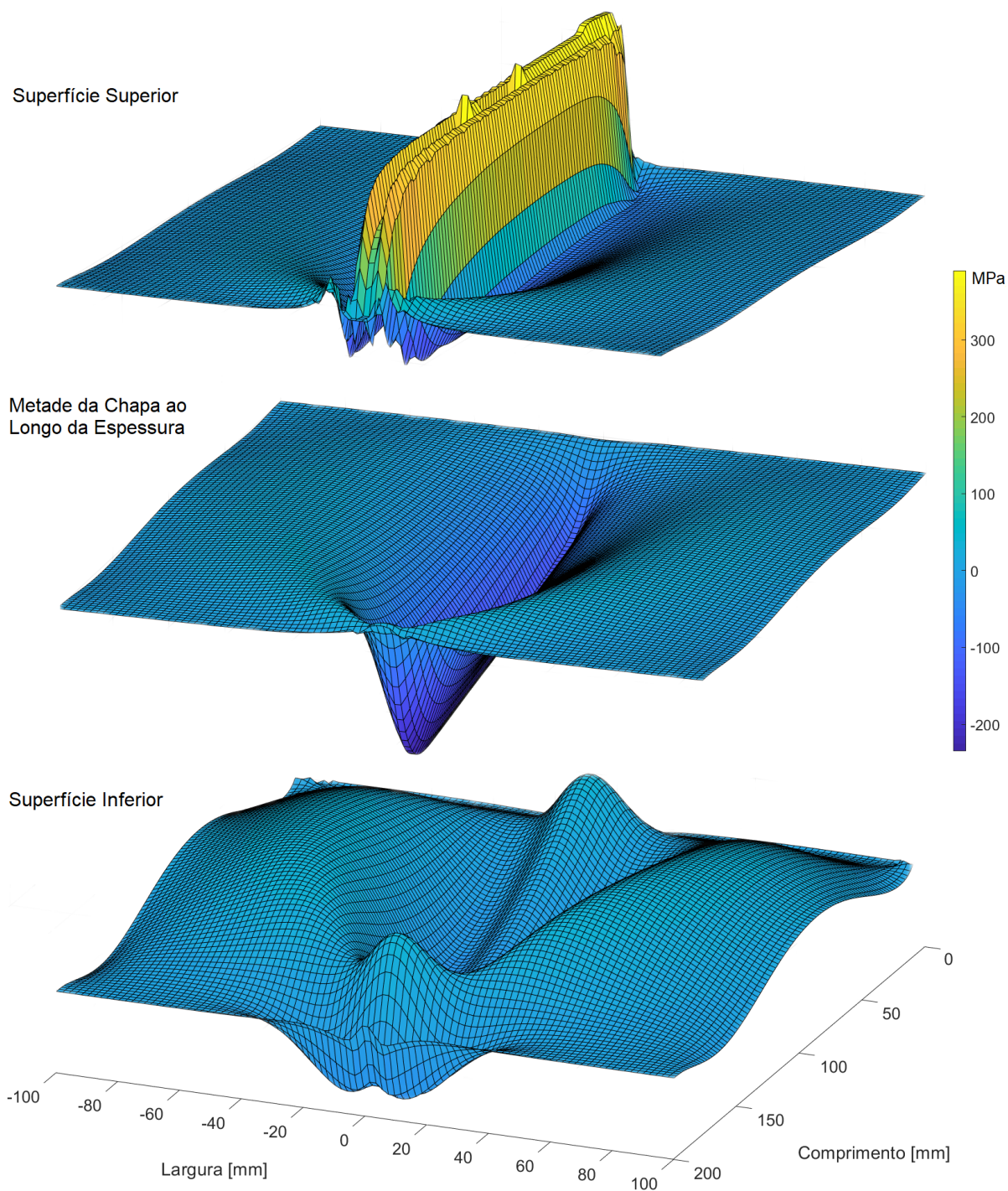
Ao analisar a tensão residual longitudinal na superfície inferior da chapa, apresentada na Figura 44, foi observado um padrão totalmente diferente do apresentado nas Figuras 42 e 43 e daqueles já conhecidos da soldagem, mas com intensidade muito baixa. Observa-se que tensões de compressão atuam no início e final da superfície inferior, que são as regiões que correspondem ao início e término da goivagem na superfície superior. Adjacente à essas regiões sob compressão, nota-se picos de tensões trativas que declinam semelhantemente a uma parábola ao longo da distância que as separam.



Fonte: Autoria própria.

Para melhor entendimento sobre como as tensões residuais longitudinais se alteram ao longo da espessura da chapa, foram criadas superfícies 3D para observação desses esforços em três regiões da chapa, sendo essas a superfície superior, a metade da chapa na espessura e a superfície inferior mostradas na Figura 45.

Figura 45 - Variação da Tensão Residual Longitudinal ao Longo da Espessura do Metal Base



Fonte: Autoria própria.

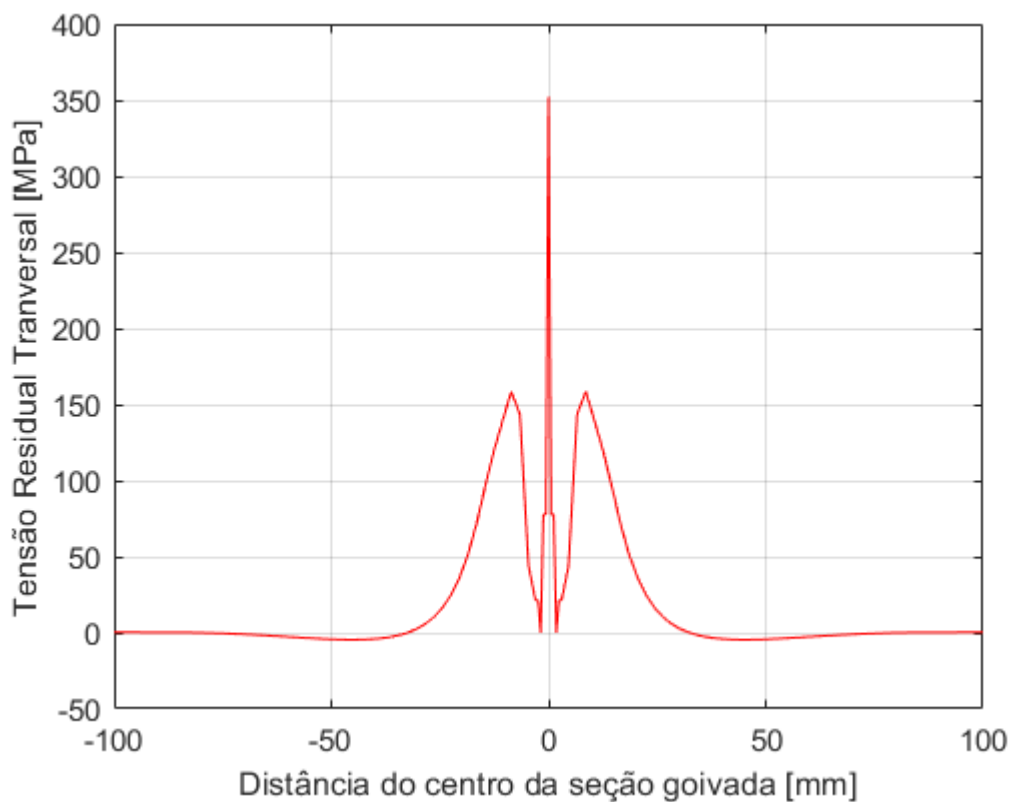
Através da Figura 45, observa-se a forma como a tensão residual longitudinal varia seu comportamento para que, ao longo da espessura, se somadas as curvas, é satisfeita a condição de equilíbrio das tensões residuais na chapa, cuja somatória de força deve ser igual a zero. Além disso, verifica-se que as tensões ocorrem em maior

intensidade na superfície em que o calor é aplicado e reduz conforme se distancia desta.

5.4.1.2. Tensão Residual Transversal

A tensão residual transversal é exposta pelas as Figuras 46 e 47, para as superfícies superior e inferior, respectivamente.

Figura 46 - Tensão Residual Transversal na Superfície Superior



Fonte: Autoria própria.

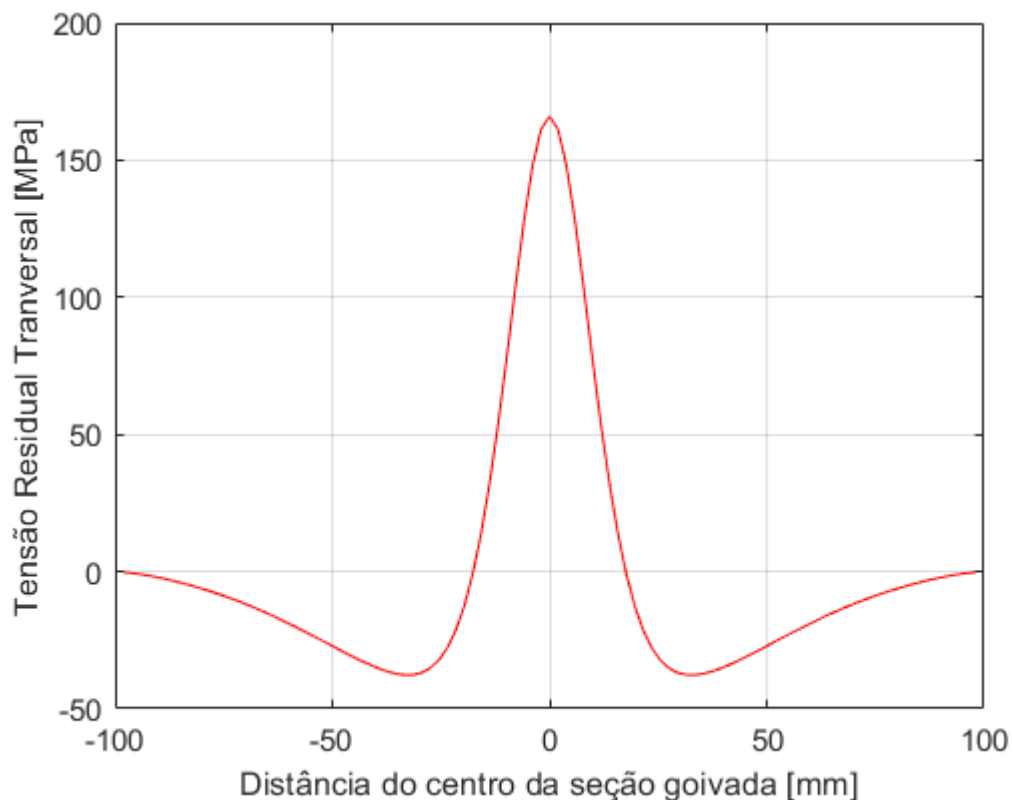
O modo como a tensão transversal está disposta na superfície superior é da mesma maneira observada por Radaj (2003). Quando na soldagem, o metal de adição tem resistência à tração inferior ao metal base, isso faz com que sejam induzidas tensões trativas no cordão de solda. Já na zona afetada pelo calor, devido às transformações metalúrgicas, são obtidas tensões compressivas, enquanto que no restante do metal base voltam a ser tensões trativas.

Na goivagem, diferentemente daquilo descrito por Radaj (2003) para a soldagem, não há a deposição de metal de adição, mas a remoção do metal base

fundido. Assim, observa-se as maiores tensões trativas no centro da região goivada, pois essa é a seção que passa por maior aquecimento e, conseqüentemente, sua resistência à tração é reduzida quando aquecida, conforme os gráficos de propriedades do material apresentados nas Figuras 24 e 25. De forma análoga ao descrito por Radaj (2003), devido a transformações metalúrgicas na ZAC a tensão residual transversal se reduz a zero, mas na goivagem essa não se mostra compressiva. Após a ZAC as tensões voltam a se tornar trativas.

Ao analisar a tensão residual transversal na superfície inferior da chapa, é observado que, assim como para a tensão longitudinal, há um padrão diferente daquele apresentado na superfície superior mostrado na Figura 46. De forma que conforme a Figura 47, ocorre o máximo da tensão de tração no mesmo local que, na superfície superior, é o centro da seção goivada.

Figura 47 - Tensão Residual Transversal na Superfície Inferior

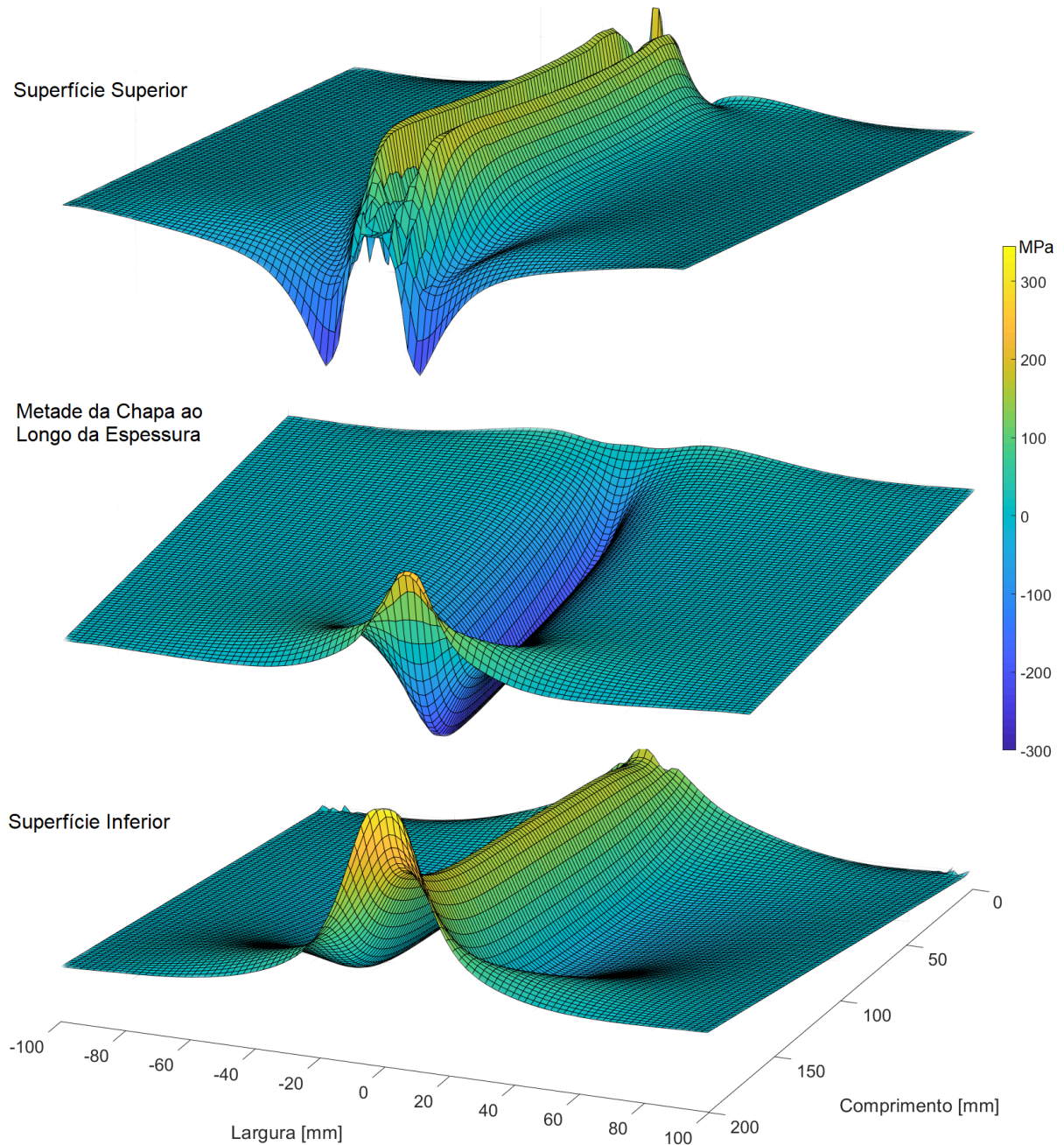


Fonte: Autoria própria.

Assim como realizado para as tensões residuais longitudinais, foram geradas três superfícies 3D para observação das tensões residuais transversais. Essas

superfícies são a superior, o meio da chapa na espessura e a superfície inferior mostradas na Figura 48.

Figura 48 - Variação da Tensão Residual Transversal ao Longo da Espessura do Metal Base



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 48, analogamente ao descrito para a tensão residual longitudinal, também é observado que a condição de equilíbrio é satisfeita ao longo da espessura para a tensão transversal à goivagem, conforme já era esperado. Mas, nesse caso, a variação da intensidade das tensões não apresenta um padrão como na Figura 45,

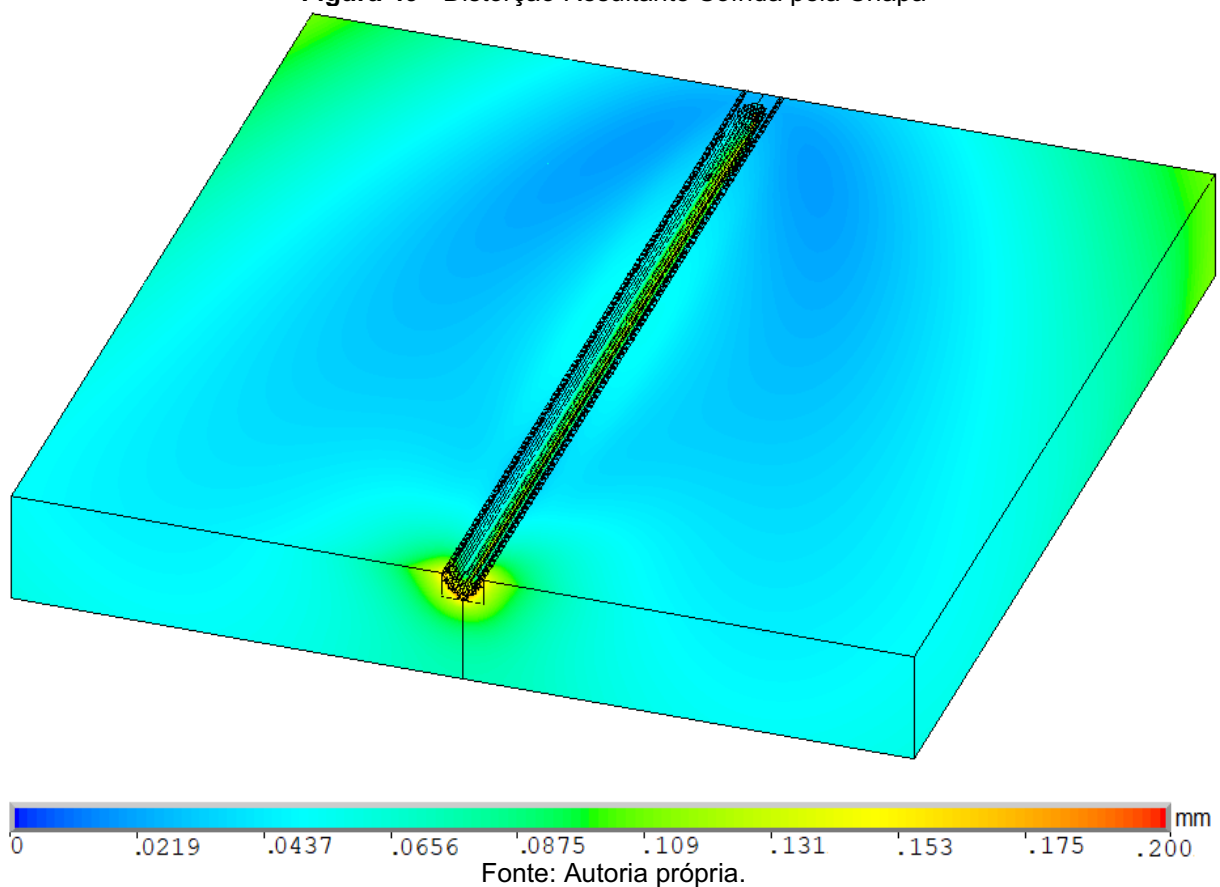
em que pode-se constatar maiores tensões compressivas na metade da espessura da chapa e maiores tensões trativas na superfície inferior.

5.4.2. Deslocamentos

Igualmente ao que acontece com as tensões residuais, a intensidade e a disposição da ocorrência dos deslocamentos da chapa estão diretamente associadas ao modo com que o material foi fixado. Assim, conforme abordado no Tópico 4.3.2.1, a chapa foi fixada o mínimo possível de acordo com o apresentado na Figura 28, ou seja, essa está configurada com o máximo de liberdade possível para distorcer.

Os deslocamentos observados nas direções x (ao longo da largura), y (referente à espessura) e z (referente ao comprimento), são mostrados no Apêndice C. A partir disso, é calculada a distorção resultante sofrida pela chapa ao final do processo, apresentada na Figura 49.

Figura 49 - Distorção Resultante Sofrida pela Chapa



É verificado maior deslocamento na seção goivada, que corresponde à região de aplicação de calor e remoção de elementos da malha. No restante da chapa os níveis de distorções são baixos.

Relembrando que conforme abordado no Tópico 4.2.1, a simulação realizada é simétrica, e por isso os resultados de distribuição de tensões residuais e distorções são iguais para a chapa esquerda e direita, de forma espelhada.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES

Ao longo do desenvolvimento da metodologia para simulação de processos de goivagem foram gerados vários resultados e detalhamentos necessários para melhor entendimento do processo.

À vista disso, são apresentadas nesse capítulo as conclusões sobre os objetivos propostos e resultados encontrados nesse trabalho.

6.1. Lógica de Programação

Ao desenvolver a lógica para programação de simulações termoestruturais de goivagem, apresentada em forma de fluxograma na Figura 20, foi observado que essa se aplica da mesma maneira a qualquer processo de goivagem ou corte que remova material por fusão. Portanto, seu uso na forma como foi desenvolvida, em outros processos, implica apenas na alteração de parâmetros do processo e propriedades do material.

Pode-se afirmar que o emprego desse método a processos não térmicos como por exemplo, corte a jato d'água, implica na alteração do método de desativação dos elementos que devem ser removidos durante o corte. Troca-se, portanto, a variável temperatura pela força exercida pelo jato d'água.

6.2. Malha do Modelo Numérico

Pode-se afirmar que as simulações realizadas preliminarmente possibilitaram a criação da lógica de programação da simulação do processo de goivagem, além da observação da relação entre tamanho de elemento na malha refinada e os resultados obtidos.

Ao variar o tamanho dos elementos percebeu-se que em alguns casos a malha apresentava instabilidades nos resultados, sendo que a ocorrência dessas instabilidades é consequência de um conjunto de fatores que são os parâmetros do

processo de goivagem, parâmetros da fonte de calor, dimensões da região refinada da malha e tamanho dos elementos. Por isso, ao desenvolver a Tabela 4, é orientado que apenas se faça uso para modelo com todos as variáveis já ajustadas, de modo que apenas o tamanho dos elementos na malha refinada influenciará nos resultados.

6.3. Fonte de Calor e Rendimento Térmico

A validação do modelo numérico com base na comparação com resultados experimentais, pode-se afirmar que o modelo de fonte de calor logarítmica se adapta corretamente e condizentemente com o processo de goivagem a plasma.

Os parâmetros da fonte de calor assim como o rendimento térmico do processo de goivagem, eram desconhecidos e para tornar possível ajustá-los, foi utilizada a mesma metodologia aplicada por Teixeira, Araújo e Cunda (2014). Pode-se concluir que tal método se mostrou eficaz e coerente, pois foi possível validar os resultados obtidos computacionalmente com resultados experimentais.

Portanto, foi constatado que o rendimento térmico do processo de goivagem a plasma é de 85%. Mas, para a simulação foi assumido esse valor como sendo igual a 15%, pois esse foi encontrado a partir de analogias como rendimento térmico da soldagem e toda a lógica de programação desenvolveu-se a partir dos estudos numérico de processos de soldagem. Já os parâmetros da fonte de calor foram apresentados no Tópico 5.2.3.

6.4. Tensões Residuais e Distorções

Em geral, constata-se tensões residuais em menor intensidade na goivagem se comparadas com a soldagem, isso ocorre porque o material aquecido é removido nesse processo, enquanto que na soldagem o material adicionado é funde-se ao metal base e permanece junto ao metal base. Desse modo, os ciclos térmicos na soldagem apresentam maiores temperaturas e taxa de resfriamento mais acentuada, gerando assim, tensões residuais com maiores intensidades para o caso de mesma fixação. Observa-se também que as superfícies inferior e superior da chapa foram submetidas a diferentes temperaturas e taxas de resfriamento, em razão da grande espessura da

chapa, e por esse motivo apresentaram características diferentes na disposição das tensões residuais.

Além disso, conclui-se que as tensões residuais ao longo da espessura resultam em zero se somadas, isso satisfaz a condição de equilíbrio que impõe que a somatória de forças e momentos seja nula. Por esse motivo, as tensões variam ao longo da espessura de forma a mudarem completamente a forma como estão dispostas para satisfazer a condição de contorno.

Em relação às distorções, pode-se concluir que elas ocorrem em maior intensidade na região de regime transiente da fonte de calor. Mesmo com a chapa estando fixada apenas o mínimo necessário, essa apresentou baixos níveis de distorções, a que se credita ao fato de o material aquecido ser removido no processo de goivagem. Ao eliminar os elementos com alta temperatura, a temperatura não é conduzida intensamente para o restante do metal base, e devido ao baixo ciclo térmico, são obtidas pequenas distorções. É importante contemplar que a chapa goivada é espessa e com dimensões reduzidas, e isso também é um fator que implica na redução dos níveis de distorções.

CAPÍTULO VII

TRABALHOS FUTUROS

O desenvolvimento de uma metodologia que permite a realização da simulação de processos de goivagem que seja fisicamente coerente com o que é observado experimentalmente, abre novas possibilidades para pesquisa, tais como:

- Realização de simulação de goivagem com tecimento e suas implicações de programação;
- Definir experimentalmente o rendimento térmico da goivagem;
- Adequação de um método de *machine learning* para determinar estatisticamente a distribuição de tensões residuais em qualquer momento da goivagem, baseando-se em um conjunto de simulações e experimentos variando as dimensões das chapas, o número de goivagens, os parâmetros do processo e o material;
- Desenvolver um método numérico que leve em consideração a força exercida pelo arco elétrico e a pressão do ar comprimido, assim como a tensão superficial;
- A realização de simulações termoestruturais com uso de elementos sólido e *shell* acoplados. Objetivando a redução no número de nós no modelo simulado, e conseqüentemente a diminuição no tempo de processamento, possibilitando o desenvolvimento de estudos numéricos de modelos com dimensões ainda maiores;
- Verificação computacional dos efeitos de múltiplas goivagens para reparos de soldas ou em processos de manufatura aditiva;
- Determinação da influência de cada parâmetro da goivagem, da fonte de calor e das funções de programação na convergência da simulação estrutural.

CAPÍTULO VIII

REFERÊNCIAS

AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS A3.0M/A3.0:2010**: standard welding terms and definition. 12th ed. Miami: AWS; 2010. 162 p.

ARAÚJO, Douglas Bezerra. Study of distortion in welding by using numerical and optimization techniques. 2012. 262 f. **Tese** (Doutorado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

BERGMAN, Theodore; LAVINE, Adrienne; QUEIROZ, Eduardo Mach. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 7ª edição. 2014.

CAPRICCIOLI, Andrea; FROSI, Paolo. Multipurpose ANSYS FE procedure for welding processes simulation. **Fusion engineering and Design**, v. 84, n. 2-6, p. 546-553, 2009. DOI <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2009.01.039>

ÇENGEL, Yunus; GHAJAR, Afshin. **Transferência de Calor e Massa – Uma abordagem prática**, 4ª ed. Porto Alegre: Mc Grall-hill, 2012.

CVERNA, Fran (Ed.). **Worldwide guide to equivalent irons and steels**. ASM international, 2006.

DENG, Dean; Zhou, Yijun; Bi, Tao; Liu, Xiaozhan. Experimental and numerical investigations of welding distortion induced by CO2 gas arc welding in thin-plate bead-on joints. **Materials & Design (1980-2015)**, v. 52, p. 720-729, 2013. DOI <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.06.013>

DHINAKARAN, Veeman; SHANMUGAM, Nallathambi Siva; SANKARANARAYANASAMY, Krishnasamy. Some studies on temperature field during plasma arc welding of thin titanium alloy sheets using parabolic Gaussian heat

source model. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science**, v. 231, n. 4, p. 695-711, 2017. DOI <https://doi.org/10.1177/0954406215623574>

FARIAS, Rodrigo Martins. Simulação Numérica do Processo de Soldagem MIG/MAG Multipasse de Topo em Chapas de Aço Inoxidável 304L Utilizando a Técnica Element Birth and Death. 2015. **Dissertação** – Escola de Engenharias da Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, Brasil.

FU, Chang Hung, SEALY, Michael, GUO, Yuebin, WEI, Xiao Tang. Finite elements simulation and experimental validation of pulsed laser cutting of nitinol. **Journal of Manufacturing Processes**, v.19, p.81-86, 2015. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.06.005>

GÉRY, De Saxcé; LONG, Hui; MAROPOULOS, Paul. Effects of welding speed, energy input and heat source distribution on temperature variations in butt joint welding. **Journal of materials processing technology**, v. 167, n. 2-3, p. 393-401, 2005. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.06.018>

GUROVA, Tetyana; QUARANTA, Francisco; ESTEFEN, Segen. Monitoramento do estado das tensões residuais durante fabricação de navios. In: **21º Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore. Anais... Rio de Janeiro**. 2006.

HyperTherm. Disponível em: <<https://www.hypertherm.com/pt/hypertherm/powermax/powermax1650-plasma-system/>>. Acesso em: 08 dez. 2021.

HyperTherm. Disponível em: <<https://www.hypertherm.com/Download?fileId=HYP104509&zip=False>>. Acesso em: 18 jan. 2022.

HYUN, Chung-Min; BAE, Kang-Yul; YANG, Young-Soo; & YI, Myung-Su. A study on heat flow and thermal distortion in terms of air-carbon-arc gouging of steel

plates. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 232, n. 12, p. 2210-2217, 2018. DOI <https://doi.org/10.1177/0954405416685385>

INCROPERA, Frank, DEWITT, David, BERGMAN, Theodore; & LAVINE, Adrienne. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 6ª edição. **Rio de Janeiro: LTC**, 2008.

KALYANKAR, Vivek; SHAH, Prassan. A review on methodologies to reduce welding distortion. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 11, p. 24741-24749, 2018. DOI <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.272>

KOU, Sindo; WANG, Yi-Hong. Computer simulation of convection in moving arc weld pools. **Metallurgical Transactions A**, v. 17, n. 12, p. 2271-2277, 1986. DOI <https://doi.org/10.1007/BF02645925>

LIN, Chun-Ming; TSAI, Hsien-Lung; CHENG, Chun-Der; YANG, Cheng. Effect of repeated weld-repairs on microstructure, texture, impact properties and corrosion properties of 304L stainless steel. **Engineering Failure Analysis**, V.21, p.9-20, 2012. DOI <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2011.11.014>

MACHERAUCH, Edward. Different Sources of Residual Stress as a Result of Welding. **Residual stress in welded construction and their effects: An international conference**, Nov 15-17, London, Cambridge, Welding Institute, 1977, 267-282.

MARINHO, Cleidiney Corrêa. Influência da preparação de juntas soldadas pelo Processo Arame Tubular na microestrutura e resistência mecânica do Aço Naval ASTM A131-A. 2020. **Dissertação** – Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas, Manaus, Brasil.

MISHCHENKO, Andrii; SCOTTI, Américo. Tensões residuais em soldagem a arco: uma visão holística. **Soldagem & Inspeção**, v. 23, n. 1, p. 93-112, 2018. DOI <https://doi.org/10.1590/0104-9224/si2301.10>

MODENESI, Paulo. Fluxo de calor em soldagem. **Belo Horizonte**, 2003.

NETO, Luiz Fernando Castro; COSTA, Dênis Almeida. Discussão sobre os processos de goivagem e a utilização de suporte de solda. **Infosolda**, 2018.

PHAM, Xuan-Tan. Two-dimensional Rosenthal moving heat source analysis using the meshless element free Galerkin method. **Numerical Heat Transfer, Part A: Applications**, v. 63, n. 11, p. 807-823, 2013. DOI <https://doi.org/10.1080/10407782.2013.757089>

PILIPENKO, Artem. Computer simulation of residual stress and distortion of thick plates in multielectrode submerged arc welding: Their mitigation techniques. 2001. **Thesis** – Department of Machine Design and Materials Technology of Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.

RADAJ, Dieter. Modelling of welding residual stresses and distortion. **Welding residual stresses and distortion: calculation and measurement, 2nd ed. DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf**, p. 100-272, 2003.

ROUQUETTE, Sébastien; GUO, Jialin; LE MASSON, Philippe. Estimation of the parameters of a Gaussian heat source by the Levenberg–Marquardt method: Application to the electron beam welding. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 46, n. 2, p. 128-138, 2007. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2006.04.015>

ROSENTHAL, Dieter. Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting. **Welding journal**, v. 20, p. 220-234, 1941.

SATERNUS, Zbigniew; PIEKARSKA, Wiesława; KUBIAK, Marcin; DOMANSKI, Tomasz; KROLISZEWSKA, Dorota Goszczyńska. Numerical modeling of cutting process of steel sheets using a laser beam. **MATEC Web of Conferences**, v.254, 2019. DOI <https://doi.org/10.1051/matecconf/201925408004>

SCOTTI, Américo; REIS, Ruham Pablo; LISKEVYCH, Olga. Modelo descritivo do fluxo de calor em soldagem a arco visando o conceito de calor imposto efetivo. **Soldagem & Inspeção**, v. 17, p. 166-172, 2012. DOI <https://doi.org/10.1590/S0104-92242012000200010>

SHAHABAD, Shahriar Imani; ZHANG, Zhidong; KESHAVARZKERMANI, Ali; ALI, Usman; MAHMOODKHANI, Yahya; ESMAEILIZADEH, Reza; BONAKDAR, Ali; TOYSERKANI, Ehsan. Heat source model calibration for thermal analysis of laser powder-bed fusion. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 106, n. 7, p. 3367-3379, 2020. DOI <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04908-3>

SORENSEN, Martin Birk. **Simulation of Welding Distortion in Ship Section**. Industrial PhD thesis, University of Denmark, Department of Naval Architecture and Offshore Engineering. Denmark. 1999.

TAVARES, Wellison da Silva. Estudo das técnicas de remoção de material empregadas em soldagens de fabricação ou de manutenção de estruturas de aços. 2009. **Dissertação** – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil.

TEIXEIRA, Paulo Roberto de Freitas; ARAÚJO, Douglas Bezerra de; CUNDA, Luiz Antônio Bragança da. Study of the gaussian distribution heat source model applied to numerical thermal simulations of TIG welding processes. **Ciência & Engenharia**, 23 (1) jan, 2014, 115-122. DOI <https://doi.org/10.14393/19834071.2014.26140>

TENG, Tso-Liang; FUNG, Chin-Ping; CHANG, Peng-Hsiang; YANG, Wei-Chung. Analysis of residual stresses and distortions in T-joint fillet welds. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, 78(8), 2001, 523-538.

TOULOUKIAN, Yeram Sarkis; DEWITT, David. **Thermophysical properties of matter-the tprc data series. volume 7. thermal radiative properties-metallic**

elements and alloys. Thermophysical and Electronic Properties Information Analysis Center Lafayette IN, 1970.

VEGA, Becerra; HALLEN, José Manuel López; VILLAGÓMEZ, Agustin; CONTRERAS, Antonio. Effect of multiplex repairs in girth welds of pipelines on the mechanical properties. **Materials characterization**, v.59, p. 1498-1507, 2008. DOI <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2008.01.011>

WU, ChuanSong; WANG, Hiun; ZHANG, Yuming. A new heat source model for keyhole plasma arc welding in FEM analysis of the temperature profile. **Welding Journal**, v. 85, n. 12, p. 284, 2006.

WU, Wenjin; TOR, Shu Beng; CHUA, Chee Kai; LEONG, Kah Fai; MERCHANT, Aziz. Investigation on processing of ASTM A131 Eh36 high tensile strength steel using selective laser melting. **Virtual and Physical Prototyping**, v. 10, n. 4, p. 187-193, 2015. DOI <https://doi.org/10.1080/17452759.2015.1106091>

APÊNDICE A – FLUXO DE CALOR 2D OU 3D

A verificação do comportamento do fluxo de calor é desenvolvida baseando-se na revisão bibliográfica realizada no Tópico 2.4.1. Dessa forma, é necessário que a Equação 3 seja resolvida.

O valor da velocidade de goivagem é informado na Tabela 2, e a potência utilizada é um produto entre corrente, tensão e rendimento do processo. Sendo que as propriedades do material são avaliadas na Figura 25 a 25°C. As temperaturas admitidas nesse cálculo foram a inicial e a de fusão do material. Com isso, a Tabela 8 reúne as variáveis necessárias para o cálculo.

Tabela 8 - Propriedades do Material a 25°C e Parâmetros de Goivagem

e [m]	0,0254
Q [W]	3238,2
ρ [kg/m ³]	7775
c [J/kg°C]	405
T _o [°C]	25
T [°C]	1500
V _g [m/s]	0,0051

Fonte: Autoria própria.

Dessa forma, a espessura média para o modelo simulado é expressa pela Equação 22:

$$\bar{e} = e \sqrt{\rho c v (T - T_0)/Q} = 2,17 \quad (22)$$

O valor de espessura média calculada para esse caso de estudo satisfaz a condição da Equação 6, pois é maior que 1,2.

Portanto, conclui-se que o fluxo de calor se comporta de forma 3D para essa situação em análise.

APÊNDICE B – CÁLCULO DO COEFICIENTE DE CONVECÇÃO

São seguidas as orientações do Tópico 2.5.3 para que seja demonstrado o cálculo do coeficiente convectivo de transferência de calor em um exemplo. Para isso, são definidas as seguintes condições:

- Temperatura ambiente: $T_{\infty} = 25^{\circ}\text{C}$
- Temperatura do nó: $T_S = 475^{\circ}\text{C}$
- A chapa troca calor por convecção com ar durante todo o processo;
- A goivagem é realizada na posição plana;
- Aceleração gravitacional: $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

As propriedades do fluido são avaliadas na temperatura média entre a temperatura da superfície e a temperatura do fluido, denominada temperatura de filme, conforme Equação 23.

$$T_F = \frac{T_S + T_{\infty}}{2} = \frac{475 + 25}{2} = 250^{\circ}\text{C} = 523\text{K} \quad (23)$$

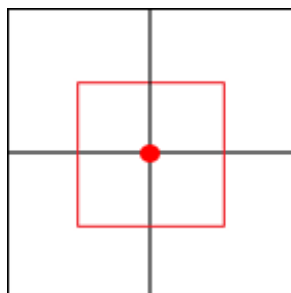
Desta forma, é possível definir os parâmetros do ar na temperatura de filme, de acordo com a tabela apresentada no Anexo A.

- Condutividade térmica do fluido: $k_f = 4,104 \times 10^{-2} \text{ W/mK}$
- Viscosidade cinemática do fluido: $\nu = 4,091 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
- Número de Prandtl: $Pr = 0,6946$
- Coeficiente de expansão volumétrica: $\beta = 19,120 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$

Por fim, o comprimento característico (L_c) é a última variável a ser definida antes do cálculo do coeficiente de convecção. Por se tratar de uma análise numérica, esse é quantificado em relação a área do elemento.

Assim, cada nó é responsável pela troca de calor que ocorre em um elemento. Pois esse compartilha 1/4 de elemento com quatro elementos. Isso é mostrado na Figura 50 para um nó. É importante destacar que o modelo é 3D e, por isso, os nós localizados nas laterais do modelo também são responsáveis pela troca de calor que ocorre em um elemento. Entretanto, os nós nas quinas são responsáveis apenas por 3/4 de um elemento, contudo o software não altera.

Figura 50 - Área de Troca de Calor por Convecção de Um Nó



Fonte: Autoria própria.

Conforme informado no Tópico 4.2.3, os elementos da malha na chapa têm tamanho de 2 mm. Assim, o comprimento característico para áreas retangulares é calculado na Equação 24.

$$L_c = \frac{\text{área}}{\text{perímetro}} = \frac{0,002^2}{4 \cdot 0,002} = 5 \times 10^{-4} \text{ m} \quad (24)$$

A Equação 25 define o número de Rayleigh conforme Equação 12.

$$Ra = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} Pr = \frac{9,81 \cdot 19,12 \cdot 10^{-4} \cdot (748 - 298) \cdot (5 \cdot 10^{-4})^3 \cdot 0,6946}{(4,091 \cdot 10^{-5})^2} = 0,43788 \quad (25)$$

Sabe-se que a goivagem é realizada na posição plana, ou seja, a superfície quente está para cima. Assim, conforme a Figura 8 e o número de Rayleigh, o número de Nusselt é determinado na Equação 26 a partir da relação da Equação 10.

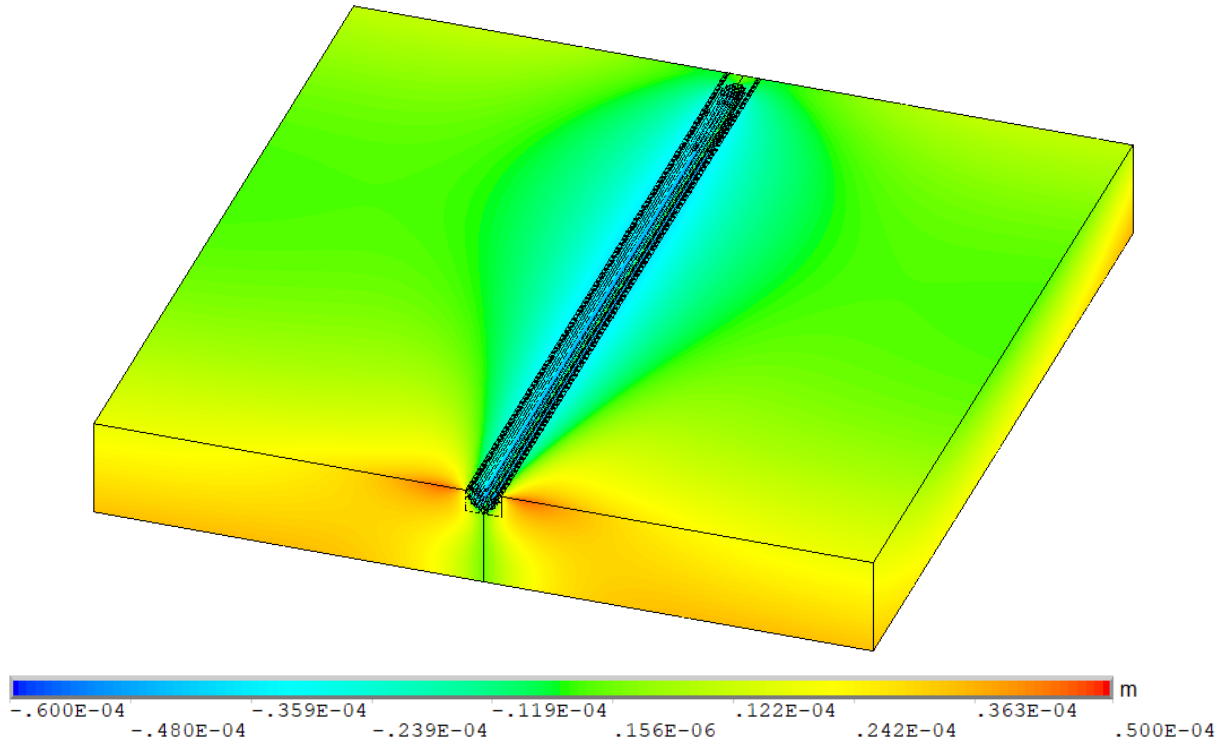
$$Nu = 0,54 Ra^{1/4} = 0,54 (0,43788)^{1/4} = 0,43927 \quad (26)$$

Portanto, em concordância com a Equação 9, é calculado na Equação 27 o coeficiente convectivo de troca de calor para uma temperatura de filme de 523K.

$$h_c = \frac{Nu \cdot k_f}{L_c} = \frac{0,43927 \cdot 4,104 \cdot 10^{-2}}{5 \cdot 10^{-4}} = 36,06 \text{ W/mK} \quad (27)$$

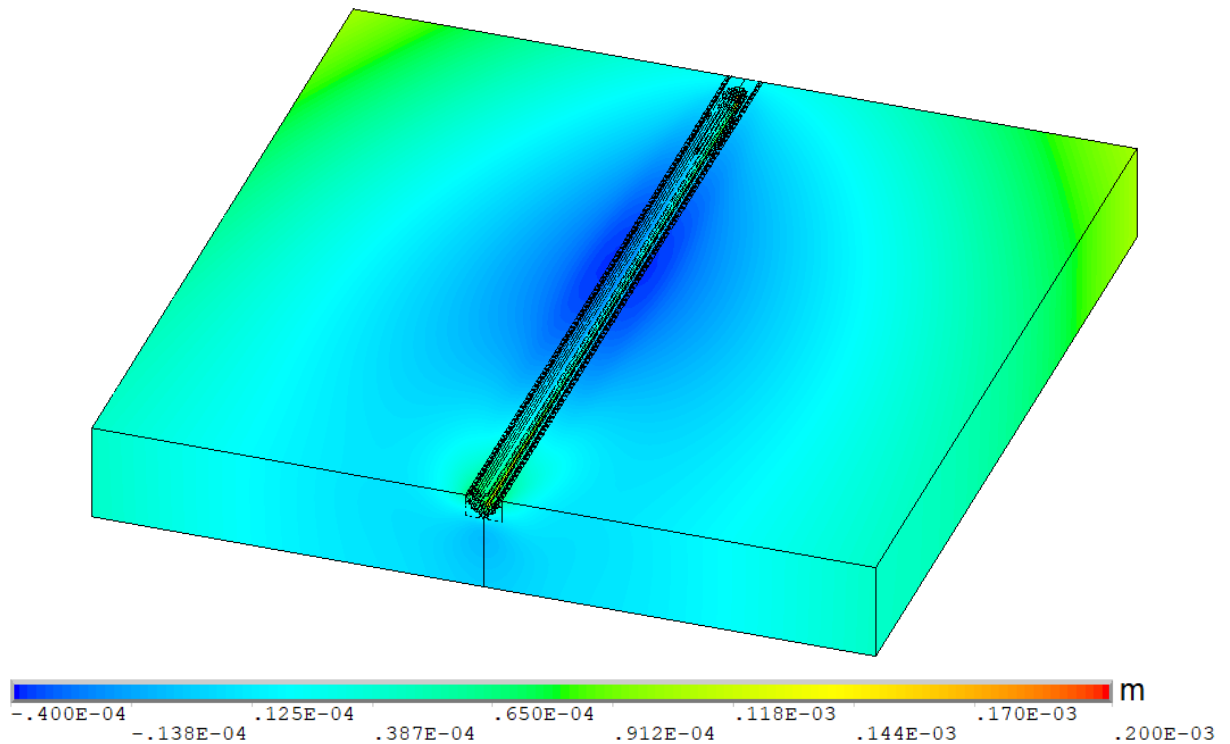
APÊNDICE C – DESLOCAMENTOS EM CADA DIREÇÃO

Figura 51 - Deslocamento ao longo da largura (direção x)



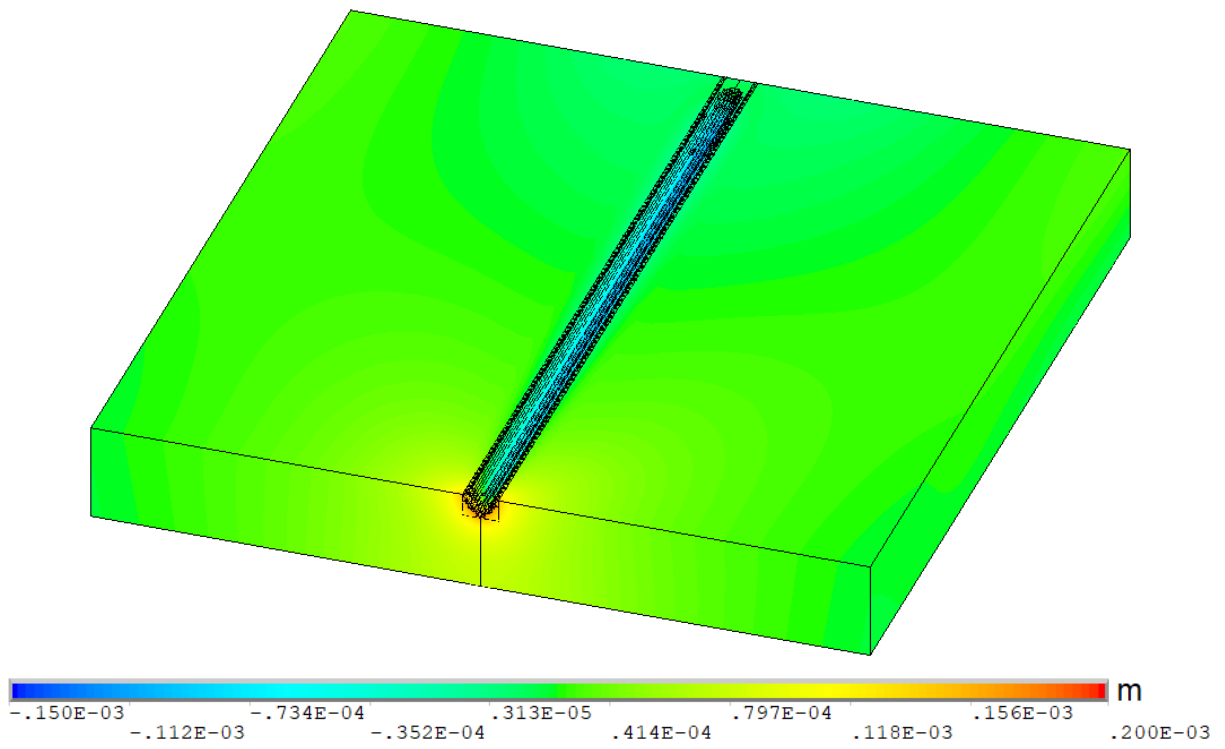
Fonte: Autoria própria.

Figura 52 - Deslocamento ao longo da espessura (direção y)



Fonte: Autoria própria.

Figura 53 - Deslocamento ao longo do comprimento (direção z)



Fonte: Autoria própria.

ANEXO A – PROPRIEDADES DO AR A UMA ATMOSFERA DE PRESSÃO

Tabela 9 - Variação das Propriedades do Ar com a Temperatura a Uma Atmosfera de Pressão

Temperatura [K]	Condutividade Térmica [10^{-2} W/mK]	Viscosidade Cinemática [10^{-5} m ² /s]	Número de Prandtl	Coefficiente de Expansão Volumétrica [10^{-4} K ⁻¹]
273	2,364	1,338	0,7362	36,630
283	2,439	1,426	0,7336	35,336
288	2,476	1,470	0,7323	34,722
293	2,514	1,516	0,7309	34,130
298	2,551	1,562	0,7296	33,557
303	2,588	1,608	0,7282	33,003
308	2,625	1,655	0,7268	32,468
313	2,662	1,702	0,7255	31,949
318	2,699	1,750	0,7241	31,447
323	2,735	1,798	0,7228	30,960
333	2,808	1,896	0,7202	30,030
343	2,881	1,995	0,7177	29,155
353	2,953	2,097	0,7154	28,329
363	3,024	2,201	0,7132	27,548
373	3,095	2,306	0,7111	26,810
393	3,235	2,522	0,7073	25,445
413	3,374	2,745	0,7041	24,213
433	3,511	2,975	0,7014	23,095
453	3,646	3,212	0,6992	22,075
473	3,779	3,455	0,6974	21,142
523	4,104	4,091	0,6946	19,120
573	4,418	4,765	0,6935	17,452
623	4,721	5,475	0,6937	16,051
673	5,015	6,219	0,6948	14,859
723	5,298	6,997	0,6965	13,831
773	5,572	7,806	0,6986	12,937
873	6,093	9,515	0,7037	11,455
973	6,581	11,330	0,7092	10,277
1073	7,037	13,260	0,7149	9,320
1173	7,465	15,290	0,7206	8,525
1273	7,868	17,410	0,7260	7,855
1773	9,599	29,220	0,7478	5,640
2273	11,113	42,700	0,7539	4,399

Fonte: Çengel e Ghajar (2012).