



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMIÁRIDO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

CAIO NEPOMUCENO SANTOS

**OBTENÇÃO DOS CAMPOS DE TEMPERATURA DA SOLDAGEM TIG EM AÇO
INOXIDÁVEL AISI 304L ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL**

MOSSORÓ-RN

2019

CAIO NEPOMUCENO SANTOS

**OBTENÇÃO DOS CAMPOS DE TEMPERATURA DA SOLDAGEM TIG EM AÇO
INOXIDÁVEL AISI 304L ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada à
Universidade Federal Rural do Semiárido –
UFERSA, Departamento de Engenharia e
Tecnologia para a obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Mecânica.

Orientador: MSc. Daut de Jesus Nogueira Peixoto
Couras – UFERSA

MOSSORÓ-RN

2019

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

S237o Santos, Caio.
Obtenção dos campos de temperatura da soldagem
TIG em aço inoxidável AISI 304L através de
simulação computacional / Caio Santos. - 2019.
46 f. : il.

Orientador: Daut Couras.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Mecânica, 2019.

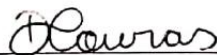
1. Soldagem TIG. 2. Campo de temperatura. 3.
Simulação numérica. 4. Fluxo de calor. I. Couras,
Daut, orient. II. Título.

CAIO NEPOMUCENO SANTOS

**OBTENÇÃO DOS CAMPOS DE TEMPERATURA DA SOLDAGEM TIG EM AÇO
INOXIDÁVEL AISI 304L ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-
Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em
ENGENHARIA MECÂNICA.

Defendida em: 14 / FEVEREIRO / 2019



Prof. MSc. Daut de Jesus N. P. Couras
Presidente e Orientador



Prof. Dr. Francisco Edson Nogueira Fraga
Membro



Prof. Dr. Antônio Rodolfo Paulino Pessoa
Membro

Dedico aos meus pais, Julio e Dayse, e a meu irmão Lucas

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais pelo grande suporte, força, amor e carinho que me deram desde o início dos estudos. Ao professor MSc. Daut de Jesus Nogueira Peixoto Couras pela orientação, nesta monografia e nas pesquisas. Aos meus amigos e meu irmão, pelo grande apoio e grandes momentos.

“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível. ”

(Charles Chaplin)

RESUMO

A fim de se obter o campo de temperatura da soldagem TIG (Tungsten Inert Gas) autógena do aço inoxidável AISI 304l em uma placa de 100 mm de largura, 240 mm de comprimento e 1,47 mm de espessura, utilizou-se o software de volumes finitos ANSYS *Workbench* 18.2, onde foi operado o módulo *Fluent* com a adição de uma UDF (User Defined Function) a fim de gerar e movimentar uma fonte de calor elipsoidal sobre a chapa. Um novo material foi criado na biblioteca do programa, o qual respeitou as propriedades termofísicas não constantes do material da chapa (calor específico, condutividade térmica e densidade), para que seja assim realizada uma análise transiente de maior confiabilidade. Além disso, serão consideradas as perdas de calor para o ambiente através da convecção. O campo e algumas temperaturas pontuais serão comparadas as obtidas experimentalmente por Guessasma (2015) a fim de validar a simulação.

Palavras-chave: Soldagem TIG. Campo de temperatura. Simulação numérica. Fluxo de calor.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química da liga AISI 304L	5
Tabela 2: Propriedades termofísicas do aço AISI 304L	6
Tabela 3: Parâmetros de soldagem.....	33

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Ciclo térmico medido computacionalmente de uma placa de aço AISI 304 durante o processo de soldagem TIG	10
---	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tocha TIG resfriada a água	3
Figura 2 - Transferência de energia no processo de soldagem.....	8
Figura 3 - Valores médios da eficiência da soldagem TIG obtidos desde 1950 até 2010	9
Figura 4 - Discretização do domínio computacional e formação da malha	12
Figura 5 - Volume de controle elementar 2D e seus vizinhos.....	13
Figura 6 - Volume de controle 3D e seus vizinhos.....	15
Figura 7 - Geometrias das fontes de calor e seus respectivos autores.	17
Figura 8 - Dimensões do corpo de prova.....	25
Figura 9: Geração da malha.....	27
Figura 10: Configurações iniciais da malha computacional.....	28
Figura 11: Qualidade do elemento de malha.....	29
Figura 12: Qualidade ortogonal de malha.....	30
Figura 13: Skewness dos volumes finitos gerados na malha.....	30
Figura 14: Resultado final da rotina de criação de malha.....	30
Figura 15: Detalhe do refino de malha aplicado ao centro da placa.....	31
Figura 16: Distribuição da temperatura sobre a placa com a passagem da fonte de calor computacional no $t=1s$	31
Figura 17: Distribuição da temperatura sobre a placa com a passagem da fonte de calor computacional no $t=21s$	35
Figura 18: Distribuição da temperatura sobre a placa com a passagem da fonte de calor computacional no $t=41s$	36
Figura 19: Distribuição da temperatura sobre a placa com a passagem da fonte de calor computacional no $t=61s$	36
Figura 20: Distribuição da temperatura sobre a placa com a passagem da fonte de calor computacional no $t=81s$	37
Figura 21: Distribuição da temperatura sobre a placa com a passagem da fonte de calor computacional no $t=101s$	38
Figura 22: Distribuição da temperatura sobre a placa com a passagem da fonte de calor computacional no $t=121s$	38
Figura 23: Fonte de calor aplicada ao corpo de prova.....	39
Figura 24: Variação da densidade do material do corpo de prova com a passagem da fonte de calor computacional.....	40
Figura 25: Comparação entre os resultados de Aissani et al. com os da simulação do presente trabalho.....	41

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVOS	11
2.1 OBJETIVOS GERAIS	11
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3.1 PROCESSO DE SOLDAGEM TIG EM AÇOS INOXIDÁVEIS AISI 304L	12
3.1.1 Processo de soldagem TIG	12
3.1.2 Soldabilidade da liga de aço AISI 304L	13
3.1.3 Liga de aço inoxidável AISI 304L	13
3.2 TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA SOLDAGEM.....	16
3.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE SOLDAGEM TIG AUTÓGENA	20
3.3.1 Mecânica dos Fluidos Computacional e o Método dos Volumes Finitos.....	20
3.3.2 O Método dos Volumes Finitos e a transferência de calor por condução	22
3.3.3 Modelo de fonte de calor para soldagem	24
4. METODOLOGIA.....	27
4.1 GEOMETRIA COMPUTACIONAL DO CORPO DE PROVA.....	27
4.2 GERAÇÃO DA MALHA.....	28
4.3 MODELAMENTO DA FONTE DE CALOR COMPUTACIONAL.....	32
4.4 PARÂMETROS DE SOLGEM.....	33
4.5 MATERIAL	33
4.6 PARÂMETROS UTILIZADOS NO SOLVER	34
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
5.1 CAMPO DE TEMPERATURA	35
5.2 ANÁLISE DA VARIAÇÃO DE DENSIDADE IMPLEMENTADA PELA UDF.....	40
5.3 CICLOS TÉRMICOS PONTUAIS.....	41
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	43
7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS.....	44

8. INTRODUÇÃO

Em um processo de soldagem, uma grande quantidade de calor é introduzida a uma determinada peça, a qual reage a temperatura de diferentes modos, como nas deformações através de tensões residuais, ou como na microestrutura do material. A obtenção dos campos de temperatura informa a carga térmica a qual o material está exposto, assim, podemos realizar outras análises sobre as consequências do processo sobre aquele material.

O método dos volumes finitos é um modo de analisar problemas de engenharia bastante difundido por ter a capacidade de solucionar inúmeros processos de interesse tecnológico (MELO, 2016).

O constante avanço de softwares e hardwares trazem mais eficiência, veracidade e detalhamento dos problemas propostos. Entretanto, a escolha do detalhamento da malha como forma, tipo e dimensão variam em relação a aplicação.

Com isso, é possível determinar-se numericamente a distribuição de calor e temperatura durante um processo de soldagem TIG, objeto de estudo do trabalho, e conseqüentemente, devido às diferentes dilatações do material, calcular as tensões residuais (BEZERRA, 2006).

9. OBJETIVOS

9.1 OBJETIVOS GERAIS

Realizar a simulação numérica para a obtenção do campo de temperatura provocado pela soldagem TIG em uma placa de aço inoxidável AISI 304l através do software ANSYS Workbench 18.2.

9.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 9.2.1** Aperfeiçoar e compilar uma fonte gaussiana de calor no módulo Fluent, do programa, através da User Defined Function (UDF).
- 9.2.2** Comparar os resultados computacionais das zonas térmicas obtidas, com os resultados experimentais alcançados por Aissani (2015).

10. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

10.1 PROCESSO DE SOLDAGEM TIG EM AÇOS INOXIDÁVEIS AISI 304L

Os aços inoxidáveis são amplamente utilizados em diversas indústrias devido não somente às suas propriedades físicas, mas principalmente a sua resistência a corrosão. A soldagem de aços inoxidáveis é crítica e importante para a geração de energia e produção de petroquímicos (KOU, 2003).

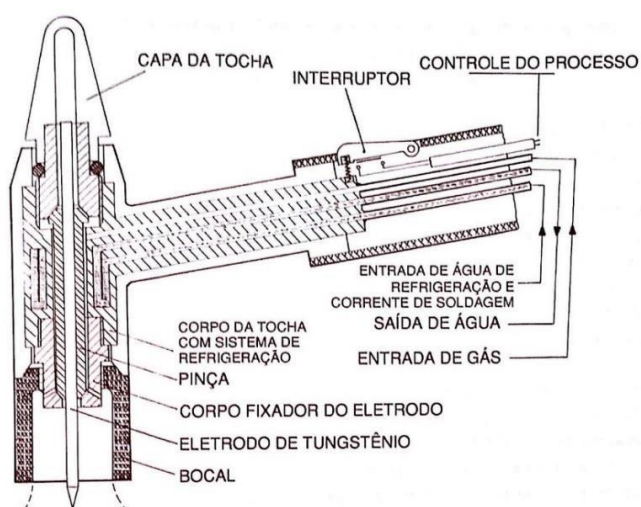
Os aços inoxidáveis austeníticos representam o maior grupo dentro dessa classificação dos aços e é o mais produzido e comum dos aços inoxidáveis. Eles possuem boa resistência a corrosão para uma maioria de ambientes e também, em geral, são considerados soldáveis, caso as precauções adequadas forem aplicadas (LIPPOLD, 2005).

3.1.1 Processo de soldagem TIG

O processo de união de metais mais importante na indústria é o de soldagem. Tal método de união possui aplicações fundamentais desde a indústria microeletrônica até a construção de navios e diversas estruturas com milhares de toneladas de peso (MODENESI, 2012).

Muito conhecido pela sigla GTAW (Gas Tungsten Arc Welding), a soldagem TIG (Tungsten Inert Gas) é um processo que funde e une metais através do calor gerado entre um arco estável de um eletrodo de tungstênio não consumível e o metal (KOU, 2003). A Figura 1 abaixo esquematiza a tocha utilizada no processo:

Figura 1: Tocha TIG resfriada a água.



Fonte: (WAINER, 2004)

Não é necessário a utilização de metal de adição para o processo. Tal dissociação da fonte de calor e da inclusão do metal de adição promove um excelente controle da energia transferida para a peça. Por isso, o processo é bastante utilizado em chapas finas e materiais de difícil soldabilidade (MODENESI, 2012).

3.1.2 Soldabilidade da liga de aço AISI 304L

Apesar das ligas austeníticas serem consideradas bastante soldáveis, elas estão sujeitas a diversos problemas de soldagem caso as devidas precauções não sejam tomadas. Muitos desses defeitos podem ser evitados com o controle adequado da temperatura do material no processo (LIPPOLD, 2005).

A simulação numérica pode ajudar a encontrar uma faixa de parâmetros para o equipamento a fim de que o controle da temperatura ocorra de modo eficiente para o cordão de solda.

Segundo Kou (2003), o processo possui problemas típicos quando aplicado em uma liga de aço inoxidável austenítica. Muitos desses defeitos podem ser evitados com o controle adequado da temperatura do material no processo (LIPPOLD, 2005).

A simulação numérica pode ajudar a encontrar uma faixa de parâmetros para o equipamento a fim de que o controle da temperatura ocorra de modo eficiente para o cordão de solda.

3.1.3 Liga de aço inoxidável AISI 304L

A liga de aço inoxidável AISI 304L, uma das mais antigas e mais comumente escolhida juntamente com a AISI 304, é austenítica e amplamente utilizada em aplicações para usos arquitetônicos, equipamentos de cozinha, produtos médico-hospitalares e petroquímica, por exemplo (LIPPOLD, 2005).

A composição do aço está apresentada na Tabela 1 abaixo:

Tabela 1: Composição química da liga AISI 304L

Componente	Peso %
C	0,03 max
Mn	2
Cr	18-20
Ni	8-12
Si	0,03 max
P	0,045 max
S	1 max

Fonte: (Fisher, 1977)

Tal composição nos leva às propriedades termofísicas do material. A Tabela 2 exibe a variação da condutividade térmica, calor específico e a densidade em relação a temperatura.

Tabela 2: Propriedades termofísicas do aço AISI 304L

Temp., K	Sp. Heat, cal/(g)(K)	Density (g/cm ³)	Conductivity [W/(cm) (K)]
300	0.1219	7.894	0.1297
400	0.1251	7.860	0.1459
500	0.1283	7.823	0.1620
600	0.1315	7.783	0.1782
700	0.1348	7.742	0.1944
800	0.1380	7.698	0.2106
900	0.1412	7.652	0.2267
1000	0.1444	7.603	0.2429
1100	0.1476	7.552	0.2591
1200	0.1509	7.499	0.2753
1300	0.1541	7.444	0.2914
1400	0.1573	7.386	0.3076
1500	0.1605	7.326	0.3238
1600	0.1638	7.264	0.3400
1700(s)	0.1670	7.199	0.3561
1700(l)	0.1900	6.926	0.1781
1800	0.1900	6.862	0.1814
1900	0.1900	6.795	0.1846
2000	0.1900	6.725	0.1879
2100	0.1900	6.652	0.1911
2200	0.1900	6.577	0.1944
2300	0.1900	6.498	0.1976
2400	0.1900	6.416	0.2009
2500	0.1900	6.331	0.2041
2600	0.1900	6.243	0.2073
2700	0.1900	6.152	0.2106
2800	0.1900	6.058	0.2138
2900	0.1900	5.961	0.2171
3000	0.1900	5.861	0.2203

Fonte: (KIM, 1975)

3.2 TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA SOLDAGEM

Na soldagem por fusão, que é o caso da soldagem TIG, trabalha-se com fontes de calor de elevada temperatura (2000 a 20000°C) e concentradas, as quais ao serem deslocadas ao longo da junta resultam na formação da solda pela fusão e solidificação localizadas na junta (MODENESI, 2012).

Logo, o calor é elemento essencial ao processo, mas pode, por outro lado, representar fonte potencial de problemas devido à sua influência direta nas transformações metalúrgicas e nos fenômenos mecânicos que ocorrem na zona da solda (WAINER, 2004).

Wainer (2004) ainda elenca os principais fatores que devem ser considerados no estudo da transferência de calor. São eles:

- Aporte de energia ou de calor à junta soldada, também denominado insumo de calor ou energia;
- Rendimento térmico do arco elétrico;
- Distribuição e picos de temperatura (ciclo térmico) durante a soldagem;
- Tempo de permanência nessas temperaturas;
- Velocidade de resfriamento da zona de solda;

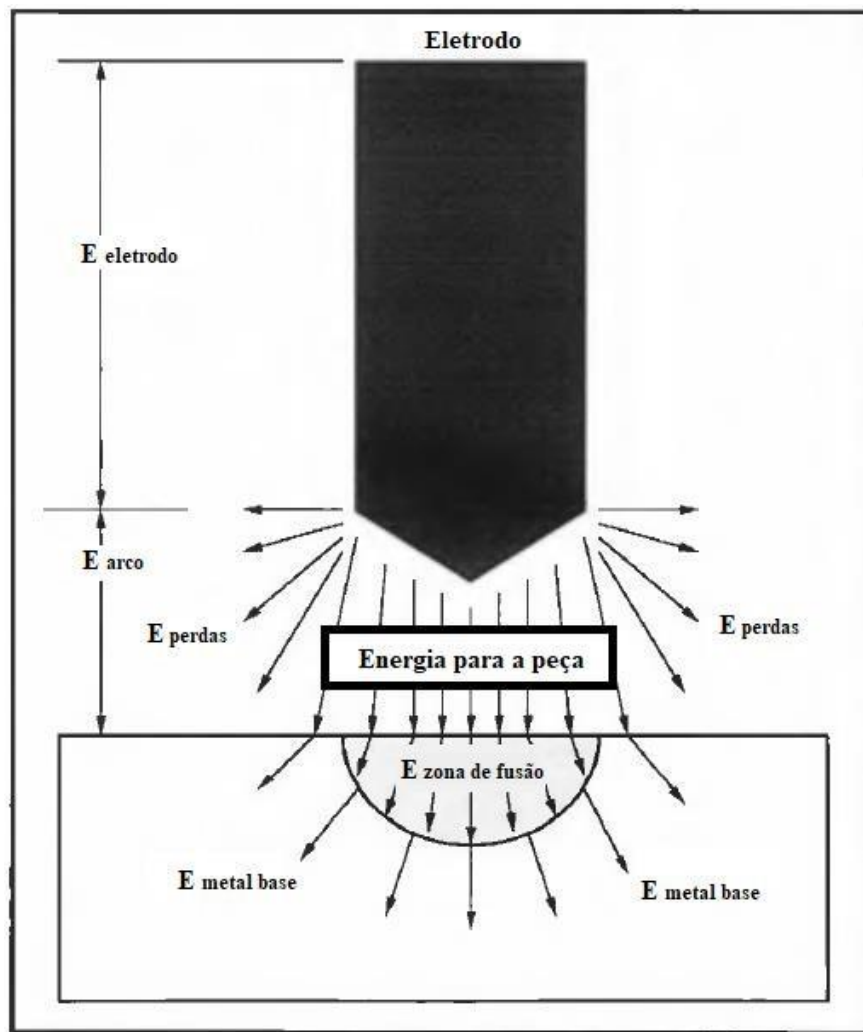
O insumo de calor ou energia de soldagem é definido como a quantidade de energia fornecida à junta. Em soldagens à arco elétrico, pode-se considerar o arco como a única fonte de calor (MODENESI, 2012). Tal energia pode ser expressa pela seguinte Equação 1:

$$Q = \eta \cdot U \cdot i \quad \text{Equação 1}$$

Onde Q (W) é a potência de soldagem, η é a eficiência térmica da soldagem, U (V) é a tensão no arco e i (A) é a corrente do processo (MODENESI, 2012).

A maior parte da energia será fornecida pelo o arco elétrico na geração da fonte, porém, uma pequena parte é promovida pelo eletrodo. A energia da fonte é então distribuída de duas formas, uma parte é perdida para o ambiente por convecção (geralmente natural) e radiação (E_{perdas}) e outra é transferida para a peça. Parte do calor fornecido para a peça é utilizado para a fusão do material ($E_{zona\ de\ fusão}$) enquanto o restante é perdido para as áreas adjacentes ao cordão de solda principalmente por condução ($E_{metal\ base}$). Tal parte perdida contribui para a formação da ZAC (Zona Afetada pelo Calor) e para o aquecimento do restante da peça (DuPONT, 1995). A Figura 2 esquematiza as utilizações e perdas da energia:

Figura 2: Transferência de energia no processo de soldagem



Fonte: adaptado DuPONT,1995

Dessa forma, o balanço de energia total do sistema pode ser expresso pela Equação 2 abaixo:

$$E_{arco + eletrodo} = E_{perdas} + E_{zona de fusão} + E_{metal base} \quad \text{Equação 2}$$

Finalmente, depois de todos esses valores obtidos, podemos calcular a eficiência do arco elétrico através da Equação 3 abaixo:

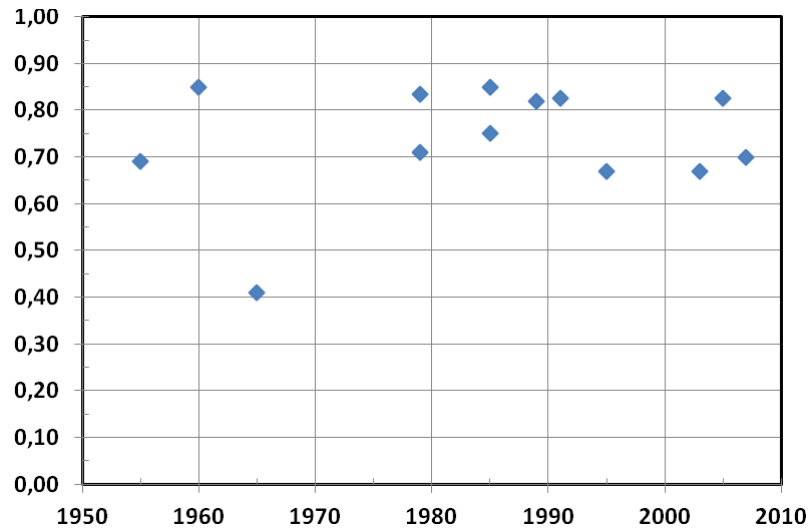
$$\eta = \frac{E_{zona de fusão} + E_{metal base}}{E_{arco + eletrodo}} \quad \text{Equação 3}$$

De acordo com Stenbacka (2012), existem dois diferentes métodos para se determinar experimentalmente a eficiência do arco. Um é baseado em experimentos com calorímetros

enquanto o outro utiliza diferentes modelos de fluxo de calor calibrados com os parâmetros medidos, como penetração e área fundida.

Depois de uma rebuscada pesquisa de artigos relacionados à eficiência do arco elétrico (de 1950 a 2010), como mostra a Figura uma faixa plausível para esse valor foi encontrada. Os estudos mostraram que a eficiência varia entre 0,73 e 0,82, com uma média de 0,78 para diferentes metais base como aços inoxidáveis e aços carbono (STENBACKA, 2012).

Figura 3: Valores médios da eficiência da soldagem TIG obtidos desde 1950 até 2010



Fonte: (STENBACKA, 2012)

Com o respectivo valor da eficiência da soldagem TIG sobre o aço inoxidável identificado e possuindo os parâmetros do processo de soldagem, calculamos a energia aplicada à peça, que seria representada pela soma de $E_{zona\ de\ fusão}$ e $E_{metal\ base}$ ou como o resultado da Equação 1.

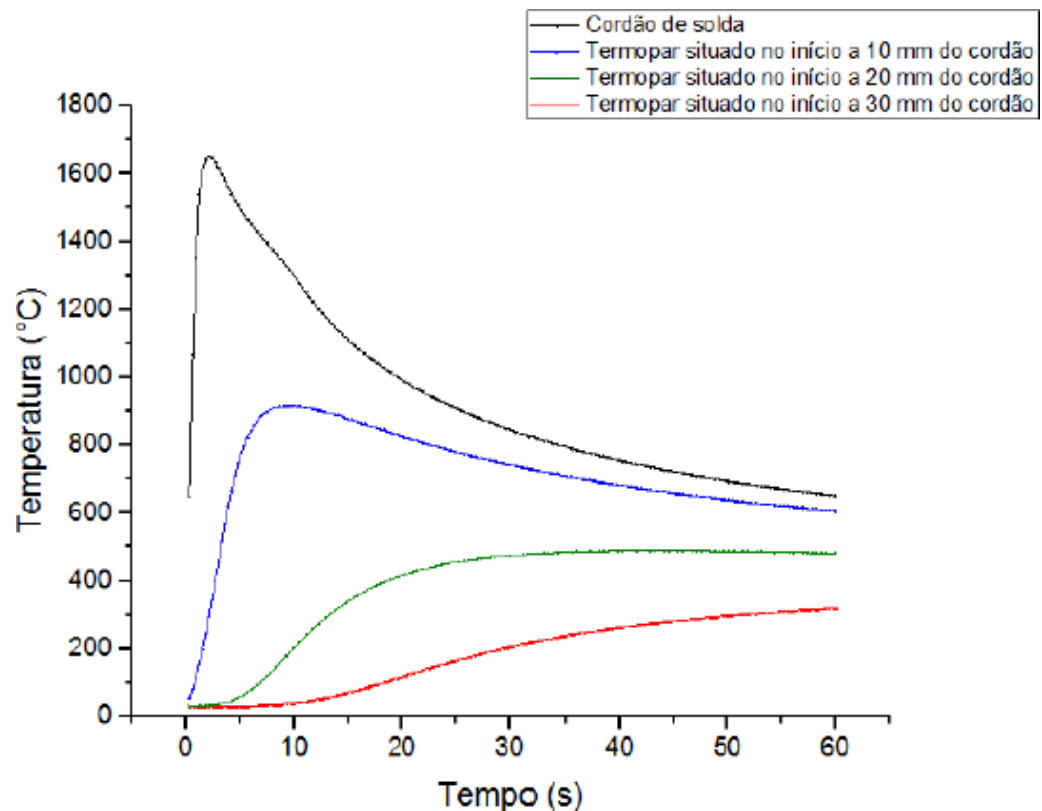
A difusão do calor gerado por essa energia na peça é representada pela seguinte Equação 4:

$$\rho(T)c(T)\frac{\partial T}{\partial t} = q + \frac{\partial}{\partial x} (K_x(T)\frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y(T)\frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_z(T)\frac{\partial T}{\partial z}) \quad \text{Equação 4}$$

A equação representa a difusão da energia em um material nas três dimensões (x, y, z), onde $\rho(T)$ (kg/m^3) é a densidade, $c(T)$ (J/kg.K) é o calor específico, q (W/mm^3) é o calor da fonte gerado por unidade de volume, $K_x(T)$, $K_y(T)$ e $K_z(T)$ (W/m.K) são os coeficientes de condutividade térmica nas três direções, T (K) é a temperatura e t (s) é o tempo (BEZERRA, 2006).

Tal difusão gera um comportamento diferente da temperatura em diversos pontos próximos ao cordão de solda. A variação da temperatura em relação ao tempo de cada ponto gera uma curva conhecida como ciclo térmico de soldagem e pode ser considerada como um tratamento térmico que o ponto sofreu durante o processo (MODENESI, 2012). O Gráfico 1 abaixo exemplifica tal ciclo:

Gráfico 1: Ciclo térmico medido computacionalmente de uma placa de aço AISI 304 durante o processo de soldagem TIG



Fonte: MELO, 2016

As perdas de calor agem como as condições de contorno no processo e são essenciais na simulação computacional. No problema térmico da soldagem, essas perdas se dão através da convecção e radiação para o ambiente (MELO, 2016).

Tais perdas podem ser quantificadas através das seguintes equações (INCROPERA, 2006):

$$q_c = h(T - T_{\infty})$$

onde q_c (W) é o calor perdido por convecção, h (W/m²K) é o coeficiente de convecção, T (K) é a temperatura da superfície da peça e T_{∞} (K) é a temperatura ambiente, e:

$$q_r = \varepsilon \sigma (T^4 - T_{\infty}^4)$$

onde q_r (W) é o calor perdido através da radiação, ε (J/K) é a emissividade da superfície do corpo e σ é a constante de Stefan-Boltzmann.

3.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE SOLDAGEM TIG AUTÓGENA

Em geral, há três maneiras de se determinar os campos de temperatura em uma peça soldada. Uma é o método analítico, outra é o método numérico e a última é o método experimental, o qual nos validará o resultado dos outros dois (SANTOS, 2017).

O método analítico busca resolver uma equação governante da transferência por condução térmica de uma peça, a qual está sujeita a aplicação de calor através de uma fonte móvel de calor. Ele produz resultados satisfatórios quando o tamanho da peça é considerado muito maior do que as dimensões do cordão de solda e também para obter soluções em um tempo mais curto (DEPRADEUX, 2004).

Apesar disso, o método além de considerar uma temperatura infinita na fonte de calor, também considera as propriedades físicas do material constantes para qualquer temperatura, o que leva a erros significativos na zona de fusão e nas proximidades (GOLDAK, 2005).

As técnicas numéricas vêm sendo desenvolvidas nos últimos anos para a análise térmica de soldagem devido à complexidade das equações fundamentais da termodinâmica e de distribuição de calor, bem como devido aos efeitos do calor latente e da não linearidade dos materiais (que por sua vez está associada a dependência entre a temperatura e as propriedades termofísicas) (STEPHEN, 1996).

3.3.1 Mecânica dos Fluidos Computacional e o Método dos Volumes Finitos

A Mecânica dos Fluidos Computacional, em inglês Computational Fluid Dynamics (por isso CFD), é a análise de um sistema envolvendo fluxo de fluidos, transferência de calor e fenômenos associados como reações químicas, baseadas em simulações computacionais (VERSTEEG, 2007).

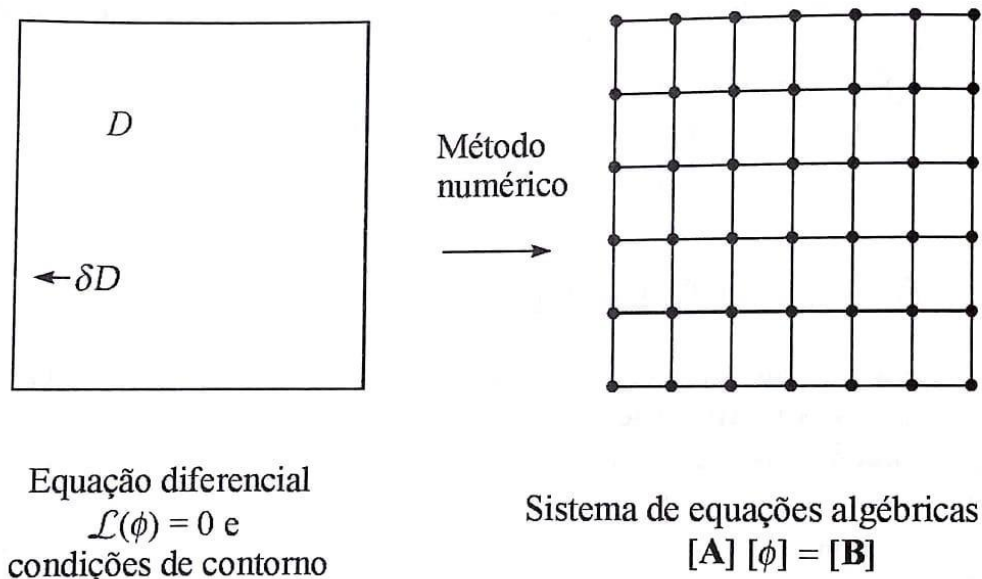
Tal técnica é muito poderosa e possui uma vasta área de aplicação seja na indústria ou não. A sua utilização varia desde estudos da aerodinâmica de aeronaves e veículos a meteorologia para a previsão do tempo (VERSTEEG, 2007).

O Método dos Volumes Finitos (MVF) ou em inglês Finite Volume Method (FVM), é um método numérico utilizado para a análise de CFD que tem o objetivo de resolver uma ou mais equações diferenciais, substituindo as derivadas existentes por expressões algébricas que envolvem a função incógnita (MALISKA, 2004).

Quando uma solução analítica não é possível de ser realizada, podemos decidir fazer uma aproximação numérica da equação diferencial, aceitando ter a solução para um número discreto de pontos, com um determinado erro, e esperando que quanto maior a quantidade de pontos, mais perto da solução exata será a nossa solução aproximada (MALISKA, 2004).

Tal número discreto de pontos provém da subdivisão do domínio computacional (geometria ou região de interesse) em volumes de controle (célula), os quais geram a malha. As soluções do problema, seja de velocidade, pressão ou temperatura, são definidas nos nós de cada célula (VERSTEEG, 2007).

Figura 4: Discretização do domínio computacional e formação da malha



Fonte: (MALISKA, 2004)

Segundo VERSTEEG (2007), o método é uma formulação especial da diferença finita e é o ponto central dos mais conhecidos e renomados códigos de CFD como o CFX e o FLUENT, da empresa ANSYS. Em geral o algoritmo consiste em três passos:

- Integração das equações governantes de todos os volumes de controle do domínio;
- Discretização (conversão do resultado das integrais das equações em um sistema algébrico de equações);
- Solução das equações algébricas através de um método iterativo;

3.3.2 O Método dos Volumes Finitos e a transferência de calor por condução

O FVM pode ser utilizado em análises de condução de calor em sólidos, apesar de ser mais conhecido por ser utilizado em análises fluidodinâmicas, que é o caso do problema da obtenção do campo de temperatura do processo de soldagem TIG.

De acordo com Maliska (2004), o FVM é o método mais empregado na indústria para tais análises uma vez que possui robustez elevada devido às suas características conservativas. Dessa forma, diferentemente de métodos de elementos finitos por exemplo, não será possível que em uma célula qualquer apareça uma quantidade de calor maior ou que esse calor subitamente desapareça graças ao balanço da energia.

Um dos softwares comerciais mais utilizados para a análise da condução térmica é o FLUENT da empresa ANSYS. A equação 5 abaixo é a utilizada pelo programa para calcular a variação de temperatura em regiões sólidas:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot (\vec{v}\rho h) = \nabla \cdot (k\nabla T) + S_h \quad \text{Equação 5}$$

Onde t é o tempo em segundos, ρ é a densidade, k é a condutividade térmica, T é a temperatura e S_h é a entalpia sensível. O segundo termo da equação é referente a transferência de calor por convecção, que no caso não será utilizada no problema puramente de condução (ANSYS, 2017).

A entalpia sensível é representada pela equação 6 abaixo:

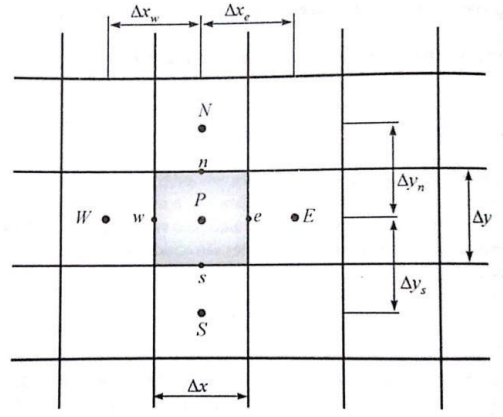
$$S_h = \int_{T_{ref}}^T c_p dT \quad \text{Equação 6}$$

Com isso, ao desenvolver a equação 5, chegamos a equação 7 de condução térmica abaixo:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho T) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S \quad \text{Equação 7}$$

Observando o nosso volume de controle no plano “xy” obtemos a Figura 5 abaixo:

Figura 5: Volume de controle elementar 2D e seus vizinhos



Fonte: (MALISKA, 2004)

De acordo com Maliska (2004), a integração da equação 4 no espaço e no tempo, quando se aproxima as derivadas nas interfaces do volume elementar por diferenças centrais e utilizando uma formulação totalmente implícita resulta na equação 7 abaixo:

$$A_p T_p = A_e T_E + \underline{A_w T_W} + A_n T_N + A_s T_S + A_f T_F + A_b T_B + B_p \quad \text{Equação 8}$$

Tais coeficientes são dados pelo conjunto de equações abaixo:

$$A_e = \frac{k}{c_p \Delta x} \Big|_e \Delta y \Delta z \quad \text{Equação 9}$$

$$A_w = \frac{k}{c_p \Delta x} \Big|_w \Delta y \Delta z \quad \text{Equação 10}$$

$$A_n = \frac{k}{c_p \Delta y} \Big|_n \Delta x \Delta z \quad \text{Equação 11}$$

$$A_s = \frac{k}{c_p \Delta y} \Big|_s \Delta x \Delta z \quad \text{Equação 12}$$

$$A_f = \frac{k}{c_p \Delta z} \Big|_f \Delta x \Delta y \quad \text{Equação 13}$$

$$A_b = \frac{k}{c_p \Delta z} \Big|_b \Delta x \Delta y \quad \text{Equação 14}$$

$$B_p = A_p^o T_p^o + S_c \Delta x \Delta y \Delta z \quad \text{Equação 15}$$

$$A_p^o = \frac{M_p^o}{\Delta t} = \frac{\rho^o}{\Delta t} \Delta x \Delta y \Delta z \quad \text{Equação 16}$$

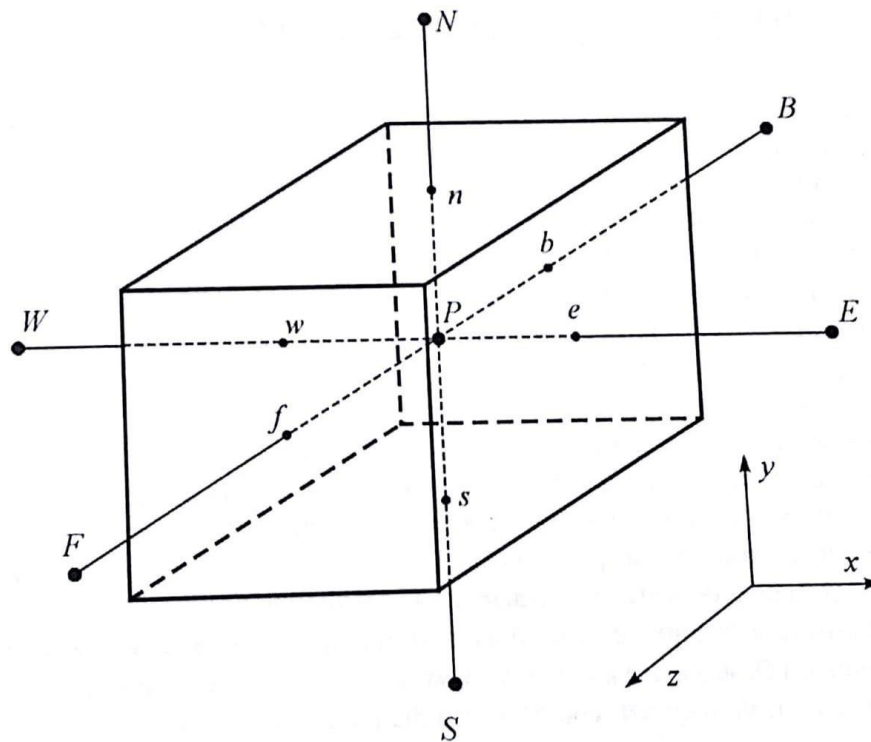
$$A_p = A_e + A_w + A_n + A_s + A_f + A_b + \frac{M_p}{\Delta t} - S_p \Delta x \Delta y \Delta z \quad \text{Equação 17}$$

$$S = S_p T_p + S_c$$

Equação 18

A Figura 6 abaixo apresenta a célula em três dimensões e seus vizinhos:

Figura 6: Volume de controle 3D e seus vizinhos



Fonte: (MALISKA, 2004)

Depois disso, os valores são então iterativamente encontrados através do método Multigrid (ANSYS, 2017).

3.3.3 Modelo de fonte de calor para soldagem

A maior dificuldade da simulação do campo de temperatura de um processo de soldagem é a modelagem da fonte de calor (ARAÚJO, 2014). Existe um complexo fenômeno físico que ainda não pode ser rigorosamente modelado que é a interação entre a fonte de calor e a poça de fusão (GOLDAK, 2005).

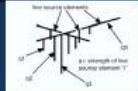
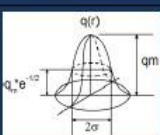
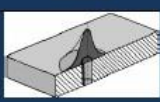
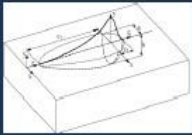
Desenvolvida por Fourier, a teoria básica de fluxo de calor foi aplicada em fontes móveis de calor por Rosenthal e Rykalin ainda em meados de 1930. Esse ainda é o método analítico mais popular para se calcular as zonas de temperaturas de um processo de soldagem. Contudo, o tal modelo está sujeito a sérios erros por conta da temperatura na poça de fusão e

da zona afetada pelo calor, principalmente por desconsiderar as variações das propriedades do material com a temperatura (GOLDAK, 2005).

Um dos modelos mais empregados por diversos cientistas é o duplo elipsoide tridimensional proposto por Goldak (2005). Ele é utilizado para que as dimensões e o formato da fonte de calor possam ser facilmente modificadas, tanto para os modelos de soldagens de baixas penetrações como para os de altas penetrações (GOLDAK, 2005).

Além de tal modelo do Goldak, a evolução das análises numéricas levou muitos modelos novos a serem criados. Araújo (2012) destaca alguns tipos de modelagens e seus autores, como exposto na Figura 7 abaixo:

Figura 7: Geometrias das fontes de calor e seus respectivos autores

Geometria	Fonte de calor	Autores
	Pontual	Rosenthal (1941)
	Linear	Rosenthal (1941)
	Conjunto de linhas	Lambraskos, Milewski e Moore (2003)
	Planar	Akbari, Sinton e Bahrami (2009)
	Gaussiana	Eagar e Tsai (1983); Cho e Kim (2002); Deng, Murakawa e Liang (2007); Rayamyaki, Karkhin e Khomich (2007)
	Gaussiana Cônica	Balasubramanian et al.(2008); Zaeh e Schober (2008); Ziolkowski e Brauer (2009)
	Gaussiana com cilindro	Bachorki et al. (1999)
	Duplo-Elipsoide	Goldak, Chakravarti e Bibby(1984); Nguyen et al.(1999); Goldak (2005); Gery, Long e Maropoulos (2005); Zhang, Zhang e Wu (2007)
	Duplo-Elipsoide com uma fonte de calor esférica	Wahab, Painter e Davies (1998)
	Duplo-elipsoide com uma fonte de calor cilíndrica	Wu, Hu e Gao (2009)

Fonte: (ARAÚJO, 2012)

Há ainda o modelo conhecido como elipsoidal. Ele consiste em um semi Duplo-Elipsoidal como representado na Figura 7 acima e também é amplamente utilizado. A equação que define tal fonte é a Equação 19, diferencial, abaixo:

$$q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}Q}{abc\pi\sqrt{\pi}} e^{-3x^2/a^2} e^{-3y^2/b^2} e^{-3[z+v(\tau-t)]^2/c^2} \quad \text{Equação 19}$$

Além de representar bem a fonte de calor sobre o material em questão, o modelo precisa justificar a complexidade em termos da sua calibração requerida e do tempo computacional gasto, dado as incertezas que existem em outros aspectos do modelo (PRESTON, 2003).

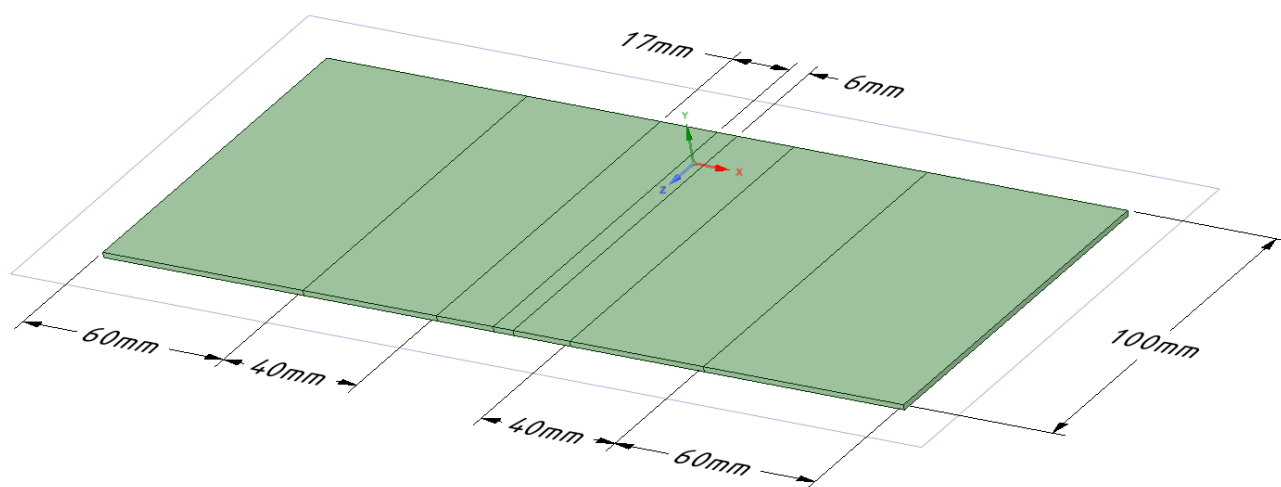
4. METODOLOGIA

O software ANSYS *fluent* 18.2 foi utilizado a fim de realizar-se uma simulação computacional de uma soldagem TIG autógena. Para isso, o programa utiliza o método dos volumes finitos. Os resultados foram então comparados com os testes laboratoriais de Aissani (2015). A configuração da máquina utilizada para processar os dados foram: processador Intel(R) Core(TM) i7-4700HQ CPU @ 2.40GHz com 12 GB de memória RAM.

4.1 GEOMETRIA COMPUTACIONAL DO CORPO DE PROVA

O corpo de prova foi construído através da ferramenta *SpaceClaim*. A placa possui 100mm de largura, 240mm de comprimento e 1,47mm de espessura. O ponto de origem foi definido no início do cordão de solda, para assim facilitar a implementação da fonte de calor computacional. A Figura 8 abaixo apresenta a geometria:

Figura 8: Dimensões do corpo de prova



Fonte: (AUTOR)

A placa ficou assim dividida, como mostrado na Figura 8, para que assim fosse facilitada a geração da malha no próximo processo, porém, todas as partes pertencem ao mesmo componente ou corpo.

A origem do desenho foi definido em um ponto central ao longo do comprimento (eixo x), na superfície da geometria (eixo y) e distante da borda superior da placa de 30 mm (eixo z). Tal definição foi realizada para que o centro do sistema coincida com o ponto de início do cordão de solda, que tem um total de 70mm.

4.2 GERAÇÃO DA MALHA

Utilizou-se diferentes métodos a fim de se obter uma malha mais refinada na área do cordão de solda e menos refinada na área mais distante, onde não há tanto interesse.

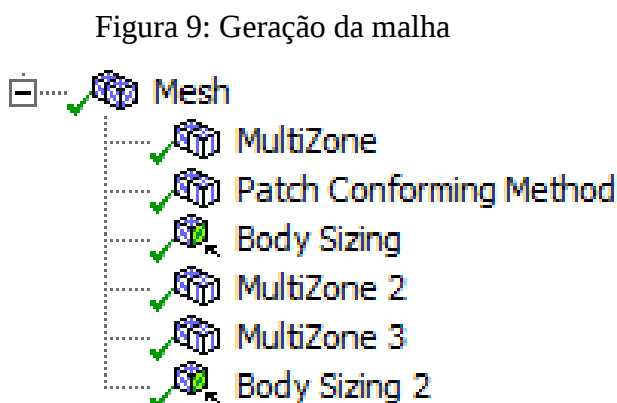
No centro da placa aplicou-se o método *Multizone*, com elementos hexaédricos a fim de diminuir o número de elementos e simplificar o cálculo numérico para se obter uma resposta mais fiel e rápida, já que o objeto não oferece grande complexidade. Além disso, a ferramenta *Sizing* também foi utilizada para que os volumes finitos obtivessem arestas de 0,1mm no centro da peça.

Na geometria mais próxima do cordão, o método usado foi o método de *Patch Conforming*, o qual usa tetraedros em sua geometria. Apesar de trazer mais complexidade aos cálculos devido ao aumento de elementos, o método permite realizar uma transição entre os volumes finitos do cordão de solda que são muito refinados e os volumes finitos da extremidade que são mais grosseiros. Consequentemente, a simulação ganha mais confiabilidade e menos tempo de processamento.

Na geometria adjacente a essa foi utilizado novamente o método *multizone* com um *body sizing* de 4 mm para que a malha voltasse a ficar simples e com um menor número de volumes finitos.

Por último, na extremidade, aplicou-se, também, o método *multizone*. Os elementos foram deixados livres e por isso sofreram uma taxa de crescimento de 1,2, como será mostrado adiante nos detalhes da malha.

A rotina para criação da malha está mostrada na Figura 9 abaixo:



Fonte: (AUTOR)

Nos detalhes do “Mesh” foram aplicadas as preferências físicas para CFD (Computational Fluid Dynamics) com o solver de preferencia sendo o Fluent. As demais opções foram utilizadas no modo padrão, de forma que os detalhes de malha apresentaram os seguintes parâmetros

mostrados na Figura 10:

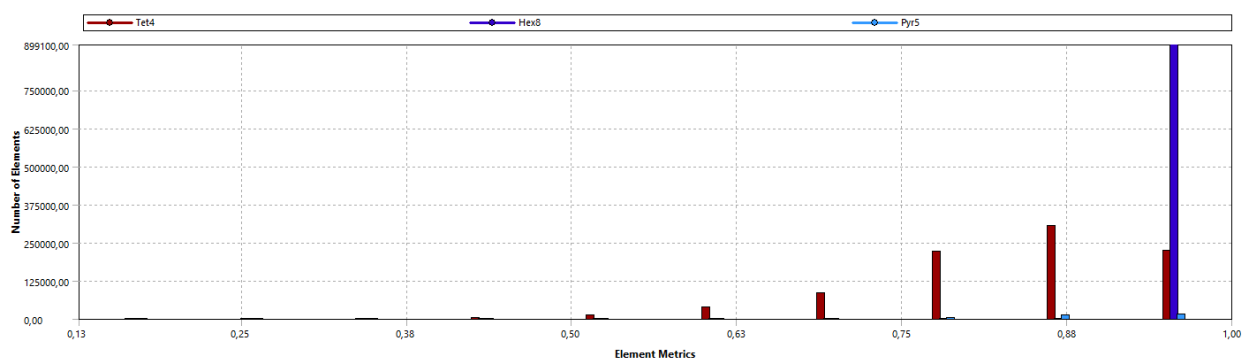
Figura 10: Configurações iniciais da malha computacional

Details of "Mesh"	
☐ Display	
Display Style	Body Color
☐ Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
☐ Relevance	0
Export Format	Standard
Element Order	Linear
☐ Sizing	
Size Function	Curvature
Relevance Center	Coarse
☐ Max Face Size	8,0 mm
Mesh Defeaturing	Yes
☐ Defeature Size	Default (4,e-002 mm)
Transition	Slow
☐ Growth Rate	Default (1,20)
Span Angle Center	Fine
☐ Min Size	Default (8,e-002 mm)
☐ Max Tet Size	Default (16,0 mm)
☐ Curvature Normal Angle	Default (18,0 °)
Bounding Box Diagonal	260,0 mm
Minimum Edge Length	1,470 mm
☐ Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
☐ Target Skewness	Default (0.900000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	None
☐ Inflation	
☐ Assembly Meshing	
☐ Advanced	
☐ Statistics	
☐ Nodes	1132628
☐ Elements	1818480

Fonte: (AUTOR)

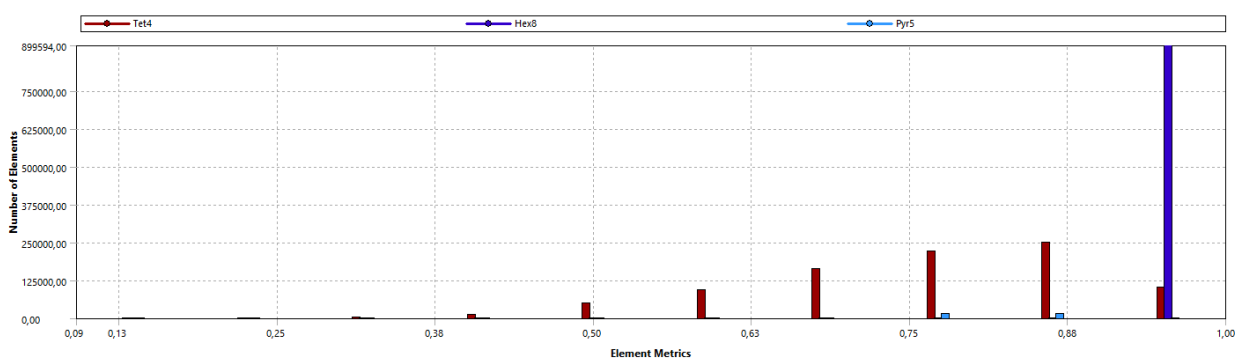
Para finalizar a geração da malha, observou-se a qualidade da malha. Os 3 parametros priorizados foram a qualidade do elemento, a qualidade ortogonal e o *Skewness*, mostrados nas Figuras 12, 13 e 14, respectivamente:

Figura 11: Qualidade do elemento de malha



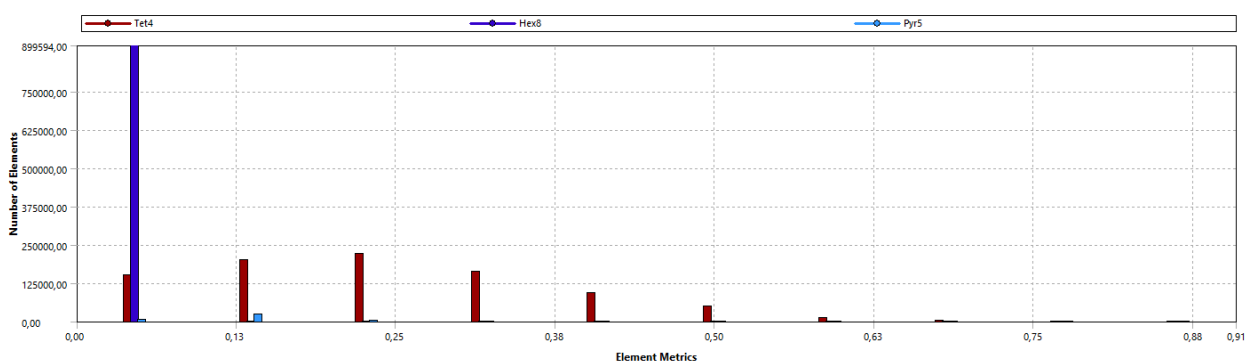
Fonte: (AUTOR)

Figura 12: Qualidade ortogonal de malha



Fonte: (AUTOR)

Figura 13: Skewness dos volumes finitos gerados na malha

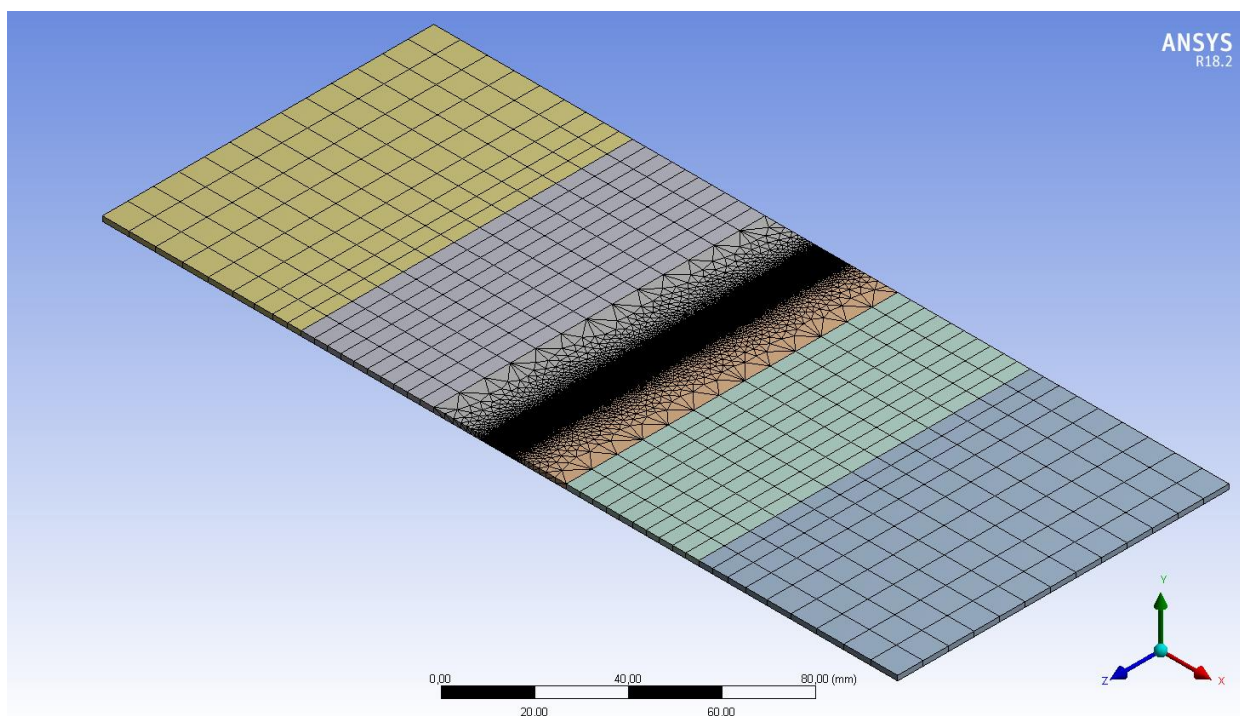


Fonte: (AUTOR)

A malha apresentou, portanto, uma boa qualidade em geral, já que nos dois primeiros parâmetros busca-se números próximos a um e no terceiro, zero. A porção da malha que apresentou mais problemas foram os elementos tetragonais. Porém, isso já era esperado e ainda assim a média dos elementos está entre um bom valor para os parâmetros analisados.

Por fim, a malha obteve a seguinte geometria apresentada na Figura 14 abaixo:

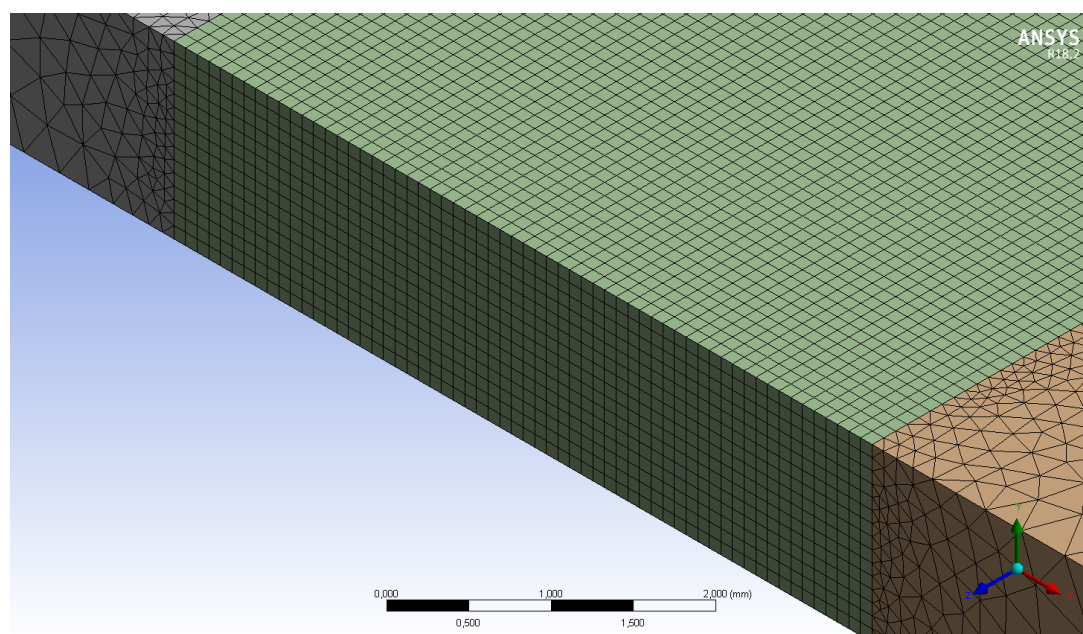
Figura 14: Resultado final da rotina de criação de malha



Fonte: (AUTOR)

Como pode-se observar, houve um refinamento muito elevado na área do cordão de solda, que é a área que receberá elevados gradientes de temperatura e que influenciará nas demais regiões, de modo que fica difícil observar os detalhes na malha na parte central. A Figura 15 apresenta então, o detalhamento da área central da malha:

Figura 15: Detalhe do refino de malha aplicado ao centro da placa



Fonte: (AUTOR)

4.3 MODELAMENTO DA FONTE DE CALOR COMPUTACIONAL

O modelo de fonte de calor computacional proposto no presente trabalho foi a fonte elipsoidal. Ela é derivada da equação diferencial 19 e suas dimensões devem ser definidas para que a simulação encontre valores que convirjam com os valores obtidos experimentalmente.

Para isso, gerou-se uma programação em linguagem C++ a fim de ser implementada no programa *Fluent* através de uma UDF (User Defined Function). UDFs são programas que permitem ao operador alterar o comportamento do programa satisfazendo as suas necessidades particulares.

4.4 PARÂMETROS DE SOLGEM

Os parâmetros de soldagem utilizados na simulação computacional, foram os mesmos que foram utilizados experimentalmente por Aissani et al. (2015), para que assim, uma validação do campo de temperatura computacional seja realizada. Com isso, os parâmetros utilizados foram os mostrados na Tabela 3 abaixo:

Tabela 3: Parâmetros de soldagem

Parâmetros	Valores
Corrente	35 A
Tensão	10 V
Velocidade de soldagem	0,57 mm/s
Rendimento	0,6

Fonte: (AUTOR)

4.5 MATERIAL

O material da placa soldada é aço inoxidável AISI 304L. Suas propriedades estão mensuradas na Tabela 2. As propriedades de densidade e condutividade térmica obedecem a uma equação parcialmente linear em relação à temperatura, enquanto a propriedade de capacidade térmica obedece a uma equação parcialmente polinomial em relação à temperatura.

Para a implementação da variação da densidade em relação à temperatura, necessitou-se de uma nova UDF, para que assim, o programa pudesse obedecer à necessidade da variação da densidade.

As outras duas propriedades puderam ser alteradas na interface do próprio programa, utilizando as funções *piecewise-linear* e *piecewise-polynomial*.

4.6 PARÂMETROS UTILIZADOS NO SOLVER

O solver do software *Fluent 18.2* utiliza o método de Newton-Rapson para realizar os cálculos da simulação.

Assim, foi escolhido um método de passo de tempo fixo, com o tempo de 1 segundo para um total de 123 passos de tempo. A escolha do número de passos de tempo foi realizado através da divisão entre o tamanho do cordão de solda (70mm) e a velocidade da soldagem (0,57mm/s).

Limitou-se um máximo de iterações/passo de tempo de 30, para que o programa pudesse calcular livremente a solução até que fosse convergida, já que esse número é relativamente alto para a quantidade de iterações necessárias para um passo de tempo da simulação em questão.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No presente tópico serão apresentados os resultados obtidos pela simulação numérica do processo de soldagem TIG autógeno no aço inoxidável AISI 304L, realizado através do software *Fluent 18.2*, com a implementação de UDFs para a geração de uma fonte de calor móvel sobre a placa.

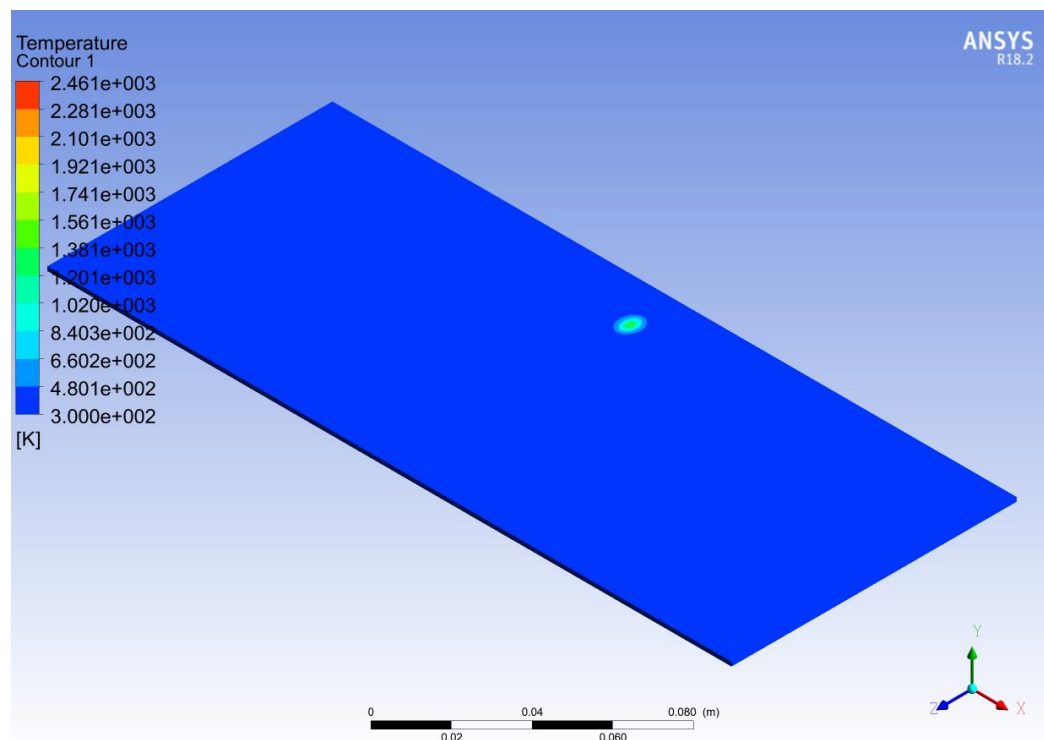
Os resultados da simulação foram comparados aos resultados experimentais e computacionais de Aissani et al. (2015) para que assim a simulação pudesse ser validada.

A simulação durou aproximadamente 57 minutos, devido ao elevado número de elementos (1818480) e nós (1132628) da malha, necessários para melhor conter e detalhar a fonte de calor computacional.

5.1 CAMPO DE TEMPERATURA

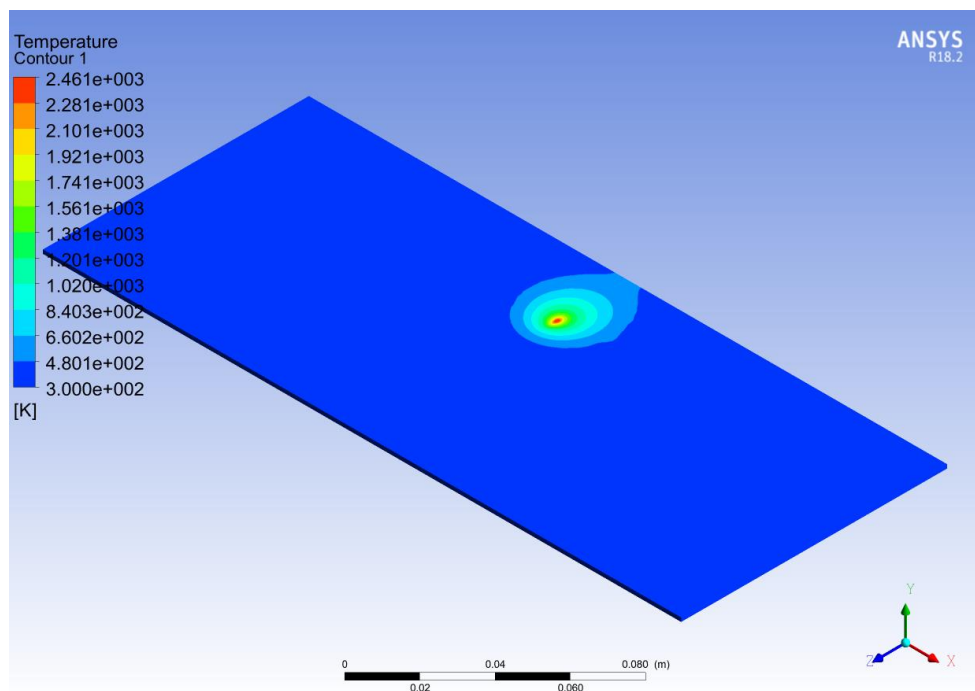
A passagem da fonte de calor na placa conferiu os seguintes campos de temperatura mostrados na sequência de Figura 16 à Figura 22 abaixo:

Figura 16: Distribuição da temperatura sobre a placa com a passagem da fonte de calor computacional no $t=1s$



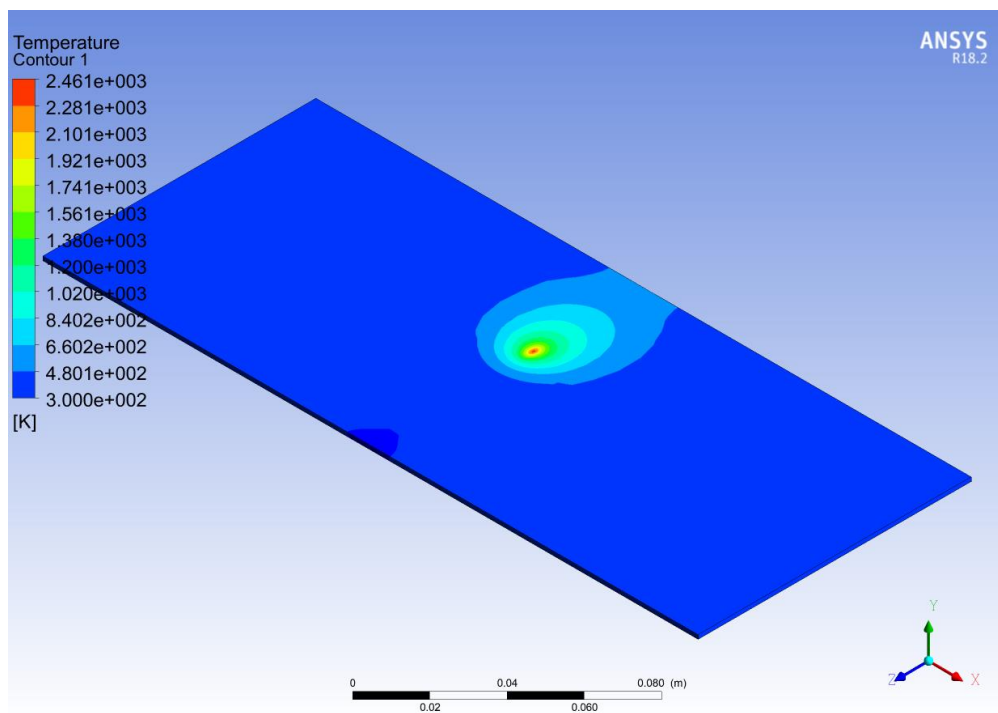
Fonte: (AUTOR)

Figura 17: Distribuição da temperatura sobre a placa com a passagem da fonte de calor computacional no t=21s



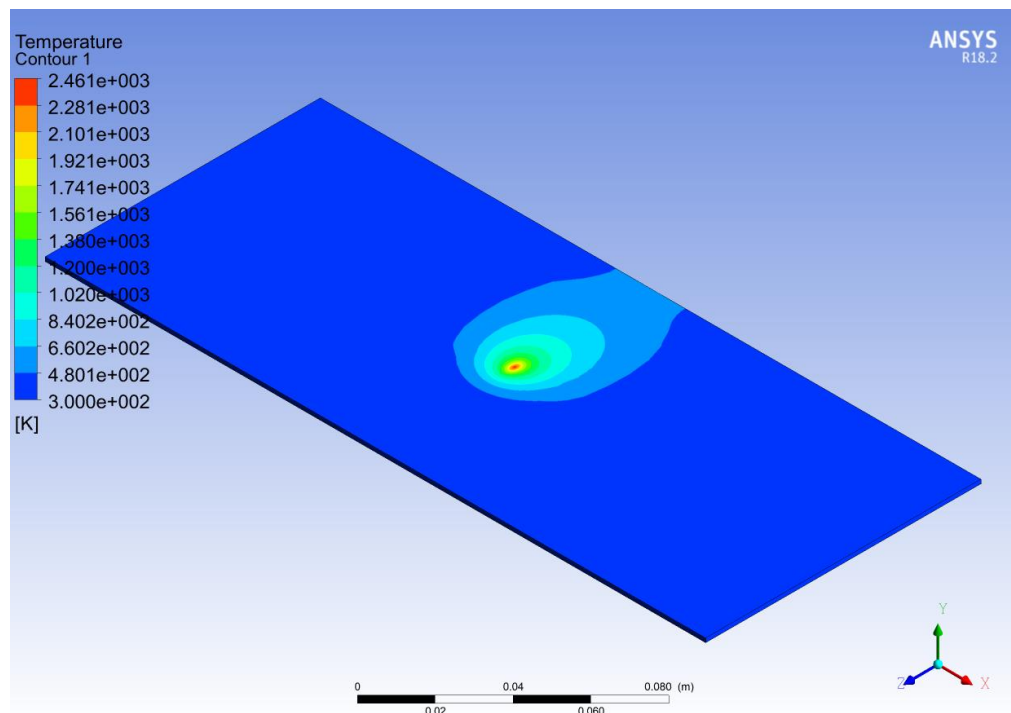
Fonte: (AUTOR)

Figura 18: Distribuição da temperatura sobre a placa com a passagem da fonte de calor computacional no t=41s



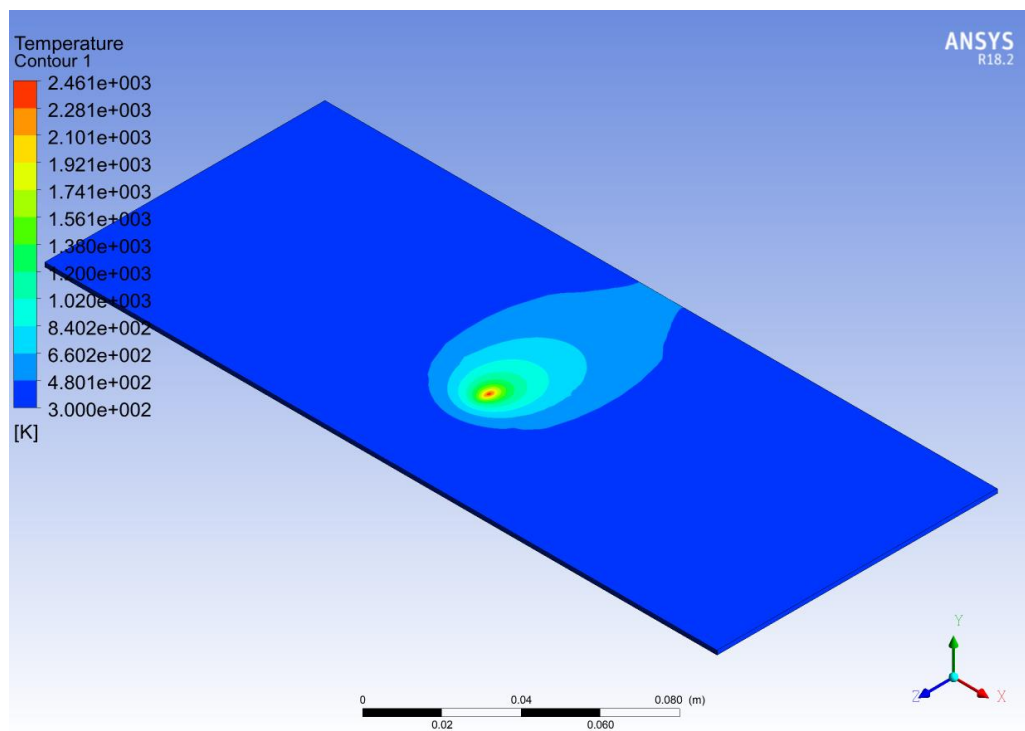
Fonte: (AUTOR)

Figura 19: Distribuição da temperatura sobre a placa com a passagem da fonte de calor computacional no $t=61s$



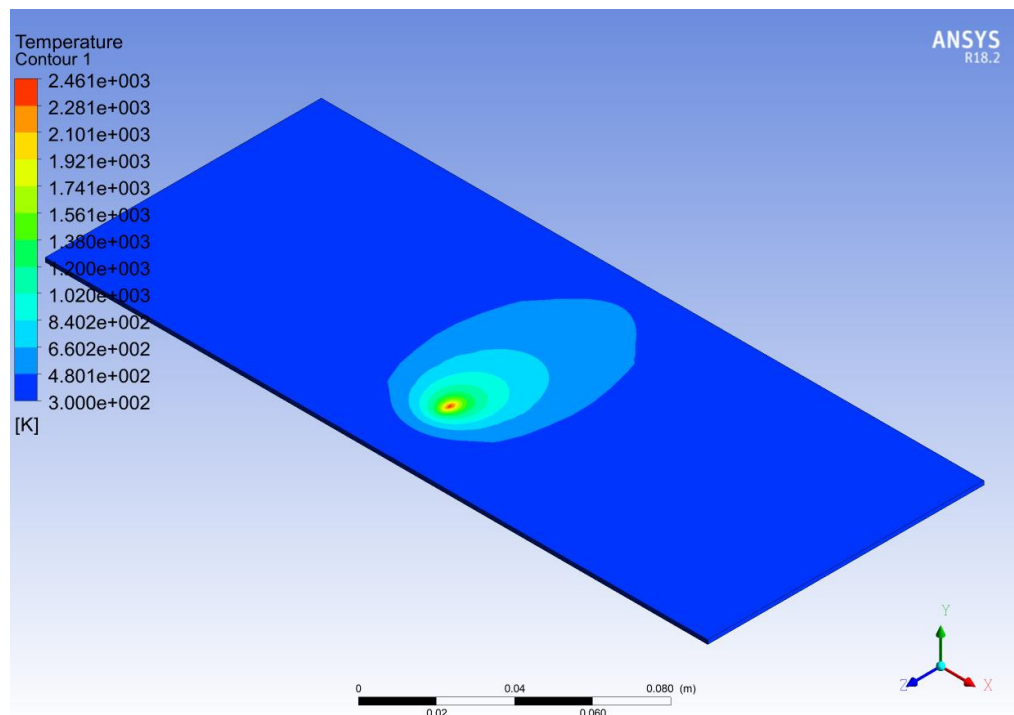
Fonte: (AUTOR)

Figura 20: Distribuição da temperatura sobre a placa com a passagem da fonte de calor computacional no $t=81s$



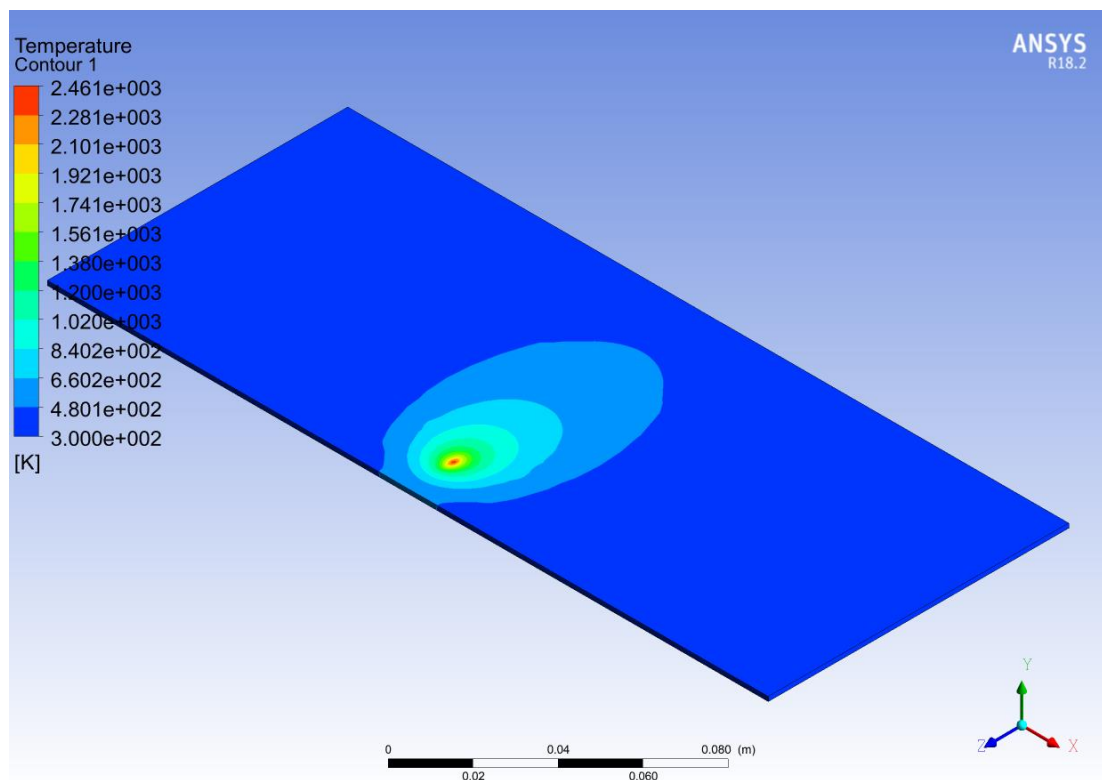
Fonte: (AUTOR)

Figura 21: Distribuição da temperatura sobre a placa com a passagem da fonte de calor computacional no $t=101s$



Fonte: (AUTOR)

Figura 22: Distribuição da temperatura sobre a placa com a passagem da fonte de calor computacional no $t=121s$

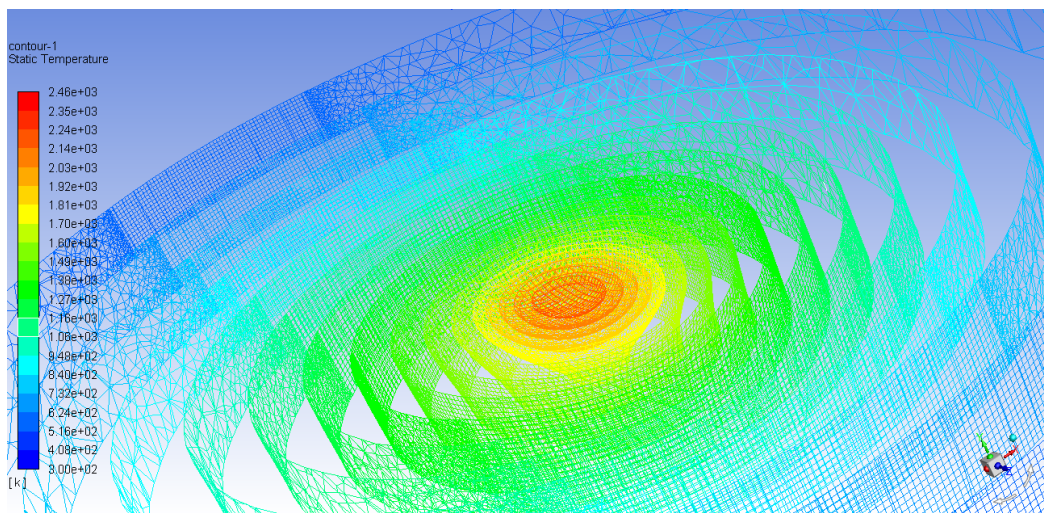


Fonte: (AUTOR)

A fusão do aço inoxidável AISI 304L, utilizado no problema, se dá aos 1700 K. Nota-se que o processo atingiu satisfatoriamente essa temperatura, obtendo um valor máximo de 2461 K. Esse valor se deu no centro da poça de fusão, como pode-se observar.

A Figura 23 abaixo representa melhor como ficou a fonte de calor computacional dentro da placa, representando também sua profundidade:

Figura 23: Fonte de calor aplicada ao corpo de prova



Fonte: (AUTOR)

Analisando a transferência de calor por condução, nota-se que inicialmente há uma diferença entre a temperatura superior e inferior da placa. Contudo, essa diferença se limita apenas às regiões mais próximas à poça de fusão, onde os gradientes de temperatura são muito elevados. Essa é uma importante constatação a ser realizada, pois, com essa informação, pode-se dizer que uma simulação em apenas duas dimensões obteria resultados satisfatórios com menos esforço computacional.

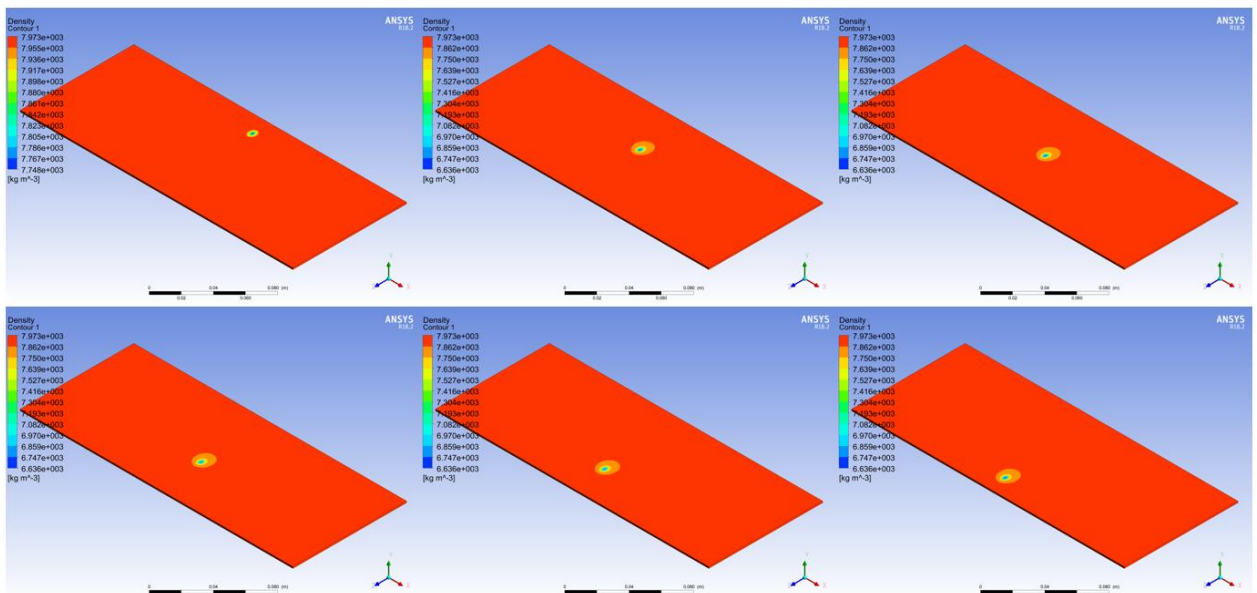
A comparação entre os resultados obtidos numericamente de Aissani et al. e os da simulação do presente trabalho divergem um pouco nos resultados. A temperatura máxima encontrada no outro trabalho foi de 2179 K, uma diferença de aproximadamente 300 K. Isso foi ocasionado devido aos diferentes modelos de fonte e ao diferente volume conferido à ela. A fonte do presente trabalho é volumétrica e encontrou seu melhor resultado com as dimensões de 2,3 mm de largura, 4.6 mm de comprimento e 0.1 mm de profundidade. Apesar da pequena espessura da fonte, notou-se uma grande variação na temperatura quando se alterava-a. Essa é a provável fonte de divergência entre os trabalhos, já que o outro utiliza uma fonte planar.

Por fim, pode-se observar que o deslocamento da fonte de calor foi executada com êxito, uma vez que se conseguiu simular o seu movimento em relação ao tempo de modo eficaz e constante, como é o propósito de tal processo.

5.2 ANÁLISE DA VARIAÇÃO DE DENSIDADE IMPLEMENTADA PELA UDF

Uma importante verificação a ser realizada é se as UDFs estão funcionando e alterando de modo eficaz as condições do programa. No caso, observou-se a UDF que alterava a propriedade da densidade fixa do material para fazer com que ela variasse com a temperatura (já que esse valor interfere no cálculo da condução térmica). Através do programa *CFD-Post* pode-se observar como a densidade variou na placa durante a passagem da fonte de calor, como apresentado na Figura 24 abaixo:

Figura 24: Variação da densidade do material do corpo de prova com a passagem da fonte de calor computacional



Fonte: (AUTOR)

Nota-se que a maior porção da placa não sofreu alteração na sua densidade. Porém, a fonte de calor, onde há os maiores gradientes de temperatura, apresentou uma grande variação. Quanto maior a temperatura, menor a densidade do aço. Isso ficou bem representado com o centro da poça de fusão na cor azul, indicando uma densidade de 6636 kg/m^3 , enquanto a parte vermelha manteve os 7973 kg/m^3 .

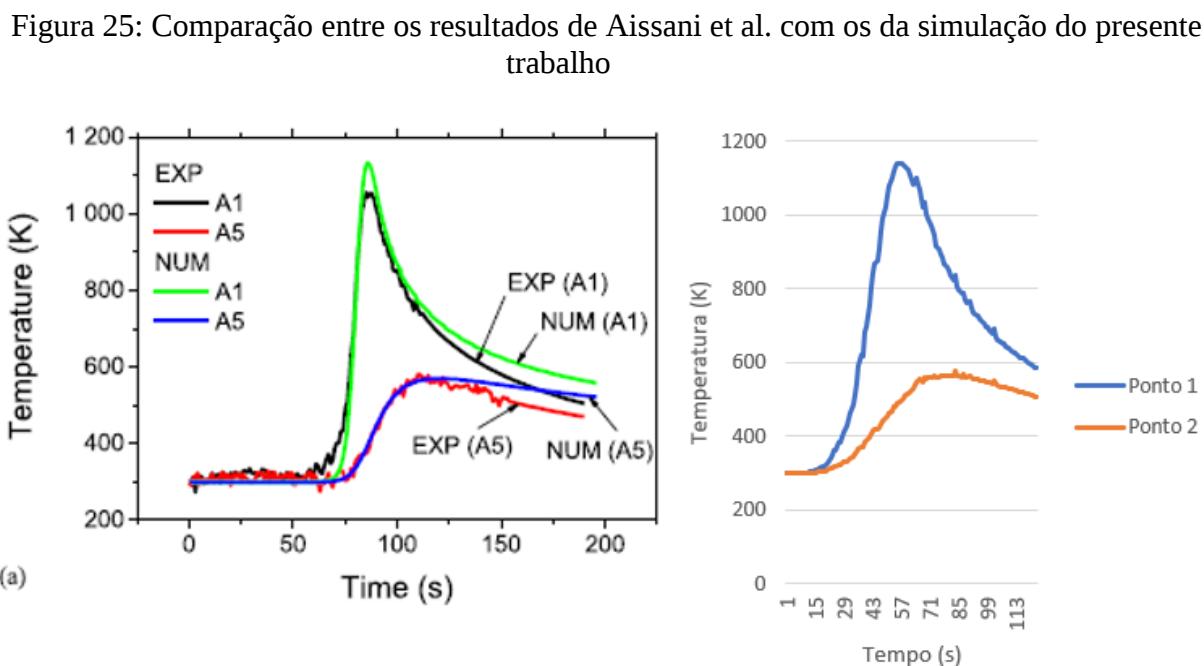
Portanto, pode-se concluir que a UDF funcionou corretamente, mostrando ainda as áreas onde o aporte térmico causou a mudança de fase e a baixa densidade na placa observada na simulação.

5.3 CICLOS TÉRMICOS PONTUAIS

Um dos principais resultados, se não o principal resultado da simulação computacional de soldagem é a obtenção dos ciclos térmicos de quaisquer pontos da placa, já que o processo de soldagem pode ser considerado também um processo de tratamento térmico devido às elevadas taxas de calor as quais a peça sofre.

Para isso foram-se comparados os ciclo térmicos obtidos computacionalmente e experimentalmente por Aissani (2015). Dois pontos foram analisados, um (ponto 1) na coordenada 5.5mm; 0mm; 30mm e outro (ponto 2) na coordenada 20.5mm; 0mm; 30mm do eixo de coordenadas definido anteriormente.

A Figura 25 abaixo mostra lado a lado os resultados obtidos por Aissani (2015) à esquerda e os resultados obtidos através deste trabalho à direita:



Fonte: (AUTOR)

A linha A1 e A5 do gráfico à esquerda são referentes aos pontos 1 e 2 do presente trabalho. O mesmo gráfico trás ainda o resultado experimental nas cores preto e vermelho e os resultados numéricos nas cores verde e azul.

Como se pode observar, os picos de temperatura do ponto mais próximo ao cordão de solda (A1 e Ponto 1) obtidos foram muito próximos, todos em torno de 1100 K. É importante dizer que o resultado experimental ainda obteve o menor pico de todos os gráficos. Isso pode ser ocasionado devido à inércia do sensor termopar utilizado no procedimento. Ainda assim, os resultados se mostraram satisfatórios quanto ao pico de temperatura.

A maior diferença a ser notada nos gráficos A1 e Ponto 1 é na área interna deles. A simulação do presente trabalho possui uma área maior, o que indica que uma maior quantidade de calor foi introduzida na peça. Apesar disso, pode-se dizer que o resultado foi próximo o bastante do resultado experimental.

Os outros pontos a serem analisados (A5 e Ponto 2) mostraram ainda mais semelhanças. Ambos obtiveram temperaturas máximas abaixo de 600 K e uma baixa variação após o pico. Isso se dá devido ao ponto está mais distante do cordão de solda e assim receber um menor gradiente de temperatura.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A elaboração da simulação computacional de soldagem possibilitou o estudo e a qualificação de se trabalhar com um software que utiliza a tecnologia dos volumes finitos, ANSYS *Fluent 18.2*, de modo a analisar os resultados de maneira crítica aos resultados obtidos experimentalmente.

Os dados da simulação convergiram satisfatoriamente, apesar de algumas diferenças nos gráficos da simulação computacional e experimental. Com isso, é possível utilizar os resultados numéricos para estudar o tratamento térmico sofrido por peças de aço inoxidável AISI 304L, no cordão de solda e principalmente na zona afetada termicamente.

A fonte elíptica se mostrou adequada para a simulação. A sua utilização é uma das possíveis soluções para o problema da simulação de soldagem TIG autógena, depois de encontrada suas melhores dimensões de penetração, comprimento e largura.

O software ANSYS *18.2*, apresentou-se como uma boa plataforma para a aplicação de tal simulação. Nele foram possíveis não só efetuar a simulação numérica em si no programa *Fluent 18.2*, como também foi possível efetuar a geração de malha e o pós-processamento.

7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

AISSANI, Mouloud et al. Three-dimensional simulation of 304L steel TIG welding process: Contribution of thermal flux. *Applied Thermal Engineering*, [s.l.], p.822-832, 03 jul. 2015.

ARAÚJO, Douglas Bezerra de et al. **Estudo de distorções em soldagem com uso de técnicas numéricas e de otimização**. Universidade Federal de Uberlândia, 2012. 240 p.

BEZERRA, A. C.; **Simulação numérica da soldagem com aplicação à caracterização do comportamento dinâmico de estruturas soldadas**. 2006. 232 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

CHOONG S. KIM. **Thermophysical Properties of Stainless Steels**. Illinois: National Technical Information Service, 1975.

DEPRADEUX, L.; **Simulation Numerique du Soudage – Acier 316L – Validation sur Cas Tests de Complexite Croissante**. 2004. Tese de Doutorado, Ecole Doctorale des Sciences de L’Ingenieur de Lyon, L’Institut National des Sciences Appliquees de Lyon.

DUPONT, J. N.; MARDER, A. R. **Thermal efficiency of arc welding processes**. *Welding Journal-Including Welding Research Supplement*, v. 74, n. 12, p. 406s, 1995.

Fisher, G. J., and Maciag, R. J., in **Handbook of Stainless Steels**, Eds. D. Peckner and I. M. Bernstein, McGraw-Hill, New York, 1977, p. 1

GOLDAK, A. J.; **Computational welding mechanics**. 1ed. Canada: Springer, 2005. 325p.

INCROPERA, F. P.; DAVID, P. D.; **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 6ed. São Paulo: LTC, 2008. 663p.

KOU, Sindo. **Welding metallurgy**. New York, 1987.

LIPPOLD, John C.; KOTECKI, Damian J.. **Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels**. Nova Jérĩa: John Wiley & Sons, 2005. 357 p.

MALISKA, C. R.; **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**, LTC, 2ª Edição, 2004. 453p.

MELO, R. L. F.; **Obtenção numérica e experimental do campo de temperatura na soldagem TIG do aço aisi 304**. 2016. 80 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2016.

MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo V.; SANTOS, Dagoberto B. **Introdução à metalurgia da soldagem**. Belo Horizonte: UFMG, 2012.

PRESTON, R., SMITH, S., SHERCLIFF, H., and WITHERS, P., 1999, **An Investigation into the Residual Stresses in an Aluminum 2024 Test Weld**. ASME PVP- Fracture, Fatigue and Weld Residual Stress, 393, pp. 265-277.

SANTOS, Caio Nepomuceno. **SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO CAMPO DE TEMPERATURA NA SOLDAGEM TIG DO ALUMÍNIO AA6061**. 2017. 50 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2017.

STENBACKA, Nils; CHOQUET, Isabelle; HURTIG, Kjell. **Review of arc efficiency values for gas tungsten arc welding**. In: IIW Commission IV-XII-SG212, Intermediate Meeting, BAM, Berlim, Alemanha, 18-20 Abril, 2012. p. 1-21.

STEPHEN, Roger. **Thermal modelling of steel welds**. 1996. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, University Of Canterbury, Christchurch, 1996.

VERSTEEG, H K; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method**. 2. ed. Essex: Pearson Education Limited, 2007.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; **Soldagem: Processos e metalurgia**. 4ed. São Paulo: Blucher LTDA, 2004. 506p.