

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

DOUGLAS SILVA MARQUES SERRATI

**ANÁLISE TÉRMICA VIA ELEMENTOS FINITOS DE SOLDAGEM  
MULTIPASSES**

UBERLÂNDIA

2019

DOUGLAS SILVA MARQUES SERRATI

**ANÁLISE TÉRMICA VIA ELEMENTOS FINITOS DE SOLDAGEM  
MULTIPASSES**

**Projeto de Conclusão de Curso**  
apresentado ao Curso de Graduação em  
Engenharia Mecânica da Universidade  
Federal de Uberlândia, como parte dos  
requisitos para a obtenção do título de  
**BACHAREL em ENGENHARIA  
MECÂNICA.**

Orientador: Prof. Dr. Douglas Bezerra  
Araújo

UBERLÂNDIA

2019

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família, por ter incentivado e apoiado antes e durante a graduação, colaborando com minha formação profissional.

Ao meu orientador, professor Douglas Bezerra de Araújo pelo compartilhamento de seus conhecimentos, serenidade, confiança e amizade.

Ao LAPROSOLDA UFU pelo suporte técnico e laboratorial;

Aos engenheiros do LAPROSOLDA UFU - Amanda Figueira Tavares, Lucas Alves do Nascimento e Diandro Bailoni Fernandes - pelas discussões sobre os parâmetros do projeto e suas soluções.

E a todos aqueles que contribuíram com minha formação acadêmica.

SERRATI, D. S. M. **Análise Térmica via Elementos Finitos de Soldagem Multipasses**. 2019. Projeto de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.

## RESUMO

As tensões residuais geradas durante o processo de soldagem provocam distorções que são foco de atenção da indústria. Esse problema é uma causa direta do ciclo térmico causado por uma intensa e localizada fonte de calor para a fusão do material, que ocasiona expansões e contrações não homogêneas entre o cordão de solda e o material de base. Ter o conhecimento desses efeitos provocados pelos ciclos térmicos garante vantagem no seu desenvolvimento e execução.

Nesse trabalho é desenvolvida a análise computacional térmica de soldagem multipasses do aço naval ASTM A131, utilizando fonte de calor gaussiana e o método *birth and death* para representar a deposição de material. Para isso, obtêm-se, a partir da análise térmica, resultados referentes à distribuição de temperatura em qualquer momento do processo e o ciclo térmico.

**Palavras-chave:** Soldagem, Elementos finitos, Simulação.

SERRATI, D. S. M. **Thermal Analysis of Multipass Welding via Finite Elements**. 2019. Graduation Project, Federal University of Uberlandia, Uberlandia, Brazil.

## **ABSTRACT**

The residual stresses generated during the welding process cause distortions that are focus of industry attention. This problem is a direct cause of the thermal cycle caused by an intense and localized heat source for material melting, which causes inhomogeneous expansions and contractions between the weld bead and the base material. Being aware of these effects caused by thermal cycles guarantees an advantage in their development and execution.

In this work is developed the computational thermal analysis of multipass welding of ASTM A131 marine steel, using Gaussian heat source and the birth and death method to represent the deposition of material. For this, results are obtained from the thermal analysis regarding the temperature distribution at any moment of the process and the thermal cycle.

**Keywords:** Welding, Finite element, Simulation.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1: Esquema do processo de soldagem GTAW (a) e SMAW (b)
- Figura 2.2: Modelo para cálculo do coeficiente convectivo de troca de calor
- Figura 2.3: Fonte de calor pontual (a), em linha (b) e plano (c)
- Figura 2.4: Fonte de calor gaussiana
- Figura 2.5: Fonte de calor dupla elipsoide
- Figura 2.6: Distribuição de tensões residuais
- Figura 2.7: Distorção angular
- Figura 2.8: Distorção transversal
- Figura 2.9: Distorção longitudinal
- Figura 2.10: Distorção por flambagem
- Figura 3.1: Modelo geométrico da chapa (esquerda) e disposição dos cordões de solda (direita)
- Figura 3.2: Dimensões das chapas em milímetros
- Figura 3.3: Modelo geométrico para simulação computacional
- Figura 3.4: Sequência de soldagem
- Figura 3.5: Malha da chapa
- Figura 3.6: Malha dos cordões de solda e vizinhanças
- Figura 3.7: Massa específica, condutividade térmica e calor específico
- Figura 4.1: Elemento SOLID70
- Figura 4.2: Elemento SOLID152
- Figura 4.3: Distribuição de energia da fonte gaussiana
- Figura 4.4: Distribuição de temperatura na metade do cordão de solda (esquerda) e no fim (direita)
- Figura 4.5: Termopares e ciclo térmico durante a soldagem do cordão de solda raiz
- Figura 4.6: Termopares e ciclo térmico durante a soldagem do oitavo cordão de solda
- Figura A.1: ciclo térmico durante a soldagem do cordão de solda raiz
- Figura A.2: ciclo térmico durante a soldagem do *hot pass*
- Figura A.3: Ciclo térmico durante a soldagem do terceiro cordão de solda
- Figura A.4: Ciclo térmico durante a soldagem do quarto cordão de solda

Figura A.5: Ciclo térmico durante a soldagem do quinto cordão de solda

Figura A.6: Ciclo térmico durante a soldagem do sexto cordão de solda

Figura A.7: Ciclo térmico durante a soldagem do sétimo cordão de solda

Figura A.8: Ciclo térmico durante a soldagem do oitavo cordão de solda

Figura A.9: Ciclo térmico durante a soldagem do nono cordão de solda

Figura A.10: Ciclo térmico durante a soldagem do décimo cordão de solda

Figura A.11: Ciclo térmico durante a soldagem do décimo cordão de solda

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Emissividade do aço ASTM A131 em relação à temperatura

Tabela 3.1: Parâmetros de soldagem

Tabela 4.1: Propriedades térmicas do aço ASTM A131

Tabela 4.2: Temperatura máxima da chapa antes de iniciar o próximo cordão de solda

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras gregas

$\Delta T$	Diferença de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )
$\varepsilon$	Emissividade
$\eta$	Eficiência térmica
$\lambda$	Condutividade térmica ( $\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ )
$\rho$	Massa específica ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann igual a $5,67 \cdot 10^{-8}$ ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$ )
$\sigma_g$	Abertura da fonte de calor (m)

### Letras romanas

As	Área superficial ( $\text{m}^2$ )
ASTM	American Society for Testing and Materials
C	Comprimento (m)
c	Calor específico ( $\text{J}/\text{Kg}^{\circ}\text{C}$ )
dAs	Diferencial da área superficial
EPS	Especificação do Procedimento de Soldagem
GTAW	Soldagem a arco com eletrodo de tungstênio e proteção gasosa
h	Coefficiente convectivo de troca de calor local ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ )
$\bar{h}$	Coefficiente convectivo de troca de calor médio ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ )
H	Geração de calor interna ( $\text{W}/\text{m}^3$ )
I	Corrente (A)
L	Largura da chapa (m)
Q	Potência (W)
$Q''_{\text{cond}}$	Fluxo de calor por condução ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
$Q''_{\text{conv}}$	Fluxo de calor por convecção ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
$Q_G$	Potência aplicada pela fonte gaussiana (W)
$Q_N$	Potência normalizada (W)
$Q''_{\text{rad}}$	Fluxo de calor por radiação ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
SMAW	Soldagem a arco por eletrodo revestido

t	Tempo (s)
T	Temperatura (°C)
$T_{\infty}$	Temperatura ambiente (°C)
$T_s$	Temperatura da superfície (°C)
$T_{viz}$	Temperatura da vizinhança (°C)
U	Tensão (V)
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
$V_s$	Velocidade de soldagem (mm/min)
X	Coordenada do eixo x da fonte de calor (m)
Y	Coordenada do eixo y da fonte de calor (m)

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>01</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>03</b>
2.1. Processo de soldagem.....	03
2.2. Transferência de calor.....	04
2.2.1. Condução.....	04
2.2.2. Convecção.....	05
2.2.3. Radiação.....	07
2.3. Energia de soldagem.....	08
2.4. Fonte de calor.....	08
2.5. Propriedades do material.....	10
2.6. Tensão residual.....	10
2.7. Distorções.....	12
2.7.1. Distorção angular.....	12
2.7.2. Distorção transversal.....	13
2.7.3. Distorção longitudinal.....	13
2.7.4. Distorção por flambagem.....	14
<b>3. METODOLOGIA.....</b>	<b>15</b>
3.1. Especificação do Procedimento de Soldagem.....	15
3.2. Modelo computacional.....	16
3.2.1. Dimensionamento.....	16
3.2.2. Malha.....	18
3.3. Propriedades do material.....	19
<b>4. ANÁLISE TÉRMICA.....</b>	<b>21</b>
4.1. Modelagem térmica.....	21
4.1.1. Elementos térmicos.....	21
4.1.2. Imposição de calor.....	22
4.1.3. Distribuição de calor.....	23
4.1.4. Propriedades térmicas.....	24
4.2. Avaliação térmica.....	25
4.2.1. Temperatura interpasses.....	27
4.2.2. Ciclo térmico.....	28

<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>31</b>
<b>6. TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>33</b>
<b>7. REFERÊNCIAS.....</b>	<b>34</b>
<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>37</b>

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

Haja vista que as simulações computacionais permitem prever situações semelhantes às reais, essas aprimoram o desenvolvimento de um projeto, reduzindo tempo de execução e aumentando a sua confiabilidade. Na soldagem, ter condições de prever tensões residuais e distorções no material, permite preparar condições de trabalho que favoreçam ao melhor resultado possível. Essas complicações surgem devido à alta quantidade de energia aplicada em uma pequena área. Desse modo, a geometria original da peça soldada pode ser afetada e até mesmo apresentar falhas estruturais. Com a necessidade de compreender melhor esses fenômenos, se faz cada vez mais presentes métodos computacionais, pois esses veem sendo constantemente inovados.

A análise térmica computacional é almejada, pois carrega consigo a credibilidade que passa aos dados encontrados caso esses estejam em conformidade com os parâmetros encontrados computacionalmente. Para tanto, essa análise objetiva definir e viabilizar a verificação da distribuição de temperatura e ciclos térmicos em qualquer momento do processo, seja esse durante a soldagem ou resfriamento de qualquer cordão de solda e em qualquer ponto do modelo.

Esse trabalho desenvolve-se, por completo, de forma computacional. Pois é referente à parte inicial de um projeto e seus resultados serão utilizados durante a sua realização. O foco deste trabalho está em desenvolver uma análise térmica da soldagem multipasses de chapas com chanfro em V, a partir de métodos de elementos finitos. Com base na análise computacional, obtêm-se dados que possibilitam o estudo sobre distribuição de temperatura e ciclos térmicos. Posteriormente, em um trabalho futuro, deverá ser desenvolvida a análise estrutural para obter informações sobre tensões residuais e distorções.

Para tanto, o trabalho baseia-se na Especificação do Procedimento de Soldagem (EPS) fornecida pelo laboratório para abordar a simulação térmica. Esta descreve uma fonte de calor se movendo ao longo do cordão de solda com deposição de material realizada pelo método *element birth and death*, em que se obtêm os campos de temperaturas dos ciclos térmicos em todo o material durante todo o processo de soldagem e resfriamento.

# CAPÍTULO II

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Processo de soldagem

São utilizados neste trabalho, dois processos de soldagem. A soldagem a arco por eletrodo revestido (SMAW) e a soldagem a arco com eletrodo de tungstênio e proteção gasosa (GTAW).

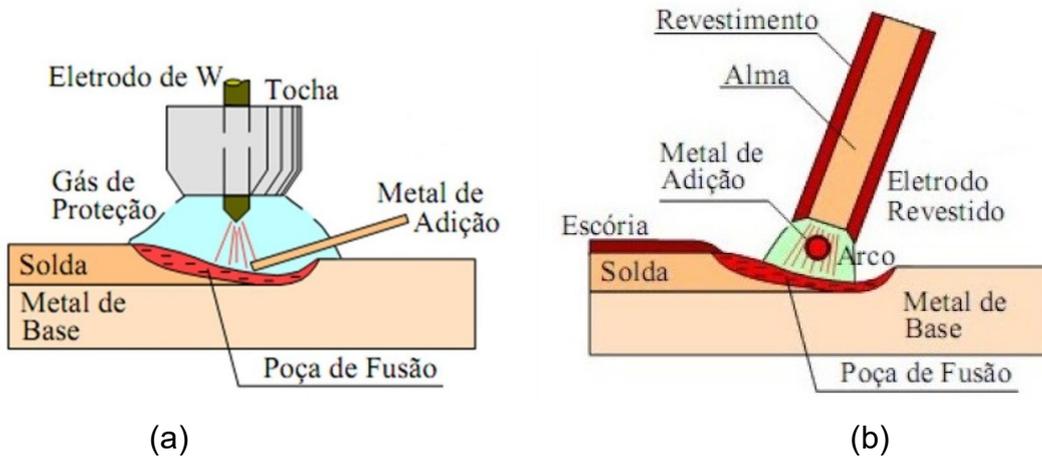
Os dois primeiros cordões de solda, raiz e *hot pass*, são realizados pelo método GTAW. Conforme Modenesi *et al.* (2005) esse é um processo no qual a união de peças metálicas é produzida pelo aquecimento e fusão destas através de um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de tungstênio e o metal base. O gás inerte ou a mistura de gases inertes age como proteção da poça de fusão e do arco do meio externo. A soldagem pode ou não ser feita com o acréscimo de metal de adição. O esquema é mostrado na Figura 2.1 (a).

Já os demais cordões de solda são realizados pelo processo de soldagem SMAW. Segundo Modenesi *et al.* (2005) esse método produz a coalescência entre metais pelo aquecimento destes com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico revestido e a peça que está sendo soldada. O eletrodo revestido consiste de uma vareta metálica, chamada “alma”, que conduz a corrente elétrica e fornece metal de adição para enchimento da junta. A proteção da poça de fusão, dentre outras funções, é realizada pelo revestimento do eletrodo. Esse processo é esquematizado na Figura 2.1 (b).

De acordo com Dupont e Marter (1995) além da energia que durante a soldagem é direcionada para a fusão, também há dissipação ao longo do metal base e arco elétrico. Além de existir perdas por efeito joule no eletrodo e para o ambiente. Então, a eficiência de fusão é a razão entre a energia de fusão e a energia total admitida pela chapa (energia de fusão mais a energia dissipada pelo metal base).

Portanto, foi verificado por Modenesi *et al.* (2005) que a eficiência do processo GTAW, com corrente contínua (CC-), está entre 50% e 80%. Já a soldagem por SMAW possui rendimento entre 70% e 90%.

Figura 2.1: Esquema dos processos de soldagem GTAW (a) e SMAW (b)



Fonte: Modenesi *et al.* (2005)

## 2.2. Transferência de calor

Os subtópicos desse tópico discutirão sobre as transferências de calor por condução, convecção e radiação.

### 2.2.1. Condução

Devido a uma diferença de temperatura no material que nesse estudo é provocada pela imposição de uma fonte de calor em uma pequena área durante a soldagem, ocorrerá a troca de calor entre as partículas mais energéticas para as menos energéticas, de acordo com Çengel *et al.* (2006). Essa troca de calor é calculada ao longo da seção transversal do cordão de solda conforme Equação 2.1.

$$Q''_{cond} = \lambda * \frac{\Delta T}{L} \quad (2.1)$$

Onde:

$Q''_{cond}$  – fluxo de calor por condução ( $W/m^2$ );

$\lambda$  – Condutividade térmica (W/m°C);

$\Delta T$  – diferença entre as temperaturas das extremidades da chapa (°C);

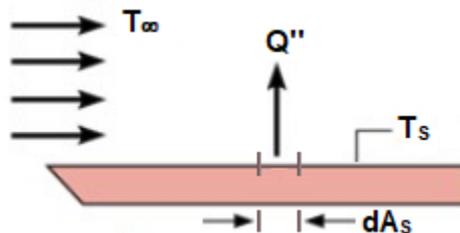
L – largura da chapa. (m).

### 2.2.2. Convecção

Conforme Incropera *et al.* (2008) a transferência de calor por convecção ocorre entre uma superfície e um fluido através da advecção e da difusão. A advecção, ou movimentação macroscópica do fluido, faz com que haja a transferência de energia devido ao deslocamento de grande quantidade de moléculas, associado ao gradiente de temperatura. Além disso, a difusão, que se refere à movimentação molecular aleatória, faz com que a transferência total de calor seja devida a sua superposição à movimentação macroscópica.

É possível definir o valor do coeficiente convectivo, local e médio, de troca de calor a partir do modelo de uma placa plana. Conforme esquematização da Figura 2.2.

Figura 2.2: Modelo para cálculo do coeficiente convectivo de troca de calor



Fonte: Adaptado de Incropera (2008)

A potência imposta sobre as duas chapas durante a soldagem é expressa conforme a Equação 2.2.

$$Q = I * U * \eta = \int_{-A_s}^{A_s} Q''_{conv} dA_s \quad (2.2)$$

Onde:

Q – Potência (W);

I – corrente utilizada na soldagem (A);

$U$  – tensão usada no processo (V);  
 $\eta$  – eficiência térmica do processo de soldagem;  
 $A_s$  – Área superficial de uma chapa ( $m^2$ );  
 $Q''_{conv}$  – fluxo de calor por convecção ( $W/m^2$ );  
 $dA_s$  – diferencial da área superficial.

Ao integrar a área superficial, obtém-se a área da superfície das duas chapas que é igual ao dobro do produto do comprimento (C) e largura (L). Além disso, conhece-se o fluxo de calor expresso pela Equação 2.3.

$$Q''_{conv} = h * (T_{\infty} - T_s) = h * \Delta T \quad (2.3)$$

Onde:

$h$  – coeficiente convectivo de troca de calor ( $W/m^2K$ );  
 $T_{\infty}$  – temperatura ambiente ( $^{\circ}C$ );  
 $T_s$  – temperatura da superfície da chapa ( $^{\circ}C$ ).

A partir desses resultados é possível definir o coeficiente convectivo local de troca de calor, substituindo o resultado da integral da área superficial e a Equação 2.3 na Equação 2.2.

$$h = \frac{I * U * \eta}{2 * L * C * (T_s - T_{\infty})} = \frac{Q}{2 * A_s * \Delta T} \quad (2.4)$$

Logo, para o cálculo do coeficiente convectivo médio ( $\bar{h}$ ), substitui-se a Equação 2.3 em 2.2, conforme descrito abaixo nas Equações 2.5 e 2.6.

$$h * \Delta T \int_{-A_s}^{A_s} dA_s = \bar{h} * \Delta T * 2 * A_s \quad (2.5)$$

$$\bar{h} = \frac{h}{2 * A_s} \int_{-A_s}^{A_s} dA_s \quad (2.6)$$

Nas análises que serão realizadas, faz-se o uso do coeficiente convectivo médio de troca de calor. Para esse caso de placas planas, os

coeficientes são iguais, quando se considera as placas como um todo conforme é mostrado na Equação 2.6.

### 2.2.3. Radiação

Segundo Incropera *et al.* (2008) a radiação é uma forma de transferência de energia que se realiza por ondas eletromagnéticas a partir de superfícies que não estão em contato e sem a necessidade de um meio natural entre elas. Para isso, além da diferença de temperatura entre as superfícies, a emissividade é um parâmetro importante para quantificar a transferência de calor. Emissividade é uma medida da eficiência na qual um material emite energia em relação a uma superfície de um corpo negro.

Logo, a quantificação da transferência de calor, está expressa na Equação 2.7.

$$Q''_{rad} = \varepsilon * \sigma * (T_s^4 - T_{viz}^4) \quad (2.7)$$

Onde:

$\varepsilon$  – emissividade;

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

$T_s$  – temperatura da superfície em análise (°C);

$T_{viz}$  – temperatura da vizinhança (°C).

De acordo com as medições realizadas por Öhman (1999), a emissividade depende do material, seu acabamento superficial e temperatura. A partir das medições realizadas por Touloukian e Dewitt (1970), com variação da temperatura para o aço naval ASTM A131, obtém-se a Tabela abaixo.

Tabela 2.1: Emissividade do aço ASTM A131 em relação à temperatura

T (°C)	E
799	0,780
827	0,855
849	0,870

Fonte: Adaptado de Touloukian e Dewitt (1970)

### 2.3. Energia de soldagem

Araújo (2012) afirma que o aporte de calor colabora com a junção dos materiais determinando o volume da poça de fusão, solidificação e a distribuição do calor. Portanto, esse parâmetro é responsável por definir o calor imposto, e esse determina a taxa de aquecimento e resfriamento. Além disso, distorções, tensões residuais e mudanças nas propriedades mecânicas estão diretamente ligadas à intensidade do calor imposto.

Essa energia é calculada a partir da potência e velocidade de soldagem ( $V_s$ ), conforme Equação 2.8.

$$E = \frac{Q}{V_s} \text{ (J/mm)} \quad (2.8)$$

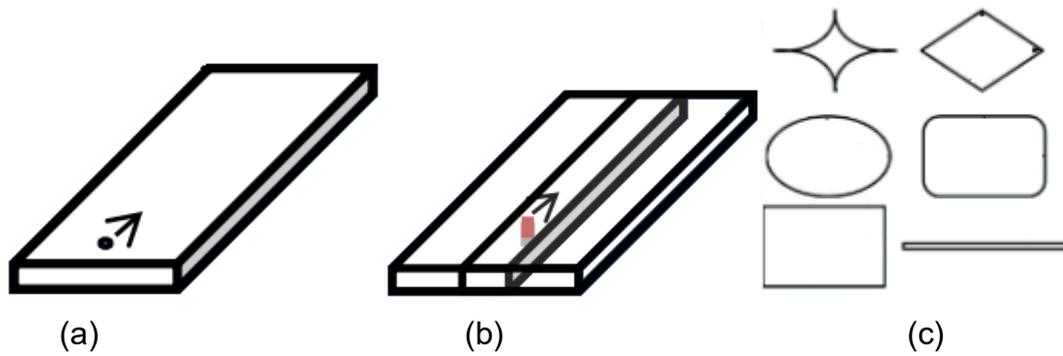
### 2.4. Fonte de calor

A fonte de calor descreve a forma com que a energia imposta sobre a chapa será distribuída.

A teoria básica de fluxo de calor desenvolvida por Fourier e aplicada como fonte de calor móvel por Rosenthal (1941) é uma das formas básicas de se expressar a distribuição de temperatura ao longo do tempo durante a soldagem. Porém, autores como Myers, Uyehara e Borman (1967) demonstram que análises concebidas a partir dos modelos de Rosenthal (que assumem formas de ponto, linha ou plano) apresentam discrepâncias na distribuição de temperaturas no cordão de solda e suas proximidades quando comparados com valores experimentais. Essas propostas para fonte de calor são mostradas na Figura 2.3 a seguir. As fontes de calor planas foram abordadas de forma mais abrangente por Akbari e Sattari-Far (2009).

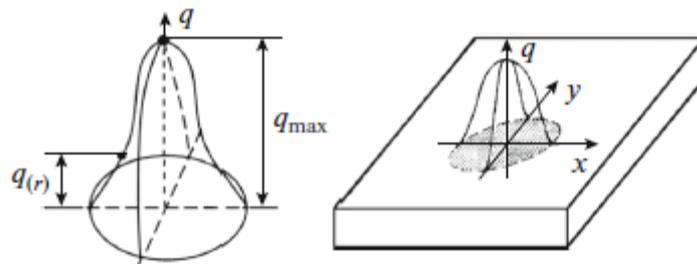
Com o intuito de superar a carência de prever a distribuição de temperatura no arco elétrico, Pavelic *et al.* (1969) sugerem que o fluxo de calor deve assumir a forma de um “disco” resultante de uma distribuição gaussiana, conforme Figura 2.4. Este modelo foi melhorado por Friedman (1978) e Kurtz e Segerlind (1978) que consideram a fonte gaussiana de calor expressa em coordenadas cartesianas e que se move ao longo do cordão de solda.

Figura 2.3: Fonte de calor pontual (a), em linha (b) e plano (c)



Fonte: Adaptado de Araújo (2012)

Figura 2.4: Fonte de calor gaussiana

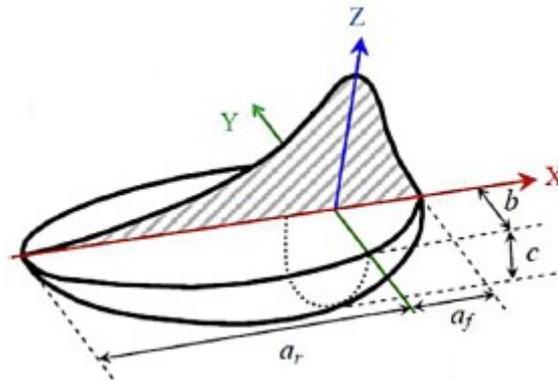


Fonte: Adaptado de Dhekordi, Anaraki e Pourkamali (2019)

Abordagem como a fonte de calor elipsoidal, segundo Goldak *et al.* (1984), apresenta diferenças com os resultados obtidos experimentalmente. O gradiente de temperatura a frente da fonte não é tão grande quanto o esperado, e a diferença de temperatura na borda da poça de fusão é menor. Como uma medida corretiva, Goldak *et al.* (1984), propuseram adotar uma forma de duplo elipsoide, onde a parte frontal corresponde ao quadrante de uma elipse e a parte traseira ao quadrante de outra elipse. Esse modelo é mostrado na Figura 2.5.

Com o avanço das ferramentas computacionais, vários modelos de distribuição de calor são desenvolvidos com o intuito de satisfazer uma determinada condição ou processo de soldagem. Como, por exemplo, a forma de duplo-elipsoide com fonte de calor cilíndrica adaptada por Wu, Hu e Gao (2009) para um processo de soldagem a plasma. Há também a adaptação de uma fonte gaussiana com fonte de calor cônica para soldagem a laser citada por Zain-UI-Abdein (2009).

Figura 2.5: Fonte de calor dupla elipsoide



Fonte: Adaptado de Fu *et al.* (2016)

## 2.5. Propriedades dos materiais

A forma com que o material comportará em relação ao ciclo térmico a que será submetido na soldagem é pautado pelas suas propriedades.

Os elementos utilizados para a análise térmica computacional admitem as seguintes propriedades:

- Massa específica: é a forma com que a massa do material está distribuída no volume que ocupa.
- Condutividade térmica: quantifica a habilidade de conduzir calor através do material. Quanto maior a condutividade, mais rápida será a condução da energia térmica.
- Calor específico: equivale à quantidade de calor necessária para a elevação da temperatura em 1°C de cada grama do material.

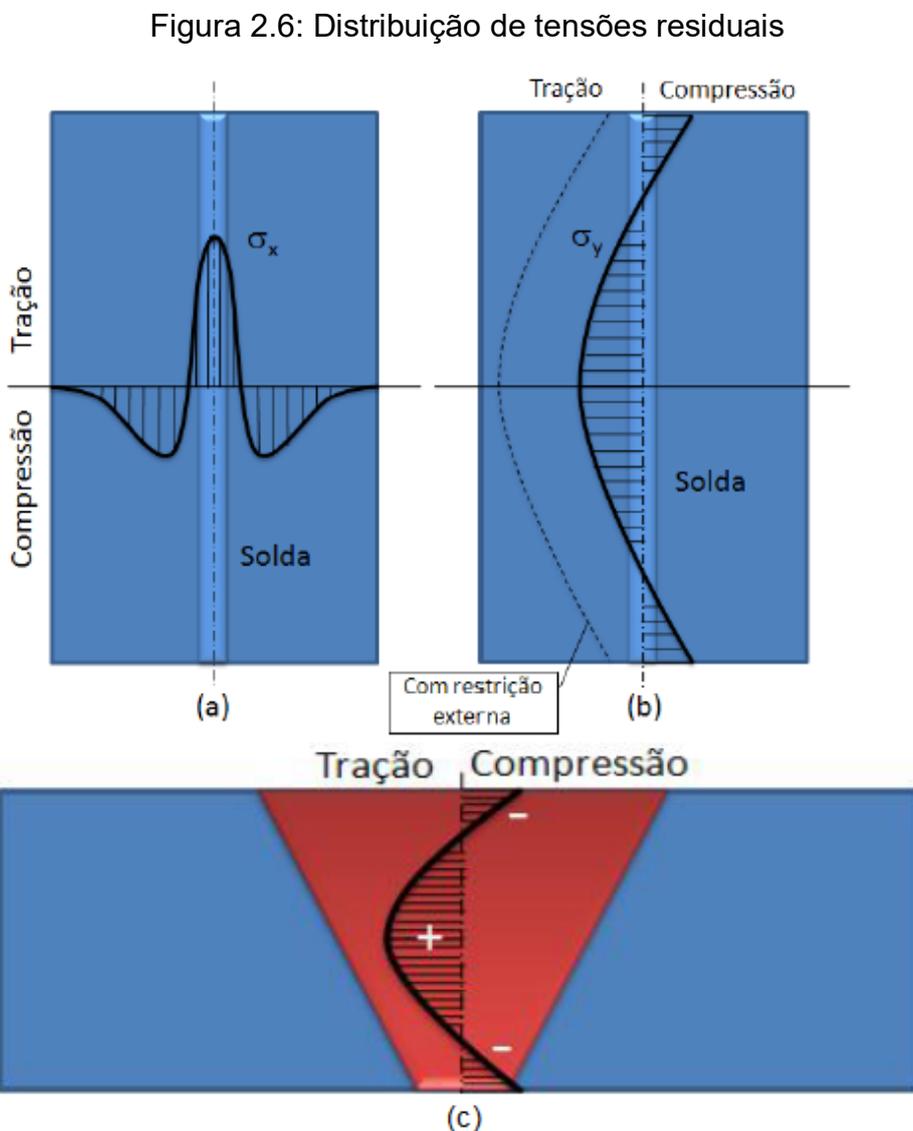
## 2.6. Tensão residual

De acordo com Radaj (2003) e Ribeiro (2006), as tensões residuais são provenientes de processos de fabricação e, principalmente, dos procedimentos de soldagem. São tensões que permanecem no material sem que haja aplicação de carga ou ciclos térmicos.

Para Amoros (2008) as tensões residuais na soldagem são provenientes de regiões plastificadas durante o processo e contrações e expansões do material devido à distribuição de temperatura não uniforme.

Conforme Radaj (2003) tensões residuais e as distorções que ela provoca prejudicam a eficiência do processo e caracterizam diminuição da qualidade do produto final.

A distribuição não uniforme de temperatura provoca dilatação e compressão não uniformes ao longo do metal base. Isso promove o surgimento de tensões residuais que podem estar dispostas de forma transversal, longitudinal e transversal normal ao plano da chapa. A disposição das tensões residuais são mostradas na Figura 2.6.



Fonte: Adaptado de Araújo (2012)

- Tensão residual longitudinal (a): está disposta de forma que atinge valor máximo de tração no cordão de solda e é responsável pelas distorções longitudinais.
- Tensão residual transversal (b): ordenada de forma a apresentar valores máximos de compressão nas extremidades do cordão de solda, é responsável pelas distorções transversais.
- Tensão residual transversal normal ao plano da chapa (c): ocorre ao longo da vista frontal do cordão de solda e apresenta valores máximos de compressão nos extremos. É responsável pela distorção angular.

## **2.7. Distorções**

Quando a tensão residual presente em um material ultrapassa o limite de escoamento, há o surgimento de distorções, que são provocadas por expansões e contrações não lineares no metal.

Distorções mudam a forma do componente após a soldagem e podem ser classificadas como distorções angular, transversal, longitudinal e por flambagem.

Esses tipos de distorções são abordados nos tópicos seguintes conforme estudos de Boothy (2014) e Kalyankar e Shah (2018).

### **2.7.1. Distorção angular**

O aquecimento e resfriamento não uniforme do metal base leva a curvatura transversal perpendicular ao cordão de solda e ao longo da espessura. Na soldagem de juntas em T, essa distorção provoca erros de perpendicularidade, conforme Figura 2.7.

Para eliminar essa distorção, o mais comum é utilizar meios de fixação, como grampos, para evitar que a chapa deforme. Mas existem outros métodos menos eficientes como, dependendo do chanfro utilizado, pré-curvar a chapa para que após a soldagem esteja na posição correta, ou no caso de juntas em X soldar de forma alternada a parte superior e inferior do chanfro.

Figura 2.7: Distorção angular



Fonte: Adaptado de Boothy (2014)

### 2.7.2. Distorção transversal

As distorções transversais são provenientes da contração perpendicular à direção de soldagem e é responsável por produzir alta tensão residual e propagação de trincas no caso de juntas muito restringidas conforme Figura 2.8. A tendência é de que haja redução da largura das chapas devido a essa contração.

As distorções transversais podem ser reduzidas fazendo o ponteamento de solda nas extremidades e no centro do comprimento a ser soldado.

Figura 2.8: Distorção transversal



Fonte: Adaptado de Boothy (2014)

### 2.7.3. Distorção longitudinal

As contrações longitudinais são aquelas que ocorrem na direção de soldagem e atingem valores maiores no cordão de solda exemplificada na Figura 2.9. A principal causa é a presença de excesso de material depositado durante a soldagem. No resfriamento, a contração puxa o cordão de solda, de forma que no início e no final do cordão de solda a distorção é maior, porque nessas regiões não há material adjacente.

Para evitar distorções desse tipo, pode-se curvar a chapa de forma a criar convexidade na junta, além de garantir que apenas a quantidade necessária de material será depositada.

Figura 2.9: Distorção longitudinal



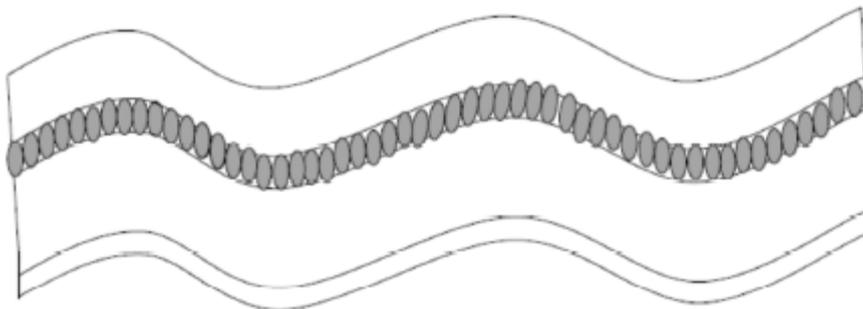
Fonte: Adaptado de Boothy (2014)

#### 2.7.4. Distorção por flambagem

A combinação das distorções longitudinal, transversal e angular resulta na distorção por flambagem esquematizada na Figura 2.10. É gerada a partir da indução de tensões residuais nas chapas.

Pode ser controlada a partir de processos de aquecimento do metal base.

Figura 2.10: Distorção por flambagem



Fonte: Adaptado de Boothy (2014)

# CAPÍTULO III

## METODOLOGIA

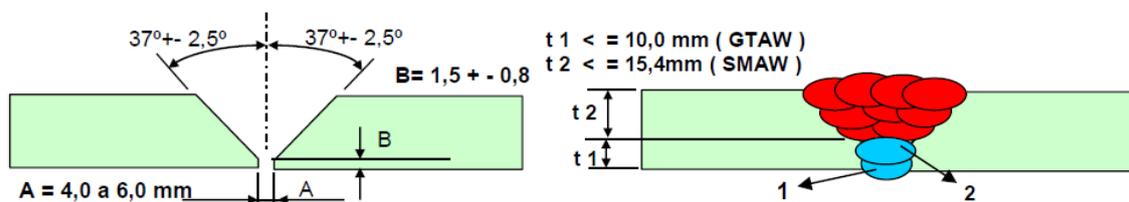
Essa seção aborda o procedimento adotado para o desenvolvimento computacional desse trabalho que faz parte de um projeto em andamento no Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem na UFU.

### 3.1. Especificação do Procedimento de Soldagem

A especificação do procedimento de soldagem tem a função de citar os parâmetros de soldagem qualificados para determinada junta. Assim, a EPS, garante a qualidade e a possibilidade de se comparar resultados obtidos através de testes padronizados. Para atingir esses objetivos, este documento contém detalhadamente as diretrizes para a realização do processo.

Para esse projeto é utilizada uma chapa de aço naval ASTM A131 com uma polegada de espessura cuja EPS determina 11 cordões de solda. Desses, os cordões de solda raiz e *hot pass* são realizados pelo processo GTAW, enquanto que os demais, enchimento e acabamento, são realizados pelo processo SMAW. Esses requisitos estão esquematizados na Figura 3.1.

Figura 3.1: Modelo geométrico da chapa (esquerda) e disposição dos cordões de solda (direita)



Fonte: Especificação do Procedimento de Soldagem (2003)

Para a soldagem são informados a corrente, tensão e velocidade de soldagem. É a partir desses três parâmetros que se define a energia de

soldagem imposta, como informado anteriormente. Na Tabela 3.1 encontram-se os valores adotados da EPS para a simulação levando em consideração a eficiência térmica de 70% para ambos os processos.

Tabela 3.1: Parâmetros de soldagem da EPS

Passe	Processo	Temperatura interpasse	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade (mm/min)	Energia (kJ/mm)
Raiz	GTAW	Min, 25°C Max, 250°C	180	22	292	0,57
<i>Hot pass</i>			192	24	333	0,58
Demais	SMAW		215	25	480	0,47

Fonte: Especificação do Procedimento de Soldagem (2003)

A EPS fornece muitas outras informações sobre como proceder com a limpeza da peça, gás de proteção, diâmetro do eletrodo, fabricantes e várias outras diretrizes que devem ser respeitadas. Mas, em relação aos parâmetros da EPS para o desenvolvimento desse trabalho são suficientes os dados contidos na Figura 3.1 e Tabela 3.1.

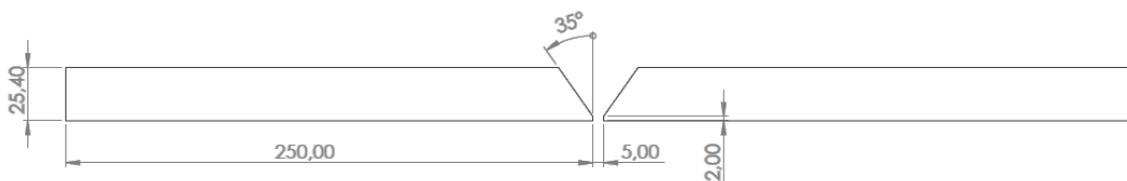
### 3.2. Modelo computacional

O modelo computacional refere-se à forma geométrica, como dimensões e organização dos cordões de solda, e também às malhas.

#### 3.2.1. Dimensionamento

De acordo com as orientações da EPS mencionadas no tópico anterior, as chapas possuem 250 milímetros de comprimento e têm demais dimensões adotadas conforme Figura abaixo.

Figura 3.2: Dimensões das chapas em milímetros

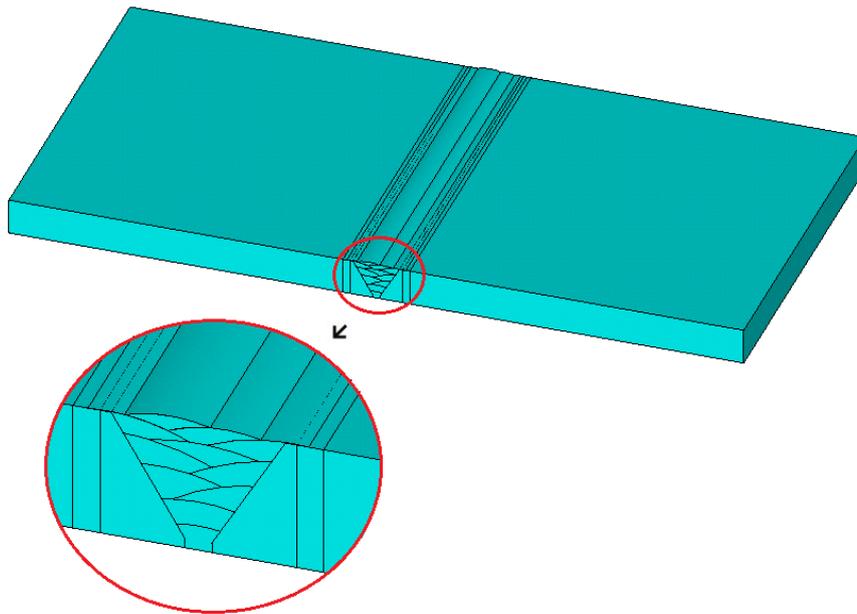


Fonte: Autoria própria

A partir disso, determina-se a disposição dos cordões de soldas e a sequência em que serão soldados. Para satisfazer a condição imposta pela EPS, conforme mostrado na Figura 3.1, adota-se uma altura de cinco milímetros para a geometria dos cordões de solda.

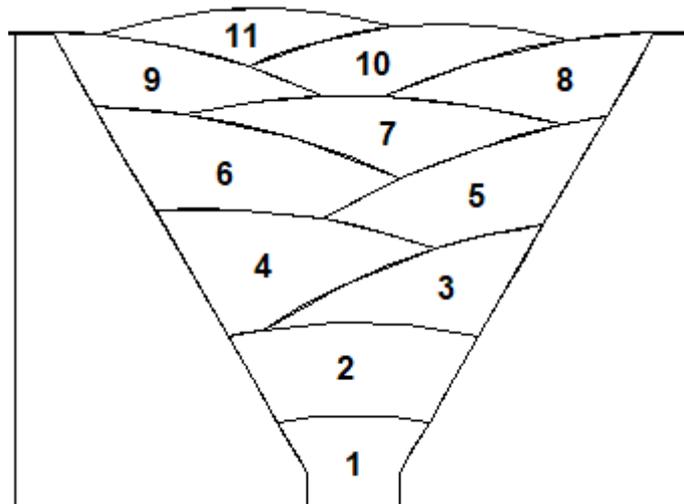
A forma como os cordões foram arranjados e a sequência em que são soldados são exibidas nas Figuras 3.3 e 3.4, respectivamente.

Figura 3.3: Modelo geométrico para simulação computacional



Fonte: Autoria própria

Figura 3.4: Sequência de soldagem



Fonte: Autoria própria

### 3.2.2. Malha

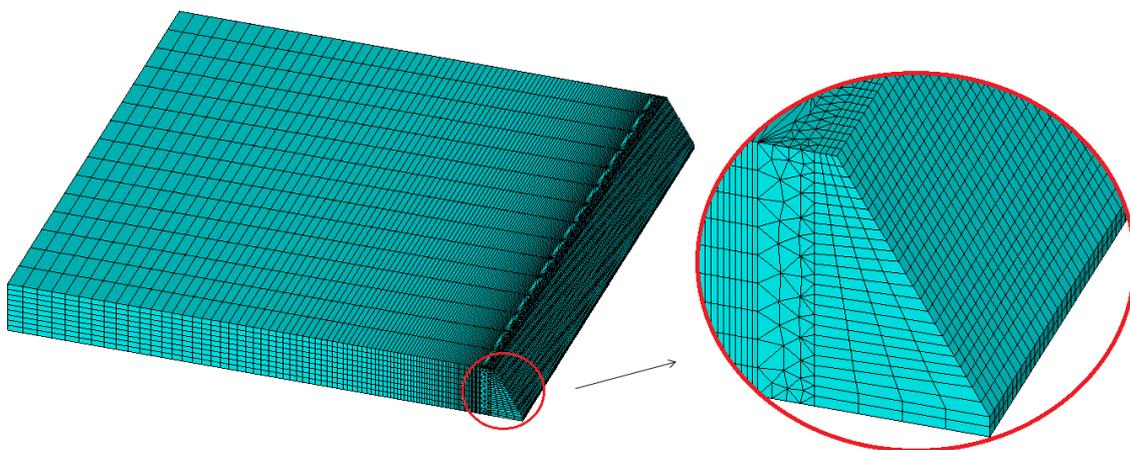
Para a criação da malha, subdivide-se o modelo em quatro partes que se referem aos cordões de solda, chanfro, chapa e região de transição da malha entre o chanfro e o restante da chapa.

Os elementos inerentes às chapas assumem valores gradativos ao longo da largura. Isso se deve ao interesse em refinar mais a região em análise, conforme Figura 3.5.

A região de transição tem a função de garantir melhor aspecto aos elementos pertencente à chapa após o chanfro. Pois a região de soldagem e o chanfro possuem geometrias irregulares que refletem o mesmo em suas malhas. Então, cria-se, na própria chapa, uma seção em que os elementos têm a função de conectar malhas com aspectos diferentes. A Figura 3.6 mostra como essa configuração é realizada.

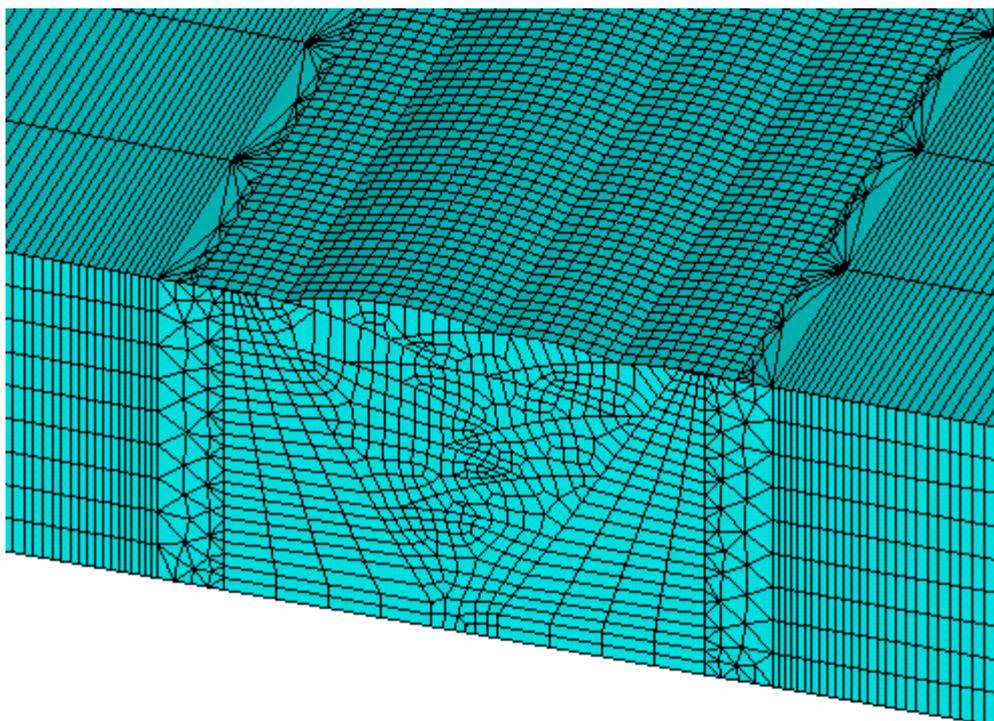
A dimensão dos elementos são diferentes dependendo da região em que se encontram. Partindo dos valores definidos por Araújo (2012), e prezando pelo aspecto visual da malha e convergência da solução, os elementos dos cordões de solda e do chanfro possuem tamanho de 1,2 mm. Já para a região de transição estes possuem tamanho igual a 1,4 mm. Por fim, o restante da chapa após a região de transição possui malha com dimensão variada, o mais refinado é de 2,5 mm e o último é 16 vezes maior que esse. Totalizando, aproximadamente, 208 mil elementos em todo o modelo.

Figura 3.5: Malha da chapa



Fonte: Autoria própria

Figura 3.6: Malha dos cordões de solda e vizinhanças



Fonte: Autoria própria

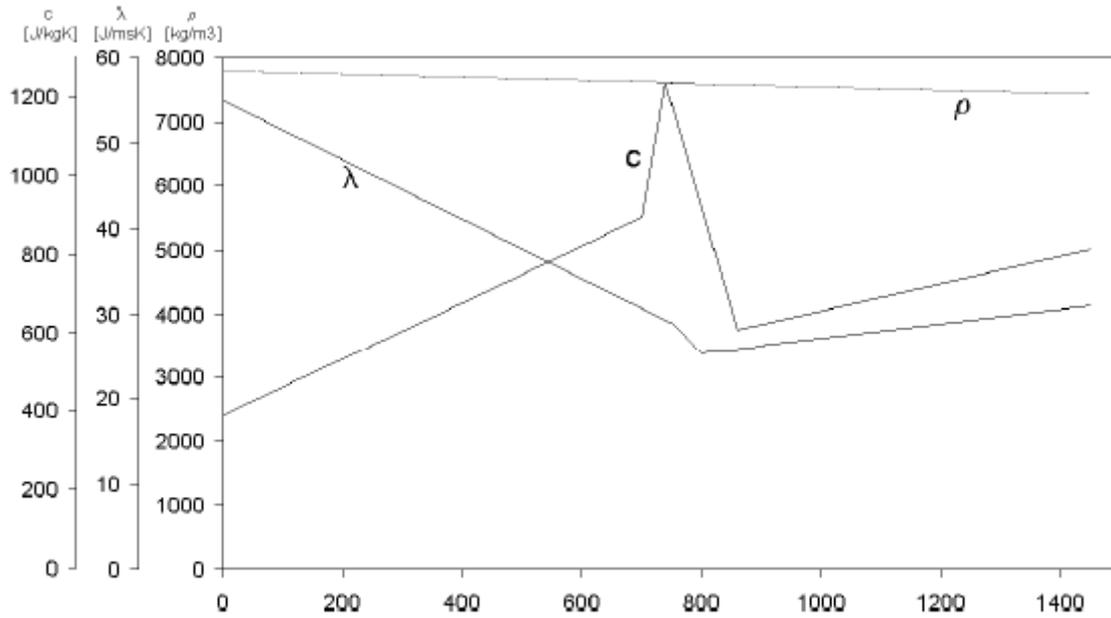
### 3.3. Propriedades do material

O aço ASTM A131 é um material que possui muitas aplicações, mas que se destaca em estruturas marítimas, como cascos de navios, embarcações e plataformas *offshore*.

A simulação térmica desenvolvida para a análise desse caso faz uso de elementos que admitem que apenas massa específica e parâmetros térmicos do material sejam informados. Haja vista que se deseja obter dados térmicos referentes ao processo de soldagem multipasse de uma chapa de uma polegada de espessura. Para isso, têm como entrada os valores de massa específica ( $\rho$ ), coeficiente de calor específico ( $c$ ) e condutividade térmica ( $\lambda$ ). Todos esses parâmetros são termicamente dependentes, ou seja, variam de acordo com a temperatura.

Os pontos do gráfico da Figura 3.7 que fazem parte da análise são informados no Tópico 4.1.4 e mostrada na Tabela 4.1.

Figura 3.7: Massa específica ( $\text{Kg/m}^3$ ), condutividade térmica ( $\text{J/mK}$ ) e calor específico ( $\text{J/KgK}$ )



Fonte: Adaptado de Pilipenko (2011)

# CAPÍTULO IV

## ANÁLISE TÉRMICA

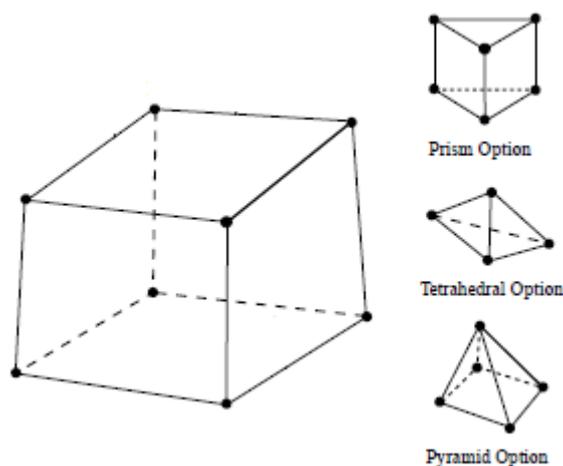
### 4.1. Modelagem térmica

Essa seção aborda o cenário das considerações realizadas para a análise térmica com base nas revisões bibliográficas.

#### 4.1.1. Elementos

Para a malha da análise térmica é utilizado o elemento SOLID70, que possui oito nós e seu único grau de liberdade é a temperatura. Admite propriedades como condutividade térmica, massa específica, calor específico, emissividade, viscosidade e entalpia. Conforme Figura 4.1.

Figura 4.1: Elemento SOLID70

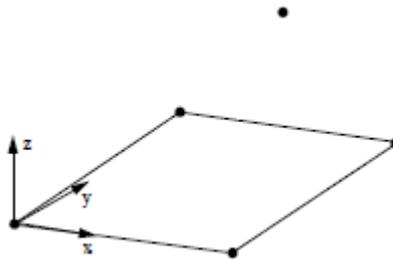


Fonte: ANSYS® (2019)

Não é permitido pelo programa que haja transferência de calor por convecção e radiação simultaneamente no elemento SOLID70. Para que ocorram todas as transferências térmicas, é sobreposto o elemento

bidimensional SOLID152 nas faces externas do modelo. Então, utilizando um nó externo acima da chapa é possível calcular, ao mesmo tempo, a transferência de calor por convecção e radiação. Esse elemento é exibido na Figura 4.2.

Figura 4.2: Elemento SOLID152



Fonte: ANSYS® (2019)

#### 4.1.2. Imposição de calor

A análise de soldagem inicia-se com a imposição de calor sobre o cordão de solda com as chapas inicialmente à temperatura ambiente igual a 25°C. A forma com que esse calor se distribui é determinada pela forma que a fonte de calor assume. Conforme avaliado no Tópico 2.4, diante das dificuldades encontradas por modelos descritos por Rosenthal (1941) e discrepâncias em alguns parâmetros observados sobre a fonte de calor elíptica por Goldak *et al.* (1984), a fonte de calor deve assumir a forma gaussiana. Bastante abordada por Pavelic *et al.* (1969) e aperfeiçoada por Friedman (1978) e Kurtz e Segerlind (1978), essa forma de aplicação de energia é descrita conforme Equações 4.1 e 4.2 e Figura 4.3.

$$Q_N = \frac{1}{2\pi\sigma_g^2} * e^{\frac{-(x+y)}{2\sigma_g^2}} \quad (4.1)$$

$$Q_G = \frac{Q}{2\pi\sigma_g^2 Q_N} * e^{\frac{-(x+y)}{2\sigma_g^2}} \quad (4.2)$$

Onde:

$Q_N$  – Potência normalizada (W/m<sup>2</sup>);

$Q_G$  – Potência aplicada pela fonte gaussiana ( $W/m^2$ );

$\sigma_g$  – Abertura da fonte de calor (mm);

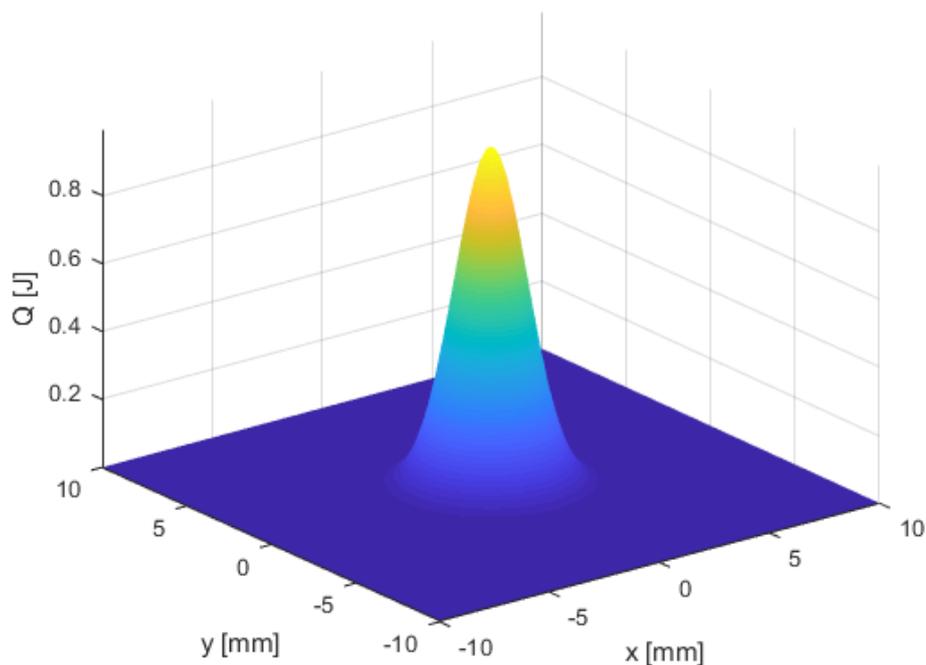
$x$  – Coordenada do eixo x da fonte de calor (mm);

$y$  – Coordenada do eixo y da fonte de calor (mm).

A Equação 4.1 representa a normalização da fonte de calor, ou seja, a aplicação de energia é limitada à quantidade de nós definidos. O valor de  $\sigma_g$  determina a abertura da fonte, ou seja, quanto maior  $\sigma_g$  maior será a dispersão de calor. O valor do parâmetro  $\sigma_g$  foi ajustado em 1,5 milímetros partindo inicialmente do valor 1,2 mm encontrado por Araújo (2012).

Após a normalização, a energia é aplicada conforme a Equação 4.2.

Figura 4.3: Distribuição de energia da fonte de calor gaussiana



Fonte: Autoria própria

#### 4.1.3. Distribuição de calor

Dada a aplicação de energia, a análise térmica requer a avaliação da distribuição transiente de temperatura durante os ciclos térmicos, que envolvem

o período de soldagem e resfriamento. Essa distribuição de energia é determinada pela Equação 4.3.

$$c * \rho * \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda * \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + H \quad (4.3)$$

$c$  – Calor específico (J/KgK);

$\rho$  – Massa específica (kg/m<sup>3</sup>);

$T$  – Temperatura (K);

$t$  – Tempo (s);

$\lambda$  – Condutividade térmica (W/mK);

$x, y, z$  – Coordenadas da fonte de calor (m);

$H$  – Geração de calor interna (W/m<sup>3</sup>);

#### 4.1.4. Propriedades térmicas

Os termos utilizados para a transferência de calor são termicamente dependentes, ou seja, assumem valores diferentes ao variar a temperatura. Mas o coeficiente de troca de calor convectivo é dependente da temperatura e dimensões da chapa, conforme Equação 2.4.

O coeficiente convectivo é calculado considerando o momento de maior intensidade de troca de calor, ou seja, a partir do maior valor de potência utilizada no processo e mostrado na Tabela 3.1. É feita essa consideração, pois o programa fixa esse valor antes de iniciar a simulação. Portanto, sabe-se que a região com maior intensidade de troca de calor é a poça de fusão durante a soldagem, cuja temperatura de fusão do metal base é de aproximadamente 1500°C e a temperatura ambiente igual a 25°C. Logo, considerando a eficiência do processo de soldagem igual a 70% para GTAW e SMAW conforme discutido no Tópico 2.1, e a partir das dimensões da Figura 3.2, tem-se que:

$$h = \frac{215 * 25 * 0,7}{2 * 0,25 * 0,25 * (1500 - 25)} = 20,41 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (4.4)$$

O valor de emissividade é fixado em 0,85, conforme faixa disponibilizada pela Tabela 2.1. Esse valor é escolhido por ser um valor intermediário.

Demais parâmetros para a simulação térmica, que são condutividade térmica ( $\lambda$ ) e calor específico ( $c$ ), são termicamente dependentes e estão Tabelados a seguir. Com base na Figura 3.7, foram utilizados os dados de 0°C, 25°C, 50°C e depois a cada 100°C para análise computacional. Leva-se em consideração que em 744°C o coeficiente de calor específico assume seu valor máximo.

Tabela 4.1: Propriedades térmicas do aço ASTM A131

T (°C)	c (J/Kg°C)	$\lambda$ (W/m°C)	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	T (°C)	c (J/Kg°C)	$\lambda$ (W/m°C)	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )
0	385,9	54,9	7774,4	700	893,0	30,6	7618,2
25	400,0	53,6	7774,4	744	1.233,8	29,3	7600,9
50	415,4	52,9	7774,4	800	909,9	25,2	7583,5
100	456,3	51,5	7757,1	900	619,7	26,2	7566,2
200	532,4	48,0	7722,3	1000	656,3	27,1	7531,5
300	605,6	44,5	7722,3	1100	690,1	28,0	7514,1
400	676,1	41,0	7687,6	1200	726,8	28,8	7496,8
500	746,5	37,5	7670,3	1300	760,6	29,7	7479,4
600	822,5	34,1	7635,6	1400	794,4	30,5	7444,7

Fonte: Adaptado de Pilipenko, 2011

## 4.2. Avaliação térmica

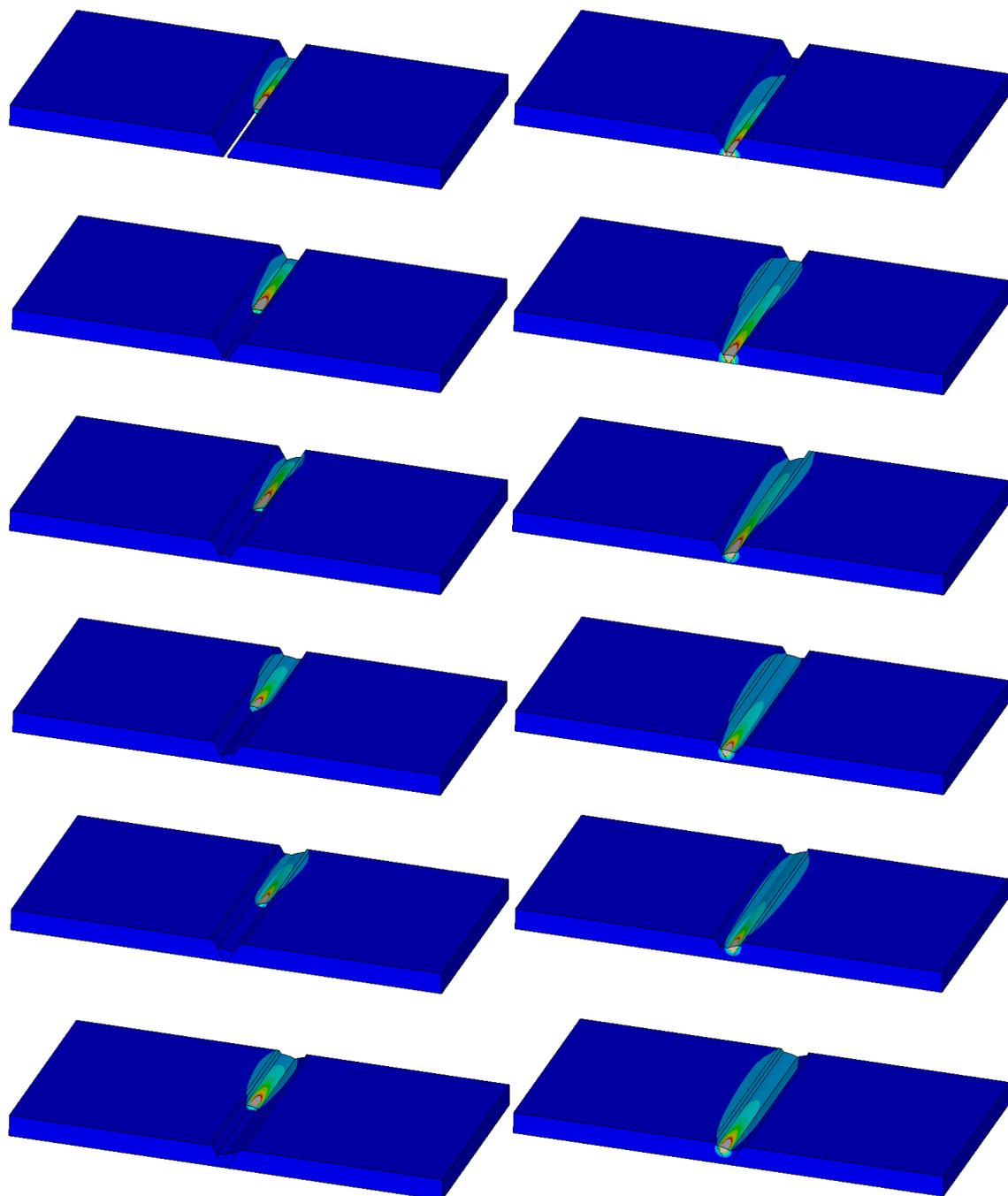
A simulação se desenvolve com a aplicação de calor em rampa, ou seja, o elemento em que o calor é aplicado tem sua temperatura elevada de forma gradativa em um curto intervalo de tempo. Esse intervalo é definido pela razão do comprimento do elemento da malha e a velocidade de soldagem. É utilizado o método *birth and death* para que o cordão de solda seja criado conforme a fonte de calor se move.

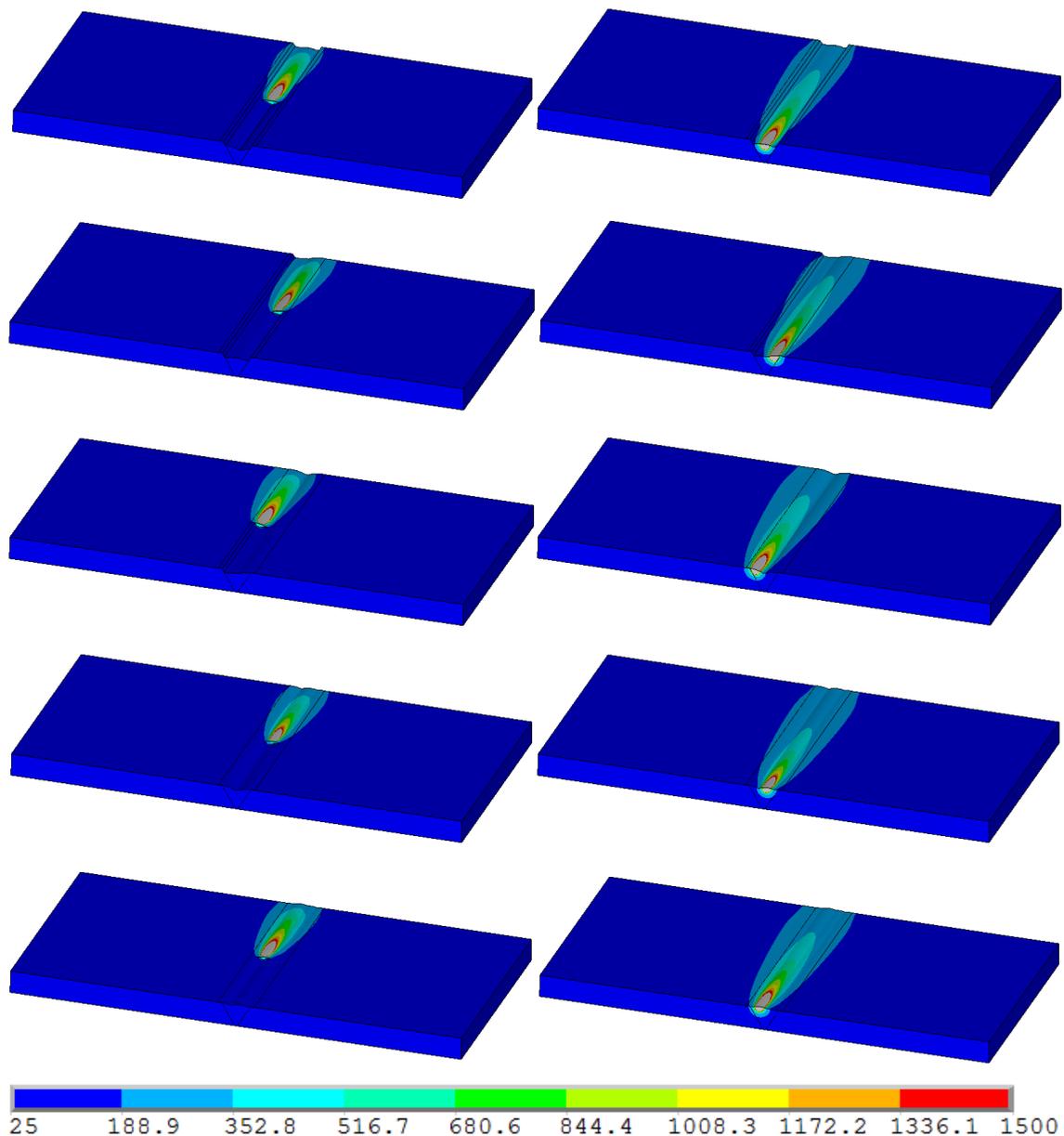
A análise deve garantir que os resultados obtidos estejam em conformidade com as exigências apresentadas pela EPS. Isso é abordado nos subtópicos a seguir, em que é discutido tempo de resfriamento necessário entre os cordões de solda e ciclo térmico.

A Figura 4.4 mostra a distribuição de temperatura em uma sequência de fotos quando a fonte de calor se encontra na metade de cada cordão de solda

(à esquerda) e no fim (à direita). Os cordões de solda se encontram aos pares, ou seja, o primeiro par de imagens se refere ao primeiro cordão de solda, o segundo par de figuras se refere ao segundo cordão de solda e assim por diante.

Figura 4.4: Distribuição de temperatura na metade de cada cordão de solda (esquerda) e no fim (direita)





Fonte: Autoria própria

#### 4.2.1. Temperatura interpasses

A temperatura interpasses corresponde à maior temperatura que um ponto da chapa se encontra antes de iniciar o próximo cordão de solda. Esse parâmetro é restringido pela EPS conforme Tabela 3.1.

O tempo de resfriamento é um parâmetro que é fixado antes de iniciar a simulação. Portanto, para obter o tempo de resfriamento que atenda as exigências é necessário que sejam analisadas mais de uma simulação. Após realizar essa verificação foi definido que o intervalo para resfriamento entre os

cordões de solda que garante que a especificação será respeitada deve ser de dez minutos. Os resultados são exibidos na Tabela 4.2.

Observa-se que, inicialmente, um tempo de resfriamento menor já seria suficiente para atender à restrição. Mas, deve-se atentar que a cada passo de soldagem a temperatura no fim de cada período de resfriamento sobe de forma não linear. Assim, garantir um tempo uniforme de resfriamento pode tornar a simulação mais rápida que se for considerado períodos dinâmicos, pois seriam curtos os intervalos de resfriamento no início, mas mais longos com o decorrer do processo.

A Tabela 4.2 garante que todos os cordões de solda iniciaram com a temperatura máxima da chapa menor que 250°C.

Tabela 4.2: Temperatura máxima da chapa antes de iniciar o próximo cordão de solda

Resfriamento entre os cordões de solda	Temperatura interpasse (°C)
1 – 2	58,6
2 – 3	87,8
3 – 4	106,1
4 – 5	107,9
5 – 6	112,8
6 – 7	118,4
7 – 8	131,8
8 – 9	141,1
9 – 10	143,7
10 – 11	141,2

Fonte: Autoria própria

#### 4.2.2. Ciclo térmico

O ciclo térmico corresponde à variação de temperatura da soldagem de um cordão de solda e o resfriamento subsequente. Essa análise geralmente é utilizada para comparar e justificar mudanças microestruturais.

Para obter a temperatura ao longo do tempo na simulação, faz-se o uso de nós provenientes da malha, pois o programa salva os dados nesses pontos. Por se tratar de uma chapa de uma plegada e dois processos de soldagem,

sugere-se que sejam escolhidos nós diferentes para cada processo. Isso deve ser feito para garantir melhor visualização das temperaturas atingidas nas proximidades da região de soldagem.

A frequência de aquisição de dados é inversamente proporcional ao intervalo de tempo com que a fonte de calor se move. Portanto, para velocidades de soldagem distintas, as frequências de aquisição de dados também serão desiguais. Isso não afeta a análise, apenas define diferentes quantidades de pontos entre o primeiro, segundo e os demais cordões de solda para a construção das curvas do ciclo térmico.

Para o processo GTAW opta-se por quatro nós da superfície inferior da chapa direita para atuarem como termopares. Todos os nós se encontram em um plano transversal na metade do cordão de solda e alinhados. O primeiro está localizado a seis milímetros do nariz do chanfro, e os demais estão espaçados quatro milímetros um do outro.

Já para o processo SMAW, selecionam-se três nós da superfície superior da chapa direita, após a região com malha de transição, para operarem como termopares. Todos os nós se encontram em um plano transversal na metade do cordão de solda e alinhados. O primeiro está localizado a oito milímetros do início do chanfro, e os demais estão espaçados três milímetros um do outro.

É possível observar a posição dos termopares, que estão quadriculados de branco, nas Figuras 4.5 para GTAW e 4.6 para SMAW. Considera-se que o termopar A é o mais próximo da poça de fusão seguido por B, C e D.

Na Figura 4.5 é exibido o momento em que se atinge o valor máximo da temperatura no termopar mais próximo à poça de fusão e a curva do ciclo térmico obtida durante a soldagem do cordão de solda raiz.

Já na Figura 4.6 é apresentado o momento em que a fonte de calor passa pela metade do cordão de solda e a curva do ciclo térmico obtida durante a soldagem do oitavo cordão de solda.

É possível embasar a escolha do tempo mínimo de resfriamento nos gráficos do ciclo térmico. Para isso, deve-se atentar que os valores de temperatura exibidos no gráfico representam apenas a temperatura naqueles pontos em que os termopares estão fixados, não sendo essas, necessariamente, a região de maior temperatura da chapa.

Figura 4.5: Termopares e ciclo térmico durante a soldagem do cordão de solda raiz (GTAW)

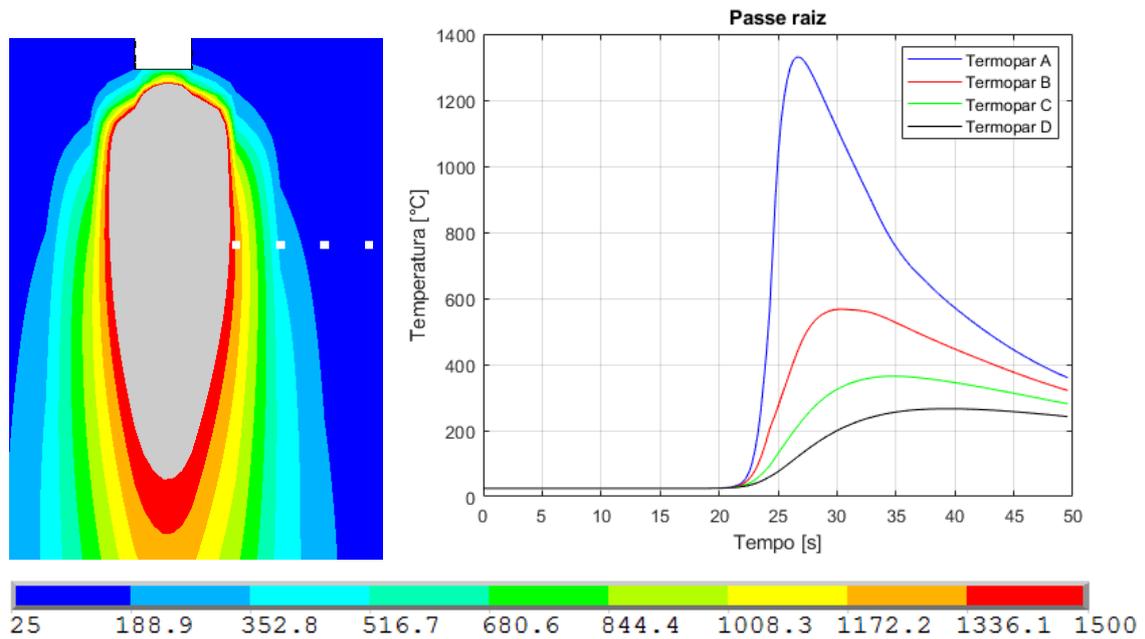
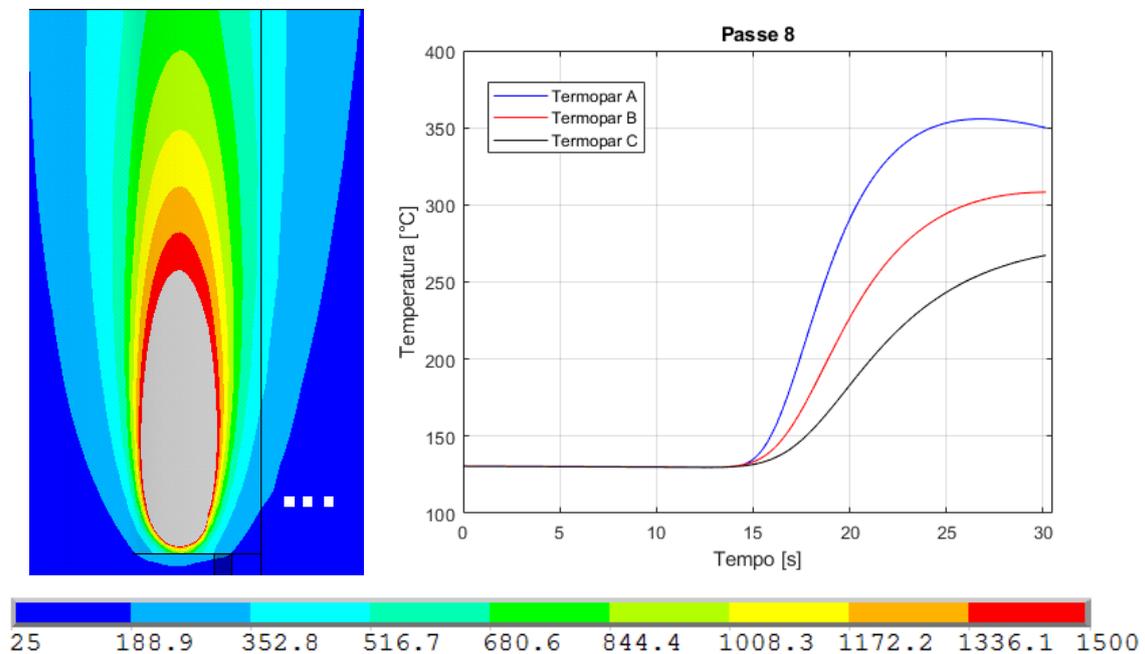


Figura 4.6: Termopares e ciclo térmico durante a soldagem do oitavo cordão de solda (SMAW)



Todos os outros gráficos referentes ao período de soldagem do ciclo térmico dos demais passes se encontram no Apêndice A.

# CAPÍTULO V

## CONCLUSÃO

Portanto, devido às dimensões do modelo, desenvolveu-se a criação da malha gradativa para a chapa, que objetivou a redução da quantidade de elementos, para que fossem obtidos os resultados da simulação de forma mais rápida. Já a malha estruturada na região de soldagem tem a finalidade de reviver os elementos alinhadamente à frente da fonte de calor.

Com a finalidade de conciliar aspecto da malha e convergência dos resultados foram adotados tamanhos de elementos, partindo dos valores encontrados por Araújo (2012), iguais a 1,2 mm para a região dos cordões de solda e chanfros, 1,4 mm para a seção de transição na chapa e, 2,5 mm para o menor elemento da chapa na parte de malha gradativa e 16 vezes maior para a região de menor refinamento. Assim sendo, verificou-se que com essas dimensões foi possível conciliar boa aparência do modelo e convergência dos resultados térmicos.

A altura dos cordões de solda foram adotados como sendo 5 mm para atender às exigências da EPS conforme a Figura 3.1, onde é informado que os cordões de solda criados pelo processo GTAW devem ter uma altura menor ou igual a 10 mm, e os demais feitos pelo processo SMAW devem preencher o restante da altura do chanfro.

O parâmetro  $\sigma_g$ , que é responsável pela abertura da fonte, teve seu valor inicialmente adotado conforme realizado por Araújo (2012). Mas observou-se que a concentração de energia era elevada e causava divergência nas soluções. Logo, esse dado foi estimado, através de simulações, em 1,5 mm. Pois apresentou distribuição do calor imposto de forma coerente e condizente com a EPS.

Para a imposição de energia, os elementos são ativados à frente da fonte de calor pelo método *element birth and death*, pois só é possível a aplicação de calor em elementos “vivos”.

Os resultados apresentados pela análise térmica prezam pelas diretrizes da Especificação do Procedimento de Soldagem. Dessa maneira, os dados dessa análise computacional podem ser utilizados para a simulação estrutural no estudo sobre tensões residuais e distorções.

A partir do estudo das curvas dos ciclos térmicos podem ser apresentadas melhorias no tempo de resfriamento com a finalidade de tornar o processo mais rápido. Pois a Tabela 4.2 mostrou que o tempo de resfriamento estabelecido em 10 minutos pode ser reduzido ainda mais.

# CAPÍTULO VI

## TRABALHOS FUTUROS

Para aproximar ainda mais a análise computacional das condições reais, deve-se minimizar as considerações. Isso é:

- Atualizar a todo tempo o valor do coeficiente de troca de calor convectivo, pois depende da temperatura que constantemente muda. Cada nó deve possuir seu coeficiente de troca de calor convectivo local;
- Modificar constantemente o valor da emissividade, pois assim como na troca de calor por convecção, esse parâmetro varia com a temperatura. O ideal é que a chapa seja dividida em seções e que cada uma delas receba o valor da emissividade na temperatura média da seção;
- Encontrar calor imposto por meio do ciclo térmico ou temperatura;
- Desenvolver lógica em que se permite utilizar o mesmo programa para materiais diferentes.

Há também métodos a serem trabalhados quanto à forma de obtenção de resultados:

- Realizar testes práticos para validar simulação,
- Foi fixado o tempo de resfriamento em dez minutos entre os cordões de solda. O ideal é monitorar a temperatura e iniciar o cordão de solda seguinte quando essa reduzir para um valor máximo especificado pela EPS;
- Associar ciclo térmico com crescimento dos grãos na zona afetada pelo calor e zona fundida;
- Analisar ciclo térmico em manufatura aditiva;
- Verificar a influência do sentido de soldagem de cada cordão de solda ao analisar tensão residual e distorção;

# CAPÍTULO VII

## REFERÊNCIAS

ANSYS®, 2019. Disponível em: < <https://ansyshelp.ansys.com/> >. Acesso em: 11 de dezembro de 2019.

AKBARI, D.; SATTARI-FAR, I. Effect of the welding heat input on residual stresses in butt-welds of dissimilar pipe joints. **Internacional Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 86, p. 769-776, 2009.

AMOROS, T. R. Avaliação de tensões residuais em chapas planas de aço carbono, destinadas a processos de corte a laser, pelo método da anisotropia planar. **M. Eng. thesis, Instituto de Engenharia do Parana. (in Portuguese)**, 2008.

ARAÚJO, Douglas Bezerra de *et al.* **Estudo de Distorções em Soldagem com Uso de Técnicas Numéricas e de Otimização**, 2012. 262 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

BOOTHY, D. **Welding Technology and Properties of Material, Apprentice and Industry Training**, pp 8-12. Canada, 2014

ÇENGEL, Yunus A. *et al.* **Termodinâmica**. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.

DEHKORDI, Yousef Ghaderi; ANARAKI, Ali Pourkamali; SHAHANI, Amir Reza. Investigation of Heat Source Models and Process Factors on Temperature and Residual Stress in GTAW of Aluminum Plates. **Russian Journal of Non-Ferrous Metals**, v. 60, n. 4, p. 450-462, 2019.

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.

FRIEDMAN, E. **Welding Journal Research Supplement**, v. 57, pp. 161s-66s, 1978.

FU, Guangming *et al.* Influence of the welding sequence on residual stress and distortion of fillet welded structures. **Marine Structures**, v. 46, p. 30-55, 2016.

GOLDAK, John; CHAKRAVARTI, Aditya; BIBBY, Malcolm. A new finite element model for welding heat sources. **Metallurgical transactions B**, v. 15, n. 2, p. 299-305, 1984.

INCROPERA, Frank P. *et al.* Fundamentos de Transferência de Calor e Massa. 6ª edição. **Rio de Janeiro: LTC**, 2008.

KALYANKAR, V. D.; SHAH, Prassan. A review on methodologies to reduce welding distortion. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 11, p. 24741-24749, 2018.

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

MYERS, P. S.; UYEHARA, O. A.; BORMAN, G. L. Fundamentals of heat flow in welding. **Welding Research Council Bulletin**, n. 123, p. 1-&, 1967.

MODENESI, Paulo José; MARQUES, Paulo Villani; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem - fundamentos e tecnologia**. Editora UFMG, 2005.

ÖHMAN, C. **Emittansmätningar med AGEMA E-Box, Teknisk rapport**. AGEMA Technical Report (FLIR Systems AB): Stockholm, 1999.

PAVELIC, V. *et al.* **Welding Journal Research Supplement**, vol. 48, pp. 295s-305s, 1969.

Especificação do Procedimento de Soldagem. **PETROBRAS**, 2003.

PILIPENKO, Artem. Computer simulation of residual stress and distortion of thick plates in multielectrode submerged arc welding: Their mitigation techniques. 2001.

RADAJ, Dieter. Welding residual stresses and distortion. **Calculation and measurement**, 2003.

RIBEIRO, J. E. **Caracterização experimental e numérica de campos de tensões residuais provocadas por processos de fabrico**. 2006.

ROSENTHAL, D. Mathematical Theory of Heat Distribution During Welding and Cutting. **Welding Journal**, v. 15, 1941.

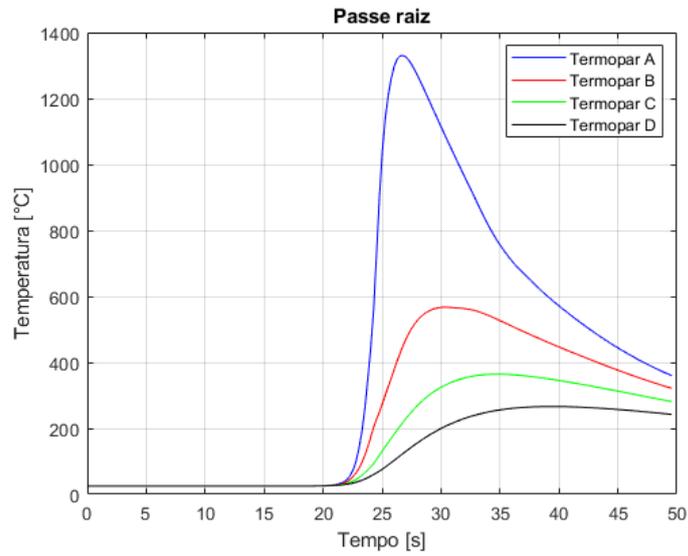
TOULOUKIAN, Y. S.; DEWITT, D. P. Thermophysical Properties of Matter - The TPRC Data Series - Thermal Radiative Properties: Metallic Elements and Alloys. [S.I.], 1970.

WU, C. S.; HU, Q. X.; GAO, J. Q. An adaptive heat source model for finite-element analysis of keyhole plasma arc welding. **Computational Materials Science**, v. 46, n. 1, p. 167-172, 2009.

ZAIN-UL-ABDEIN, Muhammad *et al.* **Experimental investigation and numerical simulation of laser beam welding induced residual stressed and distorsions in AA 6056-T4 sheets for aeronautic application**. 2009. Tese de Doutorado. Lyon, INSA.

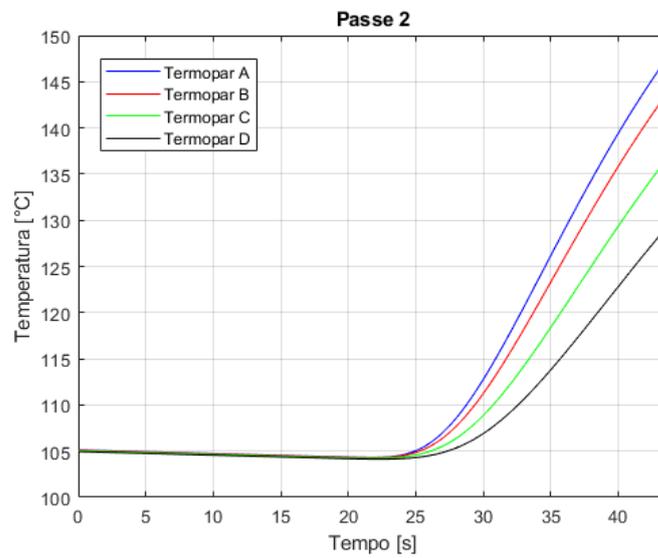
## APÊNDICE A - GRÁFICOS DOS CICLOS TÉRMICOS DURANTE A SOLDAGEM

Figura A.1: ciclo térmico durante a soldagem do cordão de solda raiz



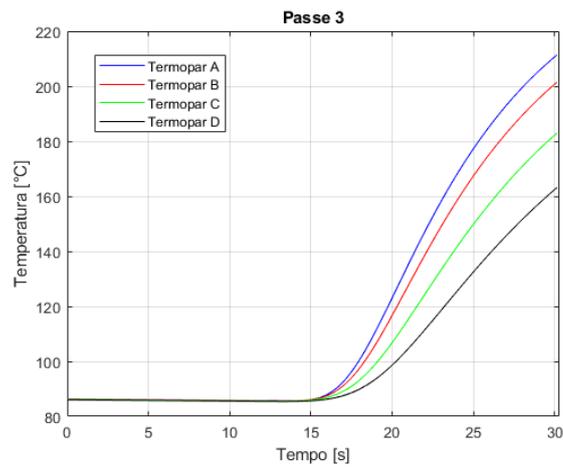
Fonte: Autoria própria

Figura A.2: ciclo térmico durante a soldagem do *hot pass*



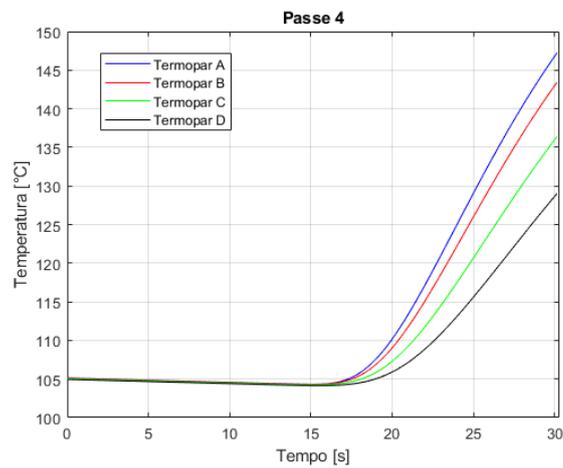
Fonte: Autoria própria

Figura A.3: Ciclo térmico durante a soldagem do terceiro cordão de solda



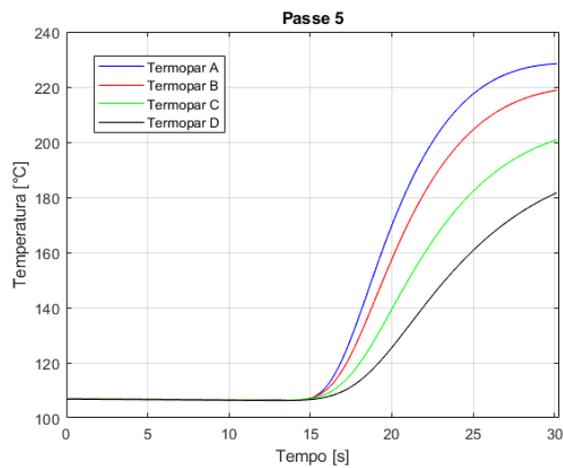
Fonte: Autoria própria

Figura A.4: Ciclo térmico durante a soldagem do quarto cordão de solda



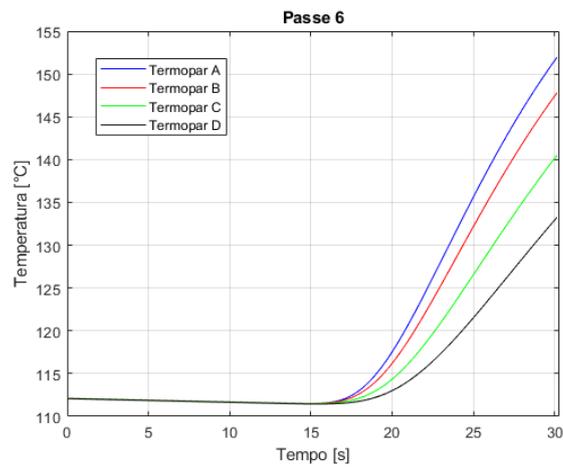
Fonte: Autoria própria

Figura A.5: Ciclo térmico durante a soldagem do quinto cordão de solda



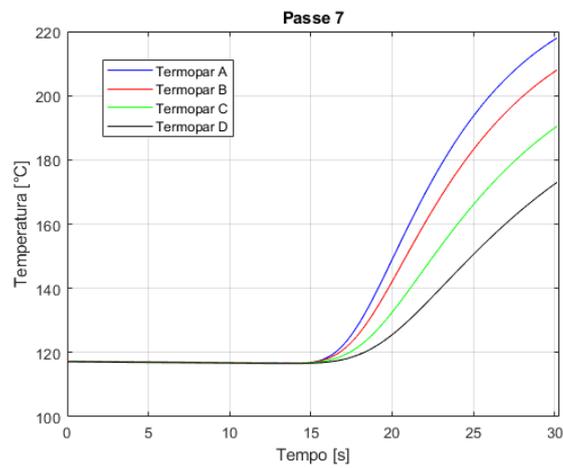
Fonte: Autoria própria

Figura A.6: Ciclo térmico durante a soldagem do sexto cordão de solda



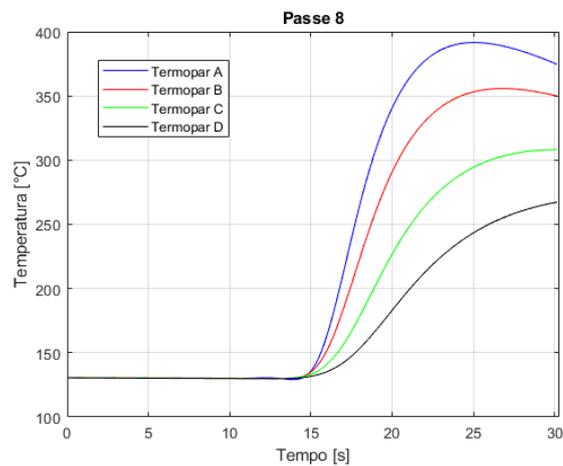
Fonte: Autoria própria

Figura A.7: Ciclo térmico durante a soldagem do sétimo cordão de solda



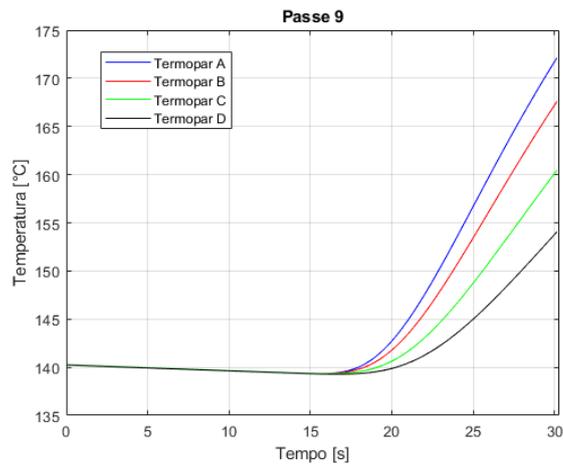
Fonte: Autoria própria

Figura A.8: Ciclo térmico durante a soldagem do oitavo cordão de solda



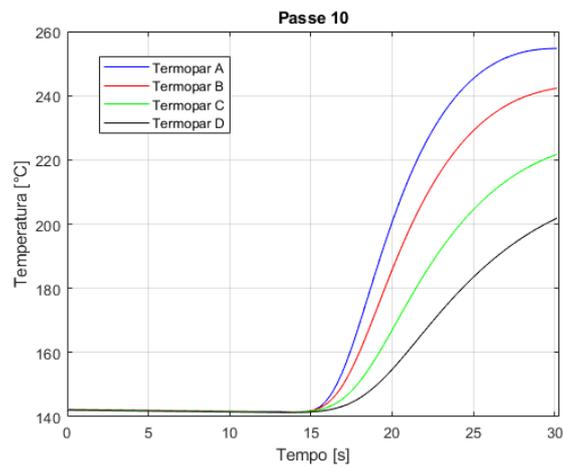
Fonte: Autoria própria

Figura A.9: Ciclo térmico durante a soldagem do nono cordão de solda



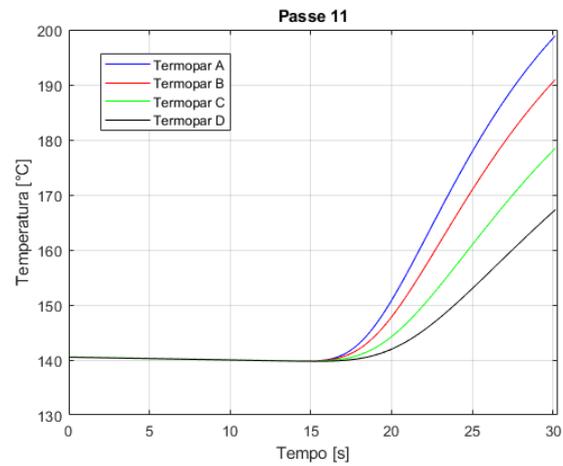
Fonte: Autoria própria

Figura A.10: Ciclo térmico durante a soldagem do décimo cordão de solda



Fonte: Autoria própria

Figura A.11: Ciclo térmico durante a soldagem do décimo cordão de solda



Fonte: Autoria própria