



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO  
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS - CCEN  
CURSO DE BACHARELADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

ANTÔNIO RODOLFO DA SILVA MOURA

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO CAMPO DE TEMPERATURA NA SOLDAGEM TIG  
DO AÇO AISI 316L**

MOSSORÓ/RN

2018

ANTÔNIO RODOLFO DA SILVA MOURA

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO CAMPO DE TEMPERATURA NA SOLDAGEM TIG  
DO AÇO AISI 316L**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Prof. MSc. Daut de Jesus Nogueira Peixoto Couras

MOSSORÓ

2018

© 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.

M929s Moura, Antônio Rodolfo da Silva .  
Simulação numérica do campo de temperatura na  
soldagem TIG do aço AISI 316L / Antônio Rodolfo da  
Silva Moura. - 2018.  
53 f. : il.

Orientador: Daut de Jesus Nogueira Peixoto  
Couras.  
Monografia (graduação) - Universidade Federal  
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e  
Tecnologia, 2018.

1. Soldagem TIG. 2. Simulação numérica  
computacional. 3. Campo de Temperatura. I.  
Couras, Daut de Jesus Nogueira Peixoto, orient.  
II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

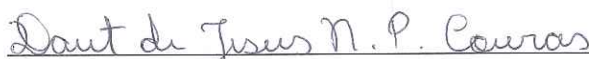
ANTÔNIO RODOLFO DA SILVA MOURA

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO CAMPO DE TEMPERATURA NA SOLDAGEM TIG  
DO AÇO AISI 316L**

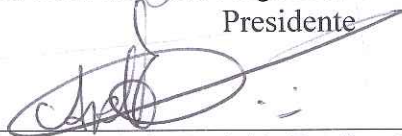
Monografia apresentada a Universidade  
Federal Rural do Semi-Árido como requisito  
para obtenção do título de Bacharel em Ciência  
e Tecnologia.

Defendida em: 19/04/2018.

**BANCA EXAMINADORA**



Prof. MSc. Daut de Jesus Nogueira Peixoto Couras (UFERSA)  
Presidente



Prof. Dr. Antônio Rodolfo Paulino Pessoa (UFERSA)  
Membro Examinador



Prof. Dr. Luís Morão Cabral Ferro (UFERSA)  
Membro Examinador

## **AGRADECIMENTOS**

A minha mãe Marluce por todo amor dedicado a mim e por sempre me manter no caminho correto. Ao meu pai Valdemar, por passar seus princípios e ter muitas vezes abdicado de seus próprios desejos em prol da minha educação.

A minha namorada Sara Pinto Vasconcelos por compreender as minhas ausências durante esse período de graduação, continuando a me apoiar nos bons e maus momentos.

Ao professor Daut por ter aceitado o convite de me orientar nessa monografia.

Aos amigos que tenho feito ao longo da minha vida, tanto acadêmica quanto particular.

## **DEDICATÓRIA**

Esse trabalho é dedicado ao meu pai,  
Valdemar Cavalcante de Moura, exemplo da  
resiliência sertaneja, companheiro dos  
domingos de futebol.

## RESUMO

A soldagem é um dos processos de fabricação mais utilizado na indústria. Os ciclos térmicos envolvidos durante a união dos metais, apresentam características particulares, de acordo com o material envolvido durante a soldagem, sendo necessário a caracterização desses campos de temperatura. Em muitos casos, a obtenção desses dados torna possível a obtenção de parâmetros que permitem a determinação de tensões residuais e transformações de fases, fenômenos que podem ocorrer durante a soldagem. A obtenção desses campos de temperatura não costuma ser fácil, necessitando de técnicas específicas para sua determinação, e que nem sempre são consideradas viáveis. Nesse trabalho foi elaborada uma simulação numérica de um processo de soldagem TIG autógeno de uma chapa de aço inoxidável 316L. A utilização do software *ANSYS Workbench*, que através do método de elementos finitos é capaz de resolver problemas de transientes térmicos, tornou possível a obtenção dos ciclos térmicos envolvidos na soldagem. Para que a simulação ocorresse, foi necessário a implementação de uma fonte de calor que representasse o arco móvel utilizado na soldagem TIG. Para isso, uma extensão chamada *Moving heat flux* foi usada para a inserção dos parâmetros de soldagem. Outros dados, como as propriedades termofísicas do material e condições de contorno de radiação e convecção, também foram inseridos. Alguns pontos foram criados em zonas estratégicas do cordão de solda visando obter dados que permitissem a caracterização dos campos de temperaturas. Os resultados apresentaram regiões próximas ao cordão de solda, onde as temperaturas alcançaram valores próximos a 1900 °C, temperatura suficiente para a fusão do material. Os dados obtidos pela simulação foram comparados com resultados presentes na literatura a fim de validar o modelo apresentado nesse trabalho.

**Palavras-chave:** Soldagem TIG. Simulação numérica computacional. Campo de temperatura.

## **ABSTRACT**

Welding is one of the most widely used manufacturing processes in the industry. The thermal cycles involved during the bonding of the metals present particular characteristics, according to the material involved during the welding, being necessary the characterization of these temperature fields. In many cases, obtaining these data makes it possible to obtain parameters that allow the determination of residual stresses and phase transformations, phenomena that can occur during welding. Obtaining these temperature fields is often not easy, requiring specific techniques for their determination, and is not always considered viable. In this work, a numerical simulation of an autogenous TIG welding process of a 316L stainless steel plate was elaborated. The use of the ANSYS Workbench software, which through the finite element method is able to solve problems of thermal transients, has made it possible to obtain the thermal cycles involved in welding. For the simulation to take place, it was necessary to implement a heat source that represents the moving arc used in TIG welding. For this, an extension called Moving heat flux was used to insert the welding parameters. Other data, such as thermophysical properties of the material and convection and radiation boundary conditions, were also inserted. Some points were created in strategic zones of the weld bead in order to obtain data that allowed the characterization of the temperature fields. The results showed regions close to the weld bead, where temperatures reached values close to 1900 °C, sufficient temperature for the melting of the material. The data obtained by the simulation were compared with results in the literature in order to validate the model presented in this work.

**Keywords:** TIG welding. Computational numerical simulation. Temperature range.



## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Formação teórica de uma solda pela aproximação das superfícies das peças .....                                                                                                                                                   | 16 |
| Figura 2 - Representação esquemática da estrutura de uma superfície metálica em contato com o ar. A - metal não afetado, B - metal afetado, C - camada de óxido, D - água e oxigênio absorvidos, E - gordura, F - partículas de poeira..... | 17 |
| Figura 3 – Soldagem por pressão e fusão .....                                                                                                                                                                                               | 18 |
| Figura 4 - Ilustração do processo de soldagem TIG.....                                                                                                                                                                                      | 19 |
| Figura 5 - Transformações do material durante a soldagem .....                                                                                                                                                                              | 21 |
| Figura 6 - Representação de um corpo discretizado.....                                                                                                                                                                                      | 25 |
| Figura 7 - Geometrias comumente utilizadas pelo MEF .....                                                                                                                                                                                   | 25 |
| Figura 8 - Comparação entre resultados numéricos e experimentais (dimensões em milímetros e escala de temperatura em Kelvin).....                                                                                                           | 27 |
| Figura 9 - Ciclos térmicos da face superior situados a 10, 25 e 50mm da solda. Barras de erro de $\pm 10\%$ .....                                                                                                                           | 28 |
| Figura 10 - Ciclos térmicos da face inferior situados a 0, 5, 10, 20 e 50mm da solda. Barras de erro de $\pm 10\%$ . .....                                                                                                                  | 28 |
| Figura 11 - Representação de simplificação bidimensional .....                                                                                                                                                                              | 29 |
| Figura 12 - Modelagem do cordão de Solda.....                                                                                                                                                                                               | 30 |
| Figura 13 - Tensões residuais medidas experimentalmente e simuladas com modelos 2D e 3D .....                                                                                                                                               | 30 |
| Figura 14 - Evolução das geometrias adotadas para modelagem de fonte de calor .....                                                                                                                                                         | 31 |
| Figura 15 - Corpo de prova utilizado na simulação.....                                                                                                                                                                                      | 35 |
| Figura 16 - Malhas geradas para a simulação.....                                                                                                                                                                                            | 37 |
| Figura 17 - Análise de convergência entre malhas.....                                                                                                                                                                                       | 38 |
| Figura 18 – Rotina para criação da malha .....                                                                                                                                                                                              | 38 |
| Figura 19 - Refinamento do cordão de solda.....                                                                                                                                                                                             | 39 |
| Figura 20 - Skewness.....                                                                                                                                                                                                                   | 40 |
| Figura 21 - Orthogonal Quality .....                                                                                                                                                                                                        | 40 |
| Figura 22 - Parâmetros de qualidade da malha gerada.....                                                                                                                                                                                    | 40 |
| Figura 23 - Condições de contorno.....                                                                                                                                                                                                      | 41 |
| Figura 24 – Parâmetros de soldagem para simulação do aço 316L.....                                                                                                                                                                          | 41 |
| Figura 25 – Configuração da extensão <i>Moving Heat Flux</i> .....                                                                                                                                                                          | 42 |

|                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 26 – Sistemas de coordenadas auxiliares utilizados para a criação de pontos sobre a placa ..... | 43 |
| Figura 27 - Simulação do deslocamento da fonte de calor, tempo de 7,7 segundos .....                   | 44 |
| Figura 28 - Simulação do deslocamento da fonte de calor, tempo de 50,3 segundos .....                  | 45 |
| Figura 29 - Simulação do deslocamento da fonte de calor, tempo de 77,4 segundos .....                  | 45 |
| Figura 30 - - Simulação do deslocamento da fonte de calor, tempo de 100,7 segundos.....                | 46 |
| Figura 31 - Simulação do deslocamento da fonte de calor, tempo de 147,1 segundos .....                 | 46 |
| Figura 32 – Ciclos térmicos localizados no início do cordão de solda .....                             | 47 |
| Figura 33 – Ciclos térmicos localizados no meio do cordão de solda.....                                | 48 |
| Figura 34 - Ciclos térmicos localizados no final do cordão de solda .....                              | 48 |

## **LISTA DE TABELAS**

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Composição do aço 316L .....                                               | 20 |
| Tabela 2 - Rendimento térmico dos processos de soldagem .....                         | 23 |
| Tabela 3 - Propriedades Termofísicas dependentes da temperatura do aço AISI 316L..... | 36 |

## SUMÁRIO

|                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------|----|
| 1 INTRODUÇÃO.....                                                | 13 |
| 2 OBJETIVOS.....                                                 | 15 |
| 2.1 Objetivo Geral.....                                          | 15 |
| 2.2 Objetivos Específicos .....                                  | 15 |
| 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....                                    | 16 |
| 3.1 SOLDAGEM .....                                               | 16 |
| 3.1.1 Processo de Soldagem TIG .....                             | 18 |
| 3.2 AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS .....                          | 19 |
| 3.2.1 Soldabilidade do aço 316L.....                             | 20 |
| 3.3 ANÁLISE TÉRMICA DE SOLDAGEM.....                             | 22 |
| 3.4 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF) .....                     | 24 |
| 3.4.1 Método dos elementos finitos aplicado a soldagem.....      | 26 |
| 3.4.2 Modelos 2d e 3d de elementos finitos.....                  | 29 |
| 3.4.3 Modelo da Fonte de Calor.....                              | 31 |
| 4 METODOLOGIA.....                                               | 35 |
| 4.1 GEOMETRIA COMPUTACIONAL DO CORPO DE PROVA .....              | 35 |
| 4.2 PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DO MATERIAL .....                  | 36 |
| 4.3 SELEÇÃO DE MALHA .....                                       | 37 |
| 4.4 CONDIÇÕES DE CONTORNO .....                                  | 41 |
| 4.5 PARAMETROS DE SOLDAGEM .....                                 | 41 |
| 4.6 MEDIÇÃO DE TEMPERATURA EM PONTOS ESPECÍFICOS DA PLACA.....   | 43 |
| 5 RESULTADOS .....                                               | 44 |
| 5.1 DESLOCAMENTO DA FONTE DE CALOR .....                         | 44 |
| 5.2 MEDIÇÕES DAS TEMPERATURAS EM DIFERENTES PONTOS DA CHAPA .... | 47 |
| 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....            | 50 |
| 6.1 CONCLUSÕES .....                                             | 50 |
| 6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....                       | 50 |
| 7 REFERÊNCIAS .....                                              | 51 |

## 1 INTRODUÇÃO

O surgimento de diversos processos de fabricação foi possível graças a primeira revolução industrial inglesa, em meados do século XVIII. Posteriormente, devido ao crescente consumo de bens e serviços da sociedade contemporânea e da explosão das duas grandes guerras do século passado, tornou-se necessário o desenvolvimento de novos processos e o aprimoramento dos demais.

Alguns dos principais desafios da indústria atualmente está ligado a otimização de tempo e recurso. Ao longo das últimas décadas, ferramentas computacionais veem sendo desenvolvidas com o intuito de reduzir custos e facilitar a compreensão de diversos fenômenos físicos. Atualmente, no ramo da engenharia, softwares de simulação numérica tornaram-se cada vez mais populares, devido a sua praticidade e acessibilidade.

Alguns desses programas utilizam o Método de Elementos Finitos (MEF), que consiste basicamente em resolver equações diferenciais, discretizando o sistema sob análise em vários elementos. A análise de elementos finitos pode ser aplicada em diversas áreas da engenharia, como por exemplo, problemas estruturais, térmicos, mecânica dos fluidos dentre outros (SAKAMOTO, 2007).

Um dos campos de estudo de maior complexidade do ponto de vista de análise por elementos finitos é o processo de soldagem. Tal procedimento consiste na união permanente entre dois materiais, em que estão envolvidos diversos fenômenos físicos como a transferência de calor, eletromagnetismo, variações fluidomecânicas, microestrutura de materiais e tensões residuais de componentes soldados. Quantificar tais fenômenos representa grande relevância durante a fabricação de diversos equipamentos mecânicos, que ao serem mal dimensionados podem acarretar falhas devido a execução incorreta do processo de soldagem (BARBAN, 2014).

Levando em consideração tais fatores, o software *Ansys* mostra-se uma poderosa ferramenta para minimizar custos e riscos ligados ao processo. Através do plug-in *Transiente Thermal*, o programa permite que o usuário simule todas as condições pertinentes envolvidos no processo de soldagem, podendo expressar o campo de temperatura de soldagem. A possibilidade de determinar numericamente a distribuição de temperatura em um material soldado permite a observação da tendência natural da dilatação das partes aquecidas, a qual é restringida pelas regiões adjacentes menos aquecidas, assim gerando deformações elásticas e plásticas não uniformes (ARAUJO, 2012).

O presente trabalho busca então obter o campo de temperatura de um processo de soldagem TIG autógeno (sem adição de material) utilizando a técnica de MEF através do programa *Ansys Workbench 17.0*. Além disso, uma revisão bibliográfica será realizada abordando todos os conceitos relacionados ao estudo, buscando encontrar resultados presentes na literatura similares aos encontrados pela simulação realizada no software.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Realizar uma simulação numérica, pelo método de elementos finitos, de um processo de soldagem no software *Ansys Workbench 17.0* comparando os resultados obtidos com os dados presentes na literatura.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre os assuntos relacionados ao tema em estudo;
- Buscar estabelecer os melhores parâmetros e condições para a realização do processo de soldagem TIG autógeno (sem adição de material) em uma chapa de aço AISI 316L;
- Desenvolver conhecimento acerca de simulações computacionais através do método de elementos finitos.

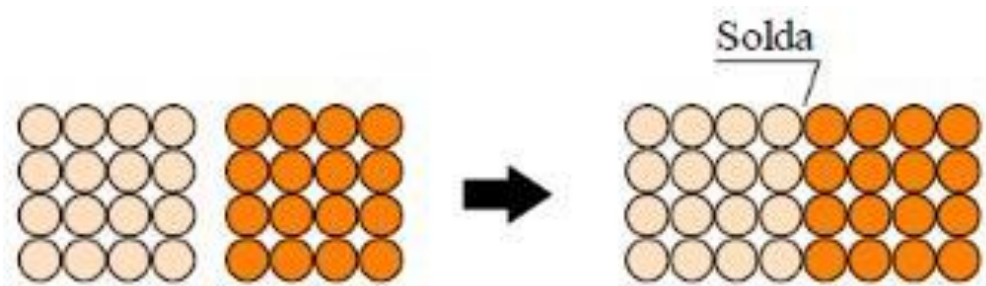
### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 SOLDAGEM

Conhecido como um dos principais processos de fabricação utilizados pela indústria, o processo de soldagem é definido pela Associação Americana de Soldagem (*American Welding Society*) como processo de união de materiais usado para obter a coalescência (união) localizada de metais e não-metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição. Tal definição representa apenas o caráter operacional da soldagem, e por isso também é possível definir tal processo de modo mais conceitual assim como Modenesi (2011), descrevendo o processo como uma operação que visa obter a união de duas ou mais peças, assegurando na junta a continuidade das propriedades físicas e químicas.

De maneira geral, uma peça metálica é um conjunto de átomos organizados em um arranjo espacial característico, também conhecido como estrutura cristalina. No seu interior, cada uma dessas partículas está separada das outras a uma certa distância, em que suas energias são mínimas. Nessas condições os átomos não tendem a ligarem-se a outros átomos, diferentemente do que acontece na superfície do sólido, onde há uma menor quantidade de ligações atômicas. Dessa maneira, ao redor do material, a energia atômica é maior, o que torna mais fácil a ligação desses átomos superficiais a outros. Levando em consideração tais aspectos, ao aproximarmos duas superfícies metálicas a uma distância em que esses átomos possam ligarem-se de maneira permanente, teríamos então a ocorrência de um processo de soldagem, como mostra a Figura 1 (MODENESI, 2011).

Figura 1 - Formação teórica de uma solda pela aproximação das superfícies das peças

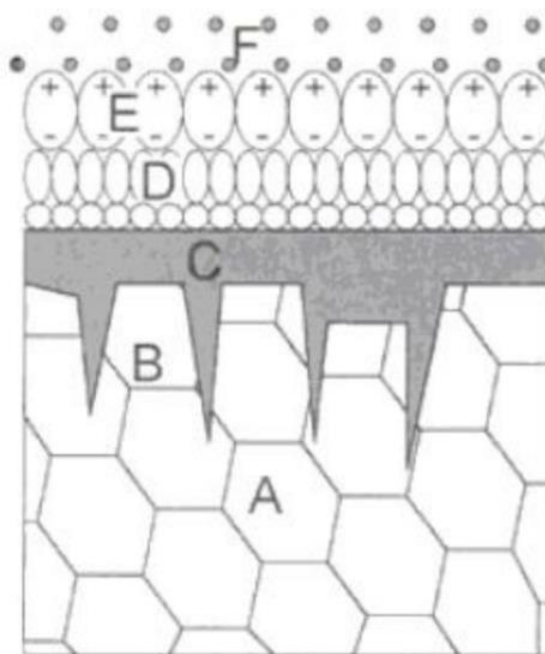


Fonte: Modenesi (2011)



Apesar de possível, para que tal fenômeno ocorra é necessário que haja uma aproximação entre as peças metálicas em uma escala microscópica, e alguns obstáculos podem impedir que uma distância efetiva entre os átomos seja alcançada. Algumas superfícies, mesmo que bem polidas, quando observadas em escala micro ou submicroscópicas continuam apresentando rugosidades, gerando um pequeno número de ligações, tornando insuficiente os pontos de contato entre os átomos prejudicando assim a resistência da junta. Outro fator que impede a formação da solda é a presença de camadas de óxidos, gordura, umidade e poeira que se ligam aos átomos da superfície da peça metálica como é visto na Figura 2 (MODENESI, 2011).

Figura 2 - Representação esquemática da estrutura de uma superfície metálica em contato com o ar. A - metal não afetado, B - metal afetado, C - camada de óxido, D - água e oxigênio absorvidos, E - gordura, F - partículas de poeira.

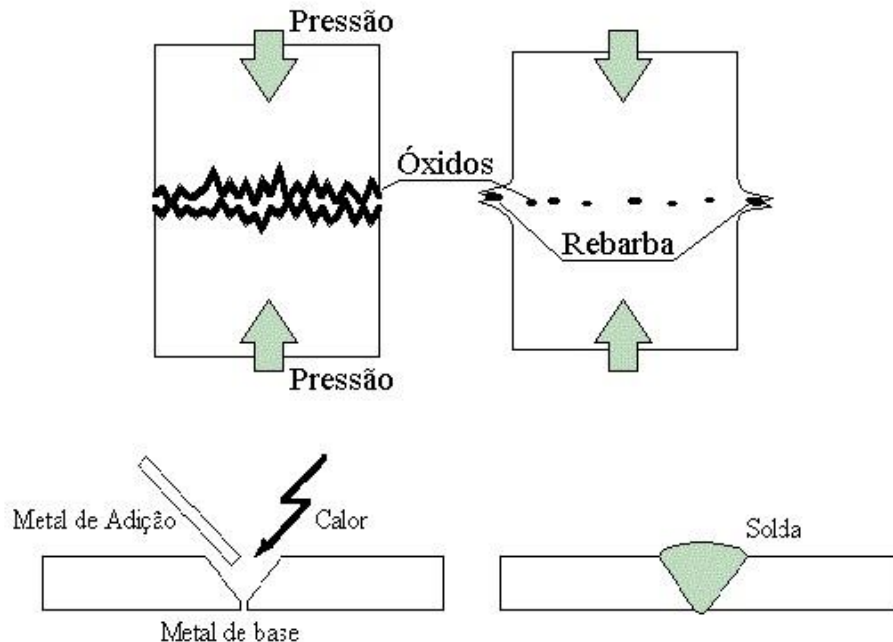


Fonte: Modenesi (2011)

Para evitar a ocorrência desses fenômenos, dois métodos são comumente usados para a união efetiva dos metais e são responsáveis por dividir a soldagem em dois grandes grupos. A soldagem por pressão é o primeiro método e consiste em pressionar uma superfície contra outra, tornando possível uma maior aproximação entre os átomos, possibilitando um grande número de ligações. O segundo método consiste em aplicar calor em uma região específica entre o metal

base e o metal de adição, formando uma massa de fusão que posteriormente se solidifica e forma a solda. Na Figura 3 estão ilustrados os dois métodos de soldagem.

Figura 3 – Soldagem por pressão e fusão



Fonte: Modenesi (2011)

Segundo Brandi (2004), os processos de soldagem por fusão são diversos e podem ser classificados levando-se em consideração, por exemplo, o tipo de fonte de energia usada para gerar o calor necessário para a união. Tais fontes podem ser:

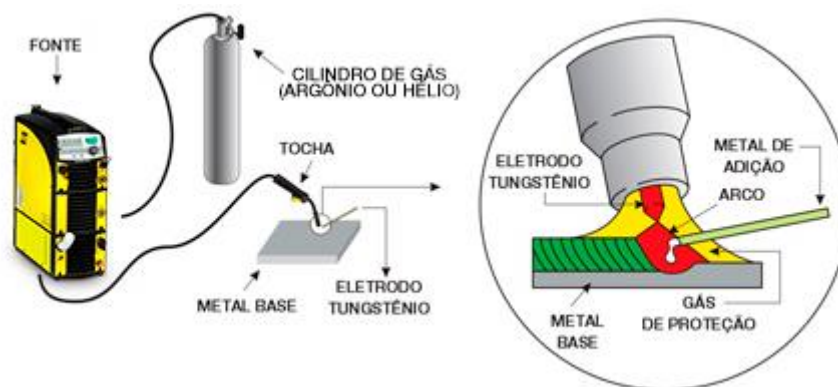
- Mecânica: Atrito, ondas de choque ou deformação plástica geram calor.
- Química: Reações exotérmicas, são responsáveis pela obtenção de calor.
- Elétrica: A passagem da corrente elétrica é responsável por gerar calor através do efeito Joule. Outra forma é através da formação de um arco elétrico, onde a movimentação das cargas gera calor.
- Radiante: O calor é gerado através por um feixe de elétrons ou através de um laser.

### 3.1.1 Processo de Soldagem TIG

Sendo um dos processos de soldagem por fusão mais comuns e utilizados pela indústria, o GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*), também conhecido como TIG (*Tungsten Inert Gas*), é um processo em que utiliza um eletrodo não consumível de tungstênio e um fluxo de gás inerte.

A poça de fusão forma-se entre o eletrodo e o material, podendo esse tipo de soldagem ocorrer com ou sem material de adição. A proteção gasosa da poça pode utilizar Hélio, Argônio ou uma mistura dos dois gases, protegendo tanto a poça de fusão quanto o eletrodo não consumível, evitando sua oxidação. A Figura 4 ilustra esse processo e os equipamentos utilizados.

Figura 4 - Ilustração do processo de soldagem TIG



Fonte: ESAB<sup>1</sup>

O processo TIG pode ser operado de forma manual ou automática, sendo a manual a mais utilizada. A possibilidade de controle independente da fonte de calor e do metal de adição permite a soldagem de peças de espessuras pequenas e também de difícil soldabilidade. O arco elétrico desse tipo de processo é considerado estável e suave, produzindo soldas que dispensam a necessidade de acabamentos, além de exigir pouca ou nenhuma limpeza ao final da operação. Apesar disso, a soldagem TIG mostra-se um processo lento e de custo elevado, sendo utilizada em situações em que a qualidade do processo é mais importante que o valor da operação. Devido a isso, esse processo é o mais utilizado na soldagem de alumínio, aços inoxidáveis, magnésio e titânio, utilizados em soldagem de alta precisão, além de passe raiz em tubulações de aço carbono (TEIXEIRA, 2011).

### 3.2 AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS

Os aços são ligas compostas por uma variedade de elementos químicos, que possuem alta resistência, ductilidade e tenacidade, características vantajosas para o setor industrial. Os aços inoxidáveis são resultado de uma mistura de ferro e cromo em uma concentração superior

<sup>1</sup>Disponível em: <[http://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo\\_soldagem\\_tig\\_gtaw.cfm](http://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo_soldagem_tig_gtaw.cfm)>. Acesso em: 03 Fev. 2018.

a 10%. Devido a suas características físico-químicas, esse tipo de material é amplamente utilizado pela indústria, apresentando grande resistência a corrosão e ótima soldabilidade, que o torna superior aos aços comuns. A adição de outros elementos de liga como silício, níquel e carbono modificam várias de suas características metalúrgicas, criando uma variedade de aços distintos (SILVA, 2017).

Os aços inoxidáveis podem ser classificados de acordo com sua microestrutura em:

- Aços inoxidáveis ferríticos;
- Aços inoxidáveis martensíticos;
- Aços inoxidáveis austeníticos;
- Aços inoxidáveis duplex;
- Aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação.

Segundo Modenesi (2001), os aços inoxidáveis austeníticos formam o maior grupo de aços inoxidáveis em uso, representando cerca de 65 a 70% do total produzido. Os aços inoxidáveis austeníticos do tipo 316L consistem de uma matriz de ferro-cromo-níquel, isto é, uma matriz de átomos de ferro cúbicos de faces centradas (CFC), com átomos em solução de inserção sólida (como carbono ou nitrogênio) e átomos em solução sólida de substituição (molibdênio, silício, manganês). Impurezas (enxofre, fósforo) também estão presentes em pequenas quantidades. Os limites de composição de 316L são dados na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição do aço 316L

| Composição | C    | Si  | Mn  | P     | S     | Cr | Ni   | Mo   | N    |
|------------|------|-----|-----|-------|-------|----|------|------|------|
| Mínimo     | 0    | 0   | 1,6 | 0     | 0     | 17 | 12   | 2,30 | 0,06 |
| Máximo     | 0,03 | 0,5 | 2   | 0,035 | 0,025 | 18 | 12,5 | 2,70 | 0,08 |

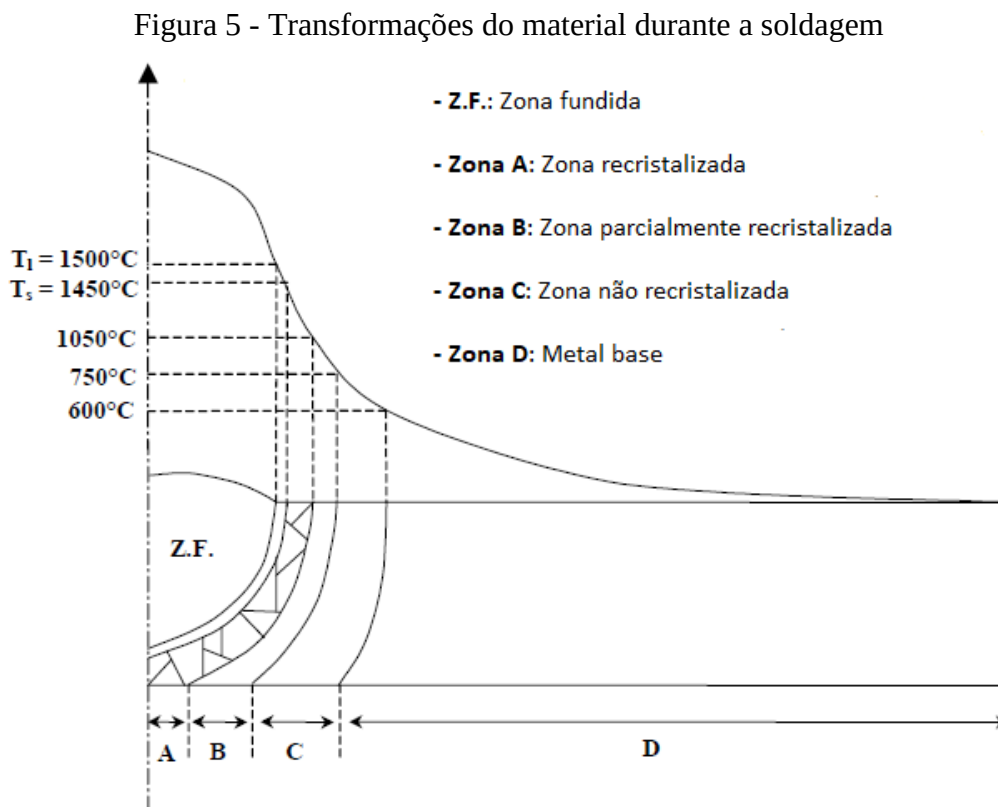
Fonte: Adaptado de Depradeux (2004)

### 3.2.1 Soldabilidade do aço 316L

Geralmente, os três principais processos utilizados pela indústria para a soldagem desse material são SMAW (Shielded Metal Arc Welding), GTAW (Gas-Shielded Tungsten Arc Welding) e GMAW (Gas Metal Arc Welding). O processo TIG é amplamente utilizado na soldagem de peças de aço inoxidável de menor espessura (MODENESI, 2011).

A soldabilidade do 316L, como a dos aços inoxidáveis austeníticos em geral, é excelente e garante soldas dúcteis de boa qualidade que, aliada a sua estrutura composta por ferrita e austenita elimina o risco de formação de martensita, evitando o aparecimento de trincas a frio. Durante o processo de soldagem, a microestrutura do material pode sofrer diversos tipos de alterações. Os aços inoxidáveis austeníticos, dado a sua natureza microestrutural, não sofrem rápido crescimento de grão a temperaturas elevadas. Assim, preaquecimentos e tratamentos térmicos tornam-se dispensáveis (BITTENCOURT, 1985).

A Figura 5 mostra as diferentes zonas metalúrgicas de uma junta soldada 316L. A extensão das diferentes áreas mostradas na Figura 5 dependem dos parâmetros de soldagem (e o processo utilizado). O maior problema que pode surgir do ponto de vista metalúrgico quanto a soldagem é o crescimento de grãos austeníticos, considerado prejudicial as soldas. Considerando uma situação ideal, durante uma operação de soldagem, os parâmetros de soldagem são ajustados para garantir soldas de boa qualidade. Mas em alguns casos, a soldagem a arco elétrico utilizando muitos passes (na indústria nuclear, algumas seções são soldadas com mais de 100 passagens), a permanência em altas temperaturas pode levar a algum tipo de problema (DEPRADEUX, 2004).



Fonte: Adaptado de DEPRADEUX (2004)

### 3.3 ANÁLISE TÉRMICA DE SOLDAGEM

Para vários materiais e projetos de juntas soldadas, o conhecimento do campo de temperaturas, aliado a composição química e cinética de transformação, são importantes ferramentas utilizadas para caracterizar a microestrutura presente na zona fundida (ZF) e na zona afetada (ZAC). Nos processos de soldagem por fusão, a fonte de calor gera um campo de temperaturas transiente responsável por modificar a microestrutura do material por solidificação, recristalização, crescimento de grão e transformações de fase. A microestrutura controla as propriedades térmicas e mecânicas do material soldado (GOLDAK; AKHLAGHI, 2005).

Segundo Incropera e Dewitt (2007), a equação de difusão de calor é não-linear, pois as propriedades termofísicas dos materiais são dependentes da temperatura. Assim temos que a equação 1, representa a condução do calor:

$$\rho(T)c(T)\frac{\partial T}{\partial t} = Q + \frac{\partial}{\partial x}(K_x(T)\frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_y(T)\frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_z(T)\frac{\partial T}{\partial z}) \quad (1)$$

onde  $\rho(T)$  ( $\text{kg/m}^3$ ) é a densidade,  $c(T)$  ( $\text{J/kg.K}$ ) é o calor específico,  $Q$  ( $\text{W}$ ) é a entrada de calor,  $K_x(T)$ ,  $K_y(T)$  e  $K_z(T)$  ( $\text{W/m.K}$ ) são os coeficientes de condutividade térmica nas três direções,  $T$  ( $\text{K}$ ) é a temperatura e  $t$  ( $\text{s}$ ) é o tempo.

Para que ocorra a união entre materiais em um processo de soldagem, a temperatura de fusão precisa ser alcançada. Logo, a variação da entalpia deve ser levada em consideração. A Equação 2 expressa a entalpia como:

$$H = \int \rho(T)c(T)dT \quad (2)$$

onde  $H$  ( $\text{W}$ ). Para que a influência do calor latente de fusão seja levada em consideração, a equação da difusão de calor pode ser reescrita em função da entalpia como:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = Q + \frac{\partial}{\partial x}(K_x(T)\frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_y(T)\frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_z(T)\frac{\partial T}{\partial z}) \quad (3)$$

Os softwares de elementos finitos são capazes de simular automaticamente os efeitos da variação de entalpia, não sendo necessário que o programa calcule ou insira valores numéricos, exigindo menos potência computacional no processo (SOUZA, 2016).

Os processos de soldagem que utilizam um arco elétrico como fonte de energia estão sujeitos a uma diferença de potencial  $U$  (V) entre o eletrodo e a peça a ser soldada. Esse arco é percorrido por uma corrente  $I$  (A), e a multiplicação de ambos os parâmetros nos fornece a potência total gerada. Devido a fenômenos como convecção e radiação, uma parcela da potência do arco elétrico é dissipada, exigindo assim que um fator de rendimento  $\eta < 1$  seja adotado. Esse fator de rendimento é também conhecido como eficiência do arco. A equação 4 mostra que a entrada real de calor pode ser expressa da seguinte maneira:

$$Q = \eta UI \quad (4)$$

A dificuldade de quantificar com precisão as perdas de energia no processo de soldagem, ocasionam desvios nos resultados da equação. Uma das principais fontes de erro reside no fato de se considerar o rendimento térmico ( $\eta$ ) constante para cada processo, independentemente dos parâmetros de soldagem. De acordo com Modenesi (2011) as variações dos valores de  $\eta$ , variam de acordo com os dados mostrados na Tabela 2:

Tabela 2 - Rendimento térmico dos processos de soldagem

| Processo de Soldagem | ( $\eta\%$ ) |
|----------------------|--------------|
| TIG (CC-)            | 0,50 – 0,80  |
| TIG (CC+)            | 0,20 - 0,50  |
| Eletrodo Revestido   | 0,70 - 0,90  |
| Arco Submerso        | 0,85 - 0,98  |
| Laser                | 0,005 – 0,70 |

Fonte: Modenesi (2011)

Segundo Santos (2016), as perdas de calor para o ambiente através da convecção e radiação são utilizadas como condições de contorno no processo de simulação computacional de soldagem. Tais fenômenos podem ser estimados através das seguintes equações:

$$q_c = h(T - T_\infty) \quad (5)$$

onde  $q_c$  (W/m<sup>2</sup>) é o calor perdido por convecção,  $h$  (W/m<sup>2</sup>K) é o coeficiente de convecção,  $T$  (K) é a temperatura da superfície da peça e  $T_\infty$  (K) é a temperatura ambiente

$$q_r = \varepsilon \sigma (T^4 - T_\infty^4) \quad (6)$$

onde  $q_r$  (W/m<sup>2</sup>) é o calor perdido através da radiação,  $\varepsilon$  (J/K) é a emissividade da superfície do corpo e  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann.

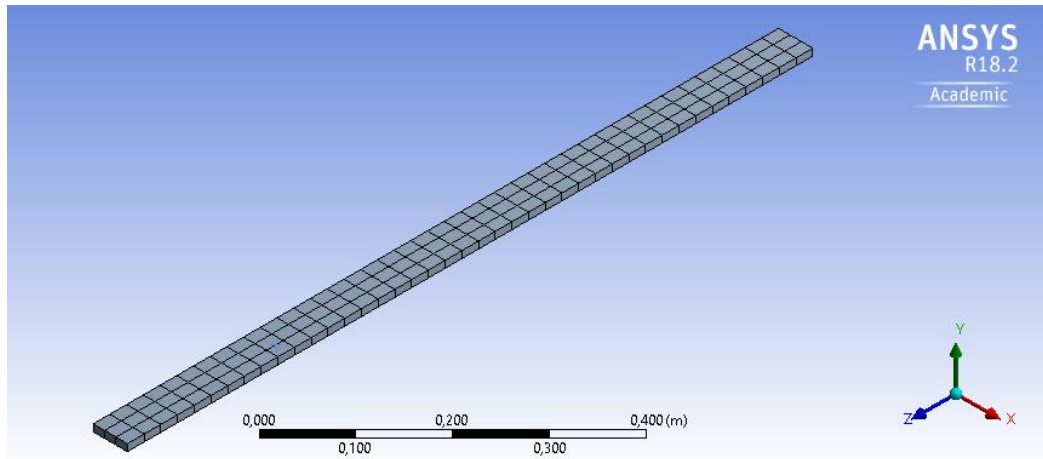
### 3.4 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)

A partir da segunda metade do século XVIII, Gauss propôs a utilização de funções aproximadas para resolver problemas matemáticos, criando uma alternativa diferente do método analítico. Apesar do desenvolvimento do método, somente por volta de 1950, com o desenvolvimento da computação, é que o método numérico pôde ser usado para a resolução de problemas mais complexos. Em 1960, Turner, Clough, Martins e Topp, utilizaram pela primeira vez o termo Método dos Elementos Finitos, descrevendo a técnica após usa-la em projetos estruturais de aviões (LOTTI, 2006).

O Método dos elementos finitos (MEF) é um procedimento matemático que utiliza uma análise numérica afim de obter soluções aproximadas para equações diferenciais. O MEF foi criado inicialmente com o intuito de resolver problemas relacionados a mecânica estrutural, mas atualmente é aplicado em larga escala a diversas outras áreas ligadas a engenharia. De maneira geral, o método faz a divisão do domínio de integração em um número finito de pequenas regiões chamadas de elementos finitos. O conjunto de tais elementos é denominado de meio discretizado, malha ou rede de elementos finitos e os pontos que os ligam uns aos outros são definidos nós (ASSAN, 2003). A Figura 6 ilustra um meio continuo discretizado para a análises através do MEF.



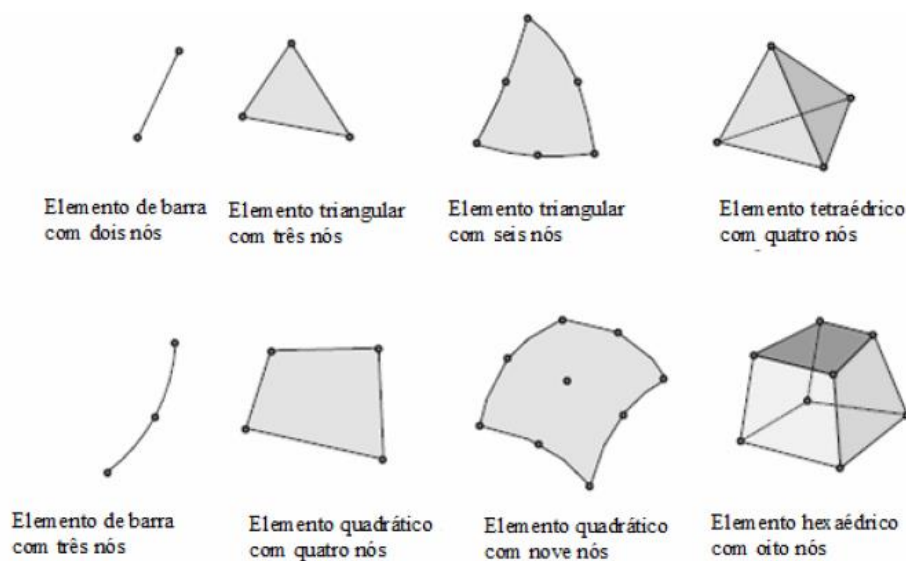
Figura 6 - Representação de um corpo discretizado



Fonte: Autoria própria (2018)

A construção de uma malha é um fator crucial para que bons resultados sejam obtidos através do MEF. Os elementos que compõem a malha podem possuir diversos tamanhos, formatos e números de nós, onde tais variáveis influenciarão nas equações responsáveis por gerar as soluções aproximadas dos problemas analisados. Levando em consideração tais fatores, alguns tipos de elementos foram criados para serem utilizados na construção das malhas. A Figura 7 exibe algumas das geometrias mais comuns utilizadas pelo Método dos Elementos Finitos (KULAZI, 2007).

Figura 7 - Geometrias comumente utilizadas pelo MEF



Fonte: Kulazi (2007)

De acordo com Kulazi (2007) a escolha da geometria, tamanho e quantidade de elementos é um fator determinante na precisão do MEF. Por se tratar de um método que busca resultados por meio de aproximações, para que haja a convergência entre os valores reais e simulados, uma malha considerada consistente deve apresentar elementos que, ao tenderem a um tamanho infinitesimal e infinitos números de nós, resultem em uma solução exata para o problema.

### **3.4.1 Método dos elementos finitos aplicado a soldagem**

A grande complexidade de se estabelecer aproximações empíricas para a modelagem do comportamento dos materiais no processo de soldagem, vem incentivando diversos esforços da comunidade científica para estabelecer outras formas de se obter resultados satisfatórios. Segundo Depradeux (2004) o primeiro método desenvolvido para a resolução do problema térmico de soldagem consiste em utilizar uma técnica analítica, que considera uma fonte de calor concentrada. Tal método busca solucionar a equação de transferência de calor por condução, na qual a fonte de calor se movimenta ao longo de uma peça (BEZERRA, 2006).

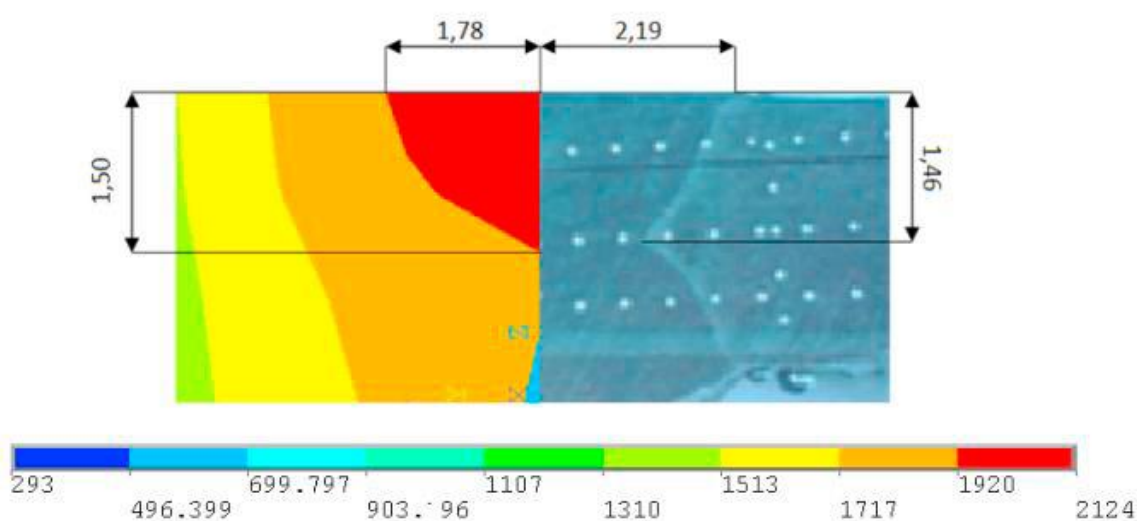
Apesar de serem considerados consistentes quando o tamanho da zona fundida é muito pequena em comparação ao tamanho da peça, o método analítico tornasse muitas vezes inviável para a análise de problemas mais complexos. Como alternativa matemática para a resolução de tais problemas, soluções numéricas foram desenvolvidas para contornar tais dificuldades. Dentre tais métodos numéricos, o MEF tem sido difundido no meio científico para a simulação de soldagem (DEPRADEUX, 2004).

A análise via elementos finitos do processo de soldagem ocorre normalmente em duas etapas: uma análise térmica e posteriormente uma estrutural. Francis (2002) destaca que ao desprezar os efeitos mecânicos dissipativos, as mudanças no estado mecânico não afetam o estado térmico, em contrapartida o oposto não ocorre, estabelecendo a necessidade de realizar inicialmente uma análise térmica do processo de soldagem. A obtenção do campo de temperatura transiente, encontrado na primeira simulação, é utilizado posteriormente na segunda análise, sendo aplicado ao modelo estrutural para a aquisição de tensões residuais presentes do processo de soldagem.

Com o avanço da tecnologia computacional vários softwares foram desenvolvidos baseados no Método de Elementos Finitos. Alguns programas como o ANSYS e o ABAQUS,

possibilitam que os usuários realizem diversos tipos de simulações, incluindo a de soldagem, tornando o processo de simulação viável. Almeida, Martins e Cardoso (2017) realizaram uma simulação no software ANSYS comparando os resultados obtidos com dados experimentais. O processo de soldagem TIG em uma placa de aço AISI 316L foi escolhido pelos autores e os resultados estão presentes na Figura 8.

Figura 8 - Comparação entre resultados numéricos e experimentais (dimensões em milímetros e escala de temperatura em Kelvin)

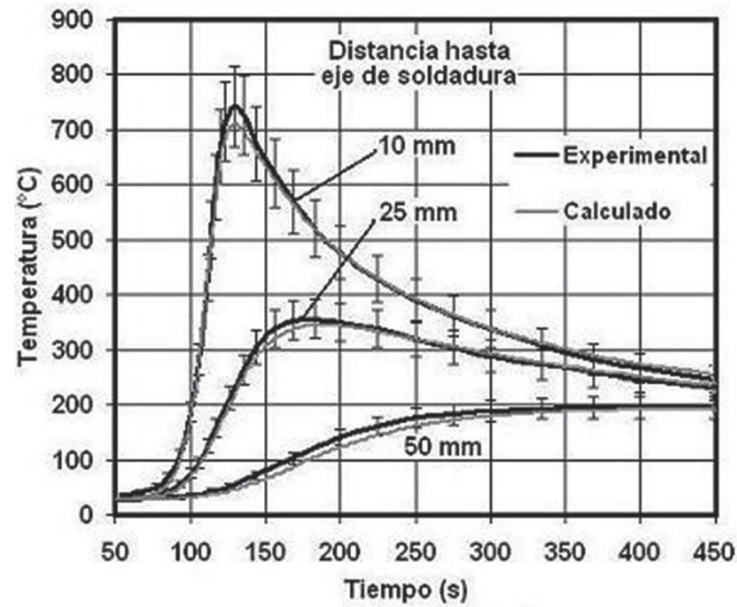


Fonte: Almeida, Martins e Cardoso (2017)

Como exibido na Figura 8, a semelhança entre as poças de solda obtidas através do método numérico e experimental pode ser considerada satisfatória, levando em consideração que o erro entre a amostra real e numérica descrita por Almeida, Martins e Cardoso (2017) foi de apenas 2,7% no primeiro passe da solda e de 2,6% para o segundo passe.

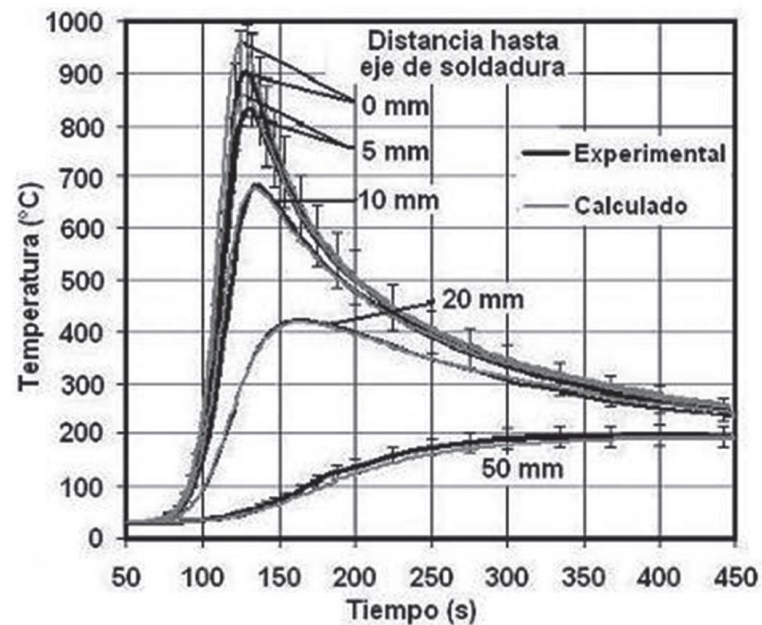
Outros resultados importantes também podem ser obtidos através da de simulações de soldagem. Morejón et al. (2011) obtiveram resultados dos campos de temperaturas situados ao redor da solda de uma placa de aço 316L. Os valores encontrados foram comparados com resultados experimentais presentes na literatura e apresentaram similaridades entre si. As Figuras 9 e 10 mostram gráficos comparando os ciclos térmicos numéricos e experimentais. No primeiro caso são avaliados os ciclos que agem na face superior da placa. No caso seguinte, a parte inferior é exibida. Em ambos os casos é notável a convergência dos resultados, comprovando mais uma vez a confiabilidade do Método de Elementos Finitos para simulação desse tipo de fenômeno.

Figura 9 - Ciclos térmicos da face superior situados a 10, 25 e 50mm da solda. Barras de erro de  $\pm 10\%$ .



Fonte: Morejón et al. (2011)

Figura 10 - Ciclos térmicos da face inferior situados a 0, 5, 10, 20 e 50mm da solda. Barras de erro de  $\pm 10\%$ .



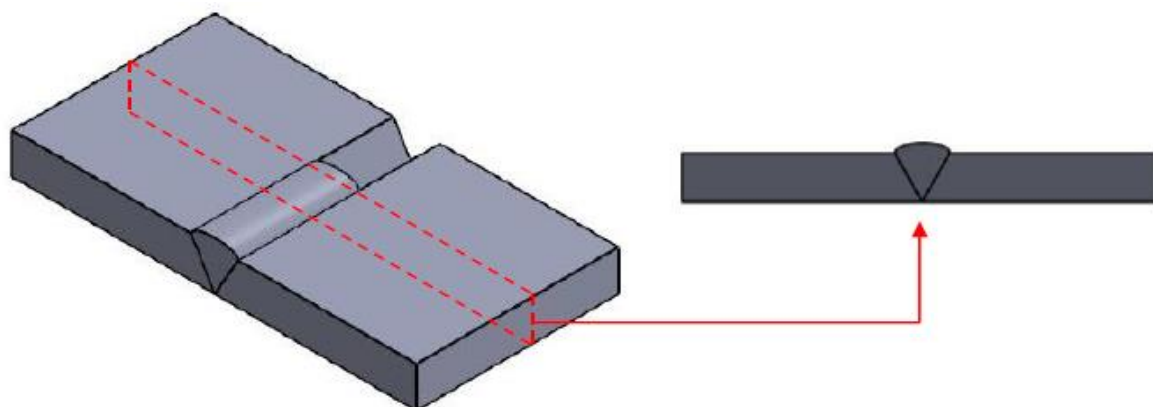
Fonte: Morejón et al. (2011)

### 3.4.2 Modelos 2d e 3d de elementos finitos

A modelagem de problemas utilizando o Método de Elementos Finitos envolvem uma serie de critérios para a realização de uma análise térmica e uma delas é a capacidade computacional requerida. Apesar dos avanços tecnológicos e desenvolvimento do desempenho dos computadores, problemas complexos exigem um tempo elevado para a obtenção de resultados. Simulações de processos de soldagem podem ser realizadas utilizando modelos tanto bidimensionais quanto tridimensionais (BARBAN, 2014).

Segundo Wentz (2008), modelos tridimensionais apresentam melhor convergência com resultados experimentais, onde diversos tipos de análises levam em consideração transformações de fase, deformações normais e cisalhantes. Apesar de apresentarem algumas limitações, simplificações bidimensionais podem ser aplicadas em várias análises, especialmente em chapas consideradas finas, diminuindo a exigência de máquinas de custo elevado para a realização da simulação. A Figura 11 mostra um exemplo de simplificação bidimensional.

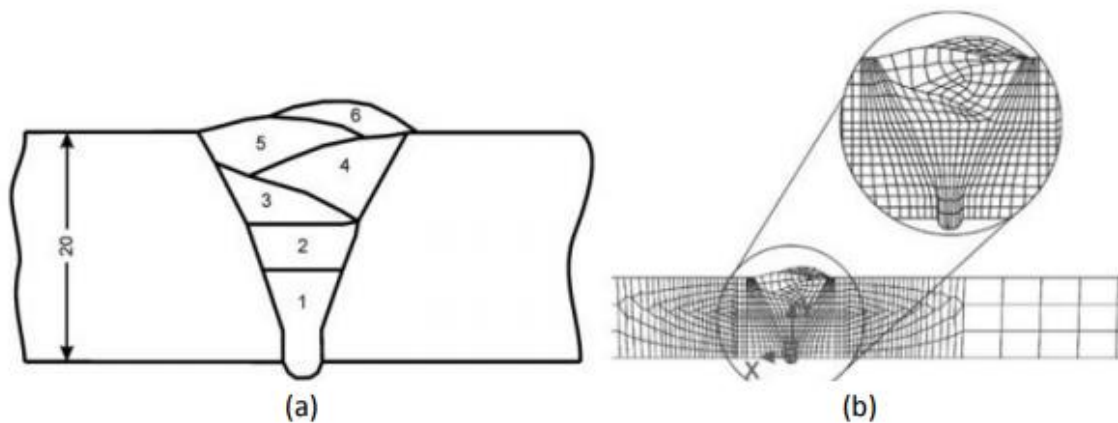
Figura 11 - Representação de simplificação bidimensional



Fonte: Adaptado de Barban (2014)

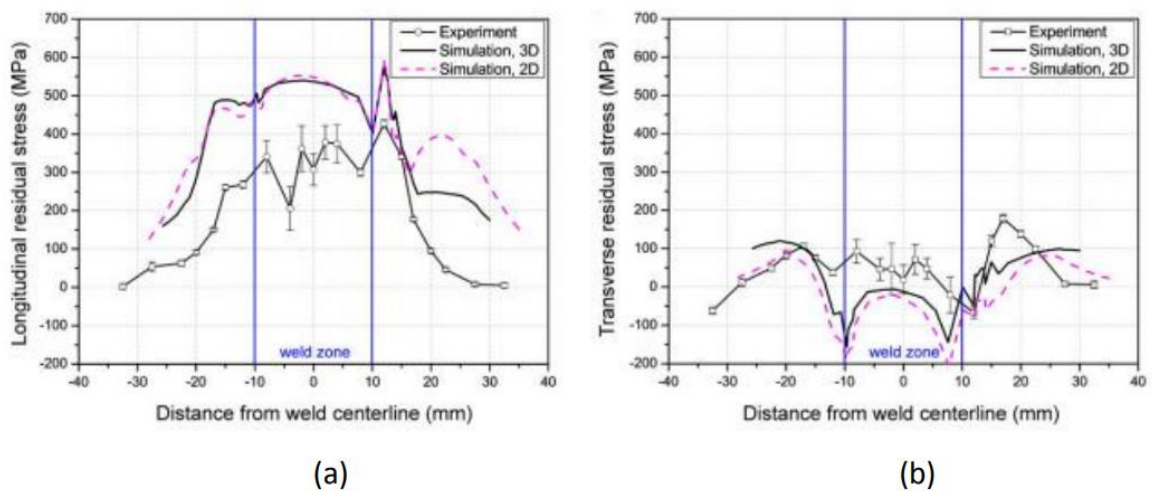
Heinze, Schwenk e Rethmeier (2012) simularam no programa SYSWELD v2010 uma soldagem multipasse de uma chapa de aço estrutural de 20mm de espessura. Modelos 2D e 3D foram utilizados a fim de se obter tensões residuais decorrentes do processo, considerando as propriedades do aço estrutural dependentes da temperatura e de suas respectivas transformações de fase. A Figura 12 apresenta a disposição dos cordões de solda e a malha utilizada no modelo bidimensional. Na Figura 13 é possível observar a comparação entre análises experimentais, 2D e 3D.

Figura 12 - Modelagem do cordão de Solda



Fonte: Heinze, Schwenk e Rethmeier (2012)

Figura 13 - Tensões residuais medidas experimentalmente e simuladas com modelos 2D e 3D



Fonte: Heinze, Schwenk e Rethmeier (2012)

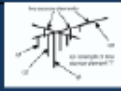
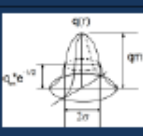
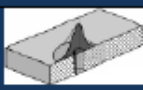
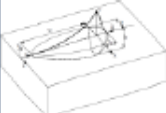
A comparação dos modelos 2D e 3D, mostraram boa convergência com os resultados de testes experimentais, demonstrando a aplicação de simplificações bidimensionais para cálculos de tensões residuais e consequentemente para encontrar o campo de temperaturas (MELO, 2014).

### 3.4.3 Modelo da Fonte de Calor

Para que haja boa convergência entre os resultados teóricos e simulados durante a análise térmica de um processo de soldagem, a escolha da modelagem de uma fonte de calor é extremamente importante. A complexidade de representar satisfatoriamente o fluxo de calor durante a simulação é objeto de estudo de vários pesquisadores, e diversos modelos tem sido desenvolvidos ao longo dos anos (SOUZA, 2016).

A Figura 14 destaca alguns dos modelos de fontes de calor desenvolvidos e seus respectivos autores.

Figura 14 - Evolução das geometrias adotadas para modelagem de fonte de calor

| 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)

Atualmente, um dos modelos mais adotados pela literatura para a representação da fonte de calor é o modelo de dupla elipsoide proposto por Goldak. A junção das elipsoides frontal e traseira assemelha-se a geometria do cordão de solda. As distribuições Gaussianas de densidade de potência em um elipsoide com centro em (0,0,0) e semieixos a, b, c paralelos ao referencial de coordenadas em movimento x, y,  $\xi$ , são representadas na Equação 7.

$$q(x, y, \xi) = q(0)e^{-Ax^2}e^{-By^2}e^{-C\xi^2} \quad (7)$$

Onde q(0) representa o valor máximo da densidade de potência no centro do elipsoide. A Equação 8 apresenta a equação da conservação de energia.

$$2Q = 2\eta UI = 8 \iiint_0^\infty q(0)e^{-Ax^2}e^{-By^2}e^{-C\xi^2} dx dy d\xi \quad (8)$$

Em que U é a diferença de potencial elétrico, I é a corrente elétrica e  $\eta$  é a eficiência da fonte de calor. Colocando q(0) em evidência, a Equação 4 pode ser reescrita como a Equação 9.

$$q(0) = \frac{2Q\sqrt{ABC}}{\pi\sqrt{\pi}} \quad (9)$$

Para determinação das constantes A, B e C, os semi-eixos da elipsoide a, b, c nas direções, x, y e  $\xi$  são definidos para que a densidade de potência reduza a 5% de q(0) na superfície da elipsoide. O fluxo de calor gerado pela fonte de calor traduz-se, pela lei da conservação de energia, em um aporte térmico na superfície dada pela Equação 10.

$$Q = q(0)\sqrt{\frac{\pi}{C}}L \quad (10)$$

Onde L representa a largura do cordão de solda (mm). Considerando que a uma distância, a, do centro do arco o fluxo de calor cai para 5% do seu valor máximo, é possível determinar o coeficiente de distribuição do fluxo de calor através da Equação 11. Na direção x, tem-se:

$$q(a, 0, 0) = q(0)e^{-Aa^2} = 0,05q(0) \quad (11)$$



Assim nas Equação 12, 13, e 14 tem-se:

$$A = \frac{\ln 20}{a^2} \cong \frac{3}{a^2} \quad (12)$$

$$B = \frac{\ln 20}{b^2} \cong \frac{3}{b^2} \quad (13)$$

$$C = \frac{\ln 20}{c^2} \cong \frac{3}{c^2} \quad (14)$$

Substituindo as constantes A, B, C e  $q(0)$  da Equação 10, na Equação 8, chega-se à Equação 15.

$$q(x, y, \xi) = \frac{6\sqrt{3}Q}{abc\pi\sqrt{\pi}} e^{\frac{-3x^2}{a^2}} e^{\frac{-3y^2}{b^2}} e^{\frac{-3\xi^2}{c^2}} \quad (15)$$

A transformação relacionada com um sistema de coordenadas fixo (x,y,z) e um sistema de coordenadas em movimento (x,y,  $\xi$ ), é dada pela Equação 16.

$$\xi = z + v(\tau - t) \quad (16)$$

Em que representa a coordenada na direção do cordão de solda com a origem fixada à fonte de calor em movimento. Considerando a transformação de coordenadas vista na Equação 16, aplica-se à elipsoide um sistema fixo de coordenadas.

$$q(x, y, \xi) = \frac{6\sqrt{3}Q}{abc\pi\sqrt{\pi}} e^{\frac{-3x^2}{a^2}} e^{\frac{-3y^2}{b^2}} e^{\frac{-3[z+v(\tau-t)]^2}{c^2}} \quad (17)$$

Quando  $\tau = t$  o sistema de coordenadas móvel coincide com o fixo. Assim, neste instante a fonte de calor encontra-se sobre a superfície de referência, e a distribuição da densidade de potência no quadrante frontal, pode ser descrita pela Equação 18.

$$q_f(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}Qf_f}{\pi\sqrt{\pi}c_1ba} e^{\frac{-3x^2}{c_1^2}} e^{\frac{-3y^2}{b^2}} e^{\frac{-3z^2}{a^2}} \quad (18)$$

Do mesmo modo, a distribuição da densidade de potência para o quadrante posterior é dada pela Equação 19.

$$q_r(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}Qf_r}{\pi\sqrt{\pi}c_2ba} e^{\frac{-3x^2}{c_2^2}} e^{\frac{-3y^2}{b^2}} e^{\frac{-3z^2}{a^2}} \quad (19)$$

Onde  $a$  é a metade da largura da elipsoide,  $b$  é a profundidade,  $c_1$  é o comprimento da elipsoide no quadrante frontal e  $c_2$  é o comprimento da elipsoide no quadrante posterior, como pode ser visto na Figura 14.

É necessária também a adoção de frações referentes à deposição de calor nos quadrantes em questão. Tem-se  $f_f$  e  $f_r$ , que são referentes às frações de calor respectivamente no quadrante frontal e no quadrante posterior (“front” e “rear”). A soma dessas frações é descrita pela Equação 20.

$$f_f + f_r = 2 \quad (20)$$

Outro modelo utilizado na modelagem de fontes de calor é do de “disco circular” proposto por Pavelic et al, que possui um fluxo térmico representado por uma distribuição Gaussiana. A equação 21 é apresentada como:

$$q(r) = q(0)e^{-Cr^2} \quad (21)$$

Onde  $q(r)$  é a distribuição superficial do fluxo de calor com raio  $r$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ),  $q(0)$  é o fluxo de calor máximo no centro da fonte de calor ( $\text{W}/\text{m}^2$ ),  $r$  é a distância radial a partir do centro da fonte de calor (m),  $C$  é o coeficiente de distribuição de fluxo ( $\text{m}^2$ ).

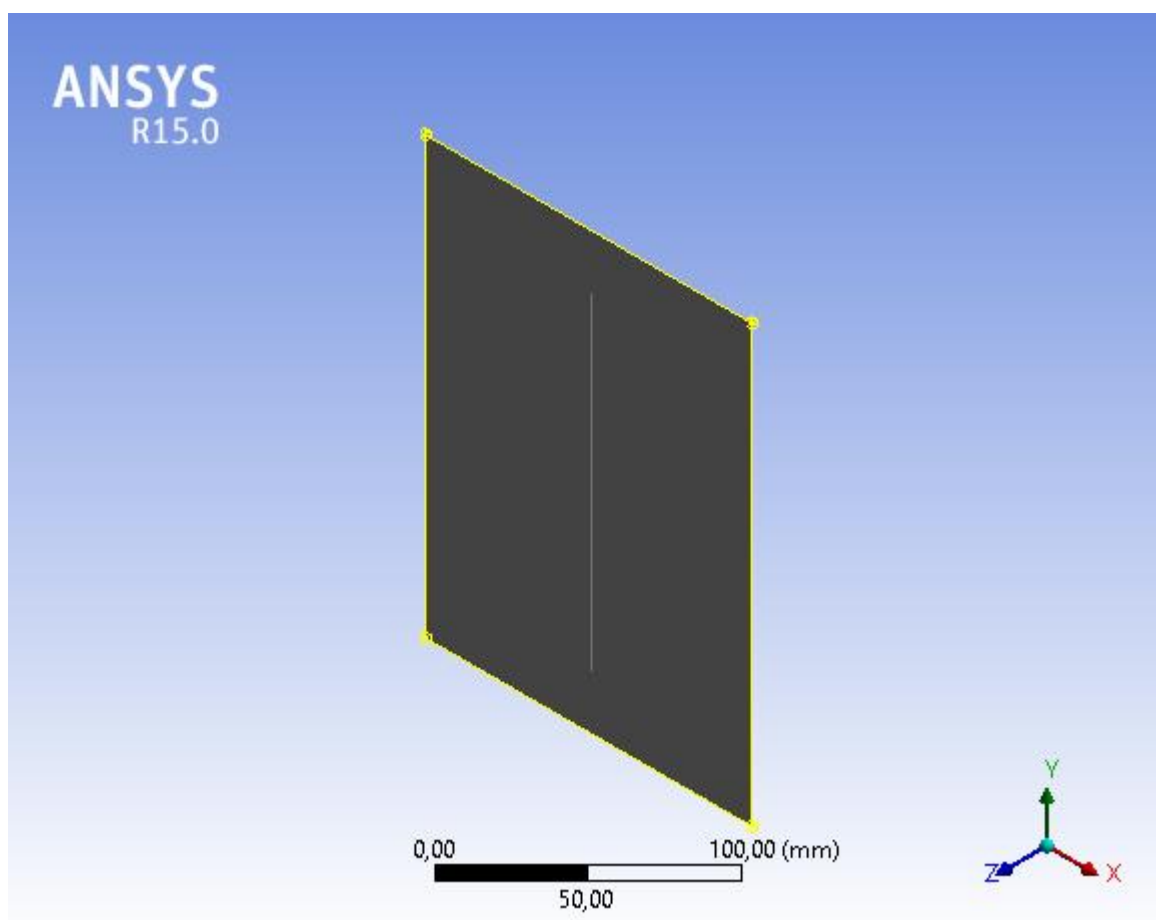
## 4 METODOLOGIA

A seguir serão descritos os dados, parâmetros e condições de contorno utilizados para a realização da simulação do processo de soldagem TIG autógeno, que visa obter os campos de temperatura de uma chapa de aço AISI 316L.

### 4.1 GEOMETRIA COMPUTACIONAL DO CORPO DE PROVA

A concepção do modelo utilizado na simulação foi adaptada dos trabalhos de Fraga (2009). O corpo de prova foi modelado no software *ANSYS WORKBENCH 17.0* através do *Design Modeler*. Suas dimensões foram de 150x200mm, com uma espessura de 3mm, com objetivo de não gerar diferenças nos campos de temperatura entre as faces superior e inferior. A Figura 15 mostra o design da chapa.

Figura 15 - Corpo de prova utilizado na simulação



Fonte: Elaborado pelo autor

## 4.2 PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DO MATERIAL

O *ANSYS WORKBENCH 15.0* apresenta uma série de materiais disponíveis em uma biblioteca, mas alguns tipos de aço, mais especificamente o AISI 316L, não estão disponíveis no software. Para contornar tais dificuldades o programa disponibiliza a possibilidade de criar diversos tipos de materiais inserindo os valores de suas propriedades. Para este trabalho as propriedades utilizadas para o aço AISI 316L foram retiradas do trabalho de Depradeux (2004), assim como mostra a Tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades Termofísicas dependentes da temperatura do aço AISI 316L

| <b>Temperatura<br/>(K)</b> | <b>Condutividade<br/>Térmica<br/>(W/m.K)</b> | <b>Densidade<br/>(kg/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Calor Específico<br/>(J/kg.K)</b> |
|----------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|
| 293                        | 14                                           | 8000                                    | 450                                  |
| 373                        | 15,2                                         | 7970                                    | 490                                  |
| 473                        | 16,6                                         | 7940                                    | 525                                  |
| 573                        | 17,9                                         | 7890                                    | 545                                  |
| 673                        | 19                                           | 7850                                    | 560                                  |
| 773                        | 20,6                                         | 7800                                    | 570                                  |
| 873                        | 21,8                                         | 7750                                    | 580                                  |
| 973                        | 23,1                                         | 7700                                    | 595                                  |
| 1073                       | 24,3                                         | 7660                                    | 625                                  |
| 1173                       | 26                                           | 7610                                    | 650                                  |
| 1273                       | 27,3                                         | 7570                                    | 660                                  |
| 1473                       | 29,9                                         | 7450                                    | 677                                  |

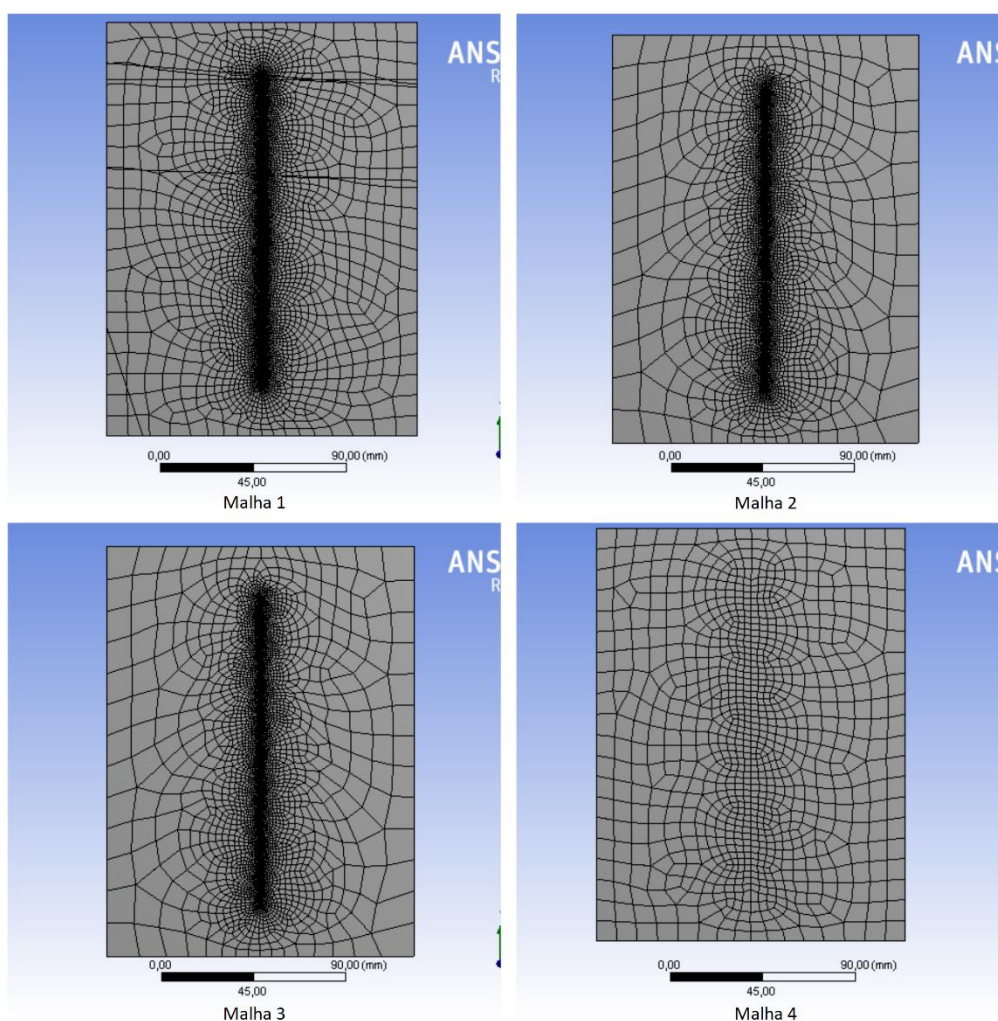
Fonte: Depradeux (2004)

### 4.3 SELEÇÃO DE MALHA

A escolha da malha é considerada uma das etapas mais importantes na simulação de soldagem. Para que resultados coerentes sejam obtidos, é necessário achar um ponto de equilíbrio entre a exigência computacional requerida para a simulação e o refino da malha. Quanto mais refinada a malha, mais os resultados irão convergir para um valor real, em contrapartida maior será a carga computacional requerida, aumentando o tempo necessário para a conclusão da simulação.

Visando encontrar uma boa correlação entre refino de malha e tempo de processamento, várias malhas foram criadas e testadas, afim de encontrar uma boa convergência entre os resultados. A Figura 16 mostra algumas das malhas geradas para a simulação.

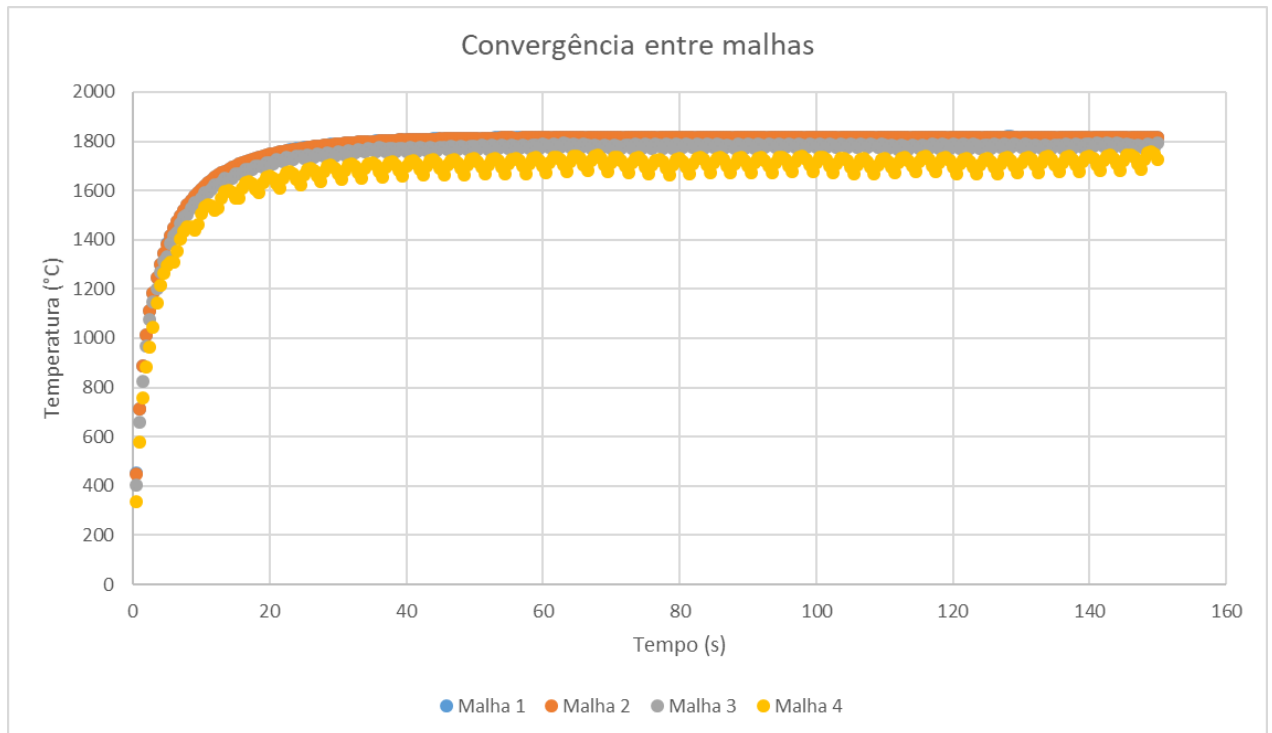
Figura 16 - Malhas geradas para a simulação



Fonte: Elaborado pelo autor

A malha 1 foi escolhida por apresentar um menor número de elementos em relação a malha 2, que possui quase o dobro, além de apresentar resultados muito próximos ao da malha mais refinada. A Figura 17, que apresenta a variação da temperatura com o tempo entre as malhas testadas

Figura 17 - Análise de convergência entre malhas



Fonte: Elaborado pelo autor

Como apresentado na Figura 16, os elementos que constituem a malha utilizada na simulação são prioritariamente quadriláteros, além de alguns poucos triângulos. A rotina utilizada para a criação da malha é apresentada na Figura 18.

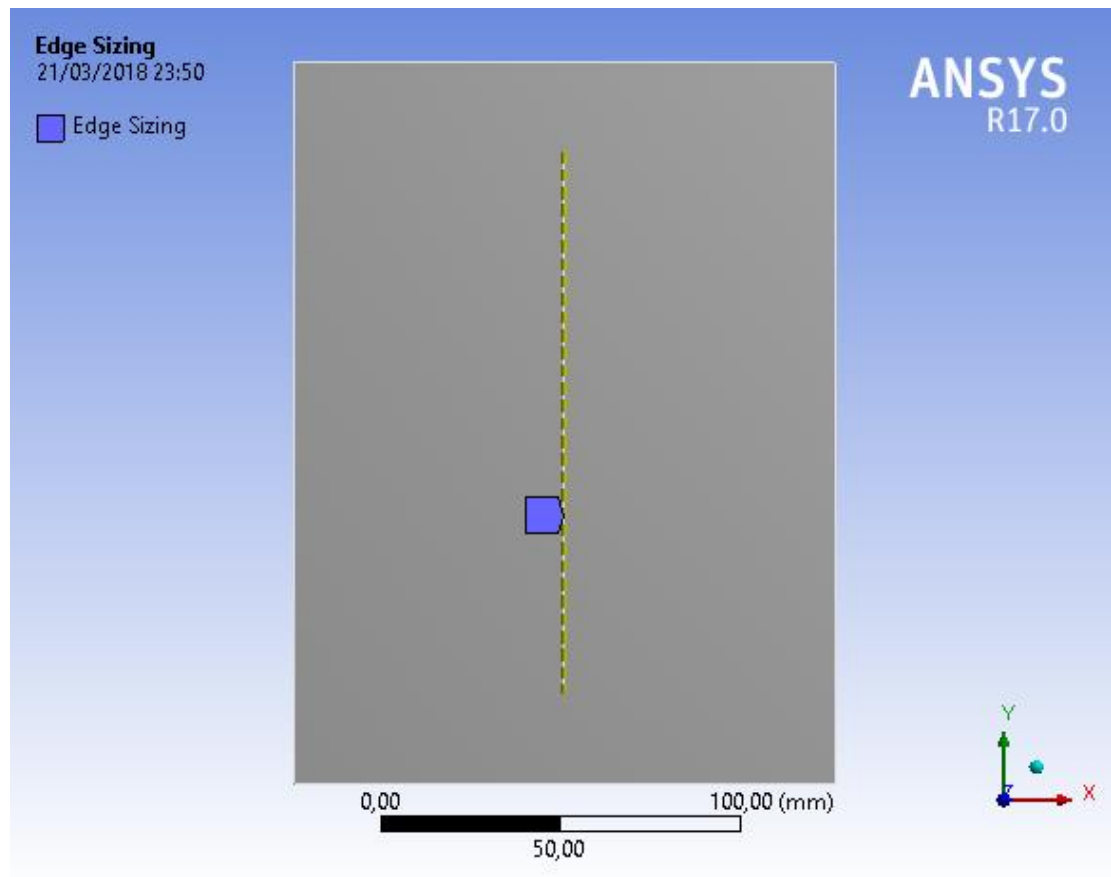
Figura 18 – Rotina para criação da malha



Fonte: Elaborado pelo autor

A primeira parte da rotina de criação da malha consistiu em definir o cordão de solda como a parcela mais refinada, utilizando o comando *Edge Sizing*. O cordão foi subdividido em 150 partes iguais. A Figura 19 apresenta a seleção do cordão de solda para aplicação da malha.

Figura 19 - Refinamento do cordão de solda



Fonte: Elaborado pelo autor

*Automatic Method*, foi responsável por transformar a malha em um conjunto de elementos quadriláteros, assim como nos trabalhos de Bezerra (2005), Depradeux (2004) e Morejon et Al. (2011).

*Refinement*, teve o objetivo de refinar um pouco mais a malha na região do cordão de solda. Essa ferramenta é responsável por ajudar a melhorar os resultados esperados ao fim da simulação, ajudando a simulação convergir a temperaturas mais coerentes com as citadas pela literatura.

Alguns outros fatores também estão relacionados a qualidade da malha gerada, e são designados pelo software *Ansys Workbench* 17.0 como *Skewness* e *Orthogonal Quality*. As Figuras 20 e 21 apresentam as faixas de valores que definem a qualidade desses dois parâmetros.

Figura 20 - Skewness



| Excellent | Very good | Good      | Acceptable | Bad       | Unacceptable |
|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|--------------|
| 0-0.25    | 0.25-0.50 | 0.50-0.80 | 0.80-0.94  | 0.95-0.97 | 0.98-1.00    |

Fonte: Ansys

Figura 21 - Orthogonal Quality



| Unacceptable | Bad        | Acceptable | Good      | Very good | Excellent |
|--------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|
| 0-0.001      | 0.001-0.14 | 0.15-0.20  | 0.20-0.69 | 0.70-0.95 | 0.95-1.00 |

Fonte: Ansys

Para a simulação realizada nesse trabalho os valores médios para *Skewness* e *Orthogonal Quality*, foram respectivamente de 0,17865 e 0,96546, que são considerados excelentes dentro dos parâmetros estabelecidos, comprovando mais uma vez a confiabilidade da malha gerada. A Figura 22 mostra mais algumas estatísticas geradas pelo software acerca da qualidade da malha, apresentando as variações dos máximas, mínimas, desvios e médias.

Figura 22 - Parâmetros de qualidade da malha gerada

| Mesh Metric                                 | Orthogonal Quality |
|---------------------------------------------|--------------------|
| <input type="checkbox"/> Min                | 0,49522            |
| <input type="checkbox"/> Max                | 1,                 |
| <input type="checkbox"/> Average            | 0,96546            |
| <input type="checkbox"/> Standard Deviation | 4,7548e-002        |
| Mesh Metric                                 | Skewness           |
| <input type="checkbox"/> Min                | 8,747e-004         |
| <input type="checkbox"/> Max                | 0,75589            |
| <input type="checkbox"/> Average            | 0,17865            |
| <input type="checkbox"/> Standard Deviation | 0,13298            |

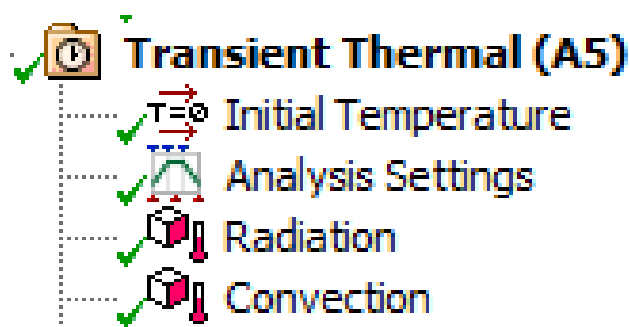
Fonte: Elaborado pelo autor



#### 4.4 CONDIÇÕES DE CONTORNO

Processos de soldagem envolvem três tipos de modos de troca de calor, são eles a condução, convecção e radiação. Durante a simulação, o fenômeno de condução é considerado automaticamente pelo software ao criar um material com características de não linearidade. Para o aço AISI 316L foi considerado um coeficiente de convecção  $h = 15$  (Bezerra, 2008). Na troca de calor por radiação, foi considerada uma emissividade constante de 0,14, valor considerado por Ôhman (1999), para um aço inoxidável. A Figura 23 apresenta as condições de contorno inseridas no software para a simulação.

Figura 23 - Condições de contorno



Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.5 PARAMETROS DE SOLDAGEM

Para a realização da simulação do processo de soldagem, parâmetros que representem as características do arco elétrico precisam ser determinados, afim de se obter um modelo da fonte de calor para utilização do software. Os valores da Figura 24 foram obtidos a partir do trabalho publicado por Depradeux (2004).

Figura 24 – Parâmetros de soldagem para simulação do aço 316L

| Corrente | Tensão | Rendimento | Velocidade de Soldagem |
|----------|--------|------------|------------------------|
| 150 A    | 10 V   | 70%        | 1 mm/s                 |

Fonte: Adaptado de Depradeux (2004)

O software possui uma extensão chamada *Moving Heat Flux*, responsável por gerar uma fonte de calor móvel que represente o arco elétrico. Esse plugin utiliza a equação 21 para representar a quantidade de energia fornecida a peça. Os dados fornecidos pela Figura 24 foram utilizados para o cálculo do fluxo de calor ( $\text{W/mm}^2$ ) e os demais valores inseridos na extensão são mostrados na Figura 25.

Figura 25 – Configuração da extensão *Moving Heat Flux*

| <b>Geometry</b>                 |                                              |
|---------------------------------|----------------------------------------------|
| Scoping Method                  | Geometry Selection                           |
| Geometry                        | 1 Face                                       |
| <b>Path</b>                     |                                              |
| Scoping Method                  | Geometry Selection                           |
| Geometry                        | 1 Edge                                       |
| <b>Start Point</b>              |                                              |
| Scoping Method                  | Geometry Selection                           |
| Geometry                        | 1 Vertex                                     |
| <b>Definition</b>               |                                              |
| Index                           | 1                                            |
| First Patch?                    | Yes                                          |
| Last Patch?                     | Yes                                          |
| Velocity                        | 1 [mm sec <sup>-1</sup> ]                    |
| Radius of the Beam              | 3 [mm]                                       |
| Source Power Intensity          | 18,56 [W mm <sup>-1</sup> mm <sup>-1</sup> ] |
| Start Time                      | 0 [sec]                                      |
| End Time                        | 150 [sec]                                    |
| Number of Segments              | 150                                          |
| Minimum Steps for Cooling Phase | 0                                            |
| Material Removal                | No                                           |

Fonte: Elaborado pelo autor

O valor definido como *Source Power Intensity* pode é o equivalente ao termo  $q(0)$  da equação 14, e pode ser calculado através da equação 22.

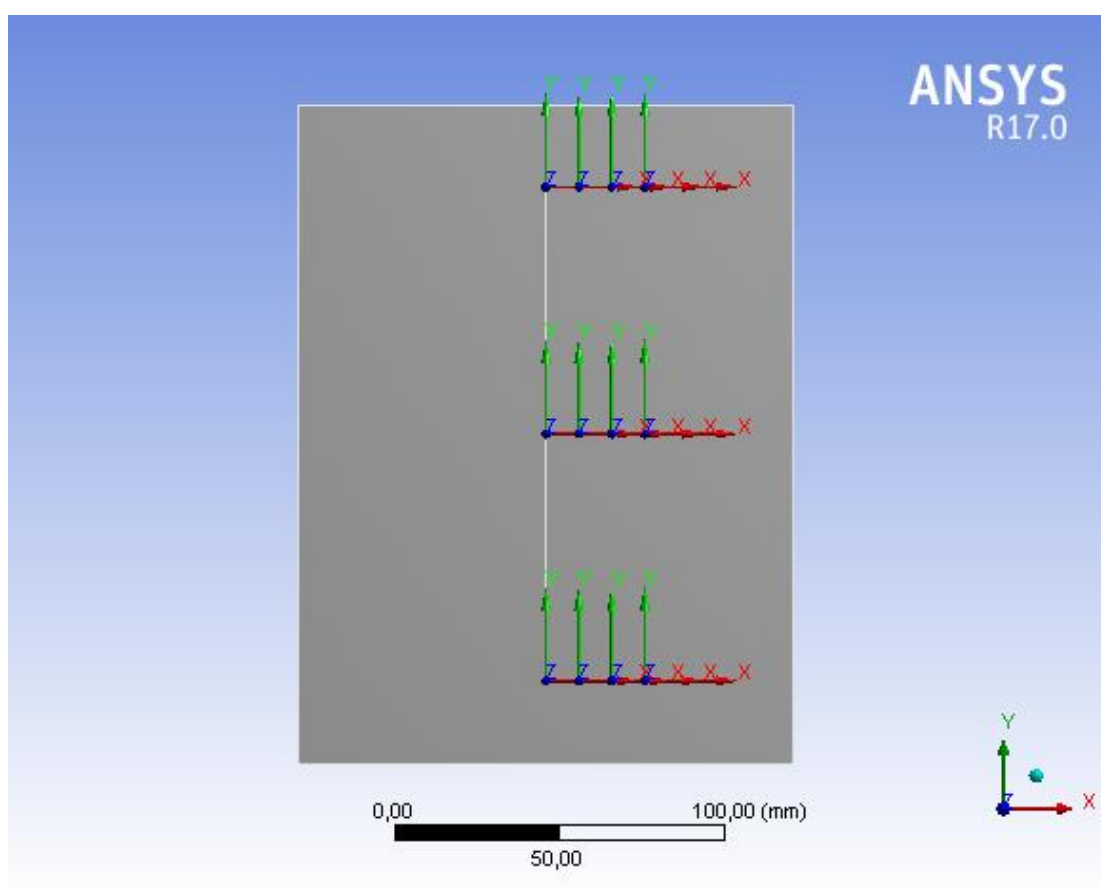
$$q(0) = \frac{\eta \cdot U \cdot I}{2\pi r^2} \quad (4)$$

Onde  $\eta$  é o rendimento do processo,  $U$  (A) a corrente,  $I$  (V) a tensão e  $r$  (mm) o raio da fonte de calor.

#### 4.6 MEDIÇÃO DE TEMPERATURA EM PONTOS ESPECÍFICOS DA PLACA

Analisar a temperatura em pontos localizados a várias distancias do cordão de solda, é uma importante ferramenta para verificar as zonas onde ocorre a fusão do metal da peça. Com o auxílio de sistemas de coordenadas criados sobre a placa e da função *Temperature Probe*, foram criados pontos no início, meio e fim do cordão de solda. Além disso, mais três pontos em cada uma dessas posições, a distâncias de 10mm, 20mm e 30mm, foram criados. A Figura 26 apresenta o posicionamento dos pontos criados para a medição de temperatura.

Figura 26 – Sistemas de coordenadas auxiliares utilizados para a criação de pontos sobre a placa



Fonte: Elaborado pelo autor

## 5 RESULTADOS

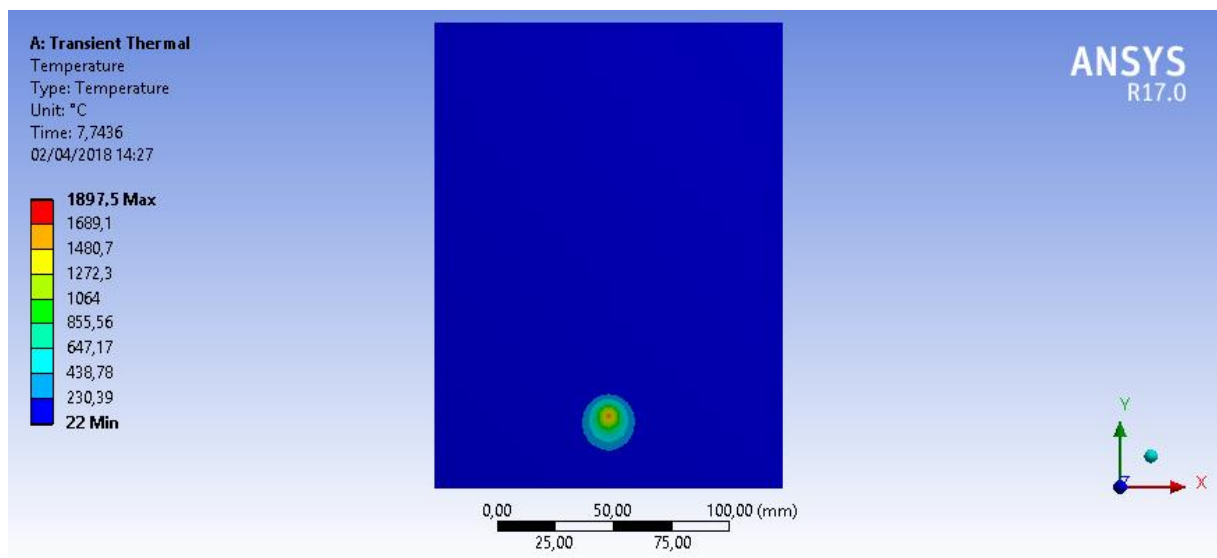
Os tópicos a seguir apresentam os resultados obtidos através da simulação do processo de soldagem TIG autógeno do aço inoxidável 316L. A simulação foi realizada no software *ANSYS Workbench 17.0*, utilizando o plugin *Moving Heat Flux 4.0*, levando cerca de 54 minutos e 22 segundos.

Os resultados obtidos através desse trabalho foram comparados com os dados obtidos nos trabalhos de Goldak (2005), Depradeux (2004) e Bezerra (2006).

### 5.1 DESLOCAMENTO DA FONTE DE CALOR

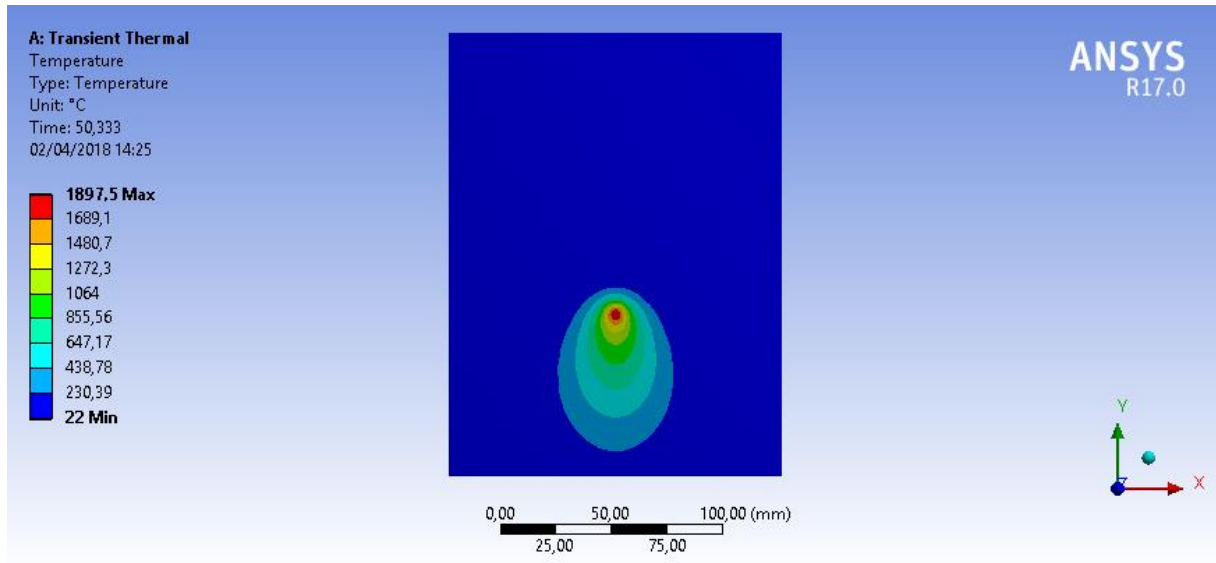
A simulação realizada neste trabalho gerou os campos de temperatura mostrados nas Figuras 27, 28, 29, 30 e 31.

Figura 27 - Simulação do deslocamento da fonte de calor, tempo de 7,7 segundos



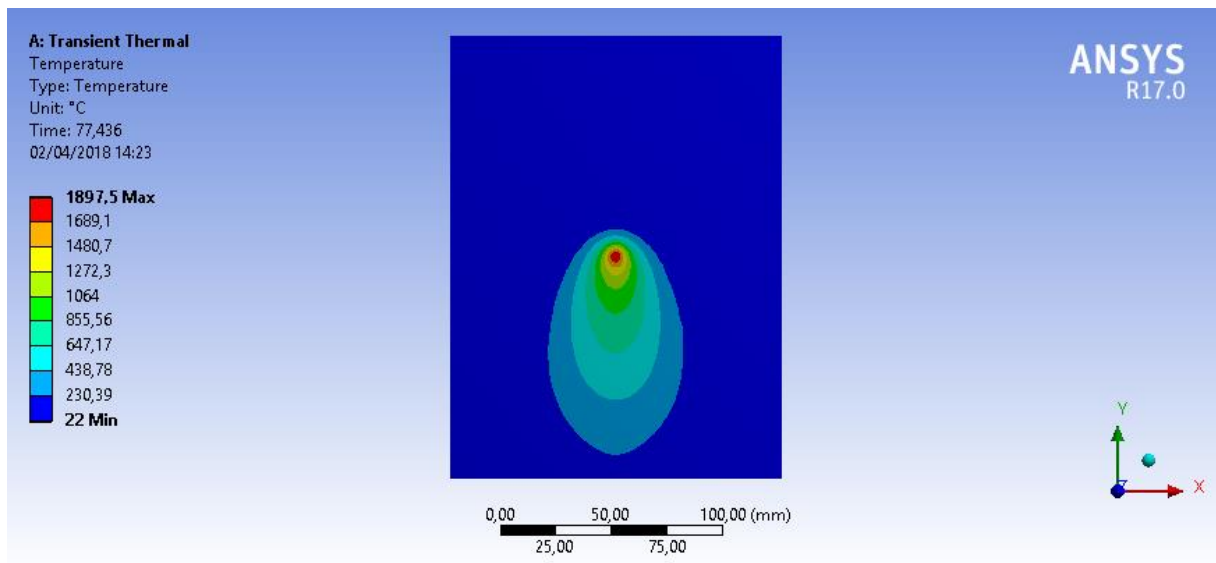
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 28 - Simulação do deslocamento da fonte de calor, tempo de 50,3 segundos



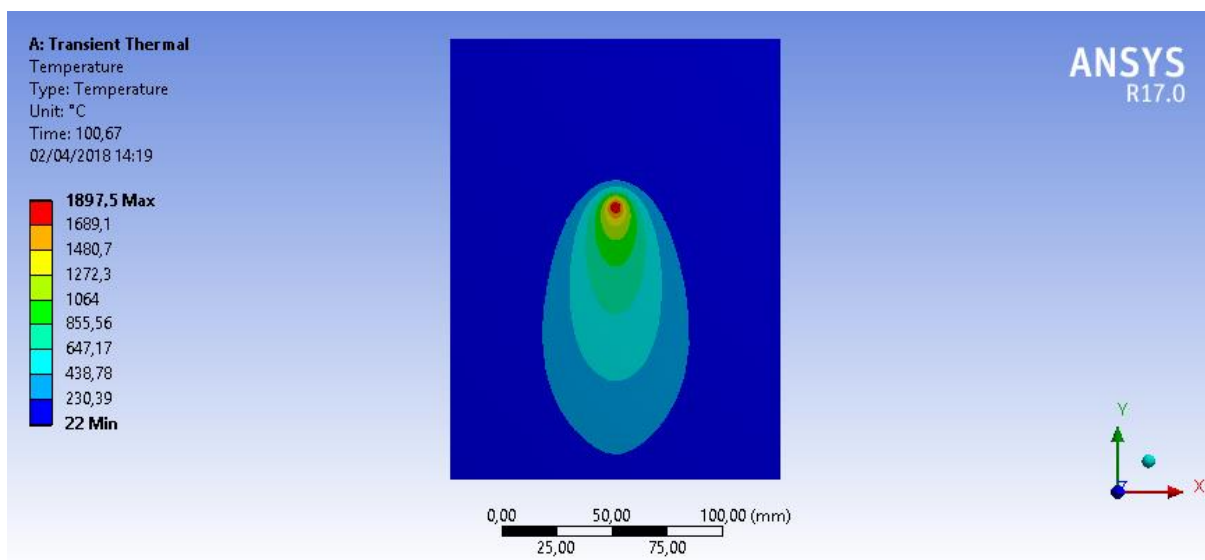
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 29 - Simulação do deslocamento da fonte de calor, tempo de 77,4 segundos



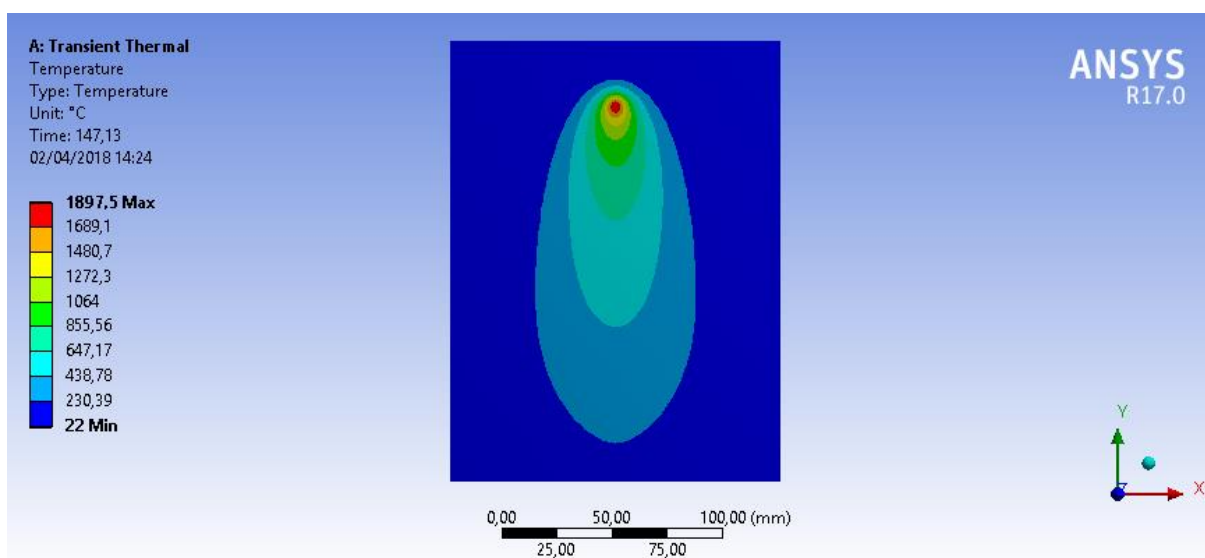
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 30 - - Simulação do deslocamento da fonte de calor, tempo de 100,7 segundos



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 31 - Simulação do deslocamento da fonte de calor, tempo de 147,1 segundos



Fonte: Elaborado pelo autor

Como é possível verificar nas imagens, com exceção da Figura 27, o centro do cordão de solda apresenta temperaturas nas faixas de 1689 °C a 1897 °C. De acordo com Depradeux (2004) e Bezerra (2006) a temperatura de fusão do aço inoxidável 316L está entre 1450 e 1500 graus, mostrando que as zonas vermelha e laranja das imagens representam as áreas fundidas do material. Os autores atingiram temperaturas similares em seus trabalhos, com temperaturas próximas a 2000 graus. As divergências entre os resultados explicam-se por haver diferenças

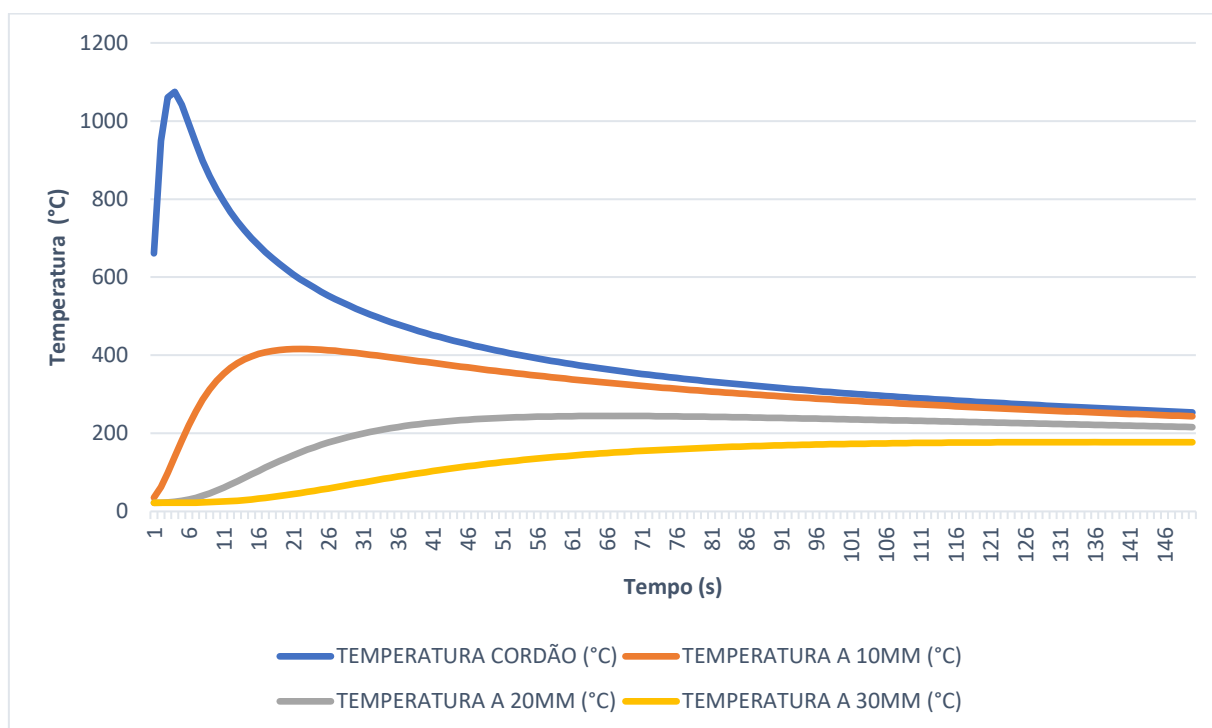
nas dimensões das placas usadas pelos autores em seus trabalhos, alterando o modo como o calor se dissipa no material.

Além das temperaturas apresentadas, outras semelhanças podem ser verificadas entre os resultados obtidos e a literatura. A geometria apresentada pelos gradientes de temperatura, mostraram-se coerentes com os apresentados por Goldak (2005), Bezerra (2006) e Depradeux (2007), evidenciando a passagem da fonte de calor adotada nessa simulação.

## 5.2 MEDIÇÕES DAS TEMPERATURAS EM DIFERENTES PONTOS DA CHAPA

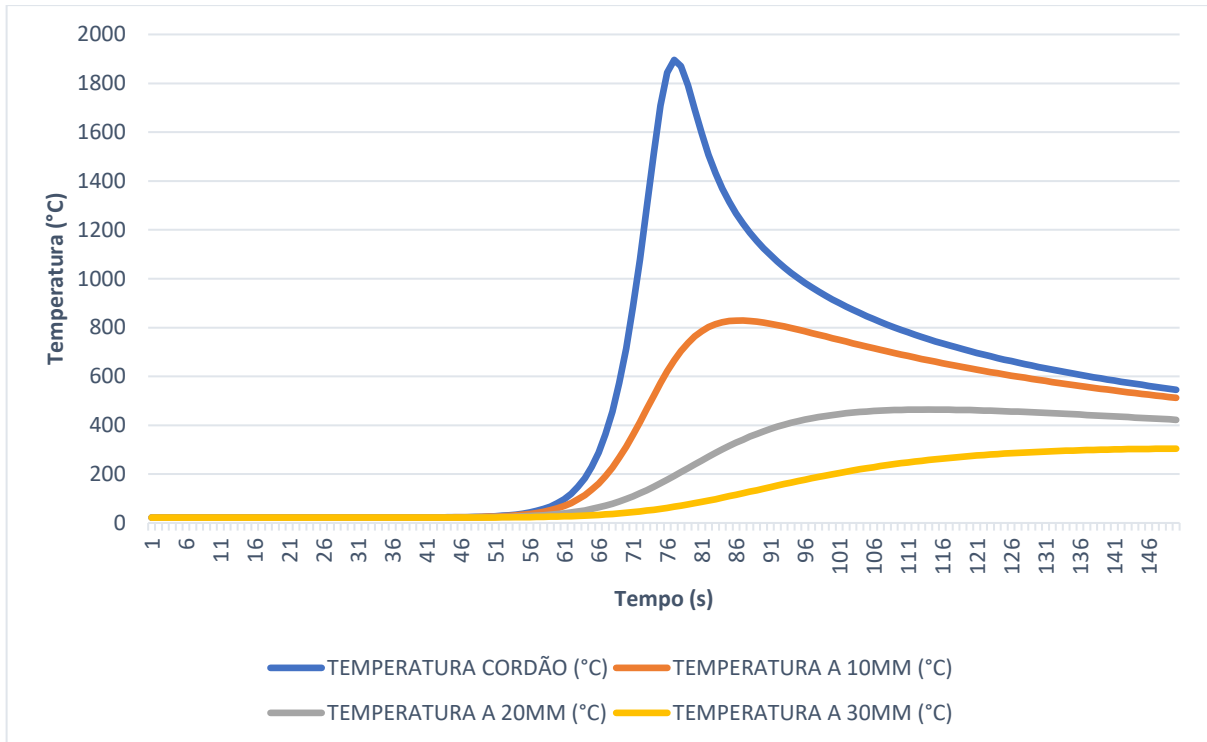
Após a simulação computacional do deslocamento da fonte de calor, foram retirados os valores de temperaturas com relação ao tempo, dos pontos mostrados de acordo com os tópicos apresentados na metodologia. Os pontos em questão estão localizados no início, meio e fim do cordão de solda, a uma distância de 0, 10, 20 e 30 mm do centro da poça fusão. As Figuras 32, 33 e 34 apresentam os ciclos térmicos obtidos na simulação.

Figura 32 – Ciclos térmicos localizados no início do cordão de solda



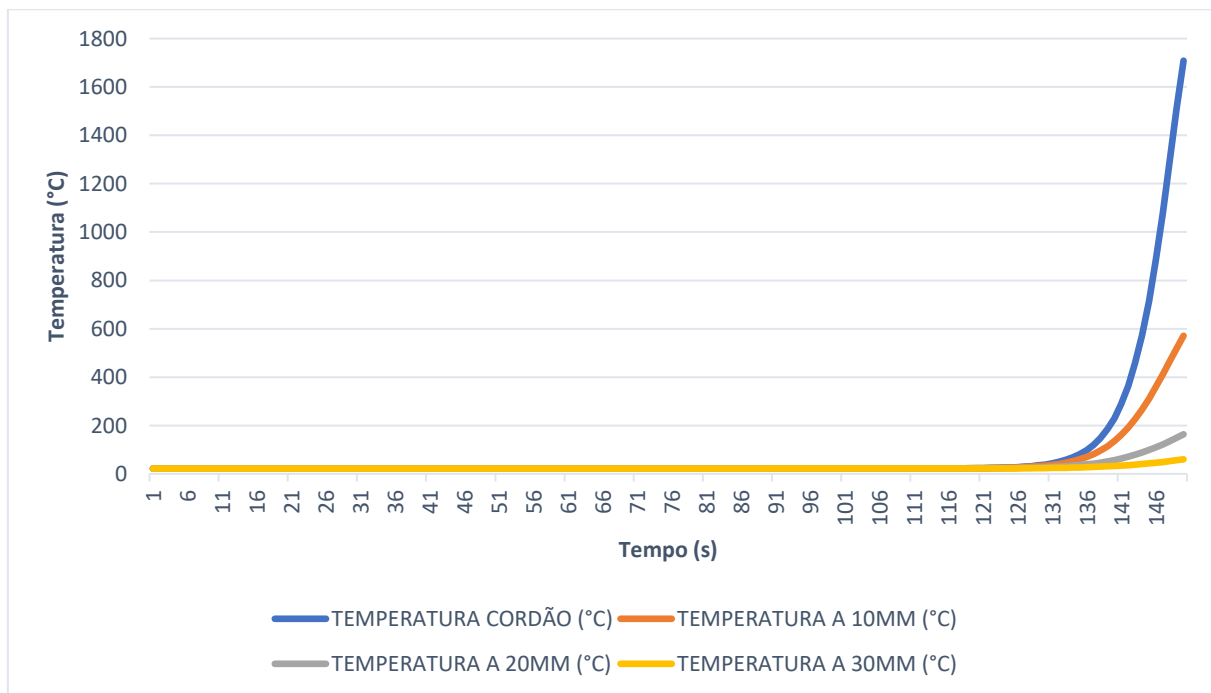
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 33 – Ciclos térmicos localizados no meio do cordão de solda



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 34 - Ciclos térmicos localizados no final do cordão de solda



Fonte: Elaborado pelo autor



A partir das imagens, podemos observar que na Figura 32 a temperatura no início do cordão de solda não atinge a temperatura necessária para a fusão do material, chegando próximo apenas da temperatura de recristalização do aço 316L. Esse fato pode estar ligado a taxa de energia entregue ao material no início da soldagem, sendo necessário uma reavaliação dos parâmetros utilizados no começo do processo. Os demais pontos apresentados na Figura 31 estão localizados em zonas não recristalizadas e de metal base da chapa, assim como descrito no tópico 3.2.1 deste trabalho.

A Figura 33 demonstra um aumento de temperatura a partir dos 50 segundos, momento no qual a fonte de calor se aproxima dos pontos descritos na imagem. A curva que descreve o aumento de temperatura no centro do cordão de solda apresenta resultados próximos dos 1900 graus, apresentando-se como uma área de fusão do material. A segunda curva, na cor vermelha, atingiu temperaturas que descrevem zonas de recristalização parcial, enquanto as demais apenas de metal base. Tais resultados apresentam semelhanças com os apresentados por Depradeux (2004) e Bezerra (2006).

No final da simulação de soldagem, podemos verificar que nos pontos localizados no final do cordão de solda foi alcançada a temperatura de fusão do material no centro do cordão, uma zona não recristalizada a uma distância de 10mm do centro da peça e, nas demais áreas, regiões constituídas de metal base. Esses dados estão expostos na Figura 34.

## 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 6.1 CONCLUSÕES

- Foram desenvolvidas algumas das habilidades necessárias para a simulação de processos de soldagens utilizando o software *ANSYS Workbench* 17.0.
- O emprego do método de elementos finitos mostrou-se uma ferramenta eficiente para a simulação de um processo de soldagem TIG autógeno.
- Apesar da divergência de certos dados obtidos neste trabalho em relação a literatura, alguns aspectos da simulação apresentaram-se coerentes com os apresentados por alguns autores como Depradeux (2004) e Bezerra (2006).

### 6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Utilizar os dados obtidos para uma posterior análise das tensões residuais provocadas pela soldagem, utilizando outra vez o método de elementos finitos.
- Realizar um experimento de uma soldagem TIG autógena em chapas de aço inoxidável 316L e coletar temperaturas através de termopares, buscando de comparar os valores experimentais com os obtidos através de simulações.
- Verificar as transformações de fases utilizando os ciclos térmicos encontrados na simulação realizada neste trabalho.

## 7 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, D. F.; MARTINS, R. F.; CARDOSO, J. B.; Numerical simulation of residual stresses induced by TIG butt-welding of thin plates made of AISI 316L stainless steel. **Procedia Structural Integrity**, Funchal, v. 5, p. 633-639, set. 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321617301178>>. Acesso em: 24 jan. 2018.

ARAÚJO, D. B.; **Estudo de distorções em soldagem com uso de técnica numérica e de otimização**. 2012. 212p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Uberlândia.

ASSAN, A. E.; Notas históricas. In: ASSAN, A. E.; **Método dos Elementos Finitos - Primeiros Passos**. 1. ed. Campinas: UNICAMP, 1999. cap. 1, p. 15-16.

BARBAN, L. M.; **Análise numérico-computacional das tensões térmicas induzidas pela soldagem**. 2014. 90 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

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

BITTENCOURT, M. S. Q.; **Soldagem TIG de tubos de aço inox AISI 316l para varetas combustíveis**. 1985. 163 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1985.

BRANDI, S. D.; Classificação dos processos de soldagem. In: WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H.; **Soldagem: processos e Metalurgia**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 2004. cap. 1, p. 1-6.

DEPRADEUX, L.; **Simulation numerique du soudage – acier 316L validation sur cas tests de complexite croissante**. 2004. 231 p. Tese (Doutorado)- L’INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON, Lyon, 2004.

FRANCIS, J. D.; **Welding simulations of aluminum alloy joints by finite element analysis**. 2002. 241p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Virginia Polytechnic Institute and State University.

GOLDAK, J. A.; AKHLAGHI, M.; Computer Simulation of Welding Processes. In: GOLDAK, J. A.; AKHLAGHI, M.; **Computational Welding Mechanics**. 1. ed. New York: Springer US, 2005. cap. 2, p. 16-69.

HEINZE, C.; SCHWENK, C.; RETHMEIER, M. Numerical calculation of residual stress development of multi-pass gas metal arc welding. **Journal of Constructional Steel Research**, Berlim, v. 146, p. 12-19, maio. 2012.

INCROPERA, F. P. et al. Introduction to Conduction. In: INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. 6. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2007. cap. 2, p. 57-82.

KULAZI, A. J.; **Comportamento à fadiga do aço dp600 processado por jacto de água**. 2007. 85 p. Dissertação (mestrado em engenharia mecânica) - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2007.

LOTTI, R. S. et al.; Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos. **Revista Dental Press de Ortodontia e Ortopedia Facial**, Maringá, v. 11, n. 2, p. 35-43, abr. 2006. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1415-541920060002000006&lng=pt&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-541920060002000006&lng=pt&nrm=iso). Acesso em: 07 jan. 2018.

MODENESI, P. J.; Metalurgia da Soldagem dos Aços Inoxidáveis Austeníticos. In: MODENESI, P. J. **Soldabilidade dos aços inoxidáveis**. Osasco - São Paulo: SENAI, 2001. cap. 5, p. 36-56. v. 1.

MODENESI, P. J.; **Soldabilidade de algumas ligas metálicas**. 2011. Universidade Federal de Minas Gerais.

MODENESI, P. J.; Soldagem: Fundamentos e Tecnologia: Introdução à Soldagem. In: MODENESI, P. J.; **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2011. cap. 1, p. 17-27.

MOREJÓN, J. A. P. et al.; Numerical simulation of residual stresses induced by TIG butt-welding of thin plates made of AISI 316L stainless steel. **Revista Soldagem e Inspeção**, Funchal, v. 16, n. 3, p. 256-264, set. 2011. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S01042242011000300007&script=sci\\_abstract&tlng=es](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S01042242011000300007&script=sci_abstract&tlng=es)>. Acesso em: 24 jan. 2018.

SAKAMOTO, M.M.; **Algoritmo de refinamento de Delaunay a malhas sequenciais, adaptativas e com processamento paralelo**. 2007. 150p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade de São Paulo, Osasco, 2007.

SILVA, C. O.; **caracterização do metal de solda do aço inoxidável austenítico AISI 316L com laser pulsado Nd:YAG**. 2017. 72 p. Dissertação (mestrado em engenharia mecânica) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, Ilha Solteira, 2017.

SOUZA, C. F. M.; **Análise numérica e experimental de tensões residuais em juntas soldadas de aço de baixo carbono**. 2016. 130 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

TEIXEIRA, G. S.; **Análise da Influência dos parâmetros de soldagem sobre a geometria do cordão de solda depositado pelo processo de soldagem TIG - MAG em tandem**. 2011. 122 p. Dissertação (mestrado em engenharia mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, São Paulo, 2011.

WENTZ, A. V.; **Simulações de soldagem por arco elétrico e resistência elétrica usando o método de elementos finitos**. 2008. 79 p. Dissertação (Mestrando em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.