

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

TAIANE TEODORA SANTOS DA CRUZ

**SIMULAÇÃO DO EFEITO DO FLUXO DE CALOR NO CORDÃO DE SOLDA
PRODUZIDO PELO PROCESSO GMAW**

BELO HORIZONTE

2022

TAIANE TEODORA SANTOS DA CRUZ

**SIMULAÇÃO DO EFEITO DO FLUXO DE CALOR NO CORDÃO DE SOLDA
PRODUZIDO PELO PROCESSO GMAW**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de Graduação em Engenharia de Materiais no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Ivan J. de Santana

Coorientador: Prof. Dr. André Guimarães Ferreira

BELO HORIZONTE

2022

TAIANE TEODORA SANTOS DA CRUZ

**SIMULAÇÃO DO EFEITO DO FLUXO DE CALOR NO CORDÃO DE SOLDA
PRODUZIDO PELO PROCESSO GMAW**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de Graduação em Engenharia de Materiais no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em 09/02/2022

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ivan J. de Santana

Prof. Dr. André Guimarães Ferreira

Prof. Dr. Carlos Eduardo dos Santos

Prof. Dr. Pedro Henrique Rodrigues Pereira

AGRADECIMENTOS

Presto meus agradecimentos especiais ao Professor Ivan J. de Santana por aceitar ser meu orientador, mais do que isso, agradeço pelos incontáveis conselhos, conversas, direcionamentos e ensinamentos técnicos ou não, que de forma inquestionável contribuíram para minha vida profissional e pessoal. Agradeço ainda por despertar em mim a vontade de ser “um agente transformador”. Por fim, agradeço por ser uma daquelas raras pessoas que surgem em nossas vidas e que são genuínas.

Agradeço ao Professor André Guimarães Ferreira, que como meu coorientador me auxiliou de forma brilhante na realização desse trabalho. Sou extremamente grata por todos os ensinamentos, os quais proporcionaram grande clareza.

A todos os mestres que contribuíram com a minha formação acadêmica e profissional. Em especial, ao Professor Carlos Eduardo dos Santos, a Professora Aline Magalhães e a Professora Elaine C. Siqueira Corrêa. Que são um grande exemplo de pessoas e profissionais.

Ao Professor Pedro Henrique Rodrigues Pereira, por me fazer apaixonar pela metalurgia física com suas notáveis aulas.

As minhas amigas Ana Luiza Salgado e Jessica Trindade, que ao longo desses anos estiveram ao meu lado, ajudando-me sempre que possível. Obrigada pela companhia.

Aos meus pais e irmãos pelo apoio. Agradeço à Lucas, pessoa responsável por um incentivo e suporte que vão além do imaginário, despertando o melhor de mim.

Por último, ao CEFET-MG por ter me proporcionado oportunidades únicas, desafios e pessoas especiais.

“Nada é pequeno se feito com amor”

(SANTA TEREZINHA)

RESUMO

No final da década de 1940 nasce a necessidade de desenvolver processos de soldagem com alto nível de produtividade e automatização, para atender à crescente demanda do mercado. Destaca-se então o processo *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) pois, além de satisfazer tais exigências, esse processo é relevante na indústria devido a sua grande aplicabilidade e confiabilidade. Entretanto o processo GMAW é sensível às alterações nos parâmetros de soldagem, podendo tornar complexa a escolha desses. Uma das alternativas é utilizar simulações computacionais para avaliar o efeito do fluxo de calor na peça devido as variações nos parâmetros de soldagem, facilitando sua aplicação e reduzindo custos operacionais. Essa alternativa vem se tornando viável principalmente com o desenvolvimento de novas tecnologias. Por esta razão, este trabalho objetiva simular o fluxo de calor gerado no processo GMAW, ao produzir cordões de solda depositados em chapas de aço AISI 1020. A simulação computacional foi realizada no *software* ANSYS® 21.0, que emprega o método de elementos finitos. Utilizou-se a extensão *Moving Heat Flux* para simular o movimento do fluxo de calor. Para uma melhor aproximação com as condições reais, foi feita uma análise transiente. A validação dos resultados simulados foi feita através da comparação com testes experimentais, realizados com os mesmos parâmetros. Estimou-se o ciclo térmico de soldagem para os dados simulados, e as dimensões da Zona Fundida (ZF) e da Zona Termicamente Afetada (ZTA), para ambos. Os valores simulados e os valores obtidos experimentalmente apresentaram uma boa convergência.

Palavras-chave: Soldagem. Processo GMAW. Simulação. Elementos Finitos. *Moving Heat Flux*.

ABSTRACT

At the end of the 1940s, the need arises to develop installation processes with a high level of productivity and automation, in order to meet the growing market demand. The Gas Metal Arc Welding (GMAW) process stands out, as it applies in addition to such industries requirements, this process is relevant and due to its great capacity, as it is reliable. The process is complex to change the GMAW configuration options, which can make the configuration complex. An alternative alternative is to use numerical simulations to evaluate the heat flow according to variations in the fit of parts, accessories, their application and operating costs. This alternative can be viable mainly with the development of new technologies. For this reason, this work aims to simulate the weld flux generated in the GMAW process, when producing finite element beads in AISI 1020 steel sheets. Reason The computer simulation was performed in the ANSYS® 21.0 software, which uses the finite element method. The Moving Heat Flux extension was used to simulate the movement of heat flux. For a better approximation with the real conditions, a transient analysis was performed. The validation of the simulated results was performed by comparing them with experimental tests performed with the same parameters. The thermal size of the heat cycle (ZTA) and the size of the molten zone (ZTA) are estimated, both for the data and for the heat (ZTA). The simulated and obtained experimental values showed a good.

Keywords: Welding. GMAW process. Simulation. Finite elements. Moving heat flux.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação esquemática da seção transversal de duas superfícies em contato.	19
Figura 2 – Esquema das regiões de queda de tensão no arco elétrico	22
Figura 3 – Valores de eficiência do arco elétrico de variados processos de soldagem	24
Figura 4 – Representação esquemática do ciclo térmico de soldagem	25
Figura 5 – Regiões básicas de uma solda por fusão	26
Figura 6 – Regiões da ZTA e temperaturas	28
Figura 7 – Esquema do processo GMAW	30
Figura 8 – Variados modos de transferência metálica	30
Figura 9 – Sequência de curto-circuito no processo GMAW	31
Figura 10 – Esquema da relação entre o modo de transferência metálica por curto-circuito e as variações de tensão e corrente.	32
Figura 11 – Modo de transferência globular	32
Figura 12 – Modo de transferência por “spray”	33
Figura 13 – Modo de transferência pulsada e o comportamento da corrente	34
Figura 14 – Principais equipamentos utilizados no processo GMAW.	34
Figura 15 – Modelo dupla elipsóide proposto por Goldak	40
Figura 16 – Fluxograma	46
Figura 17 – Vista isométrica do modelo computacional utilizado	47
Figura 18 – Valores de h em função da temperatura para as faces laterais	49
Figura 19 – Valores de h em função da temperatura para a face superior	49
Figura 20 – Valor da emissividade inseridos no <i>Software</i>	50
Figura 21 – Propriedades termofísicas aplicadas no modelo	51
Figura 22 – Fluxo geral de calor na soldagem por fusão	52
Figura 23 – Seleção dos elementos para o recurso <i>Element Birth and Death</i>	53
Figura 24 – Malha aplicada no modelo	54
Figura 25 – Controle de malha aplicada no modelo	54
Figura 26 – Estatísticas da deformação da malha	56
Figura 27 – Razão Jacobiana para a malha escolhida	57
Figura 28 – Corpos de prova após o corte e a rebarbação	58
Figura 29 – Esquema representativo da sequência de cortes das amostras	60
Figura 30 – Esquema representativo dos parâmetros avaliados nas amostras	60

Figura 31 – Fonte de calor em diferentes instantes de tempo para a Amostra 1	61
Figura 32 – Fonte de calor em diferentes instantes de tempo para a Amostra 2	62
Figura 33 – Fonte de calor em diferentes instantes de tempo para a Amostra 3	62
Figura 34 – Seção transversal da Amostra 1	63
Figura 35 – Seção transversal da Amostra 2	64
Figura 36 – Seção transversal da Amostra 3	64
Figura 37 – Pontos para as medições pontuais da temperatura	66
Figura 38 – Corpos de prova após a realização dos cordões de solda	68
Figura 39 – Amostras 1,2 e 3, respectivamente, seccionadas	68
Figura 40 – Macrografia das amostras 1, 2 e 3 respectivamente	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Potencial de ionização de variados elementos	21
Tabela 2 – Composição química do aço Copant 1020	36
Tabela 3 – Parâmetros de soldagem adotados na simulação	53
Tabela 4 – Temperatura em função do número de nós	55
Tabela 5 – Parâmetros adotados no procedimento de soldagem	59
Tabela 6 – Aporte térmico fornecido as Amostras 1,2 e 3 respectivamente	67
Tabela 7 – Parâmetros dimensionais dos cordões de solda para cada amostra	70
Tabela 8 – Diferença percentual entre os parâmetros para cada amostra	70

LISTA DE ABRIVEATURAS E SIGLAS

AWS – *American Welding Society.*

CC+ – Corrente contínua polaridade inversa

CEFET-MG – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

FRX – Fluorescência de raios X.

GMAW – *Gas Metal Arc Welding.*

GTAW – *Gas Tungsten Arc Welding.*

MB – Metal de base.

MIG – *Metal Inerte Gás.*

SMAW – *Shielded Metal Arc Welding*

ZAC – Zona Afetada pelo Calor.

ZF – Zona Fundida.

ZTA – Zona termicamente afetada.

LISTA DE SÍMBOLOS

- A – Constante que pode variar de 60 a 100 A/cm²
- A₀ – Área de contato entre a fonte e a peça
- c_p – Calor específico (J/kg.K)
- C – Carbono
- cm² – Centímetros quadrados
- e – Carga do elétron (1,6x10⁻¹⁹ C)
- eV – Potencial de ionização
- h – Coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m².K)
- h_a – Profundidade Zona Fundida e da Zona termicamente afetada pelo calor
- h_c – Altura do reforço
- h_f – Profundidade da Zona Fundida
- H_t – Aporte térmico ou insumo de calor
- I – Corrente de soldagem em Ampères
- I_e – Taxa de emissão dos elétrons
- J – joule
- K – Condutividade térmica do fluido (W/m.K)
- K – Kelvin
- Mn – Manganês
- m – Metro
- m² – Metro quadrado
- mm – Milímetros
- Nu – Número de Nusselt
- °C – Graus Celsius
- P – Fósforo
- P_{esp} – Potência específica ou a intensidade da fonte de energia.
- P_F – Potência da fonte
- Pr – Razão entre a taxa de difusão viscosa e a taxa de difusão térmica
- q – Geração de calor por unidade de volume (W.m³)
- q_{conv} – Fluxo de calor perdido por radiação (W/m²)
- Q_t – Energia líquida disponível
- S – Enxofre

T – Constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K)

T – Temperatura em kelvin

T_{∞} – Temperatura ambiente (K)

$T_{\text{sup.}}$ – Temperatura da superfície (K)

t – Tempo (s)

t_c – Tempo de permanência

T_p – Temperatura máxima

U_A – Região anódica

U_C – Região catódica

V – Tensão do arco em Volts

V_I – Primeiro Potencial de ionização

V_{II} – Segundo Potencial de ionização

W – Watts

ρ – Densidade

L – Comprimento característico (m)

g – Aceleração gravitacional (m/s^2)

β – Coeficiente de expansão volumétrica (K^{-1})

η – Rendimento térmico da fonte

v – Velocidade de avanço da fonte de calor

ϕ – Velocidade de resfriamento

\emptyset – Função do trabalho termiônico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS	17
2.1 <i>Objetivo geral</i>	17
2.2 <i>Objetivos específicos</i>	17
3 JUSTIFICATIVA	18
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
4.1 <i>Aspectos gerais da soldagem</i>	19
4.1.1 <i>Arco Elétrico</i>	20
4.2 <i>Metalurgia da Soldagem</i>	23
4.2.1 <i>Transferência de calor na soldagem</i>	23
4.2.2 <i>Macroestrutura da Soldagem por fusão</i>	25
4.3 <i>Processo de Soldagem a arco elétrico – GMAW (Gas Metal Arc Welding)</i>	28
4.3.1 <i>Fundamentos</i>	28
4.3.2 <i>Modos de transferência metálica</i>	30
4.3.3 <i>Equipamentos e consumíveis</i>	34
4.4 <i>Aço AISI 1020</i>	35
4.5 <i>Simulação Numérica no Processo de Soldagem</i>	36
4.5.1 <i>Fundamentos</i>	36
4.5.2 <i>Método dos Elementos Finitos</i>	36
4.6 <i>Análise Térmica</i>	37
4.6.1 <i>Condução</i>	37
4.6.2 <i>Convecção</i>	38
4.6.3 <i>Radiação</i>	39
4.6.4 <i>Fonte Analítica de calor</i>	39
5 ESTADO DA ARTE	41
6 METODOLOGIA	46
6.1 <i>Procedimentos Computacionais</i>	46
6.1.1 <i>Condições de Contorno</i>	46
6.1.2 <i>Domínio da solução</i>	47
6.1.3 <i>Convecção</i>	47
6.1.4 <i>Radiação</i>	49
6.1.5 <i>Propriedades físicas do AISI 1020</i>	50

<i>6.1.6 Modelagem da fonte de calor</i>	51
<i>6.1.7 Parâmetros de soldagem na simulação</i>	53
<i>6.1.8 Malha</i>	54
<i>6.1.9 Teste de convergência de malha</i>	55
<i>6.2 Procedimentos Experimentais</i>	57
<i>6.2.1 Materiais</i>	57
<i>6.2.2 Equipamentos</i>	57
<i>6.2.3 Confeção e preparação das amostras</i>	58
<i>6.2.4 Operação de Soldagem</i>	58
<i>6.2.5 Procedimento de macrografia</i>	59
7 RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
<i>7.1 Análise Térmica</i>	<i>61</i>
<i>7.1.1 Campos transientes de temperatura</i>	<i>61</i>
<i>7.1.2 Análise da Zona Fundida (ZF) e da Zona Termicamente Afetada (ZTA)</i>	<i>63</i>
<i>7.1.3 Ciclo Térmico de Soldagem e termopares</i>	<i>64</i>
<i>7.2 Análise Experimental</i>	<i>66</i>
<i>7.2.1 Avaliação visual dos cordões de solda depositados</i>	<i>67</i>
<i>7.2.2 Avaliação das macrografias</i>	<i>69</i>
8 CONCLUSÕES	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
APÊNDICE A	75

1 INTRODUÇÃO

Existem diversas formas de promover a união dos materiais metálicos, dentre elas a soldagem se destaca como a mais relevante e usual na indústria. Devido a sua ampla aplicabilidade que pode variar desde projetos simples a projetos complexos. Por sua vez, dentre os processos de soldagem, o processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), que foi desenvolvido e introduzido na indústria a partir da segunda metade do século XX atendendo uma demanda do mercado mundial, tem-se mostrado altamente significativo quando comparado a outros processos. Principalmente por ser automatizado facilmente, possuir maior produtividade (taxa de deposição), alto fator de ocupação do soldador, quando comparados a outros processos, e uma abrangente faixa de espessura e variedades de materiais que podem ser utilizados.

O processo GMAW, que atualmente é um dos processos mais utilizados no mundo, destina-se à coalescência de materiais através do aquecimento e fusão, no qual a fonte de calor é um arco elétrico estabelecido entre o eletrodo e a peça. Sendo o eletrodo consumível e sem revestimento na forma de arame contínuo. Gases inertes ou ativos, ou até mesmo uma mistura desses, garantem a proteção do arco e da poça de fusão de contaminantes presentes na atmosfera.

Entretanto o processo GMAW é sensível às alterações nos parâmetros de soldagem, revelando uma possível dependência, que pode influenciar no modo de transferência metálica, na estabilidade do arco, na quantidade de calor fornecida à peça, e conseqüentemente nas características finais atribuídas ao cordão de solda.

Devido a relação que pode existir entre as variáveis do processo GMAW e as características finais do cordão de solda, pode ser complexa a escolha dos parâmetros de soldagem. Sendo assim, é de grande importância estudos que antecipem e verifiquem a resposta do processo frente a parâmetros de soldagem previamente estabelecidos. Por essa razão, simulações computacionais têm sido frequentemente utilizadas para facilitar a escolha dos parâmetros de soldagem.

O emprego de simulações computacionais também é relevante pois as variações de temperaturas que são observadas durante o processo de soldagem causam transformações na estrutura do material próximo a junta formada. Principalmente nas ligas de aço que são ligas transformáveis, em consequência pode haver variações nas propriedades na maioria dos materiais. Tais variações podem modificar o desempenho da peça soldada, por isso é importante conhecer os fenômenos desencadeados pelo aquecimento e resfriamento da peça.

Para a análise térmica realizada neste trabalho foi utilizado o ANSYS® 21.0 que é um *Software* que se baseia no método dos elementos finitos. Esse método proposto por Gauss no final do século XVIII e desenvolvido a partir de 1950 com os avanços tecnológicos, consiste em discretizar um meio contínuo, ou seja, subdividir o meio em pequenos elementos que possuem as mesmas propriedades do todo. Tais elementos são expressados por funções que são resolvidas numericamente pelo ANSYS®, alcançando a solução desejada.

A simulação é realizada a partir do cálculo do fluxo de calor existente entre o arco elétrico e a peça, dimensionado em taxa de energia por área (W/m^2). O cálculo é feito levando em consideração os parâmetros elétricos da fonte e a eficiência do arco elétrico no processo GMAW. A análise foi feita em chapas de aço AISI 1020.

Dessa forma estimou-se as dimensões da Zona Termicamente Afetada (ZTA) e da Zona Fundida (ZT), além do ciclo térmico de soldagem. Para assegurar a confiabilidade da simulação, os dados obtidos foram comparados com os resultados de testes experimentais, realizados em laboratório com os mesmos parâmetros simulados.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desse trabalho é simular o efeito do fluxo de calor considerando um cordão de solda produzido em uma chapa de aço AISI 1020 pelo processo GMAW e realizar a validação experimental.

2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desse trabalho são:

- Calcular a intensidade do fluxo de calor (W/m^2) transferido para peça pela fonte de calor, considerando os parâmetros experimentais.
- Estimar os coeficientes de convecção em função da temperatura para as faces laterais e superior da geometria simulada;
- Entender os princípios do *Software ANSYS*[®];
- Simular no ANSYS[®] o movimento da fonte de calor sobre uma superfície plana de aço AISI 1020;
- Obter os ciclos térmicos de soldagem e estimar as dimensões da ZF e da ZTA para as simulações realizadas.
- Avaliar as características dos cordões de solda, produzidos pelo processo GMAW mecanizado, e depositados em superfícies planas de aço AISI 1020.
- Monitorar os sinais elétricos de tensão e corrente durante o processo GMAW.
- Preparar as amostras e realizar ensaio metalográfico para avaliar a ZF e a ZTA.
- Comparar as dimensões da ZF e da ZTA das amostras simuladas com as amostras experimentais.

3 JUSTIFICATIVA

Um atributo inerente aos materiais metálicos é a correlação entre a estrutura e as propriedades. A estrutura é associada aos processos em que o material foi submetido. No caso da soldagem, no qual observa-se grandes variações de temperaturas, é possível que ocorram mudanças na microestrutura durante o aquecimento e resfriamento da peça, e conseqüentemente mudanças nas propriedades. Podendo alterar a performance do material quando esse for solicitado. Por sua vez, as variações de temperatura durante o ciclo térmico de soldagem estão relacionadas com os parâmetros elétricos da fonte e as propriedades termofísicas dos materiais. Que irão influenciar diretamente na condução da energia pela peça e na transferência de calor para o meio por radiação e convecção.

Devido à complexidade dos fenômenos térmicos envolvidos e a relação que pode existir entre os aspectos finais do cordão de solda e os parâmetros da fonte no processo GMAW, o emprego de simulações numéricas tem ganhado destaque, pois a partir delas é possível inferir os efeitos do fluxo de calor na peça e assim tornar possível a implementação de medidas para reduzir custo e facilitar a escolha dos parâmetros dos processos de soldagem. Portanto, estudos que contribuem para gerar conhecimento e domínio dessa técnica são fortemente relevantes.

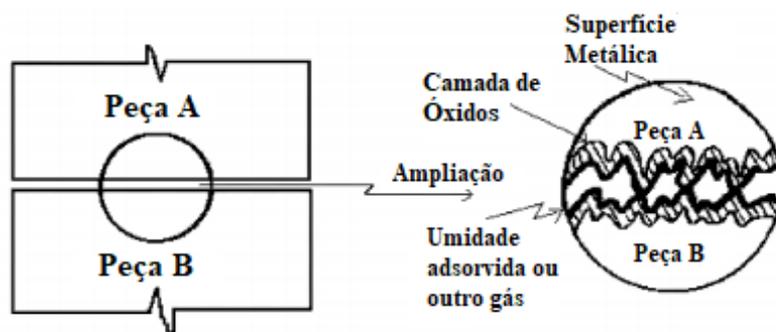
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Aspectos gerais da soldagem

O termo “Soldagem” pode ser definido, do ponto de vista conceitual e operacional, como: “Processo de união de materiais baseado no estabelecimento de forças de ligação química de natureza similar às atuantes no interior dos próprios materiais, na região de ligação entre os materiais que estão sendo unidos.” (MARQUES *et al.*, 2009, p. 18).

O processo de união dos materiais por meio da soldagem é fundamentado em forças microscópicas interatômicas ou intermoleculares. Nesse caso a união é alcançada quando as fronteiras macroscópicas são eliminadas e o espaço entre as superfícies dos materiais a serem unidos torna-se consideravelmente pequeno de tal maneira que há a formação de ligações metálicas e de Van der Waals. As fronteiras macroscópicas, ou seja, as barreiras que impedem a união efetiva dos materiais, conforme ilustrado na Figura 1, são as rugosidades de escala microscópica ou submicroscópica, as camadas de óxidos, umidade, gordura e poeira que são comumente encontradas nas faces dos materiais metálicos. A permanência desses obstáculos impossibilita a formação de um número suficientemente grande de ligações químicas capazes de formar uma junta resistente (MARQUES *et al.*, 2009).

Figura 1 – Representação esquemática da seção transversal de duas superfícies em contato.



Fonte: MACHADO, 1996. Adaptado.

Conforme descrito por Marques *et al.* (2009), existem duas maneiras de eliminar essas barreiras, subdividindo os processos de soldagem em dois grupos:

- Processos de soldagem por pressão (ou por deformação): Processos nos quais é fornecida pressão suficiente para deformar plasticamente os picos e vales microscópicos presentes nas superfícies, garantindo que haja a distância ideal para união dos átomos.

- Processo de soldagem por fusão: Envolve os processos em que os materiais são submetidos a uma fonte de calor, por exemplo feixes de luz, ocorrendo a fusão localizada e a formação da poça de fusão (MACHADO, 1996).

A AWS (*American Welding Society*) reconhece dezenas de processos de soldagem por fusão que são subclassificados de acordo com a fonte de calor utilizada, dentre eles os processos de maior relevância para a indústria no presente, são os processos de soldagem a arco, nos quais a fusão localizada é promovida pela energia fornecida pelo arco elétrico (MACHADO, 1996; MARQUES *et al.*, 2009).

4.1.1 Arco Elétrico

O arco elétrico é um fenômeno gerado por uma descarga elétrica entre dois eletrodos, sendo que a queda de tensão ocorre na região do eletrodo negativo ou cátodo. O arco é estabelecido em um meio de gás ionizado, denominado plasma, que também é responsável por conduzir a corrente elétrica no arco, as temperaturas desse fenômeno oscilam entre 4700 e 30000 °C fornecendo a energia térmica necessária para fundir localmente os materiais a serem unidos (MACHADO, 1996; MARQUES *et al.*, 2009).

Segundo Wainer *et al.* (2004) o entendimento do arco elétrico envolve três conceitos fundamentais:

- **Calor:** Proveniente da agitação dos constituintes do plasma, as moléculas, átomos, elétrons e íons. Pelo movimento dessas partículas ocorre o choque entre elas, produzindo calor. Além disso, através das colisões que ocorrem são gerados elétron e íons. Os elétrons, por sua vez, possuem uma massa consideravelmente menor, resultando em uma velocidade relativa muito maior que a dos íons, tornando a velocidade desses aproximadamente nula, logo, os elétrons são os responsáveis pela maior parte do calor produzido.
- **Ionização:** Para o processo de soldagem a arco é necessário que ocorra a ionização térmica, ou seja, os choques, que acontecem a elevadas temperaturas entre as partículas presentes na coluna de plasma, precisam fornecer energia suficiente para que os elétrons sejam transferidos de níveis de menor energia para níveis de maior energia, ou até mesmo sejam repelidos, saindo do domínio do campo eletromagnético do átomo e formando um elétron livre e um íon positivo. É chamado potencial de ionização quando a energia fornecida ao átomo for capaz de formar um elétron livre.

A energia necessária para a retirada de um elétron é menor que a energia necessária para a retirada do um segundo elétron, como pode ser visto na Tabela 1, na qual é exibido o primeiro (V_I) e segundo (V_{II}) potencial de ionização (eV) de alguns elementos. Além disso, quanto maior o potencial de ionização maior deve ser a temperatura fornecida para ionizar o plasma. É interessante que esteja presente no arco elétrico elementos de baixo potencial iônico para alcançar arcos mais estáveis (MONDENESI, 2012).

Tabela 1 – Potencial de ionização de variados elementos

Elemento	V_I (eV)	V_{II} (eV)
Alumínio	5,98	18,82
Argônio	15,75	27,62
Carbono	11,26	24,38
Césio	3,89	25,1
Ferro	7,9	16,18
Hélio	24,58	54,4
Hidrogênio	13,6	
Nitrogênio	14,54	29,61
Oxigênio	13,61	35,15
Potássio	4,34	31,81
Sódio	5,14	47,29
Titânio	6,83	13,63
Tungstênio	7,94	

Fonte: MONDENESI, 2012. (Adaptado)

- Emissão Iônica: Fenômeno que decorre da expulsão de elétrons da superfície superaquecida do material do eletrodo positivo, causado pela agitação térmica. É possível calcular a taxa de emissão dos elétrons, de acordo com a Equações 1 e 2, considerando as formulações feitas por Richardson:

$$I_e = AT^2 \cdot e^{-B} \quad (1)$$

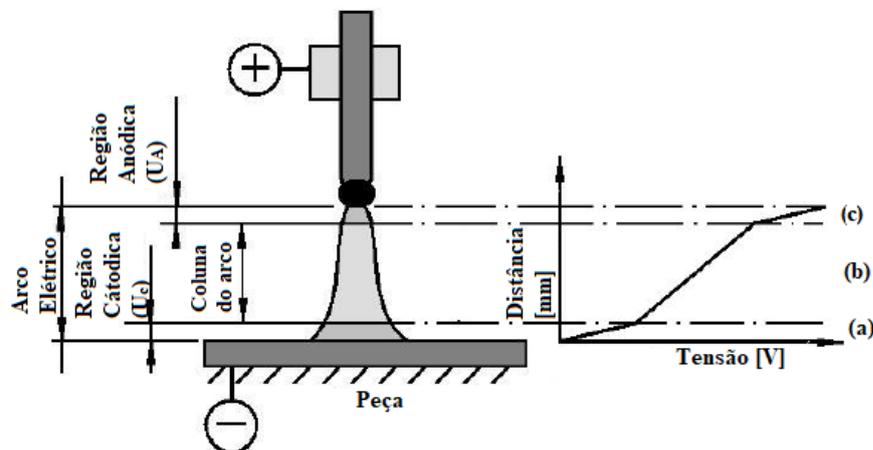
$$B = e \cdot \phi / K \cdot T \quad (2)$$

Sendo: “ I_e ” a taxa de emissão dos elétrons “ T ” a temperatura em kelvin, “ A ” uma constante que pode variar de 60 a 100 A/cm², ϕ função do trabalho termiônico, “ e ” é a carga do elétron ($1,6 \times 10^{-19}$ C) e “ T ” é a constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K) (MODENESI, 2012; WAINER *et al.*, 2004).

A tensão em vazio, um atributo das fontes de energia para soldagem, fornece a diferença de potencial necessária para o aquecimento e projeção de elétrons pelo gás que envolve o eletrodo, proporcionando a abertura do arco. A projeção de elétrons também fornece a energia térmica necessária para a ionização do gás e do vapor metálico na área entre o eletrodo e o metal-base (MODENESI, 2012; WAINER *et al.*, 2004).

O arco elétrico assume uma geometria cônica e é descrito pela diferença de potencial e pela corrente elétrica que atuam entre os eletrodos, além disso pode ser dividido em três regiões, conforme é ilustrado na Figura 2, região de queda anódica, coluna de plasma e região de queda catódica (MARQUES *et al.*, 2009; WAINER *et al.*, 2004).

Figura 2 – Esquema das regiões de queda de tensão no arco elétrico



Fonte: SANTANA, 2010. Adaptado.

A região anódica (U_A) é caracterizada por um excesso de elétrons no anodo, dessa forma tem-se uma região de cargas predominantemente negativas com comprimento próximo de 10^{-1} mm. Por não emitir íons positivos, a ação do anodo sobre a continuidade do arco é menor que a ação do cátodo (MACHADO, 1996).

Na região catódica (U_C) observa-se cargas predominantemente positivas, em uma região com dimensões próximas a 10^{-3} mm, isso ocorre pois os íons migram espontaneamente do plasma para o cátodo e os elétrons precisam vencer um grande potencial. O cátodo é termiônico, ou seja, emite elétrons sem se fundir quando é aquecido. (MACHADO, 1996).

A coluna do arco (região indicado por “b” na Figura 2) é caracterizada por gradientes térmicos e elétricos inferiores a regiões anódicas e catódicas. A diferença de potencial tem comportamento próximo a linear nessa região, que varia com o comprimento do arco (MARQUES *et al.*, 2009).

Segundo Mondenesi (2012), para ser satisfatório o arco elétrico e as demais fontes de calor devem ceder energia suficiente para fundir localmente o metal base antes que o calor seja difundido na peça, essa condição é quantificada pela Equação 3:

$$P_{\text{esp}} = \frac{\eta \cdot P_F}{A_0} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \quad (3)$$

Sendo “ P_{esp} ” a potência específica ou a intensidade da fonte de energia, “ P_F ” à potência da fonte, ou seja, unidade de energia por tempo, “ A_0 ” a área de contato entre a fonte e a peça e “ η ” é o rendimento térmico da fonte, ou seja, a porção de energia gerada que é transferida para a peça. Pois há transferências para o meio na forma de calor irradiante e transferências por convecção para os gases que protegem a poça de fusão (MODENESI, 2012; WAINER *et al.*, 2004).

4.2 Metalurgia da Soldagem

Grande parte dos processos de soldagem utilizam o calor como fonte de energia, aplicando-o localmente no metal-base a fim de obter a fusão desse. Dessa forma o calor é uma variável fundamental para formar a junta soldada, porém ele interfere diretamente nos fenômenos metalúrgicos que ocorrem durante o aquecimento e resfriamento do material. Conseqüentemente as propriedades e as respostas mecânicas da peça podem ser alteradas na região da junta. Por isso é relevante entender os fundamentos que envolvem a transferência de calor na soldagem (WAINER *et al.*, 2004).

4.2.1 Transferência de calor na soldagem

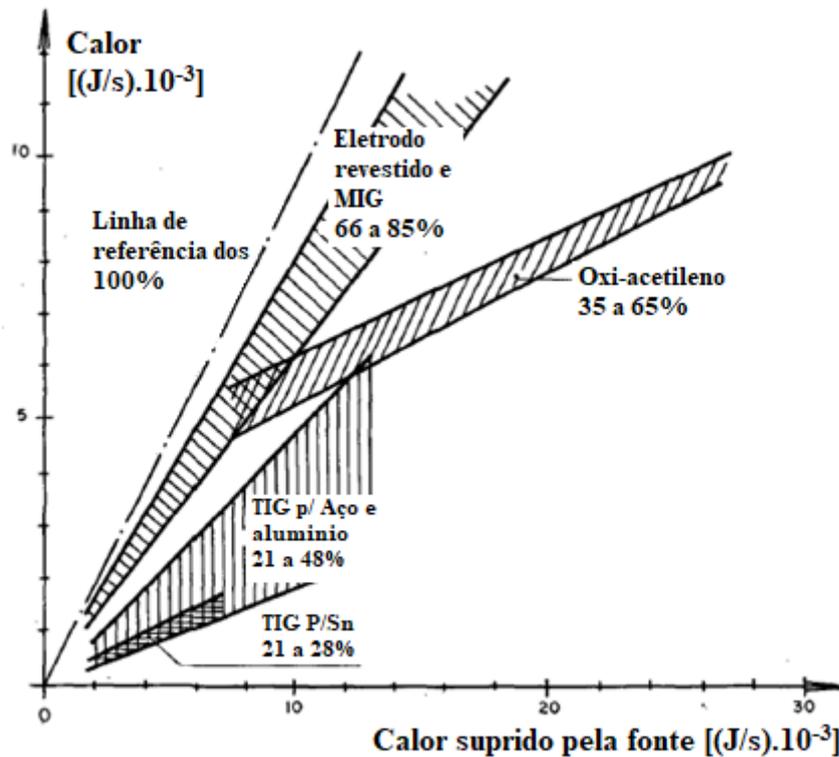
Wainer *et al.* (2004) aponta cinco fatores que devem ser avaliados nos estudos da transferência de calor em soldagem:

- Rendimento térmico do arco elétrico, somente parte da energia disponível é utilizada para fundir o metal-base e formar a junta, as transferências por convecção e radiação são mensuradas pelo η , denominado eficiência do arco elétrico ou rendimento térmico. Portanto a energia que é de fato absorvida na soldagem a arco elétrico, considerando as variáveis das fontes para esse processo, pode ser descrita de acordo com a Equação 4.

$$Q_t = \eta \cdot V \cdot I \text{ [W]} \quad (4)$$

No qual, “ Q_t ” é a energia líquida disponível, “ V ” é a tensão do arco em Volts e “ I ” é a corrente de soldagem em Ampères. Na Figura 3 são mostrados valores da eficiência do arco de alguns processos de soldagem.

Figura 3 – Valores de eficiência do arco elétrico de variados processos de soldagem



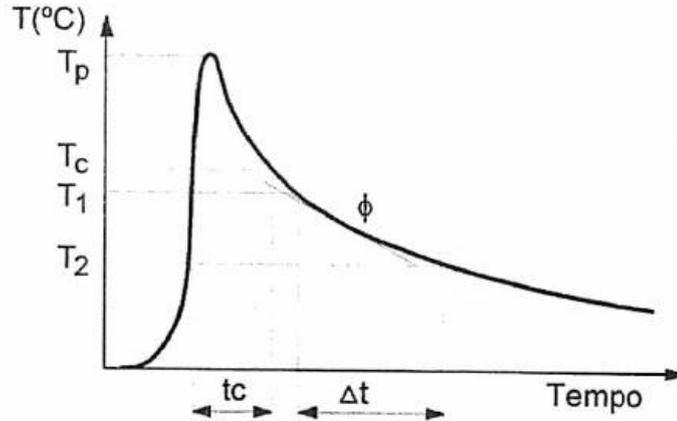
Fonte: WAINER *et al.*, 2004. Adaptado.

- Aporte térmico ou insumo de calor (H_t) é a relação entre a quantidade de energia efetiva na soldagem com a velocidade de avanço (v) da fonte de calor. Conforme mostrado na Equação 5.

$$H_t = (\eta \cdot V \cdot I) / v \quad (5)$$

- Distribuição de temperaturas, pode ser esquematicamente representada pelo ciclo térmico de soldagem, que é mostrado na Figura 4, ele pode ser dividido em três etapas, a primeira consiste no aquecimento intenso do material quando é iniciado o processo, a segunda etapa é caracterizada quando é atingindo a temperatura máxima (T_p) e a terceira etapa descreve o resfriamento até a temperatura de início.

Figura 4 – Representação esquemática do ciclo térmico de soldagem



Fonte: Marques *et al.*, 2011.

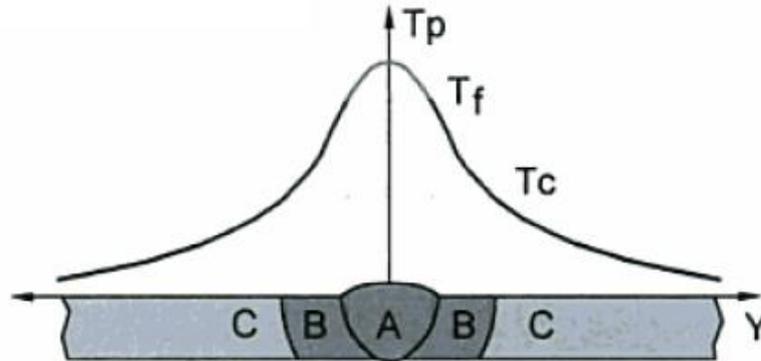
Quando o tempo é igual a 0, indica o instante exato do primeiro contato entre fonte de calor e o ponto analisado no sólido. Ao discretizar o sólido é observado que cada ponto processado é descrito por um ciclo térmico, ou seja, é representado as temperaturas alcançadas para aquele ponto em cada instante do processo. As temperaturas atingidas são em função da distância entre o ponto e a fonte de calor.

- Tempo de permanência (t_c) é o termo designado para o período em que o ponto analisado é exposto a temperaturas maiores que um temperatura mínima (T_c). Para temperaturas acima de T_c são observadas mudanças consideráveis na microestrutura do material, podendo haver alterações em suas propriedades (MARQUES *et al.*, 2009).
- Velocidade de resfriamento (ϕ) é o tempo necessário para a solda que está a uma temperatura (T_1) resfriar para uma temperatura (T_2). Na soldagem, principalmente de ligas em que se atinge a temperatura de austenitização durante o processo é relevante ter um controle sobre a velocidade de resfriamento pois a transformação da austenita está diretamente relacionada com a taxa de resfriamento (MARQUES *et al.*, 2009).

4.2.2 Macroestrutura da Soldagem por fusão

Para a solda por fusão é possível estabelecer três regiões básicas de acordo com a curva de repartição térmica que é ilustrada na Figura 5 (MARQUES *et al.*, 2009).

Figura 5 – Regiões básicas de uma solda por fusão



Fonte: MARQUES *et al.*, 2009.

Segundo Marques *et al.* (2009) a região “A” compreende a Zona Fundida (ZF), nessa região as temperaturas máximas superam as temperaturas de fusão do metal de base, logo o material foi fundido e posteriormente solidificou. Existem diversas condições para formar a Zona Fundida, comumente o metal de adição é fundido e transferido para a poça de fusão, atingindo temperaturas próximas dos 2000 °C.

Nas regiões de temperaturas mais altas da poça de fusão, ocorre a mistura do metal de base com o metal de adição. Nessas regiões o metal fundido interage fortemente com os gases e escórias que estão próximos ao arco, por meio dessas interações pode ocorrer a absorção de gases, redução de óxidos e a troca de impurezas entre o metal de base e a escória. A expressividade dessas interações determina a composição química final da Zona Fundida, além da composição química do metal de base e do metal de adição (MARQUES *et al.*, 2009).

Como não há uma diferença de temperatura muito grande entre o metal de base e o metal fundido da poça de fusão, não ocorre um resfriamento brusco e por isso é observado a formação de grãos na forma colunar. Em casos específicos, nos quais são envolvidas grandes energias e a poça de fusão tem grande extensão, pode haver a formação de grãos equiaxiais na região central (MARQUES *et al.*, 2009).

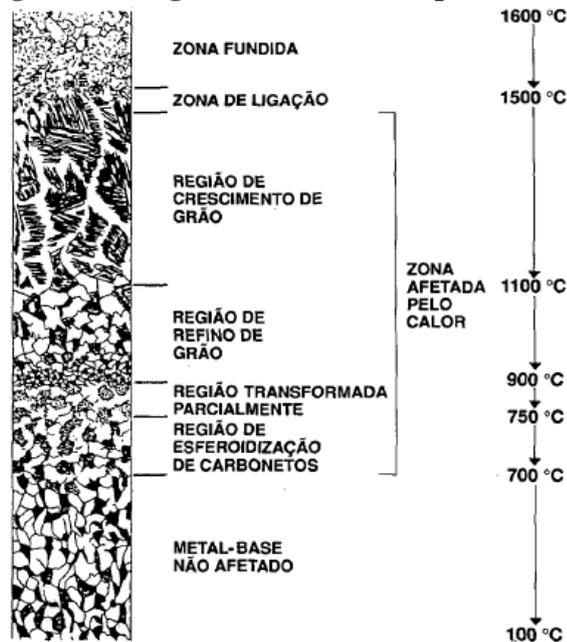
A região “B”, mostrada na Figura 5, representa a Zona Termicamente Afetada (ZTA) ou Zona Afetada pelo Calor (ZAC), nessa região as temperaturas alcançadas foram maiores que a temperatura crítica (T_c) e menores que a temperatura de fusão do metal de base (MB), ou seja, a microestrutura pode ter sido alterada pelo ciclo térmico de soldagem. Os aspectos da ZTA envolvem o tipo de material, tipo de processo e suas etapas de execução. A complexidade dessa região irá depender do tipo de material. Ligas de Alumínio tendem a apresentar crescimento de grão como mudança estrutural mais relevante, mas nos casos dos aços, que são ligas

transformáveis, as mudanças na microestrutura são observadas em diversas regiões, como: (MARQUES *et al.*, 2009).

- Região de crescimento de grão, é a região mais próxima da zona fundida, acontece entre 1100 e 1500 °C e sofre influência da transformação da fase austenita para a fase ferrita. Essa pode ser uma transformação adifusional, ou seja, a austenita passa por uma transformação martensítica devido a expressiva velocidade de resfriamento. O crescimento de grão sequente depende do tempo em que a região ficará sobre temperaturas maiores que 1300 °C. A presença de partículas ou precipitados alojados nos contornos de grãos inibem o crescimento desse. As propriedades mecânicas dessa região são determinadas pelos produtos da austenita no resfriamento e o crescimento de grão (WAINER *et al.*, 2004)
- Região de refino de grão, ocorre entre 1100 e 900 °C, nesse caso também é considerado a deformação plástica causada pela transformação da austenita para martensita, porém os efeitos são menores que na região de crescimento de grão, sendo assim a austenita se transforma em perlita ou ferrita com grãos refinados, além de apresentar alta resistência e ductilidade (WAINER *et al.*, 2004).
- Região intercrítica ou parcialmente transformada, ocorre a temperaturas que variam de 900 a 750 °C, nesta faixa de temperaturas a transformação em austenita ocorre somente em uma determinada região do metal de base, e quando resfriada a austenita pode gerar constituintes como perlita, bainita ou martensita maclada, podendo apresentar propriedades mecânicas inferiores ao metal de base (MARQUES *et al.*, 2009; WAINER *et al.*, 2004).

As regiões que compreendem a ZTA (Zona Termicamente Afetada), são apresentadas na Figura 6, juntamente com suas respectivas temperaturas.

Figura 6 – Regiões da ZTA e temperaturas



Fonte: WAINER *et al.*, 2004.

A região “C”, mostrada na Figura 5, representa o metal de base, por ser mais distante do cordão de solda as temperaturas atingidas não superam a temperatura crítica, logo, não há transformações microestruturais causadas pelo processo de soldagem (MARQUES *et al.*, 2009).

4.3 Processo de Soldagem a arco elétrico – GMAW (*Gas Metal Arc Welding*)

O processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) ou MIG/MAG ou ainda, soldagem a arco com proteção gasosa, destina-se a coalescência de materiais pelo aquecimento e fusão. No qual a fonte de calor é o arco elétrico estabelecido entre um eletrodo e a peça, sendo o eletrodo consumível e sem revestimento na forma de arame contínuo. Gases inertes ou ativos, ou até mesmo uma mistura desses, garantem a proteção do arco e da poça de fusão de contaminantes presentes na atmosfera (MARQUES *et al.*, 2009).

4.3.1 Fundamentos

O processo GMAW geralmente é semiautomático, e a alimentação do eletrodo ocorre automaticamente por meio de um alimentador mecanizado. O operador controla o momento de início e de fim da soldagem, como também os movimentos da tocha. (MARQUES *et al.*, 2009).

Geralmente para metais ferrosos é usado uma mistura de gases ativos e para metais não ferrosos é utilizado uma mistura de gases inativos (MARQUES *et al.*, 2009).

A alta empregabilidade do processo GMAW é relacionada às seguintes vantagens: (MARQUES *et al.*, 2009; MACHADO, 1996; WAINER *et al.*, 2004).

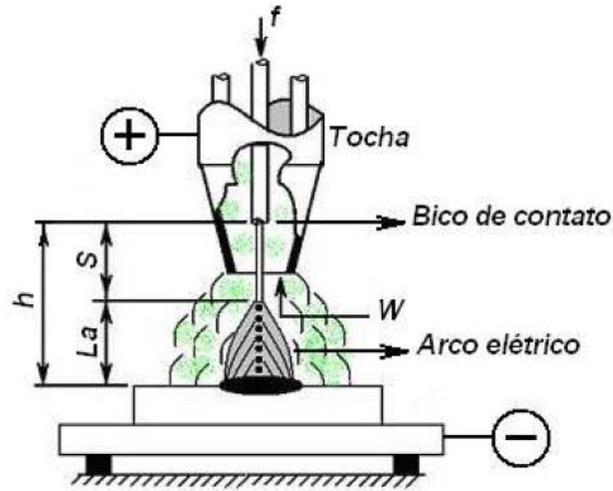
- Quando comparado ao processo *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) possui taxa de deposição e fator de ocupação do operador maior, além disso é observado maior uniformidade na penetração de raiz;
- Alta capacidade de robotização;
- Ausência do fluxo de soldagem, eliminando a etapa de remoção de escória que seria formada pelo fluxo.
- A deposição do eletrodo é feita com baixo teor de Hidrogênio, reduzindo a chance de formação de trincas por esse mecanismo;
- Alimentação do arame é contínua;
- Todas as posições de soldagem podem ser empregadas;

Entretanto, o processo GMAW é limitado por alguns fatores, como: (MARQUES *et al.*, 2009; WAINER *et al.*, 2004).

- A ausência de escória aumenta a taxa de resfriamento e conseqüentemente pode ter a ocorrência de trincas.
- É preciso proteger o processo de correntes de ar, dificultando sua utilização em ambientes abertos;
- A risco de projeção de gotas durante a operação;
- Comparado ao processo SMAW, os equipamentos são mais complexos e dispendiosos;
- Os atributos finais do cordão de solda podem estar associados a um controle dos parâmetros, uma vez que pelas alterações desses são observadas mudanças nos aspectos finais do cordão, como o dimensional.
- A manutenção nos equipamentos deve ser feita com maior frequência, quando comparado ao processo SMAW.

Na Figura 7 é ilustrado esquematicamente o processo GMAW e suas variáveis, sendo “h” a distância entre o bico de contato e a peça, “L_a” o comprimento do arco, “S” o comprimento de arame energizado, “f” a velocidade alimentação e “W” a velocidade de fusão.

Figura 7 – Esquema do processo GMAW



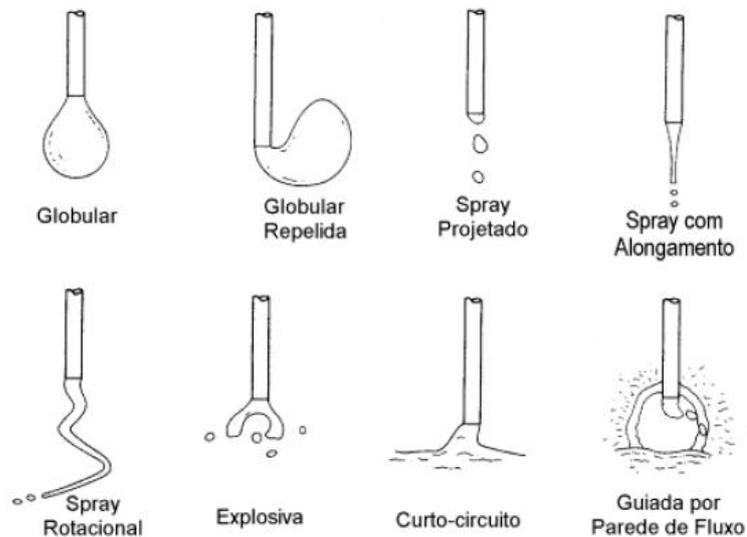
Fonte: SANTANA, 2010.

4.3.2 Modos de transferência metálica

Nos processos de soldagem que empregam eletrodos consumíveis, o metal fundido no eletrodo é transferido para a peça. Especialmente no processo GMAW a forma como essa transferência ocorre é muito relevante, pois irá influenciar na estabilidade do arco, na quantidade de gases absorvidos e nos níveis de respingos gerados (MARQUES *et al.*, 2009).

A Figura 8 ilustra diferentes modos de transferência metálica.

Figura 8 – Variados modos de transferência metálica

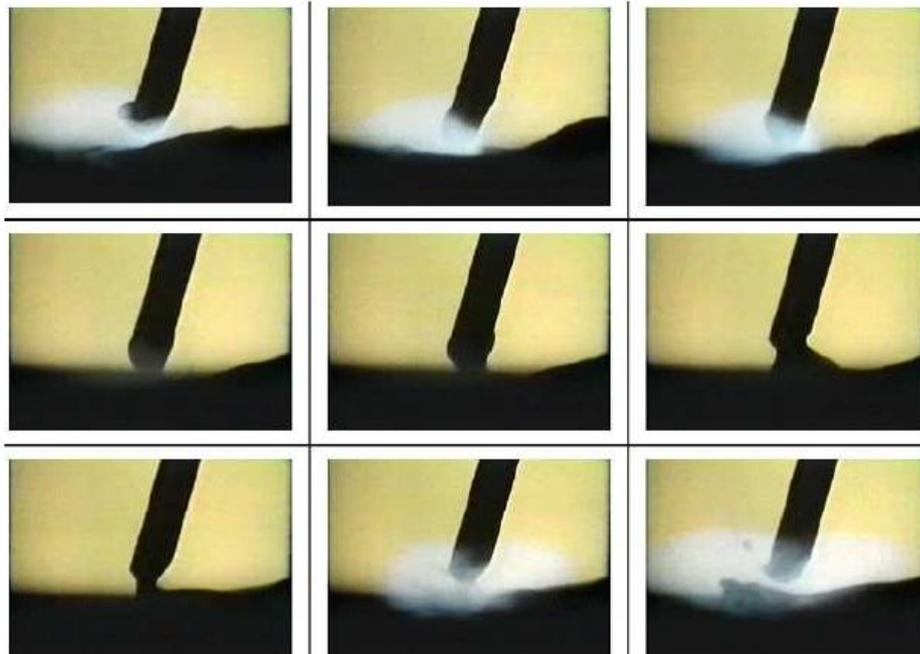


Fonte: MONDENESI, 2012.

As interações entre as forças que ocorrem na extremidade do eletrodo determinam o modo de transferência do metal fundido para a peça. Fatores como, a tensão e a corrente da fonte de energia, condições do ambiente de soldagem, composição química e dimensões dos eletrodos influenciam nas interações dessas forças. Segundo Machado (1996), existem várias formas de ocorrer a transferência metálica, mas as quatro principais são:

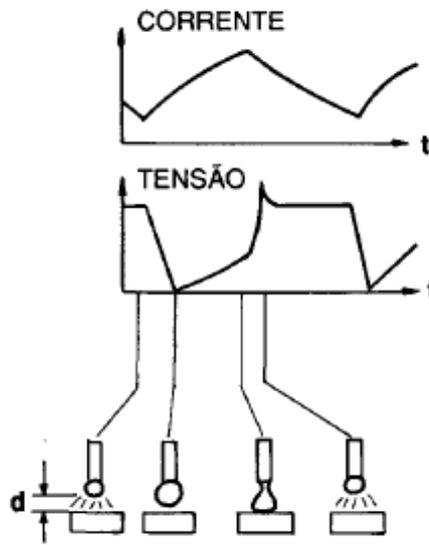
1) Transferência por curto-circuito: Quando a gota formada na extremidade do eletrodo tem seu diâmetro aumentado, por efeito da tensão superficial é estabelecido contato entre ela e a poça de fusão, provocando um curto-circuito. Esse modo de transferência é associado a baixos valores de tensão e corrente e eletrodos de pequenos diâmetros. Como envolve baixa energia de soldagem, é indicado para o processamento de chapas finas e quando necessário aplicação fora da posição plana. Relevantes oscilações nas amplitudes de tensão e corrente, arcos instáveis e projeção de respingos também são aspectos relacionados ao modo de transferência metálica por curto-circuito. Na Figura 9 é exibida a formação e a transferência de uma gota da extremidade do eletrodo para a peça, na Figura 10 é mostrado o comportamento da tensão e da corrente para cada etapa da sequência de curto-circuito (MARQUES *et al.*, 2009; MACHADO, 1996; WAINER *et al.*, 2004).

Figura 9 – Sequência de curto-circuito no processo GMAW



Fonte: SANTANA, 2010.

Figura 10 – Esquema da relação entre o modo de transferência metálica por curto-circuito e as variações de tensão e corrente.

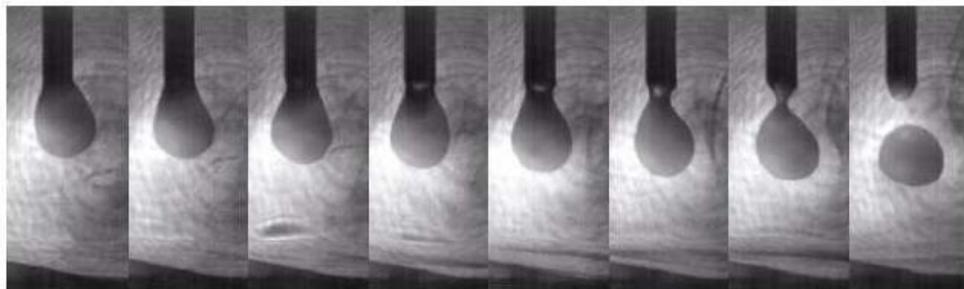


Fonte: WAINER *et al.*, 2004.

A ocorrência de curto-circuito depende do diâmetro do eletrodo e do valor de tensão. À medida que a tensão diminui, a frequência de curto-circuito aumenta até um limite, para valores de tensão mais baixos que esse limite a operação é interrompida (MACHADO,1996).

2) Transferência globular: Quando a gota formada atinge um diâmetro maior que do eletrodo, além da tensão superficial passa a agir a aceleração da gravidade, transferindo a gota para a poça de fusão, conforme é ilustrado na Figura 11. Por esse motivo sua aplicação é limitada à posição de soldagem plana. Esse modo de transferência é associado a valores de tensão e corrente mais altos que os valores observados para a transferência por curto-circuito, resultando em arcos mais estáveis, entretanto a transferência é mais imprevisível e com uma quantidade de respingos relevante (MARQUES *et al.*, 2009; MACHADO, 1996).

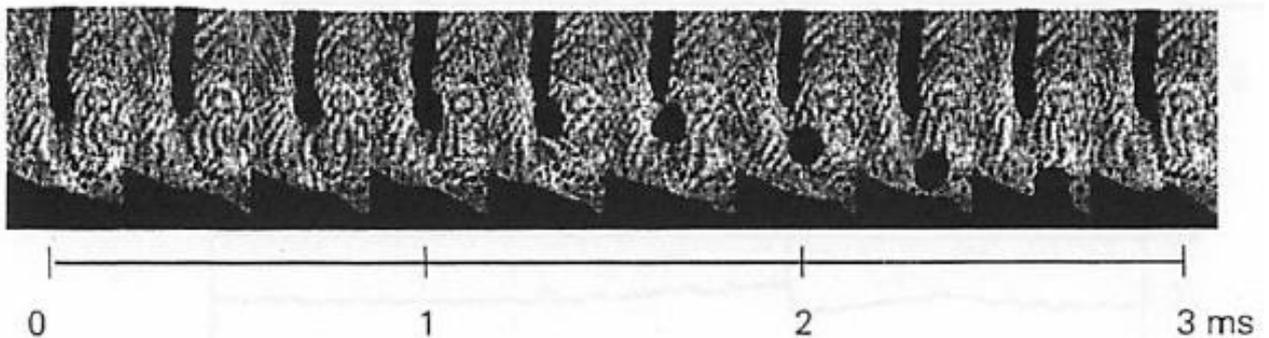
Figura 11 – Modo de transferência globular



Fonte: SANTANA, 2010.

3) Transferência por “spray” ou pulverização: Para as operações que utilizam proteção gasosa inerte ou minimamente oxidantes, conforme a corrente de soldagem é elevada o diâmetro médio das gotas formadas na extremidade do eletrodo diminui, então quando é atingido um intervalo curto de valores para a corrente chamada “corrente de transição” forças de caráter eletromagnéticas começam a agir, e um grande número de gotículas são formadas e projetadas para a poça de fusão, conforme ilustrado na Figura 12. Como os valores de tensão e corrente são mais altos comparados aos modos de transferência por curto-circuito e globular, é observado maior penetração e taxa de deposição, por isso não é aplicável a chapas finas, esse modo de transferência também se limita a posição plana, pois a poça de fusão formada possui um tamanho considerável, que pode causar problemas quando aplicado em outras posições. São associados a transferência por “spray” baixa projeção de respingos, cordões de solda regulares e arcos estáveis, com aparência e ruídos consideravelmente diferentes dos modos anteriores (MARQUES *et al.*, 2009; MACHADO, 1996).

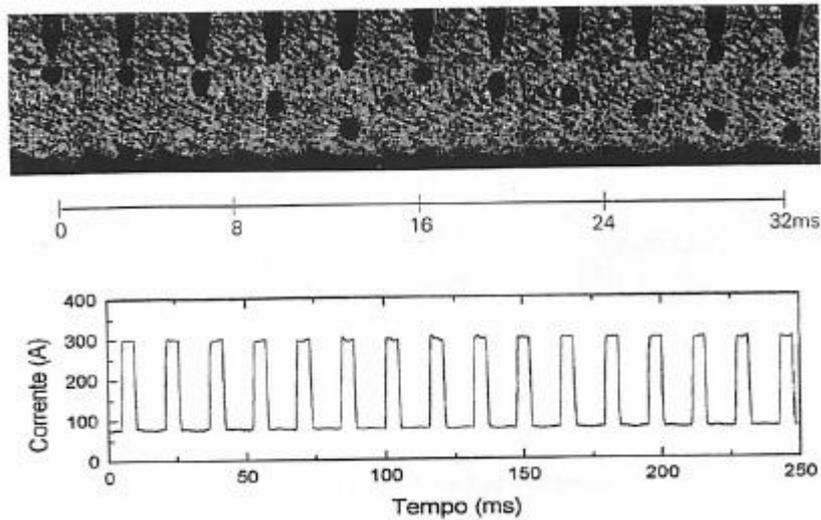
Figura 12 – Modo de transferência por “spray”



Fonte: MARQUES *et al.*, 2009.

4) Transferência pulsada: Ocorre quando há uma alternância da corrente entre valores menores e maiores que a corrente de transição, uma única gota é formada na extremidade do eletrodo no intervalo de tempo em que a corrente é inferior, e é transferida para a poça de fusão quando a corrente é superior a corrente de transição. São associados a transferência pulsada arcos estáveis e uniformes. Como o calor gerado é menor que na transferência por pulverização torna-se possível a aplicação em chapas de variados tamanhos. Na Figura 13 é apresentado a transferência pulsada e o comportamento da corrente durante o processamento (MARQUES *et al.*, 2009; WAINER *et al.*, 2004).

Figura 13 – Modo de transferência pulsada e o comportamento da corrente

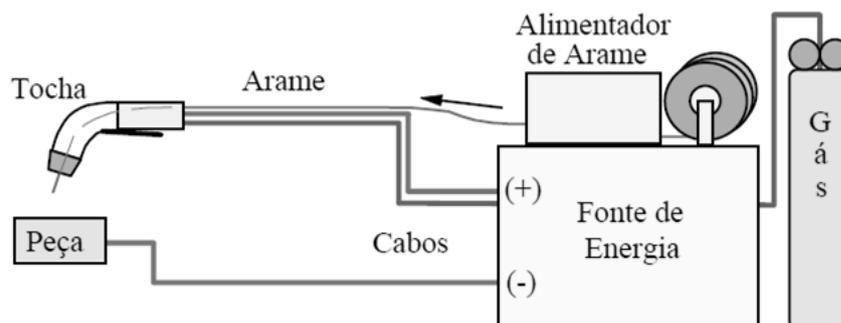


Fonte: MARQUES *et al.*, 2009.

4.3.3 Equipamentos e consumíveis

Basicamente os equipamentos do processo GMAW é constituído por uma fonte de energia, alimentador de arames, tocha de soldagem, fonte de gás de proteção, cabos e mangueiras. Os principais equipamentos são mostrados esquematicamente na Figura 14 (MARQUES *et al.*, 2009).

Figura 14 – Principais equipamentos utilizados no processo GMAW.



Fonte: MARQUES *et al.*, 2009.

Geralmente é utilizado fonte de tensão constante, com fornecimento de arame a uma velocidade constante, dessa forma o comprimento do arco é mantido estável. Para esse sistema o comprimento do arco irá variar de acordo com as alterações na corrente, sendo essa contínua com o eletrodo ligado ao polo positivo (CC+) (MARQUES *et al.*, 2009; MARQUES, MONDENESI, 2006).

Os alimentadores possuem controle para a velocidade de alimentação. A combinação entre a velocidade de alimentação e a tensão ajustada na fonte, determinam a corrente de soldagem (MARQUES *et al.*, 2009; WAINER *et al.*, 2004).

A tocha para soldagem suporta o bico de contato responsável pela energização do arame eletrodo, o bocal que conduz o fluxo de gás protetor e o gatilho que aciona o sistema. O sistema de resfriamento depende da corrente de soldagem, do gás de proteção e do fator de trabalho, podendo ser refrigerada a água ou a ar (MARQUES *et al.*, 2009; WAINER *et al.*, 2004).

O gás de proteção é armazenado em cilindros de aço que possui uma válvula de abertura e reguladores de pressão e controladores de vazão (WAINER *et al.*, 2004).

Os consumíveis do processo GMAW são os arames e o gás de proteção. Os arames são produzidos por metais ou suas ligas, com características bem controladas. Os gases de proteção, como já dito, podem ser inertes, para metais não ferrosos, ou ativos ou uma mistura desses, para metais ferrosos. A escolha do gás de proteção é relevante pois exerce ação sobre os aspectos do arco, a transferência metálica, penetração, dimensões do cordão de solda e custos do processo (MARQUES *et al.*, 2009).

O processo GMAW exige menos habilidade do operador, quando comparado ao processo SMAW. Todavia a execução da operação é dificultada pelo número elevado de variáveis, sendo as principais, a tensão, corrente, polaridade do arco, velocidade de deslocamento, vazão do gás de proteção, dimensões do eletrodo (MARQUES *et al.*, 2009).

4.4 Aço AISI 1020

A NBR NM 172:1998 classifica o aço AISI 1020 como aço para construção mecânica, ou seja, sua aplicação é destinada a fabricação de peças e componentes mecânicos, posteriormente ao tratamento térmico, como por exemplo elementos estruturais de máquinas.

Dependendo da aplicação, deve possuir controle rigoroso quanto a tolerâncias dimensionais e acabamento superficial adequado.

Em relação a composição química, a NBR NM 87:2000 classifica o aço Copant 1020 como aço ao carbono e estabelece a composição química de acordo com os valores da Tabela 2.

Tabela 2 – Composição química do aço Copant 1020

Designação Copant/AISI	Composição Química de Corrida (%)			
	Carbono (C)	Manganês (Mn)	Fósforo (P)	Enxofre (S)
1020	0,18-0,23	0,30-0,60	0,040	0,050

Fonte: NBR NM 87:2000.

4.5 Simulação Numérica no Processo de Soldagem

Devido à grande relevância do processo GMAW para indústria, diferentes estudos foram desenvolvidos com a proposta de caracterizar os fenômenos térmicos e operacionais. Além disso, esses estudos buscam uma melhor compreensão do processo. Em razão da sua complexidade, que está relacionada as transformações metalúrgicas inerentes aos processos de soldagem. Bem como, a forte dependência que pode existir entre os aspectos finais do cordão e os parâmetros da fonte de soldagem, afetando a estabilidade do arco e o modo de transferência metálica (MARQUES *et al.*, 2009; SANTANA, 2010; ARRUDA *et al.*, 2019).

4.5.1 Fundamentos

Para isso, os estudos são divididos em diferentes segmentos na intenção de prever as características geométricas do cordão de solda, a resposta mecânica e as tensões residuais da junta soldada. Como por exemplo, estudos com a proposta de modelar os parâmetros de soldagem, ou estudos que viabilizam a criação de modelos matemáticos para particularidades do processo de soldagem. Outra linha de pesquisa, são os estudos que empregam as equações de distribuição de fluxo de calor na peça, para prever as dimensões da poça de fusão e ou mudanças metalúrgicas na região soldada, utilizando por exemplo o método de elementos finitos. (SANTANA, 2010).

4.5.2 Método dos Elementos Finitos

A geometria a ser simulada é subdividida em pequenas partes, os chamados elementos, esses representam o domínio contínuo da solução. O método dos elementos finitos se baseia em substituir as infinitas variáveis que são desconhecidas pelos elementos. Pois esses possuem um número limitado, seu comportamento é conhecido e suas dimensões finitas, dando origem ao nome do método. Os elementos podem possuir variadas formas, por exemplo, triangular ou

quadriculado, sendo depende do tipo de análise e da dimensão do problema (MIRLISENNA, 2016).

Os nós ou pontos nodais conectam os elementos. O conjunto de nós e elementos é chamado de malha. Devido a divisão da geometria, as equações que descrevem os comportamentos físicos não são resolvidas de maneira exata, mas aproximada. A exatidão do método está relacionada à quantidade, ao tamanho e a geometria dos nós e elementos. Isto é, quanto menor o tamanho dos elementos, maior será a quantidade necessária para descrever a geometria e maior a exatidão da análise (MIRLISENNA, 2016).

4.6 Análise Térmica

A análise térmica dos processos de soldagem por fusão utilizando o método dos elementos finitos se baseia na solução numérica de Equações diferenciais parciais. Estas quando solucionadas apresentam valores para as variáveis de interesse em cada ponto do domínio, que é discretizado em vários elementos menores. Esses valores são determinados por meio de aproximações feitas através de interpolações (PAIVA *et al.*, 2018; SOUZA, 2016).

O calor proveniente da fonte elétrica da tocha é transferido para o componente. Essa transferência de calor ocorre por condução e a transferência de calor para o meio ocorre por convecção e radiação (WAINER *et al.*, 2004; MACHADO, 2000).

4.6.1 Condução

Como já dito, o fenômeno da condução é responsável por propagar a energia térmica através do material. A partir da Lei de Fourier é obtida a Equação diferencial que governa a análise transitória da transferência de calor por condução, durante a soldagem. Que é descrita pela Equação 6, em coordenadas cartesianas, sua solução permite determinar os campos de temperaturas em um meio estacionário (INCROPERA *et al.*, 2008, MACHADO, 2000).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6)$$

No qual, “ ρ ” é a densidade do material (kg.m^3), “ c_p ” é o calor específico (J/kg.K), “ K ” é a condutividade térmica (W/m.K), “ t ” é o tempo (s), “ T ” é a temperatura (K), “ x ”, “ y ” e “ z ”

são as coordenadas do sistema de referência e “q” é a geração de calor por unidade de volume (W/m^3).

4.6.2 Convecção

A transferência de calor por convecção de uma superfície para um escoamento adjacente é modelada matematicamente pela Lei de Resfriamento de Newton, conforme mostrado na Equação 7 (INCROPERA *et al.*, 2008):

$$q_{\text{conv}} = h \cdot (T_{\text{sup}} - T_{\infty}) \quad (7)$$

No qual, “ q_{conv} ” é o fluxo de calor dissipado por convecção (W/m^2), “ T_{sup} ” é a temperatura da superfície (K) e “ T_{∞} ” é a temperatura do escoamento adjacente (K) e “ h ” é o coeficiente de transferência de calor por convecção ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$).

O coeficiente de transferência de calor por convecção “ h ” é um parâmetro determinado por modelos empíricos, cujo valor depende de todas as variáveis que influenciam na convecção. Como a geometria da superfície e as propriedades do escoamento. Seu valor é determinado pela Equação 8 (INCROPERA *et al.*, 2008):

$$h = \frac{\text{Nu} \cdot K}{L} \quad (8)$$

No qual “ L ” é a dimensão característica (m), “ K ” é a condutividade térmica do fluido ($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$) e “ Nu ” é um número adimensional conhecido como número de Nusselt, que é obtido por modelos empíricos em função de outros números adimensionais como o número de Rayleigh. O número de Rayleigh (Ra), por sua vez, está associado com os fluxos conduzidos por empuxo, também conhecidos como convecção livre ou convecção natural. Seu valor é determinado de acordo com a Equação 9 (INCROPERA *et al.*, 2008):

$$\text{Ra} = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_{\text{sup}} - T_{\infty}) \cdot L^3}{\alpha \cdot \nu} \quad (9)$$

No qual “ g ” é a aceleração gravitacional (m/s^2), “ β ” é o coeficiente de expansão térmica (K^{-1}), “ ν ” é a viscosidade cinemática (m^2/s) e “ α ” é a difusividade térmica.

Para convecção natural sobre a superfície de placas verticais com valores de “Ra” menores ou iguais a 10^9 , ou seja, em regime laminar, o valor de Nusselt pode ser determinado utilizando a Equação 10 (INCROPERA *et al.*, 2008):

$$\text{Nu} = 0,68 + \frac{0,67 \cdot \text{Ra}^{1/4}}{\left[1 + (0,492/\text{Pr})^{9/16}\right]^{4/9}} \quad (10)$$

No qual, “Pr” é um número adimensional calculado pela razão entre a taxa de difusão viscosa e a taxa de difusão térmica.

Para convecção natural sobre a superfície de placas horizontais com valores de “Ra” entre 10^4 e 10^7 , o valor de Nusselt pode ser determinado utilizando a Equação 11 (INCROPERA *et al.*, 2008):

$$\text{Nu} = 0,54 * \text{Ra}^{1/4} \quad (11)$$

4.6.3 Radiação

A transferência de calor por radiação entre uma superfície e a vizinhança que a engloba completamente pode ser modelada, de acordo com a Equação 12 (INCROPERA *et al.*, 2008):

$$q_{\text{rad}} = \varepsilon \cdot \sigma (T_{\text{sup}}^4 - T_{\text{viz}}^4) \quad (12)$$

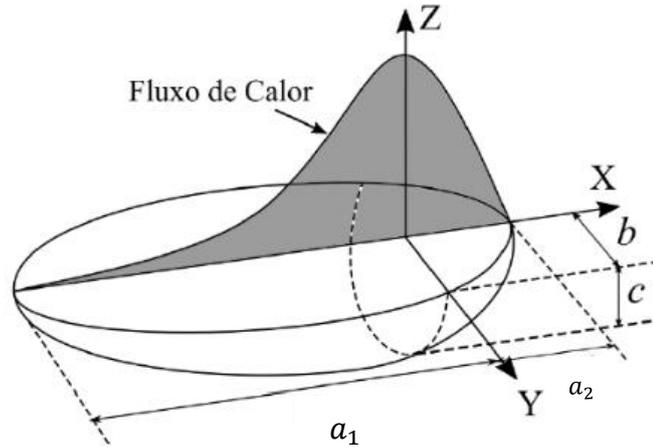
No qual, “ q_{rad} ” representa o fluxo de calor por radiação, “ ε ” é a emissividade, variando entre 0 e 1, “ σ ” é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8}$ (W/m².K⁴)) e “ T_{viz} ” é a temperatura da vizinhança (K).

4.6.4 Fonte Analítica de calor

Grande parte das análises térmicas de soldagem realizadas pelo método dos elementos finitos utiliza o modelo de fonte de calor proposto por Goldak *et al.*, (1984). Que consiste na modelagem matemática de uma fonte tridimensional, no qual a distribuição de calor ocorre por meio de dois elipsoides, conforme é ilustrado pela Figura 15. O modelo apresentado considera fontes que não possuem simetria radial, ou seja, o gradiente de temperatura na frente da fonte

é diferente do gradiente da parte de trás, conforme é descrito nas Equações 13 e 14 (GARCIA, *et al.*, 2020; PÉREZ, 2019; XIONG, *et al.*, 2017).

Figura 15 – Modelo dupla elipsóide proposto por Goldak



Fonte: PÉREZ, 2019

$$q_1(x,y,z) = \frac{6\sqrt{3}f_1Q}{\pi a_1 b c \sqrt{\pi}} \cdot \exp\left(-3\frac{x^2}{a_1^2} - 3\frac{y^2}{b^2} - 3\frac{z^2}{c^2}\right) \quad (13)$$

$$q_2(x,y,z) = \frac{6\sqrt{3}f_2Q}{\pi a_2 b c \sqrt{\pi}} \cdot \exp\left(-3\frac{x^2}{a_2^2} - 3\frac{y^2}{b^2} - 3\frac{z^2}{c^2}\right) \quad (14)$$

No qual, “Q” é a energia líquida disponível e seu valor é obtido por meio da Equação 4, “f₁” e “f₂” representam as funções de distribuição de calor na parte frontal e traseira da fonte, respectivamente, “a₁” e “a₂” são o comprimento dos semi-eixos frontal e traseiros, respectivamente, “b” é a largura e “c” a profundidade.

5 ESTADO DA ARTE

Xiong *et al.* (2017) realizaram uma simulação computacional, utilizando o método dos elementos finitos para peças de pequenas espessuras e tubulares. O objetivo do estudo foi verificar o efeito do pré-aquecimento nas peças unidas pelo processo GMAW. Pois através do pré-aquecimento, tensões residuais e ocorrência de trincas são minimizadas. Após definir a malha em toda a geometria, com base em dados da literatura, foram feitos refinamentos em regiões específicas, como a ZTA, a fim de obter resultados mais próximos dos experimentais. A técnica do elemento “morto” e elemento “nascido” foi utilizada para simular a deposição de material no cordão de solda. Essa técnica consiste em ativar ou desativar um elemento em uma etapa específica da simulação. Nesse caso os passes de solda são inativados e a partir do avanço da fonte de calor são individualmente ativados. Foram simuladas temperaturas de pré-aquecimento em uma faixa que variou de 200 a 600 °C. Para a simulação, foi considerado um modelo tridimensional com os mesmos parâmetros ensaiados. Dessa forma obteve-se ciclos térmicos de soldagem próximos para ambos procedimentos. Os resultados mostram que o pré-aquecimento da peça tem uma tendência a tornar a distribuição da temperatura mais homogênea, até um certo ponto. Dessa forma as distorções e descontinuidades podem ser reduzidas. Além disso a temperatura máxima da poça de fusão é maior quando a temperatura do pré-aquecimento é maior e a taxa de resfriamento da poça de fusão diminui gradativamente com o aumento das faixas de temperatura do pré-aquecimento (XIONG, *et al.* 2017).

Neto, Souza, Júnior (2017) desenvolveram um modelo matemático computacional, implementado em C++ para solucionar as equações de condução de calor. Essas Equações descrevem a deposição de metal durante o processamento de chapas de aço inoxidável AISI 304, unidas pelo processo GMAW, por meio de um chanfro em V com 45° em um único passe. A validação da simulação foi feita através de ensaios laboratoriais. Para estimar a taxa de calor transferido para a peça foi utilizada a técnica *Golden Section*. Foram consideradas as variações das propriedades térmicas com a temperatura, as mudanças de fases que são comumente observadas durante o processo e um modelo tridimensional. A simulação foi realizada no software comercial Ansys, considerando uma análise térmica pelo método dos volumes finitos. Dessa forma foi possível determinar o valor da eficiência do processo, bem como os campos de temperatura. Tais valores estão próximos dos valores encontrados nos experimentos (NETO, *et al.*, 2017).

Valdenebro *et al.* (2019), fizeram um estudo para validar o ciclo térmico de soldagem determinado experimentalmente durante o processamento de um perfil tubular de alumínio

6063-T5, pelo processo MIG (*Metal Inerte Gás*). Foi realizada uma análise térmica pelo método dos elementos finitos, utilizando o Software comercial Ansys. Para simular o fluxo de calor no cordão, foram consideradas variadas cargas térmicas como, fluxo de calor, convecção e radiação na superfície do cordão e do metal base, além da temperatura ambiente. O modelo analítico para descrever a fonte de calor foi baseada nas considerações de Goldak. A quantidade de energia fornecida a peça foi calculada considerando os parâmetros: eficiência do processo, tensão, corrente e velocidade de avanço da fonte de calor. Padrões rigorosos foram adotados para garantir uma semelhança considerável entre o cordão formado experimentalmente e a geometria do cordão simulado. Dessa forma os valores obtidos para temperatura máxima e tempo para atingir a temperatura de pico, do processo experimental e do processo simulado foram próximos, validando a simulação. Além disso, também foram obtidos, ciclo térmico de soldagem e taxa de resfriamento do ciclo térmico similares para ambos (VALDENEBRO, *et al.*, 2019).

Guimarães, Neto, Antônio (2018) realizaram um estudo a fim de determinar numericamente o campo de temperatura e o ciclo térmico de soldagem. Foi desenvolvido um estudo para simular o processo MIG (*Metal Inerte Gás*), utilizando o método dos elementos finitos, por meio de um software comercial. Considerou-se a técnica de fluorescência de raios X (FXR) para definir a composição química do material a ser simulado, a liga de alumínio AA5056. A modelagem do aporte térmico foi feita com base nas considerações de Goldak. A técnica do elemento “morto” e elemento “nascido”, foi utilizada para simular a deposição de material no cordão de solda. Essa técnica considera os elementos inativos (mortos), antes da soldagem, e à medida que a fonte de calor avança sobre o chanfro e deposita o metal de solda, os elementos são ativados. Os resultados mostram que o uso dessa técnica possibilitou a obtenção de valores próximos aos valores encontrados na literatura. Para realizar a simulação, foram considerados como parâmetros de soldagem, o rendimento do arco, a velocidade da tocha, a tensão e a corrente. Além disso, foi feito um refino maior da malha na região da zona termicamente afetada para aprimorar os resultados. Dessa forma foi possível encontrar o campo de temperaturas e determinar o ciclo térmico da soldagem, possibilitando a compreensão das transformações metalúrgicas, ocorridas durante o processo. Bem como determinar as tensões residuais, prevenido vários inconvenientes (GUIMARÃES, *et al.*, 2018).

Morejón *et al.* (2011) realizaram uma modelagem térmica do processo de soldagem GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*), quando processado aço inoxidável AISI 316L. A análise tridimensional foi obtida por meio do Software comercial Ansys, que utiliza o método dos elementos finitos. Simultaneamente foi feito o implemento do modelo de elipsóide duplo

Goldak, em sistema de coordenadas cartesianas através da linguagem APDL, para considerar a distribuição de calor. Além disso foi avaliado a influência do tempo, ou seja, a simulação foi realizada em diferentes intervalos de tempos, que variou de 2,5 a 40 segundos. Nesse caso foram observados que para intervalos de tempo maiores o tamanho da zona termicamente afetada foi maior, e os campos de temperaturas obtidos tiveram uma diferença considerável quando comparados os valores experimentais. Para atingir resultados melhores foi realizado o teste de convergência de malha, que consiste em refinar a malha a cada simulação até que os valores não tenham grandes oscilações. E para assegurar a confiabilidade da simulação, foram realizados teste experimentais, com parâmetros de acordo com a literatura. Destaca-se a importância de estabelecer os parâmetros corretos de soldagem. Foi estabelecido o ciclo térmico para cada intervalo de tempo simulado, como também a dimensão da zona termicamente afetada e sua relação com tempo de permanência da fonte de calor (MOREJÓN, *et al.*, 2011).

Guerra (2017), desenvolveu uma metodologia a partir de uma modelagem numérica computacional, com base no método dos elementos finitos. O objetivo é comparar os ciclos térmicos de soldagem obtidos experimentalmente e por meio da simulação. No modelo elaborado é considerado uma análise térmica e a relação entre as propriedades físicas e a temperatura. Para descrever a fonte de calor foi utilizado o modelo proposto por Goldak, no qual, os parâmetros necessários para estimar a dimensão da zona fundida foram determinadas por meio de ensaios metalográficos em corpos de prova, e posteriormente inseridos na simulação. A fonte de calor simula o processo de soldagem GMAW aplicados a aços duplex. Foram feitas análises do período de aquecimento que ocorre com o avanço da fonte de calor e análise do período de resfriamento, que ocorre após a passagem da fonte de calor. Para o resfriamento foram consideradas perdas por convecção e radiação. Para avaliar melhor os gradientes térmicos na região da zona fundida, foi feito um refino maior da malha para essa região. Para ter um controle maior sobre as perdas de calor, foi adotada a técnica do elemento inativo, para períodos anteriores a passagem da fonte de calor e elementos ativos com a passagem da fonte de calor. Com a finalidade de aproximar os valores simulados a fontes reais, foi realizada uma análise transiente, ou seja, considerou-se a variação das propriedades físicas dos materiais com relação a temperatura e ao tempo. Após a soldagem experimental e os ensaios de macrografia, para determinar as dimensões da zona fundida e os campos de temperatura, determinou-se os parâmetros para a simulação. Dessa forma foi alcançado valores similares para os ciclos térmicos de soldagem, validando a simulação. Com os resultados obtidos é possível avaliar as alterações microestruturais que ocorrem nos aços inoxidáveis duplex durante o processo de soldagem (GUERRA, 2017).

Abid, Qarni (2009) fizeram um estudo para prever e avaliar detalhadamente o histórico térmico, englobando as distribuições de temperatura em função do tempo e o resfriamento após soldagem, foi realizada uma análise de transferência de calor não linear tridimensional. Foi simulado o processamento de chapas de aço baixo carbono, unidas pelo processo de soldagem GMAW, através de um cordão de solda de passe único e chanfrado em V. Para realizar a simulação foi considerado a eficiência do processo, a tensão, corrente e a velocidade da fonte de calor. Para esse último parâmetro foi determinado que a fonte de calor se move a uma velocidade constante e que a deposição de material foi feita em um único passe. Foi analisado o tempo em que a peça levou para retornar a temperatura ambiente, que foi cerca de 50 minutos. Após a simulação foi observado que a taxa de resfriamento é dependente das propriedades termofísica dos materiais e os maiores gradientes de temperatura estão nas regiões próximas a junta soldada. Como a geometria do cordão é circular foi variado o ângulo de início da soldagem para avaliar os efeitos, porém não houve grandes variações, mostrando que o histórico de temperatura não é sensível às mudanças nos ângulos definidos em relação à posição de início da soldagem. Para o estudo foi considerado a união de um tubo em um flange. Como a geometria analisada não é simétrica, as distribuições de temperaturas encontradas para as regiões próximas a linha de solda mostraram-se diferentes. Além disso, foi possível avaliar pela simulação o tempo de resfriamento, a dissipação de calor e os valores de temperaturas máximas atingidas, para o tubo e para o flange. Devido aos bons resultados encontrados na simulação torna-se viável a utilização desta para o cálculo de tensões residuais (ABID, QARNI, 2009).

Zhang *et al.* (2015) determinaram a eficiência térmica do processo DE-GMAW, por meio de uma simulação, para a soldagem de chapas de liga de magnésio AZ31B. Para isso foram feitos testes experimentais, com dispositivos de gravação acoplados que possibilitou encontrar as dimensões das zonas fundida e termicamente afetada. Posteriormente essas dimensões foram comparadas com as dimensões encontradas pela simulação. Várias simulações foram realizadas com diferentes valores para a eficiência do processo, com a finalidade de encontrar valores similares aos valores encontrados experimentalmente. Para realizar a simulação foram desconsiderados a altura do cordão de solda, as perdas por convecção dentro da poça de fusão. Foram considerando as trocas de calor por convecção, entre a superfície externa da peça e o ambiente e as perdas de calor por condução. Outro fator considerado foi a dependência do calor específico, do coeficiente de condutividade térmica e do valor de entalpia da liga de magnésio AZ31B com a temperatura. Além dessas cargas térmicas foi considerado uma temperatura inicial de 25 °C. Os parâmetros de soldagem usados na simulação foram os mesmos parâmetros utilizados no procedimento experimental. Os

valores de eficiência do processo foram ajustados para estarem de acordo com os valores obtidos experimentalmente, e foi de aproximadamente 30%. Devido aos bons resultados a simulação foi validada e posteriormente pode ser utilizada como base para o cálculo de tensões residuais, e evitar variados inconvenientes (ZHANG, *et al.*, 2015)

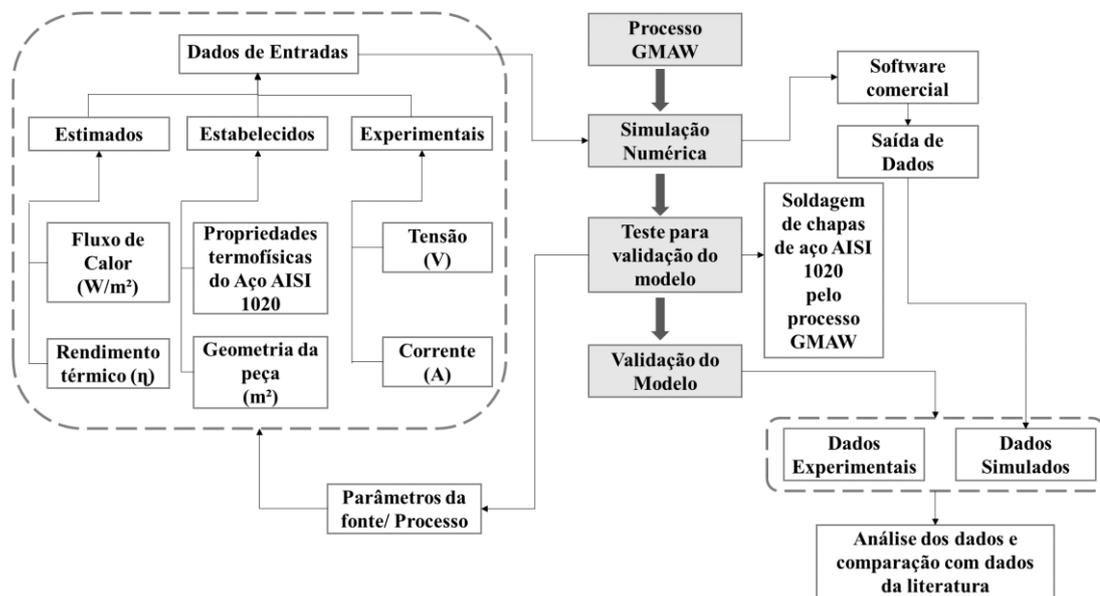
Kumar, Bhaduri (1995) realizaram uma modelagem transiente e tridimensional do processo GMAW para prever a distribuição de temperaturas. O modelo foi numericamente simulado usando o método dos elementos finitos. O estudo descreve uma fonte de calor volumétrica e aplicada à aços ao carbono. Foi considerado a variação da condutividade térmica e do calor específico com a temperatura, além das perdas de calor por convecção no interior da poça de fusão, da peça para o ambiente. Além disso foi avaliado a energia envolvida na transferência das gotas de metal, pois essas são relevantes para a formação do cordão de solda e na sua penetração. Os resultados encontrados na simulação foram comparados com dados da literatura. Foi calculado as dimensões da zona fundida, encontrando valores similares para a penetração do cordão e valores relativamente maiores para a largura do cordão, apesar disso os resultados foram considerados satisfatórios, validando a simulação (KUMAR, BHADURI, 1995).

6 METODOLOGIA

A metodologia de pesquisa aplicada nesse trabalho pode ser dividida em três etapas, conforme é ilustrado pela Figura 16:

- Aquisição de dados para a simulação numérica.
- Teste de validação do modelo.
- Validação do modelo, baseado na análise dos dados experimentais e simulados.

Figura 16 – Fluxograma



Fonte: Própria autora.

6.1 Procedimentos Computacionais

Foram realizadas no Software ANSYS® três simulações. Sendo o valor da potência específica, para a fonte de calor analítica, a diferença entre as simulações. Os parâmetros utilizados nas simulações são descritos a seguir.

6.1.1 Condições de Contorno

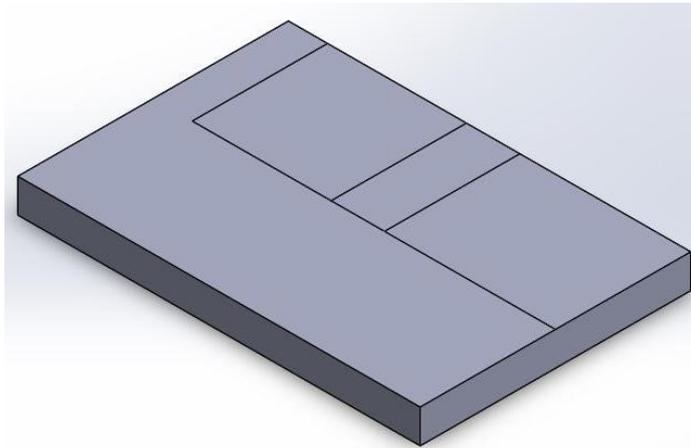
Para que as equações que descrevem a transferência e a fonte de calor nos processos de soldagem, ou seja, as Equações 4.6, 4.7, 4.12, 4.13 e 4.14 sejam resolvidas de maneira satisfatória pelo ANSYS® é preciso estabelecer condições de contorno. Para as simulações realizadas neste estudo as condições de contorno são citadas a seguir (MACHADO, 2000).

Por se tratar de um processo térmico, as condições de contorno computacionais consideradas foram as transferências de calor existentes no processo e as propriedades termofísicas. As trocas de calor inseridas na simulação foram a parcela de calor cedida à peça pela fonte externa (arco elétrico). O calor cedido pela peça ao meio externo por convecção natural e por radiação, sendo o fluxo de calor, considerado pelo ANSYS®, a partir da inserção do coeficiente convectivo e da emissividade, respectivamente. E uma temperatura ambiente de 32 °C, escolheu-se tal temperatura para uma maior aproximação com as condições reais em que foram realizados os testes experimentais.

6.1.2 Domínio da solução

O modelo computacional admitido, mostrado na Figura 17, consiste em uma chapa de comprimento de 113 mm, largura de 76 mm e espessura de 9,5 mm. A peça foi desenvolvida no *software* SOLIDWORKS® e posteriormente importada para o ANSYS®. As linhas observadas na geométrica foram inseridas para criar pontos e vértices estratégicos para avaliar a variação de temperaturas ao longo do tempo.

Figura 17 – Vista isométrica do modelo computacional utilizado



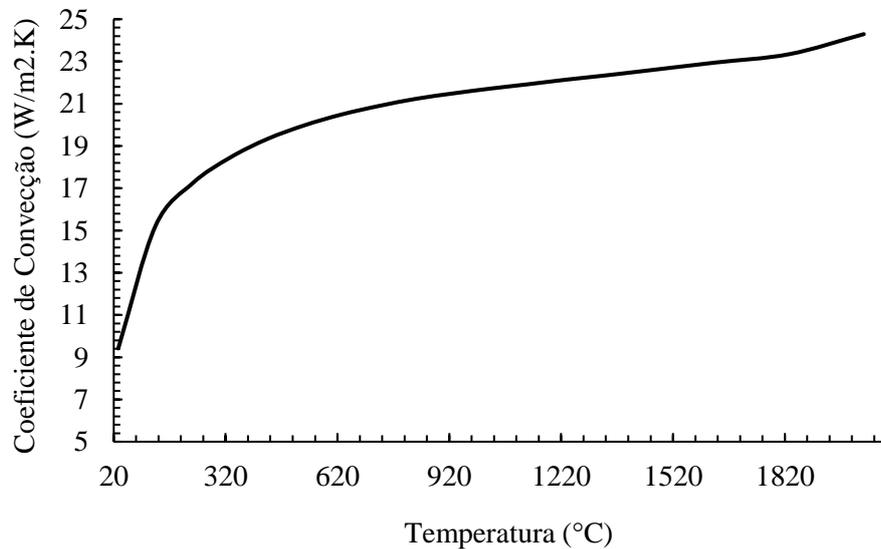
Fonte: Própria autora.

6.1.3 Convecção

No *Software* utilizado, a transferência por convecção é considerada inserindo o valor do coeficiente de transferência de calor por convecção (h). Foi calculado, para as faces laterais e a face superior da geometria simulada, um coeficiente de transferência de calor por convecção

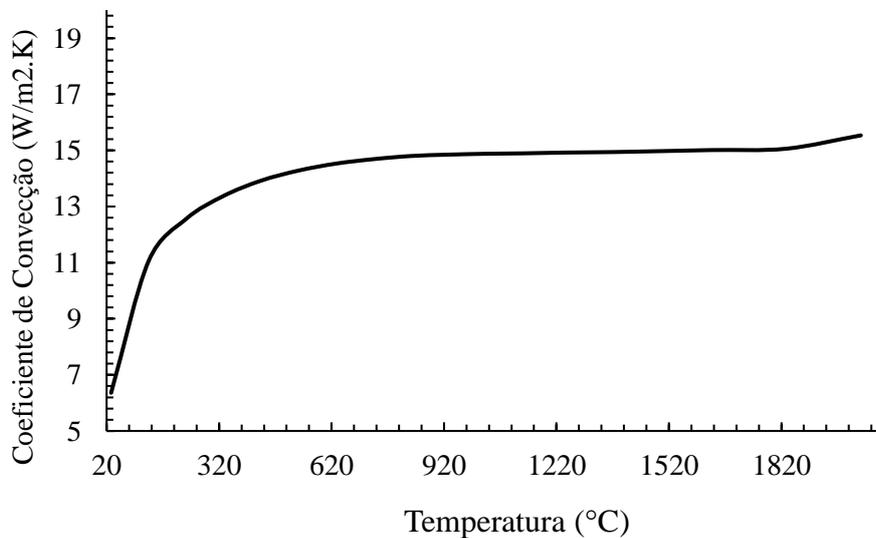
em função da temperatura com base nas Equações 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11. Posteriormente os valores foram inseridos no ANSYS®. Para o ambiente foi considerado ar quiescente a uma temperatura de 32 °C e pressão de 1 atm, os valores das propriedades do ar nessas condições (parâmetros “Pr”, “K”, “ β ”, “ α ” e “ ν ”) foram retirados de Incropera *et al.* (2008). Os Gráficos 1 e 2 apresentam o coeficiente de convecção em função da temperatura para as faces laterais e superior, respectivamente. Nas Figuras 18 e 19 são exibidos os valores inseridos no *Software*, e as faces aplicadas, indicadas pela cor amarela. No Apêndices A encontra-se a Tabela com todos os valores utilizados.

Gráfico 1 – Valores de h em função da temperatura para as faces laterais



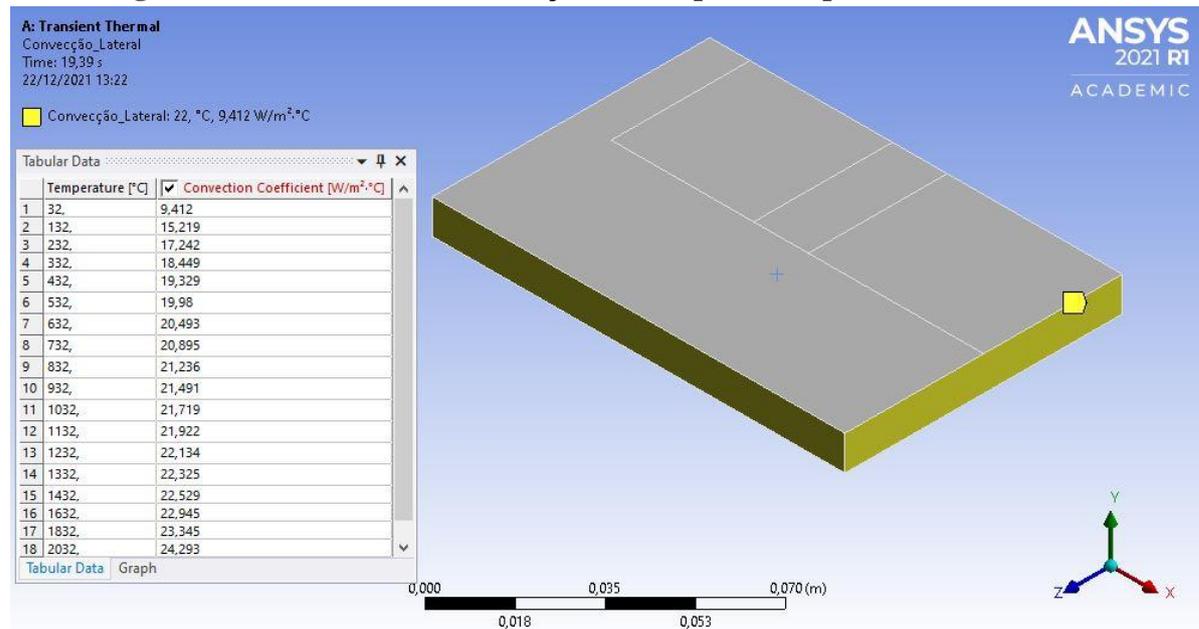
Fonte: Própria autora.

Gráfico 2 – Valores de h em função da temperatura para a face superior



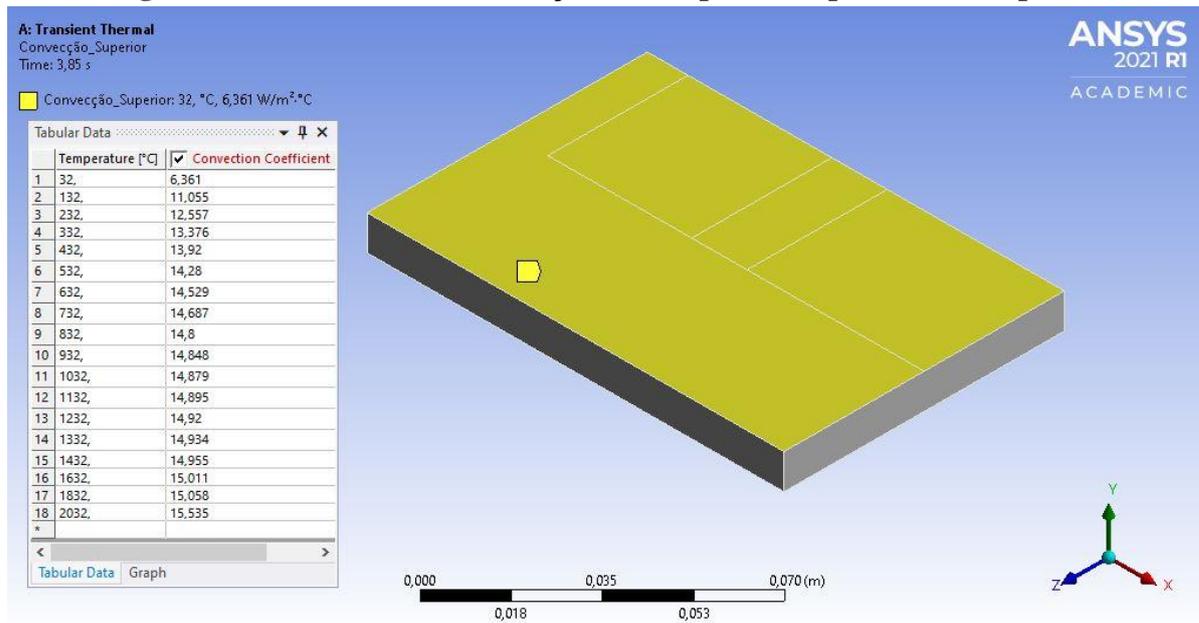
Fonte: Própria autora.

Figura 18 – Valores de h em função da temperatura para as faces laterais



Fonte: Própria autora.

Figura 19 – Valores de h em função da temperatura para a face superior



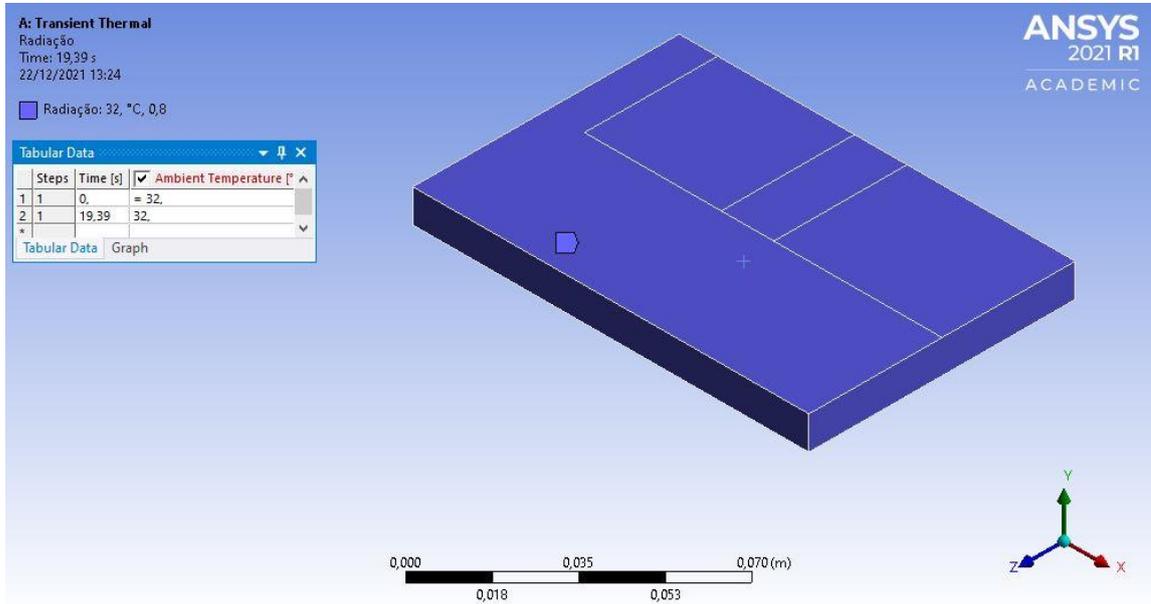
Fonte: Própria autora.

6.1.4 Radiação

No *Software* utilizado, a transferência por radiação é estimada considerando que o meio que engloba completamente o domínio está em temperatura ambiente e que a emissividade superficial é constante. Como já dito, considerou-se uma temperatura ambiente de 32 °C. A emissividade foi considerada como 0,8, para todas as faces, de acordo com os valores sugeridos

por Incropera *et al.* (2008) para aços carbono. Na Figura 20 é mostrado o valor da emissividade inserido no ANSYS® e as faces aplicadas, indicadas pela cor roxa.

Figura 20 – Valor da emissividade inseridos no Software



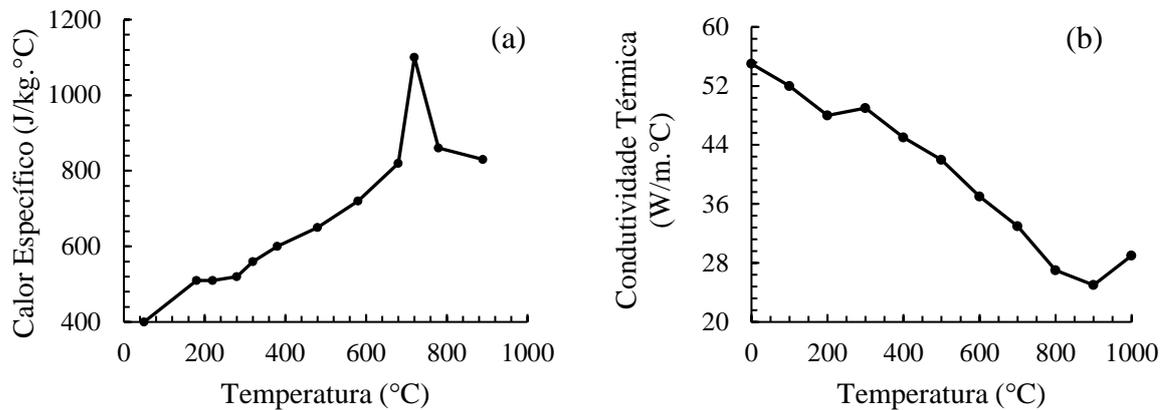
Fonte: Própria autora.

6.1.5 Propriedades físicas do AISI 1020

O processo de soldagem é um fenômeno transiente, ou seja, as propriedades termofísicas são dependentes da variação de temperatura e da taxa de calor que é transferido da fonte elétrica para a peça (PAIVA *et al.*, 2018; ARRUDA *et al.*, 2019).

Na análise térmica realizada nesse trabalho a condutividade térmica e o calor específico foram inseridos em função da temperatura de acordo com os Gráficos 3 (a) e (b). Considerou-se uma temperatura de fusão igual a 1520 °C e uma densidade constante no valor de 7678 kg/m³. Na figura 21 são mostrados os valores inseridos no ANSYS® e aplicados na peça, indicado pela cor verde (GARCIA, *et al.*, 2020; HUNG *et al.*, 2017).

Gráficos 3 (a) e (b) – Propriedade termofísicas do AISI 1020

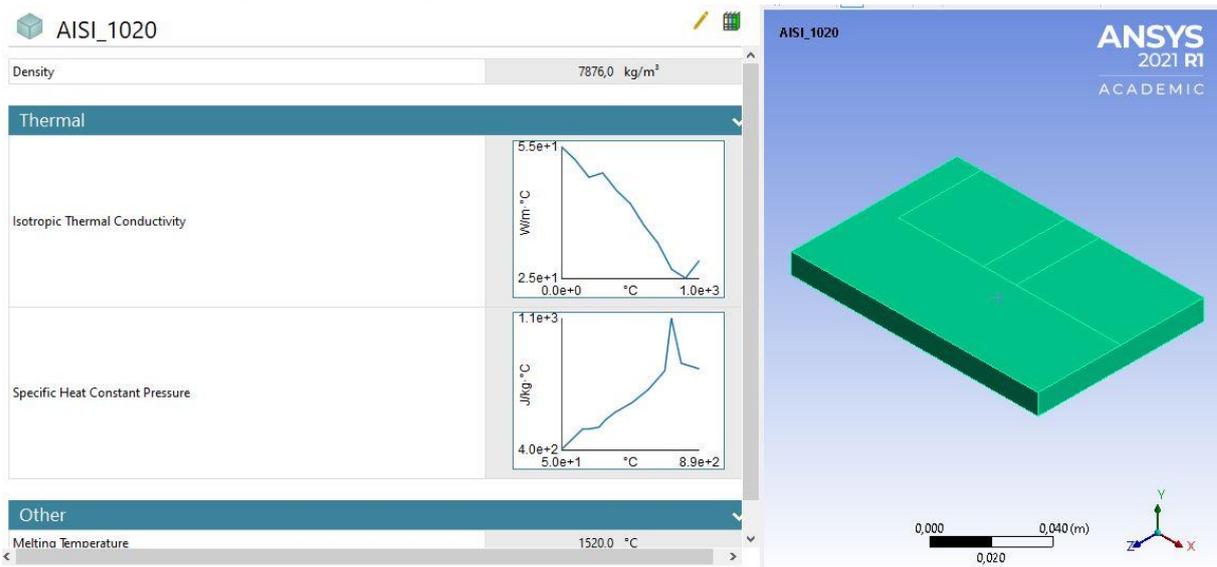


Fonte: GARCIA, *et al.*, 2020. Adaptado.

(a) Calor específico (J/kg.°C) x Temperatura (°C)

(b) Condutividade térmica (W/m.°C) x Temperatura (°C)

Figura 21 – Propriedades termofísicas aplicadas no modelo



Fonte: Própria autora.

6.1.6 Modelagem da fonte de calor

Para simular a parcela de energia cedida à peça pela fonte externa (Arco elétrico), utilizou-se uma extensão do *Software ANSYS*[®], denominada “*Moving Heat Flux*”. Para utilizá-la é necessário informar a potência específica da fonte (W/m^2), o raio da fonte (m), a velocidade de deslocamento (m/s), o caminho que irá ser percorrido e o ponto inicial. Considerou-se um cordão de 102 mm iniciado a 11 mm da borda da chapa.

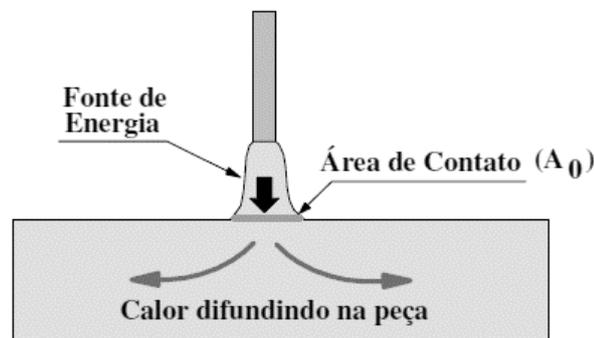
Para estimar o fluxo de calor durante o processo de soldagem, considerou a Equação 3, porém para o caso de fontes elétricas, como o arco elétrico, a potência da fonte é calculada pelo

produto da tensão (V) e a corrente (I). Sendo assim, para processos de soldagem a arco, a equação da potência específica pode ser reescrita, de acordo com a Equação 15 como (MONDENESI, 2007):

$$P_{\text{esp}} = \frac{\eta \cdot V \cdot I}{A_0} \quad (15)$$

No qual, “ A_0 ” é a área de contato entre a fonte e a peça (m^2), conforme é mostrado na Figura 22.

Figura 22 – Fluxo geral de calor na soldagem por fusão



Fonte: MONDENESI, 2007.

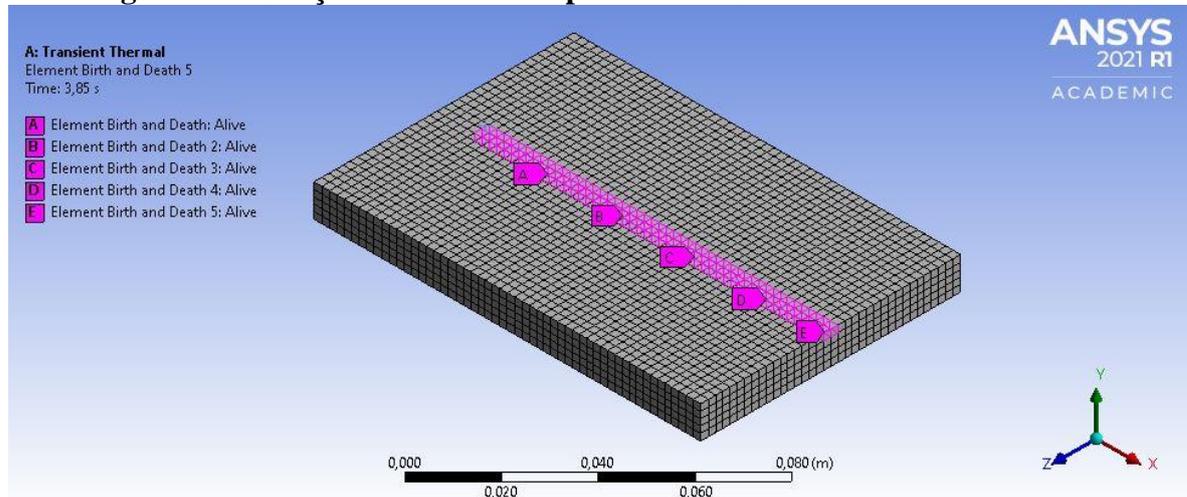
Considerou-se um raio de 5 mm para a fonte de calor, de acordo com os valores propostos por Garcia, *et al.* (2020). A partir desse valor, e dos parâmetros utilizados experimentalmente, calculou-se para cada simulação uma potência específica para a fonte de calor.

Parte do calor fornecido pelo arco elétrico é cedido à peça e outra parcela é destinada à fusão do metal de adição. Uma vez que a simulação realizada nesse estudo desconsidera a deposição do metal de adição, os valores para potência específica da fonte foram ajustados a fim de obter somente a energia cedida à peça. Os valores adotados são exibidos na Tabela 3 da seção 6.2.7 (MACHADO 2000; MARQUES *et al.*, 2009).

Para simular o resfriamento do cordão durante a soldagem utilizou-se um recurso do ANSYS® chamado *Element Birth and Death*. Que consiste em ativar ou desativar um ou vários elementos durante uma etapa específica da simulação. Então dividiu-se a simulação em cinco etapas e durante o processamento de cada etapa um conjunto de elementos era desativado à medida que a fonte de calor se deslocava sobre ele.

Na Figura 23 são mostrados os cinco conjuntos de elementos na primeira etapa da simulação, ou seja, enquanto todos os elementos estavam ativados.

Figura 23 – Seleção dos elementos para o recurso *Element Birth and Death*



Fonte: Própria Autora.

6.1.7 Parâmetros de soldagem na simulação

Na Tabela 3 são mostrados os parâmetros de soldagem e da fonte de calor utilizados na simulação para cada amostra.

Tabela 3 – Parâmetros de soldagem adotados na simulação

Parâmetros	Valores para Amostra 1	Valores para Amostra 2	Valores para Amostra 3
Corrente (A)	220	198	187
Tensão (V)	22	24	26
Potência Específica da fonte (W/m ²)	47.144.357	46.287.187	47.358.650
Eficiência do Processo (%)*	85	85	85
Tempo de Soldagem (s)	19,25	19,25	19,25
Velocidade de deslocamento da fonte (mm/s)	5,3	5,3	5,3
Raio da fonte de calor (mm)	5	5	5
Distancia a ser percorrida (mm)	102	102	102

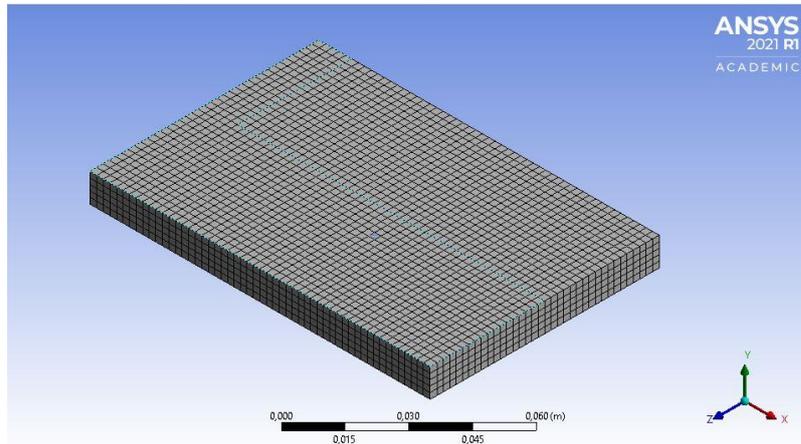
Fonte: Própria autora.

*Valores de eficiência térmica retirados de: WAINER *et al.*, 2004.

6.1.8 Malha

Ao criar a malha, as dimensões dos elementos foram determinadas de acordo com o teste de convergência de malha. Resultando em 9540 elementos e 45408 nós, com tamanho próximo a 2 mm. Na Figura 24 pode ser vista a malha aplicada ao modelo.

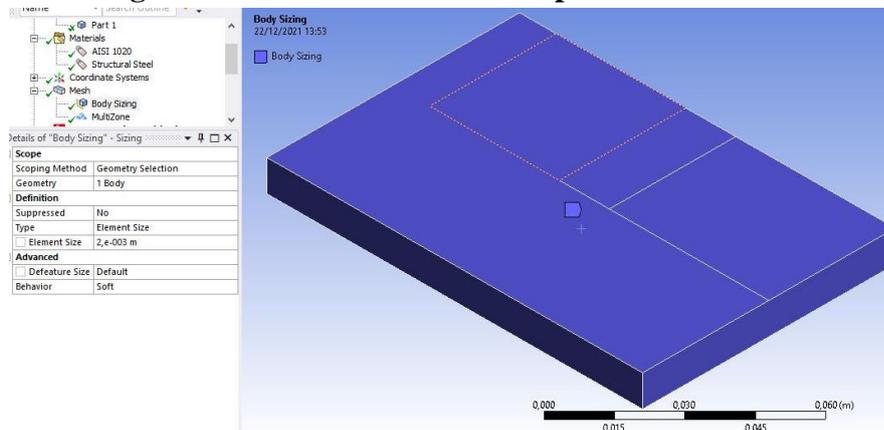
Figura 24 – Malha aplicada no modelo



Fonte: Própria autora.

Foram inseridos no *Software* dois controles de malha, conforme mostrado na Figura 25, o controle *Body Sizing* que permite controlar o tamanho dos elementos e o controle *MultiZone* que permite designar uma forma para os elementos. Por padrão o ANSYS® definiu os elementos como Hexaédricos, pois a geometria é regular e plana e não necessita de elementos com formatos mais complexos para descrever de forma precisa a peça. Além disso elementos Hexaédricos consomem menos processamento computacional.

Figura 25 – Controle de malha aplicada no modelo



Fonte: Própria autora.

6.1.9 Teste de convergência de malha

O teste baseia-se em realizar diversas simulações com malhas que serão refinadas a cada simulação até que não haja mudanças significativas no valor de uma variável determinada previamente. A convergência da malha ocorre no ponto em que não é notado diferenças nos valores da simulação ao refinar ainda mais a malha.

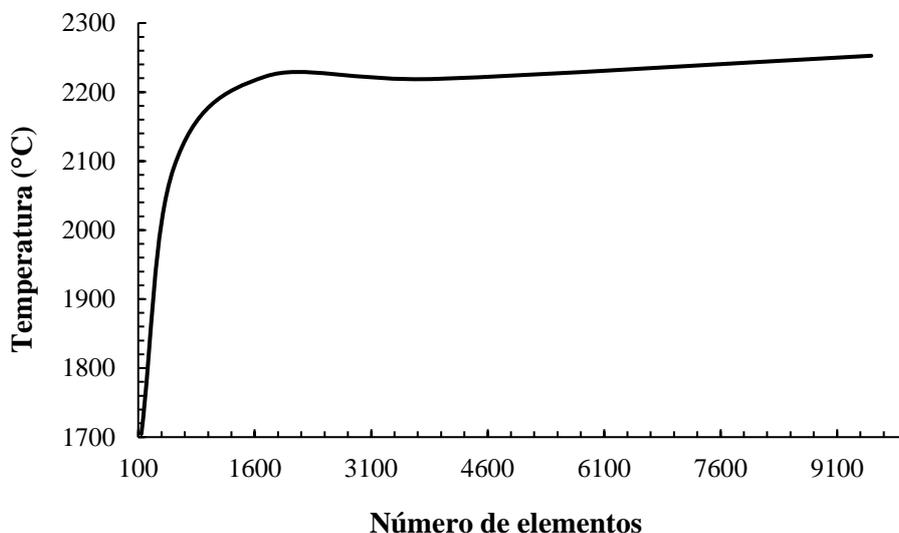
Para esse estudo, foram geradas cinco malhas. O número de nós encontrado para cada malha e a temperatura máxima no ponto escolhido estão apresentados na Tabela 4. Utilizou-se a temperatura máxima do ponto 50 mm (considerando a borda da chapa) como variável para ser avaliada e atestar a convergência da malha. A relação entre a temperatura e o número de elementos é mostrado no Gráfico 4.

Tabela 4 – Temperatura em função do número de nós

Temperatura Máxima (°C) no ponto 50 mm	Número de Elementos
1704,6	140
2091,1	560
2222,6	1740
2219,1	3952
2252,6	9540

Fonte: Própria autora.

Gráfico 4 – Relação entre o número de elementos e a temperatura máxima



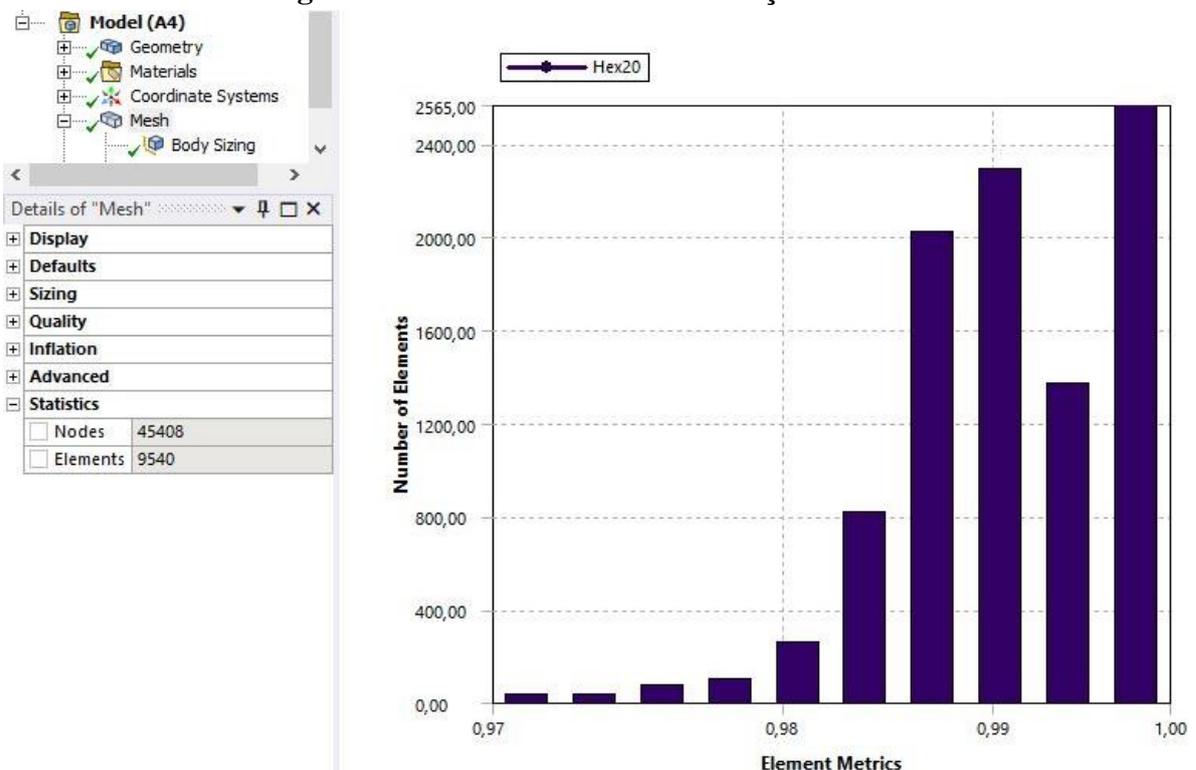
Fonte: Própria autora.

É possível visualizar somente o início da convergência dos valores com o refinamento da malha, porém devido às limitações do equipamento no qual foi realizada a simulação, não foi possível concluir o teste. Então foi escolhida a malha com o maior número de elementos.

Além do Teste de convergência malha, para atestar a qualidade dessa, foram utilizados dois parâmetros fornecidos pelo ANSYS®. O primeiro parâmetro refere-se ao nível de deformação do elemento em relação a sua condição inicial, ou seja, é mensurado o desvio da forma ideal, sendo 0 o maior nível de deformação. Como pode ser observado na Figura 26, para a malha escolhida tem-se que 95% dos elementos apresentam uma deformação menor que 2%.

O segundo parâmetro é a razão Jacobiana, ele refere a razão entre o espaço que o elemento descreve e o espaço real. De acordo com Souza Martins (2016) o melhor valor para a razão Jacobiana é 1, pois uma proporção alta corresponde a uma baixa confiabilidade. Conforme observado na Figura 27 a razão Jacobiana para a malha escolhida é 0,99923, atestado a qualidade dessa, na figura também pode ser observado outros parâmetros estatísticos como o número total de nós e elementos.

Figura 26 – Estatísticas da deformação da malha



Fonte: Própria autora.

Figura 27 – Razão Jacobiana para a malha escolhida

Mesh Metric	Jacobian Ratio (Gauss Points)
<input type="checkbox"/> Min	0,99168
<input type="checkbox"/> Max	1,
<input type="checkbox"/> Average	0,99923
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	8,9345e-004
+ Inflation	
+ Advanced	
- Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	45408
<input type="checkbox"/> Elements	9540

Fonte: Própria autora.

6.2 Procedimentos Experimentais

O procedimento experimental foi dividido em quatro etapas: preparação das amostras para o processo de soldagem, deposição do cordão de solda nas amostras pelo processo GMAW e macrografia dos corpos de prova após uma nova preparação.

6.2.1 Materiais

Os materiais utilizados na preparação das amostras foram:

- Chapa de aço AISI 1020;
- Arame ER70S6 utilizado como material de deposição, sendo o diâmetro de 1,2 mm;
- Gás de proteção: 80 %CO₂ - 20%Ar;
- Lixa de granulometrias #120, #240, #320 e #400;
- Nital (ácido nítrico em solução de álcool etílico) na proporção de 3%.

6.2.2 Equipamentos

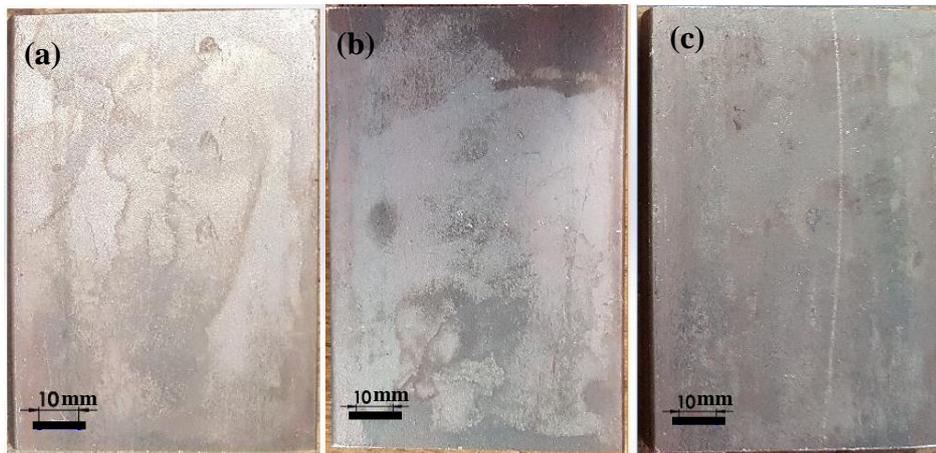
Para a realização dos procedimentos experimentais os principais equipamentos utilizados foram:

- Serra de Fita modelo FRANHO FM 1600;
- Tartilope da empresa S.A. White Martins modelo MC-46, para a mecanização do processo de soldagem;
- Fonte de soldagem GMAW Lincoln Electric CF45;
- Lixadeiras Arotec Modelo Aropol-VV.

6.2.3 Confeção e preparação das amostras

As amostras foram obtidas a partir de uma barra retangular de aço AISI 1020, que foi cortada na serra de fita resultando em 3 amostras, sendo a dimensão final (113 x 76 x 9,5) mm, posteriormente elas foram rebarbadas com uma lima. A Figura 28 mostra as amostras após o corte e a rebarbação.

Figura 28 – Corpos de prova após o corte e a rebarbação



Fonte: Própria autora.

(a) Amostra 1; (b) Amostra 2; (c) Amostra 3

6.2.4 Operação de Soldagem

Os parâmetros de soldagem utilizados, para cada amostra, durante o procedimento de soldagem são descritos na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros adotados no procedimento de soldagem

Parâmetros	Valores para Amostra 1	Valores para Amostra 2	Valores para Amostra 3
Corrente (A)	220	198	187
Tensão (V)	22	24	26
Velocidade de deslocamento da tocha (mm/s)	5,3	5,3	5,3
Distância entre o bico de contato e a peça (DBCP) (mm)	15	15	15
Vazão do gás de proteção (L/min)	15	15	15
Diâmetro do Arame (mm)	1,2	1,2	1,2

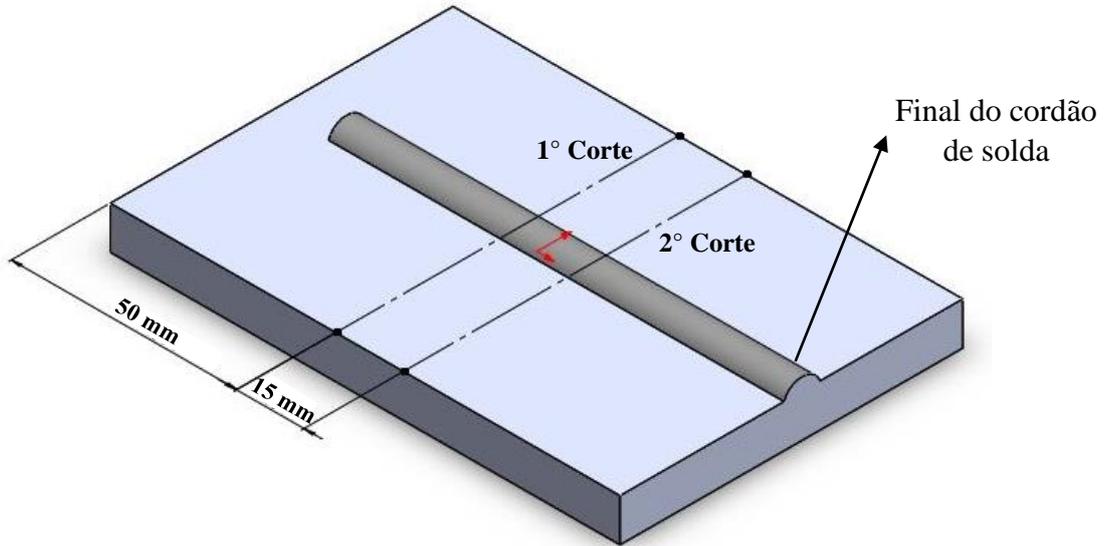
Fonte: Própria autora.

Para garantir um padrão durante o processo de soldagem utilizou-se um deslocador linear mecanizado para manter a velocidade de deslocamento da tocha constante. Esse sistema mecanizado é composto por um braço com um acoplador da tocha de soldagem ligado a um tartilope com velocidade ajustável, que se desloca por um trilho. Durante o processo de soldagem, a tocha foi posicionada de forma centralizada e perpendicular as amostras, sendo o centro da tocha posicionado a 11 mm da borda da chapa. Foi realizado para cada amostra um cordão de passe único.

6.2.5 Procedimento de macrografia

Foi realizada uma macrografia para avaliar o aspecto dos cordões das amostras em cada condição testada. Para isso, cortou-se as amostras depois de soldadas, com o intuito de obter a seção transversal dessas. O corte foi realizado na serra de fita com refrigeração constante, com o objetivo de realizar um corte contínuo sem aquecimento excessivo. Na Figura 29 é mostrado a sequência de corte, o primeiro corte foi realizado a 50 mm do início da chapa, pois foi observado nesse ponto uma certa regularidade no cordão, indicando o regime estacionário. As dimensões finais das amostras foram (15 x 76 x 9,5) mm.

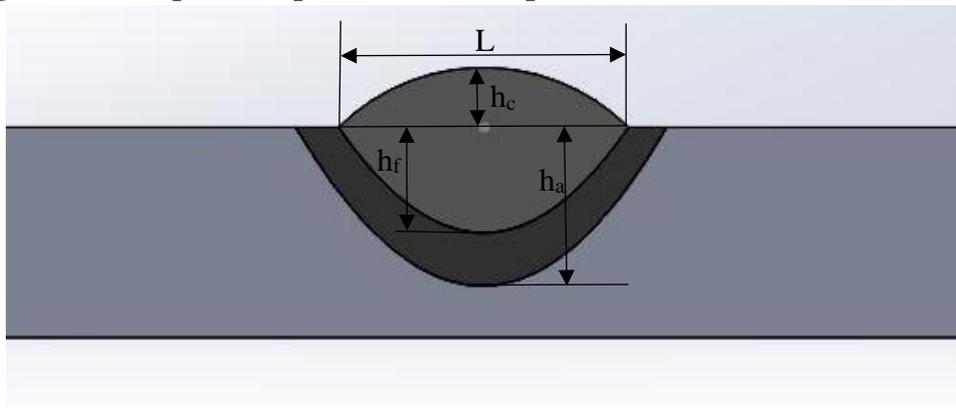
Figura 29 – Esquema representativo da sequência de cortes das amostras



Fonte: Própria autora.

Posteriormente as amostras foram lixadas com lixas de granulometrias #120, #240, #320 e #400 respectivamente. O ataque químico do metal de base foi realizado com o reativo Nital na proporção de 3%, sendo o tempo de ataque de aproximadamente 40s. Em seguida, com as áreas de interesse reveladas, ou seja, a ZF, a ZTA e o metal de base, utilizou-se uma *scanner* para digitalizar as amostras. Depois de digitalizados as imagens foram importadas para o *Software SOLIDWORKS*[®], no qual foram realizadas as medições da ZTA e da ZF, os parâmetros medidos são mostrados na Figura 30.

Figura 30 – Esquema representativo dos parâmetros avaliados nas amostras



Fonte: Própria autora.

No qual, “L” é a largura do cordão, “ h_c ” e a altura do reforço, “ h_f ” e a profundidade da Zona Fundida, “ h_a ” e a profundidade Zona Fundida e da Zona termicamente afetada pelo calor.

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

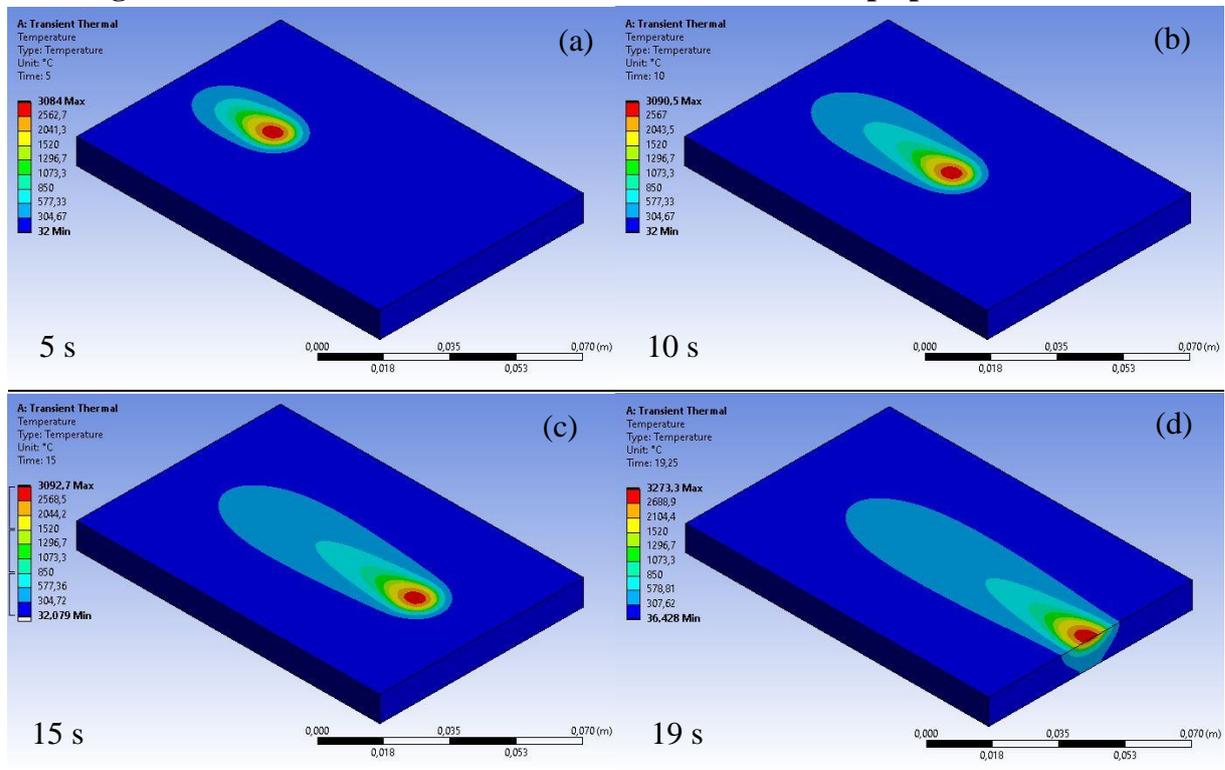
7.1 Análise Térmica

A seguir são apresentados os resultados obtidos por meio da simulação computacional do processo de soldagem GMAW, realizado no ANSYS® workbench 21.0.

7.1.1 Campos transientes de temperatura

As Figura 31, 32 e 33 mostram as fontes de calor nos instantes 5 s, 10 s, 15 s e 19 s para as Amostras 1, 2 e 3, respectivamente. É possível observar a formação dos campos transientes de temperaturas no domínio em função do tempo. Nota-se também a formação das isothermas em formato hemisférico, característica da fonte de calor utilizada. Além disso, é observado diferentes valores para a temperatura máxima atingida em cada amostra. Mas, conforme visto nas figuras, essa diferença não foi o suficiente para promover uma alteração significativa no tamanho e no formato das isothermas.

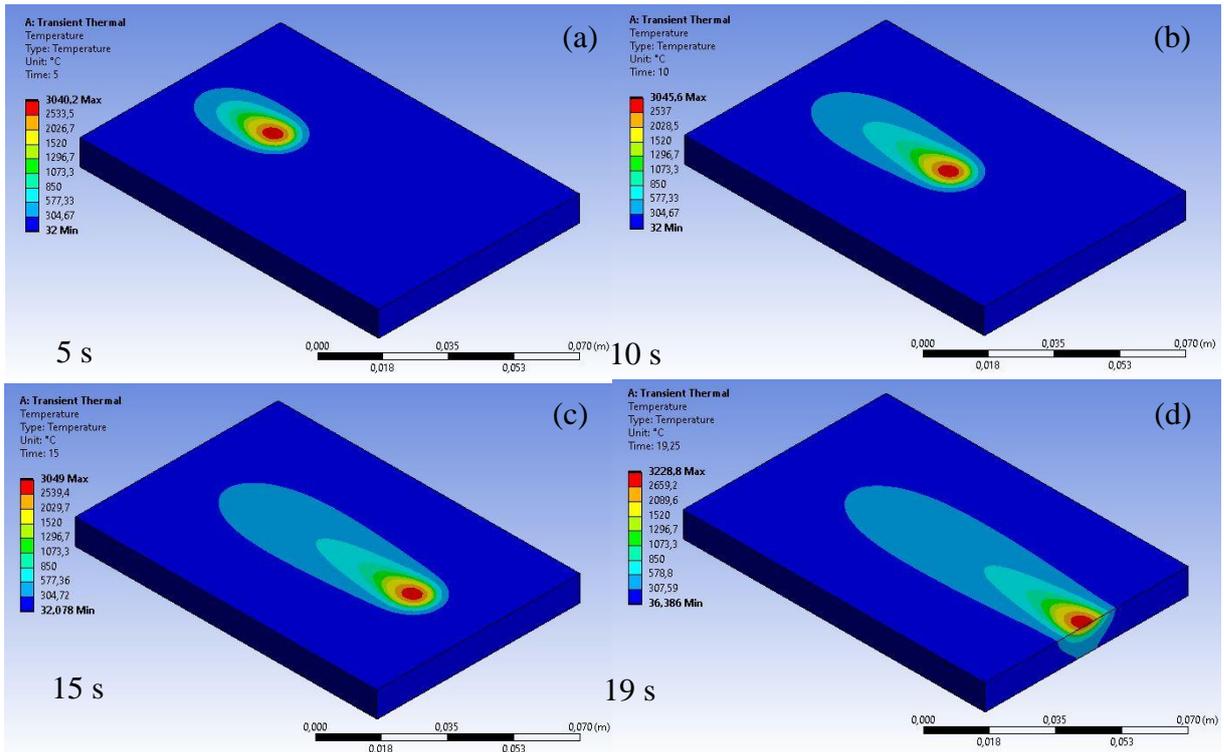
Figura 31 – Fonte de calor em diferentes instantes de tempo para a Amostra 1



Fonte: Própria autora.

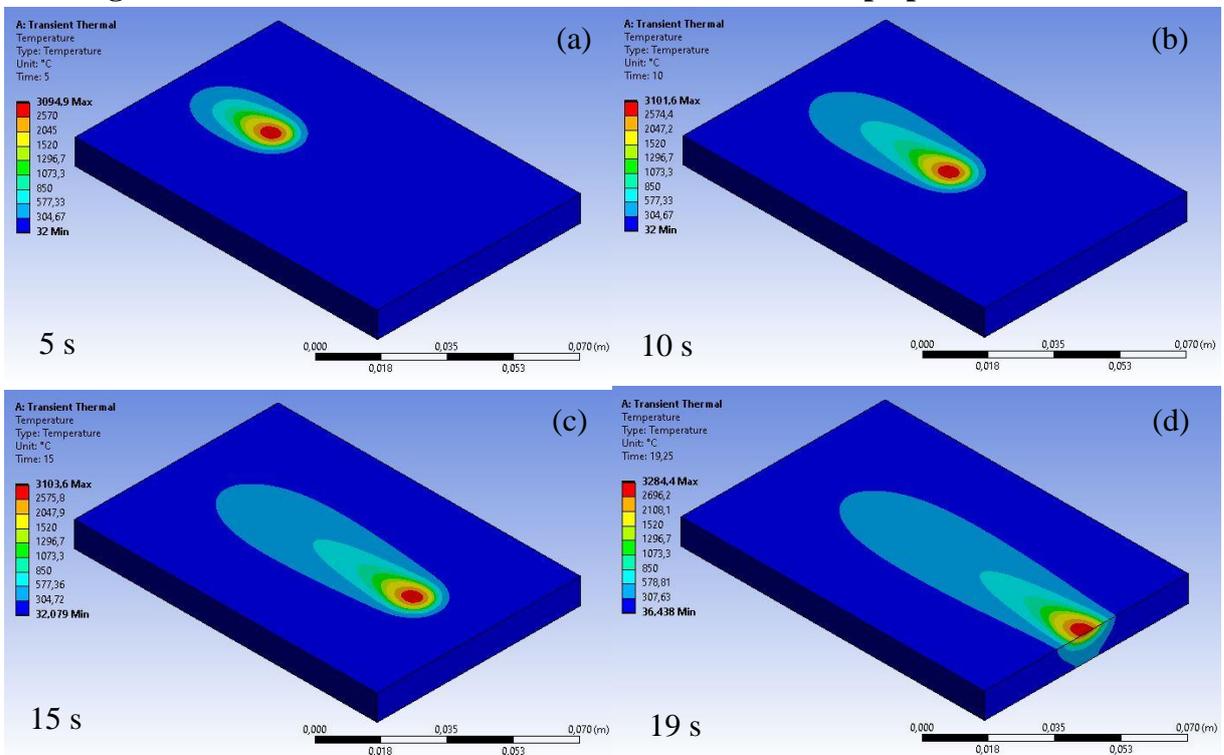
(a) 5 s; (b) 10 s; (c) 15 s; (d) 19 s

Figura 32 – Fonte de calor em diferentes instantes de tempo para a Amostra 2



Fonte: Própria autora.
(a) 5 s; (b) 10 s; (c) 15 s; (d) 19 s

Figura 33 – Fonte de calor em diferentes instantes de tempo para a Amostra 3



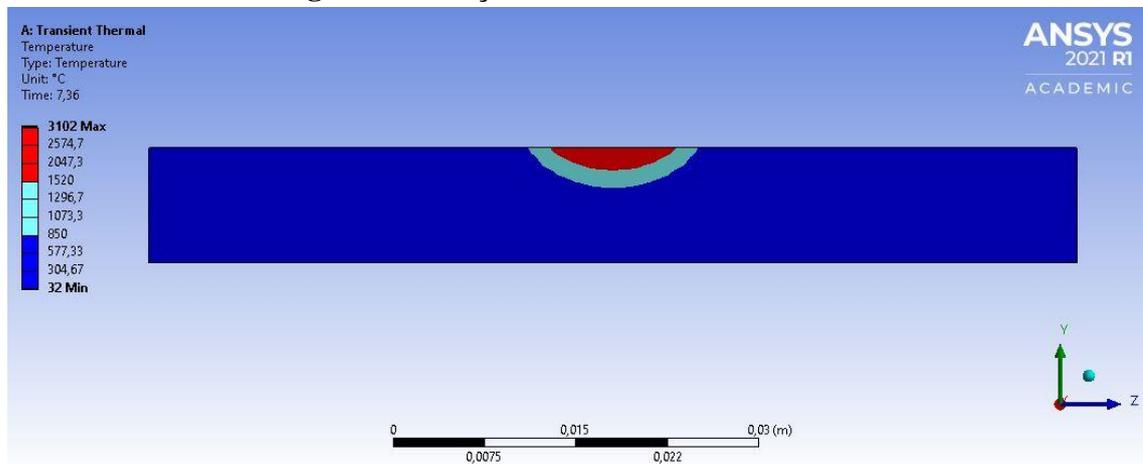
Fonte: Própria autora.
(a) 5 s; (b) 10 s; (c) 15 s; (d) 19 s

7.1.2 Análise da Zona Fundida (ZF) e da Zona Termicamente Afetada (ZTA)

As Figuras 34, 35 e 36 mostram as seções transversais das Amostras 1, 2 e 3, respectivamente. Foi feita uma análise dos contornos de temperaturas em um plano YZ. Esse plano está localizado a uma distância de 50 mm do início da chapa no momento em que o centro da fonte de calor estava sobre esta posição, ou seja, no instante de tempo 7,36 s. As partes compreendidas pelas isoterma vermelhas, representam as Zonas Fundidas, pois nessas regiões as temperaturas atingidas superam a de fusão do material, 1520°C. E para as Zonas Termicamente Afetadas, considerou-se toda a região com temperaturas maiores que a temperatura de completa austenitização do material, que é de aproximadamente 850°C e menores que a temperatura de fusão do material (CALLISTER, 2002).

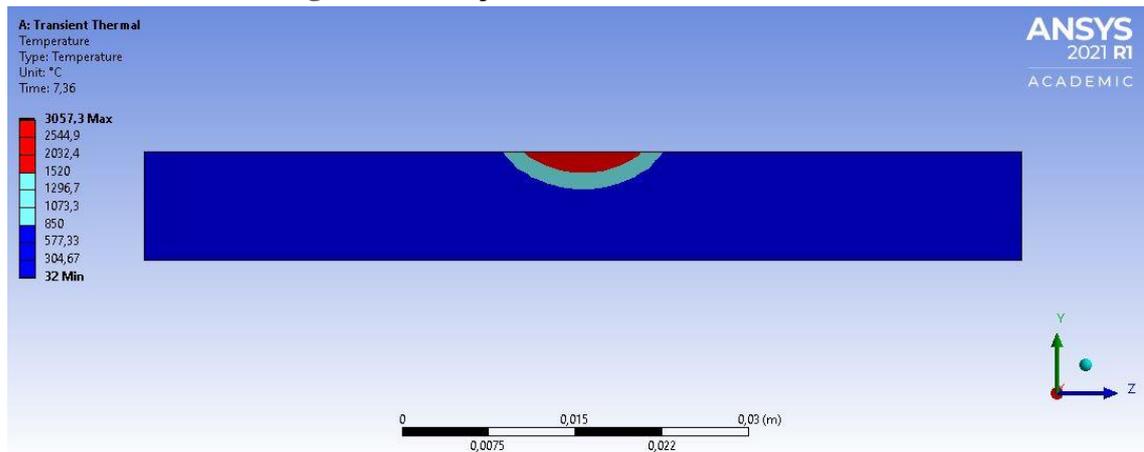
É possível observar que as amostras atingiram diferentes valores de temperatura e dimensões da Zona Fundida e a Zona Termicamente Afetada. Essa diferença pode ser associada aos valores de fluxo de calor utilizados. O aumento do fluxo de calor proporcionou um aumento nos valores de temperatura.

Figura 34 – Seção transversal da Amostra 1



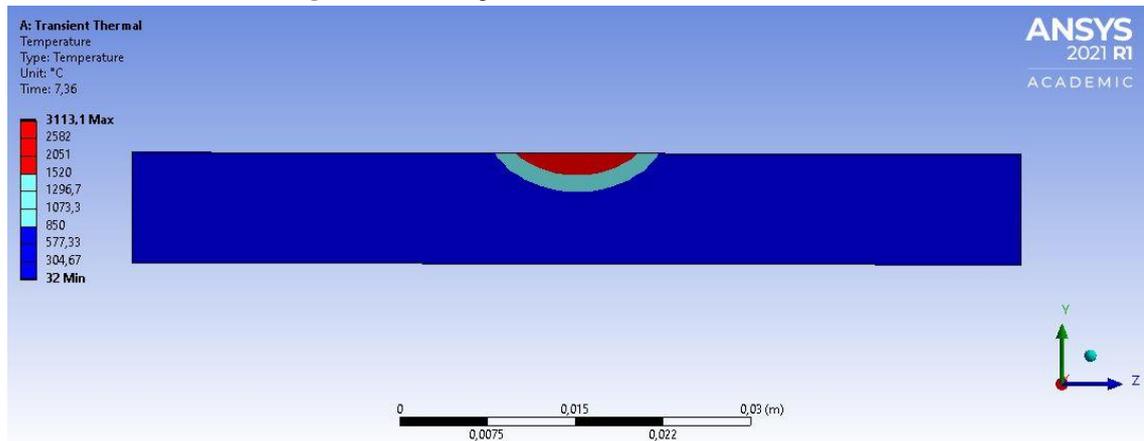
Fonte: Própria autora.

Figura 35 – Seção transversal da Amostra 2



Fonte: Própria autora.

Figura 36 – Seção transversal da Amostra 3

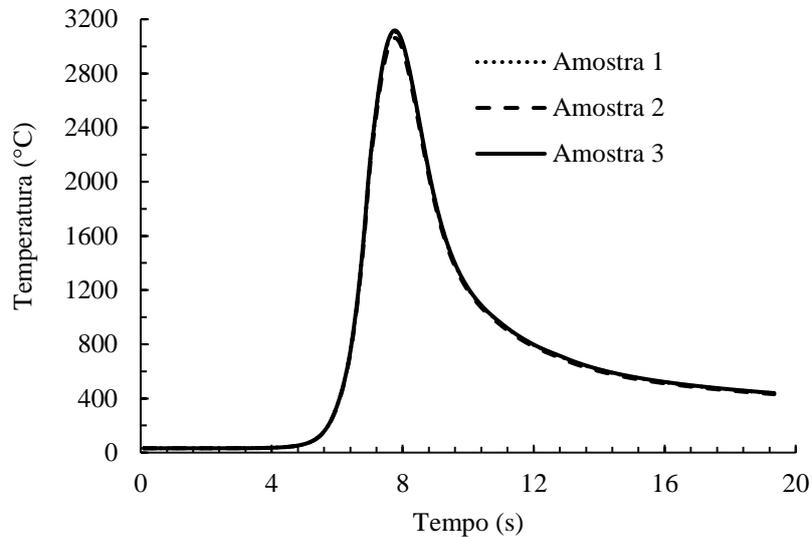


Fonte: Própria autora.

7.1.3 Ciclo Térmico de Soldagem e termopares

O Gráfico 5 mostra o Ciclo Térmico de Soldagem, ou seja, a temperatura em função do tempo durante a simulação de soldagem, para as Amostras 1, 2 e 3. O ponto escolhido está localizado a 50 mm da borda da chapa.

Gráfico 5 – Ciclo Térmico de Soldagem



Fonte: Própria autora.

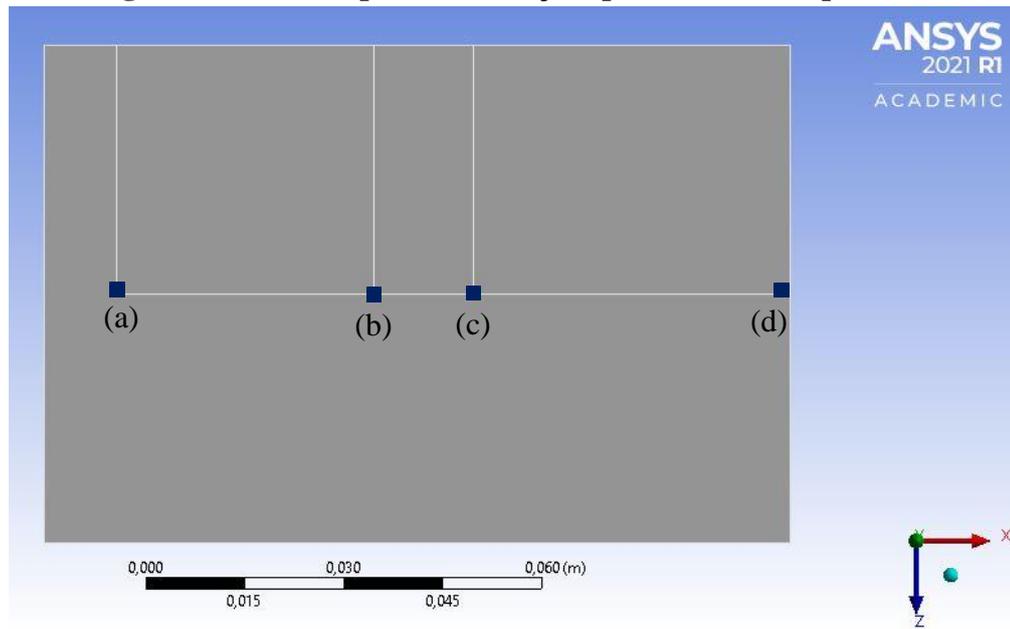
Observa-se, graficamente, que a variação da intensidade do fluxo de calor não foi o suficiente para promover uma diferença significativa nas temperaturas ao longo do tempo. Apesar disso, há uma diferença entre as temperaturas máximas atingidas em cada amostra para o ponto escolhido, evidenciando que o aumento do fluxo de calor proporcionou um aumento da temperatura máxima atingida. Nota-se também que o tempo simulado não foi suficiente para promover o resfriamento completo da peça.

Foram inseridos pontos de medição em posições específicas para verificar a variação pontual da temperatura ao longo do tempo. Na Figura 37 é ilustrado a posição destes pontos de medição no modelo computacional, indicados pelos pontos azuis. A posição dos termopares são 11 mm, 50 mm, 65 mm e 102 mm, tendo como referência a borda da chapa.

Segundo Marques, *et al.* (2009), cada ponto do material ao longo da junta soldada terá uma variação de temperatura causada pela passagem da fonte de calor. Isso pode ser observado no Gráfico 6, no qual, são mostrados os Ciclos Térmicos de soldagem para quatro pontos diferentes da Amostra 2. Os pontos escolhidos são os indicados na Figura 37.

É observado um aumento nas temperaturas máximas atingidas entre os pontos (a) (início do cordão) e os pontos (b) e (c) (medianos). Esse aumento de temperatura pode ser atribuído ao calor acumulado na peça à medida que a fonte de calor se desloca.

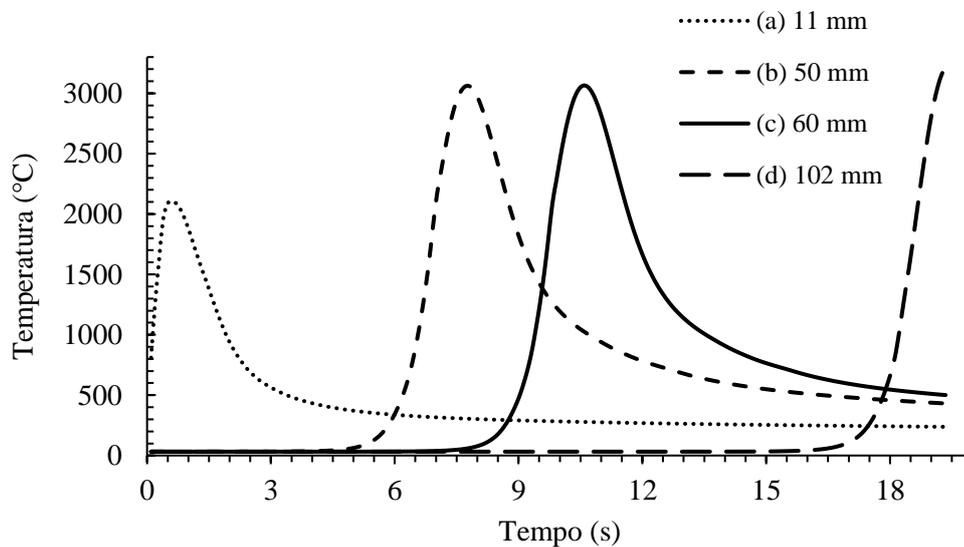
Figura 37 – Pontos para as medições pontuais da temperatura



Fonte: Própria autora.

(a) 11 mm; (b) 50 mm; (c) 65 mm; (d) 102 mm

Gráfico 6 – Ciclos Térmicos de soldagem para a Amostra 2



Fonte: Própria autora.

7.2 Análise Experimental

A seguir são apresentados os resultados obtidos experimentalmente pela soldagem de chapas de aço AISI 1020 pelo processo de soldagem GMAW. O capítulo é dividido em duas

partes, a primeira é destinada à avaliação visual dos cordões de solda e a segunda a avaliação das macrografias.

7.2.1 Avaliação visual dos cordões de solda depositados

Os valores para o aporte térmico fornecido a cada amostra são mostrados na Tabela 6. De acordo com Wainer *et al.* (2004) a quantidade de energia fornecida é proporcional a taxa de fusão do metal de adição. Avaliando somente os parâmetros elétricos da fonte observa-se que a diferença de energia cedida as amostras é menor que 3%.

Tabela 6 – Aporte térmico fornecido as Amostras 1,2 e 3 respectivamente

Amostras	Aporte Térmico
1	$H_1 = \frac{(0,85 * 22 V * 220 A)}{5,3 mm/s} = 776,23 J/mm$
2	$H_2 = \frac{(0,85 * 24 V * 198 A)}{5,3 mm/s} = 762,11 J/mm$
3	$H_3 = \frac{(0,85 * 26 V * 187 A)}{5,3 mm/s} = 779,75 J/mm$

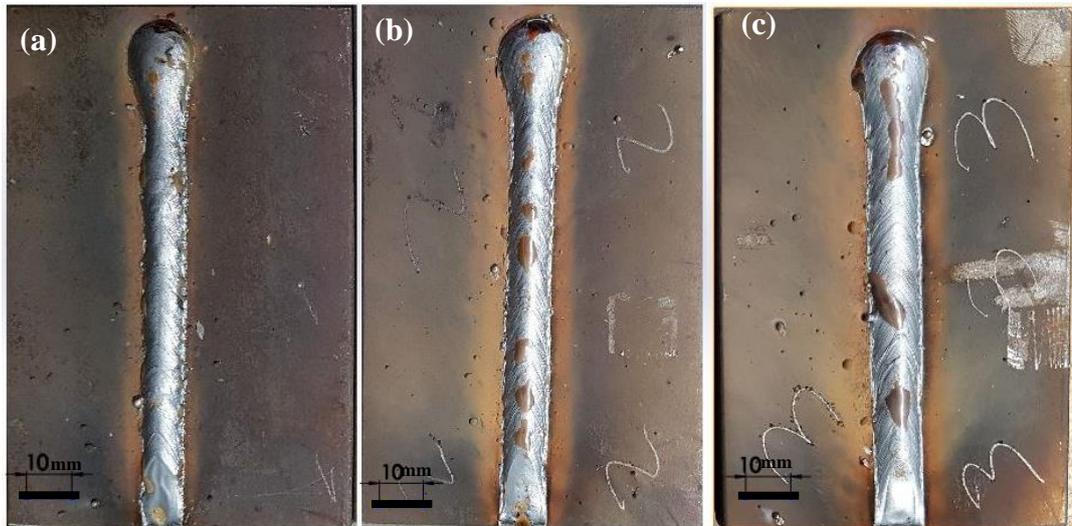
Fonte: Própria autora.

Valores de eficiência térmica retirados de: WAINER *et al.*, 2004.

Na Figura 38 são mostradas as Amostras 1,2 e 3 respectivamente, após a deposição do cordão de solda e na Figura 39 são mostradas as amostras seccionadas. Visualmente é possível observar uma diferença na largura dos cordões, esse resultado pode ser atribuído aos diferentes valores de tensão utilizados. Uma vez que o aumento da tensão proporciona um aumento no comprimento do arco e conseqüentemente um aumento na área de contato entre a fonte de calor e a peça (MARQUES *et al.*, 2009).

Analisando a Figura 38 percebe-se que a soldagem realizada proporcionou cordões homogêneos e contínuos. Observa-se também que os cordões apresentaram poucos respingos, característica do modo de transferência utilizado (curto-circuito).

Figura 38 – Corpos de prova após a realização dos cordões de solda



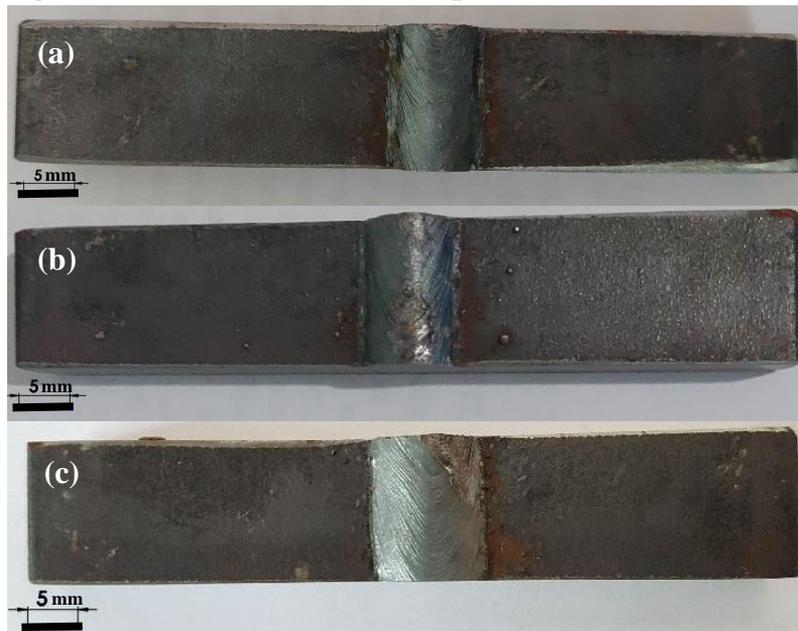
Fonte: Própria autora.

(a) Amostra 1; Corrente: 220 A; Tensão: 22 V

(b) Amostra 2; Corrente: 198 A; Tensão: 24 V

(c) Amostra 3; Corrente: 187 A; Tensão: 26 V

Figura 39 – Amostras 1,2 e 3, respectivamente, seccionadas



Fonte: Própria autora.

(a) Amostra 1; Corrente: 220 A; Tensão: 22 V

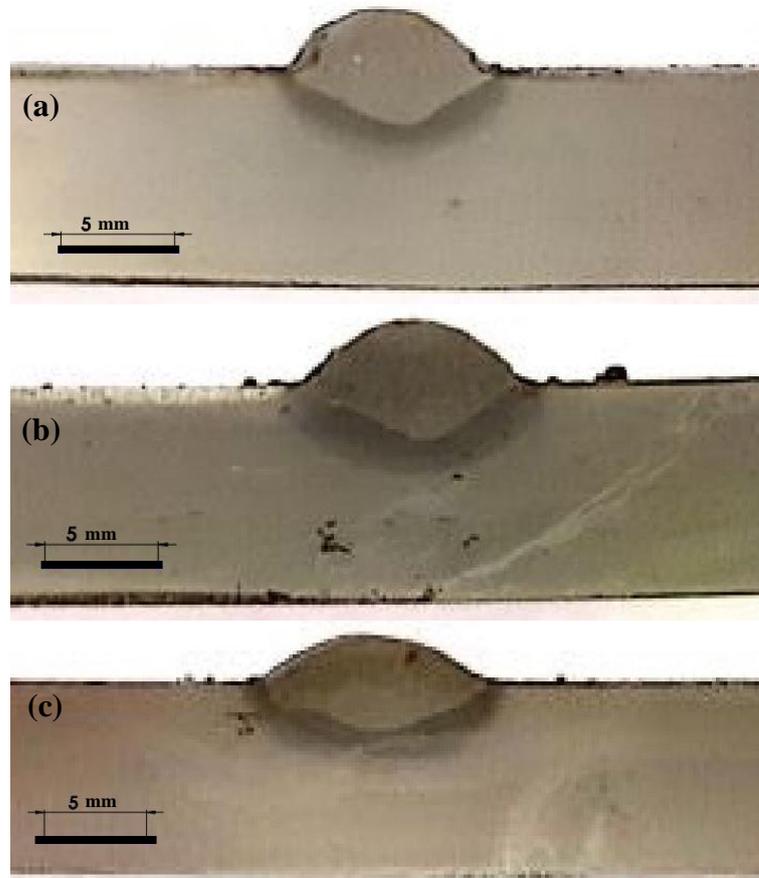
(b) Amostra 2; Corrente: 198 A; Tensão: 24 V

(c) Amostra 3; Corrente: 187 A; Tensão: 26 V

7.2.2 Avaliação das macrografias

Na Figura 40 são mostradas as imagens macroscópicas das seções transversais dos cordões depositados pelo processo GMAW. É possível observar que houve fusão localizada, sem penetração completa, gerando também uma ZTA, evidenciada pela região atacada pelo Nital.

Figura 40 – Macrografia das amostras 1, 2 e 3 respectivamente



Fonte: Própria autora.

(a) Amostra 1; Corrente: 220 A; Tensão: 22 V

(b) Amostra 2; Corrente: 198 A; Tensão: 24 V

(c) Amostra 3; Corrente: 187 A; Tensão: 26 V

Após a obtenção das imagens, foram realizadas as medições das Zonas Fundidas e das Zonas Termicamente Afetadas, conforme descrito na seção 6.3.6. Na Tabela 7 são mostrados os valores dos parâmetros simulados e os obtidos experimentalmente para cada amostra.

Tabela 7 – Parâmetros dimensionais dos cordões de solda para cada amostra

Parâmetros ($\pm 0,1$ mm)	Amostra 1		Amostra 2		Amostra 3	
	Simulado	Experimental	Simulado	Experimental	Simulado	Experimental
Altura do reforço (h_c)	Não se aplica.	2,6	Não se aplica.	2,9	Não se aplica.	2,2
Largura do Cordão (L)	9,9	9	9,8	9,7	10,4	10,6
Profundidade da ZF (h_f)	2,1	2,2	2,1	2,3	2,1	2,2
Profundidade da ZF + ZTA (h_a)	3,4	3,4	3,4	3,6	3,6	3,7

Fonte: Própria autora.

Conforme pode ser observado na Tabela 7, os valores obtidos na simulação estão próximos dos valores obtidos no experimento de soldagem, sendo a diferença percentual média de 4,2 %. Na Tabela 8 é mostrado a diferença percentual para cada parâmetro, entre os valores simulados e os obtidos experimentalmente para cada amostra.

Tabela 8 – Diferença percentual entre os parâmetros para cada amostra

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Largura do Cordão (L)	9,1%	1,0%	1,9%
Profundidade da ZF (h_f)	4,5%	8,7%	4,5%
Profundidade da ZF + ZTA (h_a)	0,0%	5,6%	2,7%

Fonte: Própria autora.

Grande parte dos resultados obtidos através da simulação apresentaram uma boa exatidão com os resultados obtidos experimentalmente, podendo ser considerados satisfatórios. A divergência nos valores pode ser atribuída às simplificações feitas no modelo, por exemplo, ter considerado algumas propriedades térmicas como constantes, ou não ter considerado a deposição de metal, que influencia na taxa de resfriamento. Além disso, a diferença pode ser

associada a metodologia adotada para a medição dos parâmetros. Uma vez que essa é indireta, ou seja, feita através de aproximações visuais.

8 CONCLUSÕES

Nesse trabalho foi adotada uma metodologia que utiliza o Método dos Elementos Finitos para descrever o fluxo de calor de uma fonte gaussiana sobre chapas de aço AISI 1020. A fim de simular o processo de soldagem GMAW. Os resultados numéricos foram comparados com os obtidos nos experimentos de soldagem.

A metodologia proposta apresentou uma boa convergência com os resultados experimentais, sendo a diferença percentual média de 4,2%.

Com base nos resultados obtidos nota-se que é possível utilizar simulações numéricas para prever os Ciclos Térmicos de soldagem, bem como as dimensões da Zona Termicamente Afetada e da Zona Fundida de maneira satisfatória.

Para alcançar resultados com maior exatidão sugere-se que em trabalhos futuros:

- Seja desenvolvido um modelo que considere os efeitos da mudança de fase líquido – vapor.
- Estudos que apliquem outras condições de contorno, como a radiação em função da temperatura, de modo a obter condições mais próximas do real;
- Análise mais criteriosa da convergência de malha com a finalidade de reduzir esforços computacionais, por exemplo, aplicar um controle de refino de malha somente na região do fluxo de calor.
- Modelos que considerem a deposição de metal, além do fluxo de calor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABID M., QARNI, M. J. **3D thermal finite element analysis of single pass girth welded low carbon steel pipe-flange joints**. Turkish J. Eng. Env. Sei. Volume 33. p 281 - 293. 2009.
- ARRUDA, N. F., CARVALHO, J. J., CRUZ NETO, R. M. A., FERREIRA, D. M. B., BRANDI, S. D. **Influência do Regime Transiente Sobre a Microdureza e Microestrutura nos Aços ASTM-A36 e SAE-1020 Soldados pelo Processo MAG**. Soldagem & Inspeção. 24:e2414. 2019
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Aços Carbono e Ligados para Construção Mecânica - Designação e Composição Química**, NBR NM 87/2000. Rio de Janeiro, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Critério de Classificação dos Aços**, NBR NM 172/1998. Rio de Janeiro, 2000.
- BRANDI, S; WAINER, E. **Soldagem – Processos e metalurgia**. São Paulo. Edgard Blucher Ltda. 2004.
- CALLISTER, W. D., **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. John Wiley & Sons, Inc., 2002;
- GARCIA, D. N., BERNADI, R. A., LIMA, A. K. F. **Análise da zona afetada pelo calor em soldagem dupla camada utilizando o método dos elementos finitos**. Revista Matéria. ISSN 1517-7076 artigos e-12643, 2020.
- GUERRA, T. **Modelagem do ciclo térmico do processo GMAW em aços inoxidáveis duplex pelo método de elementos finitos**. Tese de Doutorado. Rio de Janeiro. PUC-RJ. 2017. 144p.
- GUIMARÃES, P. B., NETO, J. J. C. O., ANTÔNIO, T. S. **Análise térmica de soldagem obtida numericamente na liga de alumínio AA 5056 pelo processo GMAW**. Instituto Federal de Pernambuco. Revista CIENTEC Vol. 9, n 2, 6–14, 2017.
- HUNG, T., SHI, H., KUANG, J. **Temperature Modeling of AISI 1020 Steel during Surface Hardening Processes**. Materials. MDPI. 2018.
- INCROPERA, F. P., DEWITT, D. P., BERGMAN, T. L., LAVINE, A. S. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 643 p.
- KUMAR, S., BHADURI, S. C. **Theoretical Investigation of Penetration Characteristics in Gas Metal-Arc Welding Using Finite Element Method**. METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS. Volume 26B. 1995.
- MACHADO, I. G. **Condução do Calor na Soldagem: Fundamentos & Aplicações**. 1.ed. Porto Alegre. 2000. 128p.
- MACHADO, I. G. **Soldagem & Técnicas Conexas: Processos**. 1.ed. Porto Alegre. 1996. 477p.
- MARQUES, P. V., MONDENESI, P. J., BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 3.ed. Belo Horizonte: UFMG.2009. 363p.
- MIRLISENNA, G. **Método dos Elementos Finitos: o que é?**. Blog ESSS. 2016. Disponível em: <<https://www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>>. Último acesso em 29 de janeiro de 2022.

- MODENESI, P. J. **Introdução à Física do Arco Elétrico E sua Aplicação na Soldagem dos Metais**. Belo Horizonte: UFMG, 2007. 151p.
- MODENESI, P. J. **Introdução à Física do Arco Elétrico**. Belo Horizonte: UFMG, 2012. 44p.
- MODENESI, P. J., MARQUES, P. V. **Introdução aos Processos de Soldagem**. Belo Horizonte: UFMG, 2000. 52p.
- MOREJÓN, J. A. P., ACOSTA, P. E. Q., CRESPO, A. C., CEDRÉ, E. D. **Análisis térmico de soldadura GTAW sobre placa de acero AISI 316L empleando el método de elementos finitos**. Centro de Investigaciones de Soldadura. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Santa Clara. Cuba. 2011.
- NETO, A. S. M., SOUZA, M. G., JUNIÓR, E. A. F. **Computational and Mathematical Model with Phase Change and Metal Addition Applied to GMAW**. UFU. Uberlândia. Hindawi Publishing Corporation. Volume 2017. 8p.
- PAIVA, T. M. A., OLIVEIRA JÚNIOR, J. G., FRAGA, F. E.N, **Análise térmica do processo de soldagem TIG em um duto em operação através do método numérico de volumes finitos**. UFERSA, Trabalho de Conclusão de Curso. 2018
- PÉREZ, J. D. E., **Desenvolvimento de modelo de fonte de calor para os processos de soldagem TIG e MAG**. Dissertação de Mestrado. UFRGS. Porto Alegre. 2019. 98p.
- SOUZA, C. F. M. **Análise numérica e experimental de tensões residuais em juntas soldadas de aço de baixo carbono**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.130p
- SOUZA, G. C., **Análise da temperatura durante a soldagem circunferencial de tubos de aço utilizando modelos bidimensionais e tridimensionais de elementos finitos**. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro. CEFET-RJ. 2016.
- VALDENEBRO, J. L. M., MARTINEZ-CONESA, E. J., PORTOLES, A. **Numerical-experimental validation of the welding thermal cycle carried out with the MIG welding Process on a 6063-T5 Aluminium tubular profile**. Cartagena. Espanha. UPTC. THERMAL SCIENCE. Vol. 23, No. 6ª. 2019.
- XIONG, J. LEI Y., LI L., **Finite element analysis and experimental validation of thermal behavior for thin-walled parts in GMAW-based additive manufacturing with various substrate preheating temperatures**. Elsevier. Applied Thermal Engineering 126 (43-52). Chengdu, China. 2017.
- ZHANG, C., MA G. H., NIE, J., YE, J. **Numerical simulation of AZ31B magnesium alloy in DE-GMAW welding process**. Springer-Verlag. London.

APÊNDICE A

Temp. Ambiente (K)	Temp. Superfície (°C)	Temp. Superfície (K)	Temp. Média	Tsup-Tamb	Pr	K (W/m.K)	v (m ² /s)	β (K ⁻¹)	α (m ² /s)	Número de Rayleigh (Laterais)	Número de Rayleigh (superior)	Número de Nusselt (Laterais)	Número de Nusselt (Superior)	h (Laterais)	h (Superior)
295	32	305	300	10	0,707	0,026	15,890	0,003	22,500	783,902	10722,388	3,400	5,910	9,412	6,361
295	132	405	350	110	0,700	0,030	20,920	0,003	29,900	4224,556	57784,444	4,819	8,640	15,219	11,055
295	232	505	400	210	0,690	0,034	26,410	0,003	38,300	4363,966	59691,336	4,846	8,692	17,242	12,557
295	332	605	450	310	0,686	0,037	32,390	0,002	47,200	3788,659	51822,147	4,699	8,409	18,449	13,376
295	432	705	500	410	0,684	0,041	38,790	0,002	56,700	3134,731	42877,572	4,512	8,049	19,329	13,920
295	532	805	550	510	0,683	0,044	45,570	0,002	66,700	2565,027	35085,025	4,324	7,687	19,980	14,280
295	632	905	600	610	0,685	0,047	52,690	0,002	76,900	2109,664	28856,471	4,151	7,355	20,493	14,529
295	732	1005	650	710	0,69	0,050	60,210	0,002	87,300	1747,235	23899,086	3,994	7,053	20,895	14,687
295	832	1105	700	810	0,695	0,052	68,100	0,001	98,000	1457,817	19940,358	3,850	6,776	21,236	14,800
295	932	1205	750	910	0,702	0,055	76,370	0,001	109,000	1225,519	16762,933	3,719	6,524	21,491	14,848
295	1032	1305	800	1010	0,709	0,057	84,930	0,001	120,000	1041,546	14246,500	3,601	6,297	21,719	14,879
295	1132	1405	850	1110	0,716	0,060	93,800	0,001	131,000	893,551	12222,192	3,494	6,092	21,922	14,895
295	1232	1505	900	1210	0,72	0,062	102,900	0,001	143,000	768,211	10507,771	3,392	5,895	22,134	14,920
295	1332	1605	950	1310	0,723	0,064	112,200	0,001	155,000	666,672	9118,897	3,298	5,715	22,325	14,934
295	1432	1705	1000	1410	0,726	0,067	121,900	0,001	168,000	578,889	7918,179	3,209	5,543	22,529	14,955
295	1632	1905	1100	1610	0,728	0,072	141,800	0,001	195,000	445,053	6087,536	3,049	5,235	22,945	15,011
295	1832	2105	1200	1810	0,728	0,076	162,900	0,001	224,000	347,550	4753,871	2,907	4,962	23,345	15,058
295	2032	2305	1300	2010	0,719	0,082	185,100	0,001	238,000	295,093	4036,347	2,814	4,785	24,293	15,535