

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ILLGNER OSWALDO MOREIRA HERMSDORF

MARCUS VINICIUS CAMPANHOLO

**MODELO MATEMÁTICO PARA SIMULAÇÃO DE SOLDAGEM TIG
ALIMENTADO UTILIZANDO A TÉCNICA DE EMPILHAMENTO**

PONTA GROSSA

2022

ILLGNER OSWALDO MOREIRA HERMSDORF
MARCUS VINICIUS CAMPANHOLO

**MODELO MATEMÁTICO PARA SIMULAÇÃO DE SOLDAGEM TIG
ALIMENTADO UTILIZANDO A TÉCNICA DE EMPILHAMENTO**

**Mathematical model for simulation of fed TIG welding using the satacking
technique**

Trabalho de conclusão de curso de
graduação apresentado como requisito
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Orientador: Roger Navarro Verastegui.

PONTA GROSSA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

ILLGNER OSWALDO MOREIRA HERMSDORF

MARCUS VINICIUS CAMPANHOLO

**MODELO MATEMÁTICO PARA SIMULAÇÃO DE SOLDAGEM TIG
ALIMENTADO UTILIZANDO A TÉCNICA DE EMPILHAMENTO**

**Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica
Federal do Paraná (UTFPR).**

Data de aprovação: 10/maio/2022

Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz

Doutor

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Oscar Regis Junior

Doutor

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Roger Navarro Verastegui

Doutor

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

PONTA GROSSA

2022

AGRADECIMENTOS

Em nossas jornadas durante a graduação passamos por diversos desafios que nos fizeram amadurecer, aprender e evoluir em muitos aspectos de nossas vidas, mas para isso tivemos a felicidade e a sorte de poder contar com o apoio de pessoas fundamentais nas nossas trajetórias.

Agradecemos, primeiramente, às nossas famílias por proporcionarem a estrutura financeira necessária para a nossa mudança de cidade e que foi essencial no nosso progresso durante o curso de engenharia. Além disso, nos suportaram emocionalmente para superarmos todos os tipos de desafios que nos deparamos.

Agradecemos, também, aos nossos colegas das turmas de 2015/2 e 2014/2, pois com eles foi possível deixar mais leve nossas rotinas de estudos e aprendizados incessantes. Por último, agradecemos também aos nossos amigos que em algum momento fizeram parte de nossa trajetória, contribuindo e enriquecendo nossas histórias.

RESUMO

Cada vez mais são utilizados métodos matemáticos para auxiliar em projeções hipotéticas e simulações do mundo real. Os softwares para simulação utilizam a matemática como base para a resolução de problemas de cenários hipotéticos. Dessa forma, é possível projetar situações que envolvem a transferência de calor e aumento de temperatura em materiais com características físicas bem definidas. O presente trabalho realizou a comparação das temperaturas obtidas na simulação computacional utilizando o método matemático dos elementos finitos e as capturadas pelo termopar do tipo K numa chapa metálica de aço SAE 1020 que incorporou o arame sólido de aço P20 pelo processo de soldagem TIG alimentado pulsado usando a técnica de empilhamento. Na simulação foram utilizadas diferentes configurações do cordão de solda e malha para definir o melhor modelo matemático. Com isso, foram obtidos os resultados de temperatura máxima atingida e sua variação pelo tempo. Por último, foi realizada a análise dos erros atrelados ao processo e, também, definida a melhor configuração com base nas temperaturas capturadas pelo termopar, sendo esta a simulação com o cordão de solda circular que apresentou melhor desempenho. Validando, desta forma, os modelos matemáticos propostos no presente trabalho.

Palavras-chave: simulação; elementos finitos; método matemático; comparação.

ABSTRACT

Mathematical methods are increasingly being used to aid in hypothetical projections and real-world simulations. Simulation software uses mathematics as the basis for solving what-if scenarios. In this way, it is possible to project situations involving heat transfer and temperature rise in materials with well-defined physical characteristics. The present work compared the temperatures obtained in the computer simulation using the mathematical finite element method and those captured by the K-type thermocouple in a SAE 1020 steel sheet that incorporated P20 steel solid wire by the pulsed fed TIG welding process using the stacking technique. Different weld bead and mesh configurations were used in the simulation to define the best mathematical model. With this, the results of maximum temperature reached and its variation by time were obtained. Finally, the analysis of errors related to the process was performed and the best configuration was defined based on the temperatures captured by the thermocouple. Thus, validating the mathematical models proposed in the present work.

Keywords: simulation; finite elements; mathematical method; comparison.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução dos processos de soldagem.	11
Figura 2 – Domínios de estudo de manufatura aditiva	12
Figura 3 – Classificação dos tipos de soldagem.....	15
Figura 4 – Representação de uma soldagem TIG.....	16
Figura 5 – Soldagem por empilhamento.	18
Figura 6 – Esquema de solução de problemas.	21
Figura 7 – Conjunto de alimentação do arame e de controle de energia.....	23
Figura 8 – Conjunto utilizado para controlar a movimentação da solda.....	24
Figura 9 – Termopar utilizado na captura das temperaturas.	25
Figura 10 – Conjunto de fixação da chapa e soldagem.....	26
Figura 11 – Ilustração do cordão de solda.....	27
Figura 12 – Ilustração da chapa com e sem cordão de solda.....	28
Figura 13 – Representação do cordão de solda quadrado utilizando a aba Geometry do Ansys.	29
Figura 14 – Representação do cordão de solda redondo utilizando a aba Geometry do Ansys.	29
Figura 15 – Faces selecionadas para gerar a malha.....	30
Figura 16 – Representação da malha gerada.	30
Figura 17 – Dados iniciais de convecção, temperatura inicial e tempo de simulação.	31
Figura 18 – Parâmetros utilizados na função Moving Heat Flow.	32
Figura 19 – Ilustração da face selecionada utilizando a função Moving Heat Flow.....	33
Figura 20 – Representação da tabela de dados obtida através de simulação no Ansys.....	34
Figura 21 – Variação da temperatura em função do tempo no primeiro passe.	35
Figura 22 – Variação da temperatura em função do tempo registrada na simulação no segundo passe.	37
Figura 23 – Variação da temperatura em função do tempo registrada em laboratório no segundo passe.	37
Figura 24 – Variação da temperatura em função do tempo registrada na simulação no terceiro passe.	39
Figura 25 – Variação da temperatura em função do tempo registrada em laboratório no terceiro passe.	39

Figura 26 – Variação da temperatura em função do tempo registrada na simulação no quarto passe.	40
Figura 27 – Variação da temperatura em função do tempo registrada em laboratório no quarto passe	41
Figura 28 – Variação da temperatura em função do tempo registrada na simulação no quinto passe.	41
Figura 29 – Variação da temperatura em função do tempo registrada em laboratório no quinto passe.	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Intensidade das fontes de calor para processos de soldagem.....	17
Tabela 2 – Parâmetros utilizados na simulação.	32
Tabela 3 – Comparação de valores para o primeiro passe.	36
Tabela 4 – Comparação de valores para o segundo passe.....	37
Tabela 5 – Comparação de valores para terceiro passe.	39
Tabela 6 – Comparação de valores para o quarto passe.	41
Tabela 7 – Comparação de valores para o quinto passe.	42
Tabela 8 – Erros relacionados a cada simulação realizada.....	43

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	Objetivos.....	13
1.1.1	Objetivo Geral.....	13
1.1.2	Objetivos Específicos.....	13
1.2	Justificativa.....	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
2.1	Soldagem.....	15
2.2	TIG alimentado.....	16
2.3	Transferência de calor.....	16
2.4	Empilhamento em soldagem.....	18
2.4.1	Empilhamento em soldagem MIG/MAG e TIG.....	19
2.5	Simulação numérica.....	19
2.6	Elementos finitos.....	20
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	23
3.1	Empilhamento.....	26
3.2	Simulação.....	27
3.2.1	Geometria do corpo de prova.....	27
3.2.2	Geometria do cordão simples.....	28
3.2.3	Geometria do cordão mais semelhante à real.....	29
3.2.4	Malha.....	29
3.2.5	Condições iniciais da simulação.....	30
3.2.6	Moving heat flow.....	31
3.2.7	Obtenção de dados.....	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	35
4.1	Análises dos passes.....	35
4.1.1	Primeiro Passe.....	35
4.1.2	Segundo Passe.....	36

4.1.3	Terceiro Passe.....	38
4.1.6	Quarto Passe.....	40
4.1.5	Quinto Passe.....	41
4.2	Erros.....	43
4.3	Incertezas experimentais.....	44
4.3.1	Incertezas devido ao posicionamento do termopar.....	44
4.3.2	Incertezas devido à aquisição de dados.....	44
4.3.3	Dados Obtidos.....	45
4.4	Método de TIG alimentado.....	46
4.5	Erros devido a geometria do cordão de solda.....	46
4.6	Erro devido a perda de calor por radiação.....	47
4.7	Erro devido ao processo simulacional.....	47
5	CONCLUSÃO.....	49
	REFERÊNCIAS.....	50

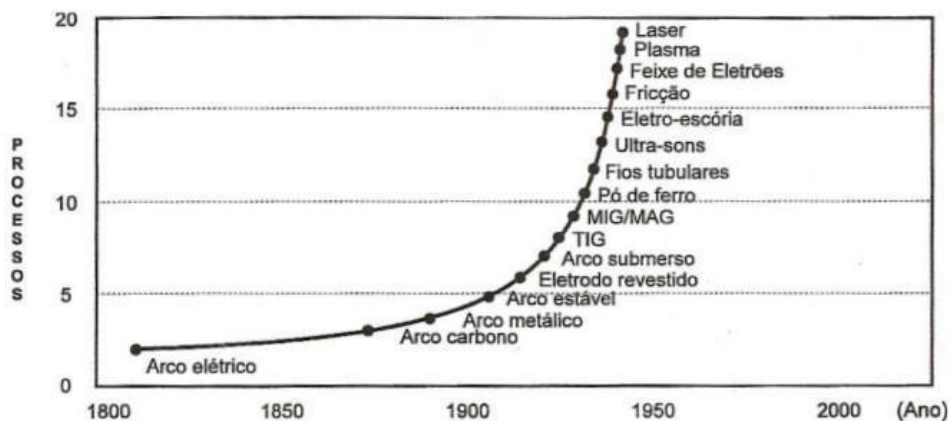
1 INTRODUÇÃO

Somente em 1800, segundo Cary (1979), que o processo de soldagem que conhecemos hoje foi descoberto e utilizado. Humphrey Davies foi o responsável, na Inglaterra, por descobrir tal processo através de duas das suas principais descobertas, a primeira do acetileno e a segunda da possibilidade da formação de um arco entre dois eletrodos de carbono com o auxílio de uma bateria.

Durante o final do século XVIII e início do século XIX ocorreram várias descobertas, principalmente no que diz respeito a formação do arco de soldagem através de eletrodos de carbono e metal, e também começaram a ser estudadas mais a fundo como se comportava a resistência de uma junta soldada (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

A figura 1 abrange graficamente os séculos XIX e XX, mostrando o surgimento do arco elétrico e a criação dos principais processos de soldagem. O período de maior desenvolvimento da soldagem compreende o período das duas grandes guerras, com isso, as tecnologias também se desenvolveram. Também pode ser observado que o processo por arco elétrico permitiu que diversos outros processos surgissem.

Figura 1 – Evolução dos processos de soldagem.



Fonte: Wainer, Brandi e Mello (1992).

Segundo Terry Wohlers (2014), foi desenvolvido em 1987 na Califórnia o que seria o precursor do processo de manufatura por adição, ou também chamado de empilhamento. A ideia inicial era endurecer uma pequena camada de líquido polimérico sensível a raios ultravioletas. O nome desse processo de endurecimento é chamado de estereolitografia.

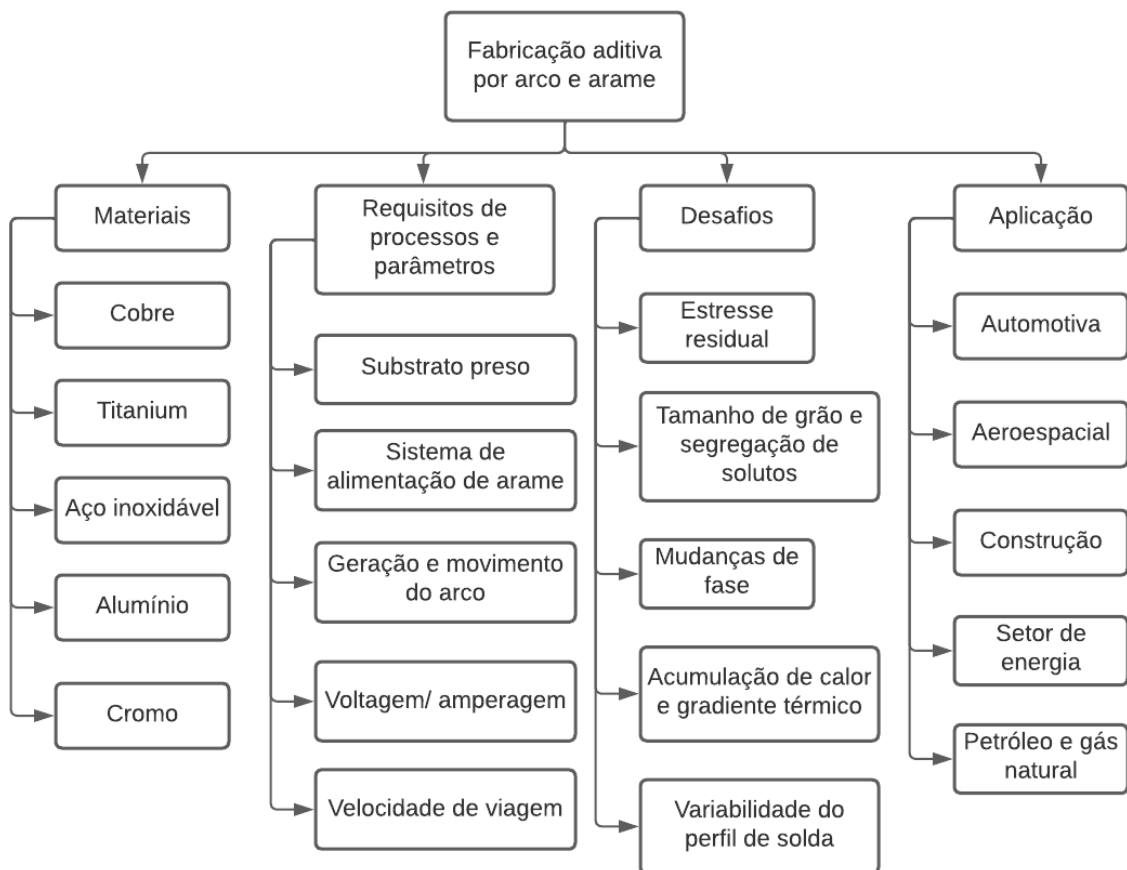
Terry Wohlers (2014) complementa que na década de 90 foram comercializadas as primeiras máquinas que utilizavam esse princípio de manufatura por adição. Elas utilizavam

os métodos de modelagem por deposição fundida, cura de solo sólido e manufatura por objetos laminados.

Também, nesse período, foi desenvolvido o processo de *Wire Arc Additive Manufacturing* (fabricação de aditivos por arco elétrico) que basicamente utiliza os princípios vistos em soldagem de forma que é possível fabricar peças com formatos complexos que podem ser utilizadas em diversas aplicações (PRIARONE *et al.*, 2020).

O processo de manufatura aditiva, ou impressão 3D, traz consigo alguns desafios inerentes ao processo. Segundo Chaturvedi *et al.* (2021) podemos sintetizar os domínios de estudo que podem interferir no processo. Como é demonstrado na figura 2.

Figura 2 – Domínios de estudo de manufatura aditiva.



Fonte: adaptado de Chaturvedi *et al.* (2021).

Como pode ser observado, a acumulação de calor na peça e o gradiente de temperatura são alguns dos domínios estudados que envolvem o processo de manufatura aditiva.

A partir disso, no presente trabalho foi realizado a simulação no Ansys Fluent de um processo de deposição de arame sólido de aço P20 na solda do tipo TIG alimentado em aço SAE 1020, baseado no método de elementos finitos, com o intuito de comparar com temperaturas reais obtidas numa solda realizada em laboratório utilizando um termopar colocado adequadamente para captação das temperaturas em um ponto específico.

A utilização do software permitiu a elaboração de condições de regime transiente, de forma que a simulação fosse fidedigna. Como ocorre a troca de energia térmica entre a fonte de calor e a peça, foi possível realizar a modelagem matemática baseada na termodinâmica do processo, assim a simulação foi embasada em conceitos físicos conhecidos.

As primeiras simulações envolvendo as propriedades térmicas, através do método de elementos finitos, se deram no final da década de 80 do século passado. Goldak *et al.* (1986) desenvolveu um modelo matemático baseado em uma distribuição Gauseana para estimar a distribuição de temperatura em um material soldado. Segundo o autor, o modelo matemático foi proposto para facilitar a manipulação dos parâmetros físicos em oportunidades futuras de simulação e, assim, gerar uma previsão assertiva dos fenômenos termomecânicos de um processo de soldagem.

Com o avanço da tecnologia e, conseqüentemente, da capacidade de processamento dos computadores, a simulação térmica tornou-se cada vez mais comum. Nos dias de hoje a simulação pelo método dos elementos finitos se mostra indispensável para os processos de soldagem atuais, possibilitando um processo mais assertivo e seguro, obtendo excelentes resultados quando comparados à valores de experimentos reais.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Validar um modelo matemático feito com o auxílio do método de elementos finitos para a verificação do perfil de temperatura de um processo de solda por empilhamento realizado numa chapa de aço SAE 1020 com a adição de metal aço P20.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Realizar a medição de temperatura para obtenção de um fluxo térmico em um processo de soldagem TIG alimentado pulsado.
- Comparar modelos matemáticos com diferentes configurações do cordão de solda no software.

- Construir um modelo matemático em software de elementos finitos para identificar a configuração que apresenta melhor desempenho comparado com a solda realizada em laboratório.
- Comparar os resultados obtidos utilizando software com valores reais encontrados com o auxílio de um termopar localizado na chapa que receberá o cordão de solda.
- Comparar o perfil térmico obtido na simulação com o capturado pelo termopar.

1.2 Justificativa

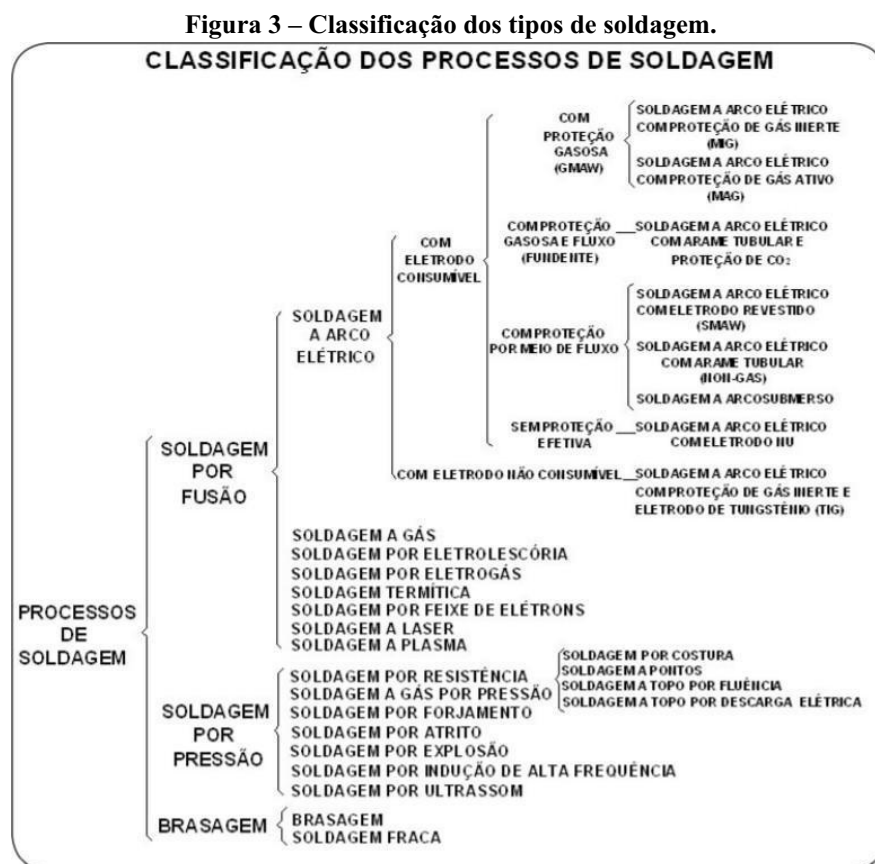
Analisar e comparar o procedimento simulacional com os dados obtidos em laboratório para validar o modelo proposto e assim otimizar recursos no estudo da soldagem especificada. Com isso, se torna mais efetivo o processo como um todo, aproveitando melhor tempo e recurso. Além disso, é possível alterar os parâmetros com mais facilidade nas simulações, a fim de se obter uma variedade maior de análises desejadas. Agregando outros tipos de estudos, podemos também ampliar a forma como vemos o processo de soldagem, tornando-o mais completo e acessível.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Soldagem

Por definição, soldagem significa um processo de união de materiais por meio da solda, a qual representa uma coalescência localizada de metais ou não metais, produzida pelo aquecimento por intermédio de uma fonte de calor com ou sem material de adição e ainda com ou sem aplicação de pressão (CARY, 1979).

Os principais processos de soldagem podem ser observados na figura 3.



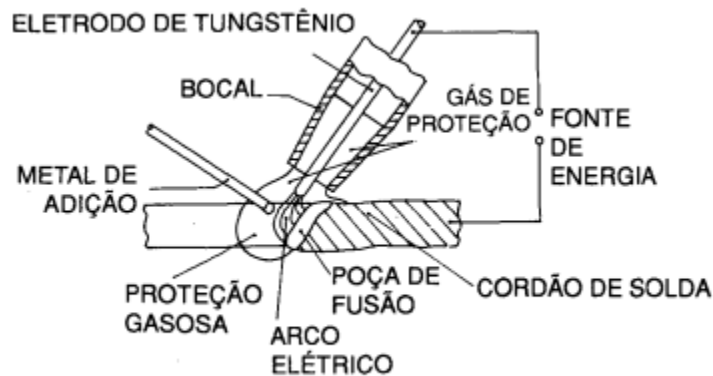
Fonte: Neris (2012).

O processo de soldagem não apresenta uma data específica de surgimento, mas indícios mostram que era praticado há mais de 30 séculos atrás na Grécia e em outras regiões do mundo tão distantes que não possuem nenhum tipo de ligação. Dessa forma, é sugerido que o processo foi descoberto, perdido e depois redescoberto pelos povos antigos, segundo The Lincoln Electric Company (1973).

2.2 TIG alimentado

O processo conhecido como TIG (*tungsten inert gas*) ou GTAW (*gas tungsten arc welding*) é um processo que faz uso de um gás inerte e um eletrodo de tungstênio não consumível. Segundo Weiner *et al.* (1992), nesse processo é utilizado uma fonte de calor proveniente de um arco elétrico que se mantém por meio do eletrodo não consumível e a peça a ser soldada, podendo ser realizada a solda com ou sem a adição de material. Juntamente com a tocha TIG, faz parte da aparelhagem para realização da solda a fonte de alimentação elétrica, uma unidade de alta frequência e um reservatório para o gás de soldagem. A figura 4 ilustra esse processo.

Figura 4 - Representação de uma soldagem TIG.



Fonte: Weiner *et al.* (1992).

O processo de soldagem TIG pode ser utilizado nos mais diversos segmentos industriais, podendo ser realizado de maneira manual ou automatizada, tendo como a principal vantagem a alta qualidade da solda e a ausência de respingos, uma vez que não há transferência de metal através do arco (GROOVER, 2012, apud AZEVEDO, 2019).

2.3 Transferência de calor

Na maioria dos processos de soldagem, a junta precisa ser aquecida até uma temperatura adequada. Na soldagem por fusão, particularmente, trabalha-se com fontes de calor (o arco elétrico ou uma chama, por exemplo) de elevada temperatura (1.000 a 20.000 C°) (MODENESI, 2001).

Segundo Modenesi (2001) a elevada temperatura de soldagem, combinada com a pequena superfície de contato de poucos milímetros quadrados em que o processo é realizado, resulta em altas taxas de intensidade da fonte de calor, como pode ser observado na tabela 1,

para os processos mais comumente encontrados. O autor cita que devido a estas altas temperaturas, além da fusão do cordão de solda, alguns efeitos indesejados podem ocorrer, como:

- Tensões residuais e distorção;
- Deterioração de propriedades mecânicas;
- Formação de trincas;
- Deterioração de propriedades físicas e químicas;

Tabela 1 – Intensidade das fontes de calor para processos de soldagem.

Processo de Soldagem	Intensidade da fonte (GW/m ²)
Eletrodo Revestido	0,005 - 0,5
Processo MIG/MAG	0,005 - 0,5
Soldagem Plasma	0,005 - 50
Feixe Eletrons/ Laser	50 - 5000

Fonte: adaptado de Modenesi (2001).

Zhou (2008) cita que além dos defeitos anteriormente descritos, o entendimento da transferência de calor em um processo de soldagem, bem como o estudo do tempo de resfriamento e das zonas termicamente afetadas pela solda, pode ser de grande importância para a minimização dos defeitos decorrentes de tal processo e também para a otimização deste.

Messler (2004) descreve também que uma parcela da alta energia requerida para realizar o processo de soldagem acaba por ser dissipada, não sendo utilizada toda a fonte de calor gerada, quimicamente ou eletricamente, utilizada. Esta parcela de perda de calor contribui para o aquecimento das fronteiras da zona de fusão, gerando alterações geométricas e estruturais indesejadas, segundo o autor, caracterizando assim, a zona termicamente afetada.

Modenesi (2001) classifica como as principais fontes de saídas de calor: condução através da peça; condução através do eletrodo; perdas por radiação e convecção e reações endotérmicas.

Segundo Chen *et al.* (2020) os principais parâmetros que influenciam na transferência de calor são: potência elétrica gerada, material a ser soldado, material do eletrodo, velocidade de soldagem e ângulo entre o eletrodo e o metal a ser soldado.

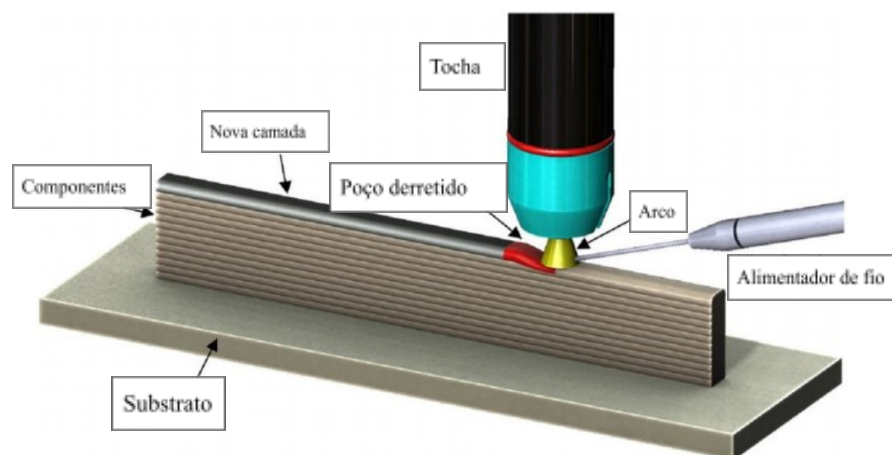
A equação (1) mostra como ocorre a variação de temperatura nas três dimensões de um material qualquer.

$$\rho C(T) \frac{dT}{dt} = \frac{d}{dx} \left[k(T) \frac{dT}{dx} \right] + \frac{d}{dy} \left[k(T) \frac{dT}{dy} \right] + \frac{d}{dz} \left[k(T) \frac{dT}{dz} \right] - \rho C(T) \left(V_x \frac{d}{dx} + V_y \frac{d}{dy} + V_z \frac{d}{dz} \right) \quad (1)$$

2.4 Empilhamento em soldagem

Manufatura por adição (empilhamento) basicamente é definida como a construção de um componente pela deposição de material camada por camada, em vez de se retirar material como comumente é feito na manufatura por subtração como, por exemplo, na usinagem (DING *et al.*, 2015a). A figura 5 representa o processo de empilhamento em soldagem.

Figura 5 – Soldagem por empilhamento.



Fonte: adaptado de McAndrew *et al.* (2018).

A fabricação de grandes componentes de média complexidade geométrica está, atualmente, sendo beneficiada pela fabricação por empilhamento. E isto está chamando a atenção da indústria e da academia nos dias de hoje (CUNNINGHAM *et al.*, 2018).

Dependendo da energia usada na deposição do material podemos classificar o empilhamento em três grupos: a laser, soldagem a arco ou por feixe de elétrons. Uma das vantagens nesses tipos de procedimentos utilizando um sistema a laser ou por elétron é a alta eficiência energética, baixo investimento e uma forte cadeia de suprimentos na indústria.

Além destas formas de soldagem citadas anteriormente, outras técnicas também foram desenvolvidas utilizando o princípio de empilhamento (DING *et al.*, 2015b). Sendo elas:

- Deposição direta de metal (*direct metal deposition*);
- Fabricação por feixes de elétrons de forma livre (*electron beam freeform fabrication*);

- Manufatura por deposição de formas (*shape deposition manufacturing*);
- Manufatura aditiva de arame e arco (*wire and arc additive manufacturing*).

2.4.1 Empilhamento em soldagem MIG/MAG e TIG

O processo de empilhamento, por apresentar certas características, só é possível ser aplicado em MIG, TIG e soldagem por arco de plasma. O processo de manufatura aditiva por arco elétrico é caracterizado por ser capaz de manufaturar geometrias complexas e por apresentar altas taxas de deposição, compatibilidade a diferentes fontes de calor do arco e diferentes formas de alinhamento e movimentos da tocha de solda. Com a alta taxa de deposição, este processo se torna adequado às indústrias de grande porte (CHATURVEDI, 2021).

Segundo Chaturvedi (2021) o método de manufatura aditiva por arco elétrico apresenta desempenhos superiores às técnicas de união convencionais. O processo MIG/MAG apresenta variações de transferência de metal, sendo eles:

- transferência globular;
- curto-circuito;
- spray;
- transferência por spray pulsado.

Segundo Chaturvedi (2021), o processo de manufatura aditiva por arco elétrico é complexo e requer bom conhecimento no campo da manufatura, pois a otimização e o modelo analítico envolvem múltiplas variáveis. Nesse processo, temos parâmetros que influenciam diretamente na propriedade e qualidade do empilhamento. Os que possuem maior influência são a taxa de deposição de material, intensidade da corrente, taxa de alimentação de arame e se é por modo pulsado ou contínuo de arco elétrico.

2.5 Simulação numérica

A Simulação Numérica por elementos finitos tem uma vasta gama de aplicações, inicialmente sendo utilizada para cálculos estruturais estáticos, evoluindo juntamente com a capacidade de processamento dos computadores modernos para resolução de problemas não lineares e dinâmicos, abrangendo, além de somente corpos sólidos, fenômenos magnéticos, térmicos e elétricos.

São três os principais métodos para resolução de um problema que envolvem parâmetros físicos (Maliska, 2017):

- Métodos analíticos;
- Métodos numéricos;
- Experimentação em laboratório.

A principal diferença entre os dois primeiros métodos segundo Maliska (2017) é dado na complexidade do problema que cada método pode resolver. Enquanto o método analítico é utilizado para situações mais simples com hipóteses e geometrias menos complexas, bem como suas condições de contorno também simplórias, podendo estes problemas serem resolvidos de forma rápida por operações computacionais. Já a simulação por métodos numéricos possibilita a resolução de problemas mais complexos, podendo ser utilizada em soluções em que a geometria a ser analisada é bastante detalhada, como também as hipóteses e condições de contorno são de uma complexidade maior, não sendo possível calcular pelo método analítico.

O software utilizado recorre a algumas ferramentas de cálculo numérico que nos ajudam a obter os valores que surgem a partir das equações geradas que definimos com base nas condições de contorno estabelecidas no estudo. Assim, o Ansys trabalha com valores que são em sua grande maioria aproximados por conta das tais condições impostas.

O presente trabalho irá focar na variação de temperatura em um cordão de solda a partir de uma análise numérica utilizando o método dos elementos finitos para, posteriormente, comparar com a experimentação em laboratório a fim de validar o método numérico desenvolvido e proposto.

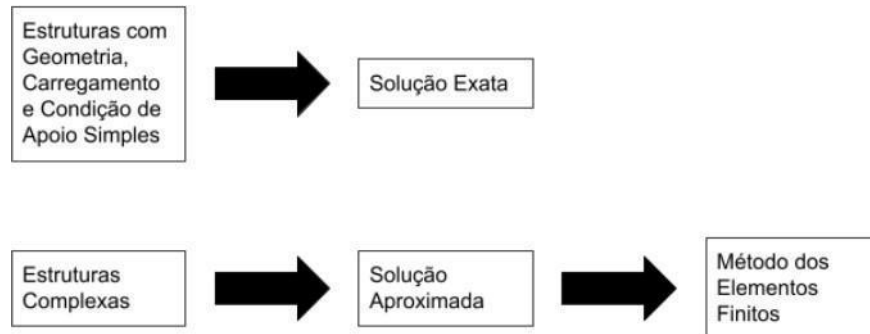
2.6 Elementos finitos

Em problemas de menor complexidade, pode-se resolver as equações de forma analítica para compreender o fenômeno atrelado a aquele estado analisado. Contudo, em estruturas mais complexas ou em pontos específicos de uma delas, sendo necessário recorrer a outras ferramentas matemáticas para compreender tais fenômenos.

O Método de Elementos Finitos (MEF) é uma técnica poderosa para resolver e encontrar soluções de equações integrais e diferenciais, estando presente em diversos ramos da engenharia e ciência aplicada. Este método pode ser considerado uma generalização do variacional clássico e residual ponderado (REDDY; GARTLING, 2010). O MEF é basicamente uma análise matemática que discretiza um meio contínuo em elementos de

tamanhos definidos para criação de uma malha poligonal. A figura 6 mostra de forma esquematizada em qual situação podemos usar a resolução de problemas pelo método dos elementos finitos.

Figura 6 – Esquema de solução de problemas.



Fonte: adaptado do livro Elementos Finitos a Base da Tecnologia CAE (2000).

O MEF foi idealizado, a princípio, para tentar resolver problemas estruturais que apresentassem algum tipo de tensão ou deslocamento. Isso foi feito com o intuito de dividir em partes menores o sistema, sendo posteriormente definido como elementos (FILHO, 2000).

Equacionando o MEF matematicamente, obtemos equações integrais sobre um domínio complexo de tal forma que subdividindo-o seja possível realizar o somatório de integrais de sub domínios mais simples. Caso seja possível realizar o cálculo das integrais, ao final deve-se realizar o somatório correspondente a integral de todo o domínio (FILHO, 2000). Conseqüentemente, as integrações representam o comportamento dos elementos de forma isolada, mas com isso é possível entender o comportamento da estrutura como um todo.

A análise pelo MEF, por característica apresenta algumas etapas que devem ser seguidas em suas aplicações (REDDY; GARTLING, 2010). São elas:

- 1 - Dividir o sistema ou estrutura em elementos com tamanhos definidos, gerando o que é chamado de malha;
- 2 - Aplicar as fórmulas adequadas em cada elemento para definir suas propriedades;
- 3 - Juntar todos os elementos compreendendo toda a extensão da estrutura analisada;
- 4 - Aplicar as cargas nos elementos, sejam elas de momento, transferência de calor, etc.;
- 5 - Definir parâmetros de acordo com a análise. Para problemas estruturais deve ser estabelecido os pontos de apoio, por exemplo. Já para problemas térmicos, deve ser imposto temperaturas conhecidas;

6 - Resolver as equações algébricas simultaneamente para determinar os deslocamentos nodais em problemas estruturais e as temperaturas nodais em problemas com temperaturas;

7 - Para os problemas de calor e mudança de temperatura, deve-se calcular o fluxo de calor nodal e também as temperaturas do campo de interpolação.

Na maioria dos casos as equações geradas pelo MEF são funções polinomiais, e isso é visto basicamente por causa de dois fatores:

- A teoria de interpolação é usada para derivá-las;
- As equações integrais podem ser resolvidas utilizando ferramentas de cálculo numérico.

No presente trabalho, todas as equações que irão reger a análise dos comportamentos dos elementos serão definidas a partir de equações que representam as análises térmicas pretendidas, de forma que será possível entender como que o material se comporta quando é submetido a uma fonte de calor.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

No processo de soldagem realizado foi utilizado um conjunto de materiais e ferramentas que possibilitaram controlar alguns parâmetros importantes para o desempenho adequado do cordão de solda.

No sistema utilizado foi possível controlar:

- Velocidade da fonte de calor;
- Intensidade da tensão;
- Intensidade da corrente;
- Fixação da chapa soldada;
- Disponibilização do gás de proteção.

Utilizando a Digi plus A7 da marca IMC, foi possível configurar a etapa inicial do processo que consiste em definir os parâmetros de alimentação de energia do processo que são a intensidade da tensão e corrente. O cordão de solda utilizado no trabalho foi feito com 14 Volts de tensão em média, 140 Amperes em média de corrente elétrica e com a velocidade de alimentação de arame sólido de aço P20 variando entre 1,2 m/min e 2,4 m/min por conta da energia pulsada. Segue na figura 7 uma imagem dos equipamentos utilizados.

Figura 7 – Conjunto de alimentação do arame e de controle de energia.



Fonte: autoria própria (2022).

Em seguida, foi possível determinar a velocidade da solda utilizando um guia projetado e um controlador que move a solda conforme o valor escolhido. No estudo foi

definido a velocidade de 85 cm/min. Dessa forma, o material depositado fica uniforme no cordão de solda. Para realizar a fixação da chapa que recebeu o material a ser depositado, foi utilizado uma morsa de mesa. Esta ferramenta foi ajustada de acordo com o tamanho da chapa.

A velocidade de soldagem foi definida utilizando um Tartilope V1 da marca SPS. Este equipamento é, basicamente, composto por um trilho, um controlador e uma fonte de alimentação. Com esses componentes é possível controlar a velocidade de movimentação da pistola de soldagem, conforme mostra a figura 8.

Figura 8 – Conjunto utilizado para controlar a movimentação da solda.



Fonte: autoria própria (2022).

Para medir a temperatura no cordão de solda, foi utilizado um termopar do tipo K. Durante o processo foi necessário prepará-lo, pois este precisou ser adequado às nossas necessidades. Esta preparação consistia na raspagem da região que ficaria em contato com a chapa metálica, pois assim viabiliza a captura das temperaturas. Após esse processo foi possível unir as pontas que fazem parte do termopar utilizando uma pistola de soldagem TIG. Dessa forma adequou-se o termopar para medir a temperatura no ponto selecionado. Por último, foi utilizado um gás de proteção de Argônio. A figura 9 mostra o termopar encostado na peça para capturar as temperaturas durante a soldagem.

Figura 9 – Termopar utilizado na captura das temperaturas.



Fonte: autoria própria (2022).

Os dados obtidos pelo termopar foram registrados utilizando o software LabView, disponibilizado pela universidade. De acordo com os dados coletados, os perfis de temperatura são medidos pelo tempo. Entretanto, há variações quanto ao tempo necessário para atingir o pico de temperatura e o tempo de resfriamento da chapa metálica.

No presente trabalho foi utilizado o método de soldagem TIG alimentado pulsado e, como consequência, durante todos os passes a corrente e voltagem do processo variava. O valor de corrente verificado variava entre 122 e 148 Amperes e a voltagem ficou entre 11,6 e 14,6 Volts em todos os passes. Nos nossos cálculos foram utilizados valores aproximados dessas duas variáveis para obter os valores das energias em cada passe. Por isso, os valores utilizados representam aproximações que consequentemente podem gerar variações e distorções dos resultados obtidos no software.

Com todos os parâmetros definidos e coletados in loco, foi possível repassá-los para o software para que fosse realizado a simulação com as mesmas configurações. No software foi inserido o material com a mesma composição estrutural e também a mesma energia de soldagem, sendo esta variável definida com base na média da tensão e corrente, pois foi utilizado o modo pulsado e, consequentemente, houve variação das duas grandezas. Dessa forma foi utilizado a média aproximada dos valores registrados no equipamento.

A única peculiaridade do software é que não foi simulado a adição de material, apenas a energia de soldagem passando pela chapa e depois pelos cordões de solda empilhados que foram desenhados um por um durante a simulação. De qualquer forma, isso não prejudica as análises realizadas.

No software foi utilizado metade da largura da chapa, de forma simétrica e, consequentemente, metade da largura do cordão de solda, para que a energia de soldagem

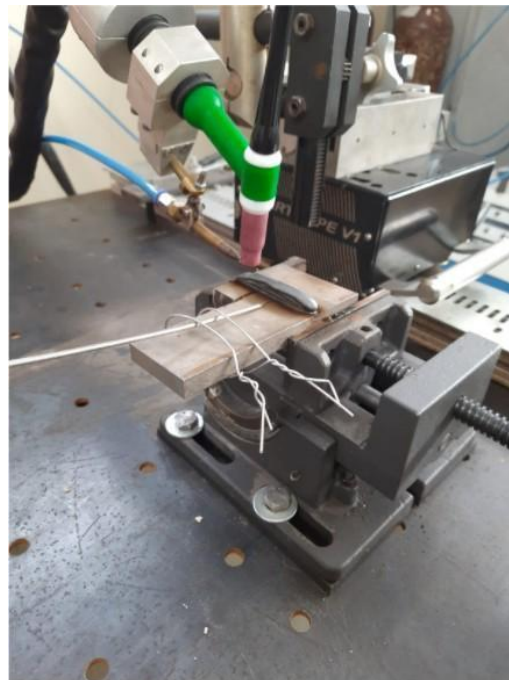
percorresse sua extremidade, conforme visto em Barban (2014) que explica que não é afetado a análise utilizando esse tipo de configuração. Sendo feito deste modo, foi possível visualizar o comportamento térmico por condução no material em toda sua espessura conforme a energia utilizada fosse se movimentando. Permitindo assim coletar a temperatura em qualquer ponto do material enquanto a energia aplicada fosse se movimentando.

3.1 Empilhamento

Depois de definir a voltagem, corrente, velocidade de alimentação do arame e velocidade de movimentação da pistola, foram ajustadas as máquinas e ferramentas para que ocorresse o processo de soldagem de forma adequada. Com isso, foi possível realizar 5 passes no cordão de solda, sempre respeitando as configurações do primeiro passe.

A solda feita apresentava um comprimento total de, aproximadamente, 66 mm de cordão, aproveitando o máximo que possível da dimensão da chapa utilizada que foi fixada na morsa de bancada. O material foi depositado em cima da chapa, sem o intuito de juntar duas partes de metal. Dessa forma, é possível analisar melhor as características do cordão. A figura 10 mostra os componentes responsáveis pela fixação da chapa e também a pistola de solda.

Figura 10 – Conjunto de fixação da chapa e soldagem.



Fonte: autoria própria (2022).

Após cada passe, foi medido a geometria do cordão utilizando um paquímetro. Com isso, foi registrado quanto de material era depositado depois de cada passe. O objetivo desse

processo é repassar as espessuras coletadas para o software e assim representar de forma fiel o que foi feito in loco. A pistola de soldagem era elevada em, aproximadamente, 2 mm após cada passe. A figura 11 mostra a solda realizada no laboratório.

Figura 11 - Ilustração do cordão de solda.



Fonte: autoria própria (2022).

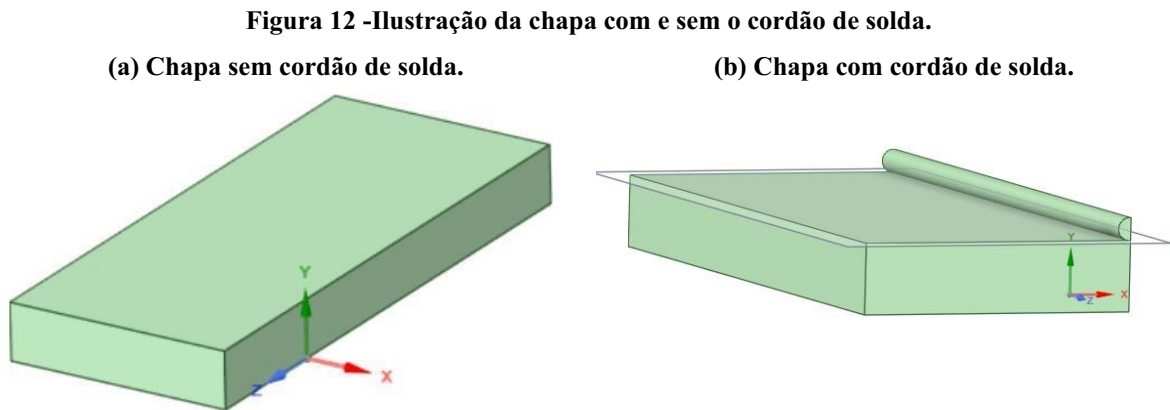
A temperatura foi coletada sempre no centro do comprimento total do cordão, utilizando o termopar do tipo K e com o auxílio do software LabView para registrar as temperaturas obtidas. Com essa configuração foi possível coletar as temperaturas conforme a tocha de soldagem fosse se movendo. Isso permitiu visualizar como a temperatura no material se comporta mesmo depois de terminar a deposição de material em cada passe. Além disso, o termopar foi fixado a 5 mm do cordão, sendo esta medida verificada com o uso do paquímetro.

3.2 Simulação

3.2.1 Geometria do corpo de prova

Para obter resultados mais precisos, a geometria seguiu fielmente o corpo de prova utilizado para os experimentos in loco. Foi desenhado utilizando a ferramenta Ansys Geometry, disponível dentro do próprio software, para esboçar uma chapa de 120 mm de comprimento, 50 mm de largura e 25,4 mm de espessura.

O desenho do corpo de prova utilizado para realizar as simulações pode ser observado na figura 12 (a) indicando a peça sem cordão de solda e na figura 12 (b) mostra a peça com um cordão de solda, ambas retiradas do software Ansys.



Fonte: autoria própria (2022).

Foram utilizadas duas geometrias para representar o cordão de solda na simulação. A primeira possui uma geometria simples, com a finalidade de se tornar um modelo mais simples e de fácil processamento, e a segunda apresenta uma geometria que segue as medidas e geometria do cordão resultante dos passes de solda realizados no experimento prático que será demonstrado a seguir.

3.2.2 Geometria do cordão simples

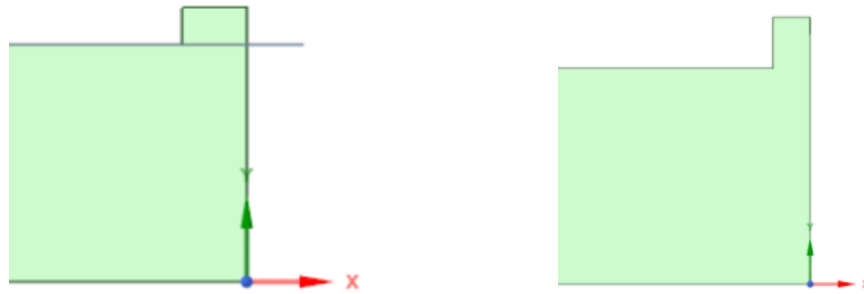
Essa geometria foi desenhada para fins comparativos, com o intuito de mostrar no trabalho a variação de temperatura quando alterada a geometria do cordão de solda.

Foi desenhado, sobre a chapa, um paralelepípedo retângulo nas dimensões de 120 mm de comprimento, 4,5 mm de largura e 2 mm de altura. Para cada passe, 2 mm eram adicionados na geometria. Na figura 13 (a) pode ser visto a geometria quadrada com somente 1 passe de solda, e a figura 13 (b) representando o quarto passe com 6 mm de altura do cordão.

Figura 13 – Representação do cordão de solda quadrado utilizando a aba Geometry do Ansys.

(a) Geometria quadrada com 2 mm de altura.

(b) Geometria quadrada com 6 mm de altura.



Fonte: autoria própria (2022).

3.2.3 Geometria do cordão mais semelhante à real

Essa geometria seguiu o formato resultante do cordão de solda realizado em laboratório de maneira mais fiel, sendo representada por um arco ligado por 3 pontos, possuindo uma altura de 2 mm por passe, 4,5 mm de largura e um comprimento total de 120 mm. A geometria que simula o cordão de solda pode ser vista na figura 14.

Figura 14 – Representação do cordão de solda redondo utilizando a aba Geometry do Ansys.

(a) Geometria circular com 2 mm de altura.

(b) Geometria circular com 6 mm de altura.

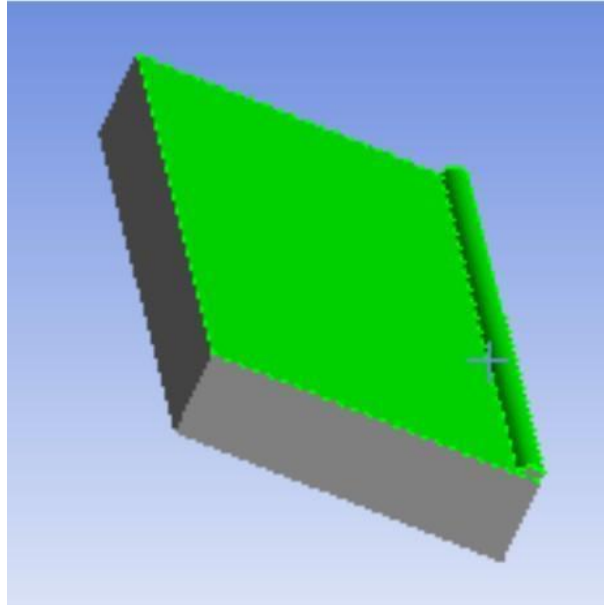


Fonte: autoria própria (2022).

3.2.4 Malha

Para realizar a simulação foram utilizadas duas funções de refinamento de malha, face meshing e sizing, nos dois locais de interesse de estudo, no cordão de solda e na face superior da chapa, como indicado na figura 15. O tamanho da malha pode ser variado através de uma configuração prévia do próprio software utilizado, alterando seu formato e distância entre os pontos a serem avaliados, podendo ter um grau maior ou menor de refinamento.

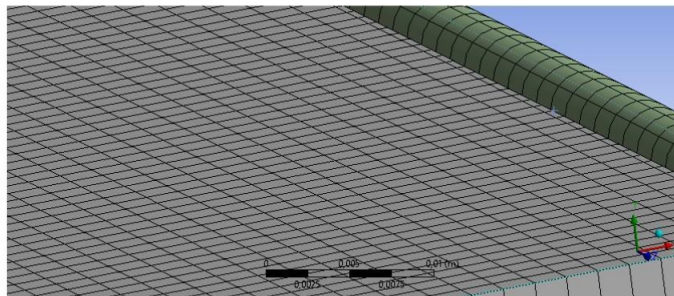
Figura 15 – Faces selecionadas para gerar a malha.



Fonte: autoria própria (2022).

Na opção sizing foi utilizado um valor de 2 mm como distância para cada nó, possibilitando um resultado preciso de variação de temperatura em cada ponto do corpo de prova. A malha gerada pode ser vista na figura 16.

Figura 16 – Representação da malha gerada.



Fonte: autoria própria (2022).

3.2.5 Condições iniciais da simulação

Para iniciar a simulação foram definidas algumas condições iniciais, são elas: temperatura ambiente, valores convectivos do ar, temperatura inicial da chapa, tempo de duração da simulação, material e geometria que estará exposta a troca de calor com o ambiente.

Para toda a geometria, menos para o cordão de solda, foi selecionado no software as propriedades do aço SAE 1020, o mesmo utilizado no experimento in loco, com os valores de

condutividade e calor específico já definidos pelo próprio software. Os cordões de solda foram definidos com as propriedades físicas do aço P20, mesmo material de adição utilizado durante os experimentos, tais configurações foram utilizadas para as geometrias circular e quadrada.

Os valores de convecção do ar foram retirados do próprio programa, variando automaticamente o coeficiente convectivo do ar conforme a temperatura em torno da chapa ia alterando devido ao fluxo de calor incidente, deixando-o de forma mais próxima à realidade do que se fosse fixado um valor de coeficiente convectivo.

O tempo de duração da simulação foi de 180 segundos, suficiente para analisar a temperatura máxima obtida na simulação como também o comportamento do gráfico referente a perda de temperatura da chapa aquecida para com o ambiente.

As condições iniciais para a simulação ser realizada estão na figura 17, que representa as configurações do primeiro passe da simulação. O tempo de simulação de 180 segundos indica que a transferência de calor entre a chapa e o ambiente por convecção é constante durante todo o processo. A temperatura inicial do corpo é definida conforme a temperatura inicial da peça para cada experimento, sendo para essa simulação em específico, configurada como 22,283°C e a temperatura ambiente foi mantida para todos os passes em 22°C. O material da base da geometria com as propriedades de aço SAE 1020 e a geometria do cordão com as propriedades do aço P20.

Figura 17 – Dados iniciais de convecção, temperatura inicial, tempo de simulação e materiais.

Tempo de duração (s)	180
Temperatura inicial do corpo (°C)	22,283
Temperatura ambiente (°C)	22
Geometria	1 corpo
Material da base da chapa	Aço 1020
Material do cordão de solda	Aço P20

Fonte: autoria própria (2022).

3.2.6 Moving heat flow

Para simular o processo de soldagem de forma mais próxima da real, foi utilizada a aba Heat Transient, destinada a simulações em que o fluxo de calor varia com o tempo, e dentro desta, foi utilizada a função Moving Heat Flow. Essa função simula um fluxo de calor transiente que percorre um caminho dentro de uma geometria pré determinada pelo usuário.

Como parâmetros de entrada foram definidos, em relação ao fluxo de calor, sua velocidade, diâmetro e intensidade, seguindo os valores obtidos no experimento realizado em laboratório.

Para definir a intensidade de fluxo de calor a fórmula (energia de soldagem), foi utilizada a equação (2):

$$Q = I.V.e/v \quad (2)$$

Em que “I” refere-se a corrente, “V” a voltagem, e “e” a eficiência, que segundo Stenbacka *et al.* (2012) é de 80% para o processo TIG em aço SAE 1020, e “v” a velocidade da fonte de calor.

A geometria selecionada foi a face da simulação da solda, tendo o caminho do fluxo de calor a borda do cordão de solda e seu ponto inicial o vértice do cordão. A velocidade do caminho do fluxo de calor é de 0,015m/s e o raio da fonte de calor 0,005 m. A energia é de 23487524,7 W/m², tendo o tempo total do fluxo de calor 8 segundos, o suficiente para que inicie e termine nas extremidades do cordão de solda. A tabela 2 mostra os valores dos parâmetros que foram utilizados na simulação baseados no experimento in loco.

Tabela 2 - Parâmetros utilizados na simulação.

Corrente (A)	Voltagem (V)	Velocidade (mm/min)	Eficiência (%)	Raio (m)	Área (m ²)	Energia (W/m ²)
140	14	850	80	0,005	7,85398E-05	23487524,78

Fonte: autoria própria (2022).

Na figura 18, retirada da simulação, pode-se observar os parâmetros utilizados na função Moving Heat Flow, utilizada para obter os resultados finais da simulação.

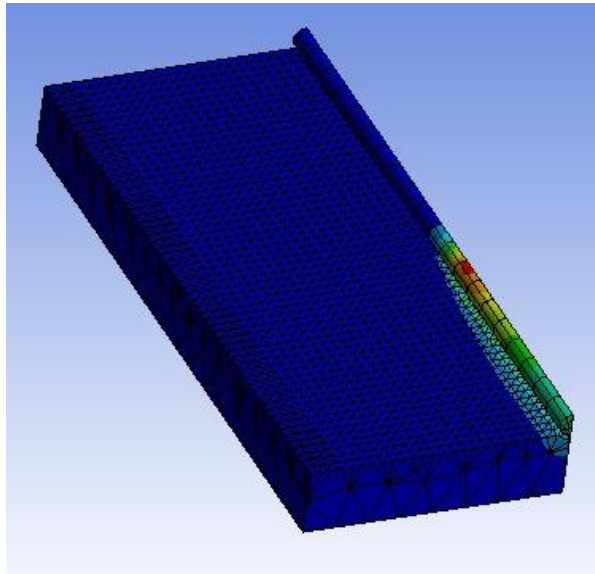
Figura 18 – Parâmetros utilizados na função Moving Heat Flow.

Geometria	1 face
Caminho	1 borda
Ponto inicial	1 vértice
Velocidade (m/s)	0,015
Raio da fonte de calor (m)	0,005
Energia (W/m ²)	23487524,7
Tempo de início (s)	0
Tempo final (s)	8
Número de segmentos	200

Fonte: autoria própria (2022).

A figura 19 mostra a face selecionada com a função Moving Heat Flow em andamento, com o fluxo do calor passando pela geometria do cordão de solda e percorrendo o restante da chapa, simulando a passagem de um fluxo de calor como ocorre um processo de soldagem.

Figura 19 - Ilustração da face selecionada utilizando a função Moving Heat Flow.



Fonte: autoria própria (2022).

3.2.7 Obtenção de dados

A obtenção de dados foi realizada utilizando os dados de variação de temperatura em um só nó, localizado a 5mm de distância da geometria que simula o cordão de solda.

A tabela de dados gerada pelo próprio software Ansys, representada pela figura 20, foi inserida no programa SigmaPlot, a fim de gerar gráficos mais precisos e facilitar a interpretação de dados do resultado final. A segunda coluna indica o tempo de simulação, a terceira a temperatura no determinado tempo e a primeira indicando a quantidade de análises realizadas relacionada ao intervalo de tempo determinado.

Figura 20 – Representação da tabela de dados obtida através de simulação no Ansys.

N	Tempo(s)	Temperatura(°C)
16	0,64	28,648
17	0,68	28,647
18	0,72	28,647
19	0,76	28,647
20	0,8	28,647
21	0,84	28,647
22	0,88	28,647
23	0,92	28,647
24	0,96	28,647
25	1	28,647
26	1,04	28,647
27	1,08	28,647
28	1,12	28,647
29	1,16	28,647
30	1,2	28,646

Fonte: autoria própria (2022).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com os resultados obtidos foi possível comparar algumas informações relevantes tanto da simulação quanto dos dados coletados pelo termopar. Dessa forma, é possível verificar se o processo e a simulação estão adequados para as análises desejadas. Segue abaixo a relação dos resultados que serão comparados.

- Temperatura máxima atingida na simulação com a coletada pelo termopar;
- Tempo em segundos até o atingimento da temperatura máxima;
- Perfil gráfico da variação de temperatura pelo tempo em segundos.

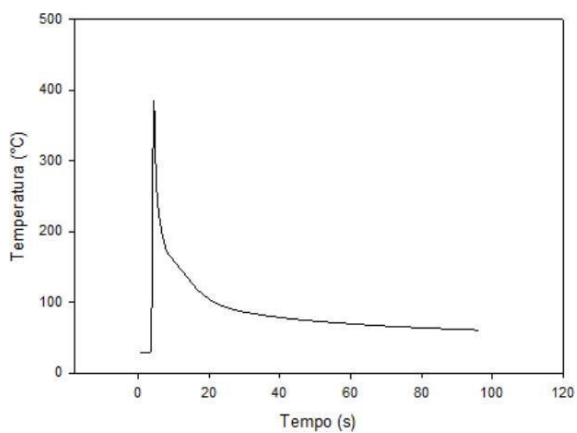
4.1 Análises dos passes

4.1.1 Primeiro Passe

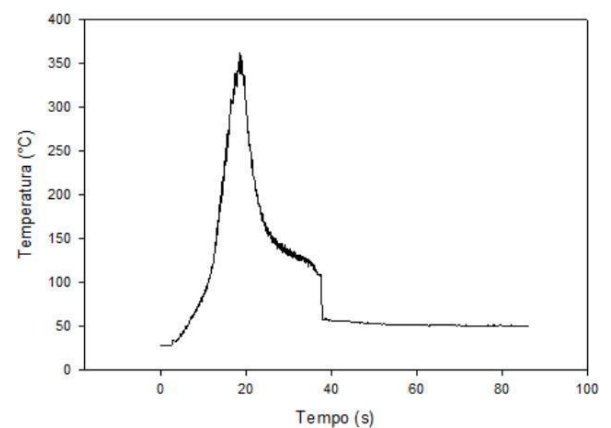
No primeiro passe a temperatura a ser comparada é a da chapa sem a influência do material de depósito. Serão comparados os dados obtidos por experimento in loco com os resultados da simulação, conforme a figura 21.

Figura 21 – Variação da temperatura em função do tempo no primeiro passe.

(a) Perfil de temperatura registrada na simulação.



(b) Perfil de temperatura registrado em laboratório.



Fonte: autoria própria (2022).

A tabela 3 mostra a temperatura máxima atingida ($T_{m\acute{a}x}(C^{\circ})$) na simulação e a registrada em laboratório, a variação entre elas e o erro atrelado. Sendo este último calculado levando em consideração a variação (temperatura máxima do termopar menos a temperatura máxima registrada pelo software) e temperatura máxima atingida pelo termopar.

Tabela 3 – Comparação de valores para o primeiro passe.

Dado	T _{máx} (C°)	Variação	Erro
Termopar	362,22	23,25	6,42%
Simulação	385,47	-	-

Fonte: autoria própria (2022).

O erro atrelado foi calculado utilizando a fórmula 3:

$$(Variação/T_{máx} (C^{\circ}) \text{ termopar}) \times 100 = \% \quad (3)$$

Para o primeiro passe já era esperado a menor variação de temperatura do experimento, uma vez que não há acréscimo de material nessa etapa.

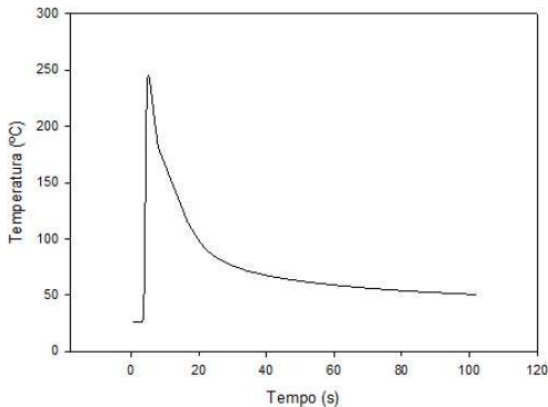
Possivelmente o erro de aproximadamente 6% encontrado pode ser devido às incertezas de medições, principalmente do posicionamento do termopar e também da incerteza da energia depositada sobre o material pela utilização de corrente e tensão variadas, sendo pouco provável alguma influência da geometria, uma vez que esta é bastante simples e se resume somente a uma chapa retangular.

4.1.2 Segundo Passe

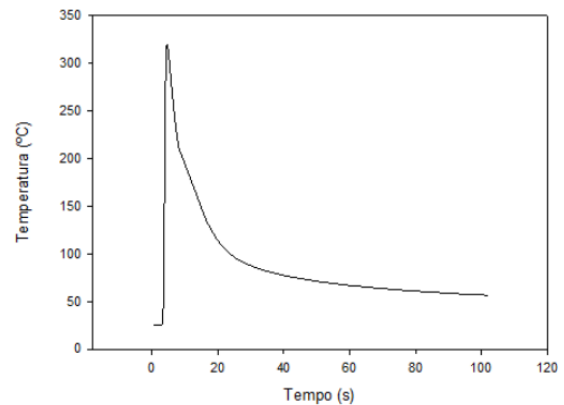
Para o segundo passe, devido ao acréscimo do cordão de solda, foram comparadas as variações de temperatura pelo tempo das duas geometrias citadas anteriormente, a fim de verificar a influência da geometria nos resultados finais, podendo ser observados os resultados das variações nas figuras 22 e 23. A temperatura inicial nesse passe foi de 26,1°C.

Figura 22 – Variação da temperatura em função do tempo registrada na simulação no segundo passe.

(a) Geometria quadrada do cordão de solda.

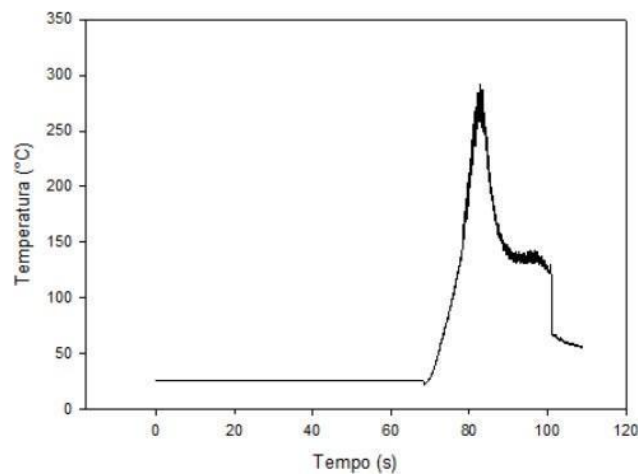


(b) Geometria circular do cordão de solda.



Fonte: autoria própria (2022).

Figura 23 – Variação da temperatura em função do tempo registrada em laboratório no segundo passe.



Fonte: autoria própria (2022).

A tabela 4, diferentemente da tabela 3, apresenta as temperaturas máximas atingidas ($T_{\text{máx}} (C^{\circ})$) nas duas configurações de cordão solda possíveis na simulação, sendo elas a quadrada e a circular. Além disso, a variação destas temperaturas com relação a temperatura máxima registrada pelo termopar ($T_{\text{máx}} (C^{\circ})$ Termopar) e também o erro atrelado para estes casos.

Tabela 4 – Comparação de valores para o segundo passe.

Geometria	$T_{\text{máx}} (C^{\circ})$	$T_{\text{máx}} (C^{\circ})$ Termopar	Variação	Erro
Quadrada	245,21	292,15	46,94	16,07%
Circular	319,43	292,15	-27,28	9,34%

Fonte: autoria própria (2022).

Para o segundo passe, como já esperado, além das incertezas já citadas para o primeiro, neste pode ser observada uma maior variação devido ao acréscimo da geometria que simula o cordão de solda.

É possível notar que a temperatura máxima para a geometria circular é consideravelmente maior do que a da geometria quadrada, isso se deve ao fato da maior área de contato direto com a fonte de calor e uma menor área de troca convectiva com o ar na geometria circular. Para a geometria quadrada, há uma menor área em contato direto com a fonte de calor e uma maior área de troca convectiva com o ar, proporcionando uma menor temperatura máxima registrada .

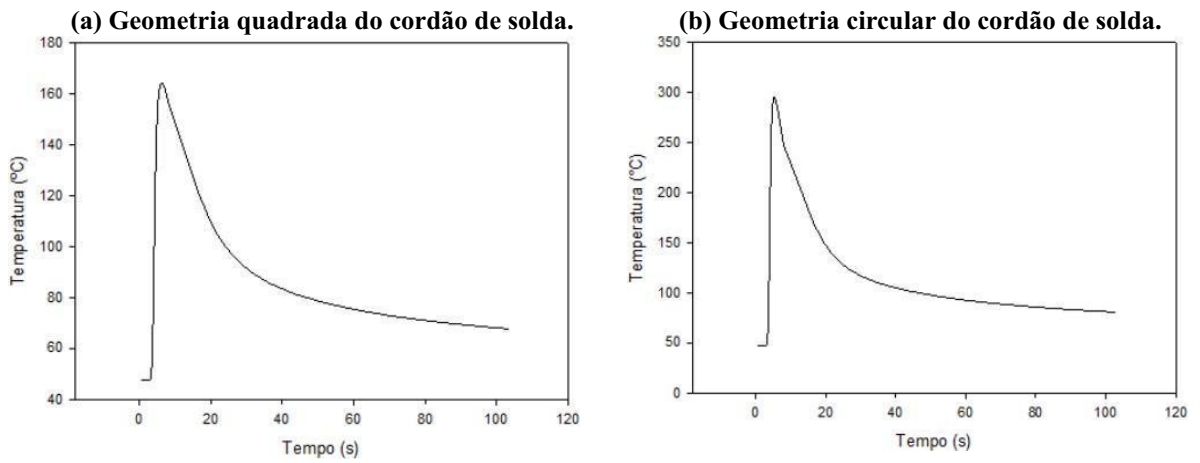
Ambos os gráficos da simulação apresentam o mesmo comportamento, com uma subida brusca a partir do momento em que o fluxo de calor passa pela chapa e a queda se assemelhando com uma parábola, divergindo do gráfico gerado pelo termopar, em que a subida ocorre também de forma rápida porém ligeiramente menor que a encontrada através da simulação e sua descida apresenta uma imprecisão bem nítida, em que o perfil de resfriamento se assemelha a uma parábola decrescente, porém em determinado intervalo ocorre uma queda repentina na temperatura.

O perfil de resfriamento encontrado no gráfico gerado em laboratório reforça o fato da incerteza da aquisição de dados pelo termopar devido aos erros intrínsecos aos procedimentos experimentais, fazendo com que as temperaturas máximas sejam de valores parecidos quando comparadas com a simulação, porém com comportamento de resfriamento não totalmente similar.

4.1.3 Terceiro Passe

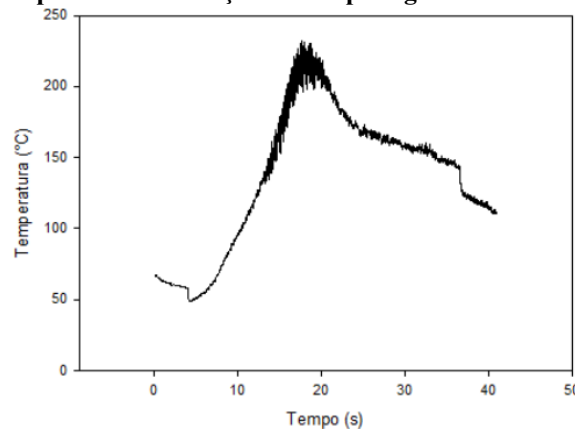
O procedimento para a análise dos resultados do terceiro passe seguem os mesmos padrões adotados para o segundo passe, representados nas figuras 24 e 25. A temperatura inicial nesse passe foi de 47,7°C.

Figura 24 – Variação da temperatura em função do tempo registrada na simulação no terceiro passe.



Fonte: autoria própria (2022).

Figura 25 – Variação da temperatura em função do tempo registrada em laboratório no terceiro passe.



Fonte: autoria própria (2022).

A tabela 5 mostra os valores relacionados ao terceiro passo de forma semelhante à tabela 4.

Tabela 5 – Comparação de valores para o terceiro passe.

Geometria	T _{máx} (C°)	T _{máx} (C°) Termopar	Variação	Erro
Quadrada	164,17	242,85	78,68	32,40%
Circular	294,83	242,85	-51,98	21,40%

Fonte: autoria própria (2022).

Para o terceiro passe podem ser feitas as mesmas considerações do segundo passe. Um erro maior já era esperado para a geometria quadrada uma vez que o acúmulo de incertezas se tornou maior, levando em conta o aumento das dimensões do cordão de solda, fazendo com

que a possibilidade de uma variação geométrica entre a geometria da simulação para com o cordão obtido em laboratório aumente.

Pode ser observado também que o gráfico gerado pela aquisição de dados através do termopar se torna menos similar ao encontrado pela simulação, reforçando a ideia de que a imprecisão da aquisição de dados tem uma forte influência no erro encontrado para cada experimento.

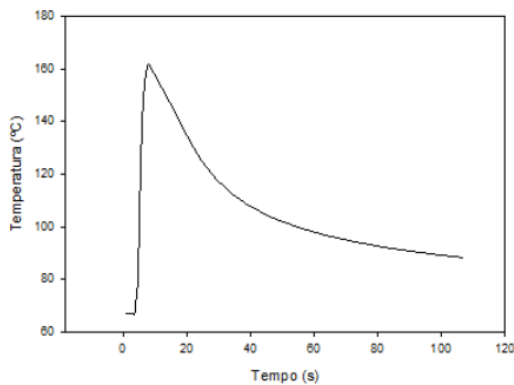
Era esperado que para a geometria quadrada o erro continuasse ainda maior e a temperatura fosse menor em relação e geometria circular e a temperatura obtida em laboratório, uma vez que a cada passe a área do cordão de solda se torna mais divergente da real pela falta de similaridade entre as duas.

4.1.6 Quarto Passe

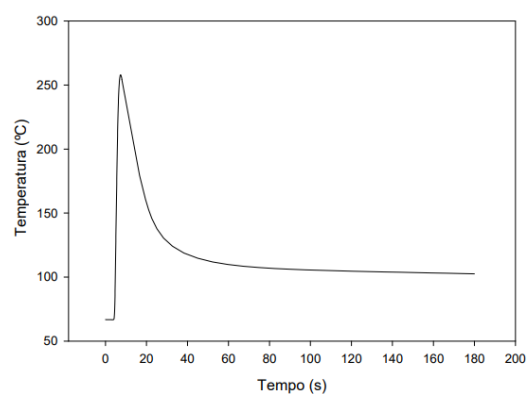
Os resultados para o quarto passe podem ser observados nas figuras 26 e 27. A temperatura inicial nesse passe foi de $66,8^{\circ}\text{C}$.

Figura 26 – Variação da temperatura em função do tempo registrada na simulação no quarto passe.

(a) Geometria quadrada do cordão de solda.

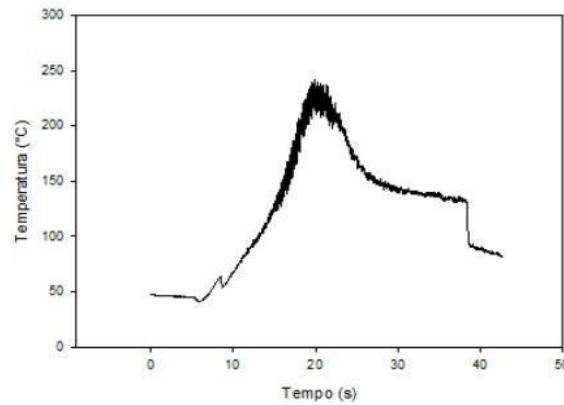


(b) Geometria circular do cordão de solda.



Fonte: autoria própria (2022).

Figura 27 – Variação da temperatura em função do tempo registrada em laboratório no quarto passe.



Fonte: autoria própria (2022).

A tabela 6 mostra os valores relacionados ao quarto passe de forma semelhante à tabela 5.

Tabela 6 – Comparação de valores para o quarto passe.

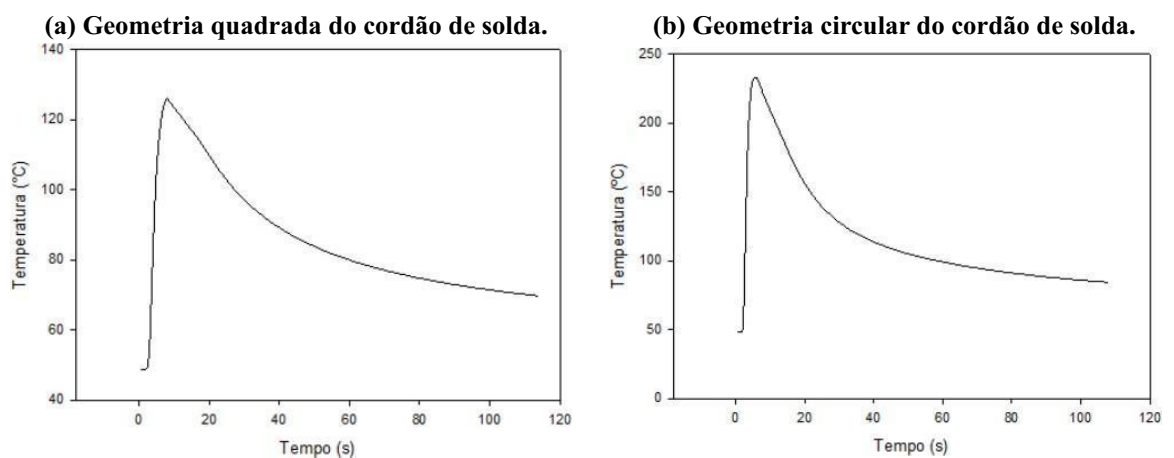
Geometria	T _{máx} (C°)	T _{máx} (C°) Termopar	Varição	Erro
Quadrada	162,02	232,33	70,31	30,26%
Circular	258,54	232,33	-26,21	11,28%

Fonte: autoria própria (2022).

4.1.5 Quinto Passe

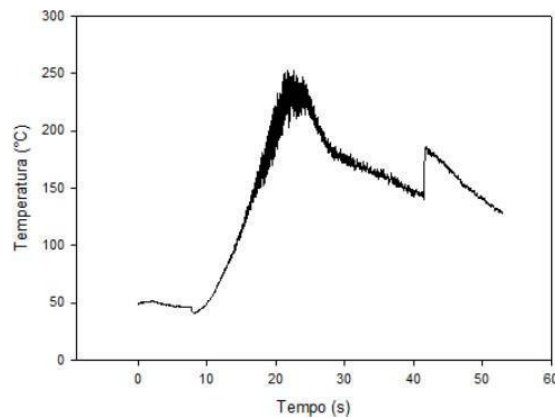
Os resultados para o quinto passe podem ser observados nas figuras 28 e 29. A temperatura inicial nesse passe foi de 48,8°C.

Figura 28 – Variação da temperatura em função do tempo registrada na simulação no quinto passe.



Fonte: autoria própria (2022).

Figura 29 – Variação da temperatura em função do tempo registrada em laboratório no quinto passe.



Fonte: autoria própria (2022).

A tabela 7 mostra os valores relacionados ao quinto passo de forma semelhante à tabela 6.

Tabela 7 – Comparação de valores para o quinto passe.

Geometria	T _{máx} (C°)	T _{máx} (C°) Termopar	Varição	Erro
Quadrada	126,04	253,42	127,38	50,26%
Circular	233,33	253,42	20,09	-7,93%

Fonte: autoria própria (2022).

Nos passes 4 e 5 pode-se observar que os valores das variações de temperaturas ficaram próximos de 20°C entre a geometria circular e a obtida pelo termopar, mostrando-se que apresentaram valores próximos ao serem analisados em relação ao valor da temperatura máxima.

Levando em conta o valor obtido no passe 3, pode ser observado que os erros de aquisição citados do experimento foram os maiores encontrados, uma vez que sua variação de temperatura deveria ser menor que nos últimos passes realizados, devido às incertezas geométricas em menores escalas presentes.

Tanto para o passe 4 quanto o 5, a geometria quadrada continua aumentando o erro. Observa-se que quanto maior a área do cordão de solda, maior será a sua divergência para com a real, devido a maior falta de similaridade da geometria quadrada, fazendo com que as temperaturas de pico atinjam valores menores, devido a fenômenos de transferência de calor já citados.

4.2 Erros

A tabela 8 mostra os erros associados a cada passe e também a cada perfil do cordão de solda realizado na simulação.

Tabela 8 – Erros relacionados a cada simulação realizada.

Geometria	Passe 2	Passe 3	Passe 4	Passe 5
Quadrada	16,07%	32,40%	30,26%	50,26%
Circular	9,34%	21,40%	11,28%	7,93%

Fonte: autoria própria (2022).

As variáveis comparativas utilizadas foram as temperaturas máximas registradas pelo termopar e nas simulações, e com elas foi possível analisar as variações de temperatura entre as duas geometrias utilizadas no software e as captadas in loco. As duas geometrias utilizadas foram a quadrada e a circular.

A geometria quadrada apresentou um desempenho inferior ao da circular, pois a diferença entre sua temperatura máxima e a do termopar foi superior em todos os passes quando comparada a circular. No passe 2 apresentou um erro atrelado superior a 15% e no passe 5 apresentou um erro de 50,26%, apontando uma diferença entre sua temperatura máxima e a do termopar superior a 120°C. Além disso, verificou-se uma tendência de aumento no erro conforme os passes foram ocorrendo, ou seja, os erros foram aumentando a cada passe.

A geometria circular apresentou um desempenho satisfatório, visto que o maior erro atrelado foi no passe 3, com valor próximo a 20%. Nos outros passes foram verificados erros próximos a 10%, ou seja, uma variação de temperatura entre 20 e 30 graus Celsius.

Além disso, pode ser observado que a geometria circular não apresentou uma tendência de aumento nos erros bem definida, diferentemente da geometria quadrada que teve no passe 2 o valor mais baixo e no passe 5 o valor mais alto, sendo este 3 vezes maior que o passe 2. O passe 5 teve o maior erro de todos para a geometria quadrada e o menor de todos para a geometria circular.

Observa-se que a geometria circular apresentou desempenho melhor ao da geometria quadrada, visto que seus erros atrelados foram menores em todos os passes. Conseqüentemente, as temperaturas máximas nessa configuração foram mais próximas às capturadas pelo termopar.

4.3 Incertezas experimentais

Provavelmente uma das principais fontes de erro no resultado final da comparação entre a simulação numérica com os valores obtidos em laboratório, deve-se à imprecisão na realização do experimento prático.

4.3.1 Incertezas devido ao posicionamento do termopar

A posição exata do termopar no corpo de prova em que a solda foi efetuada mostra-se como uma potencial fonte de erro, uma vez que era apoiado sobre a chapa e um eventual deslocamento de décimos de milímetros já é o suficiente para gerar uma variação nos valores obtidos. Uma vez que, segundo Modenesi (2001), o principal mecanismo de transferência de calor da zona fundida para com o resto do corpo soldado é a condução e, analisando a equação (4) em que a taxa de transferência de calor é dada por:

$$\rho C(T) \frac{dT}{dt} = \frac{d}{dx} \left[k(T) \frac{dT}{dx} \right] + \frac{d}{dy} \left[k(T) \frac{dT}{dy} \right] + \frac{d}{dz} \left[k(T) \frac{dT}{dz} \right] - \rho C(T) \left(V_x \frac{d}{dx} + V_y \frac{d}{dy} + V_z \frac{d}{dz} \right) + Q \quad (4)$$

Onde as expressões que aqui nos interessam, dx e dy, correspondem a distância da fonte de calor para com o ponto de medição da temperatura e, sabendo também que o termopar originalmente se encontra a 5mm da fonte de energia, pode-se concluir que um leve deslocamento no eixo transversal ou longitudinal da chapa já é o suficiente para gerar erros consideráveis no experimento, enviando dados de temperatura de um local indesejado inicialmente e divergindo da posição a ser configurada durante a simulação numérica.

4.3.2 Incertezas devido à aquisição de dados

É intrínseco ao processo de medição de temperatura a presença de erros, por mais que a ferramenta utilizada para a medida desta grandeza esteja em perfeito estado, haverá uma variação para menos ou para mais do valor real. Segundo Santos (2008) baseado na norma IEC 584 - 2, pode ser de 0,5°C para a faixa de temperatura de -40°C a 125°C e de 0,4% para a faixa de 125°C a 350°C.

A preparação não homogênea das pontas, citadas na metodologia do trabalho realizado, pode ter promovido alterações na capacidade de registro das temperaturas, pois o metal presente na peça é sensível e além disso foi necessário adaptar o seu apoio de forma que

sua extremidade permanecesse o tempo todo em contato com a peça. Sendo esta parte do processo crucial para a qualidade dos dados, podendo ter gerado incertezas acima do esperado. Portanto, um dos fatores de alteração do perfil de temperatura registrado pelo termopar pode ter sido oriundo da própria ferramenta. É possível visualizar que em alguns passes temos quedas bruscas de temperatura, diferentemente dos passes realizados no software, onde é possível ver as quedas de temperatura uniforme e gradual.

4.3.3 Dados Obtidos

A principal variável comparativa que utilizada foi a temperatura máxima capturada pelo termopar que estava encostado na chapa que recebeu as camadas de material no empilhamento e, com isso, foi possível comparar com a temperatura máxima registrada na simulação.

Considerando a variação de temperatura dos 5 passes com geometria circular, em média ocorreu uma diferença de, aproximadamente, 31,39° graus celsius. Sendo que o passe que apresentou maior diferença de temperatura registrada pelo termopar e a simulação foi o terceiro passe, com -51,98° graus celsius e que, conseqüentemente, foi o que apresentou maior erro atrelado, 21,40%. Em média, ocorreu uma variação de 12,49% de erro para esse tipo de configuração (geometria circular).

Utilizando a geometria quadrada na simulação, as diferenças de temperatura foram maiores do que utilizando a geometria circular. A média de variação de temperaturas registradas entre o termopar e a simulação ficou em 80,82° graus celsius, aproximadamente. Conseqüentemente, foi a configuração que apresentou a maior média de erro atrelado, no valor de 32,25%, aproximadamente.

Foi possível identificar também o perfil de variação de temperatura entre os tipos de geometria do cordão. Na geometria circular as temperaturas máximas obtidas em simulação, foram maiores em 3 dos 4 passes realizados, quando comparada com as temperaturas máximas obtidas em laboratório, somente no último passe que foi menor. Esse tipo de comportamento foi totalmente diferente no encontrado com geometria quadrada.

Utilizando a geometria quadrada na simulação, as temperaturas registradas pelo termopar foram maiores nos 4 passes em comparação com as obtidas no software. Dessa forma, o comportamento apresentado foi completamente diferente do que foi encontrado pelo outro tipo de geometria.

No primeiro passe não foi possível registrar a temperatura por diferenciação de geometria do cordão de solda, pois temos uma limitação com relação ao software. Não é

possível adicionar material conforme a fonte de energia vai se movimentando, com isso o cordão é adicionado após a fonte de energia completar o percurso estabelecido. Nesse passe o erro foi de 6,03%.

4.4 Método de TIG alimentado

Como citado na metodologia, o processo utilizado foi pulsado, com os valores de tensão variando entre os valores de 11,6 Volts e 14,6 Volts, e para a corrente de 122 Amperes até 148 Amperes durante a realização da solda.

Analisando a fórmula (2) de energia de soldagem, pode-se observar que a energia depositada no corpo de prova está diretamente relacionada, de forma proporcional, à variação de corrente e tensão.

Uma vez que a velocidade da solda (v) e a eficiência (e) são iguais para a simulação e o experimento em laboratório, os únicos parâmetros que variaram foram os valores do produto da corrente (I) e tensão (V).

Para o caso com a maior voltagem e a maior corrente, temos um produto destas duas variáveis com o valor de 2012,8 Watts, enquanto que para os menores valores um produto de 1415,2 Watts, havendo uma variação de 29,7% entre os picos de baixa e de alta energia.

Na simulação foi utilizado o maior valor de corrente e tensão. Como analisado na fórmula da energia de soldagem, pode-se observar que por ser utilizado valores constantes na simulação, em determinadas partes do processo pode ter ocorrido uma variação de até aproximadamente 29,7% da energia incidente na chapa, provavelmente interferindo no valor desejado final.

4.5 Erros devido a geometria do cordão de solda

Levando em consideração que a geometria do cordão de solda utilizada na simulação pode apresentar uma pequena diferença em relação à obtida em experimento, em que esta última não é perfeita e totalmente lisa. Devido a possibilidade de somente poderem serem feitos arcos ou semi círculos para esboçar a geometria do cordão de solda no software, esta variável se torna importante ser citada como uma possível fonte de erro.

Tendo em vista as fórmulas 1 e 4, é possível analisar que tanto a troca de calor por convecção do cordão de solda para com o ambiente, como a transferência de calor por condução, estão diretamente ligadas à área do cordão de solda. Uma pequena variação na geometria do cordão na simulação, que aumentava aproximadamente 2 mm por passe, já seria

o suficiente para, combinando as transferências de calor por condução e convecção, alterar o resultado final desejado mais próximo da realidade.

Além do fator citado da geometria encontrada no experimento em laboratório não ser perfeita, há também as incertezas de medidas referentes à medição do tamanho do cordão de solda, podendo ocorrer por conta de erro humano ou incertezas intrínsecas ao próprio paquímetro utilizado no experimento.

4.6 Erro devido a perda de calor por radiação

No trabalho apresentado foram levados como mecanismos de transferência de calor a condução e convecção, sendo descartada a radiação para com o ambiente, sendo levada em conta somente na eficiência do processo de soldagem utilizado, já tabelado anteriormente.

Segundo Richardson (1998, apud MODENESI, 2001) a radiação participa em, aproximadamente, 10%, sendo consideravelmente menor que as perdas por condução, que constituem cerca de 50% da transferência de calor em uma chapa soldada, sendo assim desconsiderada no estudo em questão. Uma imprecisão do resultado pode estar vinculada a falta deste mecanismo de transferência de calor, uma vez que é mais notável sua influência quanto maior a diferença de temperatura entre a peça aquecida e a temperatura da vizinhança (ROCHA, 2016).

4.7 Erro devido ao processo simulacional

Considerando que os resultados obtidos pelo software Ansys são derivados dos cálculos realizados nó a nó pela malha gerada, o grau do seu refinamento pode alterar os resultados obtidos.

No trabalho em questão foi utilizado a função Sizing para que a distância entre cada nó fosse de 2 mm, tal função foi utilizada somente na face de interesse da leitura de dados e no cordão de solda. Levando em consideração que quanto mais próximos estejam os nós, um valor mais próximo da realidade pode ser calculado. Para isso, suma maior capacidade de processamento computacional no trabalho realizado, onde uma malha mais refinada e com um maior número de pontos de estudo seria gerada, abrangendo toda a geometria.

Outro fator que pode ter ocasionado divergência de resultados é devido a geometria utilizada no software, onde tanto para a geometria circular como quadrada são totalmente lisas, não possuindo ondulações ou porosidades, diferentemente de como ocorreu no

experimento em laboratório, podendo contribuir para que as temperaturas máximas encontradas variem.

Por último, podemos citar também a adição do material na simulação na função Moving Heat Flow, onde não é possível adicionar o aço P20 conforme a fonte de calor vai se movimentando. Dessa forma, a fonte percorre o cordão após ele ser adicionado, ou seja, a chapa apresenta uma quantidade maior de material, interferindo assim nos processos de transferência de calor em toda sua extensão.

5 CONCLUSÃO

Baseando-se nos resultados e discussões realizados para o presente trabalho, nas simulações desenvolvidas e nos experimentos realizados em laboratório, foi possível notar que:

- Através do uso do termopar e da utilização do software LabView, foi possível a realização dos gráficos de fluxo térmico para um determinado ponto do cordão de solda, baseado na posição em que o termopar está disposto.

- O modelo de simulação proposto utilizando a geometria do cordão de solda circular, apresentou resultados mais próximos, quando comparado à geometria do cordão de solda quadrada, aos valores obtidos in loco.

- Os perfis térmicos obtidos na simulação e pelo termopar apresentam características semelhantes quanto ao seu formato, principalmente no que diz respeito a curva de aquecimento da chapa até atingir seu valor de temperatura máxima.

- A utilização de uma malha mais refinada, somente na face de interesse de estudo do pico de temperatura, possibilitou um modelo simulacional mais leve e rápido, mantendo a precisão da simulação.

- A cada passe realizado pode ser observado que as variações de temperaturas máximas entre as geometrias quadradas e circulares aumentaram. Mostrando que uma divergência da área de troca de calor da peça soldada para com o ambiente influencia nos resultados finais.

- Os resultados obtidos mostraram que temos oportunidade de melhoria no processo de soldagem em si e também na simulação com o refino de parâmetros que foram definidos mas, por outro lado viu-se que o procedimento como um todo teve um desempenho satisfatório para ser utilizado em análises térmicas envolvendo um dos principais modos de soldagem, o de empilhamento.

REFERÊNCIAS

- AZEVEDO, Sarah Cristina *et al.* **Avaliação de aspectos operacionais do processo de soldagem TIG-MIG/MAG.** 2019.
- BARBAN, Leonardo Manesco. **Análise numérico-computacional das tensões térmicas induzidas pela soldagem.** 2014. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- CARY, Howard B. *Modern Welding Technology.* **Englewood Cliffs, N.J.:** Prentice-Hall, 1979.
- CHATURVEDI, Mukti *et al.* Wire arc additive manufacturing: Review on recent findings and challenges in industrial applications and materials characterization. **MDPI**, 2021.
- CHEN, Jingwei *et al.* An experimental and numerical analysis of residual stresses in a tig weldment of a single crystal nickel-base superalloy. **Journal of Manufacturing Processes**, p. 190–200, 2020.
- COMPANY, The Lincoln Electric. **The Procedure Handbook of Warc Welding.** THE LINCOLN ELETRIC COMPANY, 1973. Disponível em: <https://fdocuments.in/document/the-lincoln-procedure-handbook-of-arc-welding.html>.
- CUNNINGHAM, C.R. *et al.* Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing. **Additive Manufacturing**, v. 22, p. 672–686, 2018.
- DING, Donghong *et al.* A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (waam). **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 31, p. 101–110, 2015.
- DING, Donghong *et al.* A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM). **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 31, p. 101-110, 2015.

FILHO, Avelino A. **Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE**. Editora Érica Ltda, 2000.

GOLDAK, John *et al.* Computer modeling of heat flow in welds. **Metallurgical transactions B**, v. 17, n. 3, p. 587-600, 1986.

MALISKA, Clovis Raimundo. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. Grupo Gen-LTC, 2017.

MCANDREW, Anthony R. *et al.* Interpass rolling of Ti-6Al-4V wire+ arc additively manufactured features for microstructural refinement. **Additive Manufacturing**, v. 21, p. 340-349, 2018.

MESSLER, Robert W. **Principles of welding process, physics, chemistry and metallurgy**. John Wiley & Sons. 2004.

MODENESI, Paulo J. Introdução à Física do Arco Elétrico Soldagem I. **Belo Horizonte: UFMG**, 2001.

NERIS, Manuel M. **Método dos Elementos Finitos**. Centro Paula Souza, 2012.

PRIARONE, Paolo C. *et al.* Multi-criteria environmental and economic impact assessment of wire arc additive manufacturing. **CIRP Annals**, v. 69, n. 1, p. 37-40, 2020.

REDDY, J.N.; GARTLING, D.K. **The Finite Element Method in Heat Transfer and Fluid Dynamics**. CRC Press, 2010.

ROCHA, Eduardo José Fernandes. **Modelagem da distribuição de temperatura numa junta soldada do aço API 5L X80 com validação do modelo por imagens termográficas**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

SANTOS, Marcelo Ribeiro dos *et al.* **Modelo térmico para a solução de problemas inversos em transferência de calor com aplicação em um processo de usinagem por torneamento**. 2008.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de. **Soldagem: Processos e Metalurgia**. Edgard Blücher LTDA., 1992.

WOHLERS, Terry; GORNET, Tim. History of additive manufacturing. **Wohlers report**, v. 24, n. 2014, p. 118, 2014.

ZHOU, Jia; TSAI, Hai-Lung. Modeling of transport phenomena in hybrid laser-MIG keyhole welding. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 51, n. 17-18, p. 4353-4366, 2008.