

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DOS CICLOS TÉRMICOS DO PROCESSO DE MANUFATURA
ADITIVA POR MEIO DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

por

Renan Pereira Alessio

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, novembro de 2018



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DOS CICLOS TÉRMICOS DO PROCESSO DE MANUFATURA
ADITIVA POR MEIO DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

por

Renan Pereira Alessio

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof^a. Dr^a. Thamy Cristina Hayashi.
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. José Antônio Esmerio Mazzaferro

Comissão de Avaliação:

Prof. José Antônio Esmerio Mazzaferro

Prof. Patric Daniel Reis

Prof. Flávio José Lorini

Porto Alegre, 16 de novembro de 2018.

ALESSIO, R. P. **Simulação Numérica dos Ciclos Térmicos do Processo de Manufatura Aditiva Por Meio do Método de Elementos Finitos**. 2018. 15 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

RESUMO

O processo de manufatura aditiva por soldagem à arco ganhou importância no cenário industrial por viabilizar a confecção de componentes com geometria complexa de uma maneira mais simples quando comparado à processos de fabricação tradicionais. Esse trabalho desenvolveu um modelo numérico pelo Método de Elementos Finitos para representação do comportamento térmico do empilhamento de cinco cordões de solda sobre uma chapa para quatro condições de soldagem diferentes (G1, G2, G3, G4). Experimentos foram realizados para o desenvolvimento e posterior validação do modelo. Houve a aquisição de dados nos experimentos para avaliação do ciclo térmico em três posições diferentes através de três termopares (T1, T2 e T3). O modelo de Goldak foi utilizado como fonte de calor utilizando parâmetros geométricos da poça de fusão referente à cada condição de soldagem. Testes com diferentes conjuntos de condições de contorno foram realizados para verificar qual conjunto melhor representaria o comportamento observado nos experimentos. Um processo de convergência de malha foi realizado para verificar qual nível de discretização de geometria proporcionaria um resultado convergente com menor tempo de processamento possível. Uma modelagem específica foi utilizada para representar o comportamento de deposição dos cordões de solda durante o empilhamento. O desvio médio entre as temperaturas de pico obtidas na simulação e no experimento para o empilhamento dos três primeiros cordões para a condição G1 foi menor que 10%. Para os dois cordões subsequentes, o desvio médio aumentou. Na generalização do modelo, apenas os ciclos térmicos obtidos na simulação para a condição G2 apresentaram resultados satisfatórios. Foi observado que o modelo de fonte de calor de Goldak pode não ser ideal para situações onde há variações nos parâmetros de soldagem e dimensões de poça de fusão, o que pode acontecer durante o empilhamento de cordões de soldagem.

PALAVRAS-CHAVE: Manufatura Aditiva, Modelagem, Ciclo Térmico.

ALESSIO, R. P. **Numerical Simulation of the Thermal Cycles of Additive Manufacturing Process Through Finite Element Method**. 2018. N° 15. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

ABSTRACT

The process of wire-arc-additive manufacturing gained importance in the industrial scenery by enabling the production of componentes with complex geometry in a simpler way when compared to traditional manufacturing processes. This work developed a numerical model through the Finite Element Method to represent the thermal behavior of the deposition of five layers on the top of a plate using four different welding conditions (G1, G2, G3, G4). Experiments were made to develop and validate the model afterwards. There was data acquisition during the experiments to evaluate the thermal cycle in three different spots through three thermocouples (T1, T2 and T3). The Goldak model was used as heat source considering the geometrical parameters of the welding pool from each welding condition. Tests with different boundary condition sets were made to check which set would better represent what was observed during the experiments. A process of mesh convergency was made to check which level of geometry discretization would give a convergent result with minimal processing time. A specific modelling approach was used to represent the layer deposition behavior during the piling up of weld beads. The average deviation between the simulated and experimental peak temperatures for the deposition of the three first layers using the welding condition G1 was under 10%. The deposition of the later two layers had a greater average deviation. For the model generalization, only the welding condition G2 presented satisfactory results. It was observed that the Goldak heat source model might not be ideal for situations where the welding parameters and the welding pool dimensions vary, what might happen during the piling up of layers.

KEYWORDS: Additive Manufacturing, Modelling, Thermal Cycle.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
4. METODOLOGIA.....	3
4.1 Materiais.....	3
4.1.1 Metal Base	3
4.1.2 Metal de Adição.....	4
4.2 Abordagem Experimental	4
4.2.1 Instrumentação e Aquisição de Dados	4
4.2.2 Processo de Soldagem e Empilhamento de Cordões.....	5
4.2.3 Análise Macrográfica	5
4.3 Abordagem Numérica.....	6
4.3.1 Modelo Preliminar.....	6
4.3.1.1 Abordagem Inicial e Convergência de Malha.....	6
4.3.2 Modelo Base	8
4.3.2.1 Nova Convergência de Malha.....	9
4.3.2.2 Modelagem de Empilhamento de Cordões	9
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	10
5.1 Validação do Modelo	10
5.2 Generalização do Modelo.....	11
6. CONCLUSÕES	14
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15

1. INTRODUÇÃO

O estudo sobre o processo de manufatura aditiva por soldagem à arco é de grande importância devido à atenção que tem recebido por parte dos setores industrial e científico. Esse ganho de notoriedade se baseia nas possibilidades que o processo de manufatura aditiva oferece na confecção de componentes mecânicos. Geometrias que seriam de difícil manufatura por processos convencionais como fundição podem ser construídas de maneira mais simples por manufatura aditiva através do empilhamento de cordões de solda, ou seja, através de uma impressão tridimensional. No entanto, devido ao elevado número de ciclos térmicos que a peça é exposta durante o processo, distorções podem ocorrer. Isso inviabilizaria a utilização de tal componente, bem como se caracterizaria como um desperdício de dinheiro. Portanto, torna-se importante o desenvolvimento de uma ferramenta capaz de representar o comportamento térmico de um componente durante a sua confecção por manufatura aditiva para prever e prevenir possíveis distorções ao final do processo. A ferramenta proposta nesse trabalho consiste na modelagem do processo de manufatura aditiva por meio do Método de Elementos Finitos com auxílio do software COMSOL Multiphysics. Tal ferramenta tem como foco a representação do comportamento térmico do empilhamento de cinco cordões de solda por meio das curvas de ciclos térmicos avaliados em três pontos diferentes para quatro condições de soldagem.

O modelo foi desenvolvido a partir de experimentos previamente realizados, onde dados sobre a geometria da poça de fusão e parâmetros de soldagem foram utilizados como dados de entrada do equacionamento aplicado para fonte de calor. Diferentes condições de contorno foram aplicadas para adequar o modelo ao comportamento que foi observado durante os experimentos. Vale ressaltar que o modelo foi desenvolvido com o software COMSOL Multiphysics. A validação desse modelo se faz importante, pois servirá como base para pesquisas futuras sobre distorções e tensões residuais na confecção de componentes mecânicos pelo processo de manufatura aditiva.

2. OBJETIVOS

Esse trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um modelo de elementos finitos para manufatura aditiva por soldagem à arco elétrico utilizando o modelo de fonte de calor de Goldak [Goldak e Akhlaghi, 2005]. Tal modelo de elementos finitos deve representar com acurácia o comportamento térmico do empilhamento de cinco cordões solda sobre uma chapa de aço.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O processo de manufatura aditiva por soldagem à arco é caracterizado pelo empilhamento de cordões de solda depositados sequencialmente, criando uma geometria final. Esse procedimento possibilita a obtenção de componentes com geometrias complexas que seriam de difícil confecção por processos de fabricação tradicionais. O processo de manufatura aditiva pode ser totalmente automatizado, permitindo uma conexão direta entre o desenho 3D da geometria concebido em software CAD e a fabricação da mesma. Além disso, tal processo viabiliza economicamente a utilização de ligas metálicas de alto custo, como ligas de titânio e níquel, para fabricação de componentes com finalidades específicas [Ding et al., 2015]. A Figura 3.1 ilustra um empilhamento de cordões feito por manufatura aditiva por soldagem à arco.



Figura 3.1 – Empilhamento de cordões feito por manufatura aditiva por soldagem à arco.

Mesmo apresentando vantagens atrativas para a indústria, o processo de manufatura aditiva por soldagem à arco possui alguns obstáculos a serem superados. Devido à aplicação de uma grande quantidade de calor a cada cordão depositado no componente, tensões residuais e distorções podem surgir ao longo do processo. Isso dificultaria, por exemplo, um processo subsequente de usinagem no componente necessário para que o mesmo atinja seus requisitos de uso. Montevecchi et al., 2016, analisaram o comportamento da força de corte de usinagem da liga AISI H13 depositada por manufatura aditiva por soldagem a arco elétrico. Os resultados obtidos nesse trabalho indicam uma redução na usinabilidade da liga, visto que os valores da força de usinagem eram superiores àqueles para a usinagem dessa mesma liga forjada. Outro aspecto previamente analisado foi a metodologia utilizada para deposição e empilhamento de cordões. Venturini et al., 2016, analisaram e otimizaram o padrão escolhido para deposição e empilhamento de cordões em perfis “T” visando a redução de tensões residuais e distorções e controle da altura dos cordões depositados. A otimização do padrão de deposição foi atingida, garantindo estabilidade do arco elétrico e crescimento regular da parede de cordões.

O tempo de espera entre uma deposição e outra no processo de manufatura aditiva por soldagem à arco foi analisado por Montevecchi et al., 2018. Nesse estudo, o objetivo foi a busca por tempos de espera entre deposições subseqüentes que garantissem uma temperatura de interpasse constante sem que houvesse o colapso da parede previamente depositada. O Método de Elementos Finitos foi utilizado como ferramenta de auxílio na determinação dos tempos de espera entre as deposições através da solução das equações de transferência de calor. Em seguida, o modelo de elementos finitos desenvolvido foi validado através de experimento prático. A parede de cordões empilhados ao final do experimento se mostrou estável, confirmando a validade da metodologia utilizada para determinação dos tempos de espera entre deposições subseqüentes. Montevecchi et al., 2016, desenvolveu um modelo de elementos finitos para o processo de manufatura aditiva por soldagem à arco elétrico. Nesse estudo, uma formulação matemática de fonte de calor que leva em consideração a divisão de energia de soldagem depositada entre material de adição e metal base foi utilizada. A nova formulação de fonte de calor é baseada na formulação da fonte de calor de Goldak [Goldak e Akhlaghi, 2005]. O modelo desenvolvido foi validado através de experimentos no qual distorções foram observadas e comparadas com aquelas apresentadas pelo próprio modelo de elementos finitos.

A formulação do modelo de Goldak, também conhecida como modelo de duplo elipsóide, para fonte de calor é baseada na distribuição da densidade de potência de soldagem entre dois elipsóides, sendo um frontal e um traseiro. A Figura 3.2 ilustra o formato do duplo elipsóide juntamente com seus parâmetros geométricos. As equações 3.1 e 3.2 mostram as densidades de potência aplicadas no elipsóide frontal e traseiro respectivamente [Goldak e Akhlaghi, 2005].

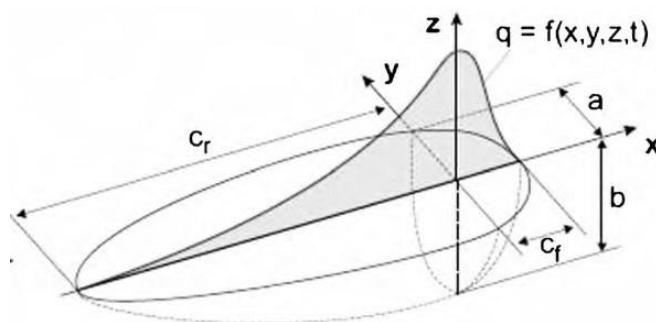


Figura 3.2 – Formato do duplo elipsóide e seus parâmetros geométricos.

$$f_1(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{abc_f\pi\sqrt{\pi}} e^{-3\left[\frac{(x-x_{00})^2}{c_r^2} + \frac{(y-y_0)^2}{a^2} + \frac{(z-z_0)^2}{b^2}\right]} \quad (3.1)$$

$$f_2(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{abc_r\pi\sqrt{\pi}} e^{-3\left[\frac{(x-x_{00})^2}{c_r^2} + \frac{(y-y_0)^2}{a^2} + \frac{(z-z_0)^2}{b^2}\right]} \quad (3.2)$$

Onde Q é a energia de soldagem considerando o rendimento térmico do processo, f_f e f_r são os parâmetros que controlam a distribuição de calor entre os dois elipsóides, a é a penetração da poça de fusão, b é metade da largura da poça de fusão, c_f e c_r são os comprimentos dos elipsoides frontal e traseiro e x_{00} , y_0 e z_0 são coordenadas da posição inicial da poça de fusão [Goldak e Akhlaghi, 2005].

4. METODOLOGIA

A metodologia do trabalho foi dividida em escolha dos materiais, abordagem experimental e abordagem numérica. Os experimentos foram realizados primeiro, depois os modelos foram desenvolvidos de acordo com as condições e resultados observados nos experimentos.

4.1 Materiais

4.1.1 Metal Base

Visando o uso de um material disponível no Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas e de fácil soldabilidade, o aço A36 foi escolhido como metal base. A Tabela 4.1 mostra a composição química do aço A36 [Arcelor Mittal, 2018]. Foram utilizadas 4 chapas de aço A36 com dimensões de 250 mm de comprimento por 150 mm de largura e espessura de 6,35 mm foram utilizadas para a deposição e empilhamento dos cordões. A Figura 4.1 ilustra as dimensões da chapa utilizada para realização dos experimentos bem como uma representação do empilhamento de cordões.

Tabela 4.1 – Composição química do aço A36.

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]
0,26	0,40 máx	0,75	0,04 máx.	0,05 máx.

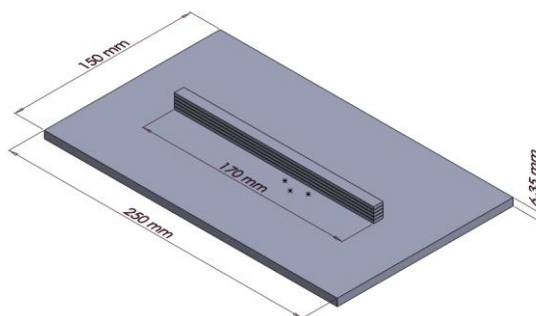


Figura 4.1 - Chapas utilizadas para os experimentos e representação do empilhamento de cordões.

4.1.2 Metal de Adição

Como metal de adição, foi utilizado o arame ER70S-6 com 0,8 mm de diâmetro. A escolha foi baseada na disponibilidade do mesmo e por ser utilizado em larga escala no processo de soldagem MAG. A Tabela 4.2 mostra a composição química do arame ER70S-6 [Arcelor Mittal, 2018].

Tabela 4.2 – Composição química do arame ER70S-6.

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cu [%]
0,06 – 0,15	0,80 – 1,15	1,40 – 1,85	0,025 máx.	0,035 máx.	0,5 0 máx.

4.2 Abordagem Experimental

4.2.1 Instrumentação e Aquisição de Dados

Para análise de ciclo térmico do procedimento de soldagem, termopares tipo K com precisão de $\pm 2,2$ °C [Ecil, 2018] foram soldados na chapa em diferentes posições. A obtenção dos dados provenientes dos termopares ocorreu através de um sistema de aquisição de dados fabricado pela National Instruments. Isso viabilizou o estudo de temperaturas de pico e taxas de resfriamento em diferentes pontos da chapa, permitindo a posterior validação do modelo de elementos finitos. Ao todo foram utilizados 3 diferentes termopares (denominados T1, T2 e T3) em cada chapa e a Figura 4.2 ilustra a posição em que cada um foi fixado em uma vista superior da chapa com representação do empilhamento de cordões. Para a leitura dos valores instantâneos de corrente e tensão foi utilizado o Sistema de Aquisição Portátil SAP 4.01, fornecido pela IMC Soldagem.

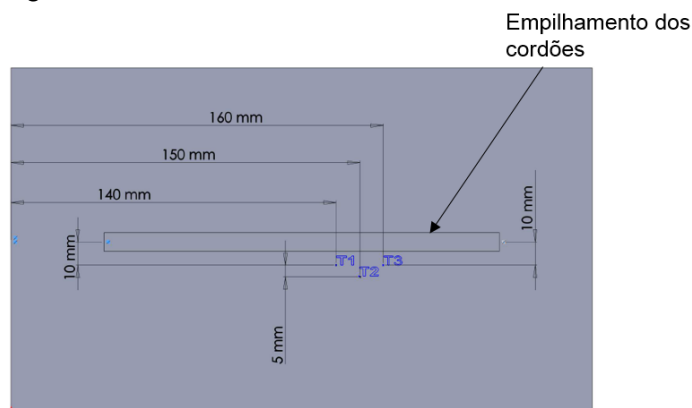


Figura 4.2 – Posição dos termopares T1, T2 e T3 em vista superior da chapa com representação do empilhamento dos cordões.

4.2.2 Processo de Soldagem e Empilhamento de Cordões

Antes de iniciar o processo de soldagem e posterior empilhamento dos cordões, as chapas foram colocadas sobre uma mesa e fixadas com o auxílio de grampos. Ao todo foram utilizados 6 grampos distribuídos igualmente em cada chapa, sendo 3 grampos posicionados à esquerda do local de deposição dos cordões de solda e 3 à direita do mesmo local.

Para o procedimento de soldagem, foi utilizado um sistema robotizado composto por uma fonte TransPuls Synergic 4000 R, fornecido pela Fronius, e o robô MA1400, produzido pela Yaskawa Motoman Robotics. Tal robô foi utilizado na configuração MAG para o empilhamento dos cordões. Foram utilizadas 4 condições diferentes de soldagem (G1, G2, G3 e G4) considerando dois tipos diferentes de transferência de metal de adição e parâmetros de soldagem variados [Machado, 1996]. Cada condição de soldagem foi utilizada para o empilhamento de 5 cordões de solda em uma determinada chapa. Os parâmetros de soldagem utilizados em cada condição foram estimados à partir da técnica de Box-Behnken de projeto de experimento [Montgomery, 2013]. A utilização de quatro condições de soldagem diferentes possibilita a validação e a generalização do modelo numérico de elemento finitos para o processo de manufatura aditiva. A Tabela 4.3 mostra detalhadamente cada condição de soldagem utilizada. Vale ressaltar que W é a velocidade de alimentação do arame de solda, v é a velocidade de soldagem e DBCP é a distância entre o bico da tocha e o corpo de prova.

Tabela 4.3 – Detalhes das condições de soldagem utilizadas nos experimentos.

	G1 - Pulsado	G2 - Pulsado	G3 - Curto-Circuito	G4 - Curto-Circuito
W [m/min]	7,5	7,5	7,5	7,5
v [mm/s]	3	4	3	4
DBCP [mm]	20	18	20	18
Potência [W]	2074	1999	2019	1955
Energia [J/mm]	519	666	673	489
Corrente [A]	74	72	106	108
Tensão [V]	20,5	20,5	18,9	18,4

4.2.3 Análise Macrográfica

Visando o fornecimento de dados da poça de fusão para o modelo matemático de Goldak [Goldak e Akhlaghi, 2005], mais 4 cordões de solda, um referente à cada condição de soldagem utilizada, foram depositados em uma outra chapa. Isso possibilitou o corte da chapa para análise da seção transversal de cada cordão e a medição do comprimento de cada poça de fusão com auxílio de um paquímetro da marca Mitutoyo. A largura e a penetração de cada cordão foram mensuradas com o auxílio do *software* ImageJ após as mesmas serem atacadas quimicamente. A Figura 4.3 ilustra a seção transversal de cada cordão referente à uma condição de soldagem e a Tabela 4.4 mostra os dados da poça de fusão de cada condição de soldagem.

Tabela 4.4 - Parâmetros geométricos da poça de fusão para cada condição de soldagem

Condição de Soldagem	Largura da poça de fusão [mm]	Comprimento da poça de fusão [mm]	Penetração [mm]
G1	7,90	12,0	1,19
G2	7,48	12,0	1,60
G3	5,80	12,0	1,01
G4	6,70	12,0	0,80

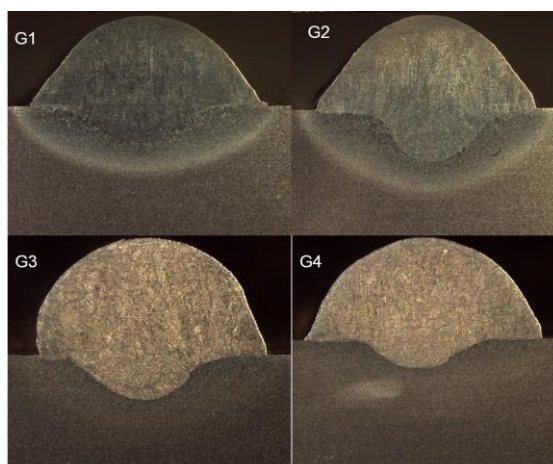


Figura 4.3 – Seção transversal do cordão de solda referente à cada condição de soldagem

4.3 Abordagem Numérica

4.3.1 Modelo Preliminar

Para verificação de convergência de malha e condições de contorno um modelo preliminar foi criado para simplificar a análise e reduzir o tempo de processamento. O modelo preliminar comporta inicialmente apenas um cordão de solda, considerado como já depositado desde o começo dos processos de soldagem, sobre uma chapa com mesma dimensão daquela utilizada no experimento. As propriedades dos materiais aplicados no cordão e na chapa são do aço AISI 1020, pois suas propriedades térmicas se assemelham ao dos materiais utilizados no experimento e porque o material AISI 1020 já estava disponível na biblioteca do software COMSOL [COMSOL, 2016]. Os parâmetros de soldagem e dados de poça de fusão utilizados no modelo preliminar são provenientes da condição experimental G1. A Figura 4.4 ilustra o modelo preliminar. Vale ressaltar que o rendimento térmico do processo de soldagem utilizado foi 0,8, seguindo o que foi analisado por Hackenhaar et al., 2016.

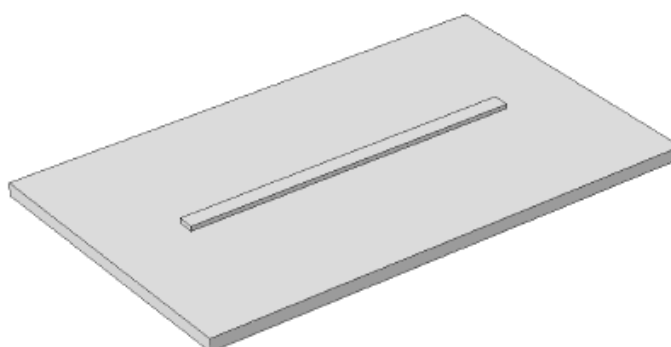


Figura 4.4 – Modelo preliminar

4.3.1.1 Abordagem Inicial e Convergência de Malha

Uma abordagem específica em relação à modelagem de transferência de calor para a verificação de convergência de malha foi adotada. Para possibilitar a transferência de calor no modelo, o módulo de transferência de calor presente no software COMSOL Multiphysics foi utilizado [COMSOL, 2016]. O tipo de análise considerada foi a transiente para viabilizar a modelagem do processo de soldagem. Por ser um modelo preliminar, o mesmo foi considerado

sem perdas para o meio ambiente, sendo sua temperatura inicial igual à 24°C. A formulação da fonte de calor de Goldak [Goldak e Akhlaghi, 2005] foi implementada e aplicada no modelo através da condição de contorno volumétrica *Heat Source*, presente no software COMSOL multiphysics [COMSOL, 2016]. Para a convergência de malha, os parâmetros para comparação utilizados foram temperatura de pico na posição do termopar T1 e tempo de processamento. Ambos os parâmetros foram analisados em função do número de elementos aplicado no modelo. A malha escolhida possuía 27689 elementos 3D tetraédricos com um grau de liberdade e teve um tempo de processamento de 1224 segundos.

4.3.1.2 Condições de Contorno e Tempo de Processamento

Após a escolha da malha a ser utilizada, o próximo passo foi a determinação das condições de contorno que melhor representassem o comportamento observado no experimento. Primeiramente foram consideradas duas situações: apenas convecção (A) e a combinação de convecção e radiação (B) [COMSOL, 2016]. Ambas as situações atuando em toda a chapa e cordão. Vale ressaltar que a temperatura ambiente T_{amb} considerada foi de 24°C e o coeficiente de convecção h considerado foi de 10 W/(m²°C). Esse valor de h foi estipulado considerando a condição de convecção natural durante o processo de soldagem e posterior empilhamento de cordões. A Figura 4.5 ilustra o ciclo térmico obtido para as condições A e B em comparação com o ciclo térmico observado no experimento. Tais curvas são referentes ao termopar T1.

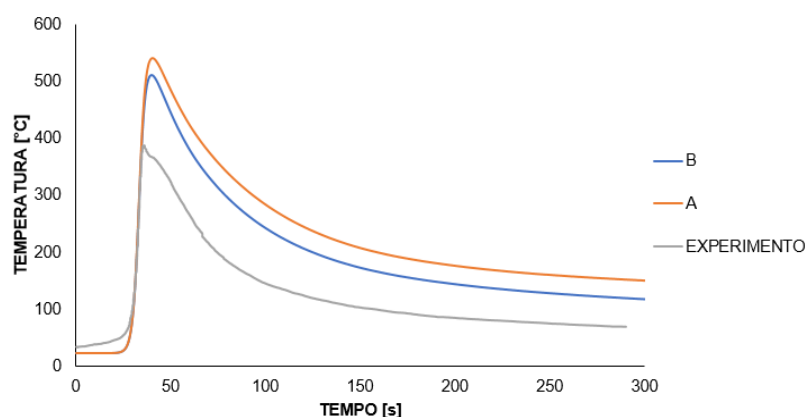


Figura 4.5 – Ciclo térmico para condições A e B em comparação com ciclo térmico obtido no experimento para o termopar T1.

Como pode-se observar na Figura 4.7, a temperatura de pico de ambas as condições de contorno é muito maior com relação ao experimento. Ambas as abordagens se mostraram não adequadas para a representação do comportamento térmico da deposição do primeiro cordão de solda. Sendo assim, uma terceira condição de contorno foi testada no modelo. Tal condição é a modelagem da mesa que apoiava a chapa durante a deposição dos cordões. A mesa tem dimensões de 650 x 313 x 14 mm. Vale ressaltar que a malha utilizada inicialmente na mesa tinha densidade de elementos parecida com aquela utilizada na chapa e cordão.

Visando simplificar o contato mecânico entre a mesa e a chapa, a propriedade *Continuity* foi aplicada nas superfícies em contato. Tal propriedade garante que haja continuidade na transferência de calor entre as superfícies sem a necessidade de modelar o contato termomecânico entre a chapa e a mesa [COMSOL, 2016]. Para contabilizar o efeito de resistência de contato, a condutividade térmica da mesa foi reduzida visando dificultar a extração de calor da chapa por parte da mesa. Vale ressaltar que o material aplicado na mesa também foi o aço 1020 [COMSOL, 2016], porém com uma condutividade térmica de 10 W/(m°C). A Figura 4.6 mostra a comparação dos ciclos térmicos entre dois modelos e o

experimento. Um modelo considerou convecção e condução através da mesa (C) e o outro modelo considerou convecção, radiação e condução através da mesa (D).

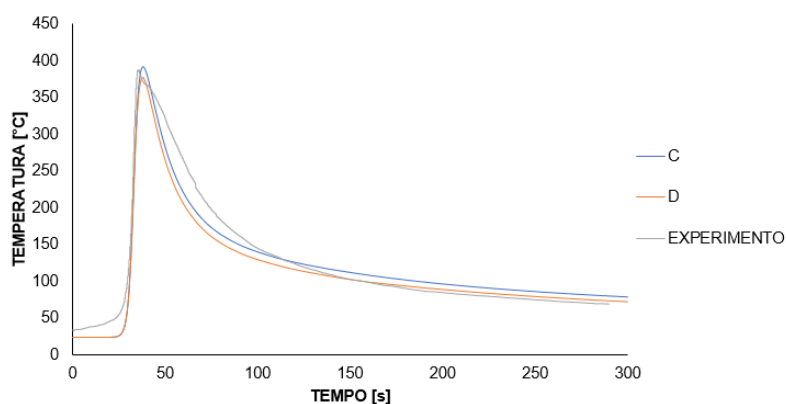


Figura 4.6 - Ciclo térmico para condições C e D em comparação com ciclo térmico obtido no experimento para o termopar T1.

De acordo com a Figura 4.9, as situações C e D se mostraram muito mais representativas ao comportamento observado no experimento. No entanto, o tempo de processamento também deve ser levado em consideração para a escolha adequada do conjunto de condições contorno do problema. A Tabela 4.6 mostra a temperatura de pico encontrada em todas as quatro situações testadas no modelo numérico, bem como sua defasagem em relação à encontrada no experimento e o tempo de processamento dispendido. Vale ressaltar que a temperatura de pico observado no experimento para o termopar T1 foi de 387,41 °C.

Tabela 4.6 – Temperaturas de pico encontradas na posição do termopar T1 para as condições de contorno A, B, C e D, desvio em relação ao experimento e tempo de processamento

Condição	Temperatura de pico [°C]	Desvio em relação ao experimento	Tempo de processamento [s]
A	539,33	39,21 %	571
B	510,95	31,89 %	650
C	391,40	1,03 %	1919
D	376,76	2,75 %	3130

De acordo com a Tabela 4.6, a situação C aplicada ao modelo numérico apresenta um comportamento convergente com aquele observado no experimento e um tempo de processamento menor. Sendo assim, a situação C foi escolhida para a modelagem do processo de manufatura aditiva.

4.3.2 Modelo Base

Um modelo base utilizando o modelo preliminar criado anteriormente foi desenvolvido para a simulação do processo de manufatura aditiva por soldagem à arco. O modelo base passou por um novo procedimento de convergência de malha e posterior implementação de um método para ativação de cordões.

4.3.2.1 Nova Convergência de Malha

Como houve a Acréscimo da mesa para melhor representação do experimento, ocorreu uma alteração no volume total da geometria do modelo. Sendo assim, visando a otimização de tempo e qualidade de resultado, uma nova convergência de malha foi feita considerando a mesa. A nova convergência de malha é análoga à convergência feita antes, levando em consideração a temperatura de pico avaliada no termopar T1 e o tempo de processamento em relação ao número de elementos. A malha escolhida possuía 38331 elementos 3D tetraédricos com um grau de liberdade e teve um tempo de processamento de 1839 segundos.

4.3.2.2 Modelagem de Empilhamento de Cordões

O modelo preliminar representa a deposição do primeiro cordão de solda, com o cordão inteiro ativo numericamente desde o início da aplicação da poça de fusão. A mesma abordagem não é fisicamente representativa se for considerado vários cordões ativos e empilhados desde a primeira aplicação da poça de fusão (representando a deposição do primeiro cordão). Isso é inválido, pois os cordões que seriam posteriormente depositados extrairiam muito calor da poça de fusão referente ao cordão que estaria sendo depositado naquele momento. Portanto, uma ativação sequencial de cada cordão foi feita para impossibilitar a transferência de calor através da interface entre dois cordões.

Inicialmente todos os cordões são desenhados e discretizados de acordo com o estudo de convergência de malha previamente realizado. Em seguida, a propriedade *Continuity* [COMSOL, 2016], a mesma utilizada para garantir continuidade do campo de temperatura entre a mesa e a chapa, foi aplicada nas interfaces entre os cordões. Essa propriedade funciona como uma chave de ativação para condução de calor através de uma interface. Se essa propriedade não está ativa em determinado momento da simulação, não há transferência de calor por condução através da interface. Sendo assim, essa propriedade é ativada apenas na interface entre um cordão já depositado e o que irá ser depositado logo em seguida. Os outros cordões que serão “depositados” posteriormente permanecem isolados pela não ativação da propriedade *Continuity* – continuam com a temperatura inicial (temperatura ambiente) previamente determinada. Vale lembrar que o empilhamento de cinco cordões de solda foi simulado. A Figura 4.7 mostra o campo de temperatura em diferentes momentos de aplicação da fonte de calor (deposição do primeiro e do último cordão) para ilustrar o funcionamento da ativação de condução de calor entre os cordões.

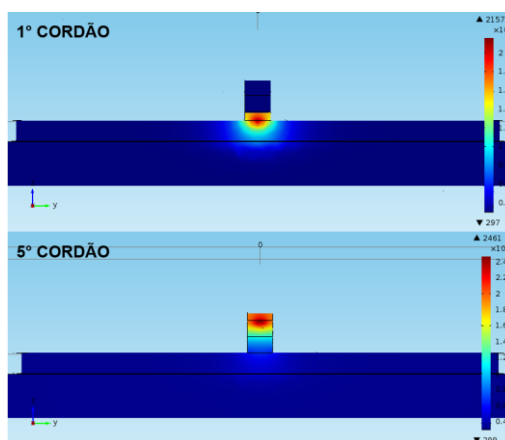


Figura 4.7 – Campo de temperaturas ilustrando a transferência de calor ao longo das interfaces entre os cordões durante a passagem da poça de fusão referente a deposição do primeiro e último cordão de solda.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Validação do Modelo

O conjunto de parâmetros de soldagem G1 foi utilizado para a validação do modelo numérico. A Figura 5.1 ilustra a comparação entre os ciclos térmicos referentes ao empilhamento de cinco cordões de solda obtidos do modelo numérico e do experimento na posição do termopar T1.

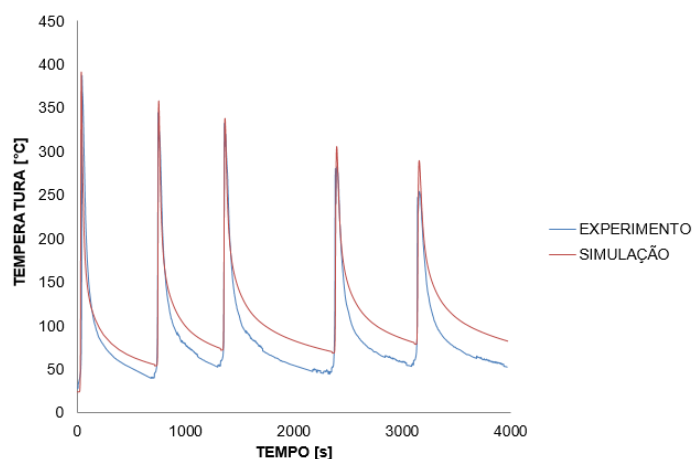


Figura 5.1 – Comparação entre ciclos térmicos do experimento e da simulação para a condição de soldagem G1 no termopar T1.

De acordo com a Figura 5.1, o comportamento apresentado pelo modelo numérico é convergente com aquele apresentado pelo experimento. É possível observar o paralelismo entre as curvas durante o processo de deposição, indicando uma taxa de resfriamento similar nas duas situações. Vale ressaltar, no entanto, que o experimento apresentou uma extração de calor mais acentuada logo após atingir a temperatura de pico. O instante de tempo em que as temperaturas de pico são atingidas em cada passe também são similares, indicando uma modelagem adequada das condições de contorno e material. Por fim, os valores de temperatura de pico são próximos, principalmente nos três primeiros passes. A Tabela 5.1 mostra os valores de temperatura de pico do experimento para os três termopares e a Tabela 5.2 mostra os valores de temperatura de pico do modelo numérico para os três termopares bem como a diferença em porcentagem com relação aos valores encontrados no experimento.

Tabela 5.1 – Valores de temperaturas de pico observadas no experimento para os termopares T1, T2 e T3 para condição G1.

	CORDÃO 1	CORDÃO 2	CORDÃO 3	CORDÃO 4	CORDÃO 5
T1 [°C]	387,45	344,70	332,32	273,25	254,19
T2 [°C]	262,72	249,59	248,16	222,13	211,20
T3 [°C]	360,37	330,69	314,16	288,00	256,31

Tabela 5.2 - Valores de temperaturas de pico observadas na simulação para os termopares T1, T2 e T3 e desvio com relação ao experimento para condição G1.

	CORDÃO 1	CORDÃO 2	CORDÃO 3	CORDÃO 4	CORDÃO 5
T1 [°C]	391,40	358,00	338,07	305,48	289,55
Desvio	1,03 %	3,85 %	1,72 %	11,8 %	13,9%
T2 [°C]	260,11	254,91	253,6	235,46	230,46
Desvio	1,11 %	2,13 %	2,31 %	5,99 %	9,11 %
T3 [°C]	399,72	359,10	338,56	306,32	289,8
Desvio	8,82 %	8,58%	7,60%	6,36 %	13,0 %

De acordo com a Tabela 5.2, as temperaturas de pico nos três termopares para os três primeiros cordões apresentam um desvio de menos de 10% em relação àquelas obtidas no experimento. O termopar T1 apresentou um desvio médio de 2,2% para os três primeiros cordões, enquanto o termopar T2 um desvio médio de 1,85% e o termopar T3 de 8,33%. No entanto, as temperaturas de pico observadas na simulação para as deposições 4 e 5 apresentaram desvios médios maiores. Para o termopar T1 um desvio médio de 12,85% foi encontrado, enquanto que para o termopar T2 o desvio médio foi de 7,55% e para o termopar T3 de 9,68%. O aumento no desvio das temperaturas pode ser devido à utilização da formulação de Goldak sem alteração de parâmetros como penetração, largura e comprimento da poça de fusão. Isso resulta na aplicação da mesma quantidade de calor para todos as deposições, resultando em temperaturas mais elevadas do que aquelas observadas no experimento. Tais parâmetros podem mudar à medida que um cordão é depositado sobre o outro, visto que o metal-base não é mais a chapa de material A36 e a condutividade térmica do material depositado previamente é alterada sob a implicação de um novo ciclo térmico (deposição de outro cordão). Portanto, é possível afirmar que houve boa concordância entre o experimento e o modelo numérico desenvolvido para os primeiros três cordões de solda depositados utilizando a condição de soldagem G1.

5.2 Generalização do Modelo

Visando a utilização do modelo para a previsão do comportamento de ciclo térmico pra diferentes situações de soldagem, as condições G2, G3 e G4 também foram simuladas. A Figura 5.2 mostra a comparação entre os ciclos térmicos provenientes do experimento e da simulação para o termopar T1 utilizando a condição de soldagem G2.

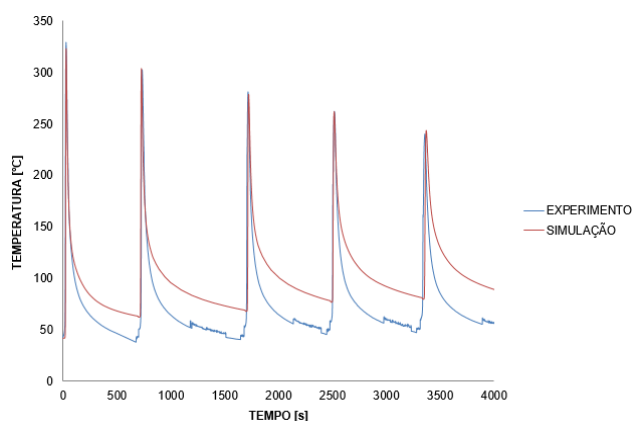


Figura 5.2 - Comparação entre ciclos térmicos do experimento e da simulação para a condição de soldagem G2 no termopar T1.

De acordo com a Figura 5.2, se nota que para a condição G2 também há o paralelismo entre as curvas, sugerindo taxas de resfriamento similares para o experimento e para o modelo

numérico. No entanto, assim como observado para a condição de soldagem G1, o experimento apresentou uma extração de calor mais acentuada logo após atingir a temperatura de pico referente à cada deposição. Em seguida, as taxas de resfriamento se tornam similares como supracitado. As temperaturas de pico referentes à cada deposição também se mostraram similares. A Tabela 5.3 mostra os valores da temperatura de pico observadas no experimento e a Tabela 5.4 apresenta os valores de temperatura de pico obtidos na simulação bem como o desvio em relação ao que foi encontrado no experimento.

Tabela 5.3 - Valores de temperaturas de pico observadas no experimento para os termopares T1, T2 e T3 para condição G2.

	CORDÃO 1	CORDÃO 2	CORDÃO 3	CORDÃO 4	CORDÃO 5
T1 [°C]	329,05	302,41	281,06	262,05	240,19
T2 [°C]	243,33	236,36	224,08	215,59	201,44
T3 [°C]	326,10	301,08	277,17	259,21	237,57

Tabela 5.4 - Valores de temperaturas de pico observadas na simulação para os termopares T1, T2 e T3 e desvio com relação ao experimento para condição G2.

	CORDÃO 1	CORDÃO 2	CORDÃO 3	CORDÃO 4	CORDÃO 5
T1 [°C]	322,99	303,71	278,59	261,90	243,59
Desvio	1,87 %	0,43 %	0,88 %	0,01 %	1,4 %
T2 [°C]	218,26	218,85	210,04	205,19	196,55
Desvio	11,48 %	8,00%	6,68 %	5,06 %	2,49 %
T3 [°C]	329,83	304,79	279,36	262,14	243,85
Desvio	1,13 %	1,22 %	0,79 %	1,12 %	2,58 %

De acordo com a Tabela 5.4, os valores de temperatura de pico para os termopares T1 e T3 ficaram próximos daqueles observados no experimento. Os valores do termopar T1 apresentaram um desvio médio de 0,92% e os valores do termopar T3 um desvio médio de 1,37% considerando a deposição dos 5 cordões. Tais valores de desvio médio sugerem que o modelo se adequou melhor para a condição G2, mesmo utilizando valores constantes de penetração, largura e comprimento da poça de fusão. Os parâmetros de soldagem utilizados na condição G2 podem ter causado menor variação da geometria da poça de fusão na deposição dos 5 primeiros cordões de solda. Com relação ao termopar T2, as temperaturas apresentaram um desvio médio de 6,74 %, aproximadamente 6 vezes maior que aquele apresentado nos termopares T1 e T3. Essa discrepância pode ser derivada de um posicionamento do termopar T2 mais próximo do local de deposição, visto que todas as temperaturas experimentais são superiores àquelas observadas na simulação.

Vale ressaltar que as condições de soldagem G1 e G2 eram processos MAG com transferência de material por corrente pulsada. As condições G3 e G4 são processos MAG com transferência de material por curto circuito. A Figura 5.3 mostra as comparações de ciclo térmico entre o experimento e a simulação na posição do termopar T1 para as condições G3 e G4.

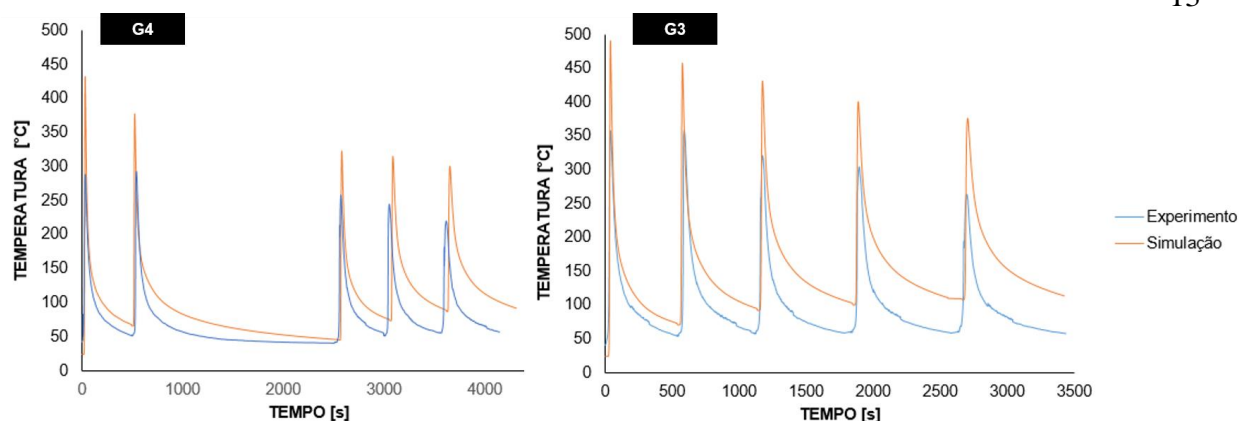


Figura 5.3 - Comparação entre ciclos térmicos do experimento e da simulação para a condição de soldagem G4 e G3 no termopar T1.

De acordo com as Figuras 5.3 e 5.4, as curvas de ciclos térmicos experimentais e simulados das condições G3 e G4 apresentam certo paralelismo. Tal fato sugere taxas de resfriamento similares em ambas as condições de soldagem. No entanto os valores de temperatura de pico apresentam grande discrepância. As Tabelas 5.5 e 5.6 mostram os valores de temperatura de pico observados no experimento utilizando as condições G3 e G4 e as Tabelas 5.7 e 5.8 mostram os valores de temperatura pico observados nas simulações das respectivas condições.

Tabela 5.5 – Valores de temperaturas de pico observadas no experimento para os termopares T1, T2 e T3 para condição G3.

	CORDÃO 1	CORDÃO 2	CORDÃO 3	CORDÃO 4	CORDÃO 5
T1 [°C]	357,92	358,496	320,875	304,597	264,053
T2 [°C]	278,740	277,042	264,677	246,178	226,984
T3 [°C]	370,444	353,894	323,484	290,809	270,226

Tabela 5.6 – Valores de temperaturas de pico observadas no experimento para os termopares T1, T2 e T3 para condição G4.

	CORDÃO 1	CORDÃO 2	CORDÃO 3	CORDÃO 4	CORDÃO 5
T1 [°C]	292,50	288,26	257,68	244,46	219,98
T2 [°C]	247,06	242,59	221,11	211,49	201,79
T3 [°C]	296,46	257,75	254,15	243,83	221,98

Tabela 5.7 - Valores de temperaturas de pico observadas na simulação para os termopares T1, T2 e T3 e desvio com relação ao experimento para condição G3.

	CORDÃO 1	CORDÃO 2	CORDÃO 3	CORDÃO 4	CORDÃO 5
T1 [°C]	490,89	457,88	431,33	400,88	376,16
Desvio	32,34 %	21,7 %	25,6 %	24,0 %	29,8%
T2 [°C]	326,90	327,62	324,47	312,14	301,26
Desvio	14,7 %	15,4 %	18,4 %	21,1 %	24,7 %
T3 [°C]	504,44	459,09	431,45	400,96	376,10
Desvio	26,4 %	22,9 %	25,0 %	27,5 %	28,2 %

Tabela 5.8 - Valores de temperaturas de pico observadas na simulação para os termopares T1, T2 e T3 e desvio com relação ao experimento para condição G4.

	CORDÃO 1	CORDÃO 2	CORDÃO 3	CORDÃO 4	CORDÃO 5
T1 [°C]	432,25	377,79	322,36	314,76	300,28
Desvio	26,1 %	21,7 %	20,07 %	22,34 %	26,75 %
T2 [°C]	281,82	269,02	233,58	241,57	238,62
Desvio	12,34 %	9,83 %	5,34 %	12,46 %	15,44 %
T3 [°C]	429,77	377,84	323,65	314,76	299,44
Desvio	31,02 %	31,79 %	21,48 %	22,54 %	25,87 %

De acordo com as Tabelas 5.7 e 5.8, há uma diferença significativa entre as temperaturas de pico obtidas nos experimentos e simulações de ambas as condições. Essa diferença é presente desde a primeira deposição de cordão e em todos os termopares. Tal fato pode ser explicado pelo fato de a formulação de Goldak considerar a corrente constante durante todo o processo de soldagem. Como para essas duas condições o modo de transferência escolhido foi o curto-circuito, a corrente não é constante durante a deposição do cordão. Sendo assim, seria necessário analisar as curvas de corrente no osciloscópio e inferir um valor de corrente efetivo. Tal valor de corrente efetiva seria menor que aquele que foi determinado na fonte de corrente e posteriormente utilizado na simulação. Ao utilizar um valor de corrente menor na formulação de Goldak, a energia de soldagem aplicada no modelo seria menor e, conseqüentemente, as temperaturas de pico atingidas na posição dos termopares T1, T2 e T3 também seriam menores. Isso aproximaria os valores observados na simulação daqueles obtidos no experimento.

6. CONCLUSÕES

A formulação de Goldak foi utilizada para a modelagem da fonte de calor, pois leva em consideração parâmetros geométricos da poça de fusão e parâmetros de soldagem como tensão, corrente e velocidade de soldagem. Tal formulação se mostrou eficaz para o desenvolvimento e validação do modelo preliminar, que apresentou um desvio de 1,03% na comparação entre temperaturas de pico experimental e simulada, além do comportamento convergente entre ambos os ciclos térmicos. Vale ressaltar que a abordagem escolhida para a modelagem do contato entre a mesa e chapa também se mostrou eficaz, além de ser uma representação mais próxima do experimento. O desenvolvimento do modelo base para manufatura aditiva utilizando a formulação de Goldak obteve resultados satisfatórios para as condições de soldagem G1 e principalmente G2, possibilitando a validação do mesmo. Para a condição G2, por exemplo, o desvio médio dos valores de temperatura de pico na posição do termopar T1 para a deposição dos cinco cordões foi de 0,92%. No caso da condição G1, o desvio médio da temperatura de pico para os três primeiros cordões de solda na posição do termopar T1 foi de 2,2 %. Para os dois cordões restantes na condição G1, o desvio médio para o termopar T1 foi de 12,85%, indicando uma limitação do modelo para um número maior de deposições. Essa limitação pode ser proveniente dos parâmetros geométricos da poça de fusão utilizados na formulação de Goldak. Esses parâmetros foram considerados constantes durante a toda a simulação, enquanto que eles podem ter variado durante o experimento, o que alteraria a energia aplicada sobre o modelo. Um problema similar foi observado para as condições de soldagem G3 e G4. Ao contrário das condições G1 e G2, que tinham modos de transferência de metal pulsado, as condições G3 e G4 tinham modos de transferência de metal por curto-circuito. A corrente elétrica utilizada nesse modo varia durante a deposição de metal e a formulação de Goldak considera a corrente de entrada constante. Isso resultou em uma quantidade de calor aplicada no modelo superior àquela observada na prática, causando temperaturas de pico nos termopares T1, T2 e T3 significativamente mais elevadas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arcelor Mittal, “Guia do Aço”, <http://brasil.arcelormittal.com.br/pdf/quem-somos/guia-aco.pdf>. Acessado em 15/11/2018.

COMSOL Multiphysics, “COMSOL Multiphysics User’s Guide”, <http://people.ee.ethz.ch/~fieldcom/ppscomsol/documents/User%20Guide/COMSOLMultiphysicsUsersGuide.pdf>. Acessado em 15/11/2018.

Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H. “Wire-Feed Additive Manufacturing of Metal Components: Technologies, Developments and Future Interests”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2015, vol. 81, pp 465-481, 2015.

Ecil, “Termopar Tipo K”, <http://www.ecil.com.br/temperatura-industrial/termopares/termopar-tipo-k/>. Acessado em 15/11/2018.

Goldak, J. A.; Akhlaghi, M.; “Computational Welding Mechanics”, Springer, 1ª edição, 2005.

Hackenhaar, W., Mazzaferro, J. A. E., Gonzalez, A. R., Machado, I. G. “Influência da Vazão e Geometria da Região de Entrada Sobre a Eficiência Térmica Medida por um Calorímetro de Fluxo Contínuo de Água”, *Soldagem & Inspeção*, vol. 21, pp 269-281, 2016.

Machado, I. G. “Soldagem e Técnicas Conexas: Processos”, Imprensa Livre, 1ª edição, 1996.

Montevecchi, F., Grossi, N., Takagi, H., Scippa, A., Sasahara, H., Campatelli, G. “Cutting forces Analysis in Additive Manufactured AISI H13 Alloy”, *CIRP Conference on High Performance Cutting*, pp 476-479, 2016.

Montevecchi, F., Venturini, G., Grossi, N., Scippa, A., Campatelli, G. “Idle Time selection for Wire-Arc Additive Manufacturing: A Finite Element Based Technique”, *Additive Manufacturing*, vol. 21, pp 479-486, 2018.

Montevecchi, F., Venturini, G., Scippa, A., Campatelli, G. “Finite Element Modelling of Wire-Arc-Additive-Manufacturing Process”, *5th CIRP Global Web Conference Research and Innovation for Future Production*, vol. 55, pp 109-114, 2016.

Montgomery, D. “Design and Analysis of Experiments”, John Willey & Sons, Inc., 8ª edição, 2013.

Venturini, G., Montevecchi, F., Scippa, A., Campatelli, G. “Optimization of WAAM Deposition Patterns for T-Crossing Features”, *5th CIRP Global Web Conference Research and Innovation for Future Production*, pp 95-100, 2016.