

**CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

MATHEUS RODRIGUES CORTEZE

**SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDA POR FRICÇÃO E
MISTURA (FSW) UTILIZANDO O MÉTODO DOS VOLUMES
FINITOS**

São Bernardo do Campo
2021

**CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

MATHEUS RODRIGUES CORTEZE

**SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDA POR FRICÇÃO E
MISTURA (FSW) UTILIZANDO O MÉTODO DOS VOLUMES
FINITOS**

Dissertação apresentada ao Centro
Universitário FEI como parte dos requisitos
necessários para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Mecânica.
Orientado pelo Prof. Dr. Roberto Bortolussi.

São Bernardo do Campo
2021

Corteze, Matheus.

SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDA POR FRICÇÃO E MISTURA (FSW) UTILIZANDO O MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS / Matheus Corteze. São Bernardo do Campo, 2021.
87 p. : il.

Dissertação - Centro Universitário FEI.
Orientador: Prof. Dr. Roberto Bortolussi.

1. FSW. 2. Transferência de Calor. 3. Método dos Volumes Finitos. 4. Alumínio AA7050-T7451. 5. Simcenter STAR-CCM+. I. Bortolussi, Roberto, orient. II. Título.

Elaborada pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da FEI com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Aluno: Matheus Rodrigues Corteze

Matrícula: 218124-6

Título do Trabalho: SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDA POR FRICÇÃO E MISTURA (FSW) UTILIZANDO O MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS..

Área de Concentração: Materiais e Processos

Orientador: Prof. Dr. Roberto Bortolussi

Data da realização da defesa: 15/06/2021

ORIGINAL ASSINADA

Avaliação da Banca Examinadora:

O aluno apresentou o trabalho dentro do tempo determinado, respondeu as perguntas da banca na fase de arguição e demonstrou conhecimento suficiente para obter o título de Mestre em Engenharia Mecânica.

São Bernardo do Campo, 15 / 06 / 2021 .

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Roberto Bortolussi

Ass.: _____

Prof. Dr. Sérgio Delijaicov

Ass.: _____

Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha

Ass.: _____

A Banca Julgadora acima-assinada atribuiu ao aluno o seguinte resultado:

APROVADO

REPROVADO

VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO

APROVO A VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO EM QUE FORAM INCLUÍDAS AS RECOMENDAÇÕES DA BANCA EXAMINADORA

Aprovação do Coordenador do Programa de Pós-graduação

Prof. Dr. Rodrigo Magnabosco

*Dedico esta dissertação aos meus
queridos pais.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, a Nossa Senhora, aos Anjos e aos Santos por tantas bênçãos em minha vida e por me manterem firme na fé.

Agradeço aos meus pais, Roberto Carlos Corteze e Silvia Helena Rodrigues Corteze, por me apoiarem em todas as decisões.

Agradeço, também, aos professores pesquisadores do Centro Universitário FEI, em especial, ao meu orientador Prof. Dr. Roberto Bortolussi por todo ensinamento e pelo suporte durante o Programa de Mestrado.

Agradeço ao IPT, representado por Andre Ferrara Carunchio e Mario Henrique Fernandes Batalha e à Embraer SA, representada por Marcos H. Miyazaki e Felipe Mariano Brandão pelas etapas de desenvolvimento das soldagens.

*“Todos os nossos sonhos podem se realizar,
se tivermos a coragem de persegui-los.”*
Walt Disney

RESUMO

Este trabalho traz a simulação do processo de soldagem FSW para validação de análise computacional de dados. Os processos de soldagem auxiliam na fabricação de qualquer componente, independente do tamanho e tipo de estrutura final. Dentre esses processos, tem-se a Soldagem por Atrito e Mistura Linear, que foi desenvolvida na Inglaterra pelo TWI, em 1991. Esse processo consiste na união de juntas em seu estado sólido, sendo largamente utilizado na indústria aeronáutica, para substituição de rebites da fuselagem. Já que as ligas de alumínio apresentam melhor desempenho para esta indústria, utilizou-se neste trabalho as ligas de alumínio da serie AA7050-T7451, em placas de 8 mm de espessura para realização dos ensaios que serviram de base de dados para preenchimento do software SIMCENTER STAR-CCM+. Na simulação computacional as geometrias foram modeladas e foi criada uma malha numérica, através da análise de volumes finitos, fiel aos modelos físicos do experimento, calibrando o modelo. Com o objetivo de capturar todos os detalhes dimensionais dos componentes utilizou-se malha do tipo poliédrica para as geometrias de análise. Ao final da simulação, foram coletados os dados de temperatura e analisado a discrepância entre os dados experimentais e os computacionais. Os valores encontrados virtualmente para a quantidade de calor gerado e as temperaturas das peças durante o processo de soldagem foram validados e apresentaram uma excelente precisão, já que o erro para os valores obtidos pelo equacionamento é menor que 0,1% quando comparados aos obtidos pela simulação. Portanto, foi possível encontrar uma relação entre as variáveis de processo (rotação e avanço), tendo sua relação equacionada com uma ótima precisão, sendo possível estimar a quantidade de calor gerado para outros valores destes parâmetros de processo sem necessariamente realizar um ensaio físico; permitindo o entendimento dos fenômenos físicos e auxiliando no desenvolvimento de novas tecnologias, identificando, isolando e testando variações virtualmente com baixo custo e tempo, resultando em parâmetros precisos para otimização do processo.

Palavras-chave: FSW; Soldagem; Transferência de Calor; Método dos Volumes Finitos; Alumínio AA7050-T7451; Simcenter STAR-CCM+.

ABSTRACT

This work presents the simulation of the FSW welding process for validation of computational data analysis. Welding processes help in the manufacture of any component, regardless of the size and type of final structure. Among these processes, there is Friction Welding and Linear Mixing, which was developed in England by TWI, in 1991. This process consists of joining joints in their solid state, being widely used in the aeronautical industry, to replace rivets in the fuselage. Since aluminum alloys present the best performance for this industry, the aluminum alloys of the AA7050-T7451 series were used in this work, in 8 mm thick plates to carry out the tests that served as a database for filling the SIMCENTER software STAR-CCM+. In the computational simulation, the geometries were modeled and a numerical mesh was created, through the analysis of finite volumes, faithful to the physical models of the experiment, calibrating the model. In order to capture all the dimensional details of the components, a polyhedral mesh was used for the analysis geometries. At the end of the simulation, temperature data were collected and the discrepancy between experimental and computational data was analyzed. The values virtually found for the amount of heat generated and the temperatures of the parts during the welding process were validated and presented excellent accuracy, since the error for the values obtained by the equation is less than 0.1% when compared to those obtained by the simulation. Therefore, it was possible to find a relationship between the process variables (rotation and feed), having its relationship equated with great precision, being possible to estimate the amount of heat generated for other values of these process parameters without necessarily performing a physical test; allowing the understanding of physical phenomena and assisting in the development of new technologies, identifying, isolating and testing variations virtually with low cost and time, resulting in precise parameters for process optimization.

Keywords: FSW; Welding; Heat transfer; Finite Volume Method; AA7050-T7451 Aluminum; Simcenter STAR-CCM+.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema ilustrativo FSW	20
Figura 2 – Etapas da soldagem FSW.....	21
Figura 3 – Regiões afetadas pela soldagem	22
Figura 4 – Geometria da ferramenta para FSW.....	25
Figura 5 – Modelo de ombro côncavo	26
Figura 6 – Defeito “ <i>OnionRings</i> ” com velocidade de avanço de 50mm/min.....	29
Figura 7 – Rebarbas resultantes do FSW	30
Figura 8 – Defeito de Tunelamento e “ <i>Kissing bond</i> ”	31
Figura 9 – Defeito na raiz da solda	31
Figura 10– Gráfico comparativo das densidades dos materiais.	35
Figura 11 – Gráfico da resistência mecânica versus alongamento máximo para as ligas de alumínio soldadas e ensaiadas.	39
Figura 12 – Representação do volume de controle	41
Figura 13 – Gráfico da distância da linha de solda versus temperatura atingida para placa de AL6061-T6	43
Figura 14 – Gráfico da distância da linha de solda versus temperatura atingida para placa de AA5083-H18	43
Figura 15 – Gráfico da distância da linha de solda versus temperatura atingida para placa de AL6066-T6	44
Figura 16 – Gráfico da distância da linha de solda versus temperatura atingida para placa de AA5083-H18	45
Figura 17 — Distribuição da temperatura na superfície do material para uma velocidade de translação de 3mm/s e para velocidade de rotação de 1000rpm após 35°	46
Figura 18 — Gráfico da distribuição da pressão média em função da posição da ferramenta para modelo de fluxo de fase simples e para o de duas fases.....	46
Figura 19 – Modelagem da junta soldada e condições de contorno	47
Figura 20 — Comparação dos resultados experimentais de Peel et al. (2006) e dos computacionais de R. Padmanaban et al. (2014)	48
Figura 21 – Campos de temperatura para V_{av} igual a 20 (a), 40 (b) e 60 (c) mm/min	49
Figura 22 – Campos de temperatura para n igual 900 (a), 1050 (b) e 1200 (c) rpm	50
Figura 23 – Campo de viscosidade para n igual a 900 (a), 1050 (b) e 1200 (c) rpm	51
Figura 24 — Campo de viscosidade pra D_{omb} igual a 15 (a), 17,5 (b) e 20 (c) mm	52

Figura 25 — Campo de viscosidade para V_{av} igual a 20 (a), 40 (b) e 60 (c) mm/min	53
Figura 26 — Equipamento de <i>Friction Stir Welding</i>	55
Figura 27 — Detalhe do cabeçote do equipamento	55
Figura 28 — material de base: Chapas de Liga de Alumínio	56
Figura 29 — Ferramenta	56
Figura 30 — Sensor térmico preso à ferramenta, no equipamento de FWS.....	57
Figura 31 — Sensores térmicos dispostos ao longo da soldagem.....	58
Figura 32 — Instalação dos suportes laterais.....	59
Figura 33 — Instalação do fixador centra.....	59
Figura 34 — Instalação dos termopares.....	60
Figura 35 — Execução da soldagem.....	60
Figura 36 — Verificação visual da solda	61
Figura 37 — Modelagem em 3D do conjunto montado para a análise.....	63
Figura 38 — Posição dos sensores de temperatura.....	64
Figura 39 — Malha gerada para análise.....	65
Figura 40 — Vista em corte da malha nas regiões de maior interesse	66
Figura 41 — Representação do movimento de avanço.....	69
Figura 42 — Média das medições de temperatura do ensaio físico 1	72
Figura 43 — Temperaturas medidas do modelo computacional replicando o ensaio 1.....	73
Figura 44 — Representação em corte central das temperaturas durante o processo FSW	74
Figura 45 — Temperatura dos componentes durante processo de soldagem FSW	74
Figura 46 — Variação de temperatura com o avanço para rotação de 600 rpm.....	76
Figura 47 — Variação de temperatura com o avanço para rotação de 700 rpm.....	77
Figura 48 — Variação de temperatura com o avanço para rotação de 800 rpm.....	77
Figura 49 — Relação entre potência e rotação para diferentes avanços.....	78
Figura 50 — Relação entre potência e avanço para diferentes rotações.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo dos materiais de ferramenta mais utilizados em FSW.....	26
Tabela 2 – Principais elementos da Crosta Terrestre.....	32
Tabela 3 – Propriedades do elemento Alumínio.....	33
Tabela 4 – Consumo de Alumínio no setor de transportes	33
Tabela 5 – Nomenclatura segundo AA e ASTM para ligas de alumínio	34
Tabela 6 - Siglas referentes ao tratamento realizado nas ligas de alumínio	36
Tabela 7 - Subdivisão das ligas temperadas.....	37
Tabela 8 – Comparação entre propriedades mecânicas de algumas ligas de alumínio	38
Tabela 9 - Composição Química da Liga AA7050.....	39
Tabela 10 - Propriedades Mecânicas da Liga AA7050-T7451	39
Tabela 11 - Características do tratamento térmico T7451	40
Tabela 12 - Características da malha computacional.....	66
Tabela 13 - Propriedades dos Materiais.....	67
Tabela 14 - Coeficientes de Convecção.....	68
Tabela 15 - Parâmetros dos Experimentos	69
Tabela 16 - Média das temperaturas na região do meio para o primeiro ensaio.....	71
Tabela 17 - Médias tratadas de temperatura.....	71
Tabela 18 - Calor gerado durante processo de soldagem FSW.....	75
Tabela 19 - Relação entre avanço e os coeficientes angular e linear	79
Tabela 20 - Valores de fonte de calor obtidos pela equação	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA	Aluminum Alloy
AA	Aluminium Association
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APDL	ANSYS Parametric Design Language
ASTM	American Society for Testing and Materials
CFC	Cúbica de Face Centrada
CFD	Computational Fluid Dynamics
FSW	Friction Stir Welding
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ISO	International Organization for Standardization
LE	Limite de Escoamento
LRT	Limite de resistência à tração
SPH	Smoothed Particle Hydrodynamics
TWI	The Welding Institute
ZTA	Zona Termicamente Afetada
ZTMA	Zona Termo Mecanicamente Afetada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 OBJETIVOS	18
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1 PROCESSO DE SOLDA POR FRICÇÃO E MISTURA (FSW).....	19
3.2 FERRAMENTA DE SOLDAGEM	25
3.3 DEFEITOS NA JUNTA SOLDADA	28
3.4 O ALUMÍNIO	32
3.5 LIGAS DE ALUMÍNIO	34
3.5.1 Liga AA7050-T7451	38
3.6 SIMULAÇÃO	40
3.6.1 Os ensaios computacionais	40
3.6.2 Utilização do método CFD para simulação do processo FSW	42
3.6.3 Utilização do Fluent para simulação do processo FSW	45
4 MATERIAIS E MÉTODOS	54
4.1 EQUIPAMENTOS DE SOLDAGEM	54
4.2 PROCESSOS DE SOLDAGEM	57
5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	62
5.1 GEOMETRIA DAS PEÇAS	63
5.2 MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS	64
5.3 METODOLOGIA DE ANALISE	66
5.4 CONDIÇÕES DE SIMULAÇÃO	67
5.4.1 Materiais	67
5.4.2 Troca de Calor	67
5.4.3 Movimentação da ferramenta	68
5.5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	69
5.5.1 Tratamento dos dados de temperatura do ensaio físico	70
5.5.2 Comparação entre temperatura do ensaio real e do modelo numérico virtual	72
5.5.3 Resultado da distribuição de temperatura no componentes	73

5.5.4 Influencia das variaveis de processo na quantidade de calor gerado e nas temperaturas	75
5.5.5 Equacionamento da fonte de calor gerado	77
6 CONCLUSÃO	81
7 TRABALHOS FUTUROS.....	83
REFERENCIAS	84

1 INTRODUÇÃO

Desde os primórdios da civilização, a busca pela obtenção de objetos levou a humanidade a desenvolver técnicas e procedimentos para sua obtenção utilizados até hoje. Seja para extração e exploração de materiais, como para confecção de utensílios. Dentre tantas possibilidades desenvolvidas, a soldagem foi uma dessas técnicas.

Os primeiros exemplos de soldagem ocorreram na Idade do Bronze (de 3.000 a.C. a 1.200 a.C.), com pequenas caixas circulares de ouro, feitas por meio de solda por pressão. Durante a Idade do Ferro, os egípcios e pessoas na região do mediterrâneo oriental aprenderam a soldar os pedaços de ferro juntos. Foram encontradas muitas ferramentas que foram feitas aproximadamente em 1.000 a.C. para essa prática. Porém, somente no século XIX que a soldagem, como se conhece hoje, foi inventada, através da produção de um arco entre dois eletrodos de carbono usando uma bateria. Esse tipo de soldagem é creditada a Sir Humphry Davy . (AVENTA, 2017).

Atualmente, os processos de soldagem aparecem com a função de auxiliar a fabricação de praticamente qualquer componente, independente do tamanho de suas partes ou estrutura final do equipamento.

Dentre tantos processos de solda, temos a Soldagem por Atrito e Mistura Linear ou Friction Stir Welding (FSW), que trata de uma soldagem executada no estado sólido da matéria. Esse tipo de soldagem vem sendo estudado e desenvolvido desde 1991, no The Welding Institute (TWI), na Inglaterra; sendo um processo de solda capaz de ser utilizado em diversos segmentos metalúrgicos.

Nas indústrias aeronáuticas, que têm buscado por diversas tecnologias para reduzir o peso de suas aeronaves, aumentar sua estabilidade e desempenho, e, ainda assim, reduzir seus custos de produção; esse procedimento de solda vem sendo desenvolvido para substituição de rebites de fixação de chapas estruturais, principalmente, da fuselagem.

A grande vantagem desse procedimento de solda em relação aos processos convencionais é a minimização das tensões residuais, melhorando a vida em fadiga do componente (diminuindo a propagação de trincas na estrutura fixada); isso porque, o procedimento convencional traria grande perda das propriedades mecânicas, fratura frágil e formação de oxido de zinco em sua superfície.

Dentre os metais utilizados pela indústria aeronáutica, as ligas de alumínio são as que apresentam melhor desempenho por possuírem baixo ponto de fusão. Essas ligas podem trazer, junto ao alumínio, elementos de liga como cobre, magnésio e silício, modificando as propriedades principais do alumínio, conferindo a ele baixa densidade e elevada resistência. Essas ligas de alumínio, representadas pela series 2XXX e 7XXX, são largamente utilizadas na indústria aeronáutica por apresentarem alta resistência e baixa densidade; além de serem ideais para a utilização na técnica de FSW.

Segundo parâmetros obtidos por Rodrigues (2020), foram utilizadas placas de liga de Alumínio AA7050 – T7451 de 8 milímetros de espessura para os ensaios deste trabalho. Nas réplicas utilizadas para soldagem foram coletados os dados de temperatura que serão comparados através do software comercial SIMCENTER STAR CCM+. Para validação do modelo após os experimentos, foi necessário que o sistema atingisse resultados o mais próximo possível dos valores reais, utilizando-se de dezesseis pontos de captura estrategicamente posicionados para garantir as aferições de temperatura no inicio, no meio e no final do cordão de solda.

Ao final da simulação, foi possível coletar os dados de temperatura e realizar cálculos para verificar a discrepância entre os dados experimentais e os computacionais, uma vez que o foco principal deste trabalho se voltou para a análise dos picos de temperatura atingidos durante o processo de soldagem.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo realizar uma simulação computacional do processo FSW a fim de validar o modelo computacional com os valores de temperatura coletados durante a fase experimental (fases de soldagem).

Será utilizado o Método dos Volumes Finitos com a abordagem CFD para analisar os picos de temperatura nas regiões do início, do meio e do final do cordão de solda e a relação dos parâmetros de processo (rotação e avanço) com a quantidade de calor gerada no processo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O conteúdo desta revisão aborda o processo de soldagem, as ligas de alumínio, os defeitos que podem ocorrer nas juntas e as simulações já realizadas por diferentes métodos computacionais, relatadas em artigos sobre o tema, nas diversas bases de dados existentes.

3.1 PROCESSO DE SOLDA POR FRICÇÃO E MISTURA (FSW)

Segundo RHODES (1997), o processo de soldagem por *Friction Stir Welding (FSW)*, tem como principal objetivo a união das juntas em estado sólido, sendo que, durante a soldagem, a temperatura de trabalho é próxima à temperatura de fusão do material. Essa técnica teve início no ano de 1991, no Reino Unido, por W. M. Thomas e alguns pesquisadores do *The Welding Institute (TWI)*, em Cambridge, pioneiros ao conduzir uma pesquisa envolvendo este processo.

O processo consiste na união em estado sólido de dois corpos utilizando-se de um terceiro corpo como ferramenta de união para as duas superfícies de contato. Este terceiro corpo apresenta-se como uma ferramenta cilíndrica rotativa não consumível constituída de pino e de ombro, que deve ser introduzida na interface dos materiais que serão unidos. O pino deve possuir comprimento ligeiramente menor do que a profundidade de soldagem e seu ombro deve deslizar sobre a superfície de trabalho. Esse corpo avança com velocidade constante, gerando calor entre a ferramenta e o material adjacente às partes a serem unidas, provocando o “amaciamento” da região próxima à ferramenta de FSW, que mistura mecanicamente as duas peças do metal no local da junta; desta forma, os metais são unidos por pressão mecânica. Foi inicialmente utilizada em alumínio e, mais frequentemente, em alumínio extrudado, em estruturas que necessitam de soldagens com resistência elevada sem posterior tratamento térmico da solda (THOMAS et al, 1991)(MISHRA; MA, 2005).

O esquema do processo de soldagem está ilustrado na figura 1.

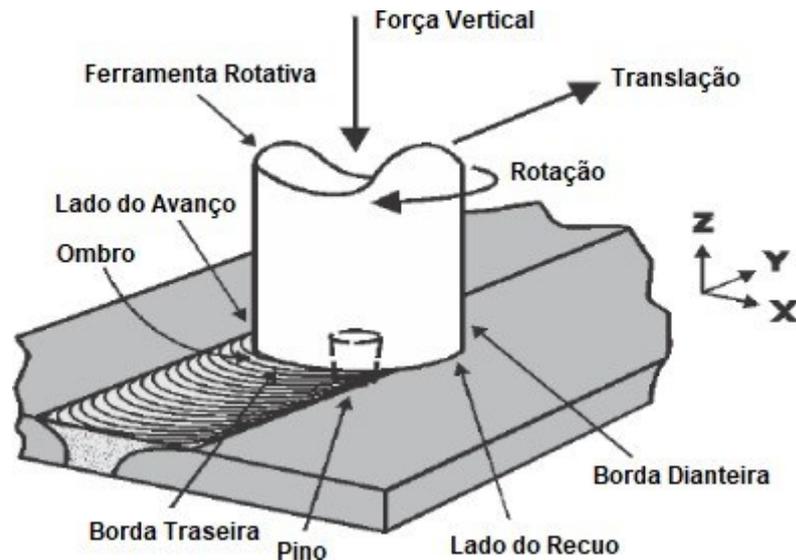


Figura 1 - Esquema ilustrativo FSW
 Fonte: Adaptado de MISHRA, 2018.

O atrito do pino com as chapas gera uma quantidade de calor suficiente para a plastificação do material, que é transportado ao longo do cordão de solda através do movimento de translação da ferramenta. Durante esse movimento, o fluxo de material acontece da borda dianteira para a borda traseira da ferramenta. Para evitar a dissipação do calor gerado, o ombro mantém o material aquecido e confinado, contribuindo para um cordão de solda com boa qualidade. Por ser um processo que não atinge a temperatura de fusão do material, os grãos resultantes são finos e equiaxiais (RHODES et al, 1997).

Especificando esse processo, Padhy (2017) o descreve dividindo-o em quatro etapas, da seguinte forma:

- (A) *Inserção (Plugging)*: a ferramenta é inserida no ponto inicial da linha de solda no material base com velocidade constante e força axial descendente, até o encontro com o ombro da ferramenta, iniciando o processo de deformação;
- (B) *Acomodação (Dwelling)*: a ferramenta é mantida no mesmo ponto de contato durante um tempo de cinco a dez segundos (dependendo do material a ser soldado e sua espessura) para que as ações de rotação e força axial, gerem um calor, através do atrito, suficiente para causar a plastificação do material base. Esse processo garante uma transição suave da ferramenta durante as etapas de soldagem subsequentes;

- (C) Soldagem (*Welding*): sobre a ação de uma força transversal e com um volume de material plastificado sob o ombro da ferramenta, esta se movimenta com velocidade constante ao longo da linha de solda, resultando na união das placas a serem soldadas. O ombro aplica uma força de forjamento ao material plastificado abaixo do pino, preenchendo os espaços deixados pelo movimento de avanço do pino, causando uma mistura do material na forma de difusão atômica, resultando na solda na parte de trás da ferramenta;
- (D) Retrocesso (*Retracting*): quando a ferramenta é removida do material base ao final da solda, é visto um furo de saída na região onde se encontrava o pino.

Esse processo pode ser observado na figura 2:

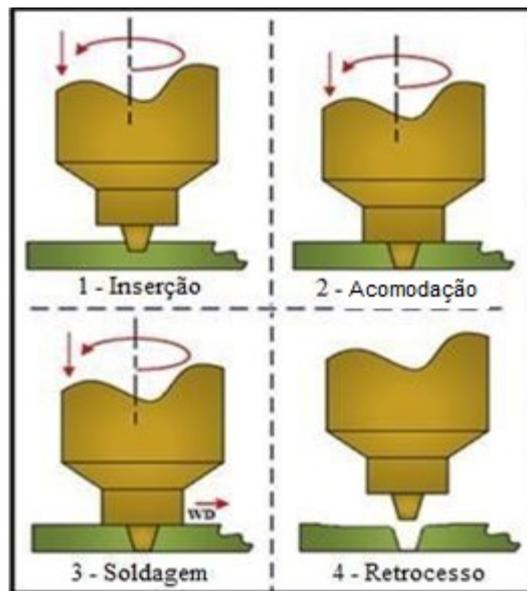


Figura 2: Etapas da soldagem FSW
Fonte: Padhy, 2017

Dentre as inúmeras vantagens do processo FSW, pode-se destacar: (a) evita-se problemas associados ao arrefecimento da fase líquida, por ser um processo de soldagem no estado sólido; (b) a limpeza durante a soldagem, por se tratar de um método sem resíduos e sem respingos, evitando uso de solventes; (c) não produz gases ou radiações perigosas durante o processo; (d) pela estabilidade dimensional e pela repetibilidade; (e) baixa distorção quando comparado ao processo de soldagem por fusão; (f) não há necessidade

de material de adição; (g) microestrutura recristalizada refinada; (h) capacidade de soldar alumínio; e (i) excelente propriedade mecânica na área de junta. (MISHRA; MA, 2005)(PADHY, 2017). Segundo THREADGILL (2007), o método de soldagem, por atrito, reduz as trincas durante a solda e consome menos energia que o processo de soldagem a laser, além de resultar em um produto final mais leve.

Contudo, existem algumas dificuldades no uso dessa técnica que devem ser ressaltadas, como: (a) temperatura de soldagem insuficiente, devido à baixa rotação ou elevada velocidade de avanço, levando a falta de preenchimento na linha de soldagem; (b) existência de um furo ao final do processo por conta da geometria da ferramenta, levando a um defeito de raiz; (c) lugares de difícil acesso, onde apenas o trabalho manual consegue ser realizado, tornando impossível a utilização do FSW, porque este método é totalmente mecanizado, sendo que essas máquinas são robustas e pesadas. Além disso, as peças devem ser fixadas corretamente para que a força aplicada pela ferramenta não movimente as chapas e também não atrapalhe o percurso realizado pela máquina. (THOMAS et al, 1991).

Para que a soldagem por este método seja realizada, as regiões no entorno da peça de solda devem sofrer as influências do processo. Durante a soldagem por atrito, as regiões do material ao entorno da ferramenta sofrem as influências provocadas pelos parâmetros de soldagem. THREADGILL (1999) definiu um modelo que retrata morfologicamente as regiões afetadas pelo calor da soldagem, apresentadas na figura 3.

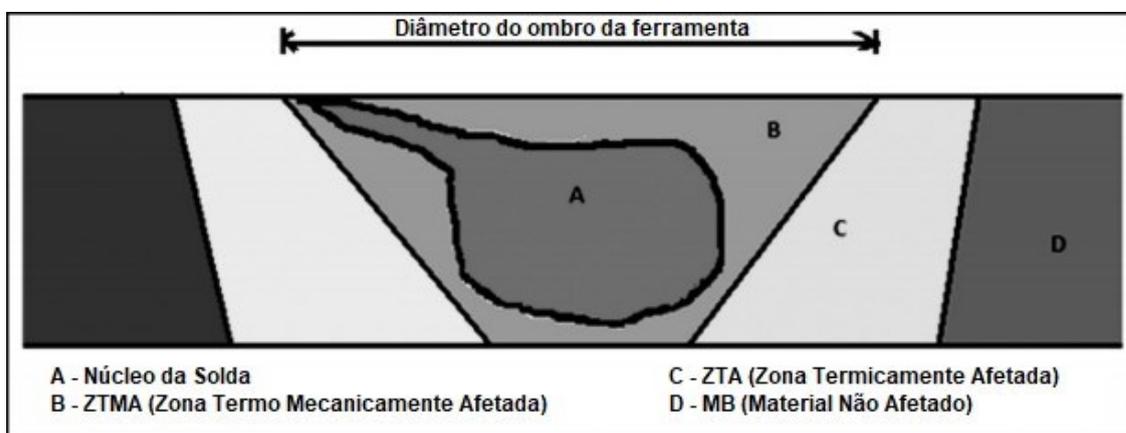


Figura 3: Regiões afetadas pela soldagem
Fonte: Adaptado de PATIL e SOMAN, 2013

- (A) Núcleo da Solda: também chamada de zona de mistura; aproximadamente nesta região localiza-se o pino da ferramenta durante a soldagem, por esta razão, o material é intensamente deformado, apresentando grãos finos, equiaxiais e recristalizados (MISHRA e MAHONEY, 2007).
- (B) Zona Termo Mecanicamente Afetada: região onde o ombro da ferramenta entra em contato com o material, provocando uma deformação rasa e abrangente. A alta temperatura atingida nesta região é responsável por dissolver os precipitados e a deformação mecânica contribui para a orientação dos grãos devido à plasticidade atingida. Por esta razão, há formação de precipitados durante o resfriamento das áreas mais quentes (KRISHNAN, 2002).
- (C) Zona Termicamente Afetada: região afastada do núcleo da solda, porém termicamente afetada, sofrendo alterações em suas propriedades e microestrutura. Nesta região não há deformação plástica do material. O precipitado formado nesta região possui tamanho significativo, oriundo de temperaturas menores que 250°C (JATA et al, 2011), (SU et al, 2003) e (HUNG e SKROTZKI et al, 2002).
- (D) Material Não Afetado: região mais distante do núcleo, cujo material não sofre influências de calor e não é afetado pela soldagem. No entanto, esta região pode sofrer variações, já que a influência de calor depende da geometria da ferramenta, do tipo de junta a ser soldada, do material de base e dos parâmetros de soldagem (THREADGILL, 1999).

Segundo NADAN, DEBROY e BADESHIA (2008), existem algumas variáveis que podem ser controladas ao longo do processo, contribuindo para a otimização e parametrização da soldagem. São elas:

- Rotação da ferramenta;
- Velocidade de avanço;
- Força de forjamento;

- Geometria da ferramenta;
- Penetração da ferramenta;
- Ângulo de inclinação da ferramenta.

A rotação da ferramenta está ligada à geração de calor e à mistura do material de forma diretamente proporcional, ou seja, o aumento da rotação provoca o aumento do atrito entre ferramenta e material de base, atingindo elevadas temperaturas, facilitando a transferência do material plastificado para a região traseira da ferramenta; além de ocasionar a quebra do filme de óxido na superfície do material a ser soldado. (MISHRA, 2005/ MA, 2005).

A velocidade de avanço também contribui para a geração de calor no processo, sendo inversamente proporcionais uma a outra. Portanto, por se tratar da distância percorrida pela ferramenta em um intervalo de tempo, quanto menor for a velocidade, maior será o calor gerado. Deve-se observar que o aspecto visual da solda pode ser afetado caso a velocidade de avanço ultrapasse os limites otimizados para o processo.

CRUZ (2009) concluiu que a força de forjamento se relacionava com o aporte de calor e aos defeitos da junta. Por esta razão, recomenda-se que a máquina utilizada possa controlar e compensar os efeitos dessa força, evitando rebarbas, furos ou soldas rasas.

Segundo ZHU e CHAO (2004), a penetração da ferramenta se refere a quanto o ombro invade o material de base. Esse parâmetro depende da geometria e da dimensão do pino, da espessura da chapa e da inclinação da ferramenta. Quanto mais longo o pino, menor é o contato entre ombro e material, com isso, atingindo menores temperaturas, menores pressões e possíveis soldas com defeito.

O ângulo de inclinação da ferramenta facilita a movimentação do material plastificado da região frontal para a parte traseira do pino. Por conta da alta pressão naquela região, a inclinação auxilia na consolidação do material deformado plasticamente, estando ligado ao acabamento superficial e aparente da solda (CERVEIRA, 2008).

3.2 FERRAMENTA DE SOLDAGEM

A ferramenta de soldagem deve gerar atrito, controlar o fluxo do material e conter o material plastificado (PADHY, 2017). Esta ferramenta utilizada para o processo de soldagem deve ser composta por duas partes: o ombro e o pino.

O pino é responsável por iniciar o aquecimento das chapas durante sua penetração e por misturar o material durante o movimento da ferramenta (DAWES et al, 1995). O diâmetro deste pino deve ser escolhido de acordo com a espessura das placas a serem soldadas (HILLER, 2007).

O ombro, por sua vez, possui diâmetro aproximadamente três vezes maior do que o diâmetro do pino. Tem por função não permitir que o material escape da junta, gerar calor e manter a pressão de consolidação na junta (GENICOLO, 2007). Na figura 4, pode-se observar um modelo ilustrativo da geometria desta ferramenta.

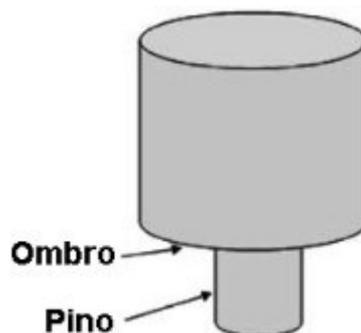


Figura 4: Geometria da ferramenta para FSW
Fonte: Adaptado de Alves Paiva, 2009.

No projeto da ferramenta devem ser levados em consideração os parâmetros de soldagem, o tipo de equipamento utilizado para a soldagem e a junta a ser soldada. (CERVEIRA, 2008). Na tabela a seguir (tabela 1) pode-se observar os materiais mais utilizados para confecção das ferramentas, respeitando o material e a espessura a ser soldada:

Liga	Espessura [mm]	Material da ferramenta
Ligas de alumínio	< 12	Aço ferramenta, WC-Co
	< 26	MP159
Ligas de magnésio Cobre e ligas de cobre	< 6	Aço ferramenta, WC
	< 50	Ligas de níquel, PCBN, ligas de tungstênio
Ligas de titânio	< 11	Aço ferramenta
	< 6	Ligas de tungstênio
Aços inoxidáveis	< 6	PCBN, ligas de tungstênio
Aços baixa liga	< 10	WC, PCBN
Ligas de níquel	< 6	PCBN, ligas de tungstênio

Tabela 1 – Resumo dos materiais de ferramenta mais utilizados em FSW
Fonte: Mishra e Mahoney, 2007

Segundo MISHRA e MAHONEY (2007), o modelo de ferramenta mais utilizado possui ombro côncavo, pino cilíndrico e roscado, além de uma ponta arredondada. Medidas utilizadas devido à facilidade de projeção e fabricação. Na figura 5 pode-se observar um modelo de ombro côncavo.



Figura 5: Modelo de Ombro Côncavo
Fonte: Adaptado de Rosato Júnior, 2003.

Para melhorar a mistura do material durante a soldagem, é necessário um acabamento do ombro mais elaborado, elevando o cisalhamento, deformação e atrito com o material de base. (DAWES e THOMAS, 1999). Como o ombro plano prejudica o acabamento superficial da solda, não costuma ser muito utilizado. Já o ombro côncavo permite a retenção de material plastificado sob ele. Assim como o ombro convexo, o qual é recomendado na soldagem de chapas de espessuras e planicidades diferentes (ZHANG et al, 2012).

Diversos tipos de pinos são projetados com o objetivo de facilitar o fluxo e escoamento do material durante o processo de soldagem (BURFORD, GIMENEZ e BOLDSAIKHAN, 2010). Entre os tipos de pinos projetados, àqueles que possuem extremidade plana necessitam de uma força de forjamento elevada no momento da penetração do pino; já àqueles que possuem pontas arredondadas necessitam de menores forças de forjamento, prolongando a vida da ferramenta; além disso, a ausência de pontos concentradores de tensões corrobora para uma qualidade superior da raiz da solda. Sendo assim, é recomendado que o raio de arredondamento da extremidade seja de 75% do diâmetro do pino (DAWES, 1995) (ZHANG, 2012).

Segundo FONDA, BINGERT e COLLIGAN (2004), os pinos cônicos causam, durante a soldagem, maior deformação plástica, maior geração de calor por atrito e maior pressão hidrostática. Os pinos cilíndricos são ideais para soldar chapas de até 12 mm, necessitando de baixa rotação e baixa velocidade de avanço para evitar a quebra da ferramenta.

Sabe-se, que pinos com acabamento superficial do tipo roscado apresentam qualidade de solda superior quando comparada aos pinos com acabamento superficial do tipo liso. Isso ocorre porque a mistura e o deslocamento do material para a raiz da solda diminuem os vazios formados. Esses pinos são os mais utilizados no processo FSW. (COLEGROVE e SHERCLIFF, 2004).

Para MISHRA e MAHONEY (2007), a ferramenta pode ser composta por diferentes materiais. Porém, entre as propriedades desses materiais, deve-se observar: boa resistência mecânica; estabilidade dimensional; resistência à fluência; boa usinabilidade – para facilitar o processo; baixo custo de aquisição – viabilidade; tenacidade à fratura – para não sofrer danos na penetração do pino no material de base; estabilidade química – não reagir com o material de base; baixo coeficiente de expansão térmica entre pino e ombro; elevado limite de escoamento em compressão em temperaturas elevadas; e boa resistência à fadiga térmica – resistir aos ciclos de aquecimento e resfriamento ao longo do processo.

Segundo ROSATO JÚNIOR (2003), entre os materiais utilizados na fabricação de ferramentas para o processo FSW estão: Ligas de Titânio, Tungstênio, Inconel, Nimonic, PCBN (Nitreto Cúbico de Boro Policristalínico) e aços com revestimento cerâmicos. O aço ferramenta (AISI H13) é um material muito utilizado para a fabricação de ferramentas devido ao seu baixo custo e às boas propriedades mecânicas porque trata-se de um aço com Cromo e Molibdênio tratados termicamente (ZHANG et al., 2012).

Analisando os resultados de FARIAS (2015), a soldagem de ligas de Titânio utilizando ferramentas fabricadas em Ligas de Tungstênio, provoca muito desgaste na ferramenta principalmente na região da ponta da ferramenta o que prejudica o acabamento superficial da solda, bem como, a inclusão de fragmentos na junta soldada.

3.3 DEFEITOS NA JUNTA SOLDADA

Por se tratar de um processo complexo, que envolve deformações plásticas, ao final da soldagem, há a possibilidade de se obter juntas com defeitos e tensões residuais. Os defeitos são oriundos da falta ou do excesso de calor, então, os parâmetros devem ser otimizados para garantir uma junta soldada com qualidade. A rotação e o avanço estão relacionados com as temperaturas máximas atingidas; estas afetam as mudanças microestruturais do material (NADAN, DEBROY e BADESHIA, 2008).

Um exemplo de defeito são os anéis (*onion rings*) (PRADO et al, 2002)(KRISHNAN, 2002). Esse defeito consiste na presença de anéis circulares com bandas claras e escuras, com espaçamento entre elas, correspondente à distância percorrida pela ferramenta durante uma rotação completa. Tal defeito está ilustrado na figura 6.

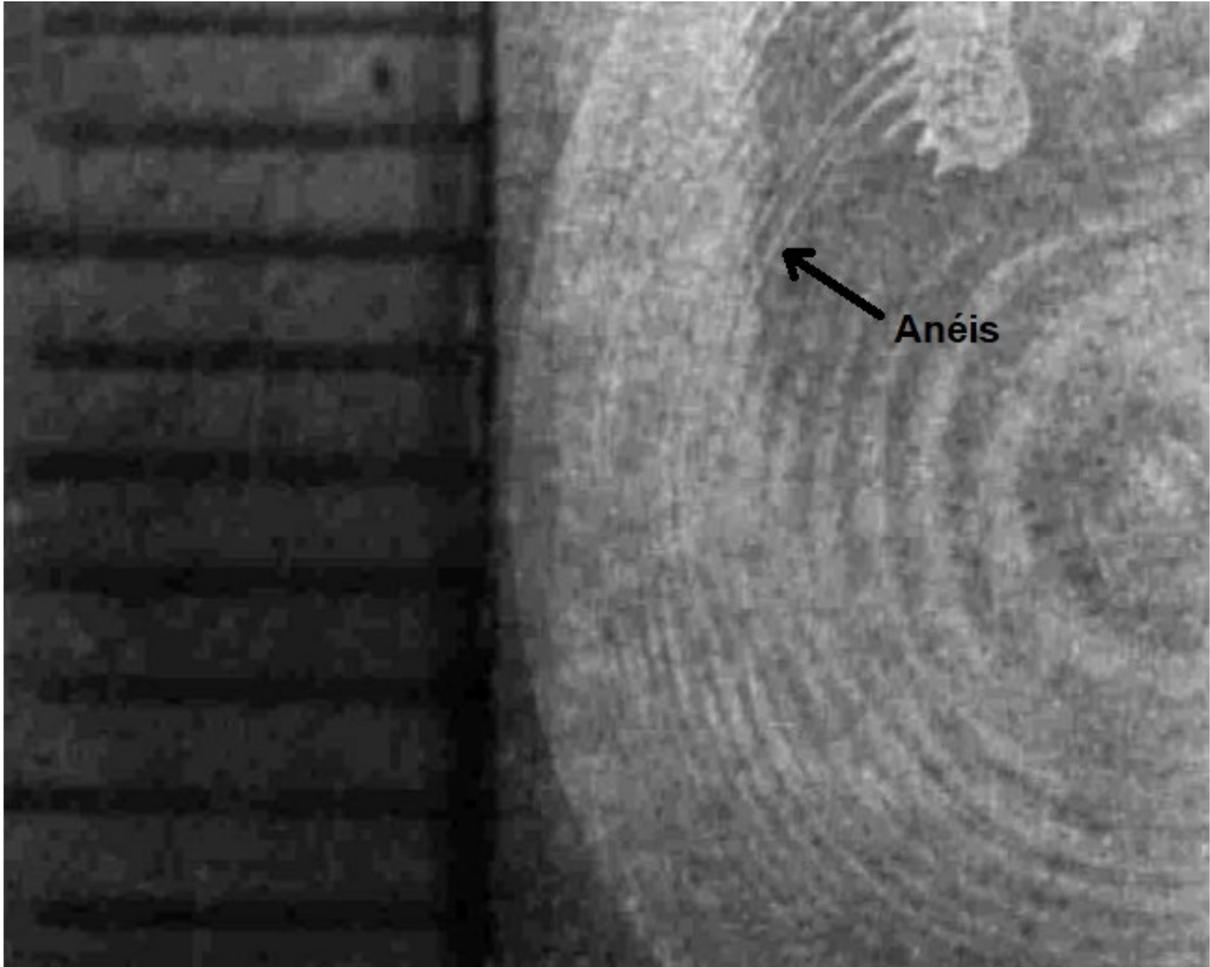


Figura 6: Defeito de anéis (*Onion rings*) observado em velocidade de avanço de 120mm/min e rotação de 400 rpm
Fonte: Adaptado de Krishnan (2001)

Segundo KAH (2015), o excesso de calor na solda pode provocar diferentes tamanhos, formas e densidades de partículas intermetálicas dentro das bandas, provocando uma ligação incompleta entre as camadas, prejudicando a resistência à fadiga quando o núcleo estiver sob carregamento cíclico. As rebarbas são formadas devido à elevada rotação e a grande quantidade de calor confinado, gerando muito atrito entre o ombro da ferramenta e o material de base, além de serem expelidas devido ao excesso de pressão entre a ferramenta e o material (PODRŽAJ, JERMAN e KLOBČAR, 2015), como indicado na figura 7.

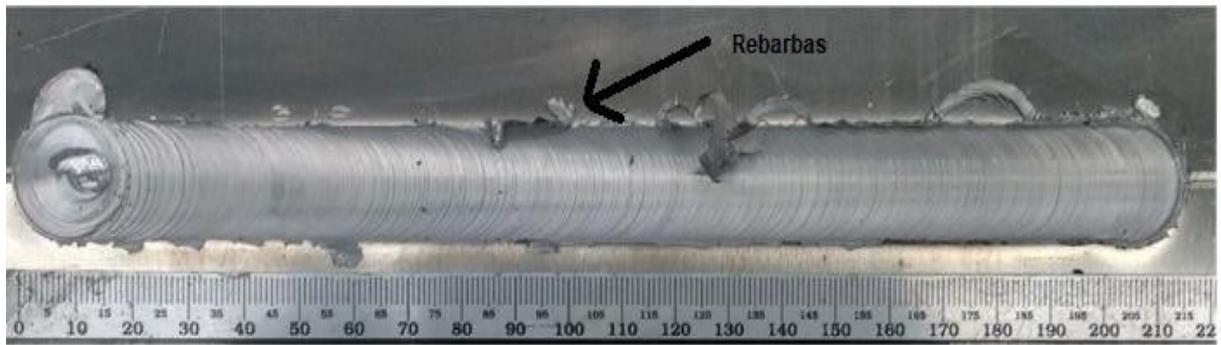


Figura 7: Rebarbas resultantes do FSW
Fonte: Adaptado de Cota e Bracarense (2017)

Outro defeito ocorre pela falta de calor, atrapalhando a movimentação do material plastificado, provocando falhas no preenchimento da cavidade atrás do pino, resultando em formações de vazio. Esse defeito é chamado de tunelamento; é possível observá-lo na Figura 8 (KHAN et al, 2015).

Quando o defeito acontece porque as superfícies das juntas não estão corretamente posicionadas, damos o nome de "*kissing bond*". Nesse caso, o defeito é criado porque não há contato suficiente entre as superfícies para que haja uma ligação atômica (OOSTERKAMP e NORDEIDE, 2004). Essa falha também se encontra representada na Figura 8.

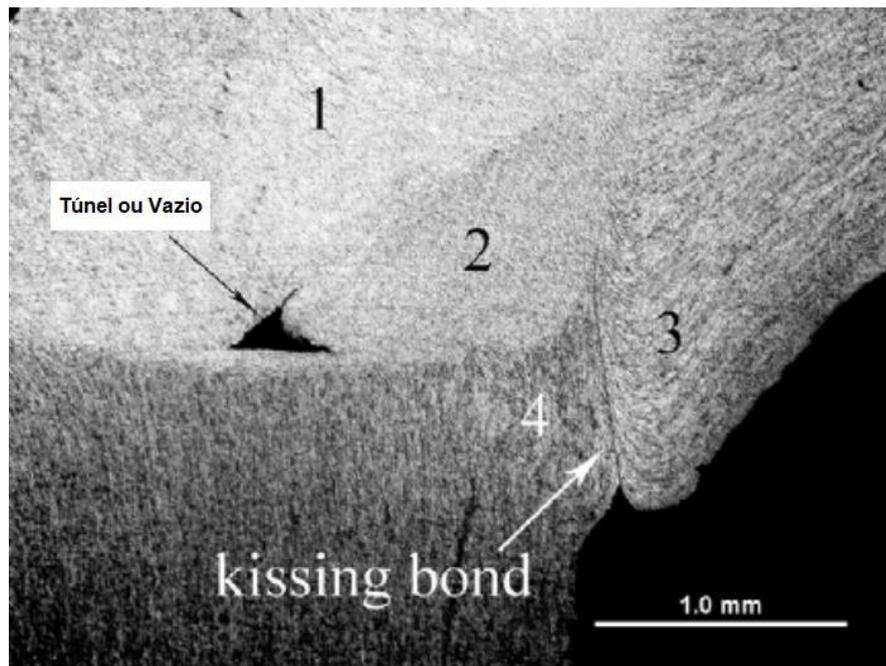


Figura 8: Defeito de Tunelamento e “Kissing bond”
Fonte: Adaptado de Zhikang Shen (2012)

Outro defeito encontrado são aqueles defeitos na raiz da solda (figura 9). Esses defeitos podem ser provocados de duas formas; ou são provocados pela quebra incompleta da camada de óxido presente na superfície do material, ou são causados quando o pino utilizado possui comprimento menor do que o correto. Neste caso, um canal é formado ao longo do cordão de solda (KAH et al., 2015).

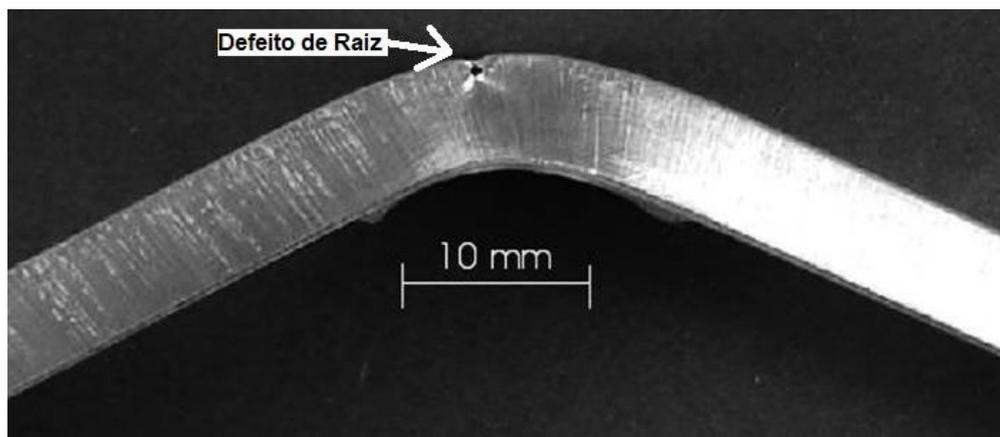


Figura 9: Defeito na raiz da solda
Fonte: Adaptado de Mazzaferro (2009)

3.4 O ALUMÍNIO

O alumínio é um elemento químico sólido e abundante na crosta terrestre (cerca de 8% do total mineral — vide tabela 2), dificilmente encontrado em sua forma pura, geralmente apresentando-se como bauxita e posteriormente transformado em óxido de alumínio, também chamado Alumina (Al_2O_3) através do Processo Bayer. Por fim, o óxido de alumínio é processado e transformado em alumínio metálico através do processo Hall-Héroult. O alumínio é um metal leve, macio e resistente; também é considerado atóxico como metal, não é magnético e não cria faíscas quando em atrito. Ele é muito maleável, muito dúctil, apto para mecanização e fundição; além de possuir excelente resistência a corrosão (tabela de propriedades do elemento alumínio — tabela 3). Em toda faixa de temperatura até o ponto de fusão, o alumínio apresenta estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC).



Tabela 2: Principais elementos da Crosta Terrestre
Fonte: Adaptado de ABAL, 2020

PROPRIEDADES DO ELEMENTO ALUMÍNIO	
Número Atômico	13
Massa Atômica	26,98
Ponto de Fusão	660 °C
Sistema Cristalino	CFC
Densidade	2,7g/cm ³
Módulo de Elasticidade (E)	70 GPa

Tabela 3 – Propriedades do elemento Alumínio

Fonte: Autor

Por possuir características essenciais para estruturas leves (resistências mecânica e à corrosão — baixa densidade), cuja necessidade é suportar altos carregamentos, o alumínio é largamente utilizado em diversos setores da indústria, principalmente nos setores aeronáutico e aeroespacial, fazendo com que a indústria de transporte seja classificada como a maior consumidora de alumínio no mundo. Atualmente, mais de 26% do alumínio produzido no mundo tem a indústria de transportes como destino. Na tabela (Tabela 4) a seguir é possível observar o uso do alumínio no mundo atualmente.



Tabela 4: Consumo de alumínio no setor de transportes.

Fonte: Adaptado de ABAL; IAI; 2020

3.5 LIGAS DE ALUMÍNIO

As ligas de alumínio podem ser classificadas em ligas não tratáveis termicamente e ligas tratáveis termicamente, sendo caracterizadas de acordo com o mecanismo de endurecimento utilizado no processo de fabricação; suas nomenclaturas seguem as normas da *Aluminium Association (AA)* e da *International Organization for Standardization (ISO)*. No Brasil, as nomenclaturas da AA são mais utilizadas. A nomenclatura dada às ligas de alumínio, obtidas através de trabalho mecânico pela Aluminium Association, pode ser observada na tabela 5:

NOMENCLATURA AA E	ASTM PARA LIGAS
Alumínio com mais de 99% de pureza	1XXX
Cobre	2XXX
Manganês	3XXX
Silício	4XXX
Magnésio	5XXX
Magnésio e Silício	6XXX
Zinco	7XXX
Outros Elementos	8XXX

Tabela 5 – Nomenclatura segundo AA e ASTM para ligas de alumínio
Fonte: Adaptado de The Aluminium Association Inc., (2006).

Dentre os processos de fabricação que podem ser aplicados a uma liga de alumínio destacam-se: laminação, extrusão, forjamento ou estiramento. As ligas tratáveis termicamente apresentam ótimas propriedades mecânicas e são obtidas através de tratamentos térmicos específicos. Por outro lado, as ligas não tratáveis termicamente possuem propriedades mecânicas determinadas pelo grau de encruamento, ou seja, de acordo com o trabalho a frio em que elas são submetidas.

As ligas não tratáveis termicamente não possuem ganho de propriedades por partículas de segunda fase associada; estas são as ligas 1XXX, 3XXX e 5XXX. As ligas de alumínio da série 1XXX são mais simples, sendo ligas comerciais de alumínio púras e endurecidas por refinamento micro estruturais. Já as ligas da série

3XXX, apesar de similares à série 1XXX, apresentam manganês em sua composição, deixando o grão mais refinado; porém, ambas apresentam baixa resistência mecânica. As ligas da série 5XXX contêm uma quantidade substancial de magnésio, que age como endurecedor em solução sólida, sendo mais resistentes quando comparadas com as demais ligas não tratáveis termicamente (RODRIGUES, 2020).

As ligas tratáveis termicamente são as séries 2XXX, 6XXX e 7XXX. Os elementos de liga primária para estas três séries são, respectivamente, cobre (2XXX), magnésio e silício (6XXX), e magnésio e zinco (7XXX). Para ganho de resistência máximo, é necessário obter uma distribuição homogênea e muito fina de precipitados da segunda fase (RODRIGUES, 2020).

A figura 10 representa uma comparação entre as densidades dos principais materiais adicionados às Ligas de Alumínio.

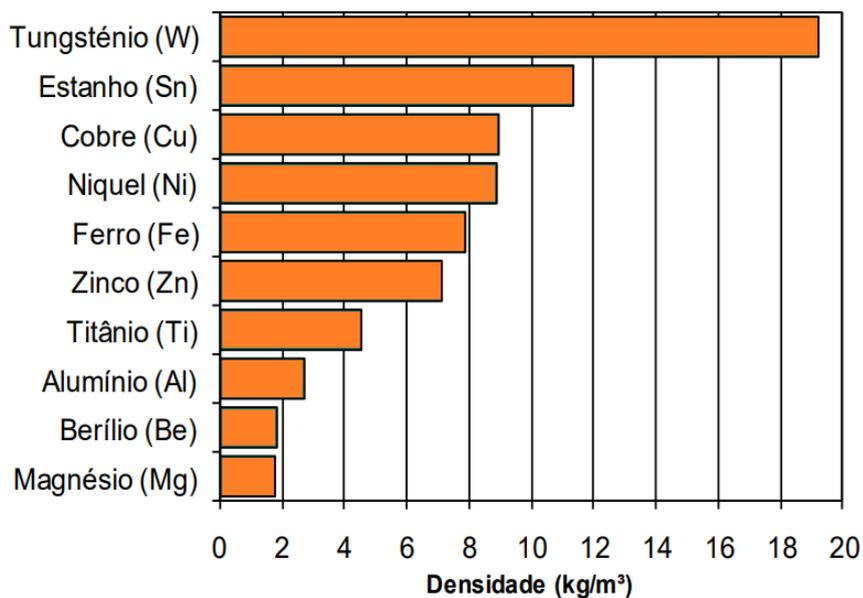


Figura 10 – Gráfico comparativo das densidades dos materiais
Fonte: Adaptado de SCHEID (2010).

A classificação das ligas de alumínio pode ser de acordo com o processamento do material, e, para isso, letras são utilizadas referenciando o tipo de tratamento térmico ou mecânico juntamente com um ou dois dígitos detalhando o tratamento. O primeiro dígito refere-se ao principal elemento de liga, o segundo dígito está ligado aos elementos de liga adicionais, o terceiro e quarto dígitos na série fazem referência ao percentual de alumínio presente na liga. Essa explicação está demonstrada na tabela 6, onde se observam as siglas e os respectivos tratamentos.

Sigla	Tratamento
F	Deformação a frio, a quente ou fundição, onde nenhum controle especial foi empregado sobre as condições térmicas ou endurecimento por deformação
O	Recozimento
H	Endurecimento por deformação
W	Tratamento térmico de solubilização que não estabilizam. Aplicado a ligas que sofrem envelhecimento natural.
T	Tratamento térmico de solubilização. Aplicado a ligas que estabilizam em até algumas semanas por envelhecimento natural ou artificial

Tabela 6 – Siglas referentes ao tratamento realizado nas ligas de alumínio
 Fonte: Adaptado de CAPELARI (2006) apud DAVIS (1990).

Um dos tratamentos ao qual a liga de alumínio é submetida é o processo de têmpera. Quando a liga passa por esse, ela é representada pela sigla T, acrescida de mais um dígito para indicar a subdivisão do tratamento. Como observado na tabela 7.

Subdivisão da Têmpera	Tratamento
T1	Resfriado a partir de uma elevada temperatura do processo de conformação e envelhecido naturalmente para uma condição termodinamicamente estável.
T2	Resfriado a partir de uma elevada temperatura do processo de conformação, trabalhado à frio e envelhecido naturalmente para uma condição termodinamicamente estável.
T3	Solubilizado, trabalhado à frio e envelhecido naturalmente para uma condição termodinamicamente estável.
T4	Solubilizado e envelhecido naturalmente para uma condição termodinamicamente estável.
T5	Resfriado após o processo de fabricação a uma temperatura elevada e envelhecido artificialmente.
T6	Solubilizado e envelhecido artificialmente.
T7	Solubilizado e estabilizado (superenvelhecimento).
T8	Solubilizado, deformado plasticamente a frio e envelhecido artificialmente.
T9	Solubilizado, envelhecido artificialmente e em seguida deformado plasticamente a frio.
T10	Resfriado após o processo de fabricação a uma temperatura elevada, deformado plasticamente a frio e posteriormente envelhecido artificialmente.

Tabela 7 – Subdivisão das ligas temperadas
Fonte: Adaptado de OLIVEIRA, (2011).

Com o objetivo de melhorar as propriedades das ligas, é necessário adotar métodos e procedimentos analisando o comportamento da microestrutura, bem como suas impurezas e concentrações. (DURSUN e SOUTIS, 2014 – SMITH 2003 – CHEN et al, 2013). Na tabela 8 é possível observar as propriedades das principais ligas de alumínio e suas utilizações.

Liga	LRT (MPa)	LE (MPa)	Alongamento em 50mm (%)	Dureza Brinell / Vickers (HB/HV)	Aplicação
1060-O	69	28	43	19 / -	Cabos elétricos
2024-T6	475	395	10	125 / 142	Estruturas aeronáuticas
6061-T6	310	276	12	95 / 107	Estruturas automotivas
6063-T6	241	214	18	73 / 83	Estrutural e arquitetura
6013-T6	359	317	8	130 / 149	Estruturas aeronáuticas e automotivas.
6351-T6	330	310	11	95 / 107	Estruturas automotivas
7075-T6	572	503	11	150 / 175	Estruturas aeronáuticas

Tabela 8: Comparação entre propriedades mecânicas de algumas ligas de alumínio
Fonte: Adaptado de European Aluminium Association

3.5.1 Liga AA7050-T7451

O presente trabalho utilizou-se de uma liga de alumínio da série 7XXX, desta forma, o enfoque será dado às características desse grupo específico.

O zinco é o principal elemento adicionado ao alumínio nas ligas dessa série, no entanto, em alguns casos, é possível conter os elementos cobre e magnésio como elementos secundários. As ligas desse grupo apresentam maior resistência à tração, por outro lado, sua resistência à corrosão é prejudicada devido à presença de outros elementos na liga.

A liga de alumínio da serie 7XXX apresenta maior nível de resistência mecânica quando comparada com outras ligas, por esta razão é a mais utilizada na indústria aeronáutica, são geralmente selecionadas para a fabricação de upper wing skins, stringers e estabilizadores horizontais e verticais, além de serem utilizadas tanto para confecção de componentes estruturais da asa, quanto para fuselagem, por apresentarem um bom balanço entre resistência mecânica, resistência à corrosão e a propagação de trincas (GENICOLO, 2007). Na Figura 11 está representada uma comparação entre as ligas de alumínio, demonstrando uma maior resistência mecânica das ligas da série 7XXX.

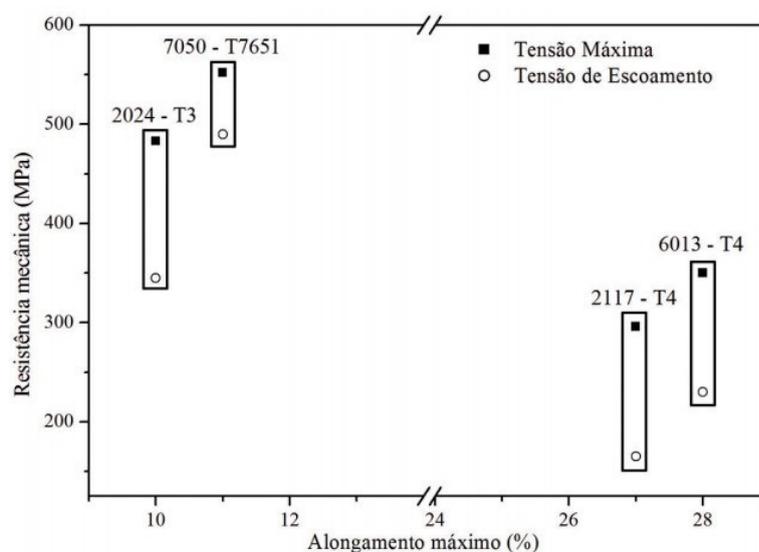


Figura 11 – Gráfico da resistência mecânica versus alongamento máximo para as ligas de alumínio soldadas e ensaiadas.

Fonte: SIQUEIRA, OLIVEIRA, RIVA, ABDALLA e LIMA, (2014).

A liga AA7050-T7451 apresenta em sua composição os elementos silício, ferro, cobre, manganês, magnésio, cromo, zinco, titânio, zircônio e alguns outros. Essa liga possui uma excelente combinação entre resistência mecânica, resistência a corrosão e tenacidade. Alguns fatores que contribuem para a melhoria da tenacidade são: elevado teor de zinco e baixo teor de cobre; volume controlado de partículas intermetálicas grosseiras e estrutura de grão não cristalizado. A composição química da Liga AA7050 e as propriedades mecânicas da Liga AA7050-T7451 estão indicadas nas Tabelas 9 e 10, respectivamente.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr	Outros
0,12	0,15	2,0 - 2,7	0,10	1,9 - 2,6	0,04	5,7 - 6,7	0,06	0,08 - 0,115	0,15

Tabela 9: Composição Química da Liga AA7050.
Fonte: Autor adaptado de PASCOAL JÚNIOR (2014).

Liga	Tensão de Resistência a Tração (MPa)	Tensão de Escoamento (MPa)	Alongamento (%)
AA7050-T7451	510	483	9

Tabela 10: Propriedades Mecânicas da Liga AA7050-T7451.
Fonte: Autor adaptado de PASCOAL JÚNIOR (2014).

As características do tratamento térmico a qual a liga é submetida pode ser encontrado na tabela 11

Tratamento Térmico	Solubilização	Envelhecimento	Tempo na Temperatura
T7451	470 – 480 °C resfriado	1ª) 115 – 125 °C 2ª) 160 – 170 °C	3 a 6 horas 24 a 30 horas

Tabela 11: Características do tratamento térmico T7451
Fonte: Autor adaptado de JACUMASSO (2014).

3.6 OS ENSAIOS COMPUTACIONAIS

É possível modelar e simular as condições dos processos através do uso de diversas ferramentas computacionais, sendo assim, é possível verificar características e comportamentos fundamentais das geometrias e materiais envolvidos nos processos utilizando as metodologias inseridas nos programas de simulação.

3.6.1 Fluidodinâmica Computacional

A técnica do CFD (Computational Fluid Dynamics) é muito aplicada pela comunidade científica e cada vez mais pela indústria para aplicações onde há fenômenos da mecânica dos fluidos e que ocorram transferência de calor, que é o caso deste estudo. O método de solução dos problemas de volumes finitos é realizado através do princípio da conservação de massa, momento e energia aplicados para cada volume de controle. O primeiro ponto da modelagem numérica da física em questão é decompor a geometria em pequenos volumes de controle onde serão calculadas as equações de continuidade.

O conjunto dos volumes de controle que representam a geometria de interesse é chamado de malha. Nos vértices de cada elemento de volume estão localizados os nós da malha, que são os locais para qual serão resolvidas as variáveis de cálculo das equações (Figura 12). Depois da criação e definição da malha, as equações de conservação são resolvidas em sua forma integral para cada um dos volumes de controle criados. As equações então são transformadas para a conversão das integrais de volume em integrais de superfície utilizando o teorema de Gauss.

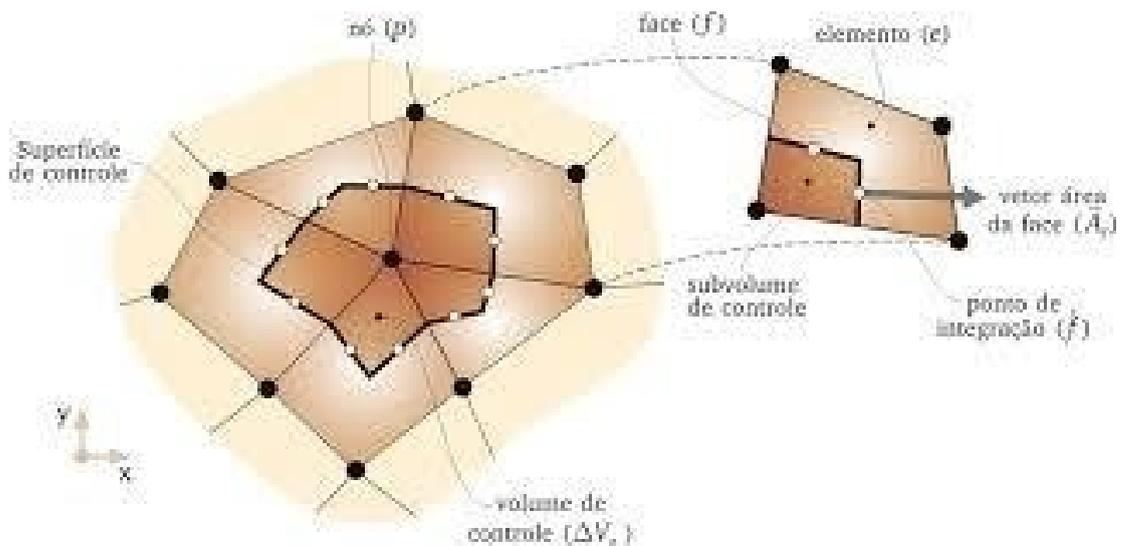


Figura 12: Representação do volume de controle.
Fonte: Research gate

Com estes passos então é possível montar todo o sistema algébrico de equações. Neste processo, as integrais são aproximadas, o volume é simplificado em função das variáveis em cada nó e as superfícies são aproximadas através dos balanços de energia, momento e massa nas faces de cada volume de controle.

Para a resolução dos problemas relacionados ao processo de solda por atrito FSW, após a criação da malha com as geometrias de interesse é resolvido a equação da conservação de energia em um volume de controle. Para isso, é assumido que a energia interna específica do volume de controle é dada em função da densidade e temperatura. A energia interna que é considerada no volume de controle aumenta com o tempo devido a adição desses dois tipos de energia em cada superfície através das seguintes formas possíveis: condução de calor através da superfície; trabalho realizado na superfície; fluido que se move na superfície e por causa do trabalho feito contra forças externas.

A equação 1 representada abaixo é resolvida em cada nó do volume de controle para determinação da conservação de energia em cada volume de controle. O domínio de interesse é sólido, logo, é resolvida a equação de transferência de calor por condução.

$$\nabla^2 T + \frac{\dot{q}_g}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (2)$$

onde:

$\nabla^2 T$ = Laplaciano da Temperatura

\dot{q}_g = Termo fonte de calor

α = Difusividade térmica

ρ = massa específica do sólido

c_p = capacidade calorífica do sólido

k = condutividade térmica do sólido

3.6.2 Utilização do método CFD para simulação do processo FSW

Há vários artigos na literatura que abordam o processo de soldagem FSW através de uma simulação utilizando a dinâmica dos fluidos computacionais, a partir da utilização de diferentes softwares comerciais. A ideia principal dessas simulações é conseguir validar os resultados que foram atingidos na análise experimental.

KANG e JANG (2013) realizaram dois experimentos com dois tipos de placas de alumínio (AL6061-T6 e AA5083-H18). Nesse experimento, mediram a distribuição de temperatura na superfície das placas durante o procedimento e validaram com o método computacional através da simulação CFD. A partir desse experimento, assumiu-se que o Alumínio é um fluido incompressível Não-Newtoniano, por esta razão, utilizaram as equações de conservação de massa, de momento (Navier-Stokes) e de energia (1ª Lei da Termodinâmica). Os campos de temperatura dependem das propriedades do material e da taxa de transferência de calor por condução e por convecção. Em seus estudos, os autores fizeram referência ao trabalho de Murr et al (1998), que concluiu que o tamanho da zona afetada pelo diâmetro de rotação da ferramenta é estreitamente maior que o diâmetro da ferramenta. No que concerne ao ângulo de inclinação da ferramenta, utilizaram variações entre um e dois graus. Os resultados apresentaram melhor concordância

entre experimento e simulação quando os diâmetros afetados pela rotação da ferramenta ficaram em 34 mm e 12 mm; os diâmetros ficaram dois milímetros maior do que o ombro da ferramenta utilizada para o processo e análise experimental. Nas figuras 13 e 14 é possível observar os resultados obtidos experimentalmente e computacionalmente.

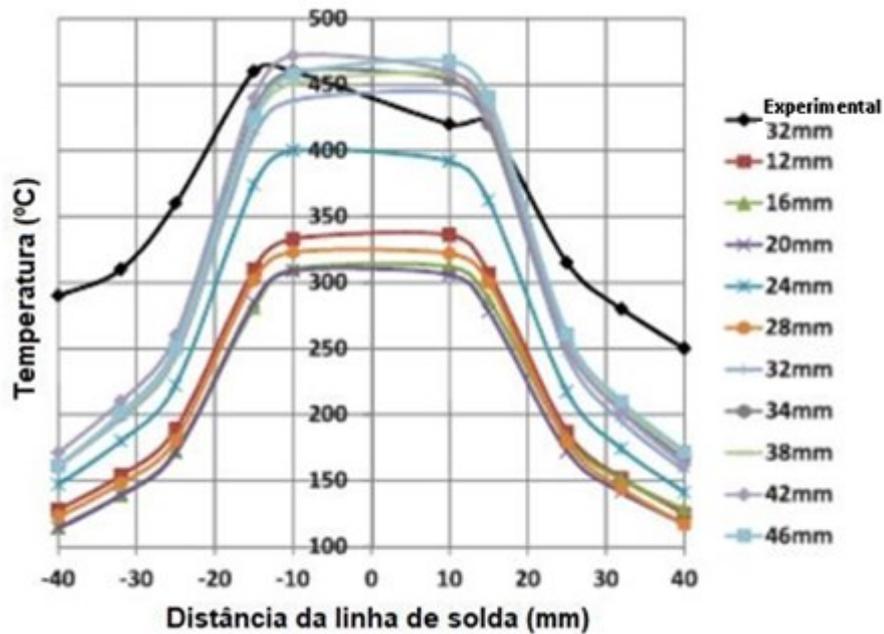


Figura 13: Gráfico da distância da linha de solda vs temperatura atingida para placa de AL6061-T6
 Fonte: Autor, adaptado de KANG e JANG (2013).

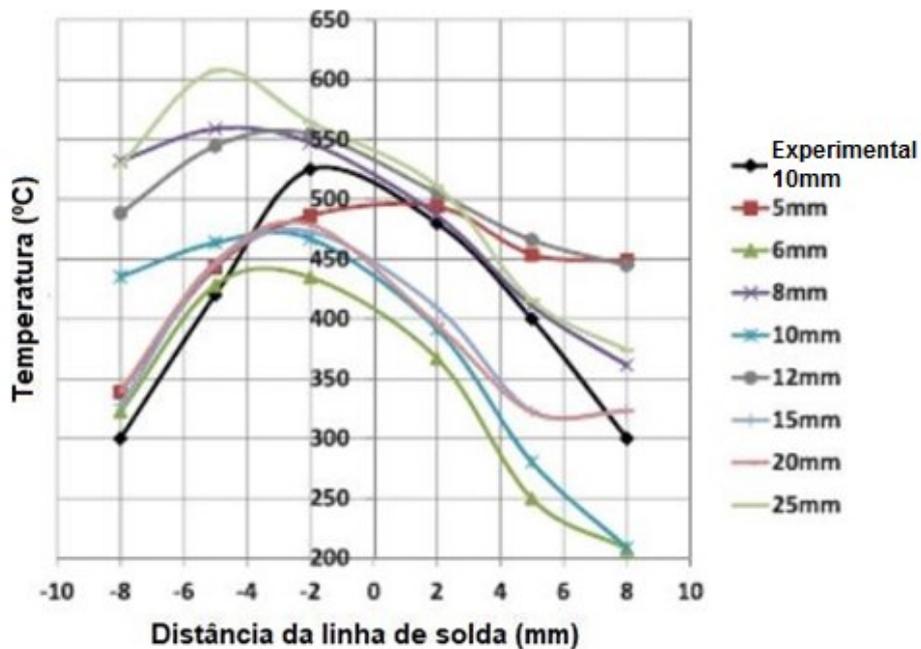


Figura 14: Gráfico da distância da linha de solda versus temperatura atingida para placa de AA5083-H18
 Fonte: Autor, adaptado de KANG e JANG (2013).

Os resultados demonstram que diâmetro e temperatura são diretamente proporcionais, ou seja, quanto maior for o diâmetro afetado pela rotação da ferramenta, maiores serão as temperaturas máximas atingidas.

A ferramenta utilizada possuía ombro de 32 mm para soldagem das placas de AL6061-T6 e ombro de 10 mm utilizada nas placas de AA5083-H18, justificando, assim, os diâmetros de 34mm e 12 mm afetados pela rotação da ferramenta, convergindo para resultados mais próximos dos experimentais. Tais análises foram apresentadas nas figuras 15 e 16. Concluiu-se, então, que a zona afetada pelo diâmetro da rotação é alguns milímetros maior do que o diâmetro do ombro da ferramenta, confirmando o que foi pressuposto no início do estudo.

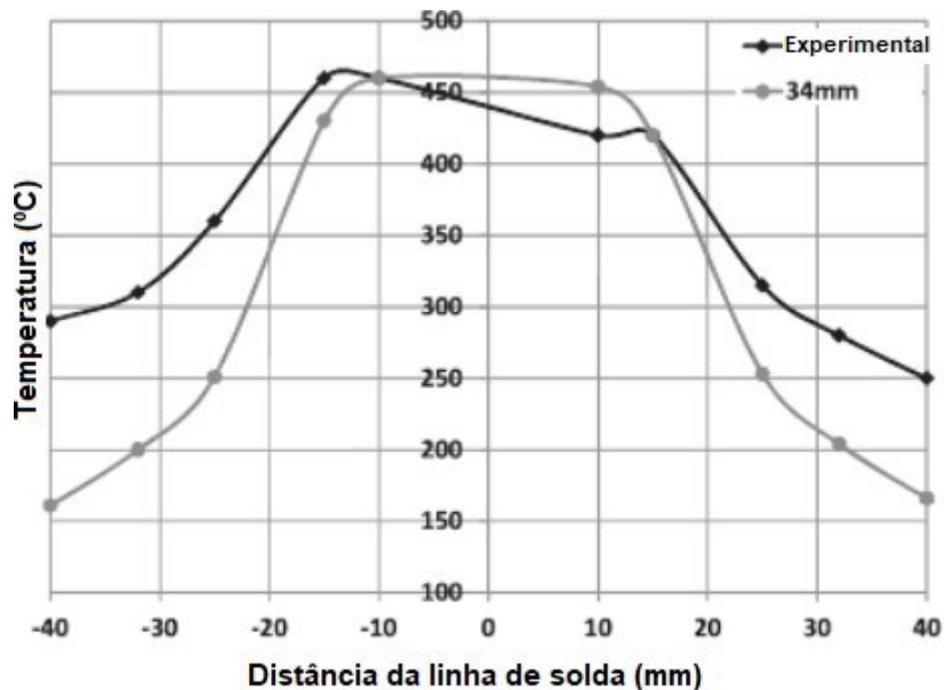


Figura 15: Gráfico da distância da linha de solda vs temperatura atingida para placa de AL6066-T6
Fonte: Autor, adaptado de KANG e JANG (2013).

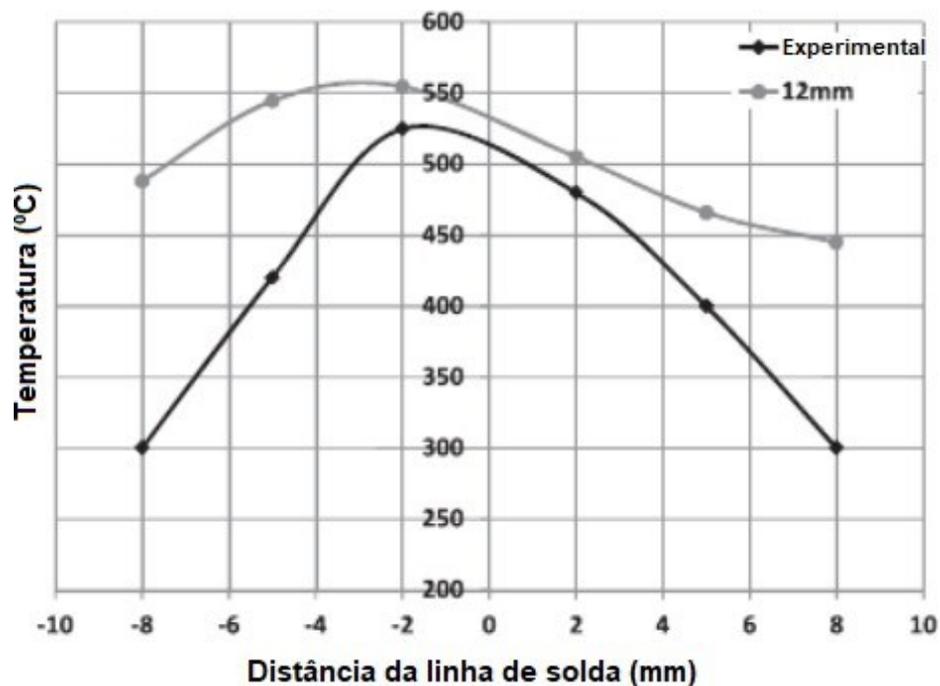


Figura 16: Gráfico da distância da linha de solda vs temperatura atingida para placa de AA5083-H18
 Fonte: Autor, adaptado de KANG e JANG (2013).

3.6.3 Utilização do Fluent para simulação do processo FSW

Através da ferramenta FLUENT, inserida na plataforma Ansys, é possível criar um modelo para simulação como aquele utilizado por HASAN (2018), que realizou duas modelagens do processo em ligas de magnésio AZ31. Uma para validação experimental e determinação de algumas variáveis, as quais seriam utilizadas como dados de entrada na outra simulação; e a outra para analisar o fluxo de duas fases e verificar a distribuição de pressão na superfície da ferramenta. Nessas simulações foi aplicada a formulação Euleriana e escoamento laminar viscoso com fluxo incompressível. A rotação da ferramenta foi considerada a principal fonte de geração de calor e o modelo térmico utilizado foi o modelo transiente. As geometrias da ferramenta e placas foram escolhidas a partir de artigos utilizados como referência. Os resultados obtidos sobre os fluxos de temperatura e de pressão estão representados nas figuras 17 e 18.

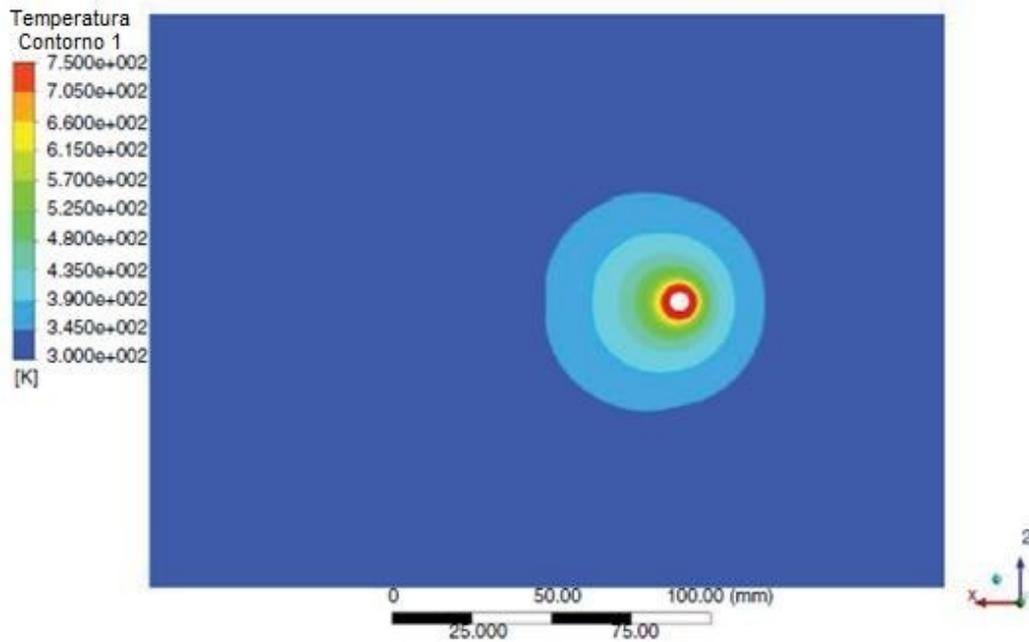


Figura 17: Distribuição da temperatura na superfície do material para uma velocidade de translação de 3mm/s e velocidade de rotação de 1000rpm após 350s.

Fonte: Adaptado de HASAN (2018).

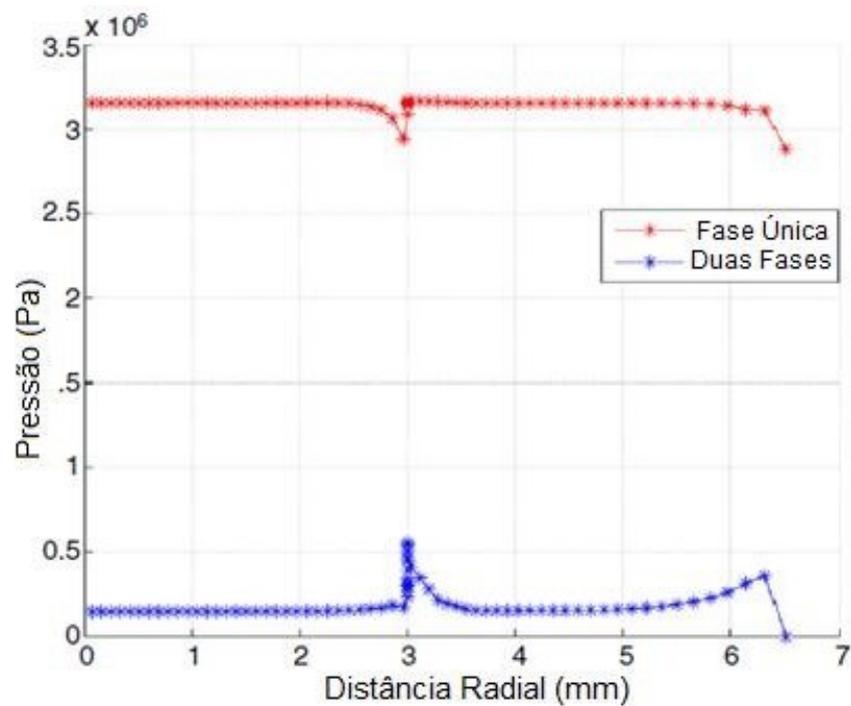


Figura 18: Gráfico da distribuição da pressão média em função da posição da ferramenta para modelo de fluxo de fase simples e de duas fases.

Fonte: Adaptado de HASAN (2018).

Ao final dos estudos, os resultados de distribuição de temperatura obtidos experimentalmente e computacionalmente foram validados, com apenas 11% de discrepância média. O autor concluiu que utilizar o Ansys FLUENT para estudar os efeitos de fluxos altamente viscosos é uma boa alternativa, porque possibilita uma análise mais detalhada sobre o comportamento do material ao redor da ferramenta, evitando possíveis falhas e aumentando a vida útil da ferramenta durante o processo de FSW.

Padmanaban et al. (2014) desenvolveu um modelo computacional utilizando o FLUENT para verificar a transferência de calor e o fluxo de material durante o processo FSW para juntas dissimilares compostas por chapas de Alumínio AA2024 e AA7075 com medidas de 150 mm de comprimento, por 75 mm de largura e 5 mm de espessura. A ferramenta utilizada para esse processo possuía ombro com diâmetro de 17,5 mm e pino com diâmetro de 5 mm e comprimento de 4,65 mm. A malha possuía 551470 elementos hexaédricos. As condições de contorno são observadas na figura 19 e o ferramental não foi modelado.

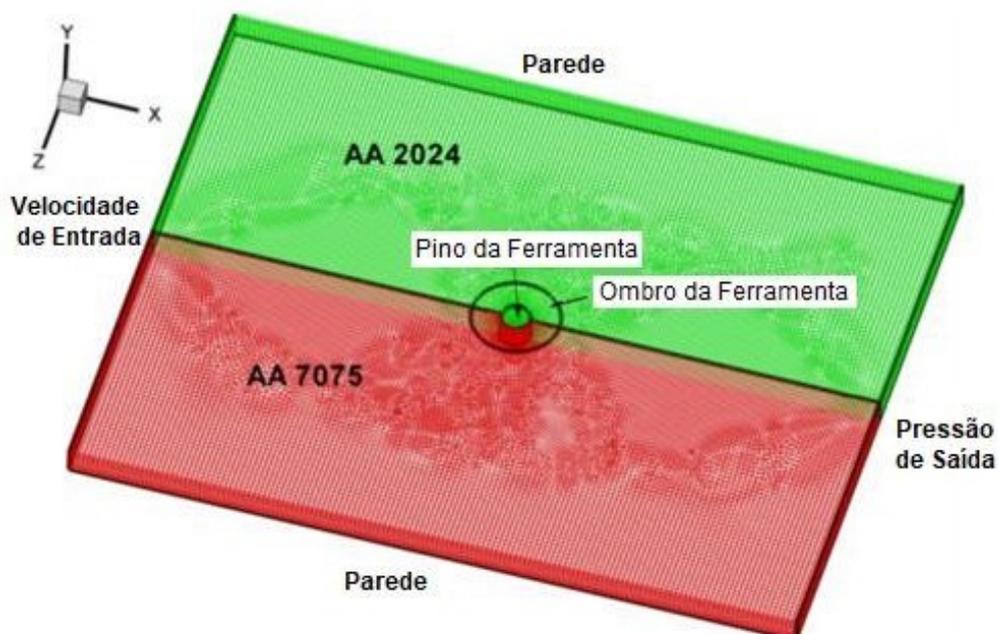


Figura 19: Modelagem da junta soldada e condições de contorno.
Fonte: Adaptado de R. Padmanaban et al. (2014).

Para validação do modelo numérico, foi utilizado o trabalho de Peel et al (2006), onde houve aplicação do processo de FSW com junta de material dissimilar, AA5083 e AA6082, rotação da ferramenta em 840 rpm e velocidade de avanço de 100 mm/min. Na figura 20, há a comparação entre os dados coletados no experimento de Peel et al (2006) e os dados resultantes da simulação de R. Padmanaban et al (2014).

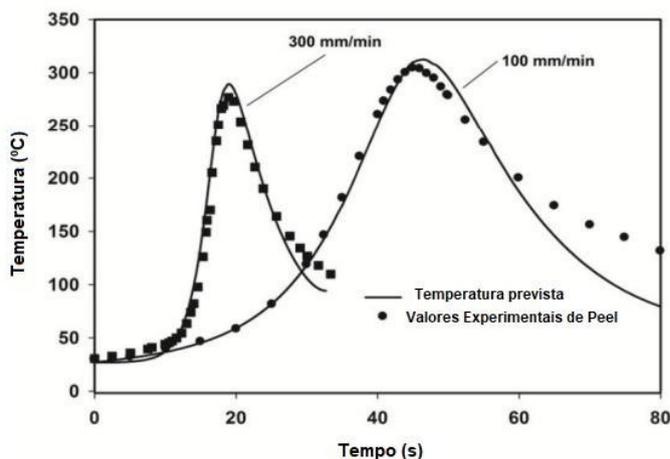


Figura 20 – Comparação dos resultados experimentais de Peel et al. (2006) e computacionais de R. Padmanaban et al. (2014)
Fonte: Adaptado de R. Padmanaban et al. (2014).

Com os resultados que obtiveram através da simulação computacional, foi possível verificar a influência da velocidade de avanço, da rotação e do diâmetro do ombro da ferramenta. No que concerne aos efeitos da velocidade de avanço, concluiu-se que, conforme há aumento dessa velocidade, os picos de temperatura diminuem. Para uma velocidade de avanço de 20 mm/min, a temperatura máxima atingida foi de 726 K; já para uma velocidade de avanço de 60 mm/min, o pico de temperatura atingido foi de 704 K. As forças atuantes na ferramenta são maiores quando a velocidade de avanço é maior, pois o material presente à frente da ferramenta está mais rígido devido às temperaturas menores e à maior viscosidade, isso afeta a vida útil da ferramenta de forma negativa.

A figura 21 representa o campo de temperatura atingido na seção transversal da junta soldada para diferentes velocidades de avanço. O diâmetro do ombro da ferramenta foi de 17,5 mm e sua velocidade de rotação foi de 900 rpm.

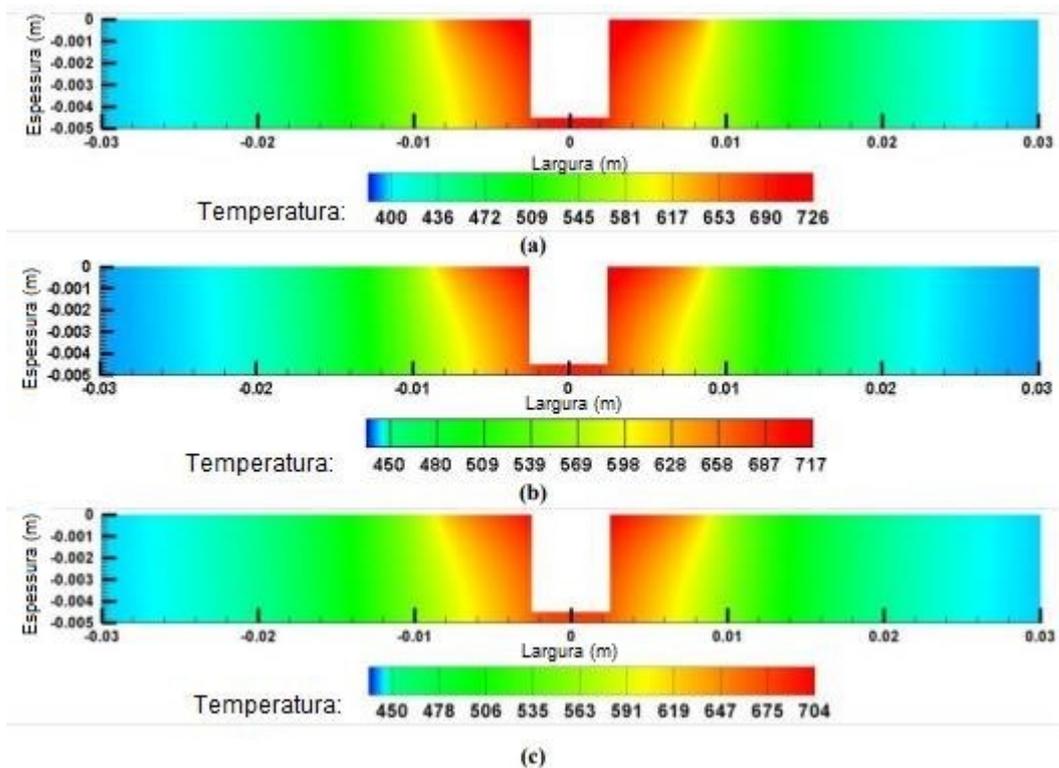


Figura 21 – Campos de temperatura para V_{av} igual a 20 (a), a 40 (b) e a 60 (c) Fonte: Adaptado de R. Padmanaban et al. (2014).

Para a análise dos efeitos da rotação da ferramenta sobre o processo FSW, foi utilizada velocidade de avanço de 20 mm/min, diâmetro do ombro de 17,5 mm e rotações da ferramenta de 900, de 1050 e de 1200 rpm. As temperaturas máximas atingidas nessas amostras foram, respectivamente, 726, 739 e 745K. Para esta análise, foi observado que o aumento da rotação da ferramenta levou ao aumento na geração de calor e, conseqüentemente, aumento na temperatura. Na figura 22 é possível visualizar os campos de temperaturas na seção transversal da junta soldada para velocidades de rotação de 900, 1050 e 1200 rpm da ferramenta. O diâmetro do ombro da ferramenta permanece em 17,5 mm.

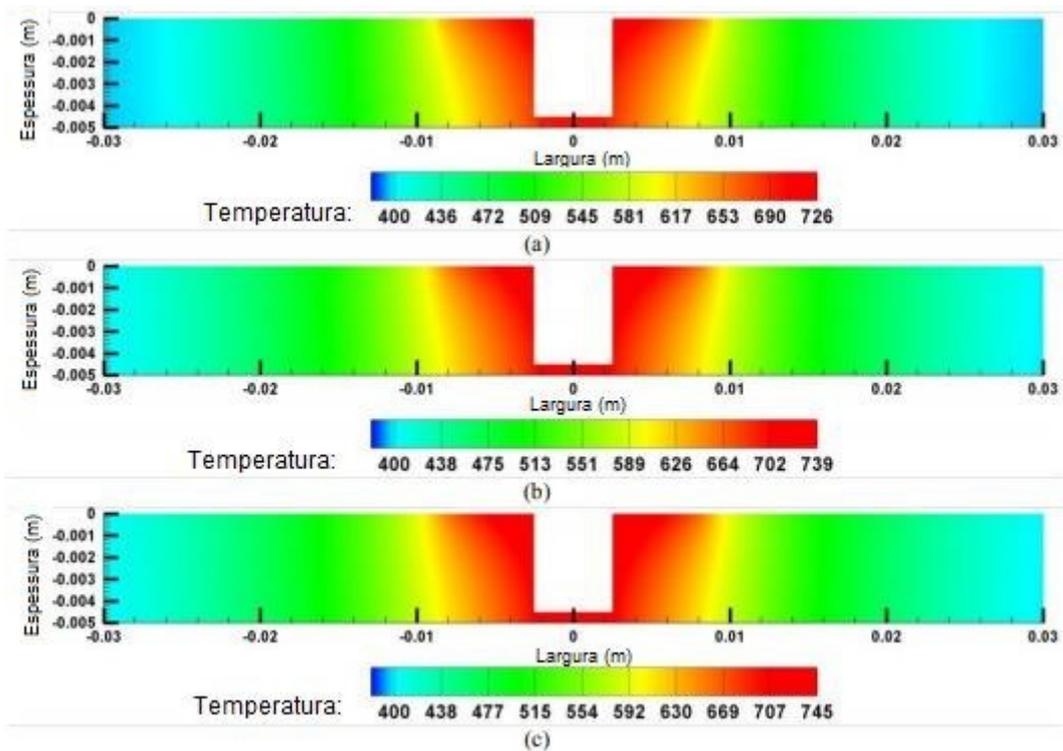


Figura 22 – Campos de temperatura para n igual 900 (a), 1050 (b) e 1200 (c) rpm.
 Fonte: Adaptado de R. Padmanaban et al. (2014).

Com os resultados provenientes da simulação computacional, verificaram-se os efeitos dos parâmetros sobre o tamanho da zona de mistura. O aumento da rotação da ferramenta causou um aumento no tamanho da zona de mistura, uma vez que esse aumento leva à diminuição da viscosidade do material. O diâmetro do ombro da ferramenta continuou em 17,5 mm e a velocidade de avanço em 20 mm/min. As rotações da ferramenta utilizadas na simulação foram de 900, 1050 e 1200 rpm.

A figura 23 apresenta a viscosidade do material e a dimensão das regiões de mistura para as diferentes velocidades de rotação da ferramenta. A viscosidade do material, quando aplicado a uma rotação da ferramenta de 900 rpm, foi de 48076,2 Pa.s e, quando aplicado a uma rotação de ferramenta de 1200 rpm, foi de 35318,2 Pa.s, levando à conclusão de que as forças atuantes na ferramenta são menores conforme aumento da rotação da ferramenta, pois o material oferece menos resistência para a mesma.

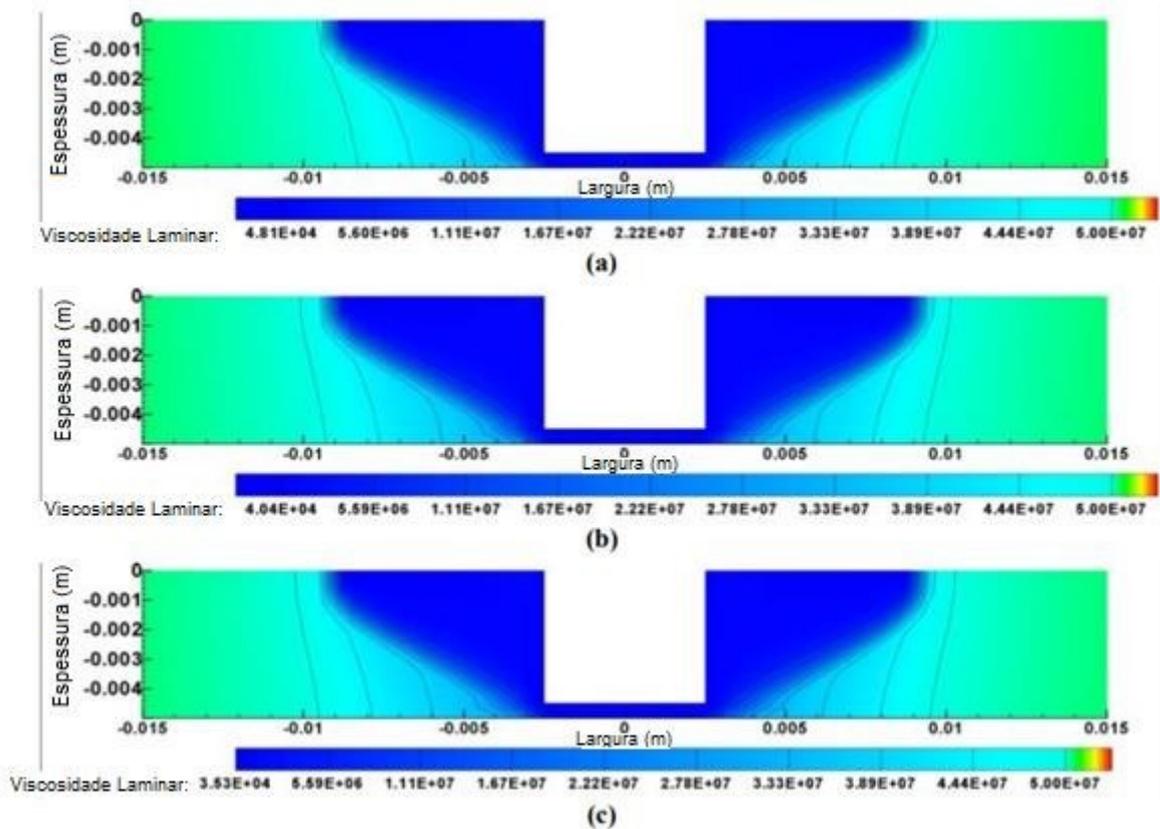


Figura 23 – Campo de viscosidade para n igual a 900 (a), a 1050 (b) e a 1200 (c)
 Fonte: Adaptado de R. Padmanaban et al. (2014).

Para realizar a análise da influência do diâmetro do ombro da ferramenta no processo, foram alterados os diâmetros entre 15 e 20 mm. A rotação da ferramenta foi fixada em 900 rpm e a velocidade de avanço em 20 mm/min. Neste caso, observou-se uma diminuição nos valores de viscosidade. Para o diâmetro de ombro da ferramenta de 15 mm, a viscosidade do material foi de 43100 Pa.s, e ao mesmo tempo em que, para diâmetro de ombro de 20 mm, a viscosidade diminuiu para 40351 Pa.s. A viscosidade e a região de mistura podem ser verificadas na figura 24 para os diferentes diâmetros de ombro da ferramenta.

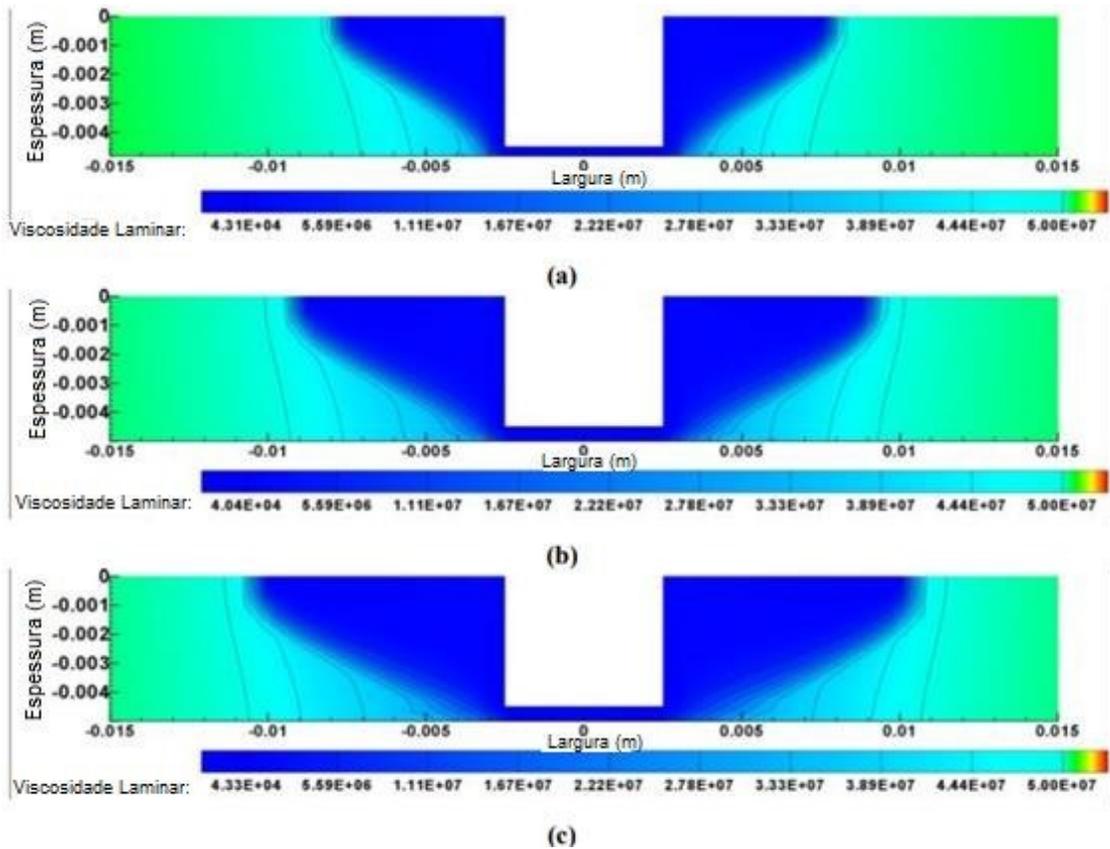


Figura 24 - Campo de viscosidade pra D_{omb} igual a 15 (a), a 17,5 (b) e a 20 (c) mm.
 Fonte: Adaptado de R. Padmanaban et al. (2014).

Por fim, para a análise dos efeitos da velocidade de avanço sobre a região de mistura, utilizou-se rotação da ferramenta em 1050 rpm e diâmetro de ombro de 17,5 mm. As velocidades de avanço utilizadas variaram entre 20 e 60 mm/s. Notou-se que ao aumento da velocidade de avanço, o tamanho da zona de mistura diminuiu. Além disso, o valor de viscosidade do material aumentou de 40351,3 para 47592 Pa.s, quando utilizado 20 e 60 mm/s, respectivamente. Isso indica que o material oferece maior resistência ao movimento da ferramenta e a mistura do material não será eficiente para elevadas velocidades de avanço da ferramenta. Pode-se verificar a influência da velocidade de avanço sobre a zona de mistura e a variação da viscosidade na figura 25.

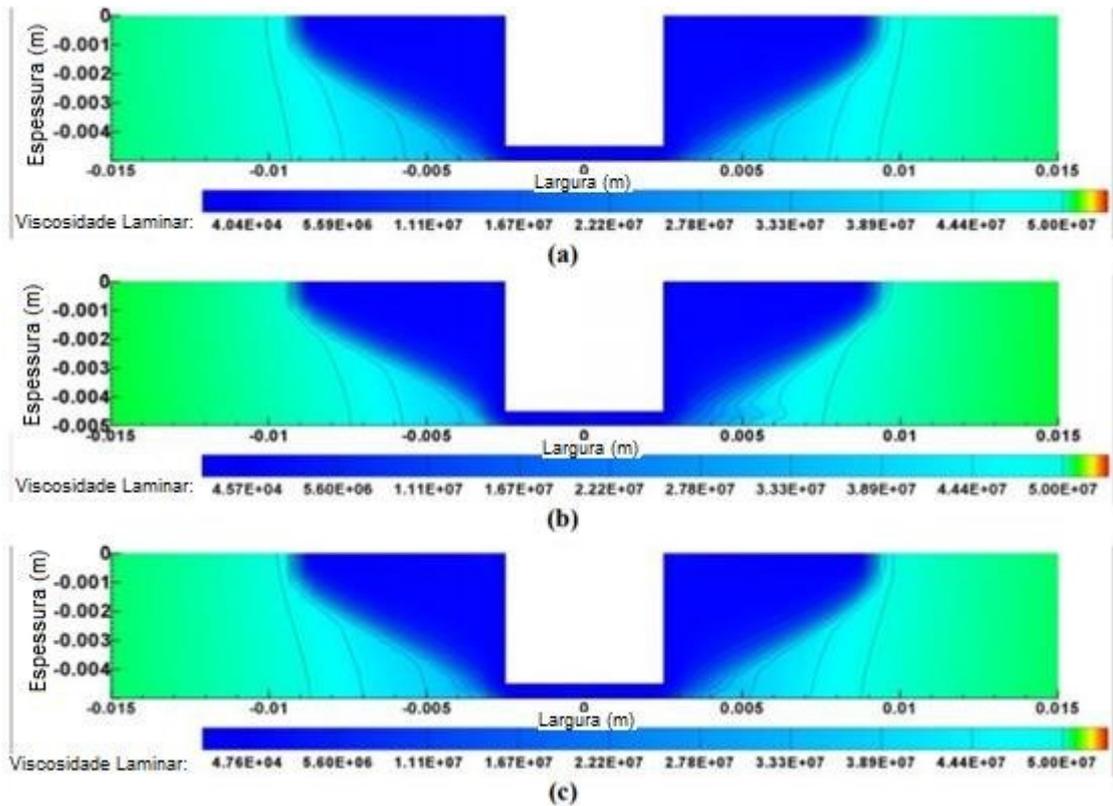


Figura 25: Campo de viscosidade para V_{av} igual a 20 (a), a 40 (b) e a 60 (c)
 Fonte: Adaptado de R. Padmanaban et al. (2014).

Ao final dos estudos, os autores puderam concluir que a distribuição da temperatura é afetada pela rotação da ferramenta e pela velocidade de avanço da mesma; que o aumento da rotação, por sua vez, aumenta o pico de temperatura durante o processo; contudo, com o aumento da velocidade de avanço, o pico de temperatura diminui. Assim como concluíram que com o aumento da rotação da ferramenta, a vida da ferramenta é beneficiada juntamente com a mistura do material; no entanto, o aumento da velocidade de avanço da ferramenta, aumenta o carregamento sobre ela, prejudicando sua vida útil. A viscosidade do material diminui à medida que se aumenta a rotação e o diâmetro do ombro da ferramenta, contribuindo para a melhora no fluxo do material; todavia, a viscosidade do material é elevada conforme se aumenta a velocidade de avanço da ferramenta.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho analisará os picos de temperatura nas regiões do início, do meio e do final do cordão de solda através da realização de uma simulação computacional do processo FSW, para validar o modelo computacional através dos dados experimentais coletados durante as fases de soldagem. Com os resultados da simulação, realizada através do método CFD, será quantificada a discrepância entre os valores experimentais e os computacionais.

Para os ensaios deste trabalho, foram utilizadas placas de 8mm de espessura da liga de Alumínio AA7050 — T7451; com parâmetros obtidos através de experimentos realizados, modelando o sistema com resultados o mais próximo possível de experimentos realizados, utilizando-se de dezesseis pontos de captura posicionados para garantir as aferições de temperatura no início, no meio e no final do cordão de solda.

4.1 EQUIPAMENTOS DE SOLDAGEM

Para a realização deste projeto, foi necessária a realização de um experimento físico para validação do modelo a ser representado computacionalmente. Através do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) de São José dos Campos, foi possível realizar a soldagem através do processo FWS, utilizando o equipamento do fabricante *Manufacturing Technology, Inc.* Este equipamento possui 5 eixos de movimento, sendo que o eixo árvore disponibiliza uma potência de 30kW, com força axial máxima de 80 kN, torque máximo de 280N, velocidade máxima de avanço de 3000 mm/min, rotação máxima de 3000 rpm e uma mesa de tamanho de 3800 x 3900 mm, como pode ser observado na figura 26.



Figura 26 – Equipamento de *Friction Stir Welding*
Fonte: Autor

A máquina foi programada através do comando numérico (CNC) para execução da soldagem. Seu cabeçote é instrumentado, permitindo a obtenção do torque, e esforços axiais e transversais durante o processo de soldagem, como mostra a figura 27.



Figura 27 – Detalhe do cabeçote do equipamento
Fonte: Autor

Como material de base foram utilizadas chapas da liga de alumínio da série AA 7050 – T7451 com dimensões de 420 mm de comprimento, 300 mm de largura e 8 mm de espessura (Figura 28).



Figura 28 - Material de base: Chapas de Liga de Alumínio
Fonte: Autor

A ferramenta utilizada foi um modelo composto de duas peças (ombro e pino). Sendo que o ombro medindo 20 mm de diâmetro; o material do ombro feito de aço ferramenta H13. O pino da ferramenta é faceado (três faces) e roscado, com diâmetro de 8 mm na intersecção do ombro, altura de 7,87 mm e o material utilizado para o pino foi MP- 159, uma superliga de cobalto e alumínio com alta resistência (Figuras 29).



Figura 29 - Ferramenta
Fonte: Autor

4.2 PROCESSO DE SOLDAGEM E MEDIÇÕES DE TEMPERATURA EXPERIMENTAL

Para o processo de soldagem, foi realizada a adaptação de sensores térmicos em toda a extensão do equipamento utilizado para garantir a recepção de todos os dados necessários para a calibração do software de simulação. Na ferramenta foi instalado apenas um sensor térmico; já na extensão das placas a serem soldadas foram adaptados 16 sensores, nos dois lados da região a ser soldada. Esses sensores se posicionaram em grupos de 3 pontos, equidistantes em 5 mm; já na extensão da placa, o grupo inicial estava a 13,5 mm do início da solda, o grupo central (ou aferição mediana) há 16,5 mm do início da solda e o grupo final há 19,5 mm do início da solda. (Figuras 30 e 31).

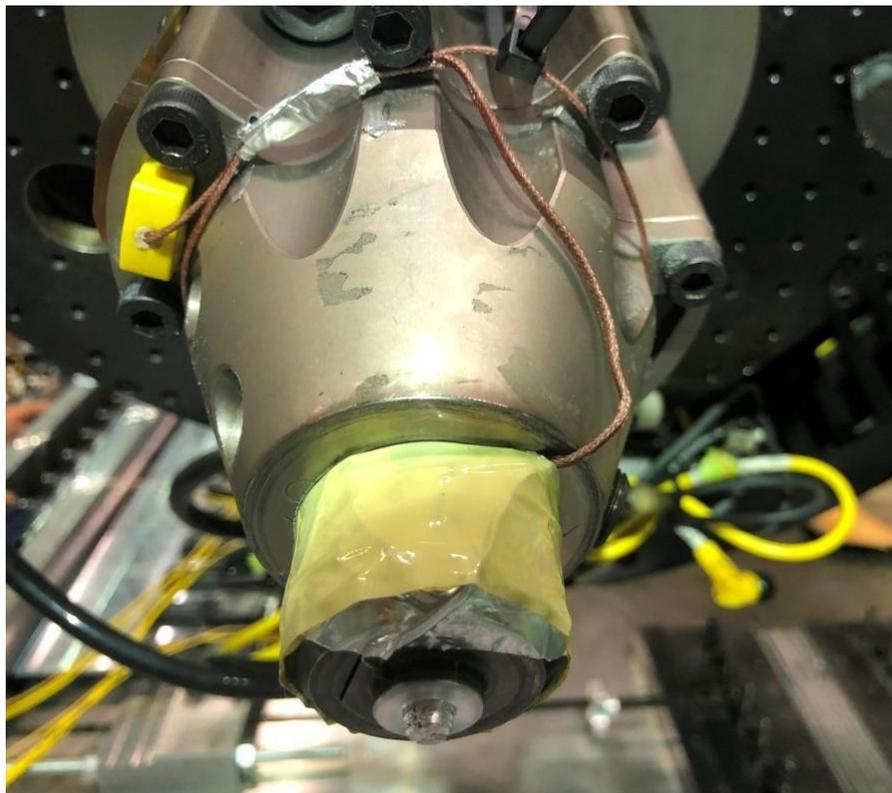


Figura 30 – Sensor térmico preso à ferramenta, no equipamento de FWS.
Fonte: Autor

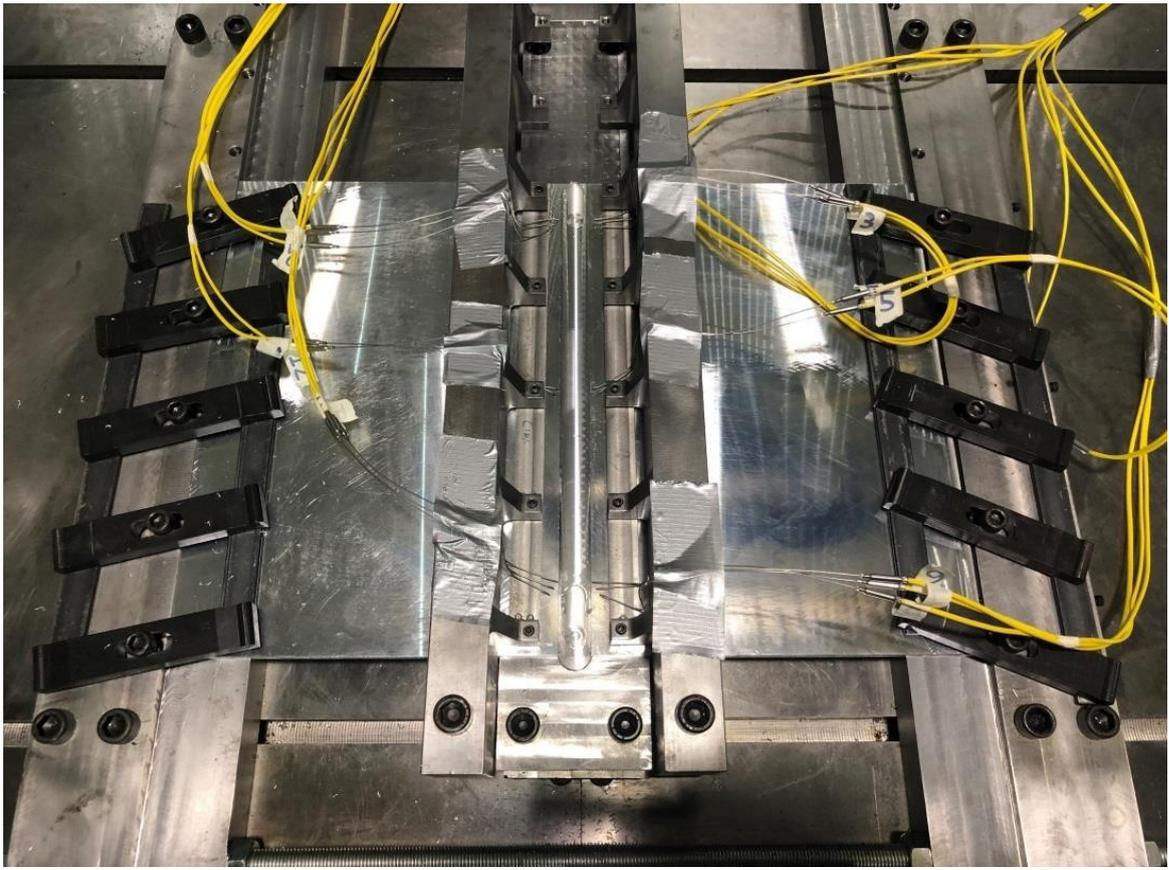


Figura 31 – sensores térmicos dispostos ao longo da soldagem.
Fonte: Autor

Para o processo, é necessário que as placas de alumínio sejam fixadas no equipamento para que não ocorram movimentações e defeitos durante a soldagem.

Essas placas foram fixadas por suportes e parafusos na extensão de suas laterais externas. Foi colocado o fixador central, composto por vários parafusos próximos a região de solda, sendo as placas fixadas e os parafusos localizados na lateral do suporte foram apertados para manter as placas encostadas e não permitir que se separassem durante a soldagem (Figuras 32 e 33). Após todo o preparo e fixação das placa é que se fez a fixação do termopares (Figura 34).



Figura 32 - Instalação dos suportes laterais
Fonte: Autor



Figura 33 – Instalação do fixador central
Fonte: Autor

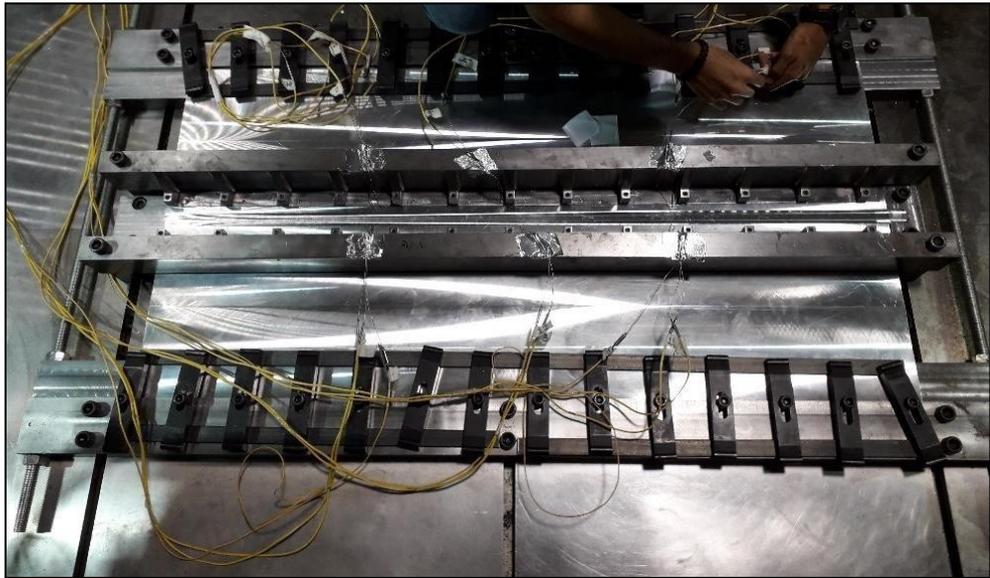


Figura 34 – Instalação dos termopares
Fonte: Autor

Após a conclusão da etapa de montagem é realizado o procedimento de soldagem para coleta de dados para posterior uso em análise no software SIMCENTER STAR-CCM+ da SIEMENS (Figuras 35 e 36).

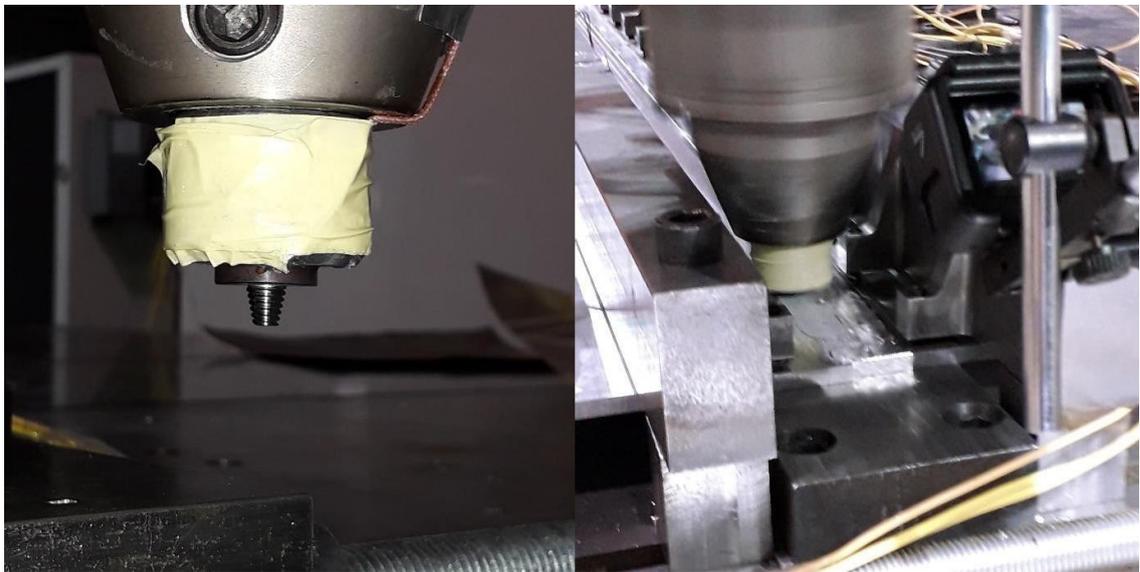


Figura 35 – Execução da soldagem
Fonte: Autor

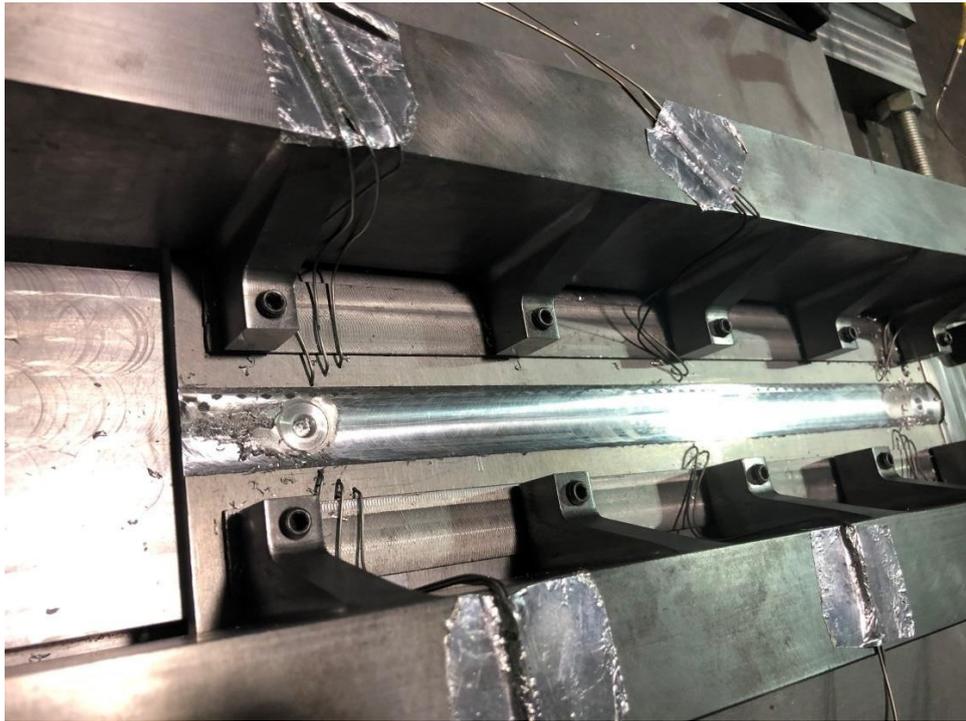


Figura 36 – Verificação visual da solda
Fonte: Autor

5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Este é um trabalho de simulação térmica e fluidodinâmica (CFD — Computational Fluid Dynamics) por técnica de análise de volumes finitos (FVM — Finite Volume Method) do processo de solda por atrito FSW (Friction Stir Welding). Este trabalho foi realizado com o software SIMCENTER STAR-CCM+, desenvolvido pela SIEMENS. Software que apresenta um grande potencial de controle de parâmetros, auxiliando na geração da malha computacional.

Cada parâmetro de processo, ferramenta ou material a ser analisado demanda alto custo e tempo para a fabricação dos protótipos e instrumentação de ensaio físico. Portanto, a simulação térmica e fluidodinâmica do processo de solda por atrito FSW tem como vantagem avaliar os fenômenos de possíveis alterações nos parâmetros do processo de um modo mais eficiente do ponto de vista de tempo e recursos financeiros, encontrando virtualmente os valores de temperatura e potência térmica gerados no processo de solda com baixo investimento.

No presente projeto o objetivo é avaliar termicamente a solda por atrito FSW entre duas placas de alumínio utilizando ferramentas específicas para este processo. Por ser uma solda de reação física, através do atrito é gerada a quantidade de calor suficiente para realização do processo, se fazendo necessária a análise térmica do processo para um bom entendimento dos fenômenos que ocorrem no processo e da influência das variáveis.

Os resultados térmicos e fluidodinâmicos são importantes na avaliação das temperaturas das peças durante o processo, permitindo o aperfeiçoamento e a manipulação dos parâmetros para um processo otimizado. Com isto, se torna possível a promoção de diferentes condições (avanço e rotação) em novos desenvolvimentos de solda por atrito FSW com o objetivo de melhorar a qualidade da solda, já que a energia térmica é muito importante porque o processo tem uma necessidade específica de temperatura para ter qualidade.

5.1 GEOMETRIAS DAS PEÇAS

A geometria modelada em 3D para a realização da análise replicou as peças e ferramentas que foram utilizadas nos ensaios experimentais da solda por atrito FSW (Figura 43).

Cada uma das placas de alumínio a serem soldadas foi considerada com dimensões de 420 mm de comprimento, 300 mm de largura e 8 mm de espessura. No processo de solda, duas dessas placas foram unidas na dimensão de 420 mm de comprimento. A base de fixação das placas de alumínio foram fixadas e modeladas com dimensão de 840 mm de comprimento, 800 mm de largura e 100 mm de altura. As placas de alumínio foram posicionadas ao centro desta base de aço. Os suportes de fixação das placas de alumínio na base para impedir seu movimento foram modelados com 75 mm de altura, 50 mm de largura e 420 mm de comprimento. Os suportes foram posicionados ao centro do conjunto, alinhado com as placas de alumínio e distanciados em 100 mm com referência em seu comprimento.

O cabeçote da ferramenta utilizada para realizar o processo de solda foi modelado com um ombro medindo 20 mm de diâmetro e 20 mm de altura, ombro este que foi colocado em contato direto com as peças de alumínio a serem soldadas. Devido ao pino que realiza a soldagem se posicionar no interior das chapas de alumínio, ele não foi modelado em 3D e considerado nas análises.

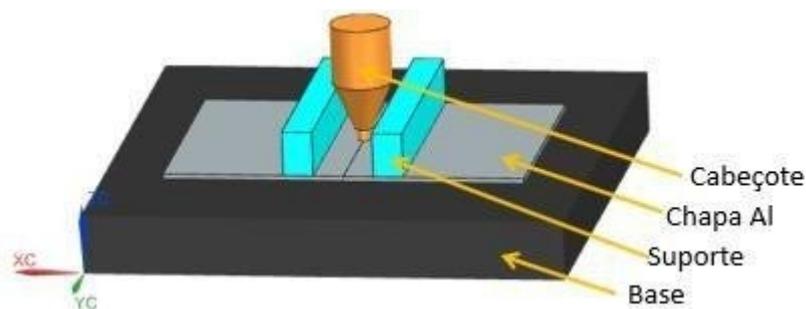


Figura 37 – Modelagem em 3D do conjunto montado para a análise
Fonte: Autor

Para simular o início do processo de soldagem, o cabeçote da ferramenta foi posicionado no início do comprimento da solda, alinhando o centro da ferramenta com a região de contato entre as duas chapas de alumínio, conforme representado

na Figura 37. Durante o processo de soldagem, o cabeçote percorre o comprimento de contato entre as chapas conforme o avanço proposto no ensaio.

A medição da temperatura da chapa foi realizada nos pontos em vermelho indicados na Figura 38. Cada um dos três conjunto de pontos tem localização determinada pelas medições indicadas e estes pontos estão espaçados entre si ao longo do comprimento da chapa em 5mm. O primeiro conjunto de 3 pontos próximo do início da solda é denominado de “início”, o conjunto de 2 pontos no centro da peça é denominado de “meio” e o conjunto de três pontos próximo do fim da solda é denominado de “fim”. Os pontos de medição de temperatura também estão espaçados entre si ao longo da largura da chapa de alumínio em 3 mm pelas dimensões “A”, “B” e “C” que respectivamente correspondem as dimensões de 13,5 mm, 16,5 mm e 19,5 mm.

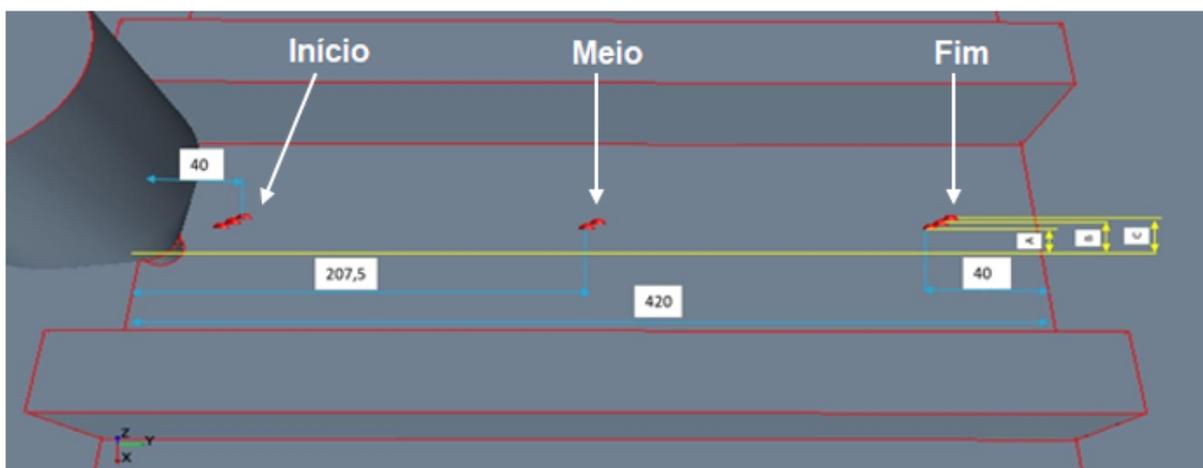


Figura 38 - Posição dos sensores de temperatura
Fonte: Autor

5.2 MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS

Como base para o modelamento numérico foram utilizados dados de experimentos realizados em estudos anteriores com o objetivo de replicar estes experimentos numericamente e calibrar o modelo computacional. Os parâmetros de processo e geometria foram replicados computacionalmente e o modelo numérico foi calibrado para que as temperaturas tivessem comportamento similar aos dados experimentais.

A malha computacional utilizada foi construída com o auxílio do software SIMCENTER STAR CCM+. Este é um software robusto com grande potencial de controle de parâmetros que auxiliam na geração da malha computacional e da notoriedade da aplicação desta ferramenta na área de geração de malha computacional. Para todas as geometrias utilizadas na análise, a malha gerada foi do tipo poliédrica com o objetivo de capturar todos os detalhes dimensionais dos componentes.

No processo de geração de malha, visou-se manter as dimensões dos principais objetos do estudo, a chapa e o ombro da ferramenta, devido a importância das medições que são realizadas e os fenômenos considerados neste local. Na Figura 39 é apresentado a representação da malha gerada para a solução das físicas de todos os corpos e na Figura 40 uma vista em corte das regiões de maior interesse.

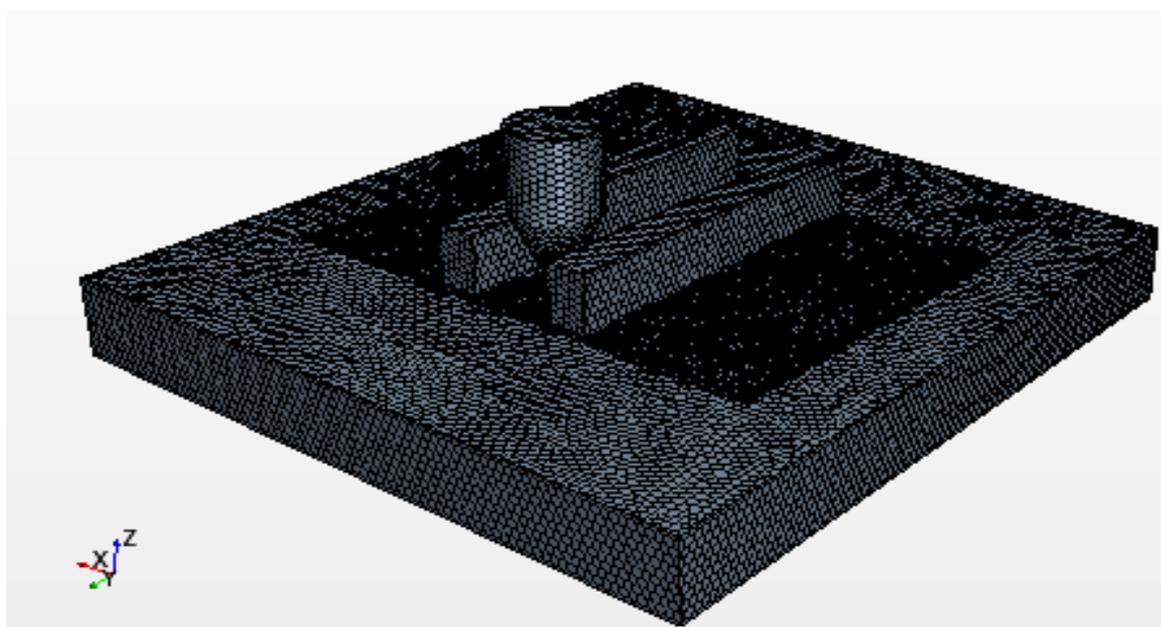


Figura 39 - Malha gerado para análise
Fonte: Autor

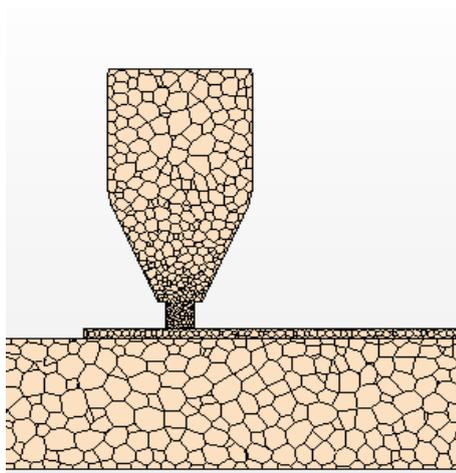


Figura 40 - Vista em corte da malha nas regiões de maior interesse
Fonte: Autor

Em resumo, a malha computacional para o presente caso ficou com as características principais, apresentadas na Tabela 12. A malha é considerada de boa qualidade quando a variação de volume mínima é maior que 0,01, o ângulo de distorção é menor que 85 e a validade da face é igual a 1.

Característica	Base	Chapa	Ferramenta	Suportes	Total
Número de células	41.894	45.569	3.744	3.224	94.435
Número de faces	265.737	253.342	22.829	17.930	559.881
Validade da face mínima	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Variação de volume mínima	1,25E-02	1,12E-02	1,12E-02	2,28E-02	1,12E-02
Ângulo de distorção máximo	83,05	81,17	57,90	83,07	83,07

Tabela 12 - Características da malha computacional
Fonte: Autor

5.3 METODOLOGIA DE ANÁLISE

O procedimento de análise foi realizado a partir de algumas diretrizes: (a) Realizar a modelagem 3D das geometrias das peças utilizadas nos ensaios físicos; (b) Levantar dados de literatura sobre as propriedades mecânicas (densidade, calor específico e condutividade térmica) dos materiais dos componentes que fazem parte do processo de solda; (c) Levantamento e tratamentos dos dados e gráficos de temperatura dos ensaios realizados para a calibração do modelo; (d) Desenvolver modelo computacional com geometrias, materiais, físicas e condições de processo; (e) Calibrar modelo computacional com as temperaturas do ensaio físico; e (f) Definição da equação que representa as variáveis de processo com o calor gerado.

5.4 CONDIÇÕES DE SIMULAÇÃO

As condições para realização da simulação, dados de entrada, calibração e considerações sobre o modelo estão descritas nos tópicos a seguir.

5.4.1 Materiais

Os materiais das geometrias utilizadas na análise foram considerados de acordo com os materiais utilizados nos ensaios em laboratório. Para a placa de alumínio, foi considerado o alumínio AA7050 — T7451, para o cabeçote da ferramenta que compõe o ombro foi considerado o aço ferramenta H13 e para a base e para o suporte foi considerado aço comum. As propriedades e fonte de dados para estes materiais estão descritos na Tabela 13.

Característica	Alumínio AA7050-T7451	Aço Ferramenta H13	Aço Comum
Desidade (kg/m ³)	2.830	7.800	7.850
Calor Específico (J/kg.K)	860	460	480
Condutividade Térmica (W/m.K)	140,0	24,3	51,9

Tabela 13 - Propriedades dos Materiais
Fonte: Autor

5.4.2 Troca de Calor

Para a resolução do equilíbrio de energia entre os corpos, foi necessário estabelecer alguns parâmetros de troca de calor além das propriedades do material.

A irradiação entre os corpos foi desprezada devido a sua baixa contribuição para a temperatura das peças. No contato entre o ombro da ferramenta e as placas de alumínio foi adicionado uma fonte de calor que irá causar o aumento de temperatura dos componentes. Sabe-se que no processo FSW a geração de calor está centralizado no contato do ombro da ferramenta com as placas de alumínio; este calor varia de acordo com as variáveis de processo de rotação e avanço da ferramenta. Na simulação, não foi considerado os efeitos do pino da ferramenta na geração de calor.

A transferência de calor e energia dentro das peças é regida pela condutividade térmica do material. Foi desprezado a resistência de contato entre os componentes devido a alta pressão que as chapas são fixadas a fim de evitar qualquer movimento indesejado ao decorrer do processo. A energia dos

componentes é então finalmente dissipada para o ambiente através dos coeficientes de convecção. A temperatura ambiente para todos os ensaios foi considerada como 20°C.

Os coeficientes de convecção da ferramenta e das regiões próxima da ferramenta foram utilizados para a calibração do modelo numérico com o ensaio e a variação destes coeficientes foi realizado de acordo com a rotação da ferramenta, já que a mesma provoca grande perturbação e movimento do ar nessas regiões, aumentando o grau de convecção e transmissão de energia dos componentes para o ambiente. Os valores destes coeficientes estão representados na Tabela 14.

Coeficientes de Convecção (W/m²K)			
Rotação (rpm)	600	700	800
Ferramenta	80000	92000	105000
Chapa próximo da ferramenta	500	1000	2000
Suportes	300	600	1200
Chapa afastado da ferramenta	10	10	10

Tabela 14 - Coeficientes de Convecção
Fonte: Autor

5.4.3 Movimentação da Ferramenta

A análise computacional foi realizada de modo transiente devido a movimentação de translação e de rotação da ferramenta durante o processo de soldagem. Durante os ensaios físicos realizados para encontrar o melhor parâmetro de processo para a soldagem, estas movimentações de translação (avanço) e rotação da ferramenta foram variados. Com isto, as análises computacionais foram realizadas também variando estes parâmetros, replicando exatamente os valores utilizados no ensaio físico. Ao todo foram realizados 9 ensaios físicos e por consequência 9 simulações computacionais, de acordo com os parâmetros indicados na Tabela 15.

Experimento	Rotação (rpm)	Avanço (mm/min)
1	600	240
2	600	270
3	800	240
4	800	270
5	600	300
6	800	300
7	700	240
8	700	270
9	700	300

Tabela 15 - Parâmetros dos Experimentos
Fonte: Autor

A rotação da ferramenta foi sempre realizada sobre o próprio eixo. Já a translação (avanço) foi realizada sobre a linha que une as duas chapas de alumínio, caracterizando o centro da solda, conforme representado na Figura 41.

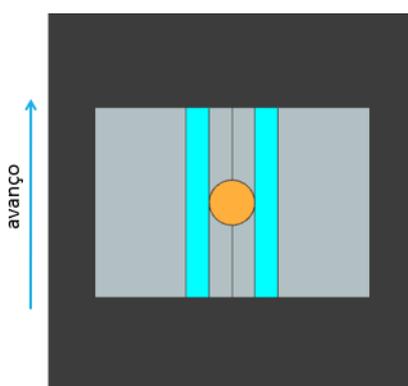


Figura 41 - Representação do movimento de avanço
Fonte: Autor

5.5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Ao final das simulações, foi possível verificar as influências dos parâmetros de processo sobre os picos de temperatura, quantidade de calor gerado e fazer uma comparação com os dados experimentais. Toda a metodologia utilizada na análise de dados está descrita nos tópicos seguintes.

5.5.1 Tratamento dos dados de temperatura do ensaio físico

Para realizar a calibração e validação do modelo numérico, foi necessário realizar o tratamento dos dados de medição de temperatura coletados nos ensaios físicos para utilizar um dado robusto de temperatura devido à grande variação nas medições encontradas no trabalho experimental. Este tratamento de dados consistiu em realizações de médias e retirada de pontos com uma variação grande com relação à média de seus pares. Para uma calibração mais adequada, o valor de interesse buscado foi o maior valor de temperatura encontrado em cada um dos sensores aquisitados durante todo o ensaio.

A primeira média realizada foi entre os ensaios repetidos, já que para cada conjunto de parâmetros (rotação e avanço) foram realizados dois ensaios; realizando, assim, a média entre a temperatura máxima dos dois ensaios equivalentes. A segunda média realizada foi entre as medições de temperatura do ensaio físico entre os lados de avanço e retrocesso. Para cada ponto de medição em uma placa a ser soldada, foi realizada uma outra medição na mesma localização de outra placa, de forma espelhada ao centro da solda. Esta medição foi feita no ensaio físico para tentar capturar alguma possível variação devido à movimentação plástica de material que ocorre durante o processo de soldagem. Como na análise numérica este fenômeno de transporte de material plástico não foi considerado, foi realizada uma média entre essas duas temperaturas, representando uma média entre as placas esquerda e direita, no mesmo ponto de medição com relação ao centro da solda. Com essas duas médias, temos quatro pontos de medição do ensaio físico que serão representados para a calibração do modelo numérico.

Desta forma, foi verificado o desvio padrão destes 4 pontos e, quando o desvio padrão dos pontos foi maior que 10, o ponto de medição com valor mais distante da média foi desprezado. Essa medida foi tomada com o intuito de evitar que erros grandes de medição tenham influência na calibração do modelo numérico.

Exemplificando a metodologia descrita, foi elaborada a tabela 13. Os 8 pontos de medição serão transformados em duas médias, a primeira média será a da aferição à 13,5mm de distância do centro da solda e a segunda será a média da aferição realizada à 16,5mm. Ambos os pontos de aferição realizados no centro do

comprimento da solda.

O desvio padrão dos conjuntos de 4 pontos aferidos à 13,5 mm foi de 4,95 e para o conjunto de aferição à 16,5 mm foi de 8,07; sendo assim, nenhum dado foi desprezado pois ficaram dentro do critério de desvio padrão.

Medição (mm)	13,5				16,5			
Ensaio	S01		S11		S01		S11	
Posição	Avanço	Retrocesso	Avanço	Retrocesso	Avanço	Retrocesso	Avanço	Retrocesso
Temperatura (°C)	252,0	262,0	265,0	256,0	210,0	195,0	218,0	207,0
Medição (mm)	13,5				16,5			
Ensaio	S01		S11		S01		S11	
Temperatura (°C)	256,8		260,1		202,4		212,5	
Medição (mm)	13,5				16,5			
Temperatura (°C)	258,4				207,4			

Tabela 16 - Média das temperaturas na região do meio para o primeiro ensaio
Fonte: Autor

Esta metodologia foi realizada para todos os experimentos, do 1 ao 9, e para todas as posições de aferição do início, do meio e do fim do comprimento da solda, como mostrados na Tabela 16. O conjunto de tratamento destas médias de temperatura é apresentado na Tabela 17.

Experimento	Início			Meio		Fim		
	Temperatura em 13,5 (mm)	Temperatura em 16,5 (mm)	Temperatura em 19,5 (mm)	Temperatura em 13,5 (mm)	Temperatura em 16,5 (mm)	Temperatura em 13,5 (mm)	Temperatura em 16,5 (mm)	Temperatura em 19,5 (mm)
1	257,5	213,3	188,4	258,4	207,4	264,2	229,6	198,3
2	275,4	216,5	190,0	243,9	212,8	258,9	231,7	189,4
3	279,8	227,3	194,6	278,6	217,7	276,5	247,2	202,6
4	277,6	213,7	182,1	240,0	199,6	242,3	223,1	180,5
5	265,4	210,4	182,2	238,0	197,3	219,5	220,3	173,8
6	275,2	224,4	189,7	247,8	204,7	256,4	233,1	192,4
7	279,4	228,2	198,9	269,8	212,2	268,9	242,8	199,3
8	279,8	221,8	189,8	252,5	209,3	255,3	231,7	189,1
9	279,7	221,3	186,7	256,9	202,9	257,3	238,1	189,3

Tabela 17 - Médias tratadas de temperatura
Fonte: Autor

5.5.2 Comparação entre temperatura do ensaio real e do modelo numérico virtual

Após ter encontrado a média das aferições de temperaturas máximas, o modelo computacional foi calibrado. Para esta calibração, foram utilizadas como referência as aferições de temperatura tratadas do meio da peça, em 13,5 e 16,5mm, conforme presente na quinta e sexta coluna da Tabela 17.

Na Figura 42 é apresentada a temperatura média por tempo das duas repetições do ensaio 1, lembrando que foram realizadas 8 aferições de temperatura, portanto, existem 8 curvas no gráfico. Conforme a ferramenta de solda avança ao longo da placa, observa-se que quanto mais próximo do sensor, maior a temperatura. Quando a ferramenta passa do sensor, a temperatura começa a baixar.

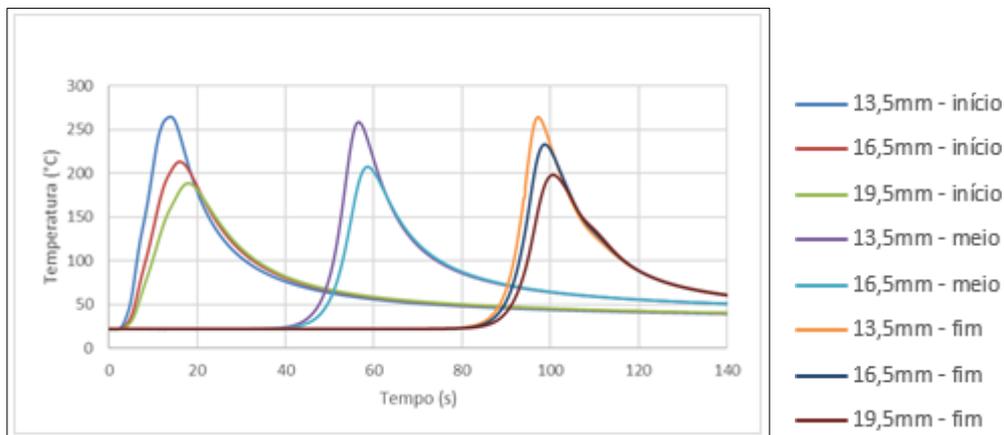


Figura 42 - Média das medições de temperatura do ensaio físico 1
Fonte: Autor

Já na Figura 43 é apresentada a curva de aferição de temperaturas do modelo numérico, na mesma localização dos pontos do ensaio físico. É possível perceber a grande semelhança entre os dois gráficos, o que significa que o modelo numérico conseguiu ser calibrado e capturar os fenômenos físicos presentes no ensaio. Essa comparação é muito importante e serve para a validação do modelo numérico.

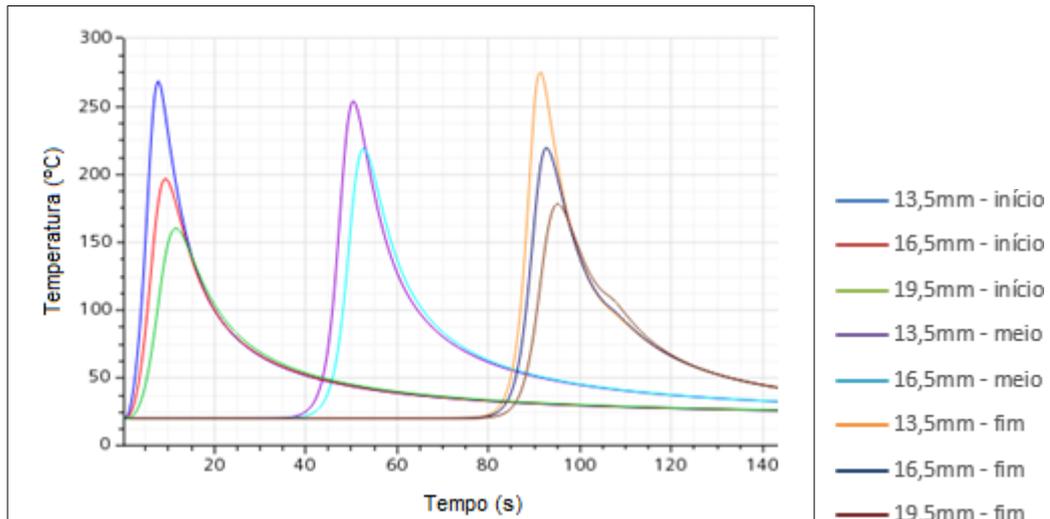


Figura 43 - Temperatura medidas do modelo computacional replicando o ensaio 1
 Fonte: Autor

Apesar de ter sido repetida esta mesma análise nos ensaios de 2 a 9, apenas o realizado no primeiro ensaio será apresentado no presente trabalho, como forma de demonstração da obtenção de resultados.

5.5.3 Resultado da distribuição de temperatura nos componentes

Um grande benefício ao realizar a criação de um modelo virtual de um processo físico é a possibilidade de observar a distribuição de variáveis de interesse ao longo do domínio de controle, neste caso específico, a distribuição de temperatura ao longo dos corpos. Essa observação possibilita a melhoria de possíveis problemas ou dificuldades que possam ocorrer durante o desenvolvimento e escolha de parâmetros para a soldagem de placas em um processo experimental.

Um exemplo de observação encontra-se na figura 44; nela é apresentado um corte através da linha central placa de alumínio com as temperaturas dos componentes de solda, na união das duas placas, com os parâmetros de processo do Ensaio 1. Observa-se que a temperatura máxima alcançada é próxima aos 550°C e também como a temperatura flui e se distribui para a base de suporte da placa e para a ferramenta.

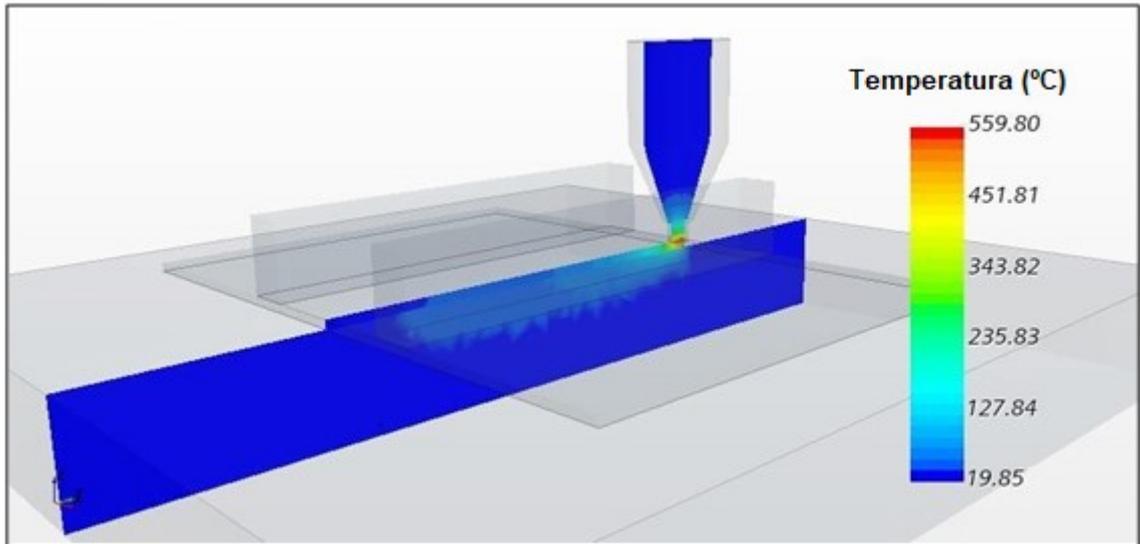


Figura 44 - Representação em corte central das temperaturas durante o processo FSW
 Fonte: Autor

A figura 45 apresenta uma outra imagem que auxilia no entendimento dos fenômenos que ocorrem durante o processo de soldagem FSW, com os parâmetros de processo para o Ensaio 1. Nela é possível observar a cauda que se forma durante o processo, fenômenos influenciados pelo avanço da ferramenta que percorre a peça, pela propagação de temperatura e pelos fenômenos de troca de calor.

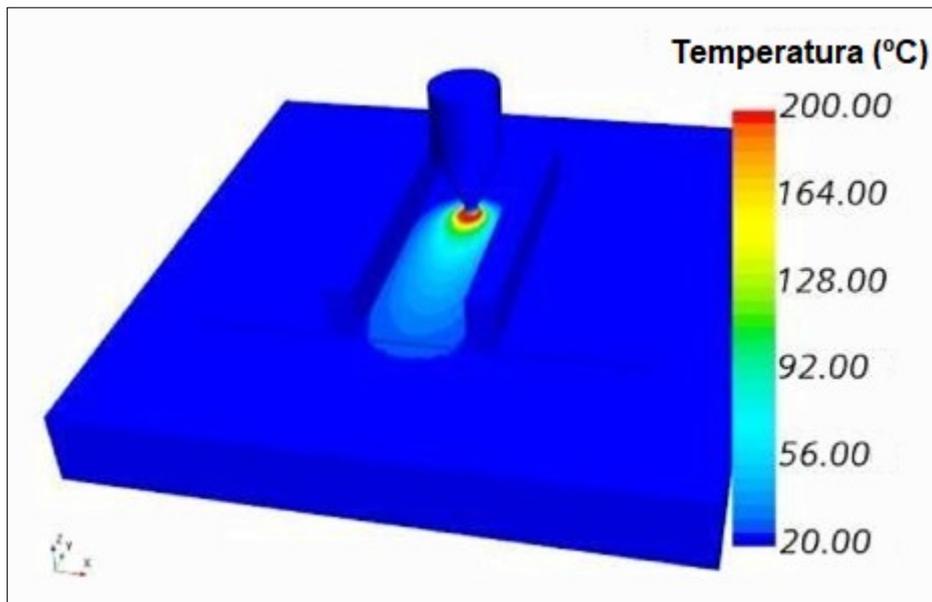


Figura 45 - Temperatura dos componentes durante processo de soldagem FSW
 Fonte: Autor

5.5.4 Influência das variáveis de processo na quantidade de calor gerado e nas temperaturas

Primeiramente foram realizadas todas as simulações que representam os ensaios 1 a 9 de acordo com a calibração e validação ilustradas neste trabalho. Desta forma, com os dados dos modelos numéricos calibrados, foi possível fazer inferências sobre os dados obtidos para entender a influência dos parâmetros de processo na fonte de calor gerado e conseqüentemente nas temperaturas obtidas.

Na Tabela 18 é apresentada a quantidade de calor gerado em cada ensaio. Essa quantidade de calor foi calibrada na simulação de tal modo que as temperaturas do modelo numérico ficassem próximas dos valores de temperatura medidas no ensaio experimental.

Experimento	Rotação (rpm)	Avanço (mm/min)	Calor Gerado Simulação (kW)	Calor Gerado Experimental (kW)
1	600	240	5,70	5,80
2	600	270	5,72	5,78
3	800	240	6,40	6,71
4	800	270	6,55	6,90
5	600	300	5,75	5,95
6	800	300	6,70	6,90
7	700	240	6,05	6,28
8	700	270	6,14	6,31
9	700	300	6,23	6,50

Tabela 18 - Calor gerado durante processo de soldagem FSW

Fonte: Autor

Como modo de validação no modelo numérico, foi calculado o valor da fonte de calor estimada como referência de cada ensaio físico realizado. Esta fonte de calor foi calculada através dos dados de torque e rotação aqüisitados durante os ensaios, levando em consideração que neste tipo de processo de soldagem grande parte da energia empregada na peça é transformado em calor e dissipado para a peça, assim como existem outras perdas, como no motor elétrico que gira a ferramenta durante o processo de solda, que explica porquê as fontes de calor encontradas na simulação são ligeiramente inferiores às calculadas através de dados experimentais.

A boa semelhança entre os dados da simulação e os dados de referência valida mais uma vez o modelo numérico criado. No mais, os dados de simulação

ainda são livres de erros de medição e variações não controladas que podem ter ocorrido nos experimentos físicos realizados.

Analisando a tabela 18, é possível observar duas tendências quanto a quantidade de calor gerado. A primeira delas é que quanto maior o avanço, maior o calor gerado; isso é explicado pela força extra que a ferramenta deve fazer sobre as peças para que ela percorra a mesma distância em um menor espaço de tempo, provocando um aquecimento maior das placas. A segunda tendência é de que quanto maior a rotação da ferramenta, maior é o atrito entre a ferramenta e o material das chapas fazendo com que haja uma maior movimentação do meio plastificado aumentando, assim, a quantidade de calor gerado.

Nas Figuras 46 a 48 são apresentados os valores de temperatura máxima em cada ponto de medição do modelo numérico e os dados experimentais. Os gráficos ilustram a variação da temperatura com a variação do avanço para os três valores de rotação que foram utilizados nos ensaios físicos: 600, 700 e 800 rpm.

É possível notar que os valores máximos de temperatura diminuem com um maior avanço devido ao menor tempo de contato da fonte de calor com as peças. É possível notar também que os dados de simulação são próximos aos dados do experimento, no entanto, os dados da simulação são lineares e corrigem as variações indesejadas de aferição obtidas por experimento, representando assim uma fonte mais limpa e confiável de informação sobre o processo.

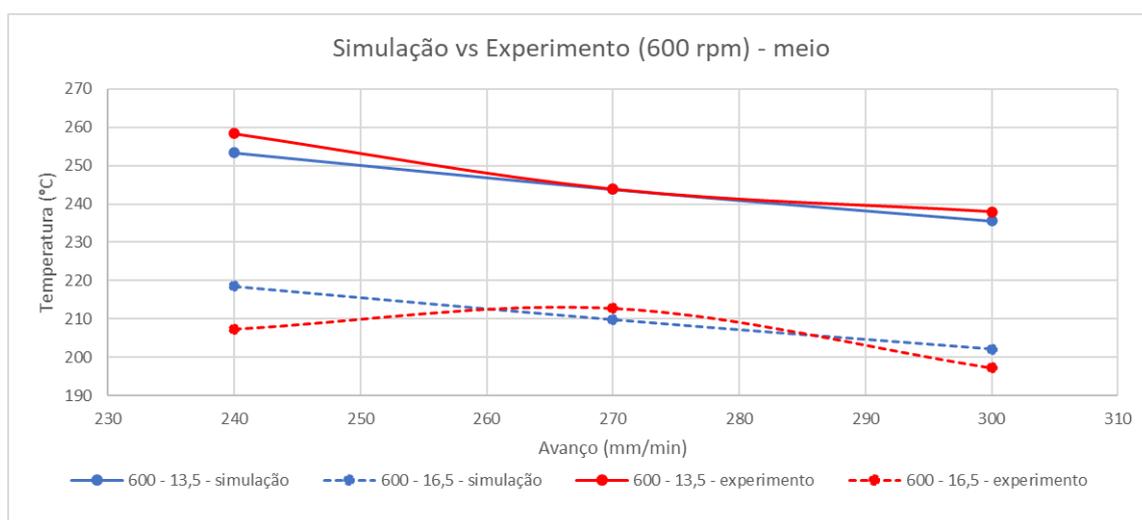


Figura 46 - Variação de temperatura com o avanço para rotação de 600 rpm
Fonte: Autor

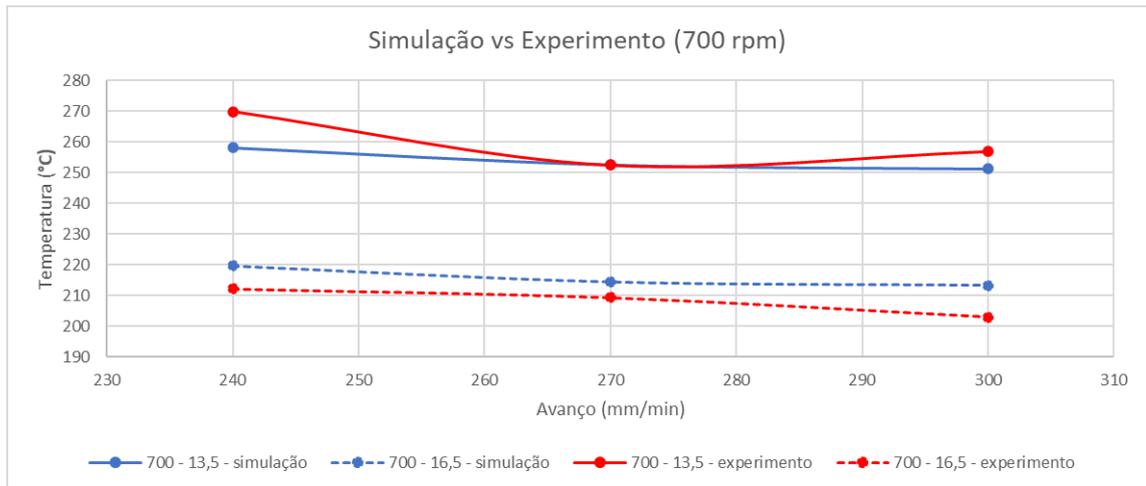


Figura 47 - Variação de temperatura com o avanço para rotação de 700 rpm
Fonte: Autor

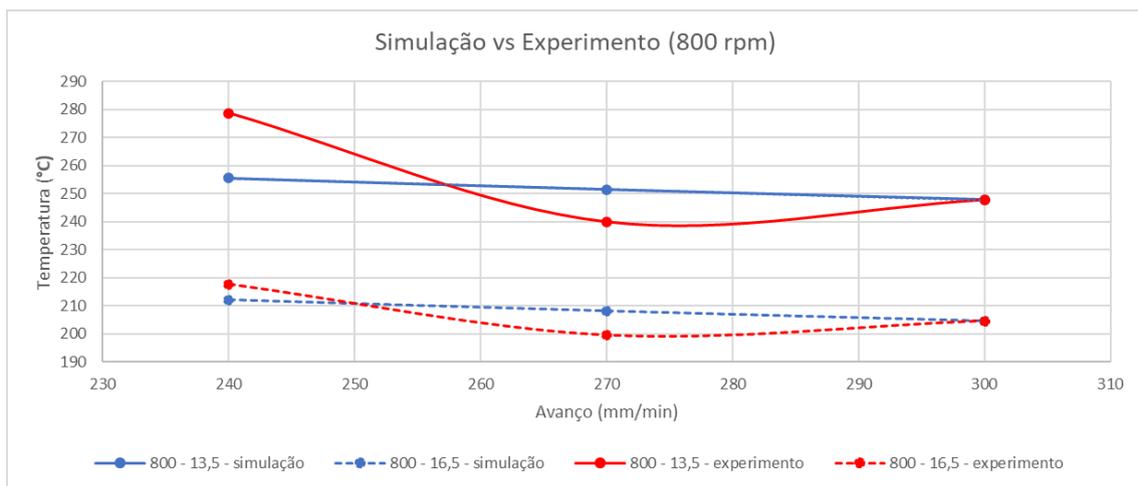


Figura 48 - Variação de temperatura com o avanço para rotação de 800 rpm
Fonte: Autor

5.5.5 Equacionamento da fonte de calor gerado

Com as relações encontradas entre as variações de processo de solda FSW e a fonte de calor gerada, foi possível realizar um equacionamento através das tendências observadas. Este equacionamento permitiu identificar a fonte de calor gerada para parâmetros de processo diferentes dos testados experimentalmente e ter informações importantes para definição dos melhores parâmetros de processo.

Os gráficos apresentados nas Figuras 49 e 50 relacionam a potência (calor

gerado) e a rotação para diferentes avanços e a relação entre potência (calor gerado) e avanço para diferentes rotações, respectivamente. Devido a estas relações apresentarem forte linearidade ($R^2=1$) foi possível equacionar estas relações para termos a fonte de calor gerado com relação a diferentes rotações e avanços. A equação de cada reta obtida através da linearização dos dados obtidos é apresentada nos gráficos.

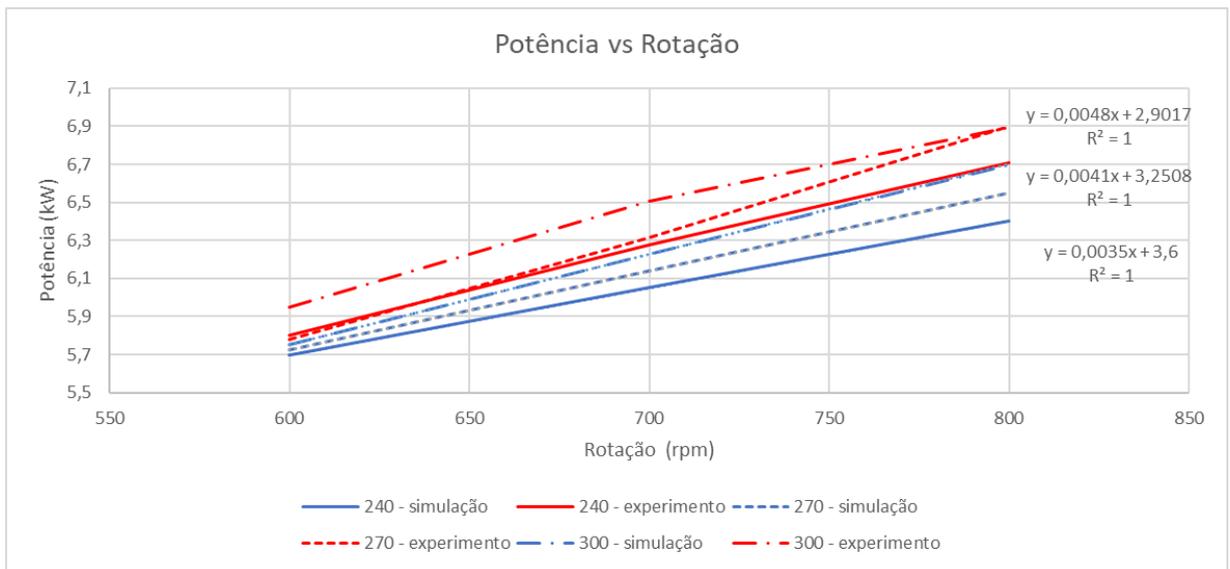


Figura 49 - Relação entre potência e rotação para diferentes avanços
Fonte: Autor

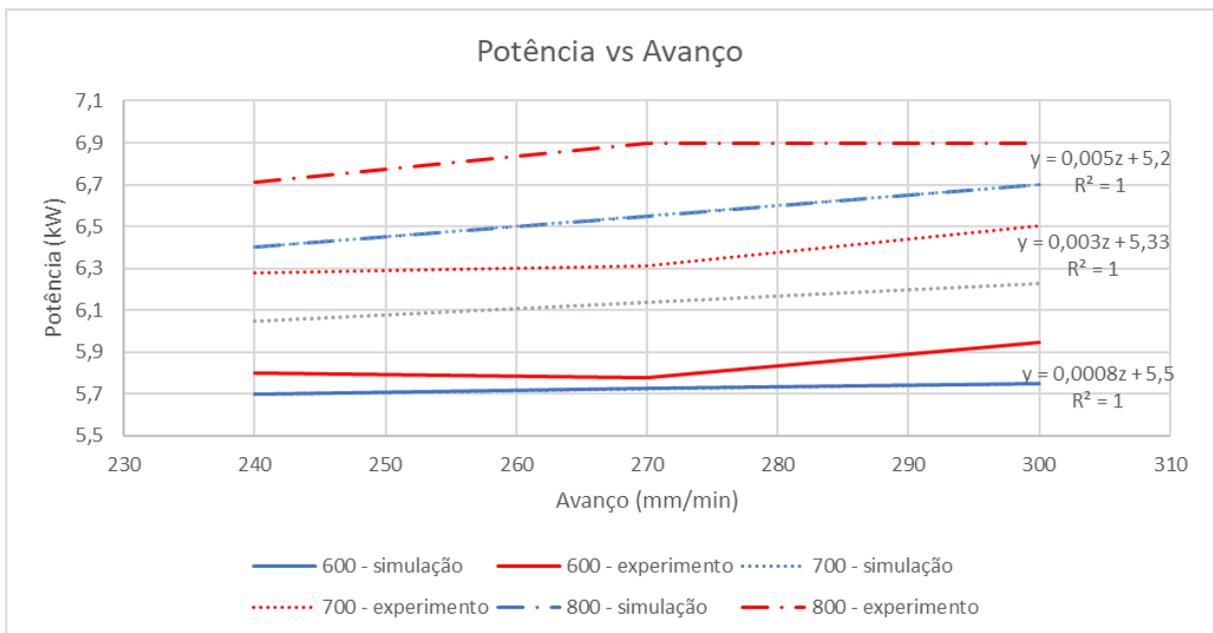


Figura 50 - Relação entre potência e avanço para diferentes rotações
Fonte: Autor

Com isso, coletando as equações linearizadas apresentadas na Figura 49, tem-se:

$$\text{Calor gerado (kW)} = 0,0035 \times \text{Rotação (rpm)} + 3,6000 \rightarrow \text{para avanço} = 240 \text{ mm/min} \quad (3)$$

$$\text{Calor gerado (kW)} = 0,0041 \times \text{Rotação (rpm)} + 3,2542 \rightarrow \text{para avanço} = 270 \text{ mm/min} \quad (4)$$

$$\text{Calor gerado (kW)} = 0,0048 \times \text{Rotação (rpm)} + 2,9250 \rightarrow \text{para avanço} = 300 \text{ mm/min} \quad (5)$$

Com este conjunto de 3 equações é possível então fazer a relação dos termos que são os coeficientes angular e linear com os avanços, como apresentado na Tabela 19.

Avanço (mm/min)	Coef. Angular	Coef. Linear
240	0,0035	3,6000
270	0,0041	3,2542
300	0,0048	2,9250

Tabela 19 – Relação entre avanço e os coeficientes angular e linear
Fonte: Autor

Com estas relações, é possível criar novas equações lineares para os coeficientes angular e linear que tem como variável dependente o avanço e substituir na equação que relaciona o calor gerado com rotação. Portanto, as equações encontradas são apresentadas a seguir:

$$\text{Coeficiente Angular} = 2,0830 \times 10^{-5} \times \text{Avanço (mm/min)} - 0,0015 \quad (6)$$

$$\text{Coeficiente Linear} = -0,0116 \times \text{Avanço (mm/min)} + 6,3930 \quad (7)$$

Por fim, substituindo as equações 6 e 7 na equação 3 que relaciona com a rotação, tem-se:

$$\text{Calor gerado} = (2,0830 \times 10^{-5} \times \text{Avanço} - 0,0015) \times \text{Rotação} - 0,0116 \times \text{Avanço} + 6,3930 \quad (8)$$

As unidades de medida para os termos das equações são: Calor gerado em kW, Avanço em mm/min e Rotação em rpm.

Após o equacionamento, podemos verificar que a acuracidade da equação é muito boa porque os valores estão bem próximos daqueles medidos durante os ensaios experimentais, conforme apresentado na Tabela 20, onde há comparação, também, entre os valores de calor gerado da simulação e os valores obtidos pelo

equacionamento. As curvas de temperatura ao longo da simulação também estão bem próximas das curvas de temperatura do experimento. Além disso, pode-se observar que o erro para os valores obtidos pelo equacionamento é menor que 0,1% quando comparados aos obtidos pela simulação.

Experimento	Rotação (rpm)	Torque (N.m)	Avanço (mm/min)	Calor Gerado Simulação (kW)	Calor Gerado Equação (kW)	Calor Gerado Experimento (kW)
S01	600	92,80	240	5,70	5,70	5,80
S02	600	92,08	270	5,73	5,72	5,78
S05	600	94,68	300	5,75	5,75	5,95
S07	700	85,65	240	6,05	6,05	6,28
S08	700	86,12	270	6,14	6,14	6,31
S09	700	88,75	300	6,23	6,23	6,50
S03	800	80,10	240	6,40	6,40	6,71
S04	800	82,34	270	6,55	6,55	6,90
S06	800	82,31	300	6,70	6,70	6,90

Tabela 20 - Valores de fonte de calor obtidos pela equação
Fonte: Autor

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve por objetivo simular computacionalmente o processo FSW para validação do modelo experimental. Para tanto, foram realizados os testes físicos do modelo experimental e as temperaturas de soldagem foram aferidas; vale ressaltar que os dados supracitados foram obtidos em trabalho anterior. A partir disso, criou-se modelos numéricos virtuais fieis aos modelos físicos experimentais por geometria 3D, com as devidas caracterizações de acordo com os materiais e densidades do modelo físico experimental utilizado. Com o uso desses dados, foi possível calibrar o software SIMCENTER STAR-CCM+, da SIEMENS para a simulação.

Desta forma, foi possível concluir que a simulação computacional, quando devidamente calibrada, apresenta fidelidade e excelente precisão quando comparados ao modelo experimental. Os valores encontrados virtualmente para a quantidade de calor gerado e as temperaturas das peças durante o processo de soldagem foram validados, sem apresentar discrepâncias numéricas significativas, o que possibilita identificar, isolar e testar variações virtualmente, com baixo custo e tempo, para desenvolver parâmetros precisos e otimizar o processo; já que saber a quantidade de calor gerado é essencial para o processo de solda por atrito FSW, por este possuir uma faixa ideal de temperatura para obter juntas de qualidade.

Foi possível observar que as curvas de temperatura da simulação computacional estiveram bem próximas das curvas de temperatura obtidas durante o experimento, independente da rotação adotada (600, 700 ou 800 rpm), e da velocidade de avanço (de 240, 270 ou 300 mm/min); além disso, observa-se que os valores máximos de temperatura diminuem com um maior avanço devido ao menor tempo de contato da fonte de calor com as peças. Ao final do processo, nota-se uma tendência de descolamento da curva de temperatura, isso se deve, dentre outros fatores pela menor área de material para dissipação do calor e devido às possíveis variações nas propriedades do material provocadas pelas elevadas temperaturas atingidas durante o processo.

Por fim, conseguiu-se relacionar os parâmetros do processo (rotação e velocidade de avanço) com a quantidade de calor gerada através do equacionamento. Os valores da quantidade de calor obtida através da equação

apresentou variação de erro menor que 0,1% quando comparado aos valores obtidos na simulação, além disso, esses valores são bem próximos aos valores experimentais considerando que a maior parte da potência envolvida no processo seja transformada em calor.

7 TRABALHOS FUTUROS

- Analisar a influência da geometria do pino da ferramenta na geração de calor durante o processo de soldagem;
- Analisar as variações de temperatura nos lados de avanço e retrocesso;
- Verificar a influência dos parâmetros do processo na zona de mistura;

REFERÊNCIAS

ABAL - Associação Brasileira do Alumínio. Boletim eletrônico. 12ª Edição. Disponível em: <www.abal.org.br>. Acesso em: 20 dez. 20.

APDL. National Conference On Recent Trends & Innovations In Mechanical Engineering. India, p. 194-204. abr. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6835: Alumínio e suas ligas - classificação das têmperas. Rio de Janeiro: ABNT. 2000.

AVENTA; "Evolução da solda"; 2017. Disponível em: <http://aventa.com.br/novidades/infografico-historia-da-soldagem>; Acesso em: 20/12/2020

A. Timesli, H. Zahrouni, B. Braikat, A. Moufki, and H. Lahmam, "Numerical model based on meshless method to simulate FSW," in Particle-Based Methods: Fundamentals and Applications, vol. 2 of Computational Methods in Applied Sciences, pp. 651-662, 2011.

BENZ, W., Asphaug, E. Simulation of brittle solids using smooth particle hydrodynamics. Computer Physics Communications 87, 253–265, 1995.

BURFORD, D.; GIMENEZ, P.; BOLDSAIKHAN, E. Evaluation of friction stir weld process and properties for aerospace application: e-NDE for friction stir processes. Annual Technical Review Meeting. Washington: [s.n.]. 2010.

CERVEIRA, R. Caracterização experimental do comportamento mecânico sob sollicitação multiaxial em junções de chapas AA 2024-T3 soldadas por fricção-mistura. 2008. 156 f. Dissertação de Mestrado (Pós graduação em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br>>. Acesso em: 12 Abr 2019.

CHEN, Y. C. & Nakata, K. Microstructural characterization and mechanical properties in friction stir welding of aluminum and titanium dissimilar alloys. Materials and Design, pp. 469 – 474, 2009.

CHEN, Z. W. Y. S. Microstructures interface region and mechanical behavior of friction stir lap Al6060 to Ti-6Al-4V welds. Materials Science & Engineering A634, pp. 37 – 45, 2015.

COLEGROVE, P. A; SHERCLIFF, H. R. Development of Trivex friction stir welding tool Part 1 – two-dimensional flow modelling and experimental validation. Science and Technology of Welding and Joining, v. 9, n. 4, p. 352–361, 2004.

CRUZ, M. F. Desenvolvimento dos parâmetros de friction stir welding - FSW aplicado na junta de topo de chapas finas de alumínio de alta resistência. p. 162, 2009.

DAWES, C. J. et al. Development of the new friction stir technique for welding aluminum phase II. Cambridge, UK: [s.n.].

DAWES, C. J.; THOMAS, W. M. Development of improved tool designs for friction stir welding of aluminum. Proceedings of the 1th International Symposium on Friction Stir Welding. Anais. Thousand Oaks, CA, USA: TWI, 1999.

DURSUN, T.; SOUTIS, C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys. Materials and Design, v. 56, p. 862–871, 2014.

EAA - European Aluminium Association. Disponível em: <www.aluminium.org>. Acesso em: 05 dez. 2020.

FARIAS, Adalto de. Avaliação do processamento por atrito linear em chapas da liga de titânio Ti-6Al-4V. 2015. 250 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2015.

FONDA, R. W.; BINGERT, J. F.; COLLIGAN, K. J. Texture and grain evolutions in a 2195 friction stir weld. Proceedings of the 5th International Friction Stir Welding Symposium. Anais.Metz, France: Los Alamos, NationalLaboratory, 2004a.

FONDA, R. W.; BINGERT, J. F.; COLLIGAN, K. J. Development of grainstructure during friction stir welding. Scripta Materialia, v. 51, n. 3, p. 243–248, 2004b.

GENICOLO, M. Estudo de viabilidade para implementação de uniões soldadas pelo método Friction Stir Welding em estruturas aeronáuticas. 2007. 62 f. Dissertação de Mestrado (Pós- graduação em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br>>. Acesso em: 13 Abr 2019.

HASAN, A.f.. CFD model lingof friction stir welding (FSW) processof AZ31 magnesium alloy using volume of fluid method. Journal Of Materials Research And Technology. Iraque, p. 1819-1827. jan.2019.

HASAN A, et al. A numerical methodology for predicting tool wear in FrictionStirWelding, 2017.

HASAN AF. Model lingof tool wearand metal flow behavior in friction stir welding (FSW). University of Nottingham; 2016.

HEINZ, B. and Skrotzki, B.: Characterisation of a friction-stir-welded aluminium alloy 6 013. Metall. Mater. Trans. 33B, 489, 2002.

HILLER, D. J. Estudo de parâmetros e percursos no processo de soldagem de mistura por atrito (FSW) da liga de alumínio 5052. São Paulo: [s.n.], 2007.

IAI - International Aluminium Institute. Improving sustainability in the transport Sector Through Weight Reduction and the Application of Aluminium. Disponível em: <www.world-aluminium.org>. Acesso em: 20 dez. 2020.

JACUMASSO, C. Sheila. Caracterização microestrutural das partículas de segunda fase de uma liga de alumínio AA7050 nas condições T7451, T6 e T6I4- 65. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2014.

KAH, P. et al. Investigation of weld effects in friction-stirweldingand fusion weldingofaluminiumalloys. InternationalJournalofMechanicalandMaterialsEngineering, 22 Dec. 2015.

KANG, Sungwook&Jang, Beom. A study on computational fluid dynamics simulation of friction stir welding. (2013).

KRISHNAN, K. N. On the formation of onion rings in friction stir welds. Materials Science and Engineering A, v. 327, n. 2, p. 246–251, 2002.

KUMAR, T.pavan; ANUPOJU, Madhu; MUNNANGI, RamanjaneyaReddy; REDDY, Dr.prabhakar. Friction Stir Welding (FSW) Simulation using FEA Techniques Parametric Study using Ansys

MARCONATO, E.A.; “Influencia de defeitos nas propriedades mecanicas de juntas soldadas por FSW da liga AA 6013-T6” Dissertação de Mestrado (Engenharia de Materiais) – UFSCAR, São Carlos, 2009.

MISHRA, R. S.; MA, Z. Y. Friction stir welding and processing. Materials Science andEngineering: R: Reports, v. 50, n. 1–2, p. 1–78, ago. 2005.

MISHRA, R. S.; MAHONEY, M. W. Friction Stir Welding and Processing. 1. ed. [s.l.] ASM International, 2007.

NANDAN, R.; DEBROY, T.; BHADESHIA, H. K. D. H. Recent advances in friction-stirwelding - Process, weldments tructureand properties. Progress in Materials Science, v. 53, n. 6, p. 980–1023, 2008.

OOSTERKAMP, A.; OOSTERKAMP, L. D.; NORDEIDE, A. "Kissing Bond" Phenomena in Solid- State Welds of Aluminum Alloys. *The Welding Journal*, n. August, p. 225–231, 2004.

PADHY, G.K., et al., *J. Mater. Sci. Technol.* Friction stir based welding and processing technologies – processes, parameters, microstructures and applications: A review, 2017.

PADMANABAN, R.; KISHORE, V. Ratna; BALUSAMY, V.. Numerical Simulation of Temperature Distribution and Material Flow During Friction Stir Welding of Dissimilar Aluminum Alloys. In: 12TH GLOBAL CONGRESS ON MANUFACTURING AND MANAGEMENT, GCOMM 2014, 97, 2014, India. Article. India: Elsevier Ltd, 2014. p. 854-863.

PAN, W., Tartakovsky, A., Monaghan, J. A smoothed particle hydrodynamics model for ice sheet and ice shelf dynamics. *Journal of Glaciology* 58 (207), 216–222, 2012.

PAN, Wenxiao et al. A new smoothed particle hydrodynamics non-Newtonian model for friction stir welding: Process modeling and simulation of microstructure evolution in a magnesium alloy. *International Journal Of Plasticity*. EUA, p. 189-204. 14 mar. 2013.

PASCOAL JUNIOR, Fernando Antônio. Análise Microestrutural, Tenacidade à Fratura e Vida em Fadiga das Ligas AA7050-T7451 e AA2050-T84 (Al-Li). 2014. 156 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências, Escola de Engenharia de São Carlos (USP), São Carlos, 2014.

PEEL, M., et al., Dissimilar friction stir welds in AA5083-AA6082. Part I: Process parameter effect on thermal history and weld properties. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2006. 37(7): p. 2183-2193.

PRADO, R. A.; MURR, L. E. Tool wear in the friction-stir welding of aluminum alloy 6061+20% Al₂O₃: a preliminary study. *Scripta Materialia*. El Paso, p. 75-80. Feb. 2001.

PODRŽAJ, P.; JERMAN, B.; KLOBČAR, D. Welding defects at friction stir welding. *METALURGIJA*, Croatia, p. 387-389, Apr. 2015.

RHODES, C. G. et al. Effects of friction stir welding on microstructure of 7075 aluminum. *Scripta Materialia*, v. 36, n. 1, p. 69–75, 1997.

RODRIGUES, M.; "Estudo das propriedades mecânicas em juntas de chapas espessas de alumínio aeronáutico soldadas por atrito linear e mistura (FSW)" Dissertação de mestrado (Engenharia Mecânica) - Universitário FEI; São José dos Campos; 2020.

R. JUNIOR, A. Estrutura Integral por Soldagem por Atrito "Friction Stir Welding – FSW" – Requisitos Básicos Para o Projeto Estrutural. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2003.

SILVA, P. A. O. Efeitos dos parâmetros de soldagem por atrito linear (FSW) nas tensões residuais, microdureza e microestrutura em juntas dissimilares de ligas AA2024-T3 e AA7475-T761, 2016.

SMITH, C. B. et al. Friction stir welding in the automotive industry. 2001 TMS Annual Meeting Automotive Alloys and Joining Aluminum Symposia (Aluminum 2001), p. 175–185, 2001.

SU, J.; NELSON, T. W.; STERLING, C. J. A new route to bulk nano crystalline materials. *Journal of Materials Research*, v. 18, n. 8, p. 1757–1760, 2003.

SU, J. Q. et al. Microstructural investigation of friction stir welded 7050-T651 aluminium. *Acta Materialia*, v. 51, n. 3, p. 713–729, 2003.

TARTAKOVSKY, A., Ferris, K., Meakin, P. Multi-scale lagrangian particle model for multiphase flows. *Computer Physics Communications* 180, 1874–1881, 2009.

THOMAS, W. M. et al. International Patent Application N. PCT/GB92/02203 UK, 1991.

THOMAS, W.M.; NICHOLAS, E.D.; NEEDHAM, J.C.; MURCH, MG.;TEMPLE-SMITH, P.; DAWES, C.J.; “Friction-stir- butt welding”; GB Patent nº9125978.8; International patent application nº PCT/GB92/02203; 1991

THREADGILL, P. L. Terminology in frictionstirwelding. Science and Technology of Welding and Joining, v. 12, n. 4, p. 357–360, 2007.

THREADGILL, P. L. et al. Friction stir welding of aluminium alloys. International Materials Reviews, v. 54, n. 2, p. 49–93, 2009.

THREADGILL, P. L. Friction stir welding – the state of the art. 1999. Disponível em: <<http://www.twi-global.com/technical-knowledge/industrial-member-reports/friction-stirwelding-the-state-of-the-art-678-1999/>>. Acesso em: 10 Abr. 2019.

YAKABU. Y. D. Caracterização da superfície e propriedades mecânicas da soldagem por atrito linear em juntas tri-dissimilares com ligas de alumínio e liga de titânio, 2016.

ZHANG, Y. N. et al. Review of tools for friction stir welding and processing. Canadian Metallurgical Quarterly, v. 51, n. 3, p. 250–261, 2012.

ZHU, X.; CHAO, Y. Numerical simulation of transient temperature and residual stress in friction stir welding of 304L stainless steel. Journal of Materials Processing Technology, v. 146, p. 263-272, Feb. 2004.