



PROJETO DE GRADUAÇÃO

**CARACTERÍSTICAS DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM  
FCW, FSW e FSP: UMA REVISÃO**

Wellington Nascimento Reis Teixeira

Brasília, Novembro de 2021

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
Faculdade de Tecnologia

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**CARACTERÍSTICAS DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM  
FCW, FSW e FSP: UMA REVISÃO**

**Wellington Nascimento Reis Teixeira**

*Relatório submetido ao Departamento de Engenharia  
Mecânica como requisito parcial para obtenção  
do grau de Engenheiro Mecânico*

Banca Examinadora

Prof. Alysson Martins Almeida Silva, \_\_\_\_\_  
ENM/UnB  
*Orientador*

Prof. Guilherme Caribe de Carvalho, \_\_\_\_\_  
ENM/UnB  
*Examinador*

Prof. Maksym Ziberov, \_\_\_\_\_  
ENM/UnB  
*Examinador*

## **Dedicatória**

*Dedico este trabalho aos meus amados pais.*

*Wellington Nascimento Reis Teixeira*

## Agradecimentos

*Agradeço a todas as pessoas que me ajudaram a desfrutar o caminho, que afinal é mais importante do que o destino final.*

*Meu orientador, família, namorada, Esquema Bacana, Apuama Racing, amigos de Portugal, amigos eternos da época colegial, amigos do "corredor da mecânica", do estágio e trabalho, do esporte.*

*Sintam-se abraçados e homenageados. Sem vocês nada disso seria possível.*

*Wellington Nascimento Reis Teixeira*

---

## RESUMO

A soldagem de metais que possuem difícil soldabilidade é um constante desafio para o estudo metalúrgico dos materiais. Várias técnicas de soldagem são aplicadas para a união destes materiais, porém requerem alta dependência de mão-de-obra qualificada e implicam em baixa produtividade. A soldagem por fricção apresenta uma boa abordagem para este problema, visto que seu recente desenvolvimento apresenta grande campo de estudo e entrega boas soldas com elevada produtividade. Dessa forma, avanços nesta área mostram-se promissores, tanto no desenvolvimento de máquinas robotizadas com elevado incremento de produtividade, quanto na construção de aparatos destinados a estudos em grupos de pesquisa. A proposta deste trabalho é investigar os parâmetros da solda de fricção, e algumas de suas subdivisões, como o *Friction Stir Welding* (FSW), "*Friction Stir Processing*" (FSP) e a "*Friction Crush Welding*" (FCW) aplicados a liga de alumínio escolhida (AA6061-T6) e verificar meios para sua robotização a fim de unir através do processo de soldagem metais de difícil soldabilidade.

**Palavras-chave:** Soldagem por fricção, Parâmetros de soldagem, Liga de Alumínio

---

## ABSTRACT

Welding metals that are difficult to weld is a constant challenge for the metallurgical study of materials. Several welding techniques are applied to join these materials, but they require a high dependence on skilled labor and imply low productivity. Friction welding presents a good approach to this problem, since its recent development presents a large field of study and delivers good welds with high productivity. Thus, advances in this area show promise, both in the development of robotic machines with a high increase in productivity, and in the construction of apparatus intended for studies in research groups. The purpose of this work is to investigate the friction weld parameters, and some of its subdivisions, such as Friction Stir Welding (FSW), "Friction Stir Processing"(FSP) and "Friction Crush Welding"(FCW) applied to the chosen aluminum alloy (AA6061-T6) and verify means for its robotization in order to join metals that are difficult to weld through the welding process.

**Keywords:** Friction welding, Welding parameters, Aluminum Alloy

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1	OBJETIVOS .....	1
1.2	APRESENTAÇÃO DO MANUSCRITO .....	2
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>3</b>
2.1	FUNDAMENTOS DA SOLDAGEM .....	3
2.1.1	CONCEITO E COMPOSIÇÃO .....	3
2.1.2	SOLDAGEM POR FUSÃO .....	3
2.2	SOLDAGEM POR ATRITO .....	4
2.3	METAL DE BASE .....	5
<b>3</b>	<b>SOLDAGEM POR FRICÇÃO COM PINO NÃO CONSUMÍVEL (FSW)</b> .....	<b>7</b>
3.1	OMBRO E PINO .....	9
3.2	PARÂMETROS DO PROCESSO FSW .....	11
3.3	PRINCIPAIS DEFEITOS DA SOLDAGEM FSW .....	11
3.3.1	DEFEITO POR KISSING BOND .....	12
3.3.2	DEFEITO POR FLASH .....	12
3.3.3	DEFEITO POR CAVIDADE OU WORMHOLE .....	13
<b>4</b>	<b>SOLDAGEM POR PROCESSAMENTO DE ATRITO LINEAR (FSP)</b> .....	<b>14</b>
4.1	FSP EM LIGAS DE ALUMÍNIO .....	15
<b>5</b>	<b>SOLDAGEM POR ATRITO E ESMAGAMENTO (FCW)</b> .....	<b>16</b>
5.1	PARÂMETROS DO PROCESSO FCW .....	17
5.2	GEOMETRIA DO DISCO E DO METAL DE BASE .....	17
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>21</b>
6.1	CARACTERÍSTICAS E APLICAÇÕES DOS PROCESSOS .....	21
6.2	VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS PROCESSOS .....	21
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>24</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>25</b>
	<b>ANEXOS</b> .....	<b>31</b>

<b>I</b>	<b>APÊNDICE .....</b>	<b>33</b>
I.1	PROPOSTA DE EQUIPAMENTO .....	33
I.2	PROJETO DO FERRAMENTAL.....	34
I.3	MOTOR ELÉTRICO.....	35
I.4	MODELAGEM DO PROJETO.....	35

# LISTA DE FIGURAS

2.1	Taxonomia dos processos de soldagem (Jr, 2004) .....	4
2.2	Comparação de diferentes ligas e processos de soldagem. (Moreira, 2017) .....	6
3.1	Princípio do processo "Friction Stir Welding"(JÚNIOR, Abel. 2003) .....	8
3.2	- Ferramentas do processo FSW (Capelari e Mazzaferro (2009), modificada). .....	9
3.3	- Detalhe do defeito "kissing bond"(TWI, 2003.) .....	12
3.4	Soldas com "flash"devido ao comprimento pequeno do pino. (FIOVARANTI, 2008). Adaptado) .....	13
3.5	Localização do defeito "wormhole"causado por uma má soldagem, com ampliação de 40x no microscópio.(Arbegast,1998, modificado) .....	13
4.1	Friction Stir Processing para a execução de soldagem com material particulado (Asadi, 2010, modificado) .....	14
5.1	Tipos de metal de base para a solda FCW (a) Flange simples , (b) Adição de solda de topo (c) Junta de topo sobreposta. (Besler, 2017, adaptado) .....	16
5.2	Vista lateral da soldagem por esmagamento (Jamwal et al. , 2019, modificado).....	17
5.3	Vista frontal e geometria do disco de fricção (Besler et al, 2016, modificado) .....	18
5.4	Resistência da solda FCW do Al6061 correlacionado com a rotação do disco .....	19
I.1	Detalhe de uma soldagem FSW (Asadi et al. 2014) .....	33
I.2	Renderização da ferramenta (Ombro+pino) .....	34
I.3	Dimensões principais da ferramenta a ser utilizada no processo FSW para a soldagem da liga Al 6061-T6.....	35
I.4	Vista frontal da mesa de soldagem .....	37
I.5	Vista isométrica do desenho contendo os principais componentes .....	38

# LISTA DE TABELAS

2.1	Percentual de elementos em peso na liga 6061 - T6 (Metals Handbook, 1990) .....	6
2.2	Propriedades Mecânicas da liga 6061 T6 (Metals Handbook, 1990).....	6
3.1	Principais variáveis do processo FSW .....	7
3.2	Vantagens e desvantagens do processo de soldagem FSW.....	9
3.3	Resumo dos efeitos desejados por geometria da ferramenta (Lowasser, 2009, modificado) .....	10
6.1	Vantagens e desvantagens da soldagem FSW.....	22
6.2	Vantagens e desvantagens da soldagem FSP.....	23
6.3	Vantagens e desvantagens da soldagem FCW .....	23
1	Informação representativa sobre experimentos de soldagem FSW encontrados na literatura .....	31
2	Informação representativa sobre experimentos de soldagem FSW encontrados na literatura - continuação .....	32
I.1	Faixa de composição química do aço AISI H13 da ferramenta.....	34
I.2	Parâmetros fixos sugeridos para a soldagem FSW do trabalho .....	35

# LISTA DE SÍMBOLOS

## Símbolos Latinos

<i>Al</i>	Alumínio
<i>Cr</i>	Cromo
<i>Cu</i>	Cobre
<i>Fe</i>	Ferro
<i>Mg</i>	Magnésio
<i>Mo</i>	Molibdênio
<i>O</i>	Oxigênio
<i>P</i>	Fósforo
<i>Si</i>	Silício
<i>Ti</i>	Titânio
<i>V</i>	Vanádio
<i>Zn</i>	Zinco

## Símbolos Gregos

$\pi$	Pi
$\mu$	Mi

## Siglas

AISI	American Iron and Steel Institute
AWS	American Welding Society
FCW	Friction Crush Welding
FSP	Friction Stir processing
FSW	Friction Stir Welding
GMAW	Gas Metal Arc Welding
GRACO	Grupo de Automação e Controle da Universidade de Brasília
GTAW	Gas-Shielded Tungsten Arc Welding

HV	Hardness Vickers
MIG	Metal Inert Gas
SMAW	Shielded Metal Arc Welding
SZ	Zona Mecanicamente Afetada
TMAZ	Zona Termomecanicamente Afetada
TWI	The Welding Institute
USW	Ultrasonic Welding

# Capítulo 1

## Introdução

A soldagem é um dos mais importantes métodos de uniões metálicas utilizadas atualmente na indústria, e seu aprimoramento é algo de constante exigência para obter melhor qualidade e menor custo. Ela consiste no processo de junção de metais por fusão, visando unir duas ou mais peças, assegurando a continuidade de propriedades físicas, químicas e metalúrgicas [Quitês e Dutra 1979]. Desde o seu surgimento, amplas aplicações na indústria adotam esse processo de transformação, o que ressalta a sua importância no estudo da Engenharia Mecânica e Metalúrgica.

Um dos métodos de união é a soldagem por fricção (FSW), que constitui um campo de estudo que apresenta imenso potencial acadêmico e de aplicação industrial, dado a crescente presença de robotização nos processos de manufatura e da necessidade de métodos alternativos que potencializem a redução de custos do processo final. Apesar da sua aplicação por meio de robôs antropomórficos seja relativamente recente, grupos de pesquisa no Brasil ainda são relativamente escassos.

As relações entre força axial, transversal e torque segundo [Cota, Bracarense e Coelho 2017] mostram um bom parâmetro a ser estudado por este trabalho, mostrando etapas para o dimensionamento de um equipamento por soldagem FSW. O método FSW representa uma boa maneira de soldar materiais que são tradicionalmente difíceis de serem soldados pelo método de fusão, como as ligas de alumínio e magnésio, nomeadamente. Este trabalho se propõe a estudar e dimensionar um sistema de soldagem por fricção para fins de robotização e continuação dos seus resultados em pesquisas futuras pelo grupo de pesquisa da Universidade de Brasília.

### 1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho é fazer uma introdução e revisão bibliográfica da soldagem e de seus métodos, nomeadamente a soldagem por fricção. Este trabalho tem como objetivo realizar um estudo comparativo entre três subtipos de soldagem por atrito denominados em inglês “*Friction Stir Welding*” (FSW), “*Friction Stir Processing*” (FSP), e “*Friction Crush Welding*” (FCW) e suas aplicações em ligas metálicas, especificamente a liga de alumínio AA6061 T6, ~~dentro do grupo GRACO UnB (Grupo de Automação e Controle), da Universidade de Brasília (UnB).~~

Posteriormente, o trabalho desenvolvido será utilizado como suporte teórico para construção e adaptação de equipamento para construção de um sistema FSW para futuros estudos e pesquisas a serem desenvolvidos pelo grupo GRACO - UnB.

## 1.2 Apresentação do manuscrito

Este trabalho está dividido em seis capítulos. O primeiro capítulo trata da motivação do trabalho e objetivos. O segundo capítulo trata de uma revisão bibliográfica acerca dos tipos de soldagem, incluindo o método de soldagem por fricção e o metal de base estudado. O terceiro capítulo apresenta uma revisão da soldagem FSW. O quarto capítulo é referente ao processo de soldagem FSP, seguido do método de soldagem FCW no quinto capítulo. O conjunto de ~~das~~ conclusões no capítulo 7. O apêndice contém material complementar, que traz uma proposta inicial de adaptação de projeto para a construção de uma solda por fricção para o GRACO - UnB.

## Capítulo 2

# Revisão Bibliográfica

### 2.1 Fundamentos da soldagem

#### 2.1.1 Conceito e Composição

Segundo a "*American Welding Society*" (AWS), soldagem é operação que visa obter a coalescência localizada produzida pelo aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a aplicação de pressão e de metal de adição. A união de duas peças metálicas para qualquer que seja a aplicação apresenta diversas formas de fazê-lo, além das naturais e amplas aplicações. A soldagem aparece em evidências históricas desde a antiguidade, mas desde o final da segunda metade do século XX, com a patente de Bernardos e Olszewski a soldagem avança a passos rápidos, contendo mais de 50 processos diferentes de união entre metais nos dias de hoje.

Outra definição de soldagem divide o processo em dois grandes grupos, dos quais parte do escopo deste trabalho está enquadrado. Um primeiro grande grupo consiste na deformação das superfícies até uma distância mínima na escala molecular e a partir disso ocorre a união dos metais. Este processo pode ser facilitado com o auxílio ou não de uma fonte de calor. Este primeiro método engloba os processos de soldagem por pressão. Métodos como FSW (Soldagem por fricção com pino não consumível) e FCW (Soldagem por atrito e esmagamento) são exemplos deste método.

O segundo método de soldagem induz uma aplicação de uma fonte de calor na superfície a ser unida e por meio de um fusão gerada ocorre a união metálica. Este grande grupo de processos é denominado de soldagem por fusão. Soldagem do tipo GMAW em inglês "Gas Metal Arc Welding" (Solda tipo MIG -do inglês "Metal Inert Gas"), SMAW em inglês "Shield Metal Arc Welding" (Soldagem a arco elétrico), USW (Soldagem por ultrassom) são exemplos contidos neste grupo. Segue-se uma revisão bibliográfica dos principais métodos de soldagem nas seções subsequentes.

#### 2.1.2 Soldagem por fusão

O meio mais amplamente utilizado pela indústria é a soldagem por fusão, ~~onde~~ o metal de base é fundido, juntamente com o metal de adição com o auxílio de uma fonte de calor. Segundo

[Jr 2004], a soldagem pode ser dividida, com base no tipo de fonte, como elétrica, energia radiante e arco conforme o desenho esquemático apresentado na figura 2.1.

Os métodos mais utilizados seguindo o processo de soldagem por fusão são a soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido (SMAW), soldagem a arco elétrico com gás de proteção (GMAW) e soldagem por eletrodo de tungstênio não consumível (GTAW). [Jeyaparakash, Haile e Arunprasath 2015]

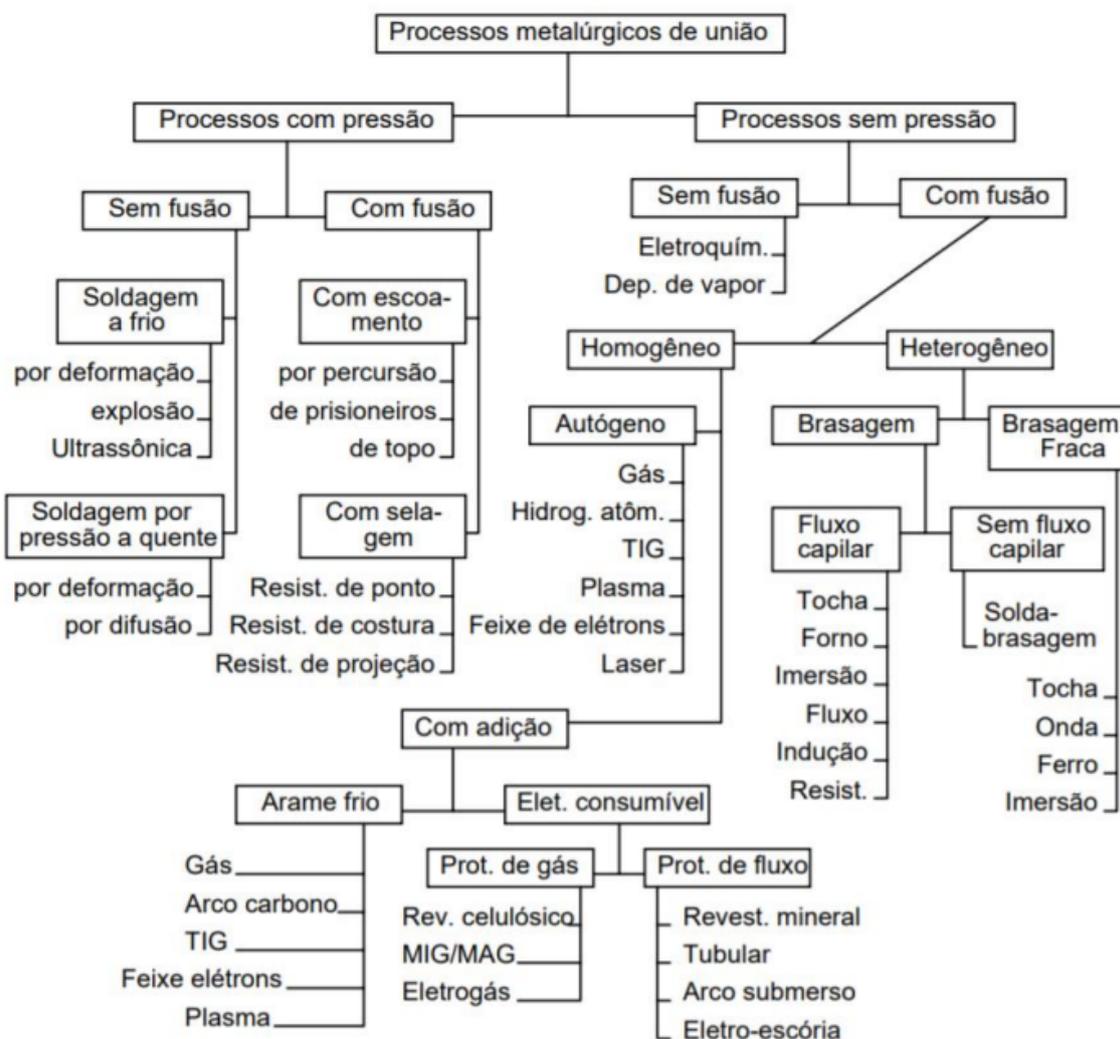


Figura 2.1: Taxonomia dos processos de soldagem (Jr, 2004)

## 2.2 Soldagem por atrito

A soldagem por atrito utiliza fundamentos do contato entre superfícies abordadas pela tribologia, em que a superfície de um sólido representa uma forma de matéria mais complexa do que um simples plano. As irregularidades e características de uma superfície real influenciam as reações químicas que ocorrem quando do contato com meio fluidos lubrificantes ou não, enquanto o parâmetro rugosidade controla o mecanismo de contato entre sólidos e o desgaste

[Stachowiak e Batchelor 2000]

As superfícies apresentam diversas irregularidades quando observadas na escala nanométrica, fato que permite a coalescência dos materiais quando expostos a pequenas distâncias no arranjo atômico. A técnica de soldagem por atrito utiliza o fato da irregularidade da superfície a nível atômico e força um deslocamento relativo entre duas superfícies em que se deseja unir. Essas irregularidades, quando expostas a uma pressão e deslocamento são unidas metalurgicamente.

Segundo [Oosterkamp, Oosterkamp e Nordeide 2004], para a formação de novas ligações químicas primárias entre a maioria dos metais é necessário um contato entre asperezas a distâncias menores que 1nm, onde para se obter este contato entre duas superfícies é necessário um processo de deformação que ultrapasse a tensão de escoamento. Para metais com superfícies limpas, uma deformação de 10% seria suficiente. Porém, como no caso do alumínio, devido à presença natural de óxido na superfície, são necessários maiores níveis de pressão e deformação para a obtenção de asperezas livres de óxido, sendo estimado, a necessidade de 40% de deformação a temperatura ambiente.

O fato de ocorrer o atrito entre as superfícies, acrescido de uma pressão imposta pelo atrito resulta em uma soldagem que ocorre em um nível de temperatura inferior à temperatura de fusão dos materiais, pois a geração de calor necessária para se atingir este nível inferior de temperatura é possibilitado devido ao atrito entre as peças, juntamente com a deformação plástica imposta.

## 2.3 Metal de base

Para execução do estudo, o metal de base utilizado será a liga de alumínio da série 6000, sendo escolhido especificamente a liga de alumínio 6061 T6, que tipicamente possui os elementos Magnésio (Mg) e o Silício (Si) como elementos principais da liga, que precipita  $Mg_2Si$  como uma fase de reforço. Esses elementos podem estar presentes em quantidades apropriadas para apenas formar a fase  $Mg_2Si$ , ou podem estar em excesso de Si daquele requerido para formar  $Mg_2Si$ . [Moharami et al. 2020]

Entretanto, para se atingir as crescentes demandas da indústria, com uma junção de maior resistência, baixo peso e boa usinabilidade, aliado a uma boa resistência à corrosão, o tratamento térmico T6 é recomendado. O tratamento térmico T6 envolve dois processamentos: envelhecimento artificial e solubilização.

Esta liga é extensivamente utilizada em barras, chapas e perfis para indústrias automotivas, usinagem de precisão e indústria aeroespacial. [Anas et al. 2020].

A soldabilidade desta liga observada após as soldagens por atrito apresenta um padrão relativamente comum: a recristalização da zona termicamente afetada apresenta uma mudança na microestrutura, com aumento local da dureza em comparação com outras áreas não soldadas. Naturalmente, pela área soldada ser térmica e mecanicamente exigida, é notável perceber que alguns autores discorrem tanto a influência do método de união quanto sobre a presença dos elementos químicos aglutinantes na liga, bem como o tratamento térmico feito antes da soldagem.

Tabela 2.1: Percentual de elementos em peso na liga 6061 - T6 (Metals Handbook, 1990)

Componente	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Peso Máximo (%)	0.8	0.7	0.4	0.15	1.2	0.35	0.25	0.15	98.6

Tabela 2.2: Propriedades Mecânicas da liga 6061 T6 (Metals Handbook, 1990)

Limite de Resistência a tração [MPa]	290
Tensão de Escoamento [MPa]	186
Dureza Brinell [HB]	95
Módulo de Elasticidade [GPa]	68.9

A liga escolhida possui notoriamente uma boa soldabilidade [Maisonnette et al. 2011] e vários estudos implicam no seu potencial uso como material para soldagem por fricção.

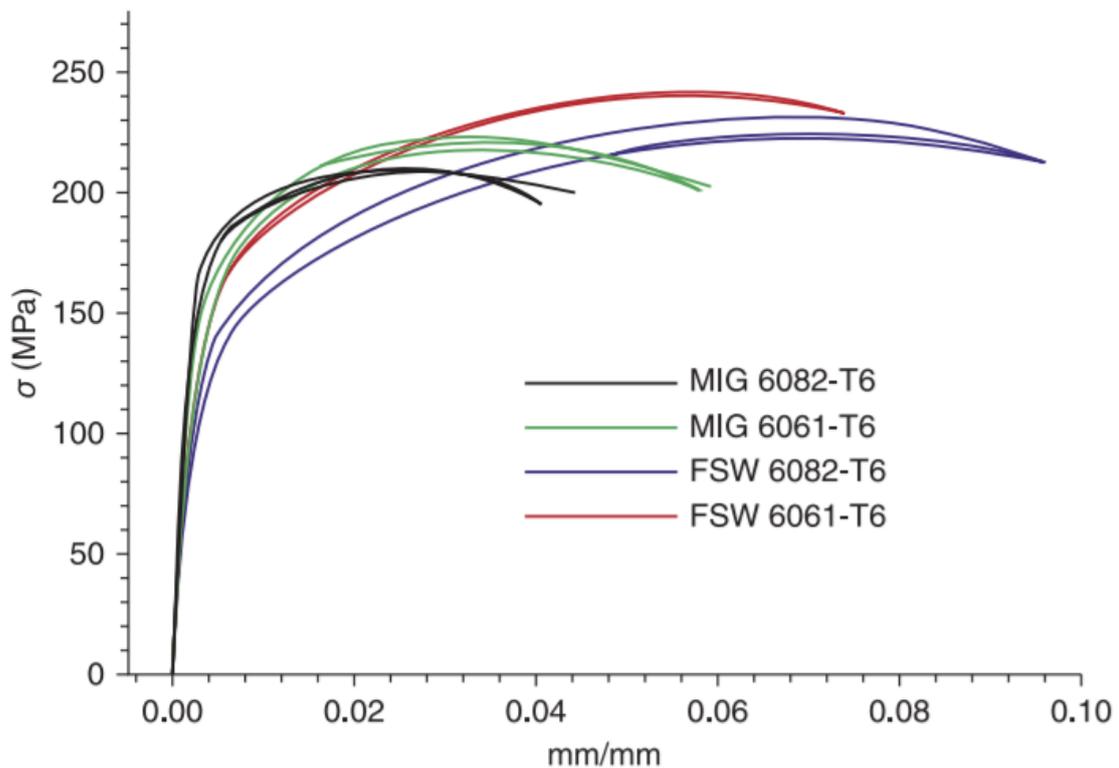


Figura 2.2: Comparação de diferentes ligas e processos de soldagem. (Moreira, 2017)

[Moreira, Figueiredo e Castro 2007] demonstra, na figura 2.2, que a liga de alumínio 6061-T6 possui vantagens quando submetida à soldagem por fricção até mesmo em comparação com soldagens por fusão. Quando submetida a FSW, a solda apresentou um melhora de 51% da tensão de escoamento e 70% para a resistência à tração.

## Capítulo 3

# Soldagem por fricção com pino não consumível (FSW)

Segundo a AWS, a soldagem por fricção é um método em que a união dos metais é obtida por meio do calor resultante da fricção (devido ao atrito) e a deformação plástica causada pela rotação causada pela ferramenta. A soldagem por fricção é um método que se iniciou após a segunda guerra mundial e teve maior estudo a partir das últimas décadas do século XX, nomeadamente pelas patentes europeias apresentadas ao “*The Welding Institute*” (TWI) na década de 1990.

Segundo [Fonseca et al. 2013], processo FSW tem sido motivo de intensa pesquisa e tem ganhado relevância no setor produtivo devido às diversas vantagens técnicas e econômicas. Apesar do recente crescimento no estudo desta técnica, a gama de metais compreendidos neste método ainda é restrito àqueles com baixa temperatura de fusão, notadamente o alumínio e o magnésio. Apesar de serem metais conhecidos pela baixa soldabilidade e pela alta dificuldade na soldagem, estes materiais apresentam bons resultados com o método FSW.

Tabela 3.1: Principais variáveis do processo FSW

Variáveis do maquinário	Variáveis da ferramenta	Outras variáveis
Velocidade de rotação da ferramenta (ombro + pino)	Diâmetro do pino	Fixação das chapas a serem soldadas
Velocidade de avanço da soldagem	Altura do pino	Tamanho da base do maquinário
Força vertical e penetração da ferramenta	Tipo de material da ferramenta (ombro + pino)	Material e tamanho da mesa de suporte
Inclinação relativa da ferramenta		

Apesar de conter menos variáveis, comparado relativamente à soldagem por fusão, os reduzidos fatores apresentam enorme influência na qualidade da solda, até mesmo o material e dimensões da mesa de apoio à chapa de metal [Colligan e Mishra 2008] possui efeitos residuais na força vertical e na dispersão de calor gerada com a solda FSW.

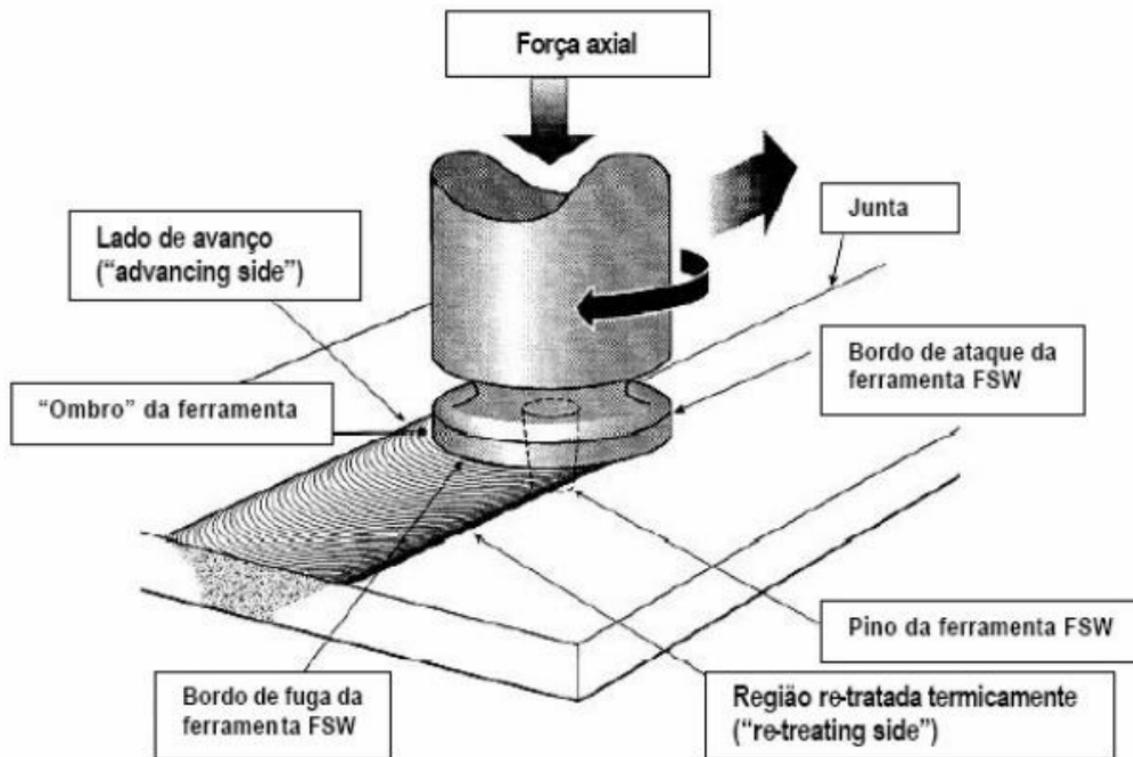


Figura 3.1: Princípio do processo "Friction Stir Welding"(JÚNIOR, Abel. 2003)

Conforme mostrado na figura 3.1, um processo rotativo ocorre, juntamente com uma pressão aplicada, possibilitando a formação do processo “Friction Stir Welding”, aliado a uma formação de calor gerada pelo atrito entre a peça rotativa e as juntas. O resultado é uma solda autógena inteiramente no estado sólido, com uma temperatura de trabalho que não excede 80% da temperatura de fusão da liga [Li, Murr e McClure 1999]. A tabela 3.2 é apresentada evidenciando-se as vantagens e desvantagens deste processo, de acordo com ASM (1993), [Mishra e Ma 2005],[Verma e Misra 2015], [Tavares 2017].

De acordo com a tabela 3.2, a soldagem FSW representa uma boa alternativa para soldar metais de difícil soldabilidade, além de representar uma nova possibilidade de linha de pesquisa para o grupo GRACO, possibilitando um grande ganho de produtividade e hipóteses de desenvolvimento acadêmico para o grupo.

Tabela 3.2: Vantagens e desvantagens do processo de soldagem FSW

Vantagens	Desvantagens
Ausência de fumos ou faíscas	Necessidade de um sistema muito robusto
Ausência de defeitos provenientes da fusão, como: porosidade, rebaixos e bolhas	Obrigatoriedade da substituição da ferramenta de acordo com a espessura da peça
Não é necessário o uso de metal de adição, fluxo ou gás de proteção	Não permite a soldagem de materiais com baixo coeficiente de atrito, como latão e ferro fundido.
Não é requerida a qualificação do soldador	O custo do equipamento é alto
Não é necessária atenção especial com a limpeza da superfície a ser soldada, pois o atrito remove as impurezas para a região de rebarba	Necessidade de simetria da peça para maior aporte térmico e conseqüentemente melhor processo de soldagem (BOZ e KURTZ, 2004)
O processo pode ser facilmente automatizado, possibilitando maior controle de qualidade	O processo é normalmente limitado a execução de soldas de topo planas e angulares (ou cônicas)

### 3.1 Ombro e Pino

A descrição da ferramenta evidencia uma divisão em duas partes: Ombro e pino. A geometria da ferramenta é um dos fatores de maior influência no desenvolvimento do processo [Mishra e Ma 2005](Mishra e Ma, 2005).

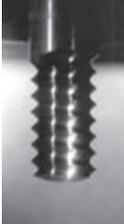
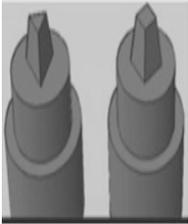


Figura 3.2: - Ferramentas do processo FSW (Capelari e Mazzaferro (2009), modificada).

A ferramenta possui duas funções primárias: (a) aquecimento localizado e (b) escoamento do material. No estágio inicial do contato da ferramenta o aquecimento resulta primariamente da fricção entre a ferramenta e a junta, sendo que parte do aquecimento é resultado da deformação do material. Levando-se em conta o aspecto do aquecimento, o tamanho relativo do pino e o

diâmetro do ombro são importantes, sendo que outros parâmetros de projeto não são críticos. Além disso, o ombro proporciona o confinamento do volume aquecido do material. A segunda função da ferramenta é misturar e mover o material.

**Tabela 3.3:** Resumo dos efeitos desejados por geometria da ferramenta (Lowasser, 2009, modificado)

Configuração da ferramenta	Efeito Desejado	Exemplos
Passo progressivo (pino)	Maior compressibilidade da área soldada mais próxima da mesa de apoio	
Sem reentrâncias (pino)	Maior seção da área soldada Maior adição de calor	
Pino liso	Aumento da TMAZ Maior robustez (limite de escoamento)	
Forma geométrica (triangular ou trapezoidal) (pino)	Redução das forças laterais na ferramenta Aumento da área soldada	
Ombro cônico	Variação da área de contato durante a soldagem Variação da penetração do pino	

## 3.2 Parâmetros do processo FSW

Segundo [Zettler et al. 2006], é importante ressaltar que os avanços nos estudos da FSW permitem discretizar fatores para o projeto principalmente da ferramenta, visto que este fator muda para cada tipo de soldagem a ser realizada. Com o auxílio dos valores pré-determinados antes do processo da soldagem, pode-se quantificar fatores que não eram considerados inicialmente, como a taxa de dissipação de calor e o escorregamento relativo durante a penetração. De acordo com a equação 3.1, nota-se:

$$dq_{hg} = \delta[(\omega r) - (V \sin\theta)]\mu dA \quad (3.1)$$

Aonde:

- $dq_{hg}$  é a taxa local de dissipação de calor
- $\delta$  é a extensão do escorregamento
- $\omega$  é a velocidade angular da rotação da ferramenta
- $r$  é a distância radial entre o pino e a ferramenta
- $V$  é a velocidade da soldagem
- $\theta$  é o ângulo entre o vector radial ( $r$ ) e a direção de soldagem
- $\mu$  é o coeficiente de atrito
- $p$  é a pressão aplicada pela ferramenta em relação ao  $dA$

Percebe-se da equação 3.1 que quando  $\delta$  é 1, nada do material adere-se à ferramenta e todo o calor é gerado exclusivamente pela fricção. No caso em que  $\delta$  tende a 0, todo o calor é gerado pela deformação plástica.

A suposta dificuldade de aplicação desta equação se dá em virtude da dificuldade de medição do grau de escorregamento da ferramenta, juntamente com o coeficiente de atrito, que por ser dinâmico, é alterado durante o processo de soldagem. Entretanto a equação 3.1 é importante para atingir um grau de previsibilidade do modelo teórico e o real, obtendo mais uma ferramenta para auxiliar nos parâmetros de robotização do processo. [Nandan, DebRoy e Bhadeshia 2008].

Aqui caberia colocar valores típicos de coeficientes de atrito e de pressão aplicada. A pressão é da ordem da tensão de escoamento do material?

## 3.3 Principais defeitos da soldagem FSW

Embora a soldagem FSW não seja processo livre de defeitos, [James et al. 2005] relata que a quantidade de defeitos em processos de soldagem por atrito geralmente é pequena se comparada à quantidade encontrada em processos por fusão. Algumas dessas falhas são a falta de penetração do pino, a formação de cavidade (ou "wormhole"), "flash" e a presença de "kissing bonds".

### 3.3.1 Defeito por Kissing Bond

O defeito “kissing bond” é um defeito específico observado na união de elementos quando dois materiais sólidos estão em contato mas não **apresentam** ou pouco se conectam metalurgicamente. Este tipo de defeito é uma grande questão na soldagem FSW, pois esta falha pode reduzir a vida útil de fadiga e além disso é de difícil detecção.

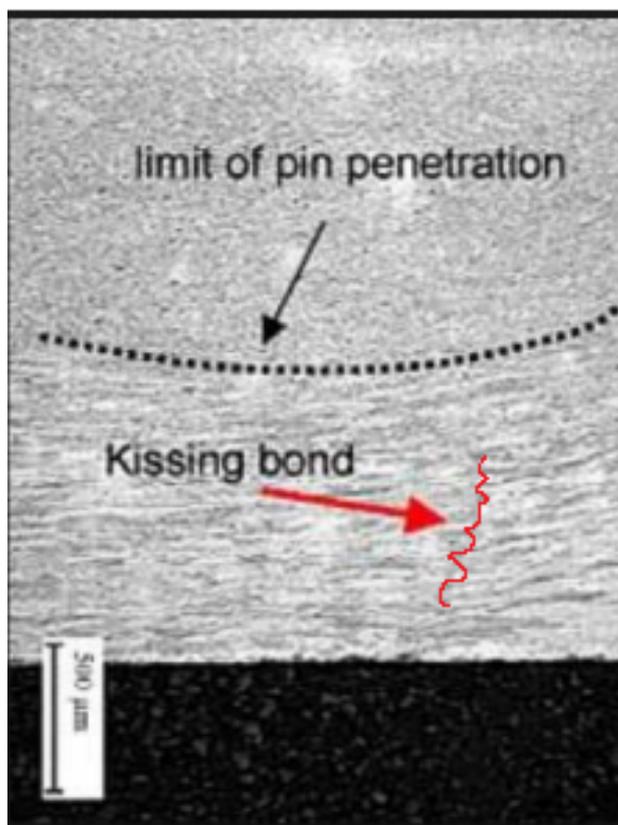


Figura 3.3: - Detalhe do defeito "kissing bond"(TWI, 2003.)

A falta de penetração ocorre quando o comprimento do pino é consideravelmente menor que a espessura da chapa. Segundo [James et al. 2005],[Kleiner e Bird 2004], a penetração da ferramenta é, geralmente cerca de 90% desta espessura e pode haver falhas se houver alguma variação neste valor ao longo da linha de junção . Já a cavidade, forma-se abaixo da superfície, não contém material e geralmente é alinhada com a direção da junção [Kleiner e Bird 2004].

Este tipo de defeito é bastante relevante no estudo da soldagem, principalmente pela dificuldade de verificá-lo sem **utilizar** de métodos de inspeção ~~nao~~-destrutivos. As possibilidades de identificação são notadamente mais caras, como o teste por ultrassom ou por raios-x. Tal defeito potencializa falhas por fadiga nos materiais estudados.[Luo, Liu e Ye 2011]

### 3.3.2 Defeito por flash

Um fator importante a ser considerado é a quantidade de rebarba proveniente do processo de soldagem FSW. A presença excessiva de rebarbas ao redor do ombro da solda ou “flash” é um

dos possíveis defeitos mostrados por [Fioravanti 2008]. A imagem 3.4 demonstra a falha por flash causada pelo pequeno comprimento do pino.



Figura 3.4: Soldas com "flash" devido ao comprimento pequeno do pino. (FIOVARANTI, 2008). Adaptado)

Alguns autores afirmam que o defeito "flash" pode ser causado intencionalmente, visto que para algumas situações aonde se deseja uma excelente penetração da ferramenta, a presença do "flash" é inevitável. [Threadgill et al. 2009]

### 3.3.3 Defeito por cavidade ou wormhole

Um dos defeitos mais presentes na soldagem por fricção é o "*wormhole*", uma cavidade localizada abaixo da superfície da solda, entre o final da união e o final da chapa metálica. A causa principal identificada na literatura é um volume anormal de depósito de material durante a soldagem. Esta ausência de volume soldado, ou "vazio" causa uma drástica redução nas propriedades da solda. [Arbegast, Baker e Hartley 1998]

Nota-se nas situações em que a mistura do material no processo de soldagem permanece constante durante todo o processo de rotação da ferramenta, o diagrama de fases da liga soldada permanece bastante estável, o que possui baixa correlação com o defeito "wormhole". No entanto, quando há alguma perturbação na mistura do material durante o processo de soldagem, o defeito "wormhole" aparece em maior quantidade. [Kah et al. 2015]

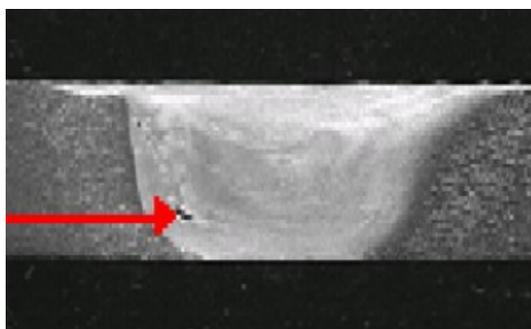


Figura 3.5: Localização do defeito "wormhole" causado por uma má soldagem, com ampliação de 40x no microscópio. (Arbegast, 1998, modificado)

## Capítulo 4

# Soldagem por Processamento de atrito linear (FSP)

O processo por atrito linear, chamado de *Friction Stir Processing* (FSP) é um processo de soldagem relativamente novo, com algumas semelhanças com o processo FSW, com algumas diferenças notáveis. Criado a partir das pesquisas de [Mishra, Ma e Charit 2003], representa uma evolução a partir do processo FSW, originalmente desenvolvido pelo TWI.

O modelo inicial do processo FSW contou com alguns defeitos típicos como uma severa deformação plástica do metal de base, que produziam uma microestrutura ultra granulada, que entre outros defeitos podem causar um aumento da corrosão da liga [Kumar et al. 2019]. Entretanto, um dos principais avanços que culminaram na criação da soldagem FSP foi a possibilidade da criação de camadas de material soldado, com o auxílio da introdução de alguns materiais cerâmicos particulados durante o processo FSP [Asadi, Givi e Faraji 2010]. Além de mudanças na microestrutura do material são importantes fatores, ao contrário da simples união das peças soldadas no processo FSW [Węglowski e Krasnowski 2020].

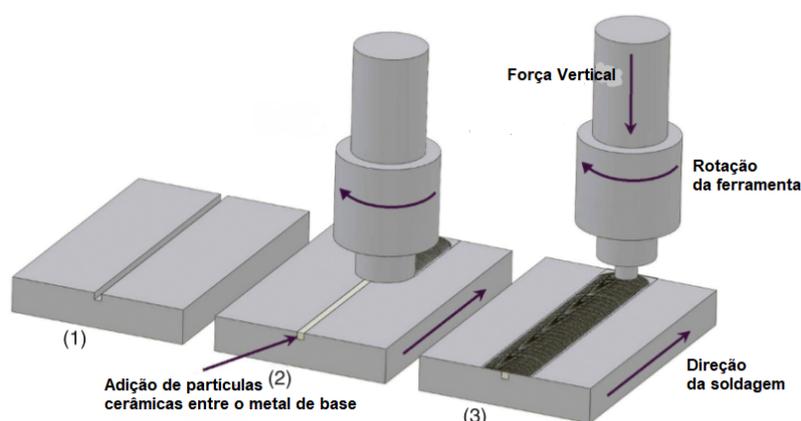


Figura 4.1: Friction Stir Processing para a execução de soldagem com material particulado (Asadi, 2010, modificado)

Além disso, a técnica FSP tem sido utilizada para homogeneizar o substrato de partículas na zona termomecanicamente afetada (TMAZ) [Mishra e Ma 2005] , e um aumento das propriedades de resistência mecânica após a soldagem [Mishra 2020], [Tutunchilar et al. 2012]

É notável perceber que o princípio de funcionamento do processo FSW e FSP é bastante similar, de modo que alguns autores encontrados na literatura utilizam os conceitos de modo intercambiável. Porém ressalta-se que [este](#) dois processos possuem diferentes propósitos e finalidades. [Asadi et al. 2012], [Faraji e Asadi 2011].

- FSW: Possibilita a simples união de metais através da fricção e calor
- FSP: Possibilita a união, mas tendo em vista a mudança da microestrutura das partes soldadas, preferencialmente com material particulado para melhorar o processo.

Alguns autores inclusive recomendam que o processo FSP seja realizado após a soldagem FSW, para mitigar possíveis defeitos realizados ou até mesmo como uma ferramenta de manutenção na indústria, a fim de melhorar a microestrutura e aumentar a vida útil dos materiais solicitados. [Grant e Weil 2011], [McNelley, Oh-ishi e Zhilyaev 2007].

## 4.1 FSP em ligas de alumínio

O ~~início do~~ Friction Stir Processing foi inicialmente testado em ligas de alumínio, sem sucesso [Yadav e Bauri 2012]. Entretanto, com o aprimoramento da técnica, começando com [a inserção de mais de 1 passo da ferramenta nas chapas](#) trouxeram resultados satisfatórios.[Mishra e Ma 2005]. O refinamento do tamanho do grão, passando de 84 para 3  $\mu\text{m}$ , foi obtido em uma única passagem usando 640 rpm, e velocidade de soldagem de 150 mm / min, com uma força axial de 5 kN. O metal de base apresentou 29 HV (Dureza Vickers) e quando submetido ao FSP foi observado um aumento relativo de 34 % no HV , devido à interação de refinamento de grãos e deslocamentos. Tais valores foram encontrados na liga Al5083.

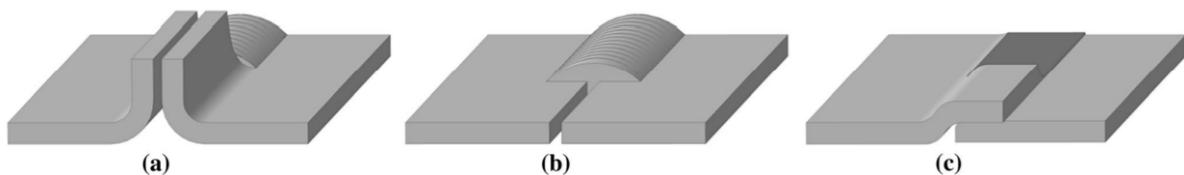
Tratando-se da liga AA6061-T6, [Um](#) aumento na resistência à tração, [alongamento](#) e [dureza](#) foi alcançado devido à eliminação de porosidades e ramos dendríticos. A adição de pó de 10 % Si com apenas uma passagem de FSP aumenta a dureza em comparação com a liga fundida. No entanto, as seguintes passagens de FSP reduzem a dureza, devido à dissolução de precipitados como o  $Mg_2Si$ .

## Capítulo 5

# Soldagem por atrito e esmagamento (FCW)

A soldagem por atrito e esmagamento, chamada de *Friction Crush Welding* (FCW) também é um método de soldagem por atrito, cuja principal característica é a aplicação de um fonte de calor e pressão através de uma ferramenta rotativa em forma de disco, que penetra o material de base no sentido vertical, em um movimento de rolagem sobre a superfície (eixo horizontal). Este método possui algumas semelhanças com a soldagem por costura, cujas metodologias e usos já são muito estudados da academia e na indústria.

A FCW baseada em uma patente alemã WO/2013/087176, cujo desenvolvimento baseou-se no método Friction Stir Welding. Devido aos dois processos, de aquecimento (abaixo da temperatura de fusão) e o esmagamento, originalmente o processo foi chamado "*Friction Squeeze Welding*" [Joma, Subhi e Hashim 2020] devido à patente referida, no entanto é comum a denominação de Friction Crush Welding. A implementação da técnica consiste no ~~deslize~~ da ferramenta de fricção sobre ambas as chapas de metal, que podem ser preparadas com uma flange simples; sem preparação (simples contato, solda de topo) ou com uma flange sobreposta, com ambas as extremidades da chapa se tocando ao meio do disco rotativo. **Não ficou claro como é o processo. Inserir uma figura**

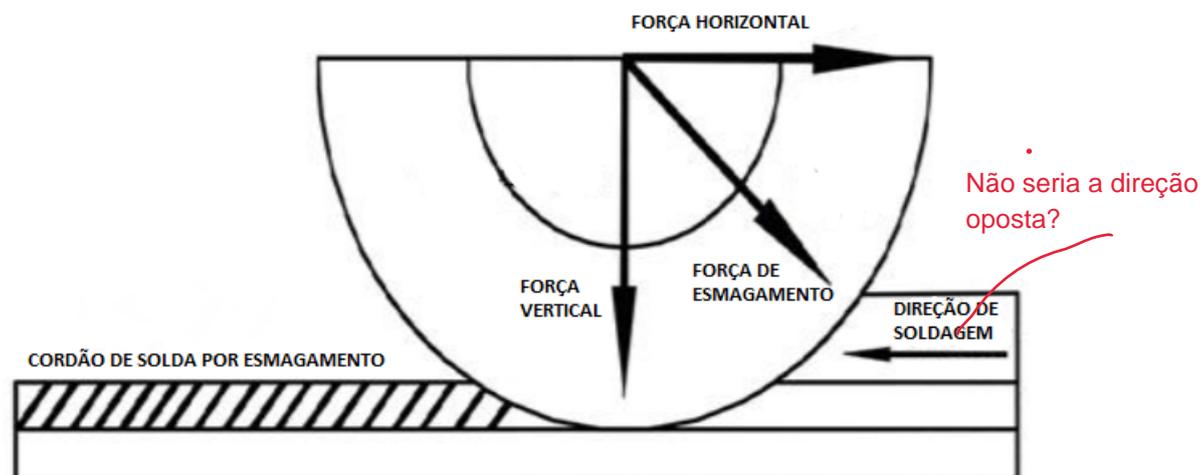


**Figura 5.1:** Tipos de metal de base para a solda FCW (a) Flange simples , (b) Adição de solda de topo (c) Junta de topo sobreposta. (Besler, 2017, adaptado)

## 5.1 Parâmetros do processo FCW

Os parâmetros envolvidos no processo FCW resultam em uma gama de possibilidades que trarão diferentes resultados para a deformação plástica a qual o metal de base será submetido.

Na execução do processo de soldagem, que depende de 3 grandes fatores principais: a fricção do disco, através de uma força (horizontal e vertical), penetração e velocidade constantes provocam uma deformação plástica na flange da chapa e o metal de base, ocorrendo a soldagem. A solda é efetuada com uma coalescência destas duas partes, que formam a chamada zona de esmagamento.



Quem se move? a chapa ou o rolete? Qual o sentido de rotação. A velocidade tangencial do disco é maior que a velocidade de deslocamento do eixo?

Figura 5.2: Vista lateral da soldagem por esmagamento (Jamwal et al. , 2019, modificado)

Outros fatores secundários são essenciais para um aumento da qualidade do processo de soldagem, como a distância entre as chapas de metal, o tamanho da flange (também chamado de volume adicional), bem como velocidade de rotação do disco, força vertical e ombro do disco. Tais parâmetros estão ilustrados na figura 5.3.

## 5.2 Geometria do disco e do metal de base

Um dos principais fatores a serem considerados na soldagem FCW é a geometria e material do disco de fricção. São 3 os parâmetros básicos a serem envolvidos no disco: Diâmetro do disco, largura do mesmo e o comprimento da zona misturada, que necessita ser o mesmo da curvatura do mesmo. [Besler et al. 2016].

É notável perceber que alguns parâmetros das chapas do metal de base também influenciam nas propriedades metalúrgicas da solda. Conforme ilustrado na figura 5.3, a espessura da chapa, bem como a distância entre as chapas são fatores que são envolvidos no cálculo da geometria do disco de fricção.

Naturalmente, a curvatura do disco também é projetada para que a zona em que ocorre a coalescência fique contida somente na área da curvatura, facilitando o processo de soldagem. É

esperado também que o ombro do disco delimite a zona de mistura (SZ), de modo que a deformação plástica fique restrita somente ao volume que estará sobre o disco durante a soldagem, sem permitir nenhum tipo de "escape" do metal soldado.

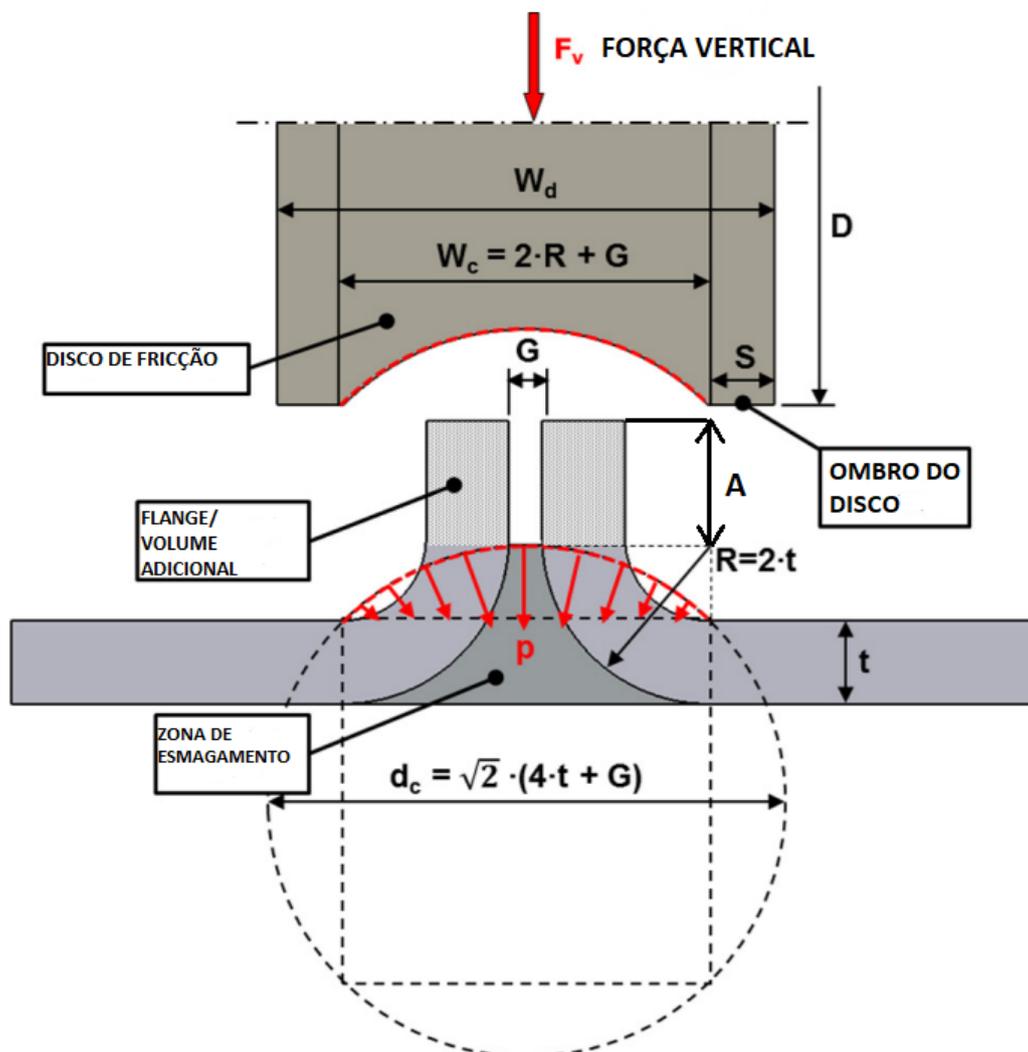


Figura 5.3: Vista frontal e geometria do disco de fricção (Besler et al, 2016, modificado)

Onde:

- $W_d$ : Largura do disco
- $W_c$ : Largura da alma do disco
- $D$ : Diâmetro do disco
- $R$ : Raio da curvatura da chapa metálica
- $G$ : Espaço entre as chapas metálicas
- $p$ : Distribuição da pressão da solda por fricção

- $d_c$ : Comprimento horizontal da zona misturada (SZ)
- $t$ : Espessura da chapa a ser soldada
- $A$ : Altura da flange do metal de base

O volume da zona de esmagamento pode ser calculada, segundo [Sato e Kokawa 2001], correlacionando o volume das flanges sendo igual ao volume soldado. Naturalmente o contorno do disco é

$$A \times 2t = G \times 2t + \frac{1}{2} [(4 \times t)^2 - (2 \times t)^2 \times \pi] \quad (5.1)$$

$$A = G + 4 \times t - (t \times \pi) \quad (5.2)$$

Uma vez escolhida a geometria do disco, [Sato e Kokawa 2001], realizou alguns testes de soldagem FCW com a liga de alumínio em questão, modificando exclusivamente a sua velocidade, conforme observado na figura 5.4:

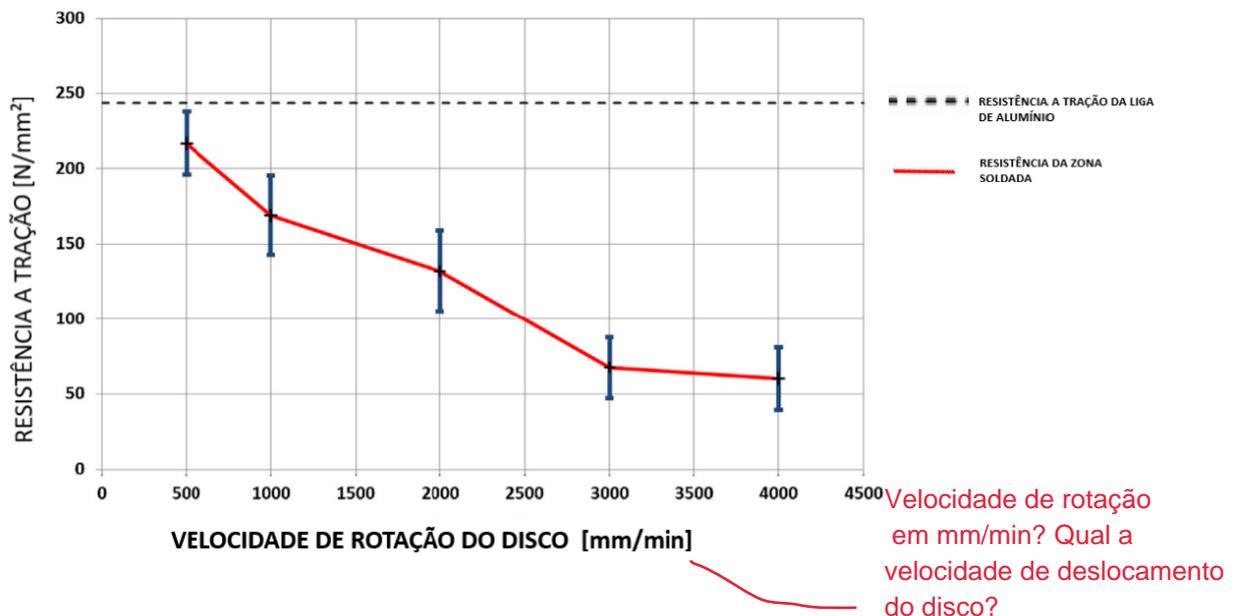


Figura 5.4: Resistência da solda FCW do Al6061 correlacionado com a rotação do disco

Nota-se pela 5.4, que há uma redução da resistência à tração quando se aumenta a velocidade, até uma estabilização da velocidade entre 3000 e 4000 rpm. Para se garantir uma melhor resistência à tração, [Sato e Kokawa 2001] sugere manter velocidades mais baixas, visto que a drástica redução da resistência da solda ocorre principalmente pela precipitação dos óxidos durante a alta rotação da ferramenta, dissociando os óxidos que não foram totalmente removidos no processo de esmagamento. Tal fato implica na possibilidade da contaminação de possíveis óxidos na ferramenta (disco) e do metal de base também antes da realização da soldagem, ~~podendo ser estudada em trabalhos futuros.~~

[Besler et al. 2016] afirma que é possível que a deformação plástica da soldagem da liga de alumínio causada pela FCW resulta de uma força de esmagamento elevada causada majoritariamente pela velocidade, quando esta é elevada. A hipótese levantada é de que a deformação plástica que possibilita as melhores propriedades mecânicas é obtidas com velocidades baixas, com uma boa solda. Este comportamento da liga de alumínio é inversamente proporcional às outras ligas metálicas estudadas (ligas de aço e cobre).

# Capítulo 6

## ~~Resultados e~~ Discussões

### 6.1 Características e aplicações dos processos

Os capítulos anteriores trouxeram **bons parâmetros para a soldabilidade** da liga AA6061T6, bem como situações de uso na indústria. Alguns fatores porém necessariamente precisam ser fixados para a execução das soldas FSW, FSP e FCP:

- Necessidade de fixação de todos os materiais de base, não permitindo adaptações durante a execução da soldagem
- Estudo prévio de todos os parâmetros do material de base, não sendo permitida a interferência humana durante o processo
- A depender das condições de velocidade e rotação, uma limpeza prévia da ferramenta e do material de base pode ser requerida

São vários os setores da indústria que já utilizam a soldagem por fricção, como o setor automotivo, aeroespacial, ferroviário e naval, todos estes em caráter já comercial. Na academia, além dos já citados trabalhos neste texto, também ressalta-se a aplicação das soldagens por fricção na união de diferentes ligas metálicas (aços, ligas de cobre) e até mesmo união de diferentes metais em uma mesma solda, bem como polímeros.

### 6.2 Vantagens e desvantagens dos processos

A investigação bibliográfica trouxe aplicações e conceitos relativos aos processos de soldagem por fricção. O fato de possuir materiais não consumíveis gera uma economia óbvia na indústria, como o fato de ferramenta poder ser utilizada em passos de até 1 quilômetro para liga da série 6000.

Alguns fatores são conhecidos em que a soldagem por fricção apresenta vantagens:

- Soldabilidade melhorada

- Redução da tensão residual
- Disponibilidade imediata para utilização após a soldagem
- Mais resistência à corrosão
- Diminuição do número de variáveis a serem controladas
- Maior mecanização

As tabelas a seguir apresentam um quadro geral das vantagens e desvantagens das soldagens estudadas nas seções anteriores:

Tabela 6.1: Vantagens e desvantagens da soldagem FSW

Vantagens	Desvantagens
Processo amplamente estudado na academia	Dificuldade de uniformização das ferramentas
Robotização completa, com estudos para variação dos processos (vibração, controle de torque, variação da penetração da ferramenta)	Maquinário muito caro
Possibilidade de soldar geometrias complexas	Microestrutura ruim quando comparado com a soldagem FSP
Mantém a maior parte das propriedades do metal de base, mesmo com a união realizada pela soldagem (quando comparado com a soldagem por fusão)	Tolerância do material é prejudica

Tabela 6.2: Vantagens e desvantagens da soldagem FSP

Vantagens	Desvantagens
Melhores resultados da qualidade da solda	Adição de materiais mais caros para melhor qualidade da soldagem
Adoção progressiva do processo na indústria a fim de obter uniões metálicas com maior custo-benefício	Relativos poucos estudos correlacionando diferentes materiais particulados
Redução da porosidade sem grandes mudanças na geometria da solda	Dificuldade de adaptação do processo para diferentes tipos de soldagem
Vários estudos evidenciando a boa soldagem de diferentes materiais	Alto custo do processo

Tabela 6.3: Vantagens e desvantagens da soldagem FCW

Vantagens	Desvantagens
Boa soldagem com baixas velocidades	Processo ainda pouco explorado na indústria
Possibilidade de adaptação com fresadora	Pouca literatura para ligas metálicas
Diferentes configurações de metal de base são atendidos	Dificuldade de adaptação do disco para diferentes configurações de metal de base
Possibilidade de inserção de elementos em pó que melhoram a qualidade da soldagem	Dificuldade em sincronizar o esmagamento com a rotação do disco para produzir uma mistura uniforme (previsibilidade do processo)

## Capítulo 7

# Conclusões

Primeiramente, pode-se concluir que todos os métodos de soldagem por fricção obtêm êxito na produção de boas uniões de ligas de alumínio, abrindo um leque de possibilidades já explorado em algumas situações da indústria. Análises da microestruturas de ligas de alumínio AA6061-T6 em todas as literaturas apresentaram desempenho satisfatório, observando-se que o melhor resultado foi encontrado na soldagem FSP.

Evidentemente o método FSP apresenta melhores resultados por consideravelmente mais caro e envolver mais passos para a sua finalização, o que pode ser entendido como uma evolução do processo FSW.

Para trabalhos futuros, recomenda-se o estudo a comparação entre o processo FSW e FSP, especificamente com a adição do  $TiO_2$  na liga AA6061-T6, caso seja viável economicamente, ou o uso de materiais cerâmicos equivalentes, que possibilitem um aumento nas propriedades metalográficas. Também sugere-se a investigação do comportamento de outras ligas de alumínio e metálicas para comparação deste estudo. Para além disso, este trabalho busca incentivar a construção ou adaptação de uma maquinário de soldagem por fricção para o grupo GRACO.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [Anas et al. 2020]ANAS, N. et al. Microstructure, mechanical and corrosion properties of cryorolled-aa5052 at various solution treatment temperatures. *Materials Research Express*, IOP Publishing, v. 7, n. 1, p. 016535, 2020.
- [Arbegast, Baker e Hartley 1998]ARBEGAST, W.; BAKER, K.; HARTLEY, P. Fracture toughness evaluations of 2195 al-cu-li autogenous and hybrid friction stir welds. In: *Proceedings of the 5th international conference on trends in welding research*. [S.l.: s.n.], 1998. p. 1–5.
- [Asadi, Givi e Faraji 2010]ASADI, P.; GIVI, M. B.; FARAJI, G. Producing ultrafine-grained az91 from as-cast az91 by fsp. *Materials and Manufacturing Processes*, Taylor & Francis, v. 25, n. 11, p. 1219–1226, 2010.
- [Asadi et al. 2012]ASADI, P. et al. On the role of cooling and tool rotational direction on microstructure and mechanical properties of friction stir processed az91. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 63, n. 9-12, p. 987–997, 2012.
- [Besler et al. 2017]BESLER, F. A. et al. Advanced process possibilities in friction crush welding of aluminum, steel, and copper by using an additional wire. *Metallurgical and Materials Transactions B*, Springer, v. 48, n. 6, p. 2930–2948, 2017.
- [Besler et al. 2016]BESLER, F. A. et al. Friction crush welding of aluminium, copper and steel sheetmetals with flanged edges. *Journal of materials processing technology*, Elsevier, v. 234, p. 72–83, 2016.
- [Brar e Jamwal 2017]BRAR, G. S.; JAMWAL, A. S. Friction crush welding of aluminium alloy 6061 t-6. *IJAMR*, v. 9, n. 2, p. 101–104, 2017.
- [Colligan e Mishra 2008]COLLIGAN, K. J.; MISHRA, R. S. A conceptual model for the process variables related to heat generation in friction stir welding of aluminum. *Scripta materialia*, Elsevier, v. 58, n. 5, p. 327–331, 2008.
- [Committee et al. 1990]COMMITTEE, A. I. H. et al. Metals handbook, vol. 2: Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials. *ASM International*, v. 3, n. 4, p. 5, 1990.
- [Cota, Bracarense e Coelho 2017]COTA, B. S.; BRACARENSE, A. Q.; COELHO, F. G. F. Dimensionamento de um sistema robotizado para a soldagem pelo processo friction stir welding. *Soldagem & Inspeção*, SciELO Brasil, v. 22, p. 480–493, 2017.

- [Crawford et al. 2006]CRAWFORD, R. et al. Modelling of friction stir welding for robotic implementation. *International Journal of Modelling, Identification and Control*, Inderscience Publishers, v. 1, n. 2, p. 101–106, 2006.
- [Deqing, Shuhua e Zhaoxia 2004]DEQING, W.; SHUHUA, L.; ZHAOXIA, C. Study of friction stir welding of aluminum. *Journal of materials science*, Springer, v. 39, n. 5, p. 1689–1693, 2004.
- [Faraji e Asadi 2011]FARAJI, G.; ASADI, P. Characterization of az91/alumina nanocomposite produced by fsp. *Materials Science and Engineering: A*, Elsevier, v. 528, n. 6, p. 2431–2440, 2011.
- [FERNANDES 2016]FERNANDES, C. A. *Estudo do desempenho mecânico e microestrutural de uniões da liga de alumínio, AA6061-T6, por solda a ponto por fricção (FSpW)*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2016.
- [Fioravanti 2008]FIORAVANTI, A. S. Soldagem por fsw de ligas de alumínio alcalad aa2024-t3 e aa7075-t6. 2008.
- [Fonseca et al. 2013]FONSECA, E. B. d. et al. Simulação física do processo de soldagem por atrito com pino não consumível do aço inoxidável duplex uns s32205. [sn], 2013.
- [Genicolo 2007]GENICOLO, M. A. C. *Estudo de viabilidade para implementação de uniões soldadas pelo método friction stir welding em estruturas aeronáuticas*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2007.
- [Gharavi et al. 2015]GHARAVI, F. et al. Corrosion behavior of al6061 alloy weldment produced by friction stir welding process. *Journal of Materials Research and Technology*, Elsevier, v. 4, n. 3, p. 314–322, 2015.
- [Grant e Weil 2011]GRANT, G.; WEIL, S. Joining technologies for coal power applications. *Advanced Res. Materials Program*, p. 26–28, 2011.
- [James et al. 2005]JAMES, M. et al. The relationship between process mechanisms and crack paths in friction stir welded 5083-h321 and 5383-h321 aluminium alloys. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Wiley Online Library, v. 28, n. 1-2, p. 245–256, 2005.
- [Januckaitis 2011]JANUCKAITIS, D. M. Comparação de projeto aeronáutico usando rebites e tecnologia de friction stir welding. 2011.
- [Jeyaprakash, Haile e Arunprasath 2015]JEYAPRAKASH, N.; HAILE, A.; ARUNPRASATH, M. The parameters and equipments used in tig welding: A review. *The International Journal of Engineering and Science (IJES)*, v. 4, n. 2, p. 11–20, 2015.
- [Joma, Subhi e Hashim 2020]JOMA, A. S.; SUBHI, A. D.; HASHIM, F. A. Microstructure and mechanical properties of friction crush welded joints of oxygen-free copper (c1020) sheets. *Diyala Journal of Engineering Sciences*, v. 13, n. 3, p. 58–65, 2020.

- [Jomah, Hashim e Subhi 2021]JOMAH, A.; HASHIM, F.; SUBHI, A. Metallurgical investigation and mechanical properties of dissimilar friction crush welded cu-al sheets with flanged edge. In: IOP PUBLISHING. *Journal of Physics: Conference Series*. [S.l.], 2021. v. 1973, n. 1, p. 012116.
- [Jr 2004]JR, W. R. Messler, *Principles of Welding (Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy)*. [S.l.]: Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim, 2004.
- [JÚNIOR 2003]JÚNIOR, A. *Estrutura integral por Soldagem por Atrito “Friction Stir Welding–FSW–Requisitos básicos para o projeto estrutural, 2003*. Tese (Doutorado) — Dissertação de Mestrado-Mecânica dos Sólidos e Estruturas, Instituto . . . , 2003.
- [Kah et al. 2015]KAH, P. et al. Investigation of weld defects in friction-stir welding and fusion welding of aluminium alloys. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, SpringerOpen, v. 10, n. 1, p. 1–10, 2015.
- [Kallee e Mistry 1999]KALLEE, S.; MISTRY, A. Friction stir welding in the automotive body in white production. In: *International Symposium on Friction Stir Welding*. [S.l.: s.n.], 1999. v. 1, p. 1–12.
- [Khan et al. 2015]KHAN, N. Z. et al. Investigations on tunneling and kissing bond defects in fsw joints for dissimilar aluminum alloys. *Journal of alloys and Compounds*, Elsevier, v. 648, p. 360–367, 2015.
- [Kleiner e Bird 2004]KLEINER, D.; BIRD, C. R. Signal processing for quality assurance in friction stir welds. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, The British Institute of Non-Destructive Testing, v. 46, n. 2, p. 85–87, 2004.
- [Kumar et al. 2019]KUMAR, M. et al. A review on friction stir processing of al6061 surface composites. In: AIP PUBLISHING LLC. *AIP Conference Proceedings*. [S.l.], 2019. v. 2128, n. 1, p. 020031.
- [Li et al. 2019]LI, J. et al. Microstructure and mechanical properties of 6061/7n01 cmt+ p joints. *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, v. 264, p. 134–144, 2019.
- [Li, Murr e McClure 1999]LI, Y.; MURR, L.; MCCLURE, J. Solid-state flow visualization in the friction-stir welding of 2024 al to 6061 al. *Scripta materialia*, v. 40, n. 9, p. 1041–1046, 1999.
- [Lohwasser e Chen 2009]LOHWASSER, D.; CHEN, Z. *Friction stir welding: From basics to applications*. [S.l.]: Elsevier, 2009.
- [Luo, Liu e Ye 2011]LUO, Y.; LIU, J.; YE, H. Bubble flow and the formation of cavity defect in weld pool of vacuum electron beam welding. *Vacuum*, Elsevier, v. 86, n. 1, p. 11–17, 2011.
- [Maisonnette et al. 2011]MAISONNETTE, D. et al. Effects of heat treatments on the microstructure and mechanical properties of a 6061 aluminium alloy. *Materials Science and Engineering: A*, Elsevier, v. 528, n. 6, p. 2718–2724, 2011.

- [McNelley, Oh-ishi e Zhilyaev 2007]MCNELLEY, T. R.; OH-ISHI, K.; ZHILYAEV, A. P. Microstructure evolution and microstructure-property relationships in friction stir processing of nial bronze. In: TRANS TECH PUBL. *Materials science forum*. [S.l.], 2007. v. 539, p. 3745–3750.
- [Midling e Rørvik 1999]MIDLING, O.; RØRVIK, G. Effect of tool shoulder material on heat input during friction stir welding. In: *Proceedings of the First International Symposium on Friction Stir Welding, Thousands Oaks, CA, USA, June14p16*. [S.l.: s.n.], 1999.
- [Mishra 2020]MISHRA, A. Surface quality analysis of friction stir welded joints by using fourier transformation and local binary patterns algorithms. *Soldagem & Inspeção*, SciELO Brasil, v. 25, 2020.
- [Mishra e Ma 2005]MISHRA, R.; MA, Z. Friction stir welding and processing ii. *Materials Science Engineering R-reports - MAT SCI ENG R*, v. 50, 09 2005.
- [Mishra e Ma 2005]MISHRA, R. S.; MA, Z. Friction stir welding and processing. *Materials science and engineering: R: reports*, Elsevier, v. 50, n. 1-2, p. 1–78, 2005.
- [Mishra, Ma e Charit 2003]MISHRA, R. S.; MA, Z.; CHARIT, I. Friction stir processing: a novel technique for fabrication of surface composite. *Materials Science and Engineering: A*, Elsevier, v. 341, n. 1-2, p. 307–310, 2003.
- [Moharami et al. 2020]MOHARAMI, A. et al. Role of mg2si particles on mechanical, wear, and corrosion behaviors of friction stir welding of aa6061-t6 and al-mg2si composite. *Journal of Composite Materials*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 54, n. 26, p. 4035–4057, 2020.
- [Moreira, Figueiredo e Castro 2007]MOREIRA, P.; FIGUEIREDO, M. D.; CASTRO, P. D. Fatigue behaviour of fsw and mig weldments for two aluminium alloys. *Theoretical and applied fracture mechanics*, Elsevier, v. 48, n. 2, p. 169–177, 2007.
- [Nandan, DebRoy e Bhadeshia 2008]NANDAN, R.; DEBROY, T.; BHADESHIA, H. Recent advances in friction-stir welding–process, weldment structure and properties. *Progress in materials science*, Elsevier, v. 53, n. 6, p. 980–1023, 2008.
- [Ogunsemi et al. 2021]OGUNSEMI, B. et al. A review of various improvement strategies for joint quality of aa 6061-t6 friction stir weldments. *Journal of Materials Research and Technology*, Elsevier, 2021.
- [Oosterkamp, Oosterkamp e Nordeide 2004]OOSTERKAMP, A.; OOSTERKAMP, L. D.; NORDEIDE, A. Kissing bond phenomena in solid-state welds of aluminum alloys. *WELDING JOURNAL-NEW YORK-*, v. 83, n. 8, p. 225–S, 2004.
- [Quites e Dutra 1979]QUITES, A. M.; DUTRA, J. C. *Tecnologia da soldagem a arco voltaico*. [S.l.]: Edeme, 1979.
- [RajKumar et al. 2014]RAJKUMAR, V. et al. Studies on effect of tool design and welding parameters on the friction stir welding of dissimilar aluminium alloys aa 5052–aa 6061. *Procedia Engineering*, Elsevier, v. 75, p. 93–97, 2014.

- [Rao 2018]RAO, K. V. Evaluation of welding characteristics using three-dimensional finite element simulation and experimentation for fsw of aluminum 6061. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Springer, v. 40, n. 2, p. 1–10, 2018.
- [Sánchez-Femat et al. 2021]SÁNCHEZ-FEMAT, O. F. et al. Diseño y construcción de una máquina de soldadura de fricción por aglomeración. *Soldagem & Inspeção*, SciELO Brasil, v. 26, 2021.
- [Sato e Kokawa 2001]SATO, Y. S.; KOKAWA, H. Distribution of tensile property and microstructure in friction stir weld of 6063 aluminum. *Metallurgical and Materials Transactions A*, Springer, v. 32, n. 12, p. 3023–3031, 2001.
- [Shinde et al. 2017]SHINDE, G. et al. Low cost friction stir welding: A review. *Materials Today: Proceedings*, Elsevier, v. 4, n. 8, p. 8901–8910, 2017.
- [Singh, Tiwari e Shukla 2019]SINGH, T.; TIWARI, S.; SHUKLA, D. Friction-stir welding of aa6061-t6: The effects of al<sub>2</sub>o<sub>3</sub> nano-particles addition. *Results in Materials*, Elsevier, v. 1, p. 100005, 2019.
- [Souza 2010]SOUZA, G. *Influência da geometria da ferramenta na soldagem da liga de alumínio 5052 pelo processo Friction Stir Welding*. Tese (Doutorado) — Dissertação (Mestrado)—Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e . . . , 2010.
- [Stachowiak e Batchelor 2000]STACHOWIAK, G.; BATCHELOR, A. Engineering tribology, chapter 10. *Corrosive and Oxidative Wear*, p. 553–570, 2000.
- [Stachowiak e Batchelor 2013]STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. *Engineering tribology*. [S.l.]: Butterworth-heinemann, 2013.
- [Taban, Gould e Lippold 2010]TABAN, E.; GOULD, J. E.; LIPPOLD, J. C. Dissimilar friction welding of 6061-t6 aluminum and aisi 1018 steel: Properties and microstructural characterization. *Materials & Design (1980-2015)*, Elsevier, v. 31, n. 5, p. 2305–2311, 2010.
- [Tavares 2017]TAVARES, S. S. Soldagem por fricção convencional entre a liga de alumínio 6351-t6 e o aço sae 1020 assistida por indução eletromagnética. Universidade Federal de Minas Gerais, 2017.
- [Threadgill et al. 2009]THREADGILL, P. et al. Friction stir welding of aluminium alloys. *International Materials Reviews*, Taylor & Francis, v. 54, n. 2, p. 49–93, 2009.
- [Tutunchilar et al. 2012]TUTUNCHILAR, S. et al. Eutectic al–si piston alloy surface transformed to modified hypereutectic alloy via fsp. *Materials Science and Engineering: A*, Elsevier, v. 534, p. 557–567, 2012.
- [Uday et al. 2010]UDAY, M. et al. Advances in friction welding process: a review. *Science and technology of Welding and Joining*, Taylor & Francis, v. 15, n. 7, p. 534–558, 2010.
- [Verma e Misra 2015]VERMA, S.; MISRA, J. A critical review of friction stir welding process. *DAAAM international scientific book*, DAAAM International Vienna, Austria, v. 249, p. 266, 2015.

[Węglowski e Krasnowski 2020]WĘGŁOWSKI, M. S.; KRASNOWSKI, K. Increase in the fatigue strength of aluminium alloy welded joints through the friction processing of the joint surface. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach*, v. 64, 2020.

[Yadav e Bauri 2012]YADAV, D.; BAURI, R. Effect of friction stir processing on microstructure and mechanical properties of aluminium. *Materials Science and Engineering: A*, Elsevier, v. 539, p. 85–92, 2012.

[Zettler et al. 2006]ZETTLER, R. et al. Dissimilar al to mg alloy friction stir welds. *Advanced Engineering Materials*, Wiley Online Library, v. 8, n. 5, p. 415–421, 2006.

# ANEXOS

Tabela 1: Informação representativa sobre experimentos de soldagem FSW encontrados na literatura

Autores / Referência	Material de base	Geometria da Ferramenta	Material da Ferramenta	Principais parâmetros	Conclusões principais
Fuji et al	AA6061-T6	Prisma triangular	-	RPM,	Para uma baixa resistência de deformação, um pino sem reentrâncias é mais efetivo
Elangovan et al	AA6061	Cilíndrico simples; Com reentrâncias; triangular ou quadrado	Aço de alto carbono	Força axial e perfil do pino	Maior dureza na zona de mistura em relação ao metal de base; Dureza tende a diminuir com o aumento do calor dissipado
Elatharasan et al	AA6061 -T6; AA7075-T6	Cilíndrico com reentrâncias	Aço H13	Penetração; Velocidade do processo de soldagem; RPM	Maior resistência à tração com o aumento no RPM e na velocidade de soldagem; Diminuição da resistência ao escoamento com aumento da força axial e velocidade da soldagem

Tabela 2: Informação representativa sobre experimentos de soldagem FSW encontrados na literatura - continuação

Autores / Referência	Material de base	Geometria da Ferramenta	Material da Ferramenta	Principais parâmetros	Conclusões principais
Kumar et al	AA5083-O; AA6061-T6	Cilíndrico	-	RPM; Velocidade do processo de soldagem; Força axial	Aumento do RPM, força axial e velocidade do processo aumen- taram a resis- tência à tração;  Aumento do RPM e da força axial aumentaram a elongação;  Aumento da velocidade do processo de soldagem di- minuiu a elongação
Dhancholia et al	AA 6061; AA7039	Cilíndrico	Aço rápido (HSS)	RPM; Velocidade do processo de soldagem	Baixa velocidade de soldagem apresentou me- lhores resultados do que as soldas realizadas com alta velocidade;  Propriedades mecânicas aumen- taram com o RPM até 900 RPM, depois houve redução

# I. APÊNDICE

## I.1 Proposta de equipamento

O experimento será conduzido com o auxílio de um motor elétrico, utilizando um conjunto de adaptações que visam aproveitar a potência gerada pra inserir rotação e a força axial necessária. A seguir, citam-se exemplos de maquinários adaptáveis a robotização do projeto. A figura I.1 representa uma vista frontal do conjunto ombro+pino no processo de soldagem de duas chapas apoiadas em uma mesa horizontal e pressionadas por pesos para se evitar o empenamento.



Figura I.1: Detalhe de uma soldagem FSW (Asadi et al. 2014)

Nestas máquinas mostradas nas figuras 13 e 14 percebe-se um controle de força axial aplicado durante a operação, fator essencial na operação. A opção de uma adaptação utilizando robôs com braços manipuladores ainda não se justifica devido a ausência de rigidez suficiente para se excluir o controle de força [Fioravanti 2008]. Segundo [Crawford et al. 2006], a força no início da soldagem pode ser de 3 a 5 vezes maior que no decorrer do processo. Ainda segundo o trabalho de [Fioravanti 2008], a força axial de reação à pressão formada pelo material plastificado na zona de solda pode variar de 1 a 15 kN no alumínio.

## I.2 Projeto do Ferramental

O ferramental neste trabalho será dedicado a elaboração dos requisitos construtivos do conjunto “ombro+pino”. Como a teoria indica, o conjunto não deve ser consumível para uma solda FSW, possibilitando a reutilização em mais de um processo. Como o escopo do trabalho visa soldar chapas da liga 6061-T6, uma ferramenta que resista ao calor e às deformações impostas sem perder suas propriedades mecânicas é buscada para este fim. O material escolhido é o aço AISI H13, material comumente utilizado para trabalho a quente, possuindo alta resistência a trincas por fadiga térmica e boa resistência ao desgaste. Sua composição química está mostrada na Tabela I.1

Tabela I.1: Faixa de composição química do aço AISI H13 da ferramenta

C	Si	Mn	P	S	Cr	V	Mo
0,32- 0,45	0,80- 1,25	0,20- 0,60	0,030	0,030	4,75- 5,50	0,80- 1,20	1,10- 1,75

[Deqing, Shuhua e Zhaoxia 2004] mostram que a razão entre o diâmetro do ombro e a espessura da chapa devem ser igual a 3. Somado a este fator, a ferramenta deve penetrar no mínimo 90% da espessura da chapa a fim de se evitar uma descontinuidade microscópica "*kissing bonds*", norteadando o comprimento do pino. [James et al. 2005], [Cota, Bracarense e Coelho 2017] relatam que o comprimento do pino deve ser um pouco inferior a espessura da chapa. A geometria da ferramenta também é baseada nos trabalhos de [Cota, Bracarense e Coelho 2017].

Com base nas indicações das referências, propõe-se a seguinte geometria para a soldagem por fricção da liga ..., com espessura ...

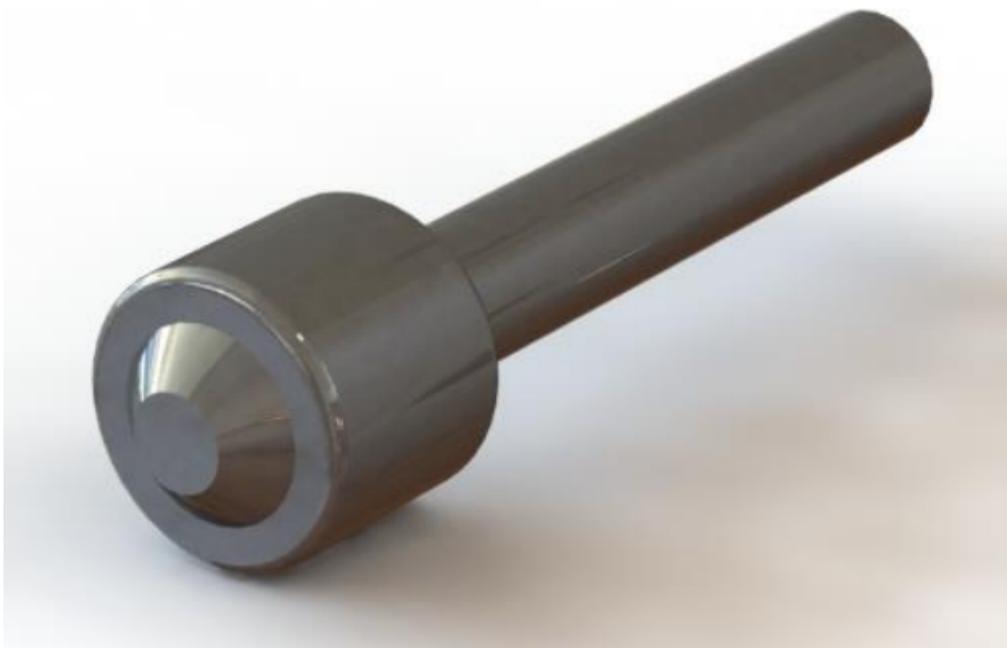


Figura I.2: Renderização da ferramenta (Ombro+pino)

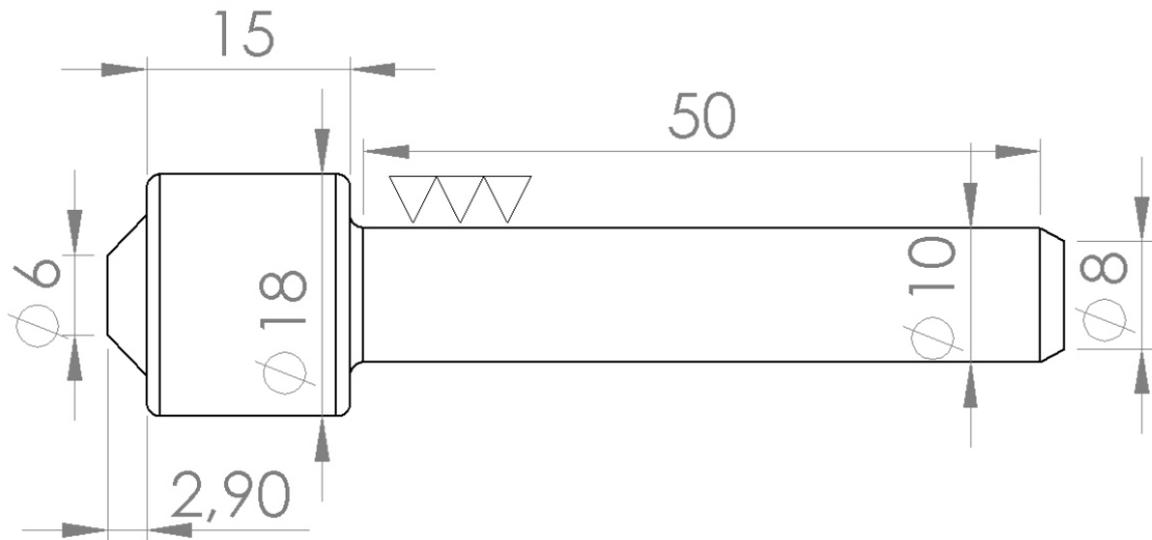


Figura I.3: Dimensões principais da ferramenta a ser utilizada no processo FSW para a soldagem da liga Al 6061-T6 **Qual o diâmetro da base do pino? como chegou a essas dimensões? qual o torque necessário e qual força axial?**

### I.3 Motor Elétrico

O motor elétrico será montado de forma que o seu posicionamento seja paralelo a instalação de um atuador, que poderia movimentar conjunto do equipamento de soldagem solidariamente ao processo de deslocamento durante a soldagem. Como já citado, será adotado um motor elétrico trifásico de **10 HP**. Os principais parâmetros fixos da soldagem estão definidos com base em trabalhos anteriores como [Fioravanti 2008], [Genicolo 2007], [Souza 2010].

### I.4 Modelagem do Projeto

Um modelo em software de modelagem CAD foi feito para auxiliar a visualização e demonstração do experimento.

Com o auxílio da vista frontal, é possível perceber a força de soldagem, de 4000 N que será exercida nas chapas metálicas, segundo [Fioravanti 2008], [Genicolo 2007] e [Souza 2010].

Tabela I.2: Parâmetros fixos sugeridos para a soldagem FSW do trabalho

Velocidade de avanço [mm/min]	10
Força Axial [N]	4000
Rotação da ferramenta [RPM]	1500

Uma vista isométrica, contendo os principais componentes também foi inserida para demonstrar

como os componentes serão montados é apresentada na figura I.5

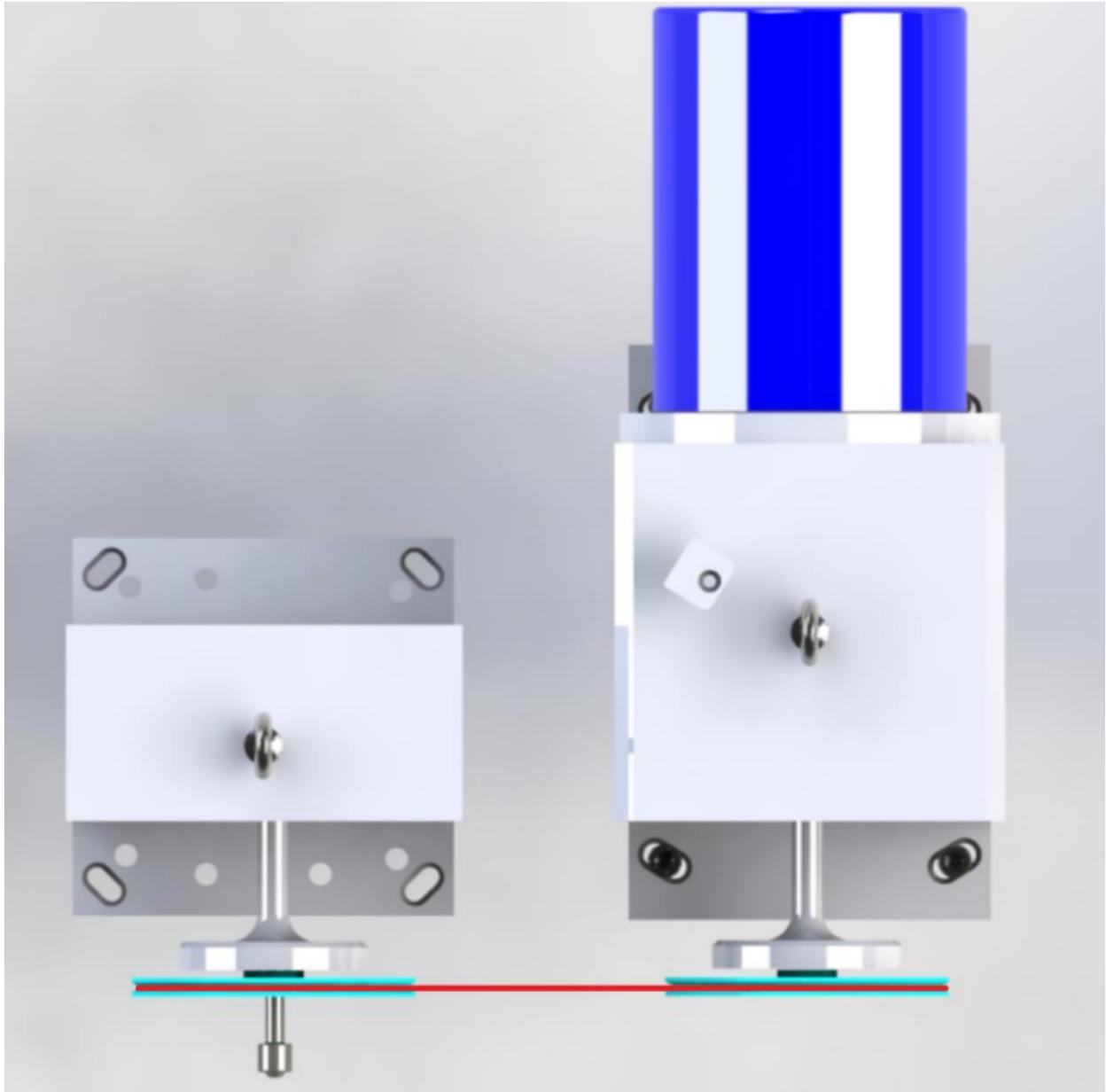


Figura I.4: Vista frontal da mesa de soldagem

Onde essa estrutura será instalada?

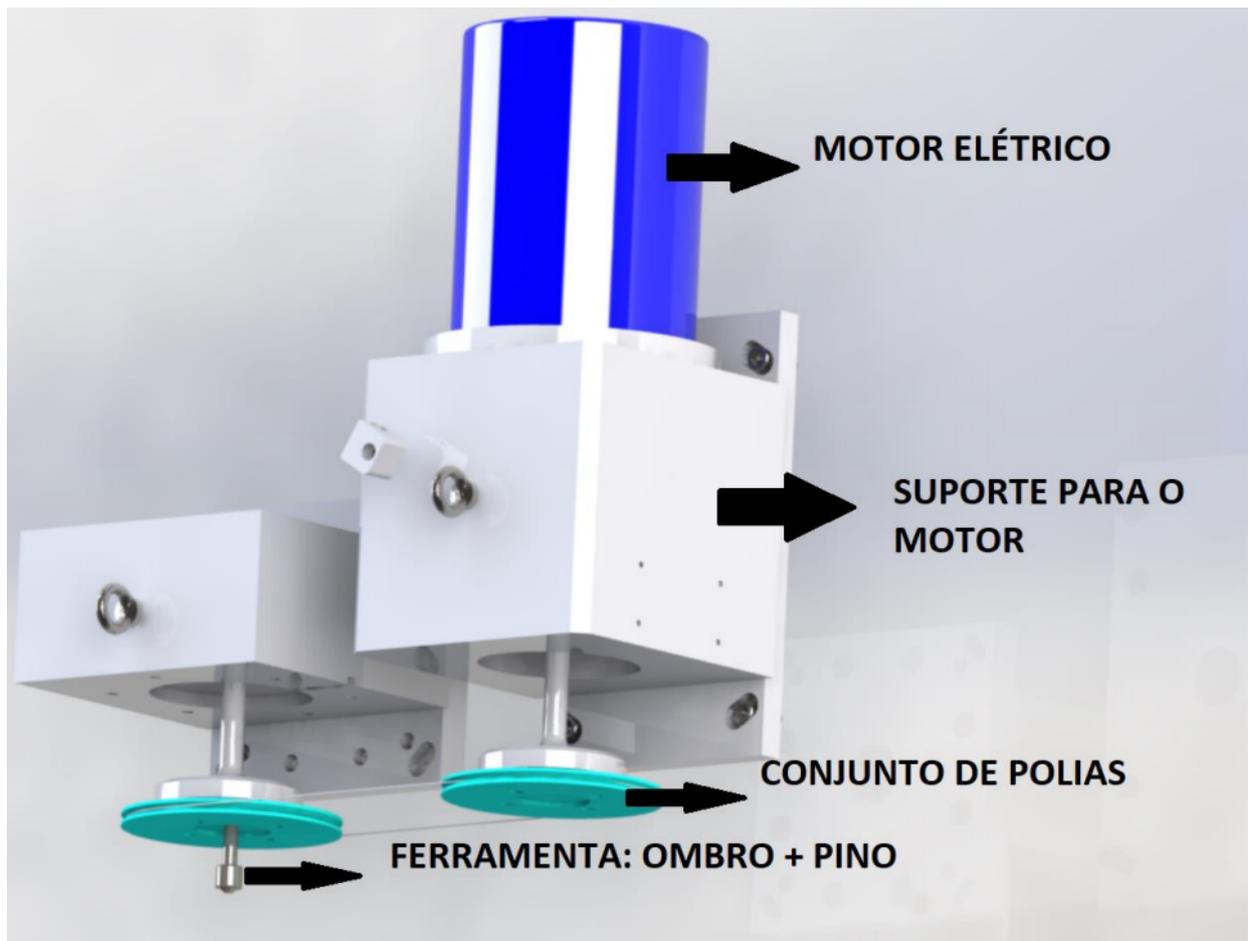


Figura I.5: Vista isométrica do desenho contendo os principais componentes

Projeto mecânico? Cálculos de esforços? Dimensionamento do conjunto?