

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

**PEDRO VITOR HIROMITSU FREITAS**

**ADAPTAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM FRICTION STIR  
WELDING PARA UMA FRESADORA CONVENCIONAL**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PONTA GROSSA**

**2017**

**PEDRO VITOR HIROMITSU FREITAS**

**ADAPTAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM FRICTION STIR  
WELDING PARA UMA FRESADORA CONVENCIONAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
como requisito parcial à obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Mecânica, do  
Departamento Acadêmico de Mecânica – DAMEC  
– da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.  
Orientador: Prof. Dr. Roger Navarro Verástegui

**PONTA GROSSA**

**2017**



## **TERMO DE APROVAÇÃO**

### **ADAPTAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM FRICTION STIR WELDING PARA UMA FRESADORA CONVENCIONAL**

por

**PEDRO VITOR HIROMITSU FREITAS**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 3 de julho de 2017 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

**Prof. Dr. Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz**  
Coorientador

**Prof. Dr. Davi Fusão**  
Membro Titular

**Prof. Dr. Luciano Augusto Lourençato**  
Membro Titular

**Prof. Dr. Marcos Eduardo Soares**  
Responsável pelos TCC

**Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de  
Carvalho**  
Coordenador do Curso

## RESUMO

Desenvolvido em 1991 pelo The Welding Institute (TWI), o processo de soldagem denominado *Friction Stir Welding* (FSW) apresenta-se como uma alternativa interessante comparado aos processos mais comuns de soldagem por fusão, principalmente para ligas de alumínio. Por ocorrer inteiramente no estado sólido, evitam-se problemas comuns relacionados à fusão do material como, trincas a quente e porosidade. Devido aos esforços envolvidos na soldagem FSW se apresentarem semelhantes aos suportados na usinagem em fresadoras convencionais, esse tipo de equipamento se torna uma opção viável para a adaptação do processo. Dessa forma, este trabalho teve como principal objetivo a adaptação uma fresadora convencional para a execução do processo *Friction Stir Welding* em chapas de alumínio 1200 H14, estabelecendo, também, os parâmetros que apresentaram os melhores resultados. Utilizando o método OFAT (One Factor At Time) os experimentos foram realizados em três seções a fim de determinar a rotação e avanço da ferramenta, a altura do pino da ferramenta e a profundidade de penetração da mesma na peça que apresentassem os melhores resultados de junta. O estudo comprovou a praticabilidade da utilização da fresadora na execução da soldagem FSW e possibilitou uma compreensão dos efeitos da alteração dos parâmetros utilizados sobre o produto da soldagem.

**Palavras chave:** Soldagem em Alumínio. *Friction Stir Welding*. FSW.

## ABSTRACT

*Developed in 1991 by the The Welding Institute (TWI), the process called Friction Stir Welding is presented as an interesting alternative, compared to common fusion welding processes, mainly in aluminum alloys. Because it occurs entirely in the solid state, common problems related to melting of the material like hot cracking and porosity are avoided. Because the efforts involved in FSW are similar to those of conventional milling machines, this type of equipment becomes a viable option for process adaptation. Thus, this study had as main objective the adaptation of a conventional milling machine for Friction Stir Welding process in aluminum 1200 H14 plates, also establishing the parameters for better results of joint. Using the OFAT (One Factor At Time) method, the experiments were made in three sections in order to determinate the tool rotation and the welding speed, the pin height and the tool penetration depth for the best results. The study proved the possibility in using a milling machine for FSW process and made possible the comprehension of the effects of changing the parameters in the weld.*

**Keywords:** *Aluminium welding. Friction Stir Welding. FSW.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Seção transversal de uma junta unida em duplo passe por FSW, na qual estão indicadas as características básicas da ferramenta. ....	10
Figura 2 - Princípio do processo por <i>Friction Stir Welding</i> . A ferramenta rotativa não consumível penetra no material e gera calor por fricção, amolecendo o material e permitindo a solda. ....	11
Figura 3 - Diferentes configurações de juntas por fricção e mistura mecânica. (a) Topo; (b) Canto; (c) Em 'T'; (d) Peças sobrepostas; (e) Várias peças sobrepostas; (f) Em 'T' sobreposta; (g) Filete. ....	12
Figura 4 - Seção transversal de uma junta soldada por FSW indicando as regiões de diferentes microestruturas. ....	13
Figura 5 - Exemplos de diferentes características de ombro para a ferramenta de soldagem. ....	14
Figura 6 – Alguns exemplos de variações de pinos. ....	15
Figura 7 - Macrografia mostrando vazio em uma solda por <i>Friction Stir Welding</i> . ....	16
Figura 8 - Falha tipo " <i>kissing bond</i> " em macrografia de uma solda por <i>Friction Stir Welding</i> . ....	16
Figura 9 - Penetração incompleta na raiz em solda por <i>Friction Stir Welding</i> mostrada por micrografia. ....	17
Figura 10 - Ferramenta para soldagem FSW ilustrando a força vertical de soldagem e o ângulo de inclinação. ....	18
Figura 11 - Fresadora utilizada para o processo de soldagem FSW. ....	20
Figura 12 - Velocidades de rotação e avanço disponíveis na fresadora. ....	21
Figura 13 - Conjunto de fixação da ferramenta explodido. ....	21
Figura 14 - Ferramenta utilizada nos experimentos de soldagem FSW. ....	22
Figura 15 - Conjunto Mesa de trabalho explodido. ....	24
Figura 16 - Modelo de peça para a soldagem FSW com dimensões arbitradas. ....	24
Figura 17 - Ensaio de solda com rotação de 1200 RPM e avanço de 60 mm/min. Vistas (a) superior e (b) inferior da solda. ....	27
Figura 18 - Ensaio de solda com rotação de 1200 RPM e avanço de 45 mm/min. Vistas (a) superior e (b) inferior da solda. ....	28
Figura 19 - Ensaio de solda com rotação de 1200 RPM e avanço de 30 mm/min. Vistas (a) superior e (b) inferior da solda. ....	29
Figura 20 - Ensaio de solda com rotação de 2100 RPM e avanço de 30 mm/min. Vistas (a) superior e (b) inferior da solda. ....	30
Figura 21 - Ensaio para a determinação da altura do pino da ferramenta com um pino de 3 mm. Vistas (a) superior e (b) inferior da solda. ....	31
Figura 22 - Ensaio para a determinação da altura do pino da ferramenta com um pino de 2,7 mm. Vistas (a) superior e (b) inferior da solda. ....	32
Figura 23 - Ensaio para a determinação da altura do pino da ferramenta com um pino de 2,4 mm. Vistas (a) superior e (b) inferior da solda. ....	33

Figura 24 - Ensaio para a determinação da altura do pino da ferramenta com um pino de 2,1 mm. Vistas (a) superior e (b) inferior da solda.....	34
Figura 25 - Primeiro ensaio para determinação da profundidade do pino da ferramenta na peça. Vistas (a) superior e (b) inferior da solda.....	36
Figura 26 - Segundo ensaio para determinação da profundidade do pino da ferramenta na peça. Vistas (a) superior e (b) inferior da solda.....	36
Figura 27 - Seção da junta soldada com descida de 2,3mm da ferramenta. ....	37
Figura 28 - Seção da junta soldada com descida de 2,4mm da ferramenta. ....	37
Figura 29 - Seção da junta soldada com descida de 2,5mm da ferramenta. ....	38

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição da liga de alumínio 1200 H14 utilizada como metal base....	19
Tabela 2 - Composição da liga de aço utilizada na fabricação da ferramenta de soldagem.....	22
Tabela 3 - Resumo das dimensões da ferramenta de soldagem para um determinado material de peça de trabalho. ....	23
Tabela 4 - Resultados dos experimentos feitos através do método OFAT. ....	38

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>8</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>10</b>
2.1. A SOLDAGEM POR <i>FRICITION STIR WELDING</i> .....	10
2.2. VANTAGENS E DESVANTAGENS .....	11
2.3. TIPOS DE JUNTAS.....	12
2.4. ZONAS CARACTERÍSTICAS DAS JUNTAS SOLDADAS.....	12
2.5. FERRAMENTAS PARA FSW .....	13
2.6. DEFEITOS NA SOLDAGEM FSW .....	15
2.7. PARÂMETROS DA MÁQUINA .....	17
<b>3. MATERIAS E MÉTODOS.....</b>	<b>19</b>
3.1. MATERIAIS.....	19
3.2. MÉTODOS.....	24
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>27</b>
4.1. DETERMINAÇÃO DA ROTAÇÃO E AVANÇO .....	27
4.2. DETERMINAÇÃO DA ALTURA DO PINO .....	31
4.3. DETERMINAÇÃO DA PENETRAÇÃO IDEAL DA FERRAMENTA.....	35
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>40</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>41</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A soldagem por atrito e mistura mecânica (*Friction Stir Welding*) foi desenvolvida no Reino Unido, no *The Welding Institute* (TWI) no ano de 1991 (Mishra & Mahoney, 2007). O processo consiste na junção de duas partes metálicas pela ação de uma ferramenta não consumível composta por um ombro e um pino de geometrias particulares.

Devido ao calor gerado pelo atrito do ombro com a peça e a deformação plástica promovida pelo pino, os materiais das partes são misturados, unindo-as. O processo ocorre inteiramente no estado sólido, assim apresenta algumas vantagens em relação aos processos convencionais de soldagem por fusão. Sem a fusão do metal base evitam-se defeitos ocorridos na solidificação e pelas altas taxas de calor como trincas a quente e reduz distorções. Além disso, o processo apresenta benefícios como peças de menor peso, devido a não utilização de metal de adição; é ‘ambientalmente amigável’ pois não necessita de gases de proteção, não produz fumos (Rosato, 2003).

Muitos estudos e testes bem sucedidos foram executados com relação à soldagem FSW em metais de baixa temperatura de fusão, principalmente em ligas de alumínio. As pesquisas para o processo em metais de altas temperaturas de fusão são mais recentes (Kathia, 2015). A utilização de fresadoras convencionais para soldagem FSW é uma opção natural devido à semelhança dos esforços no processo de soldagem com os do processo comum de usinagem da máquina (Hiller, 2007).

Segundo (Oliveicki & Beskow, 2013), a utilização comercial da soldagem FSW iniciou-se no ano de 1997 pela indústria naval em painéis de alumínio de 3,15 mm de espessura. Em 1999, o processo foi utilizado pela empresa Boeing para a soldagem do tanque de combustível do foguete de lançamento Delta. No final do ano de 2012, a Honda introduziu o processo nas juntas do sub-chassi do automóvel Honda Accord, obtendo uma redução considerável no peso comparado a mesma peça soldada pelo processo MIG (*Metal Inert Gas*).

## 1.1. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho a adaptação do processo de soldagem por atrito e mistura mecânica (*Friction Stir Welding* - FSW) para uma fresadora convencional. Como objetivo específico deste trabalho tem-se a obtenção de uma junta de qualidade aceitável bem como estabelecer os parâmetros de rotação, avanço, altura do pino e penetração da ferramenta mais adequados da máquina para a situação em estudo.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. A SOLDAGEM POR FRICTION STIR WELDING

*Friction Stir Welding*, também chamado de Soldagem por atrito e mistura mecânica, é um processo de soldagem que ocorre no estado sólido. O processo consiste na utilização de uma ferramenta não consumível, composta de um ombro e um pino (Figura 1), que percorre a região da junta fazendo a mistura do material.

O ombro da ferramenta aquece o material através do atrito com a superfície da peça, aumentando a plasticidade do material sem que o mesmo se torne líquido. A temperatura máxima atingida no processo fica em torno de 80% da temperatura de fusão do material a ser soldado (Marconato, 2009) (Chao, 2003). O pino, por sua vez, penetra entre as partes a serem unidas, e pelo movimento de rotação causa a deformação plástica do material, misturando o material das partes, bem como parte da geração de calor no processo. Iniciado o processo de mistura, a ferramenta percorre toda a extensão da junta (Mishra & Mahoney, 2007). O princípio do processo é ilustrado na Figura 2.

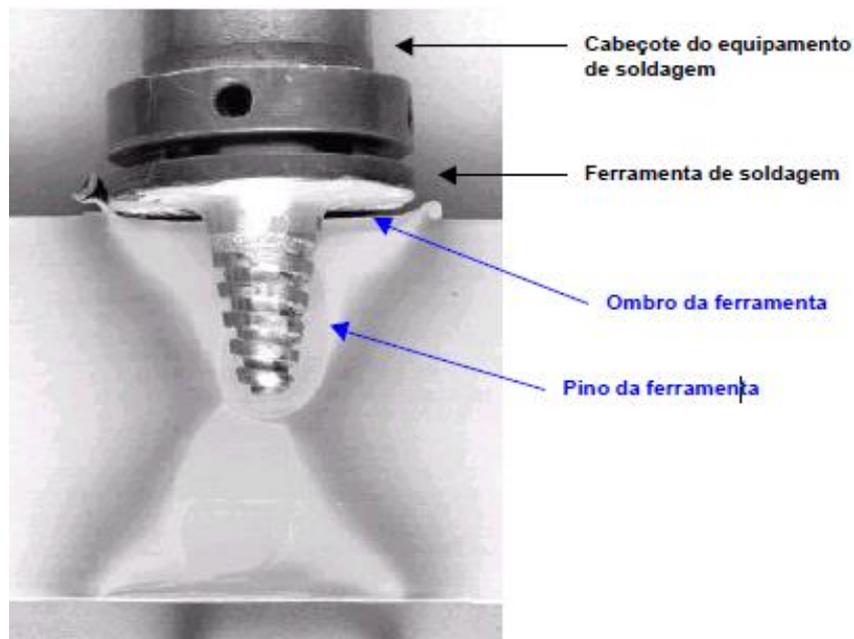
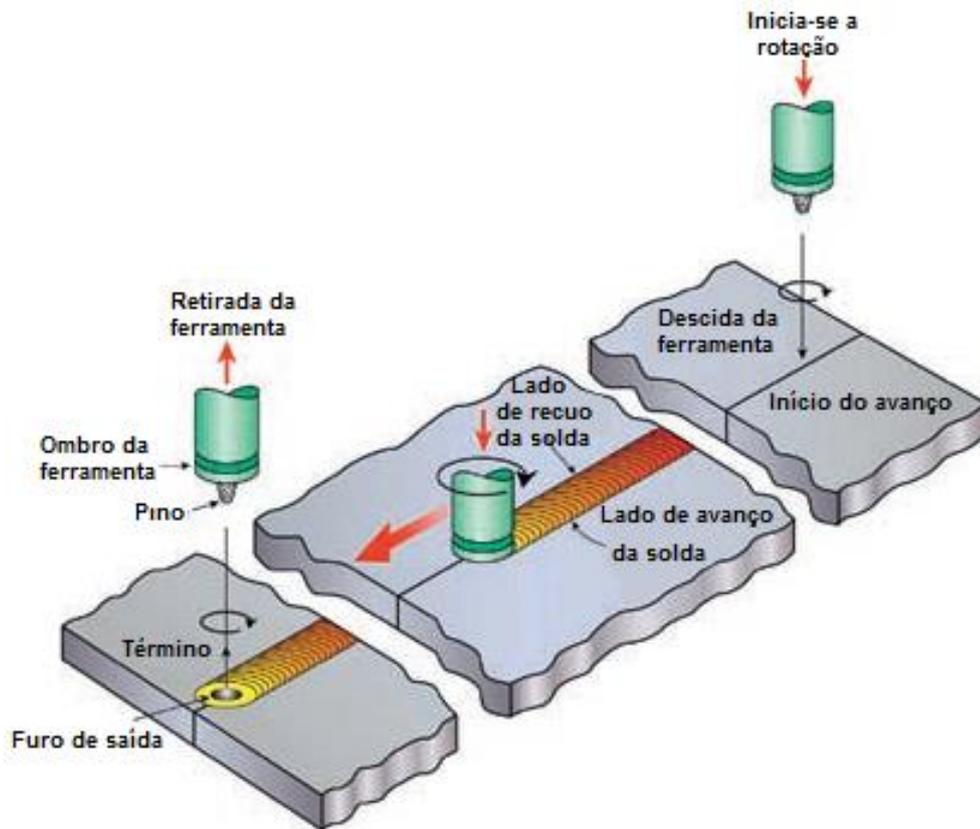


Figura 1 - Seção transversal de uma junta unida em duplo passe por FSW, na qual estão indicadas as características básicas da ferramenta.

Fonte: (Rosato, 2003).



**Figura 2 - Princípio do processo por *Friction Stir Welding*. A ferramenta rotativa não consumível penetra no material e gera calor por fricção, amolecendo o material e permitindo a solda.**

**Fonte: (Threadgill, Leonard, Shercliff, & Withers, 2009)**

## 2.2. VANTAGENS E DESVANTAGENS

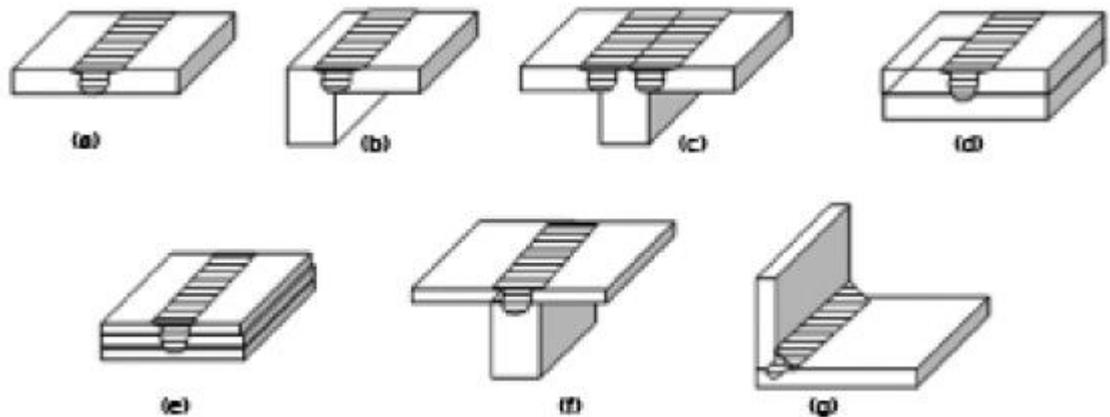
A soldagem FSW apresenta algumas vantagens significativas em relação aos processos convencionais de soldagem por fusão. Segundo (Rosato, 2003), por se tratar de um processo de soldagem no estado sólido, isto é, fazendo a junção com temperaturas abaixo da temperatura de fusão do material, evitam-se alguns defeitos associados à fusão e solidificação como trincas a quente, porosidades, diminuindo também os níveis de distorções e empenamentos. A não utilização de metal de adição proporciona peças sem peso adicionado, tornando-as mais leves. O processo também é considerado ambientalmente amigável devido a não utilizar gases de proteção, não gerar resíduos e ser mais eficiente energeticamente comparado a outros processos.

Como desvantagens do processo, (Souza, 2010) aponta: a necessidade de uma maior atenção quanto à fixação das peças a serem soldadas; o equipamento

não poder ser portátil e ser de alto custo; as ferramentas de soldagem ser exclusivas para cada tipo de junta e também a menor produtividade do processo tanto pela fixação das peças quanto pela velocidade de avanço da ferramenta na soldagem.

### 2.3. TIPOS DE JUNTAS

Diferente da soldagem por atrito tradicional, que limita a geometria das peças para que possam ser rotacionadas, o processo FSW pode ser aplicado para várias geometrias e tipos configurações, como pode ser observado na Figura 3.



**Figura 3 - Diferentes configurações de juntas por fricção e mistura mecânica. (a) Topo; (b) Canto; (c) Em 'T'; (d) Peças sobrepostas; (e) Várias peças sobrepostas; (f) Em 'T' sobreposta; (g) Filete.**

**Fonte: (Mishra & Mahoney, 2007).**

### 2.4. ZONAS CARACTERÍSTICAS DAS JUNTAS SOLDADAS

Como nas soldas convencionais por fusão, as juntas produzidas a partir do FSW apresentam-se divididas em zonas características, apresentando estruturas diferentes conforme a influência do processo sobre o material. Estas regiões são demonstradas na Figura 4 e descritas a seguir segundo (Mishra & Mahoney, 2007):



**Figura 4 - Seção transversal de uma junta soldada por FSW indicando as regiões de diferentes microestruturas.**

**Fonte: (Mishra & Mahoney, 2007).**

A - Metal base ou material não afetado: região mais distante da junta. Sua microestrutura e propriedades mecânicas não são afetadas pelo calor;

B - Zona afetada pelo calor (*heat-affected zone*): é mais próxima do centro da solda comparada a região anterior. O material passa por um ciclo térmico, modificando sua microestrutura e propriedades mecânicas. Esta região não apresenta deformação plástica;

C - Zona afetada termo mecanicamente (*Thermomechanically affected zone* "TMAZ"): nesta região há influência do calor e da deformação plástica na microestrutura assim como nas propriedades mecânicas;

D - Metal de solda ("*nugget*"): área totalmente recristalizada.

## 2.5. FERRAMENTAS PARA FSW

Como já foi dito, a ferramenta na soldagem por atrito e mistura mecânica tem a função de produzir o calor para o processo e de misturar o material das peças a serem unidas. A mistura ocorre por meio da deformação plástica, produzindo a junta. Para uma execução de uma solda de qualidade deve-se selecionar o material e a configuração mais adequada do ombro e do pino para a aplicação desejada (Mishra & Mahoney, 2007).

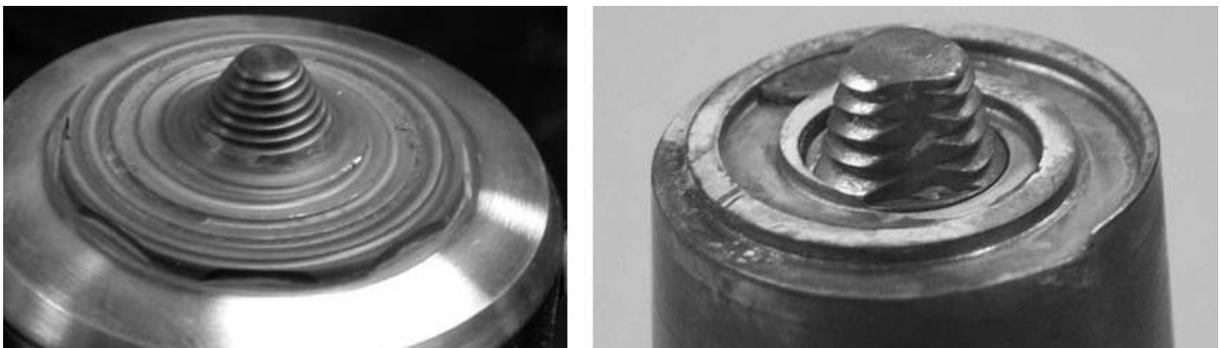
### 2.5.1. Material da ferramenta

Os principais fatores a serem considerados na seleção do material para a ferramenta são: a resistência aos esforços os quais a ferramenta é submetida no processo e a não reatividade com o material da peça a ser soldada. Dessa forma pode-se garantir a integridade da ferramenta, mantendo suas características geométricas durante toda a soldagem. Em razão destes fatores, um material comumente utilizado na soldagem *Friction Stir Welding* em ligas de alumínio é o aço da série AISI H13. Tal material apresenta boa estabilidade dimensional nas temperaturas de soldagem e propriedades mecânicas suficientes para a realização da solda (Rosato, 2003). Há casos em que o ombro e o pino são feitos de diferentes materiais, favorecendo a função de cada parte no processo.

### 2.5.2. Ombro da ferramenta

O ombro da ferramenta pode ser plano, côncavo ou convexo. Segundo (Mishra & Mahoney, 2007), o ombro côncavo armazena material em sua concavidade para iniciar a mistura e necessita de uma angulação da ferramenta. O ombro plano é o mais simples e não necessita de angulação. O ombro convexo não é muito utilizado, pois projeta o material para fora do pino, não apresentando sucesso nos testes (Mishra & Mahoney, 2007).

Buscando maior eficiência, o ombro pode ter sua superfície com características particulares, como mostra a Figura 5.



**Figura 5 - Exemplos de diferentes características de ombro para a ferramenta de soldagem.**

**Fonte: (Mishra & Mahoney, 2007).**

### 2.5.3. Pino da ferramenta

Os tipos de pinos mais comumente utilizados são: pino cilíndrico com ponta redonda, pino cilíndrico de ponta plana e pino de tronco de cone. No pino cilíndrico, a ponta redonda facilita a penetração do mesmo na peça. Em contrapartida o arredondamento faz com que a velocidade de rotação no contato do pino com a peça aumente gradualmente conforme a penetração (partindo da velocidade zero na ponta), o que não ocorre no pino de ponta plana. Já o tronco de cone é utilizado para peças de maior espessura e materiais mais duros, pois seu formato reduz o a força cisalhante sobre o pino comparado aos cilíndricos (Mishra & Mahoney, 2007).

Como no ombro, o pino da ferramenta pode receber atributos característicos para melhorar sua eficiência como ilustrado na Figura 6.

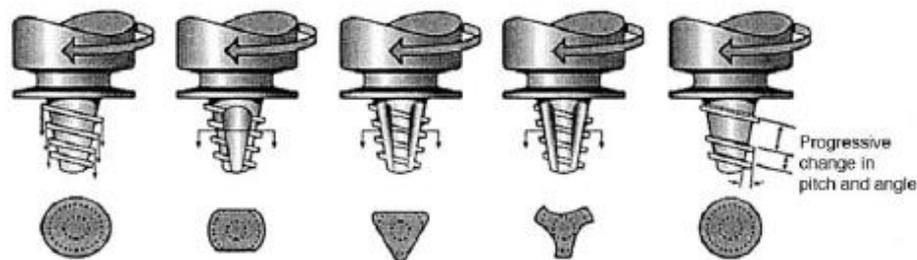


Figura 6 – Alguns exemplos de variações de pinos.

Fonte: (ESAB, 2010)

## 2.6. DEFEITOS NA SOLDAGEM FSW

Segundo (Mishra & Mahoney, 2007), os defeitos mais comuns encontrados em soldas por *Friction Stir Welding* são:

- Vazios: geralmente ficam no lado do avanço da solda podendo sair para a superfície ou não. São causados por baixa força de soldagem, velocidade de avanço da ferramenta muito elevada e fixação da peça insuficiente. A Figura 7 mostra um exemplo de vazio em uma solda por *Friction Stir Welding*.

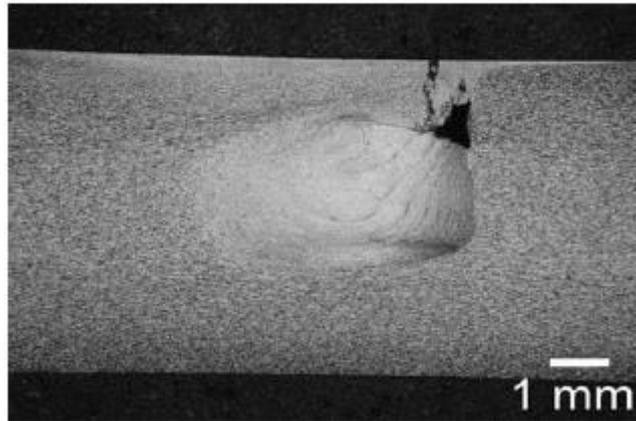


Figura 7 - Macrografia mostrando vazio em uma solda por *Friction Stir Welding*.

Fonte: (Mishra & Mahoney, 2007)

- Resíduo na linha da junta ("*Kissing Bond*"): a presença do oxido, inicialmente presente na superfície das peças, na região do metal de solda provoca uma linha de pontos de descontinuidade na junta, indicado na Figura 8. Pode ser causado por falta de limpeza da peça antes da soldagem ou deformação insuficiente entre as superfícies devido aos parâmetros de soldagem.



Figura 8 - Falha tipo "*kissing bond*" em macrografia de uma solda por *Friction Stir Welding*.

Fonte: (Mishra & Mahoney, 2007)

- Penetração incompleta na raiz: ocorre principalmente quando o pino da ferramenta é muito curto, ficando distante da base da peça. A Figura 9 mostra uma solda por *Friction Stir Welding* com defeito de penetração incompleta na raiz.

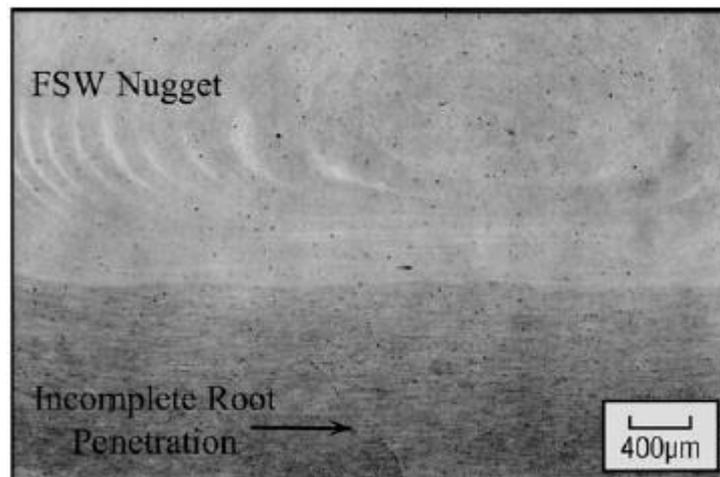


Figura 9 - Penetração incompleta na raiz em solda por *Friction Stir Welding* mostrada por micrografia.

Fonte: (Mishra & Mahoney, 2007)

## 2.7. PARÂMETROS DA MÁQUINA

Assim como os parâmetros de ferramenta (material, geometria e características especiais), o equipamento utilizado na soldagem deve permitir o controle de algumas variáveis determinantes do processo. Tais variáveis têm influência direta sobre a qualidade do produto da soldagem e suas propriedades, como descritas a seguir.

- Velocidade de avanço – o avanço da ferramenta tem influência direta na geração de calor do processo de soldagem FSW. Maiores velocidades de avanço resultam em menores temperaturas de trabalho e, conseqüentemente, menores avanços produzem maiores temperaturas (Oliveicki & Beskow, 2013). É válido atentar-se ao fato de que com maiores avanços e menores taxas de geração de calor, os esforços sobre a ferramenta durante a soldagem aumentam.

- Velocidade de rotação – a rotação da ferramenta é responsável pela mistura do material e, assim como a velocidade de avanço, está intimamente ligada a geração de calor. Desse modo, quanto maior a velocidade de rotação, maior o atrito da ferramenta com a peça e, conseqüentemente, maiores temperaturas de trabalho são atingidas. Sendo o calor um dos principais fatores na soldagem FSW, segundo (Aires, 2007), a razão entre as velocidades de avanço e rotação é um fator chave na otimização dos parâmetros do processo.
- Força vertical de soldagem – trata-se da força exercida pelo ombro da ferramenta sobre a peça, como ilustrado na Figura 10. Está diretamente relacionada com o aporte de calor na soldagem. Também é apontada como causa de falhas superficiais como formação de rebarbas (Oliveicki & Beskow, 2013).
- Ângulo de inclinação da ferramenta – algumas configurações de ferramenta demandam a utilização de uma angulação da ferramenta em relação à peça, mostrado na Figura 10. A inclinação auxilia na movimentação do material da frente para trás da ferramenta, exercendo também uma maior pressão sobre o material que se consolida na saída da ferramenta (Oliveicki & Beskow, 2013).

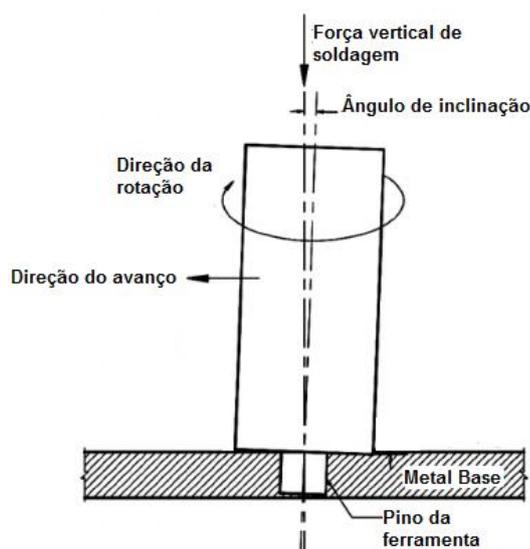


Figura 10 - Ferramenta para soldagem FSW ilustrando a força vertical de soldagem e o ângulo de inclinação.

Fonte: Adaptado de (Subramaniam, S., & S., 2013)

### 3. MATERIAS E MÉTODOS

Nesta seção estão apresentados inicialmente os materiais utilizados no trabalho e em seguida são descritos os métodos utilizados na execução da soldagem e também o procedimento de análise dos resultados obtidos.

#### 3.1. MATERIAIS

##### 3.1.1. Metal Base

Tendo em vista que a soldagem FSW em alumínio já foi alvo de inúmeros estudos e testes bem sucedidos e que envolve menores quantidades de energia e temperatura comparada à soldagem em aço, optou-se pelo alumínio como metal base para a solda. Dessa forma, foi selecionada uma chapa de alumínio descrita como 1200 H14 com espessura de 3 mm disponível na universidade. A composição do material foi verificada através de análise por espectrometria ótica. O resultado está apresentado a seguir na Tabela 1.

**Tabela 1 - Composição da liga de alumínio 1200 H14 utilizada como metal base.**

<b>Elemento</b>	<b>Cu</b>	<b>Si</b>	<b>Mg</b>	<b>Zn</b>	<b>Fe</b>	<b>Mn</b>	<b>Ni</b>
<b>%</b>	0,01296	0,52209	0,00175	0,01812	0,8632	0,00513	0,00708
	<b>Ti</b>	<b>Cr</b>	<b>Sn</b>	<b>Pb</b>	<b>Ca</b>	<b>Al</b>	
	0,014	0,00557	0,00604	0,00343	0,0064	Rest.	

Fonte: Autoria própria.

##### 3.1.2. Fresadora

O equipamento adaptado para o processo consiste em uma fresadora convencional do modelo Cardoso FC30, mostrado na Figura 11.



**Figura 11 - Fresadora utilizada para o processo de soldagem FSW.**

**Fonte: Autoria Própria.**

Comumente utilizadas sob esforços na horizontal, no caso de fresamento, e na vertical, em furações, as fresadoras apresentam-se como uma opção natural para sua adaptação para o processo FSW, visto que as forças envolvidas na soldagem são semelhantes às de usinagem no equipamento. O equipamento adotado possui oito velocidades para rotação e seis velocidades de avanço da mesa, como ilustrado na Figura 12. A fixação da ferramenta foi feita através de um mandril porta pinças que por sua vez é preso ao cabeçote da máquina por um encaixe cônico padrão ISO 30, um varão roscado para o aperto do cone e duas chavetas que restringem o escorregamento na rotação. Por fim, utilizando uma pinça padrão ER 40 de diâmetro interno de 20 mm, tem-se o conjunto de fixação da ferramenta à máquina completo, ilustrada na Figura 13.



**Figura 12 - Velocidades de rotação e avanço disponíveis na fresadora.**

Fonte: Autoria Própria.



**Figura 13 - Conjunto de fixação da ferramenta explodido.**

Fonte: Autoria Própria.

### 3.1.3. Ferramenta

Desejou-se utilizar um material amplamente utilizado para ferramentas na soldagem de peças em alumínio, o aço ferramenta AISI H13. Devido ao seu custo e disponibilidade limitada, optou-se por utilizar inicialmente outro aço, que já estivesse disponível. Posteriormente, conforme surgisse a necessidade, o material seria substituído pelo aço ferramenta. Contudo, o material utilizado na ferramenta foi bem sucedido nos ensaios, não necessitando a substituição. Sua composição foi obtida

por análise de espectrometria ótica, descrita na Tabela 2. Por meio de comparação, chegou-se à classificação mais próxima do material como sendo um aço liga AISI 8660 (MatWeb, 1996).

**Tabela 2 - Composição da liga de aço utilizada na fabricação da ferramenta de soldagem.**

<b>Elemento</b>	<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Si</b>	<b>Ni</b>	<b>Cr</b>
<b>%</b>	0,5457	0,6312	0,014	0,0271	0,3614	0,0751	0,2336
	<b>Mo</b>	<b>V</b>	<b>Al</b>	<b>W</b>	<b>Cu</b>	<b>Fe</b>	
	0,0088	0,002	0,1	0,0421	0,0659	97,912	

Fonte: Autoria própria.

Para o presente estudo, decidiu-se por utilizar a ferramenta com uma geometria simples, tanto pela simplicidade do equipamento disponível como também a fim de reduzir as variáveis do processo. Assim, a configuração da ferramenta foi de um ombro plano com um pino cilíndrico de ponta plana, ambos sem características especiais, como mostrado na Figura 14.



**Figura 14 - Ferramenta utilizada nos experimentos de soldagem FSW.**

Fonte: Autoria própria.

Por se tratar de uma implementação de um processo, a determinação de seus parâmetros de trabalho, bem como as configurações e dimensões da ferramenta ainda é algo subjetivo. Assim, os diâmetros do ombro e do pino da ferramenta foram baseados em experimentos descritos em (Mishra & Mahoney, 2007) como mostrado na Tabela 3, onde para uma chapa de 3 mm adotou-se ombro de 13 mm e pino de 5 mm de diâmetro. Como não foi descrita, a altura do pino foi inicialmente considerada como sendo a espessura da chapa a ser soldada, a qual poderia ser ajustada conforme a necessidade durante os testes.

**Tabela 3 - Resumo das dimensões da ferramenta de soldagem para um determinado material de peça de trabalho.**

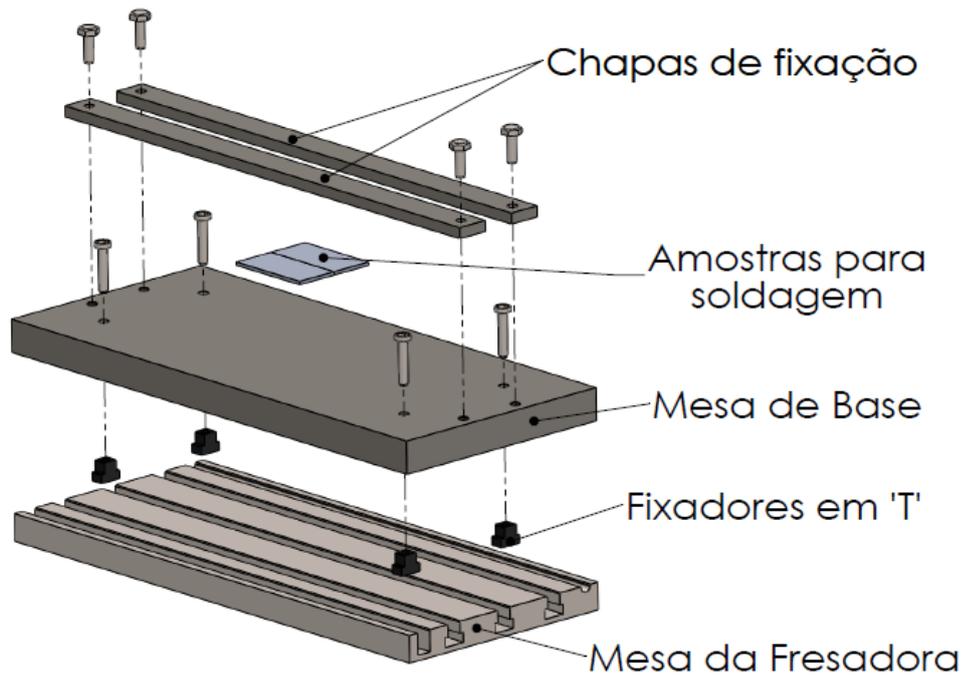
<b>Diâmetro do Ombro</b>	<b>Diâmetro do pino cilíndrico</b>	<b>Razão ombro-pino</b>	<b>Metal base e espessura</b>
<b>mm</b>	<b>mm</b>		
13	5	2,6:1	6061-T6 Al; 3mm
20-30	8,0-12	2,5:1 - 1,6:1	7050, 2195, 5083, 2024, 7075 Al; 6,35mm
23	8,2	2,8:1	2024-T351 Al; 6,4mm
20 e 16	6	3,3:1 - 2,7:1	5083 e 6061 Al; 5,5mm
12	4	03:01	1050 Al e Cobre livre de oxigênio; 1,8mm
25,4	7,87	3,22:1	7075-T7351 Al; 9,53mm
23	8,4	2,7:1	2524-T351 Al; 6,4mm
20	4	05:01	6064 Al para aço carbono; 4,5mm
23	8,2	2,8:1	2024-T351; 7mm
10	3,8	2,6:1	2095 Al; 1,63mm
25	9	2,8:1	5251 Al; 5mm

Fonte: Adaptado de (Mishra & Mahoney, 2007)

#### 3.1.4. Sistema de fixação das chapas

A fixação das amostras na mesa de trabalho foi feita por meio de duas barras de aço parafusadas em suas extremidades. Dessa forma foi deixado um espaço de 30 mm entre as barras para que a ferramenta percorresse sem risco de tocá-las.

Como base para acomodar o sistema de fixação das peças foi utilizado um bloco de aço AISI 1020. As dimensões foram determinadas a fim de que apresentasse massa elevada, para reduzir os efeitos da vibração da máquina sobre o conjunto, e atendesse o comprimento arbitrado da região de solda. Dessa forma, foram feitas as furações para as fixações tanto da mesa à máquina como também para o prensa chapas à mesa. O conjunto da mesa com suas fixações estão representados na Figura 15.



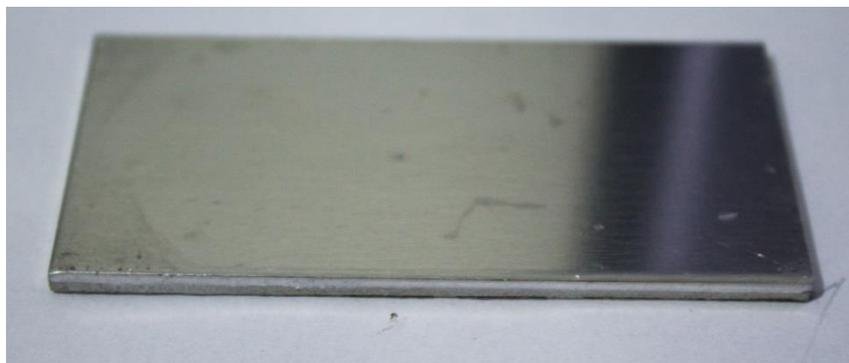
**Figura 15 - Conjunto Mesa de trabalho explodido.**

**Fonte: Autoria Própria.**

## 3.2. MÉTODOS

### 3.2.1. Preparação das chapas para soldagem

Utilizando uma guilhotina hidráulica foram obtidos os corpos de prova para a execução do processo como mostrado na Figura 16. Foram arbitradas as dimensões de 80x40 mm, consideradas suficientes tanto para a fixação das peças quanto na extensão da região para a solda.



**Figura 16 - Modelo de peça para a soldagem FSW com dimensões arbitradas.**

**Fonte: Autoria própria.**

### 3.2.2. Preparação da Máquina

Inicialmente foi incorporado o conjunto da mesa de trabalho à máquina utilizando sistema de fixação tipo 'T'. Por fim, prendendo o conjunto de fixação da ferramenta ao cabeçote da máquina, por meio de uma barra roscada de ½ polegada, tem-se a máquina pronta para a execução dos testes.

### 3.2.3. Procedimentos de soldagem

Com o equipamento pronto, restam quatro parâmetros a serem determinados a fim de se obter resultados satisfatórios de solda: a altura do pino da ferramenta, a rotação e velocidade de avanço da ferramenta, e a profundidade de penetração da ferramenta na peça a ser soldada, que neste caso substitui o parâmetro de força exercida pelo ombro da ferramenta sobre a peça. Para a determinação de uma combinação desses parâmetros que fornecesse uma solda de qualidade optou-se por utilizar o método OFAT (*One Factor At a Time*), no qual se altera um parâmetro por vez a cada ensaio, avaliando a influência do mesmo sobre o resultado.

O procedimento foi feito da seguinte forma: após a fixação das chapas na mesa, posicionou-se a ferramenta com seu centro alinhado à linha da junta. Ligou-se a rotação da ferramenta e abaixou-se a ferramenta cuidadosamente até que o pino toque a superfície das chapas, atentando-se para o contato e o ruído na ocorrência do toque, demarcando assim a posição de profundidade zero da ferramenta. Em seguida, foi feita a descida da ferramenta de forma controlada, com a profundidade determinada, sendo imprescindível que o ombro da ferramenta estabelecesse contato com a superfície da peça. Ligou-se o avanço. Após percorrer o comprimento desejado da junta, desligou-se o avanço e ergueu-se a ferramenta, retirando-a completamente da peça. Por fim desligou-se a rotação e retiraram-se as chapas da fixação para a inspeção do resultado.

Os parâmetros iniciais da máquina foram arbitrados em 1200 RPM para rotação e 60 mm/min para o avanço, apenas evitando os limites, para que fosse possível sua alteração nos experimentos seguintes tanto para mais quanto para menos, dependendo das necessidades observadas.

#### 3.2.4. Preparação das amostras para inspeção

Na análise dos resultados, apenas a inspeção visual foi o suficiente para verificar a influência da mudança dos parâmetros do processo sobre a solda.

As diferenças nos resultados dos dois primeiros experimentos, referentes à determinação da rotação, avanço e altura do pino da ferramenta, ficaram bem evidentes, como pode ser observado na seção de resultados deste trabalho. Desse modo, as juntas foram observadas somente em suas superfícies, sem qualquer preparação prévia.

No ultimo experimento, referente à determinação da penetração ideal da ferramenta, os resultados eram superficialmente mais semelhantes, então se optou por fazer uma análise mais detalhada.

No preparo das amostras foi feito inicialmente o corte das chapas soldadas, na região central de cada uma das diferentes seções, utilizando uma cortadeira policorte refrigerada. Com as peças cortadas, as superfícies foram lixadas com lixas d'água de granulometria 120, 320, 400, 600, 1200 e 2000 *mesh*. Por fim, as amostras foram submetidas a um ataque químico de *Marble*, a fim de destacar a região do material afetada pela soldagem. Dessa forma puderam-se avaliar, além dos defeitos superficiais, os defeitos internos da junta como possíveis vazios.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. DETERMINAÇÃO DA ROTAÇÃO E AVANÇO

Iniciou-se os testes com o pino da ferramenta com comprimento de 3 mm (espessura da chapa) e um canal de 0,5 mm de profundidade e 8 mm de largura na mesa de trabalho para evitar que o pino toque a mesa. A seguir, estão descritos os ensaios para determinação da rotação e o avanço mais apropriado para o presente caso.

- **1200 RPM e 60 mm/min**

Pode-se observar na Figura 17 (a) que a mistura do material não se completa, deixando uma grande falha em todo o comprimento da junta. Outro ponto que se pode observar é que o material da parte inferior não iniciou mistura, sendo apenas deformado para baixo, o que gerou um abaulamento da chapa dentro do canal existente na mesa de base. Entende-se como causa dos presentes resultados à insuficiência de calor gerado, impossibilitando a deformação necessária para a mistura completa.

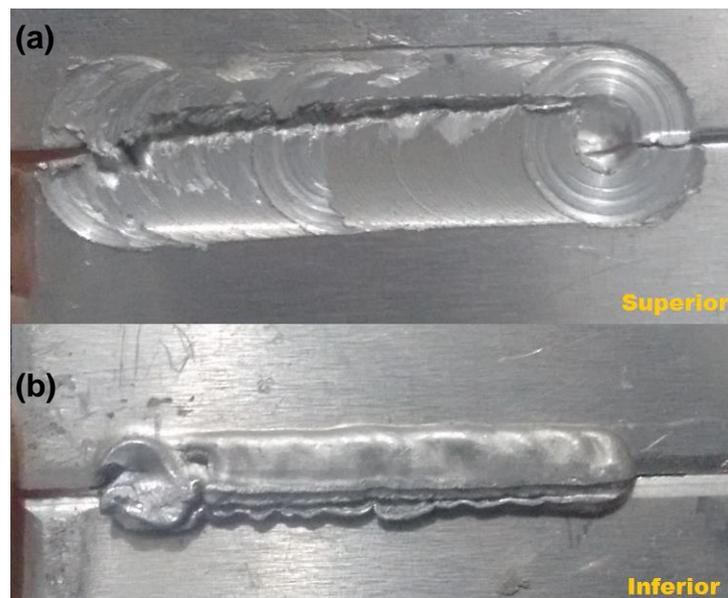
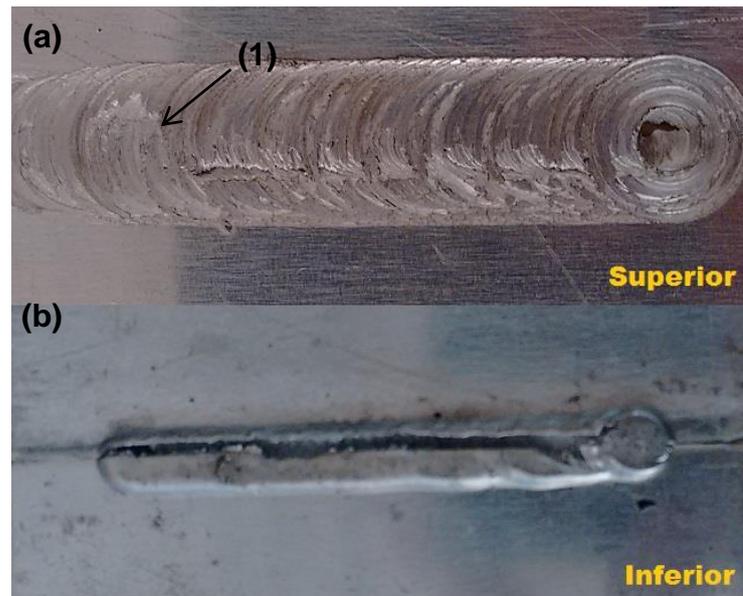


Figura 17 - Ensaio de solda com rotação de 1200 RPM e avanço de 60 mm/min. Vistas (a) superior e (b) inferior da solda.

Fonte: Autoria Própria.

- **1200 RPM e 45 mm/min**

Com o objetivo de aumentar o aporte de calor na região da junta diminuiu-se o avanço da ferramenta. Agora, com o avanço de 45 mm/min obteve-se o resultado mostrado na Figura 18.



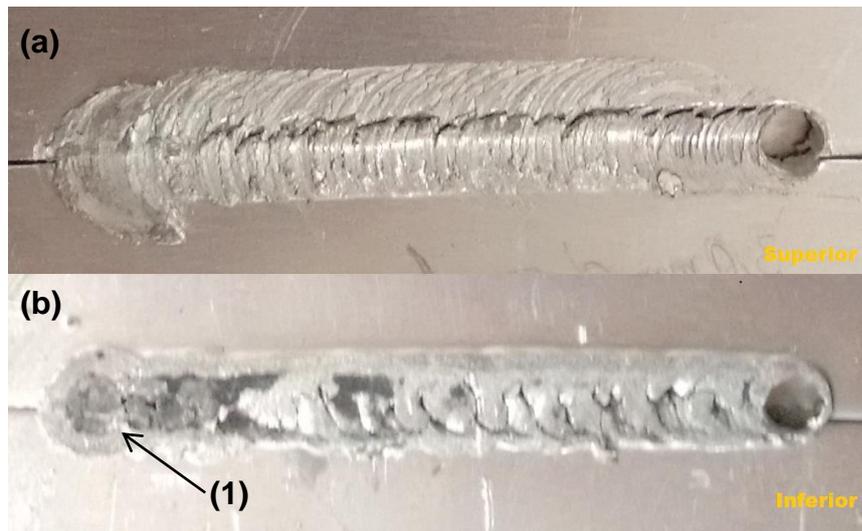
**Figura 18 - Ensaio de solda com rotação de 1200 RPM e avanço de 45 mm/min. Vistas (a) superior e (b) inferior da solda.**

**Fonte: Aatoria Própria.**

Notou-se uma melhora na mistura na face (parte superior) da junta, como pode ser observado na Figura 18 (a). Entretanto, a raiz (parte inferior) apresentou-se muito parecida como no ensaio anterior, como mostrado na Figura 18 (b). Na região do início da solda indicado por (1) na Figura 18 (a), onde a ferramenta permaneceu mais tempo antes de ligar o avanço, não apresentou falha na superfície. Com isso pode-se inferir que a permanência da ferramenta por um maior tempo no local apresenta resultados melhores, confirmando a hipótese anterior na diminuição do avanço.

- **1200 RPM e 30 mm/min**

Dando sequência aos experimentos, reduziu-se o avanço novamente. O resultado, agora com 30 mm/min de avanço, é mostrado na Figura 19.



**Figura 19 - Ensaio de solda com rotação de 1200 RPM e avanço de 30 mm/min. Vistas (a) superior e (b) inferior da solda.**

**Fonte: Autoria Própria.**

Pode-se observar na Figura 19 (a) que a face não apresentou melhorias neste caso, inclusive o ombro da ferramenta deixa de tocar uma das peças após o acionamento do avanço. Isso pode ter sido ocasionado por problemas no nivelamento da mesa base, no método de fixação das chapas ou até mesmo por diferença na espessura pelo comprimento da peça. No entanto, a parte inferior da amostra apresentou melhora. Observa-se, na Figura 19 (b), que agora o material da raiz deixa de ser apenas empurrado para baixo e passa a participar da mistura, principalmente no início da junta, indicado por (1), onde a ferramenta permaneceu por mais tempo.

Apesar das melhorias, nota-se agora a presença de um furo atravessando a peça no final da junta. Esse defeito foi tratado com maior atenção na próxima seção, onde buscou-se uma altura ideal para o pino da ferramenta. Em vista disso,

continuou-se os testes para os parâmetros da máquina atentando principalmente para a qualidade da mistura do material.

- **2100 RPM e 30 mm/min**

A fim de se aumentar o calor no processo, visto que se chegou ao limite mínimo do avanço permitido pelo equipamento, aumentou-se desta vez, a velocidade de rotação da ferramenta. Dessa forma, com rotação de 2100 RPM e avanço de 30 mm/min, obteve-se o resultado mostrado na Figura 20.

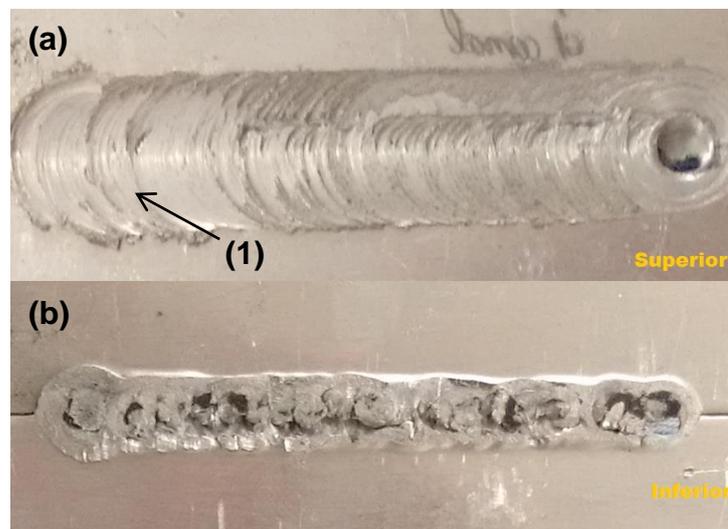


Figura 20 - Ensaio de solda com rotação de 2100 RPM e avanço de 30 mm/min. Vistas (a) superior e (b) inferior da solda.

Fonte: Autoria Própria.

Nota-se na Figura 20 (a) uma melhora considerável principalmente na parte superior. A região do início da solda apresentou uma boa mistura indicado na figura por (1). Percebe-se na Figura 20 (b) que agora o material da parte inferior está totalmente envolvido na mistura, embora não apresente um preenchimento constante da junta. Acredita-se que esse defeito ocorra devido ao pino atravessar a espessura da chapa. Pôde-se confirmar essa suspeita nos ensaios posteriores, visto que se chegou ao limite da fresadora em questão de máxima rotação e mínimo avanço.

#### 4.2. DETERMINAÇÃO DA ALTURA DO PINO

O procedimento de soldagem foi realizado conforme os testes da seção anterior, entretanto agora os parâmetros da máquina ficaram fixos com rotação de 2100 RPM e avanço de 30 mm/min modificando apenas o comprimento do pino da ferramenta.

A análise dos resultados foi, mais uma vez, apenas por inspeção visual. A partir dessa análise foi determinada a altura do pino adequada para a solda em ocasião.

Optou-se pela retirada do canal da mesa para os ensaios seguintes a fim de evitar que a ferramenta atravessasse a chapa ou ocasionasse abaulamento na parte inferior da junta soldada.

Seguem abaixo os ensaios para determinação da altura ideal para o pino da ferramenta.

- **Altura do pino de 3 mm**

Devido à retirada do canal da mesa, o pino com altura igual à espessura da chapa tocou a mesa antes de se estabelecer o contato necessário entre o ombro da ferramenta e a superfície superior das chapas. O resultado é mostrado na Figura 21.

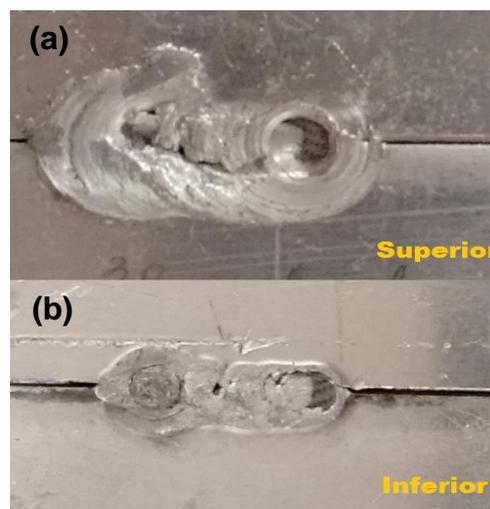


Figura 21 - Ensaio para a determinação da altura do pino da ferramenta com um pino de 3 mm. Vistas (a) superior e (b) inferior da solda.

Fonte: Autoria Própria.

- **Altura do pino de 2,7mm (-10%)**

Utilizando um decremento de 10% sobre o valor inicial, o segundo experimento, então, foi feito com o pino com 2,7 mm de comprimento.

Observando o resultado apresentado na Figura 22 nota-se que neste caso já foi possível percorrer uma maior extensão da chapa com o ombro da ferramenta tocando as chapas. No entanto, percebeu-se, pelas marcas indicadas por (1) na Figura 22 (b), que a ferramenta ainda tocou a mesa em alguns momentos e o contato do ombro sofreu influência disso. Possivelmente, isso ocorre devido a irregularidades na mesa ou variações na espessura da chapa como na seção anterior. Como consequência destes eventos, a junta apresentou varias falhas superficiais, o que levou a dar continuidade aos experimentos.

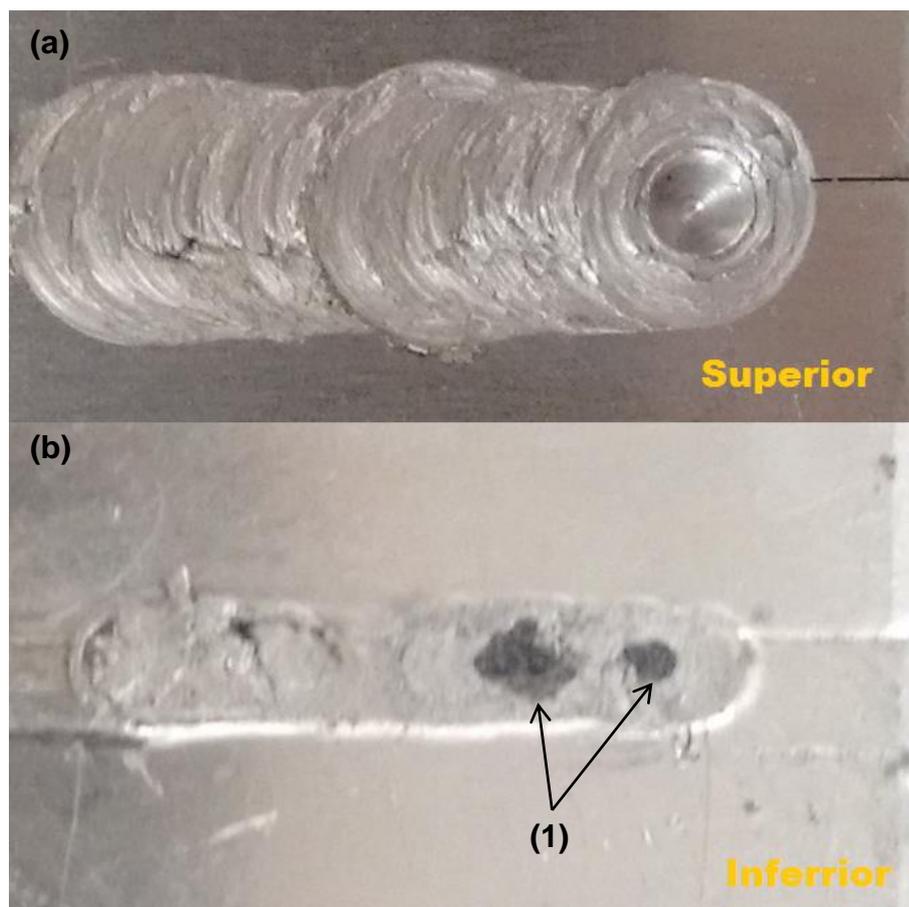


Figura 22 - Ensaio para a determinação da altura do pino da ferramenta com um pino de 2,7 mm. Vistas (a) superior e (b) inferior da solda.

Fonte: Autoria Própria.

- **Altura do pino de 2,4mm (-20%)**

Seguindo com o decréscimo de 10%, agora com um pino com 2,4 mm de altura, obteve-se o resultado observado na Figura 23. A parte superior da amostra, mostrada na Figura 23 (a), apresenta-se da forma ideal para a junta, com marcas regulares do ombro na superfície e sem defeitos superficiais, o que indica bom contato do mesmo com as chapas. Pode-se notar também que na parte inferior, na região indicada por (1) na Figura 23 (b), ocorreu um início de mistura do material como o desejado, mas com o avanço da ferramenta percebe-se que o pino ultrapassa as chapas, produzindo uma superfície com várias falhas bem como um furo no fim indicado por (2) na Figura 23 (a).

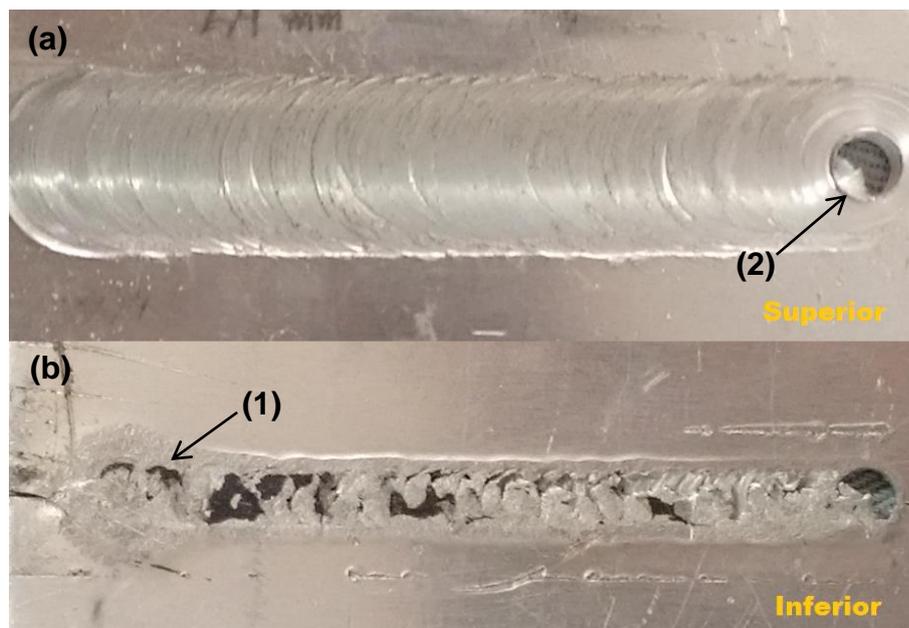


Figura 23 - Ensaio para a determinação da altura do pino da ferramenta com um pino de 2,4 mm. Vistas (a) superior e (b) inferior da solda.

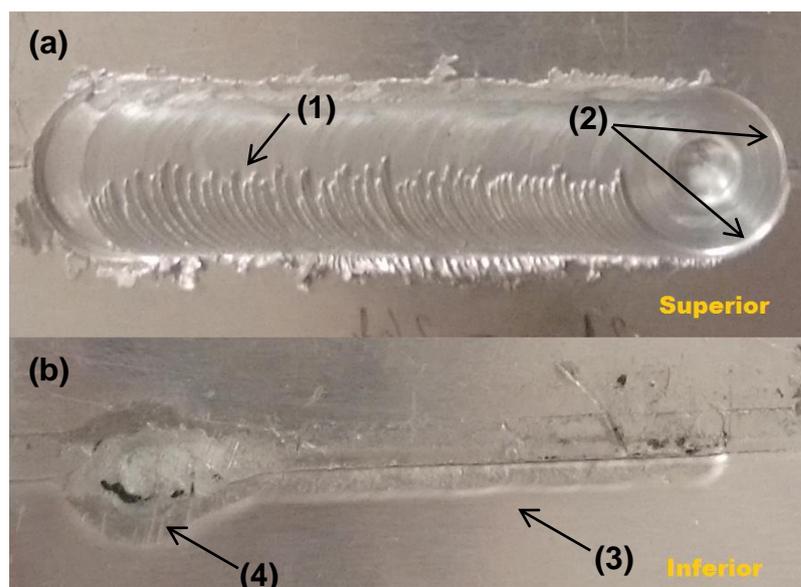
Fonte: Autoria Própria.

- **Altura do pino de 2,1mm (-30%)**

Continuando os testes, agora com um pino de 2,1 mm, obteve-se o resultado apresentado na Figura 24.

O experimento apresentou a superfície superior completamente preenchida como no experimento anterior, porém com marcas de material excedente em um dos lados indicado por (1) na Figura 24 (a). Acredita-se que tais marcas sejam devido a uma pequena diferença na altura das chapas em sua fixação na mesa base, o que fez com que houvesse mais material em um dos lados do ombro que foi sendo jogado para trás conforme o avanço da ferramenta. Outros indicativos disso são a diferença entre as marcas do ombro nas duas chapas ao final da soldagem, na Figura 24 (a) indicado por (2) e também o rastro do pino da ferramenta visto por baixo da junta, que se apresenta em apenas uma das chapas, indicado por (3) na Figura 24 (b).

A respeito da parte inferior da amostra, nota-se uma boa penetração no início, onde a ferramenta permaneceu por mais tempo (região indicada por 4 na Figura 24 (b)), e no decorrer do avanço percebe-se a falha na penetração que deve ser solucionada com a alteração na penetração da ferramenta como descrito na próxima seção.



**Figura 24 - Ensaio para a determinação da altura do pino da ferramenta com um pino de 2,1 mm. Vistas (a) superior e (b) inferior da solda.**

**Fonte: Autoria Própria.**

Em uma análise geral, considerou-se este como o melhor resultado até então. Portanto, a altura do pino da ferramenta considerada mais apropriada para este caso em específico é de 2,1 mm.

#### 4.3. DETERMINAÇÃO DA PENETRAÇÃO IDEAL DA FERRAMENTA

Uma variável determinante no processo de soldagem FSW é a força normal exercida pelo ombro da ferramenta sobre a superfície das peças a serem unidas. Devido à simplicidade do equipamento, não há como controlar tal parâmetro diretamente. Assim, será feito o controle a partir da profundidade de penetração da ferramenta na peça.

No primeiro teste, iniciou-se com a descida do pino em 2,5 mm e, com o decorrer do avanço, foi reduzida a profundidade de penetração para 2,4 mm, 2,3 mm e 2,2mm, como mostrado na Figura 25. Observando a raiz da junta na Figura 25 (b), nota-se falha de penetração se iniciando ao final do passe de 2,3 mm. Pela face da solda, percebe-se que ao chegar em 2,2 mm o ombro da ferramenta tem contato muito reduzido com a chapa e poucos sinais de falhas na superfície, o que inviabiliza a soldagem nestas condições. Em razão disso e a fim de se obter uma segunda amostragem do experimento, executou-se o processo novamente da mesma forma, no entanto, desta vez excluindo a penetração a 2,2 mm. Observa-se pela Figura 26, que o segundo ensaio apresentou resultados semelhantes ao teste anterior considerando a região com os mesmos parâmetros.

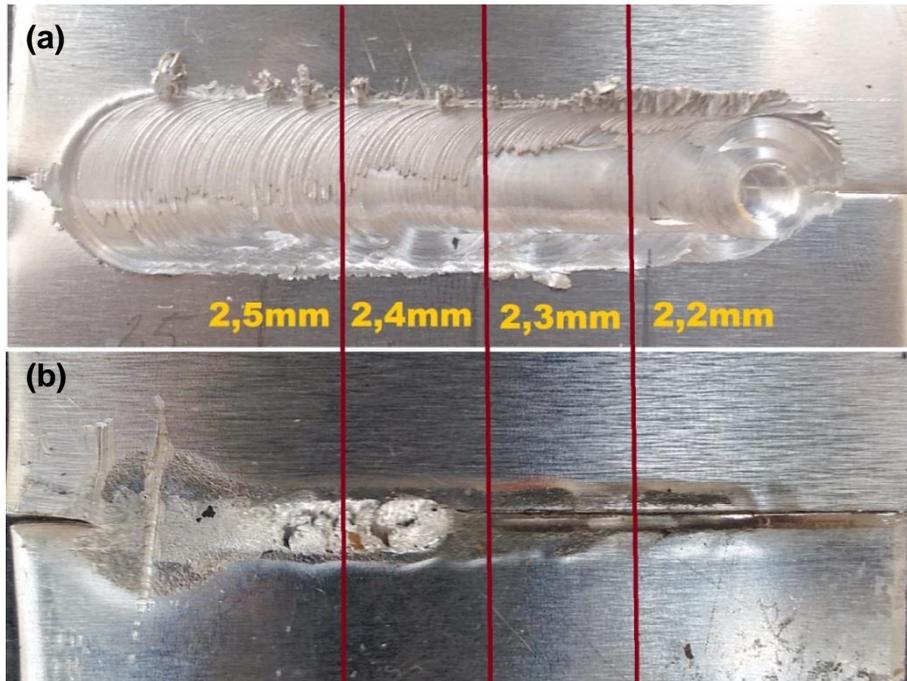


Figura 25 - Primeiro ensaio para determinação da profundidade do pino da ferramenta na peça. Vistas (a) superior e (b) inferior da solda.

Fonte: Autoria Própria.

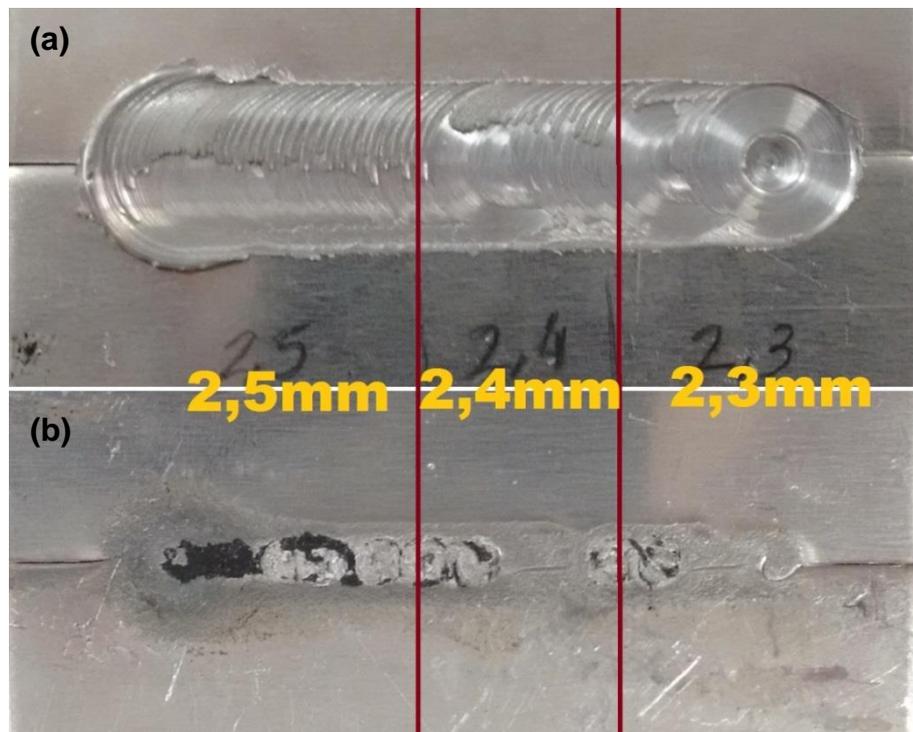
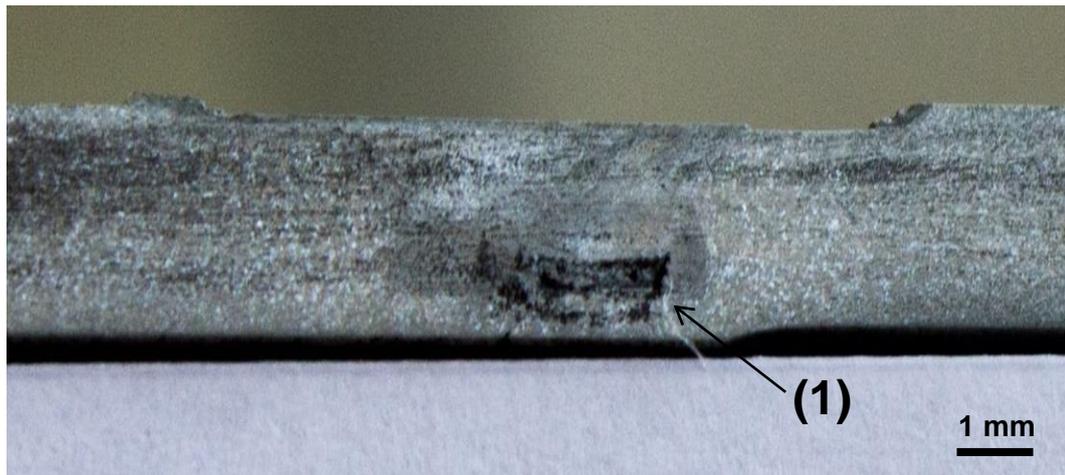


Figura 26 - Segundo ensaio para determinação da profundidade do pino da ferramenta na peça. Vistas (a) superior e (b) inferior da solda.

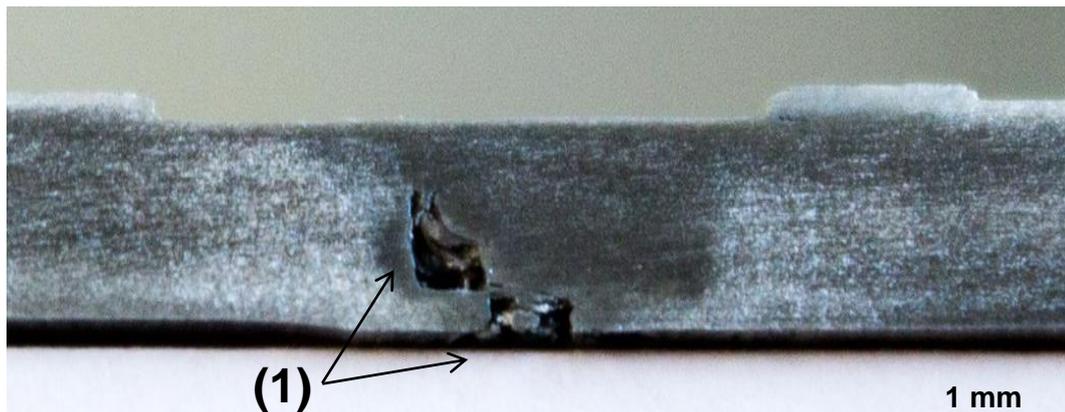
Fonte: Autoria Própria.

A seguir são mostradas as fotos das seções das soldas para cada uma das penetrações executadas, cortadas e preparadas conforme o procedimento descrito na seção 3.2.4. A Figura 27 indica a seção da solda com penetração de 2,3 mm; a Figura 28 indica a seção da solda com penetração de 2,4 mm e a Figura 29 indica a seção da solda com penetração de 2,5 mm.



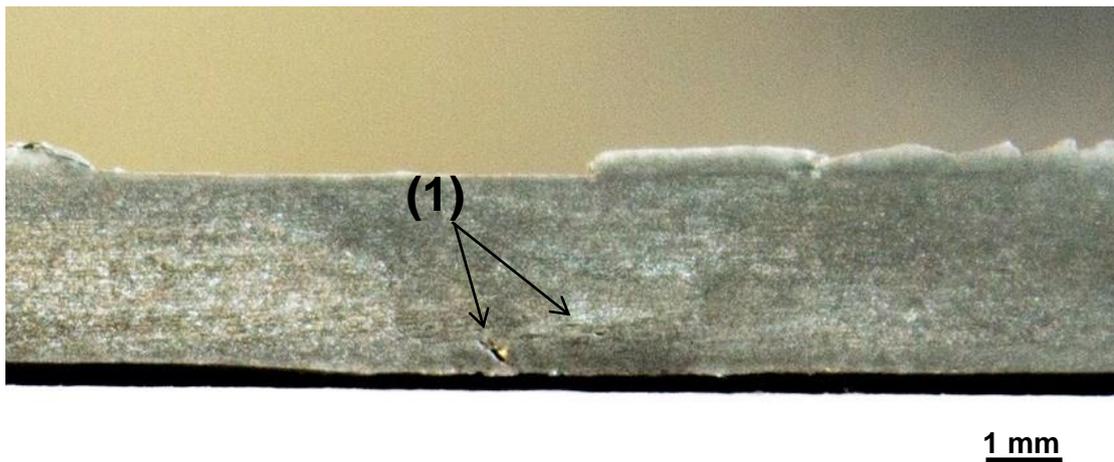
**Figura 27 - Seção da junta soldada com descida de 2,3mm da ferramenta.**

**Fonte: Autoria Própria.**



**Figura 28 - Seção da junta soldada com descida de 2,4mm da ferramenta.**

**Fonte: Autoria Própria.**



**Figura 29 - Seção da junta soldada com descida de 2,5mm da ferramenta.**

**Fonte: Autoria Própria.**

Pela comparação das três seções apresentadas, tem-se como melhor resultado o ensaio com 2,5 mm de penetração do pino. Nas figuras Figura 26 e Figura 27, correspondentes aos experimentos de penetração de 2,3 mm e 2,4 mm respectivamente, pode-se perceber a presença de grandes vazios, indicados por (1), que comprometem a qualidade da junta. Já a amostra com 2,5 mm de descida, mostrada na Figura 29, ainda que não apresente a junta ideal é superior às outras duas, sendo observados apenas dois pontos vazios bem menores indicados por (1).

A Tabela 4 mostra uma síntese dos experimentos executados, onde os parâmetros são classificados como satisfatórios ou não-satisfatórios para a situação em estudo.

**Tabela 4 - Resultados dos experimentos feitos através do método OFAT.**

<b>Avanço</b> [mm/min]	<b>Rotação</b> [rpm]	<b>Altura do pino</b> [mm]	<b>Penetração</b> [mm]
60	1200	3,0	2,2
45	2100	2,7	2,3
30		2,4	2,4
		2,1	2,5

Fonte: Autoria própria.

Tem-se como possíveis causas dos vazios presentes nas juntas: a velocidade de avanço elevada e/ou baixa força de soldagem. Referente à velocidade de avanço, esta não pode ser alterada, pois já se encontra no limite mínimo do equipamento. Quanto à força vertical de soldagem, que no caso é representada pela profundidade de penetração do pino no material, acredita-se que seja inviável aumentar a penetração devido ao aparecimento de rebarbas desde 2,3 mm de profundidade, como também a redução excessiva na espessura da seção da junta.

Desta maneira, como forma de aprimorar os resultados, acredita-se que a maneira mais viável seja a alteração nos parâmetros da ferramenta como, por exemplo, a utilização de um pino com rosca ou outra característica que aumente sua eficiência.

## 5. CONCLUSÕES

Através dos resultados da implementação do processo de soldagem *Friction Stir Welding* a uma fresadora convencional pôde-se chegar as seguintes conclusões:

- A adaptação do processo de soldagem *Friction Stir Welding* em fresadoras convencionais é praticável, demandando apenas um conjunto para fixação das peças e ferramenta.
- Os resultados obtidos, ainda que não sejam inteiramente satisfatórios, foram suficientes para a validação do experimento, pois mostram a possibilidade da obtenção de uma junta por soldagem FSW. Estes também serviram para compreensão da influência dos parâmetros envolvidos no processo sobre a solda, e para inferir sobre algumas alternativas para melhoria dos resultados.

Por fim, espera-se que os resultados obtidos neste trabalho possam servir de ponto de partida para estudos futuros, tanto no aprimoramento ou análise mais aprofundada deste caso, como para outras aplicações do processo.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- MatWeb*. (1996). Acesso em 7 de Junho de 2017, disponível em MatWeb:  
<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=d036dc901869412fa1695f31268d7c52&ckck=1>
- Aires, L. (2007). Análise experimental do comportamento à fadiga em juntas soldadas por fricção linear de ligas de alumínio para a indústria aeronáutica. *Dissertação de Mestrado em Materiais, Instituto Superior Técnico*. Lisboa.
- Chao, Y. J. (2003). *Heat Transfer in Friction Stir Welding - Experimental and Numerical Studies*. University of South Carolina, Department of Mechanical Engineering, Columbia.
- ESAB. (2010). Friction Stir Welding. Suécia.
- Hiller, D. J. (2007). Estudo de parâmetros e percursos no processo de soldagem de mistura por atrito. *Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro.
- Kathia, K. R. (Abril de 2015). Effect of Forces over Friction Stir Welding Parameters during FSW Process. (*IJRMEE*) *International Journal on Recent Technologies in Mechanical and Electrical Engineering*, pp. 54-57.
- Kou, S. (2003). *Welding Metallurgy*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Marconato, E. A. (2009). Influência de defeitos nas propriedades mecânicas de juntas soldadas por FSW da liga AA6013-T6. *Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais*. São Carlos, São Paulo.
- Mishra, R. S., & Mahoney, M. W. (2007). *Friction Stir Welding and Processing*. Missouri, EUA: ASM International.
- Oliveicki, N. J., & Beskow, A. B. (Junho de 2013). Análise Dos Parâmetros do Processo de Solda por Fricção em uma Liga de Alumínio. *Perspectiva*, 37, pp. 15-29.

- Rosato, A. (2003). Estrutura Integral por Soldagem por Atrito "Friction Stir Welding - FSW" Requisitos básicos para o projeto estrutural. São José dos Campos, SP, Brasil.
- Souza, G. S. (2010). Influência da geometria da ferramenta na soldagem da liga de alumínio 5052 pelo processo Friction Stir Welding. *Dissertação de Mestrado em Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná*. Curitiba, Paraná.
- Subramaniam, S., S., N., & S., D. A. (2013). Acoustic emission-based monitoring approach for friction stir welding of aluminum alloy AA6063-T6 with different tool pin profiles. *Engineering Manufacture*.
- Threadgill, P. L., Leonard, A. J., Shercliff, H. R., & Withers, P. J. (Março de 2009). Friction Stir Welding of Aluminium Alloys. *International Materials Reviews, TWI, 54(2)*, pp. 49-93.
- Verástegui, R. N. (Junho de 2012). Estudo de uniões dissimilares Alumínio-Aço soldadas por "Solda Ponto por Fricção e Mistura Mecânica com Preenchimento do Furo" (Friction Spot Welding - FSpW). *Tese de Doutorado em Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, Rio Grande do Sul.