

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADEMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ERIKA ZIJLSTRA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA FERRAMENTA NA QUALIDADE DO
CORDÃO DE SOLDA NO PROCESSO *FRICTION STIR WELDING***

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2017

ERIKA ZIJLSTRA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA FERRAMENTA NA QUALIDADE DO
CORDÃO DE SOLDA NO PROCESSO *FRICTION STIR WELDING***

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica, do Departamento
Acadêmico de Mecânica, da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Roger Navarro
Verástegui

Coorientador: Prof. Dr. Davi Fusão

PONTA GROSSA

2017



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Ponta Grossa
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Departamento Acadêmico de Mecânica
Bacharelado em Engenharia Mecânica



TERMO DE APROVAÇÃO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA FERRAMENTA NA QUALIDADE DO CORDÃO DE
SOLDA NO PROCESSO *FRICTION STIR WELDING***

por

ERIKA ZIJLSTRA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 29 de junho de 2017 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharela em Engenharia Mecânica. A candidata foi arguida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Davi Fusão
Coorientador

Prof. Dr. Anderson Geraldo Marendia Pukasiewicz
Membro Titular

Prof. Dr. Oscar Regis Júnior
Membro Titular

Prof. Dr. Marcos Eduardo Soares

Responsável pelos TCC

Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de
Carvalho

Coordenador do Curso

RESUMO

ZIJLSTRA, Erika. **ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA FERRAMENTA NA QUALIDADE DO CORDÃO DE SOLDA NO PROCESSO *FRICITION STIR WELDING***. 2017. 56. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017.

Friction Stir Welding (FSW), conhecida como soldagem por atrito, foi desenvolvida no Reino Unido, no início da década de 90, pelo TWI (The Welding Institute). O processo consiste na utilização de uma ferramenta rotativa não-consumível, que gera calor e deformação plástica através do atrito. A ferramenta é composta por um pino e um ombro, estes quando entram em contato com a peça de trabalho, geram o calor necessário para que haja a mistura responsável pela união da junta. Apesar de ser um processo relativamente novo, a FSW possui diversas vantagens, como boas propriedades mecânicas e impactos ambientais baixíssimos quando comparados a outros processos, porém a vantagem mais significativa é o desempenho que a soldagem por atrito apresenta quando aplicada em ligas de Alumínio. Para melhores resultados de qualidade da junta, diferentes parâmetros de soldagem devem ser ajustados, como velocidade de avanço, velocidade de rotação, penetração da ferramenta, entre outros. A escolha dos valores destes parâmetros deve ser baseada no tipo de material que será soldado, por exemplo, para chapas grossas deve ser utilizado um valor de velocidade de rotação mais alto, já valores de velocidade de avanço elevados podem causar diferentes defeitos na junta. Por isso é importante que a definição dos parâmetros seja apropriada. Este trabalho visa estudar a influência da geometria e material da ferramenta no resultado final da solda, projetando três ferramentas diferentes, para uma posterior análise dos resultados obtidos por cada uma. Os resultados do estudo são direcionados para chapas de dois milímetros de espessura de liga de Alumínio, mostrando qual geometria é a mais apropriada para execução do processo e também qual a influência da nitreção, feita na ferramenta de trabalho, no cordão de solda.

Palavras-chave: *Friction Stir Welding*. Geometria de Ferramenta FSW. Soldagem Alumínio. Soldagem por atrito.

ABSTRACT

ZIJLSTRA, Erika. **ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE TOOL IN THE QUALITY OF THE WELDING CORD IN THE PROCESS FRICTION STIR WELDING.** 2017. 56. End-of-Graduation-Course Paper (Bachelor's Degree in Mechanical Engineering) - Federal Technology University - Parana. Ponta Grossa, 2017.

Friction Stir Welding (FSW), is a recent technology founded in the United Kingdom at the beginning of the 1990s by TWI (The Welding Institute). The process consists of the use of a non-consumable rotary tool. The tool is composed of a pin and a shoulder, when they come in contact with the workpiece, it generates the heat necessary for the mixture, responsible for the joining of the joint. Despite being a relatively new process, FSW has several advantages, such as good mechanical properties and very low environmental impacts when compared to other processes, but the most significant advantage is the performance that friction welding presents when applied in aluminum alloys. For the joint has quality, different welding parameters must be set, such as feed rate, speed of rotation, tool penetration. The choice of values for these parameters should be based on the type of material to be welded, for example for thick plates a higher speed value should be used, since high speed values may cause different joint defects. It is therefore important that the parameter setting is appropriate. This work aims to study the influence of tool geometry and material on the final weld result, designing three different tools, for a later analysis of the results obtained by each one. The results of the study are directed to plates of two millimeters thick of aluminum alloy, showing which geometry is the most appropriate for the execution of the process and also the influence of the nitriding, made in the working tool, in the weld bead.

Keywords: *Friction Stir Welding.* FSW Tool Geometry. Welding Aluminum. FSW.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Ilustração do Conceito de Funcionamento FSW	13
Figura 2 – Regiões da Microestrutura Após FSW	14
Figura 3 – Tipos de Junta FSW	17
Figura 4 – Representação das Partes da Ferramenta	19
Figura 5 – Representação Simples de Ombro Côncavo	21
Figura 6 – Representação Simples de Ombro Convexo	22
Figura 7 – Fresadora Adaptada Cardoso FC-30	26
Figura 8 – Rotações da Fresadora.....	27
Figura 9 – Valores de Velocidade de Avanço da Ferramenta	28
Figura 10 – Foto do Prensa Chapas	29
Figura 11 – Desenho do Conjunto de Fixação de Chapas.....	29
Figura 12 – Geometria da Ferramenta 1	31
Figura 13 – Foto da Ferramenta 1 Confeccionada.....	32
Figura 14 – Geometria da Ferramenta 2	33
Figura 15 – Foto da Ferramenta 2 Confeccionada.....	34
Figura 16 – Cortadeira Metalográfica Solotest	36
Figura 17 – Lixadeira e Politriz Fortel.....	37
Figura 18 – Visão Superior da União Realizada com a Ferramenta 1 (1)	39
Figura 19 – Visão Inferior da União Realizada com a Ferramenta 1 (1)	39
Figura 20 – Visão Superior da União Realizada com a Ferramenta 1 (2)	40
Figura 21 – Visão Inferior da União Realizada com a Ferramenta 1 (2)	40
Figura 22 – Macrografia da Segunda União com Ferramenta 1.....	41
Figura 23 – Visão Superior da União Realizada com a Ferramenta 2 (1)	42
Figura 24 – Visão Inferior da União Realizada com a Ferramenta 2 (1)	43
Figura 25 – Visão Superior da União Realizada com a Ferramenta 2 (2)	44
Figura 26 - Visão Inferior da União Realizada com a Ferramenta 2 (2)	44
Figura 27 – Macrografia da Segunda União com Ferramenta 2.....	45
Figura 28 – Visão Superior da União Realizada com a Ferramenta 2 (3)	46
Figura 29 – Visão Inferior da União Realizada com a Ferramenta 2 (3)	46
Figura 30 – Macrografia da Terceira União com Ferramenta 2.....	47
Figura 31 – Visão Superior da União Realizada com a Ferramenta 2 (4)	48
Figura 32 – Visão Inferior da União Realizada com a Ferramenta 2 (4)	48
Figura 33 – Macrografia da Quarta União com Ferramenta 2	49
Figura 34 – Visão Superior da União Realizada com a Ferramenta 3 (1)	50
Figura 35 – Aproximação da Visão Superior da Junta Soldada com Ferramenta 3 ..	51
Figura 36 – Ferramenta 3 (nitretada) com possível acúmulo de material (Emplastamento)	51
Figura 37 – Visão Superior da União Realizada com a Ferramenta 3 (1)	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela de Dimensionamento de Ferramentas	20
Tabela 2 – Composição Química das Chapas Soldadas	30
Tabela 3 – Composição Química das Ferramentas 1 e 2	32
Tabela 4 – Parâmetros Utilizados em Cada Experimento	35

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS.

FSW – *Friction Stir Welding*

TMAZ - *Thermomechanically Affected Zone*

mm – Milímetros

mm/min – Milímetros por minuto

TIG – *Tungsten Inert Gas*

MIG – *Metal Inert Gas*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 APRESENTAÇÃO DO TEMA	10
1.2 PROBLEMA	11
1.3 OBJETIVO GERAL	11
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
1.5 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 PROCESSO FSW	13
2.1.1 Parâmetros de Processo	14
2.1.1.1 Material a ser soldado	15
2.1.1.2 Variação de espessura	15
2.1.1.3 Penetração do ombro da ferramenta	16
2.1.1.4 Velocidade de rotação da ferramenta	16
2.1.1.5 Avanço da ferramenta	16
2.1.2 Tipos de Juntas FSW	17
2.1.3 Vantagens e Desvantagens do Processo	17
2.1.3.1 Vantagens do processo	18
2.1.3.2 Desvantagens do processo	18
2.2 FERRAMENTA FSW	18
2.2.1 Geometria da Ferramenta FSW	19
2.2.2 Projeto do ombro da ferramenta	20
2.2.3 Projeto do pino da ferramenta	22
2.2.4 Características dos materiais para ferramenta	22
2.3 DEFEITOS COMUNS EM FSW	23
2.3.1 Defeitos de vazios	23
2.3.2 Defeitos de raiz	24
2.3.3 Defeitos na superfície	24
2.4 PEÇAS DE TRABALHO	24
3 MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1 FRESADORA	26
3.2 CHAPAS	30
3.3 FERRAMENTAS UTILIZADAS	30
3.3.1 Ferramenta 1	31
3.3.2 Ferramenta 2	33
3.3.3 Ferramenta 3	34
3.4 PARÂMETROS DE ENSAIO	35
3.5 MACROGRAFIA	35
3.5.1 Corte das Chapas	36

3.5.1 Lixamento	37
3.5.1 Ataque com Reagente	37
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
4.1 EXPERIMENTOS: FERRAMENTA 1	38
4.1.1 Ferramenta 1: União 1	38
4.1.2 Ferramenta 1: União 2	40
4.2 EXPERIMENTOS: FERRAMENTA 2	42
4.2.1 Ferramenta 2: União 1	42
4.2.2 Ferramenta 2: União 2	43
4.2.3 Ferramenta 2: União 3	45
4.2.4 Ferramenta 2: União 4	47
4.3 EXPERIMENTOS: FERRAMENTA 3	50
4.3.1 Ferramenta 3: União 1	50
5 CONCLUSÃO	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

1 INTRODUÇÃO

A *Friction Stir Welding* (FSW) ou soldagem por atrito foi criada em 1991 no *The Welding Institute* (TWI), localizado no Reino Unido. Como forma de definir-se FSW de uma maneira mais simplificada, pode-se dizer que se trata de um processo de soldagem, com utilização de uma ferramenta rotativa não consumível, com geometria própria, esta é inserida entre duas chapas para que a união seja realizada (Mishra; Mahoney, 2007).

Quando o assunto é união de metais, considera-se a soldagem por atrito como a maior descoberta em décadas nesta área de estudo. Somado a isso, a FSW é diretamente ligada ao termo “tecnologia verde”, pois quando comparado a outros processos de soldagem, reduz a potencialmente os impactos ao meio ambiente.

A ferramenta resume-se basicamente a três funções principais. A primeira é aquecer a peça de trabalho, a partir deste aquecimento dá-se a segunda função que é misturar o material de forma que a junta seja formada e como terceira função principal, manter o calor entre o metal aquecido e o ombro para garantir uma solda homogênea e de qualidade (Mishra; Mahoney, 2007).

O principal fator dentro da FSW, segundo os autores Mishra e Mahoney (2007), é o calor gerado no interior da peça de trabalho. Este se dá tanto pelo atrito que ocorre entre a rotação do pino e o ombro da ferramenta quanto pela deformação plástica severa que a peça de trabalho sofre. A geração de calor tem esta importância em decorrência de sua responsabilidade pela diminuição da viscosidade do material ao redor do pino, que somado a rotação e translação da ferramenta facilita o transporte do material do início ao fim das chapas, preenchendo a junta.

1.1 APRESENTAÇÃO DO TEMA

Este trabalho visa estudar a influência da geometria e material da ferramenta, no resultado do processo de soldagem FSW em chapas de ligas de alumínio.

1.2 PROBLEMA

O processo de *Friction Stir Welding*, conhecido também como soldagem por atrito com pino, vem se destacando pelas vantagens que fornece quando utilizado e isso desperta a necessidade da obtenção de maiores informações para que sua aplicação seja cada vez mais eficiente.

O estudo objetiva identificar as mudanças que a geometria e características da ferramenta, trazem para o resultado final do cordão de solda, já que a literatura nesta área é reduzida quando comparada a processos já consolidados.

1.3 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste estudo é analisar a influência que a geometria e o material da ferramenta exercem sobre a qualidade final da solda, quando o processo de soldagem por atrito é aplicado a chapas de liga de Alumínio, com dois milímetros de espessura.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Definir que tipo de geometria de ferramenta FSW é mais apropriada para soldagem de chapas com dois milímetros de espessura, de liga de Alumínio.

Analisar se o tratamento superficial de nitretação na ferramenta influencia na qualidade do cordão de solda.

1.5 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

A motivação para escolha do tema é que a soldagem por atrito é um método de soldagem ainda pouco explorado, apesar de suas inúmeras vantagens e aplicações.

Quanto mais informações forem levantadas e comprovadas cientificamente, melhor para os processos industriais e pesquisas. Pois, se tratando de processos que incluem a soldagem do alumínio, ainda existem muitas complicações durante a execução dos mesmos, e como o alumínio é utilizado em larga escala é muito importante que se descubram maneiras alternativas de soldá-lo e ao mesmo tempo obter boas propriedades mecânicas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico estão apresentados informações e estudos relacionados ao tema do trabalho.

2.1 PROCESSO FSW

O processo FSW é realizado por meio de uma ferramenta rotativa com um pino central. Esta é forçada a penetrar na linha da junta, e então deslocada ao longo da mesma, como mostra-se na figura 1. Durante o processo uma solda de “estado sólido” é formada pelo trabalho a quente do material da peça ao redor da ferramenta de soldagem. A qualidade do processo é garantida pelo controle da especificação do material e da geometria da ferramenta, além da correta seleção dos parâmetros de soldagem. (Hiller, 2008)

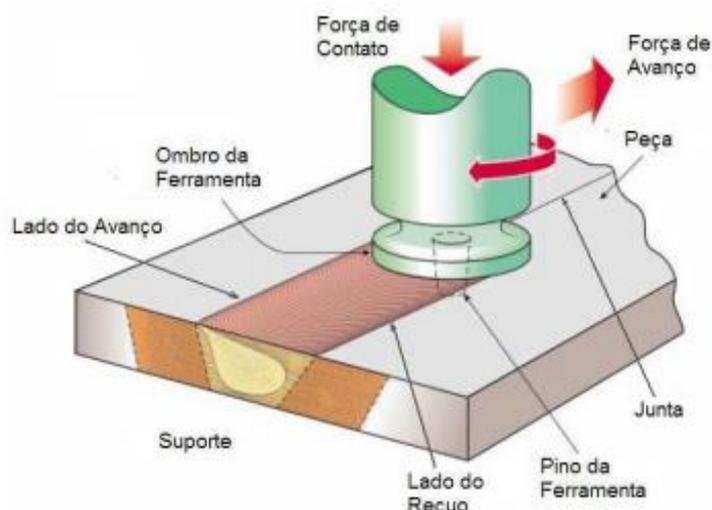


Figura 1 – Ilustração do Conceito de Funcionamento FSW
Fonte: Hiller, D. J. (2007)

Como outras novas tecnologias, a FSW necessitou também de uma nova nomenclatura, que se adequasse à microestrutura do material após a soldagem.

Mishra e Mahoney (2007) destacam quatro regiões principais da microestrutura após o processo, exibidas na figura 2. A região A, representa a porção de material que não é afetado, ou seja, esta porção de material não se deforma, assim como não sofre alterações em termos de microestrutura e propriedades mecânicas.

A região B é a chamada zona afetada pelo calor. Diferente da região A, nesta região o material passa por um ciclo térmico que modifica sua microestrutura e suas propriedades mecânicas, porém sem ocorrência de deformação plástica.

A região C é a zona térmica e mecanicamente afetada. Na literatura atual de soldagem por atrito, esta região é bastante conhecida pela sigla TMAZ (zona termomecanicamente afetada). A região C, diferente das regiões A e B, sofre sim deformação plástica. Para casos que o Alumínio é o material de trabalho, torna-se possível se obter uma deformação plástica significativa, nesta zona, sem que ocorra recristalização.

E por fim a região D, conhecida como centro da solda, esta se trata da porção de material onde ocorre completamente a recristalização, é também conhecida como zona de mistura. Esta é a região por onde, anteriormente, passou o pino da ferramenta.

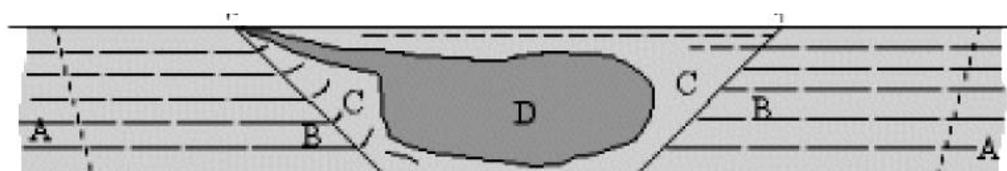


Figura 2 – Regiões da Microestrutura Após FSW
Fonte: Mishra e Mahoney (2007)

2.1.1 Parâmetros de Processo

Os parâmetros de processo influenciam diretamente as propriedades finais da peça soldada.

Threadgill e Nunn (2003) apontam parâmetros influentes no processo FSW, são eles:

- a. Material a ser soldado;
- b. Variação da espessura das peças;
- c. Penetração do ombro da ferramenta;
- d. Velocidade de rotação da ferramenta;
- e. Avanço da ferramenta;
- f. Afastamento das peças a soldar;
- g. Ângulos de inclinação;
- h. Aporte de calor.

2.1.1.1 Material a ser soldado

O material a ser soldado também influi para o ajuste destes parâmetros, as ligas de Alumínio são as mais utilizadas no processo de soldagem por atrito, porém Threadgill e Nunn (2003) comentam que estudos promissores utilizando magnésio, cobre, titânio, aço, chumbo e zinco.

No caso de peças que tenham sofrido algum tipo de tratamento térmico, é importante que uma boa limpeza seja realizada antes do processo, pois, apesar de não haverem estudos comprovando os níveis aceitáveis de impurezas no material a ser soldado, a superfície limpa diminui a chance de possíveis defeitos.

2.1.1.2 Variação de espessura

A variação de espessura é um fator bastante importante no que se diz respeito à qualidade final do produto, já que se esta variação for grande, a solda não será uniforme. Isso ocorre em razão da falta de estabilidade que a ferramenta encontrará durante o processo, além da dificuldade de aquecimento e mistura, uniformes do material, acarretando defeitos como a rebarba, por exemplo. (Mishra e Mahoney, 2007)

2.1.1.3 Penetração do ombro da ferramenta

Assim como os demais itens citados, a penetração da ferramenta na junta da solda deve ser controlada com bastante rigor, já que se esta não for feita de maneira correta não ocorre união na parte inferior da junta soldada. Isso ocorre, devido à falta de concentração de calor e mistura de material (Oliviecki e Beskow, 2013).

2.1.1.4 Velocidade de rotação da ferramenta

Baseado na escolha do material e espessura das chapas deve-se estabelecer uma velocidade de rotação da ferramenta, esta é bastante relevante para que ocorra uma boa mistura, pois está diretamente ligada à geração de calor durante o processo de soldagem. Quanto maior a velocidade de rotação, maior será a temperatura atingida durante o processo, devido ao aumento do aquecimento através do atrito da ferramenta com a peça de trabalho. (Oliviecki e Beskow, 2013)

2.1.1.5 Avanço da ferramenta

Segundo Oliviecki e Beskow (2013), pode-se definir o avanço da ferramenta como a distância percorrida pela ferramenta por unidade de tempo, por exemplo, milímetros por minuto.

O avanço da ferramenta é diretamente ligado a geração de calor no processo de soldagem, baixas velocidades de avanço implicam em uma maior geração de calor, ou seja, temperaturas de trabalho mais elevadas.

2.1.2 Tipos de Juntas FSW

Existem diferentes tipos de juntas na soldagem FSW. Segundo Rosato Junior (2003), pode-se dizer que as mais comuns e utilizadas são as juntas de topo.

Mostra-se na figura 3, mais tipos de juntas, além das juntas de topo.

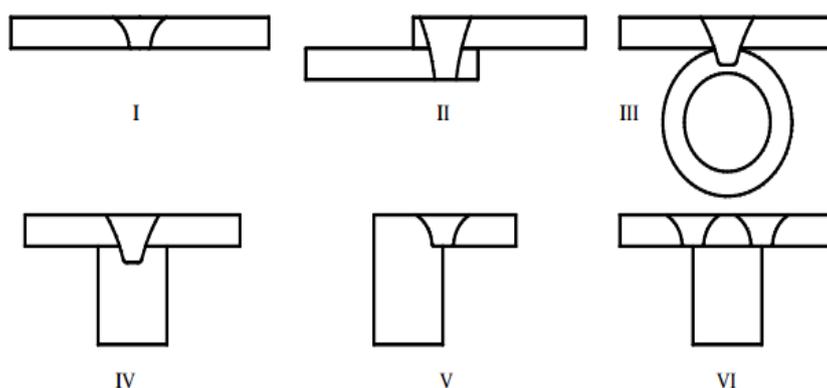


Figura 3 – Tipos de Junta FSW
Fonte: Rosato Junior, 2003

Na figura 3, em (I), é representada a junta de topo, que possui aplicação em chapas planas, soldagem circunferencial e união de materiais com espessuras diferentes. Já em (II), representa a junta sobreposta, aplicada em perfis lineares e circunferenciais. Em (III), mostra o tipo de junta utilizada em flanges e tubos. Em (IV) representa junta do tipo T. Em (V), juntas de canto ou borda e finalmente em (VI), juntas de duplo cordão de canto ou borda.

2.1.3 Vantagens e Desvantagens do Processo

Neste tópico serão descritas algumas vantagens e desvantagens da utilização do processo *Friction Stir Welding* (soldagem por atrito).

2.1.3.1 Vantagens do processo

Autores como Amâncio Filho (2002) e Willians (2001), observaram durante seus estudos, que além das propriedades obtidas na soldagem FSW se igualarem as propriedades obtidas por processos convencionais de soldagem, estas muitas vezes são superadas para ligas de Alumínio.

Além disso, Willians (2001) conta sobre outras vantagens como: boa resistência mecânica e a fadiga; alta qualidade estrutural; baixa distorção pós-soldagem; ausência de porosidade; microestrutura refinada; o processo não produz fuligem ou exalação de gases e não necessita utilização de metal de adição.

2.1.3.2 Desvantagens do processo

Apesar das inúmeras vantagens citadas no tópico anterior, Willians (2001) e Rosato Junior (2003), registraram em seus estudos que o processo também apresenta algumas limitações, tais como: necessidade de sistemas de fixação de elevada rigidez; equipamento de soldagem de baixa flexibilidade, ou seja, não possui portabilidade e apresenta alto custo; ferramenta específica para cada conjunto de ligas a unir; tempo elevado para preparação da máquina e dificuldade para determinação de parâmetros adequados para cada caso a ser soldado.

2.2 FERRAMENTA FSW

O estudo sobre a ferramenta dentro do processo FSW é de extrema importância, isto porque o projeto da mesma interfere diretamente nas propriedades finais do cordão de solda (ZHAO, 2005).

Apesar do desgaste por atrito que a ferramenta está sujeita, a mesma é considerada como não-consumível (Thomas, 2001).

A ferramenta é uma importante parte a ser estudada dentro do processo FSW, isto porque segundo os autores Thomas, Nicholas e Smith (2001) a ferramenta é fundamental para uma implementação bem sucedida de soldagem por atrito. Compartilhando da mesma opinião, Mishra e Mahoney (2007), dizem que o processo só é possível por causa da existência da ferramenta, além disso a mesma é responsável pela produção de deformação termomecânica e aquecimento por atrito da peça de trabalho. A ferramenta consiste basicamente em um pino, um ombro e uma haste de fixação, como fica representado na figura 4, e o contato do pino com a peça a ser soldada, gera o aquecimento e deformação necessários para que o processo aconteça.

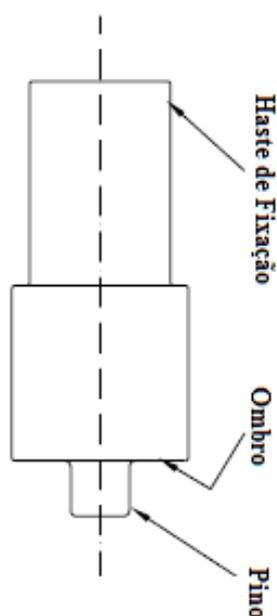


Figura 4 – Representação das Partes da Ferramenta
Fonte: Adaptado de Souza, 2010

2.2.1 Geometria da Ferramenta FSW

Khaled (2005) justifica que a geometria da ferramenta é o parâmetro mais importante do processo, devido ao fato de esta ser responsável pelo aquecimento localizado e fluxo de calor pelo material. No que se diz respeito ao aquecimento, deve haver uma relação entre o tamanho do ombro e do pino para que o mesmo

ocorra de maneira eficiente. A ferramenta é também responsável pelo atrito que faz com que a mistura ocorra e haja o fluxo do material, isto interfere diretamente na microestrutura resultante.

Para que as chances em se ter um maior êxito no projeto da ferramenta aumentem, recomenda-se a utilização de tabelas que auxiliem neste processo de dimensionamento, além de pesquisas que mostrem experimentos que possam ser utilizados como guias no projeto a se desenvolver.

Mishra e Mahoney (2007), mostram, em um de seus trabalhos, informações bastante úteis que relacionam sugestões de tamanho de ombro e tamanho de pino com o possível material e espessura das peças de trabalho. Estas informações estão representadas na tabela 1.

Tabela 1 – Tabela de Dimensionamento de Ferramentas
Fonte: Adaptado de Mishra e Mahoney (2007)

Diâmetro do Ombro		Diâmetro do Pino (Cilíndrico)		Material da peça de trabalho e espessura, mm
mm	pol	mm	pol	
13	0,5	5	0,2	6061-T6 Al, 3mm
20-30	0,8-1,2	8,0-12,0	0,3-0,5	7050, 2195, 5083, 2024, 7075 Al, 6,35mm
23	0,9	8,2	0,32	2024-T351 Al, 6,4mm
20, 16	0,8, 0,6	6	0,24	5083 e 6061 Al, 5,5mm
12	0,5	4	0,16	1050 Al e Cobre livre de Oxigênio, 1,8mm
25,4	1	7,87	0,31	7075-T7351 Al, 9,53mm
23	0,9	8,4	0,33	2524-T351 Al, 6,4mm
20	0,79	4	0,16	6064 Al até aço carbono, 4,5mm
23	0,9	8,2	0,32	2024-T351 Al, 7mm
10	0,4	3,8	0,15	2095 Al, 1,63mm
25	1	9	0,35	5251 Al, 5mm

2.2.2 Projeto do ombro da ferramenta

Segundo os autores Mishra e Mahoney (2007) o ombro da ferramenta tem a função de gerar calor para a superfície da peça de trabalho e a junta onde o pino está passando. Ele é responsável pela maior parte da deformação causada à peça de trabalho e também por armazenar o calor causado pelo atrito durante o processo.

Somado a isso, Thomas (1999), define o ombro da ferramenta como a parte que tem contato intenso com a superfície das chapas a serem soldadas, e por meio deste contato é que ocorre o atrito que gera calor. Além disso, o ombro também tem a função de impedir a expulsão do material plastificado da região de soldagem, evitando que ocorra vazão.

Os tipos de ombros que podem ser selecionados para a ferramenta são: côncavos e convexos.

Os ombros côncavos são mais simples e também mais comuns. Estes produzem um cordão de solda de qualidade assim como possuem um processo de fabricação relativamente simples.

A concavidade do ombro é produzida com um pequeno ângulo que varia entre 6 e 10°. Na figura 5, representa-se de forma simples o formato de um ombro côncavo.

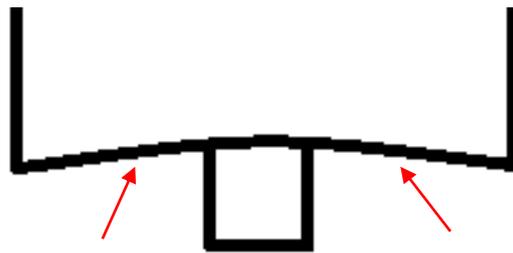


Figura 5 – Representação Simples de Ombro Côncavo
Fonte: Autoria Própria

Já os ombros convexos não são tão simples quando comparados aos côncavos, apenas algumas dimensões de diâmetro são aconselhadas para uso, pois muitas vezes seu formato afasta o material do pino. Em sua maioria são indicados para chapas finas.

Na figura 6, representa-se de forma simples o formato de um ombro convexo.

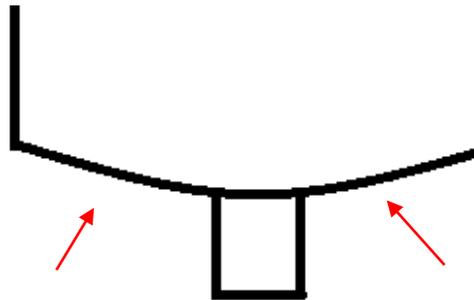


Figura 6 – Representação Simples de Ombro Convexo
Fonte: Autoria Própria

2.2.3 Projeto do pino da ferramenta

Segundo Thomas (1999) os pinos das ferramentas FSW produzem a deformação da superfície, ou seja, passam diretamente pelo caminho onde ocorre a recristalização e conseqüentemente a junta da solda, em outras palavras, são responsáveis pelo transporte do material misturado, do começo ao fim da junta. Alguns parâmetros de soldagem dependem diretamente da geometria do pino, por exemplo, a penetração da ferramenta e a velocidade de avanço da soldagem.

O principal modelo de pino de ferramenta é o cilíndrico, este tipo de pino reduz o desgaste quando penetra no material a ser soldado, possui uma concentração de tensão menor quando comparado aos outros modelos, além de que sua geometria é bastante simples de ser alterada quando necessita-se de alguma mudança nas medidas ferramenta.

2.2.4 Características dos materiais para ferramenta

Para determinação do material deve ser utilizado para confecção da ferramenta, é necessário que se tenha conhecimento de qual será a aplicação da ferramenta, por exemplo, qual será o tipo do material da peça de trabalho.

Baseando-se em Hiller (2007) é importante que se considerem algumas propriedades físicas do material, como estabilidade e reatividade química do

material, resistência à abrasão a elevadas temperaturas e aliar dureza e resistência mecânica para que não haja rompimento ou deformação por fratura durante o processo e suas condições.

Somado a geometria, o material da ferramenta tem grande responsabilidade sobre o resultado final da solda. Khaled (2005) diz que o material afeta de maneira direta o coeficiente de atrito do processo e também a geração de calor, o mesmo vale para tratamentos superficiais, estes podem trazer inúmeros benefícios, quando utilizados de forma adequada.

2.3 DEFEITOS COMUNS EM FSW

Leonard (2001), conta que alguns tipos de defeitos são característicos do processo de *Friction Stir Welding*, pode-se classificá-los basicamente em: vazios, defeitos na raiz e defeitos na superfície.

2.3.1 Defeitos de vazios

Baseando-se nos estudos do autor Hiller (2008), pode-se entender melhor o que causa cada um destes grupos de defeitos, por exemplo, os defeitos de vazios ocorrem em sua maioria quando não há uma pressão adequada sendo imposta a solda, somado a isso, altas velocidades de avanço com baixas rotações também causam estes tipos de defeitos. Isso porque estes são ligados a falta de aporte de calor na junta.

A forma que Hiller (2008) aponta como ser eficiente para evitar defeitos de vazio é utilizar um valor correto e apropriado de penetração do ombro e claro, valores de velocidade de rotação e avanço equilibrados.

2.3.2 Defeitos de raiz

Já com relação aos defeitos de raiz, Hiller (2008) diz que grande parte, deste tipo de defeitos, são causados por uma penetração inadequada do pino da ferramenta de solda ou então por um desalinhamento da ferramenta com relação à linha da junta a ser soldada. Outro fator que pode ser também responsável pelo aparecimento deste tipo de defeitos é a existência de alguma camada de óxidos sobre a superfície das chapas. Os defeitos de raiz são os mais difíceis de se detectar e ao mesmo tempo são os mais críticos com relação a comprometimento de propriedades mecânicas da solda.

Baseando-se nestas causas dos defeitos de raiz, pode-se dizer que para que os mesmos sejam evitados, deve-se utilizar um pino de tamanho adequado, alinhar-se a ferramenta, em relação à linha de solda, de forma adequada e remover sempre qualquer camada de óxido que possa ter na superfície do material a ser soldado.

2.3.3 Defeitos na superfície

Leonard (2001) concluiu em seus estudos que vórtices e irregularidades podem ser muitas vezes observados na superfície superior da solda, mas que não há comprovações científicas de que estes defeitos tragam algum tipo de deterioração as propriedades mecânicas da solda ou então aparecimento de corrosão na junta.

2.4 PEÇAS DE TRABALHO

Diferentes tipos de peças de trabalho podem ser utilizadas na execução da soldagem por atrito, quando se trata da utilização de chapas o processo FSW permite a soldagem de chapas que possuam espessura entre 1,6 e 75mm, ou seja,

pode-se dizer que dentro da faixa de espessuras em que o processo é viável, as chapas trabalhadas neste trabalho podem ser classificadas, como chapas finas já que possuem dois milímetros de espessura (Nicholas, 2003).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico serão descritos os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento do trabalho. Sendo que, os corpos de prova foram obtidos por meio da utilização de uma fresadora adaptada.

3.1 FRESADORA

Para execução dos processos de solda utilizou-se uma fresadora ferramenteira da marca Cardoso, modelo FC-30.

A figura 7 mostra a fresadora utilizada para que as chapas de liga de Alumínio, pudessem ser soldadas.



Figura 7 – Fresadora Adaptada Cardoso FC-30
Fonte: Autoria Própria

Neste modelo de fresadora é possível se trabalhar com oito rotações diferentes, que variam de 180 a 2100 RPM, mostradas na figura 8.

No caso dos experimentos deste estudo, utilizou-se a rotação de 2100 RPM, esta foi a que se adaptou melhor as necessidades requeridas pelo processo desenvolvido neste trabalho.



Figura 8 – Rotações da Fresadora
Fonte: Autoria Própria

Já o avanço da ferramenta, pode ser controlado de duas maneiras, automático ou manual. Para a opção de avanço automático, pode-se trabalhar com seis valores diferentes de avanço, os mesmos possuem unidade milímetros por minuto. Estas opções são representadas na figura 9.



Figura 9 – Valores de Velocidade de Avanço da Ferramenta
Fonte: Autoria Própria

Realizando-se alguns testes pode-se concluir que o avanço da ferramenta que mais se adequou para a aplicação requerida neste estudo foi o de 30 mm/min. Utilizando a opção de avanço mais lenta, obteve-se um resultado melhor quanto à dispersão do calor gerado. Avanços mais rápidos, especialmente pelo fato da ferramenta e os parâmetros de soldagem estarem em processo de melhoria, não resultaram em uma boa geração de calor.

Para a fixação das chapas durante o processo de solda na fresadora, utilizou-se um prensa chapas. O mesmo constitui-se de duas chapas fixadas sobre um bloco de aço 1020, por se tratar de um processo que apresenta um alto nível de vibrações optou-se por um material de massa elevada.

Colocou-se então este conjunto sobre a mesa da fresadora, tornando o processo de soldagem possível e mais estável. O prensa chapas é mostrado na figura 10.

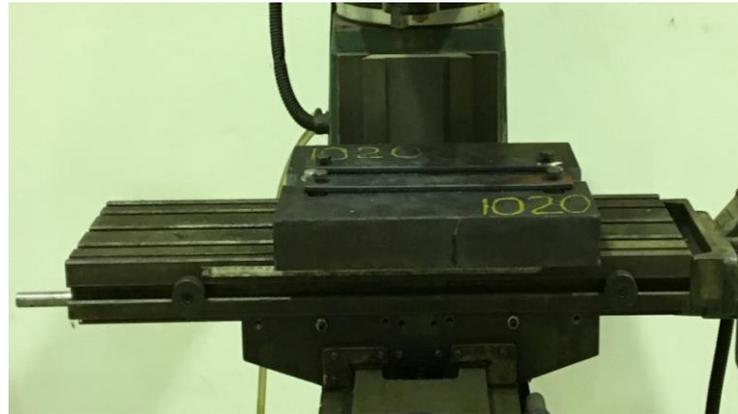


Figura 10 – Foto do Prensa Chapas
Fonte: Autoria Própria

Na figura 11 representa-se o conjunto responsável pela fixação das chapas, assim como citado anteriormente, este sistema também auxilia na diminuição das vibrações causadas pelo processo.

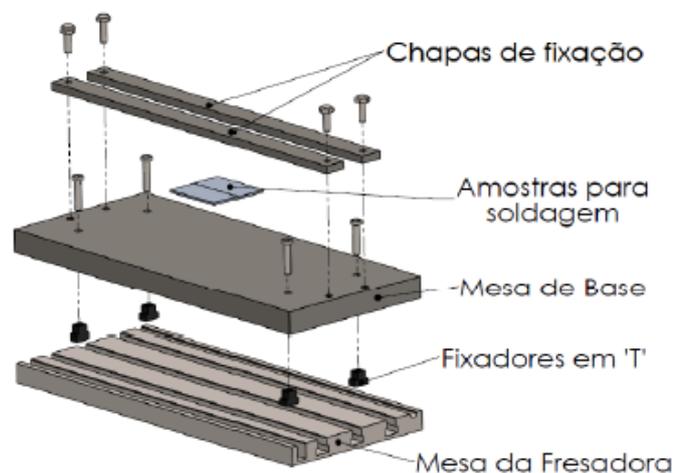


Figura 11 – Desenho do Conjunto de Fixação de Chapas
Fonte: Freitas (2017)

O prensa chapas tem um papel bastante importante no processo FSW, já que forças elevadas são aplicadas nas chapas durante a solda, e à medida que a ferramenta é empurrada ao longo da linha de soldagem, elas possuem uma tendência a se separar.

3.2 CHAPAS

As chapas, utilizadas como corpos de prova deste estudo, possuem dimensões de 0,2 x 3,5 x 7 cm. As mesmas são de liga de Alumínio, como pode ser visto na tabela 2. Nela são apresentados resultados de uma análise de composição química, feita no laboratório de fundição, da UTFPR em Ponta Grossa, realizado por espectrometria.

Tabela 2 – Composição Química das Chapas Soldadas
Fonte: Autoria Própria

Resultado: composição química das chapas soldadas			
Elemento	Quantidade (%)	Elemento	Quantidade (%)
Cu	0,06568	Sn	0,00428
Si	0,10274	Pb	0,00339
Mg	0,00237	V	0,0000
Zn	0,03306	P	0,0000
Fe	0,28701	Ca	0,01283
Mn	0,00941	Cr	0,00303
Ni	0,00908	Al%	99,446
Ti	0,02070		

Como pode-se perceber, estas chapas possuem pequenos teores de Ferro e Silício, e uma porcentagem altíssima de Alumínio. Esta característica proporciona que trabalhe-se praticamente com o comportamento de chapas de Alumínio puro.

3.3 FERRAMENTAS UTILIZADAS

Baseando-se no objetivo do trabalho, ou seja, analisar quais características de uma ferramenta mais se adequam a soldagem de chapas finas de ligas de

Alumínio, confeccionou-se três ferramentas distintas para que uma maior gama de resultados pudesse ser averiguada.

Denominou-se cada ferramenta como: ferramenta 1, ferramenta 2 e ferramenta 3.

Lembrando que para o projeto das mesmas utilizou-se, além de artigos que trazem experiências com espessuras menores de chapas, uma tabela de dimensionamento, citada por Mishra e Mahoney (2007) em um de seus trabalhos, esta é representada na tabela 1.

3.3.1 Ferramenta 1

A ferramenta número um possui a geometria que está representada na figura 12.

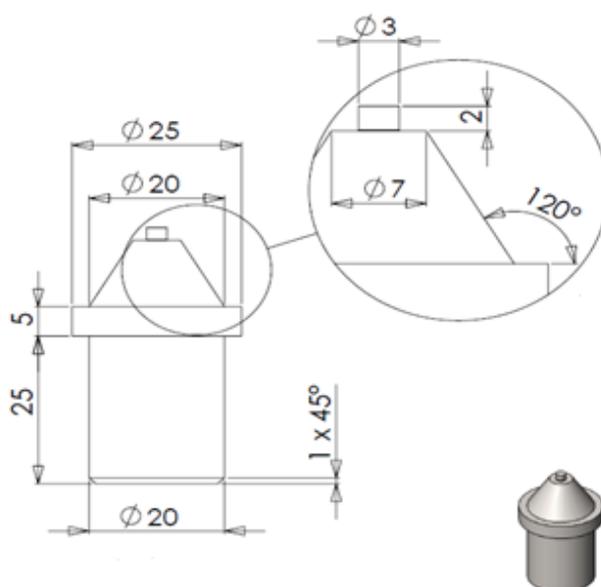


Figura 12 – Geometria da Ferramenta 1
Fonte: Autoria Própria

Pode-se perceber que, a ferramenta possui um pino cilíndrico e superfície lisa. Optou-se por utilizar este modelo para os experimentos principalmente por sua simplicidade de projeto e confecção. Outro fator positivo desta geometria é que, por

mais simples que a mesma seja, na literatura encontram-se resultados muito positivos sobre ela.

Na figura 13, é mostrado o resultado final da confecção da ferramenta 1.



Figura 13 – Foto da Ferramenta 1 Confeccionada
Fonte: Autoria Própria

Na tabela 3, são apresentados resultados de uma análise de composição química, feita no laboratório de fundição, da UTFPR em Ponta Grossa, realizado por espectrometria.

Tabela 3 – Composição Química das Ferramentas 1 e 2
Fonte: Autoria Própria

Resultado: composição química das ferramentas 1 e 2			
Elemento	Quantidade (%)	Elemento	Quantidade (%)
C	0,54567	Pb	0,00171
Si	0,36140	W	0,04205
Mn	0,63123	Ti	0,00159
P	0,1351	V	0,00204
S	0,02709	Nb	0,00453
Ni	0,07508	Sb	0,00460
Cr	0,23358	B	0,00274
Mo	0,00884	As	0,01837
Cu	0,06585	Ca	0,00657
Co	0,00895	Fe	97,844
Al	0,10014		

Analisando-se os resultados da análise química do material, pode-se dizer que a ferramenta é composta basicamente pelo elemento Ferro, já que se trata de uma liga de aço, e que possui quantidades consideráveis de Manganês, Carbono e Silício.

3.3.2 Ferramenta 2

Como foi citado anteriormente, Mishra e Mahoney (2007), dizem que a principal função do ombro é segurar calor, buscou-se baseado nesta teoria projetar-se uma ferramenta com ombro maior quando comparado a ferramenta 1. De maneira que a deformação plástica fosse mais eficiente ao longo da solda.

A representação geométrica da ferramenta dois é mostrada na figura 14.

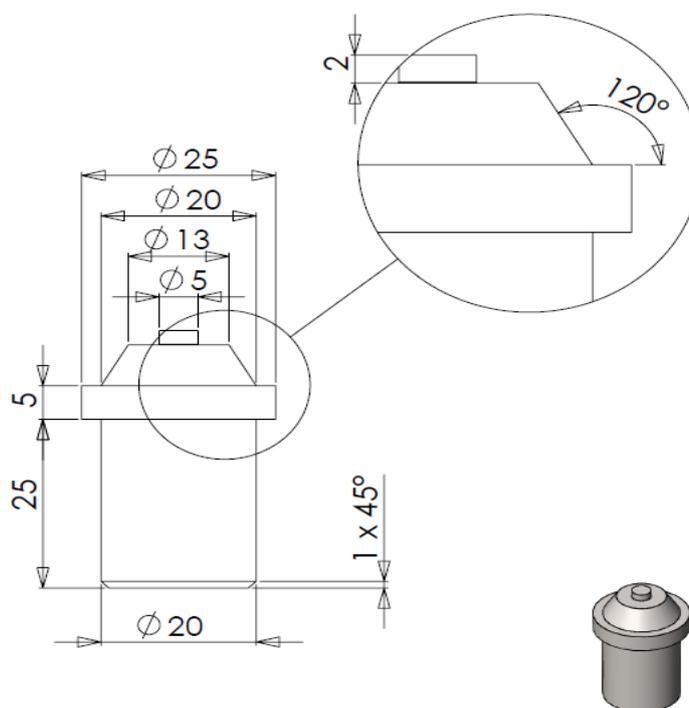


Figura 14 – Geometria da Ferramenta 2
Fonte: Autoria Própria

Na figura 15, tem-se o resultado final da confecção da ferramenta.



Figura 15 – Foto da Ferramenta 2 Confeccionada
Fonte: Autorial Própria

Pode-se perceber que a ferramenta 2 manteve as características de pino cilíndrico e de superfície lisa, como a ferramenta 1.

A ferramenta 2, foi fabricada com o mesmo material da ferramenta de número 1, pode-se observar os resultados da composição química, na tabela 3.

3.3.3 Ferramenta 3

Projetou-se a ferramenta 3 com a mesma geometria da ferramenta 2, porém para que além da geometria, fosse também testada a influência de material, optou-se pela realização de um tratamento superficial na mesma.

Escolheu-se então a nitretação. Trata-se de um processo termoquímico para superfícies. A escolha baseou-se nas propriedades que a nitretação traz aos materiais que passam por ela, por exemplo, aumento da dureza da superfície, resistência ao desgaste, à fadiga e à corrosão. O processo consiste basicamente na difusão de Nitrogênio (N_2) na superfície, levando a formação de nitretos.

No caso da ferramenta 3, a nitretação foi feita por banho em sal, ou seja, imersão.

3.4 PARÂMETROS DE ENSAIO

Para execução dos experimentos foram utilizados valores específicos de penetração de ferramenta, dimensões de ferramenta, etc.

Na tabela 4, pode-se visualizar os parâmetros utilizados em cada experimento.

Tabela 4 – Parâmetros Utilizados em Cada Experimento
Fonte: Autoria Própria

Ferramenta	União	Vel. Avanço (mm/min)	Rotação	Altura do Pino (mm)	Penetração do Pino (mm)
1	1	30	2100	2,0	2,2
1	2	30	2100	2,0	2,3
2	1	30	2100	2,0	2,2
2	2	30	2100	1,7	1,9
2	3	30	2100	1,4	1,5
2	4	30	2100	1,4	1,6
3	1	30	2100	1,4	1,6

3.5 MACROGRAFIA

Para verificação da qualidade dos cordões de solda, realizou-se uma macrografia das regiões soldadas, de forma que fosse possível a visualização de possíveis defeitos e também a definição da região precisa do cordão de solda na parte interna das chapas.

Neste tópico serão apresentadas as etapas deste processo.

3.5.1 Corte das Chapas

A primeira etapa para realização da macrografia foi o corte das chapas. Utilizou-se uma cortadeira metalográfica com refrigeração, da marca Solotest, como é mostrado na figura 16, para que o corte fosse feito. Posicionou-se as chapas de modo que a região soldada ficasse evidente para realização do restante dos ensaios.



Figura 16 – Cortadeira Metalográfica Solotest
Fonte: Autoria Própria

Realizou-se esta etapa do experimento no Laboratório de Caracterização de Materiais, da UTFPR.

3.5.1 Lixamento

Após o corte, foi feito o lixamento das amostras. Esta etapa é necessária para uma melhor visualização dos resultados.

Para isso utilizou-se uma lixadeira modelo PLF, da marca Fortel, como pode-se ver na figura 17. Com uma folha de lixa d'água número 400, na lixadeira, executou-se o processo até que todas as imperfeições causadas pelo corte não pudessem mais ser observadas, na região do cordão de solda.



Figura 17 – Lixadeira e Politriz Fortel
Fonte: Autoria Própria

Utilizou-se o Laboratório de Caracterização de Materiais, da UTFPR, para realização desta etapa.

3.5.1 Ataque com Reagente

Após o lixamento, numa capela, foi realizado o ataque com reagente Marble, próprio para trabalhos com ligas de Alumínio, com intuito de definir

macroscopicamente a região precisa do cordão de solda. Realizou-se este experimento no Laboratório de Análises Metalográficas, na UTFPR.

O objetivo do ataque é melhorar a visualização dos defeitos de soldagem.

Conclui-se com esta etapa os passos necessários para análise macrográfica.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico serão discutidos os resultados obtidos neste estudo.

4.1 EXPERIMENTOS: FERRAMENTA 1

Neste tópico serão discutidos os resultados obtidos nos experimentos realizados com a ferramenta 1.

Utilizou-se nos experimentos com a ferramenta 1, chapas de 2 milímetros de espessura de liga de Alumínio, avanço da ferramenta de 30mm/min e velocidade de rotação de 2100 RPM.

As medidas de diâmetro de ombro e pino são, 7 e 3 milímetros, respectivamente e altura de pino de 2mm

4.1.1 Ferramenta 1: União 1

A figura 18, mostra a visão superior da união 1. Pode-se perceber, na região que as flechas em vermelho estão indicando, que existem alguns vazios no decorrer da união soldada.

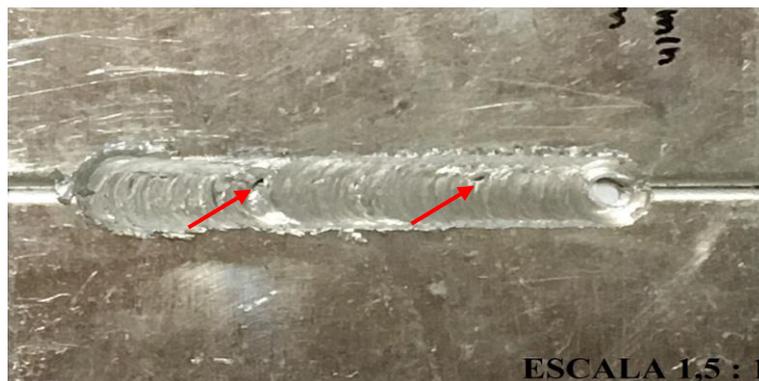


Figura 18 – Visão Superior da União Realizada com a Ferramenta 1 (1)
Fonte: Autoria Própria

E na figura 19 mostra-se a visão inferior da união 1. Pode-se perceber que há um grande vazio, indicado pela seta em vermelho.



Figura 19 – Visão Inferior da União Realizada com a Ferramenta 1 (1)
Fonte: Autoria Própria

Analisando-se os resultados da união 1, percebe-se que há grande incidência de vazios, baseado nisso pode-se dizer que não houve uma pressão adequada imposta sobre a solda, um dos principais pontos que causam defeitos de vazios no cordão de solda (Hiller, 2008).

Somado a isso, Oliviecki e Breskow (2013) concluíram em seus estudos que a falta de penetração do ombro resulta em falhas na parte inferior da junta, devido à falta de concentração de calor e mistura do material.

Optou-se então por aumentar a penetração da ferramenta no experimento seguinte para averiguar se haveria mudança nos resultados.

4.1.2 Ferramenta 1: União 2

Após a realização do experimento da união 1, optou-se por utilizar uma penetração de 2,3 mm, com intenção de melhorar a penetração do ombro da ferramenta e conseqüentemente gerar um cordão de solda com mais qualidade.

O resultado da segunda união utilizando a ferramenta 1 é representado nas figuras 20 e 21.



Figura 20 – Visão Superior da União Realizada com a Ferramenta 1 (2)
Fonte: Autoria Própria

Analisando-se apenas de maneira visual, percebe-se uma melhora na aparência do cordão de solda quando comparado ao da união 1, onde utilizou-se uma penetração de 2,2 mm, são indicados pelas setas em vermelho, alguns vazios na parte superior do cordão.

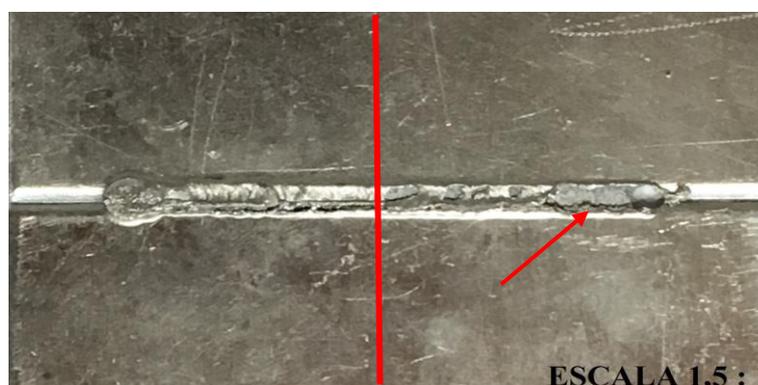


Figura 21 – Visão Inferior da União Realizada com a Ferramenta 1 (2)
Fonte: Autoria Própria

Pode-se perceber, na parte inferior, que no decorrer do cordão de solda, os vazios foram aumentando, principalmente na parte final, onde é indicado, um grande vazio, pela seta em vermelho.

Para uma melhor análise deste cordão de solda, realizou-se uma macrografia do mesmo, mostrada na figura 22.

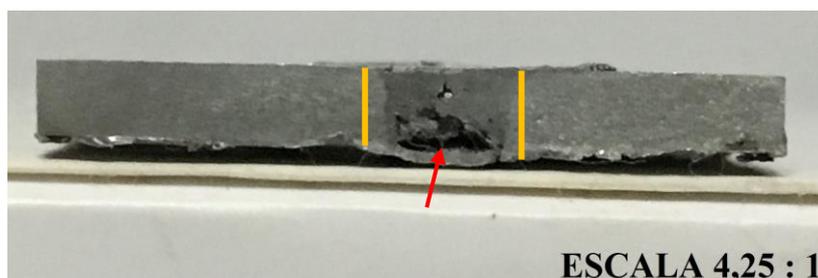


Figura 22 – Macrografia da Segunda União com Ferramenta 1
Fonte: Autoria Própria

A região compreendida entre os marcadores laranja, com uma coloração cinza mais escura, é a região precisa do cordão de solda. Além disso pode-se perceber claramente, onde a seta vermelha está indicando, a existência de um grande vazio na parte inferior da união.

Baseando-se no resultado apresentado na macrografia, pode-se afirmar novamente que não houve uma pressão adequada sobre a solda, além de falta de penetração da ferramenta e deficiência de mistura e concentração de calor. Estes fatores estão diretamente ligados ao projeto da ferramenta.

A principal causa da não eficiência da geometria da ferramenta 1 é o ombro, mais especificamente o seu tamanho, isto porque, o ombro tem a função de impedir a expulsão do material plastificado da região de soldagem, evitando que ocorram vazios (Mishra e Mahoney, 2007). Além disso, as outras funções do ombro são gerar e segurar o calor proveniente do atrito com a peça de trabalho, analisando a geometria projetada para a ferramenta 1 e comparando aos resultados obtidos por ela, pode-se afirmar que esta não foi eficiente e não é viável para soldagem das chapas deste trabalho. O ombro ficou pequeno, fazendo com que o calor fosse rapidamente dissipado, trazendo resultados não satisfatórios.

4.2 EXPERIMENTOS: FERRAMENTA 2

Neste tópico serão discutidos os resultados obtidos com os experimentos da ferramenta 2.

Utilizou-se nos experimentos com a ferramenta 2, chapas de 2 milímetros de espessura de liga de alumínio, avanço da ferramenta de 30mm/min e velocidade de rotação de 2100 RPM.

As dimensões d

4.2.1 Ferramenta 2: União 1

Os primeiros experimentos realizados com a ferramenta 2 seguiram as medidas da ferramenta exatamente iguais às que estavam no projeto. Ou seja, o pino com 5mm de diâmetro e 2mm de altura.

As figuras 23 e 24 mostram os resultados obtidos, utilizando uma penetração da ferramenta de 2,2mm.

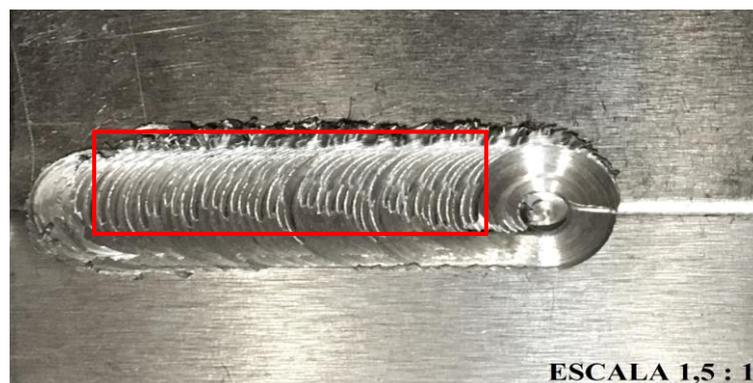


Figura 23 – Visão Superior da União Realizada com a Ferramenta 2 (1)
Fonte: Autoria Própria

Analisando-se apenas de forma visual, pode-se perceber, que na área compreendida dentro do retângulo vermelho, há algumas marcas que caracterizam problemas de mistura.

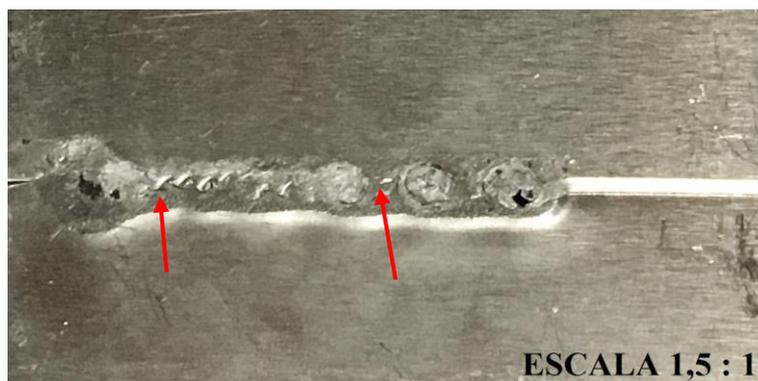


Figura 24 – Visão Inferior da União Realizada com a Ferramenta 2 (1)
Fonte: Autoria Própria

Percebe-se nos pontos indicados pelas setas em vermelho, que no decorrer do cordão de solda, em alguns momentos não ocorreu a união, visualmente vê-se que nestes pontos indicados as chapas não estão unidas.

Pelos resultados observados, novamente pode-se dizer que não houve penetração eficiente da ferramenta, as características do cordão, se assemelham as conclusões de Oliviecki e Beskow (2013). Estes concluíram que quando há uma ineficiência de penetração da ferramenta na peça de trabalho, a parte inferior da junta apresenta imperfeições, mais especificamente vazios.

4.2.2 Ferramenta 2: União 2

Levando-se em conta os resultados obtidos nos primeiros experimentos com a ferramenta 2, optou-se por diminuir a altura do pino da ferramenta para 1,7mm, com intuito de aumentar a área de contato do ombro com a peça de trabalho e consequentemente gerar um maior atrito.

Nas figuras 25 e 26 são representados os resultados obtidos na união 2 utilizando a ferramenta 2.



Figura 25 – Visão Superior da União Realizada com a Ferramenta 2 (2)
Fonte: Autoria Própria

Apesar da mudança no tamanho do pino, ainda pode-se observar, nos pontos indicados pelas setas vermelhas, na figura 25, que na parte superior da união soldada, existem inúmeros vazios.

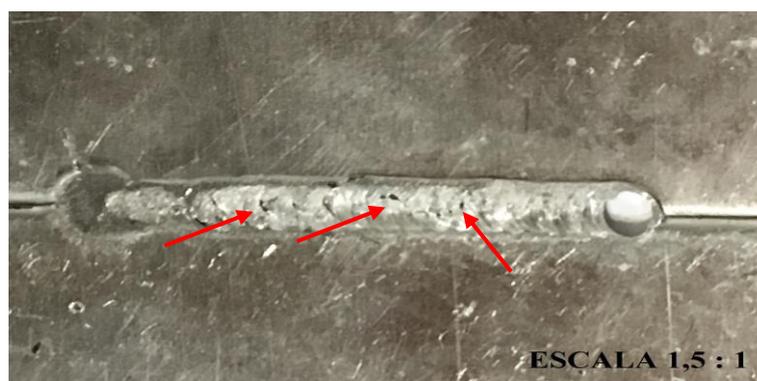


Figura 26 - Visão Inferior da União Realizada com a Ferramenta 2 (2)
Fonte: Autoria Própria

Assim como na visão superior da união da junta, na inferior também pode-se perceber novamente a presença dos vazios, indicados pelas setas vermelhas.

Para uma melhor análise, realizou-se uma macrografia desta união. Esta é representada na figura 27.

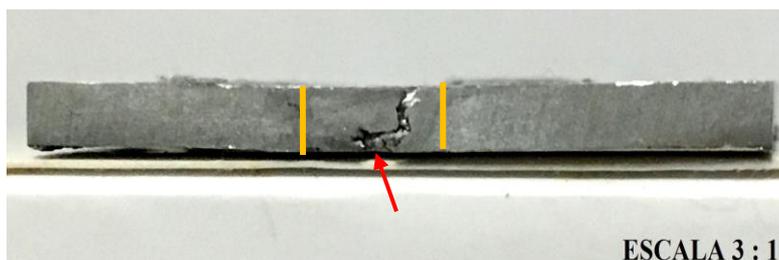


Figura 27 – Macrografia da Segunda União com Ferramenta 2
Fonte: Autoria Própria

Como citou-se anteriormente, a região entre os marcadores laranja, localiza o cordão de solda.

Confirmando o que havia sido apontado como suspeita, na análise visual, com a macrografia pode-se perceber que na parte interna existe um vazio que se estende desde a parte superior até a parte inferior da união soldada. Isso indica que mais uma vez a penetração não foi eficiente, não proporcionando a pressão adequada para o processo de solda e comprometendo a qualidade da solda.

4.2.3 Ferramenta 2: União 3

Baseando-se nos resultados obtidos na segunda união com a ferramenta 2, optou-se por novamente reduzir a altura do pino, com intuito de melhorar a penetração do ombro da ferramenta e conseqüentemente aumentar a capacidade de retenção de calor durante o processo de solda.

Diminuiu-se então a altura do pino para 1,4mm, anteriormente haviam sido utilizados os valores de 2mm e 1,7mm, porém, não apresentaram resultados satisfatórios.

A penetração utilizada na união 3, foi de 1,5mm.

Nas figuras 28 e 29 são representados resultados da união 3, com a ferramenta 2.

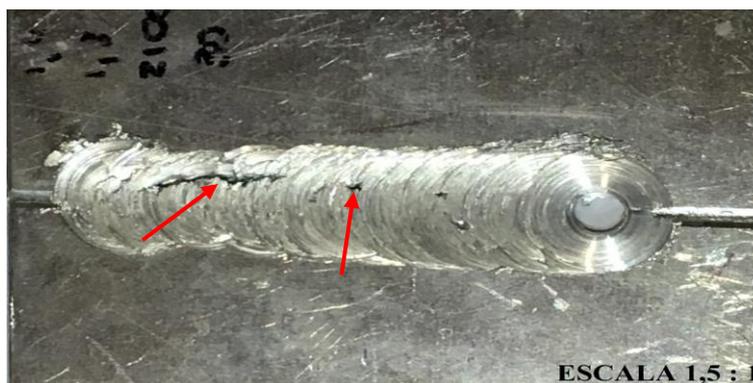


Figura 28 – Visão Superior da União Realizada com a Ferramenta 2 (3)
Fonte: Autoria Própria

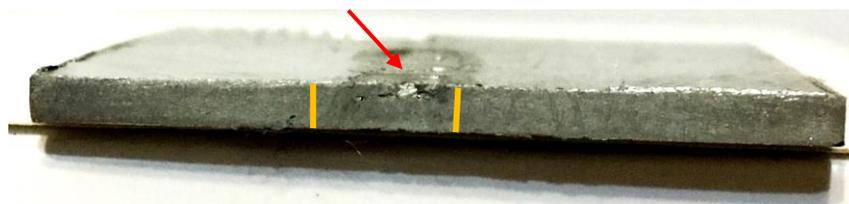
Analisando-se visualmente o resultado da solda, pode-se perceber que no início do cordão, aparece um grande vazio na parte superior da união, indicado pela primeira seta vermelha, e com o decorrer da solda os vazios ficam menos superficiais e menores, indicado pela segunda seta vermelha.



Figura 29 – Visão Inferior da União Realizada com a Ferramenta 2 (3)
Fonte: Autoria Própria

Analisando-se o resultado da visão inferior da terceira união, da ferramenta 2, pode-se dizer que comparando visualmente com os outros dois experimentos, uma melhora na questão de vazios aparentes, pode ser observada. Para uma verificação mais detalhada, optou-se pela realização de uma macrografia da junta.

Representa-se na figura 30, a macrografia.



ESCALA 2,7 : 1

Figura 30 – Macrografia da Terceira União com Ferramenta 2
Fonte: Autoria Própria

A região compreendida entre os marcadores laranjas, da figura 30, corresponde a região específica do cordão de solda.

Pode-se perceber analisando os resultados obtidos pela macrografia, que a parte interna da união apresentou resultados melhores quando comparados aos outros experimentos realizados anteriormente. A flecha em vermelho, indica um vazio na parte superior do cordão de solda, que também pode ser observado na figura 28.

Analisando-se a figura 30, nota-se que a modificação na altura do pino, trouxe uma melhora na qualidade do cordão de solda. Isto se deve ao fato de que desencadeou-se, com esta alteração, um aumento no atrito do ombro da ferramenta com a peça de trabalho, trazendo uma maior concentração de calor durante o processo, além de que se evitou também que o material deformado plasticamente fosse “expulso” da região soldada (Mishra e Mahoney, 2007; Oliviecki e Beskow, 2013).

4.2.4 Ferramenta 2: União 4

Buscando-se aperfeiçoar ainda mais o processo de solda utilizado para união 3, decidiu-se aumentar a penetração da ferramenta.

Anteriormente foi utilizada uma penetração de 1,5mm, para união 4, optou-se por utilizar uma penetração de 1,6 mm.

Nas figuras 31 e 32 são representados os resultados obtidos na união 4.

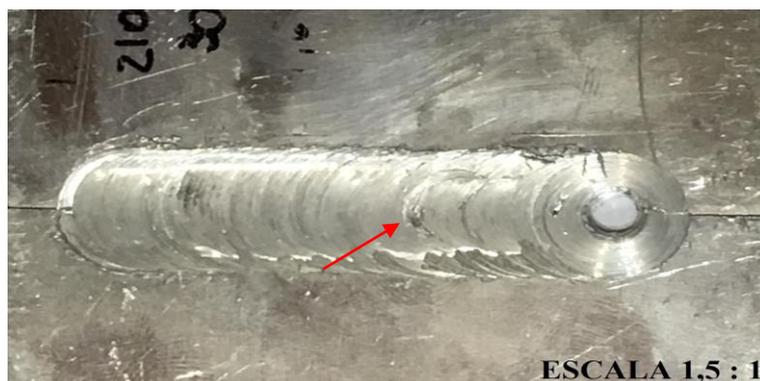


Figura 31 – Visão Superior da União Realizada com a Ferramenta 2 (4)
Fonte: Autoria Própria

Nota-se que o aumento da penetração da ferramenta, trouxe uma melhora, visual, da parte superior da união soldada. A seta vermelha indica um pequeno vazio, porém quando compara-se esta visão superior com as demais, percebe-se uma grande melhora na aparência da junta soldada.

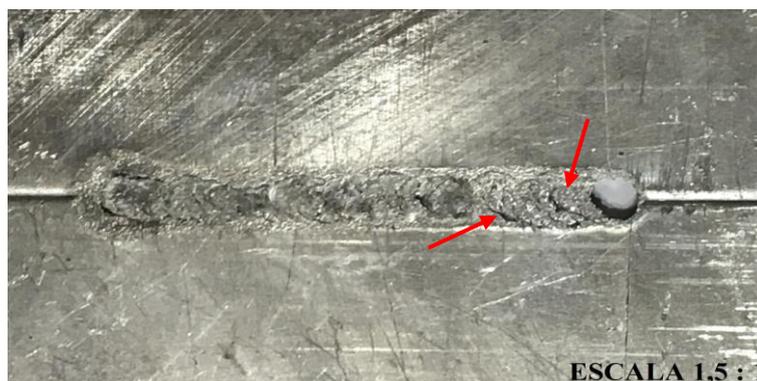


Figura 32 – Visão Inferior da União Realizada com a Ferramenta 2 (4)
Fonte: Autoria Própria

Analisando-se a parte inferior da união soldada, percebe-se que os vazios também estão menos aparentes visualmente quando comparados aos experimentos anteriores. Decidiu-se então realizar uma macrografia do cordão de solda, para verificação de até que ponto os resultados melhoraram com a maior penetração do ombro da ferramenta.

Representa-se a macrografia na figura 33.

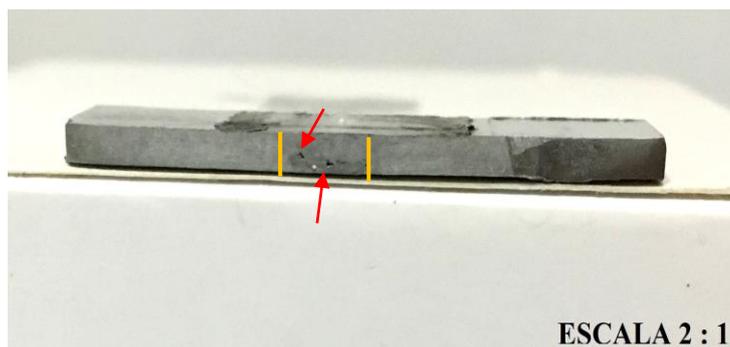


Figura 33 – Macrografia da Quarta União com Ferramenta 2
Fonte: Autoria Própria

A região entre os marcadores laranja, representa a região do cordão de solda e as setas em vermelho indicam pequenos vazios na parte interna.

Analisando-se o resultado obtido com o aumento de 0,1mm na penetração da ferramenta, nota-se que houve uma grande melhora com relação a qualidade da solda. Pode-se afirmar, que com este aumento da penetração, a geração de calor durante o processo foi maior, em consequência do maior contato do ombro com a peça. Além disso, quando compara-se com a geometria da ferramenta 1 com a geometria da ferramenta 2, nota-se que o tamanho do ombro, adaptou-se melhor ao processo, de maneira que o material plastificado ficasse concentrado na região da solda, estas análises estão de acordo com estudos já descritos na literatura (Mishra e Mahoney, 2007; Oliviecki e Beskow, 2013).

Somado a isso, Oliviecki e Beskow (2013), também concluíram em seus estudos que altas velocidades de avanço com baixas rotações de ferramenta, também causam defeitos de vazio, já que estes estão diretamente ligados a falta de aporte térmico na junta, em outras palavras, pode-se dizer que se houvesse a opção de se selecionar um valor de avanço mais baixo, que 30mm/min, na fresadora, a dissipação de calor do processo diminuiria, resultando consequentemente num cordão de solda com uma qualidade maior.

Com relação ao material das peças de trabalho, baseando-se na análise de composição química realizada, pode-se dizer que como se trata de uma liga com altíssima porcentagem de Alumínio, há uma maior taxa de dissipação de calor, já que está é uma característica deste material.

4.3 EXPERIMENTOS: FERRAMENTA 3

Além de testar a influência da geometria da ferramenta, testou-se a influência do material da mesma para verificar quais as influencias que ocorreriam no resultado da qualidade do cordão solda.

Para isso realizou-se o processo com uma ferramenta que passou por tratamento superficial de nitretação.

Como a geometria de ferramenta que trouxe melhores resultados foi a geometria da ferramenta 2, com adaptações do quarto experimento, no caso, um pino de 1,4mm de altura, optou-se por utilizar a mesma geometria para ferramenta nitretada, além dos parâmetros de processo, ou seja, valores de avanço, rotação e penetração iguais, 30mm/min, 2100 RPM e 1,6mm respectivamente.

4.3.1 Ferramenta 3: União 1

Representa-se nas figuras 34 e 37 os resultados obtidos utilizando-se a ferramenta 3.



Figura 34 – Visão Superior da União Realizada com a Ferramenta 3 (1)
Fonte: Autoria Própria

Aproximando-se a figura 34, pode-se verificar mais claramente as influências da nitretação na junta soldada. Representa-se esta aproximação na figura 35.

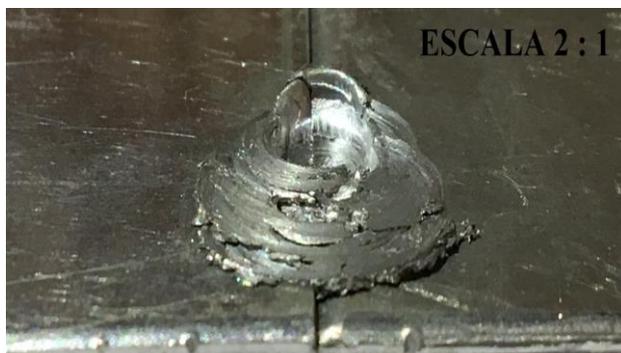


Figura 35 – Aproximação da Visão Superior da Junta Soldada com Ferramenta 3
Fonte: Autoria Própria

Nota-se, com uma análise visual, que a interação da superfície nitretada com o material da peça de trabalho, não foi positiva. Pode-se ver facilmente que a mistura teve resultados não satisfatórios e que no ponto em que a ferramenta é levantada, o material das chapas se elevou junto.

Esta interação dos dois materiais, possivelmente causou um emplastamento de material, já que observa-se um acúmulo de material no pino, representado também na figura 36, indicado pela seta em vermelho.



Figura 36 – Ferramenta 3 (nitretada) com possível acúmulo de material (Emplastamento)
Fonte: Autoria Própria

Como citou-se anteriormente, utilizou-se a mesma geometria da ferramenta 2 na ferramenta 3, considerando uma altura de pino de 1,4mm. Com intuito de verificar-se como ocorria o acúmulo de material no pino, decidiu-se medir a altura do

pino a cada cordão soldado com a ferramenta 3, e a cada passe de solda realizado a altura do pino aumentava em 0,2mm, ou seja, ficava com 1,6mm, comprovando que o material das chapas transferia-se para a ferramenta.



Figura 37 – Visão Superior da União Realizada com a Ferramenta 3 (1)
Fonte: Autoria Própria

Analisando-se a figura 37, percebe-se que as chapas não foram unidas para parte inferior, até o ponto que o processo ocorreu, indicado pelo retângulo vermelho.

Nota-se que os resultados obtidos, utilizando a ferramenta 3, com superfície nitretada, não foram satisfatórios. Como pode-se perceber não foi possível executar-se se quer até o final o processo, já que o material das chapas começou a acumular muito no pino da ferramenta, dificultando a união na parte inferior.

Somado a isso e levando em conta a análise química das chapas, pode-se dizer que esta também tem influência nos resultados observados, já que se trata de uma liga de Alumínio bastante mole, uma característica que chega a ser perceptível durante a execução de alguns processos, como o corte para análise macrográfica, o que implica numa maior facilidade de transferência quando ocorre o contato com a ferramenta.

5 CONCLUSÃO

Pode-se concluir que foi possível se utilizar a fresadora adaptada para execução de experimentos. Para uma otimização dos resultados seria interessante que a mesma fosse mais flexível, principalmente no quesito de possuir faixas mais baixas de velocidade de avanço.

Percebeu-se também, com os experimentos da ferramenta 3, que o material da ferramenta, influencia a qualidade da solda, já que mesmo utilizando a geometria da ferramenta que apresentou os melhores resultados anteriormente, não foi possível de se executar o processo de soldagem com a realização da nitretação na superfície da mesma.

A geometria da ferramenta 2, com adaptação do pino para 1,4mm de altura, foi a que apresentou os melhores resultados, estes puderam ser comprovados por meio da realização de uma macrografia da união soldada.

E finalmente conclui-se com este trabalho que é de extrema importância que antes de se confeccionar uma ferramenta, procure-se saber qual será a aplicação da mesma e se basear em pesquisas e materiais de apoio, como tabelas de dimensionamento, para que as chances de sucesso aumentem, já que a geometria é a variável mais influente dentro do processo FSW.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

VALDAMERI CAPELARI, Tiago; ESMERIO MAZZAFERRO, José Antônio. Avaliação da geometria de ferramenta e parâmetros do processo FSW na soldagem da liga de alumínio AA 5052. 16 p. Artigo Técnico (Engenharia Mecânica) - UFRGS, Porto Alegre, 2009.

DE JESUS HILLER, Daniel. ESTUDO DE PARÂMETROS E PERCURSOS NO PROCESSO DE SOLDAGEM DE MISTURA POR ATRITO (FSW) DA LIGA DE ALUMÍNIO 5052. 144 p. Dissertação (Mestrado Engenharia Mecânica)- UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.

KHALED, Terry. AN OUTSIDER LOOKS AT *FRICTION STIR WELDING*. 71 p. Artigo Técnico (Ph.D.)- Federal Aviation Administration, Lakewood, 2005.

LEONARD, A. J.; LOCKYER, S. A. Flaws in *Friction Stir Welding*. 10 p. Artigo Técnico (4º Simpósio Internacional de FSW), Utah, 2003.

OLIVIECKI, Neilor José; BESKOW, Arthur Bortolin. ANÁLISE DOS PARÂMETROS DO PROCESSO DE SOLDA POR FRICÇÃO EM UMA LIGA DE ALUMÍNIO. 16 p. Artigo Técnico (Revista Perspectiva), Erechim, 2013.

NAVARRO VERÁSTEGUI, Roger. ESTUDO DE UNIÕES DISSIMILARES ALUMÍNIO-AÇO SOLDADAS POR “SOLDA PONTO POR FRICÇÃO E MISTURA MECÂNICA COM PREENCHIMENTO DO FURO” (FRICTION SPOT WELDING – FSpW). 100 p. Tese para obtenção do Título de Doutor (Engenharia Mecânica)- UFRGS, Porto Alegre, 2012.

LOUREIRO, A. *FRICTION STIR WELDING*: Parâmetros de processo e aplicações. 30 p. Artigo Técnico (Engenharia Mecânica)- University of Coimbra, Coimbra, 2013.

SCHILIVE DE SOUZA, GISMAR. INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA FERRAMENTA NA SOLDAGEM DA LIGA DE ALUMÍNIO 5052 PELO PROCESSO *FRICTION STIR WELDING*. 142 p. Pós Graduação (Engenharia Mecânica)- UTFPR, Curitiba, 2010.

TOLOTTI DE ALMEIDA, DIEGO. ESTUDO DOS PARÂMETROS NO PROCESSO DE SOLDAGEM DE MISTURA POR ATRITO (FSW) DA LIGA DE ALUMÍNIO 5083-O. 2013. 107 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica)- UNIJUÍ, Panambi, 2013.

MISHRA, Rajiv; MAHONEY, Murray. *Friction Stir Welding and Processing*.: ASM, 2007. 352 p.

BRASIL, Nitron do. Soluções em Nitretação. Disponível em: <http://www.nitriondobrasil.com.br/serv_nitretacao.html>. Acesso em: 12 mar. 2017.

THOMAS, W M; MINUS, I; SMITH, P T. *Friction Stir Welding of an Aluminum Alloy – Effects of Tool Geometry*. England: Rep. n 668, 1999.

THREADGILL, P. L., NUNN, M. E. A Review of *Friction Stir Welding*: Part 1, Process Review. England: TWI Rep. n 760, 2003.

ZHAO, Y.; LIN, S.; WU, L.; QU, F. The influence of pin geometry on bonding and mechanical properties in friction stir weld 2014 Al alloy. *Materials Letters*, 59, p. 2948–2952, 2005.

MISHRA, C. R., Ma, Z. Y., 2005. “*Friction Stir Welding and Processing*”, *Materials Science and Engineering*, vol 50, pág 1-78.

NICHOLAS, E. D. Friction processing technologies. *Welding in the World*, 11/12, 2003, v. 47.