

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

LEONARDO MARAVIESKI NETO

MATHEUS BRANCO MANFRIN

**AVALIAÇÃO DA UNIÃO DE CHAPAS METÁLICAS VARIANDO A
GEOMETRIA DA FERRAMENTA NO PROCESSO FRICTION STIR
WELDING**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2018

**LEONARDO MARAVIESKI NETO
MATHEUS BRANCO MANFRIN**

**AVALIAÇÃO DA UNIÃO DE CHAPAS METÁLICAS VARIANDO A
GEOMETRIA DA FERRAMENTA 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 de Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Roger Navarro Verástegui

PONTA GROSSA

2018



TERMO DE APROVAÇÃO

AVALIAÇÃO DA UNIÃO DE CHAPAS METÁLICAS VARIANDO A GEOMETRIA DA FERRAMENTA NO PROCESSO FRICTION STIR WELDING

por

LEONARDO MARAVIESKI NETO E MATHEUS BRANCO MANFRIN

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 26 de novembro de 2018 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. Roger Navarro Verastegui
Orientador

Prof. Dr. Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz
Membro Titular

Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de Carvalho
Membro Titular

Prof. Dr. Marcos Eduardo Soares
Responsável pelos TCC

Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de Carvalho
Coordenador do Curso

RESUMO

MARAVIESKI, Leonardo; MANFRIN, Matheus. **Avaliação da União de Chapas Metálicas Variando a Geometria da Ferramenta no Processo de Friction Stir Welding**. 2018. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Engenharia Mecânica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2018.

A elevada complexidade dos principais processos de soldagem de alumínio disponíveis na atualidade faz com que surjam oportunidades de novos desenvolvimentos na tecnologia de soldagem. Sabe-se que as técnicas envolvidas na união de chapas mais utilizadas na indústria provocam distorções e deformações na microestrutura de chapas de alumínio. Estes problemas resultam na perda das principais propriedades mecânicas do material, principalmente quando tratado termicamente, efeito não desejado nos processos de manufatura. Surgem na década de 90 pesquisas relacionadas à soldagem com pino não consumível, de nome *Friction Stir Welding (FSW)*. O processo realiza a mistura mecânica do material através de uma ferramenta rotativa específica para a sua realização, disposta de corpo, ombro e pino. Dentro das inúmeras variáveis necessárias para a realização deste processo, o presente trabalho estuda, correlacionando o ensaio de tração e microdureza, o efeito da variação da geometria do pino da ferramenta em uma união soldada no processo de FSW.

Palavras-chave: *Friction Stir Welding*. Geometria de ferramenta. Soldagem de Alumínio. Soldagem com pino não consumível.

ABSTRACT

MARAVIESKI, Leonardo; MANFRIN, Matheus. **Evaluation of a Metallic Plate Union Varying the Tool Geometry at Friction Stir Welding Process.** 2018. 57 p. Work of Conclusion Course Graduation in Mechanical Engineer - Federal Technology University - Paraná. Ponta Grossa, 2018.

The high complexity of the main processes of aluminum welding available at the present, brings some opportunities for new developments in welding technology. It is already known that the techniques involved in joining the most used plates in the industry may cause distortions and deformations in the microstructure of aluminum plates. These problems affect the main mechanical properties of the material, especially when heat-treated, undesirable effect in the manufacturing processes. Emerge in 90's decade researches related to welding with non-consumable pin, named Friction Stir Welding (FSW). The process provides the mechanical mixing of the material through a specific rotating tool, disposed of body, shoulder and pin. Among the multiple variables required to perform this process, this research studies the effect of the variation of tool pin geometry on a welded joint in the FSW process, correlating the tensile strength and microhardness tests.

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

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema representativo do processo de FSW. FONTE: (MISHRA e MAHONEY).	2
Figura 2 - Tratamento térmico de solubilização e envelhecimento FONTE: CALLISTER (2011, cap 3).	10
Figura 3 - Processo FSW. FONTE: (ROSADO, 2003).	15
Figura 4 - União de juntas realizadas pelo processo de FSW. FONTE: (CAPELARI e MAZZAFERRO, 2009).	15
Figura 5 - Diferentes configurações de juntas que podem ser realizadas pelo processo FSW. (a) Topo. (b) Canto. (c) Perfil "T". (d) Chapas sobrepostas. (e) Mais de duas chapas sobrepostas. (f) Perfil "T" sobreposto. (g) Filete de canto. FONTE: (MISHRA e MAHONEY).	16
Figura 6 - Seção transversal de uma solda indicando as regiões afetadas pelo processo. FONTE: (MISHRA E MAHONEY, 2007).	18
Figura 7 - Macrorregiões observadas na junta. FONTE: SANTOS, TORRES e RAMIREZ, 2015.	18
Figura 8 - Diferentes geometrias de ombro. FONTE: (MISHRA e MAHONEY, 2007).	21
Figura 9 - Diferentes geometrias de pinos. FONTE: MISHRA E MAHONEY, 2007.	21
Figura 10 – Pino cilíndrico de fundo redondo com rosca esquerda FONTE: (MISHRA e MAHONEY, 2007).	23
Figura 11 – Pino cilíndrico de fundo plano com rosca esquerda FONTE: (MISHRA e MAHONEY, 2007).	24
Figura 12 – Pino cônico com rosca esquerda. FONTE: (MISHRA e MAHONEY, 2007).	24
Figura 13 – Composição da Liga de Alumínio. FONTE: (FREITAS, 2015).	25
Figura 14 – Figura ilustrativa da Fresadora Cardoso FC 30. FONTE: (FREITAS, 2015).	26
Figura 15 – Foto do <i>setup</i> inicial para execução da solda. FONTE: Autoria própria.	27
Figura 16 – Desenho esquemático do corpo de prova padrão. FONTE: Autoria Própria.	28
Figura 17 - Máquina de ensaio de tração EMIC 10000. FONTE: Autoria própria.	31
Figura 18 – Preparação da amostra para embutimento. FONTE: Autoria própria.	32
Figura 19 – Esquema representativo para a realização do ensaio de microdureza – FONTE: Autoria Própria.	34
Figura 20 – Análise visual imediatamente após a solda. FONTE: Autoria própria.	35
Figura 23 – Gráfico da dureza em 3 amostras distintas. FONTE: Autoria própria.	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades do alumínio puro	4
Tabela 2 - Principais elementos de ligas e seus efeitos	5
Tabela 3 - Nomenclatura principais ligas	6
Tabela 4 - Designação da condição de ligas não tratáveis termicamente.	11
Tabela 5 - designação da condição de ligas tratáveis termicamente.....	11
Tabela 6 - Benefícios do processo FSW.....	17
Tabela 7: Correlação entre desenho da ferramenta e corpos de prova.....	30
Tabela 8 – Parâmetros para microdureza.....	33
Tabela 9 – Resultado ensaio de tração com tensões máximas e ferramenta utilizada. 38	
Tabela 10 – Média das tensões máximas obtidas com uso das 3 ferramentas e chapa. 38	
Tabela 11 – Resultados obtidos do ensaio de Micro Dureza Vickers. Erro! Indicador não definido.	

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 – Resultados obtidos no ensaio de microdureza	46
---	----

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 ALUMÍNIO E SUAS LIGAS.....	3
2.2. NOMENCLATURA DAS LIGAS.....	5
2.3. SOLDABILIDADE.....	6
2.4. SOLDABILIDADE DO ALUMÍNIO E SUAS LIGAS.....	7
2.5. TRATAMENTOS TÉRMICOS.....	9
2.6. TRATAMENTOS TÉRMICOS EM LIGAS DE ALUMÍNIO.....	10
2.7. JUNTAS METÁLICAS EM ALUMÍNIO.....	13
2.8 FRICTION STIR WELDING.....	14
3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	25
3.1 MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	35
4.1. Resultados do ensaio visual do produto soldado.....	35
4.2. Resultados do ensaio de tração.....	36
4.3. Resultados do ensaio de microdureza:.....	38
5. CONCLUSÕES.....	41
6. SUJESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	43
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44
8. ANEXOS.....	46

1. INTRODUÇÃO

O alumínio e suas ligas são uma alternativa interessante para serem usados em diversos processos. A utilização do alumínio em projetos de engenharia vem crescendo notavelmente considerando as últimas décadas, devido não só as suas propriedades mecânicas e sua baixa densidade específica, mas também pela possibilidade de reciclagem deste metal. Por isto, o material se torna uma alternativa interessante tanto no âmbito econômico, quanto ambiental.

No processo de soldagem, percebe-se um problema intrínseco da união de chapas metálicas derivadas do alumínio, visto que atualmente a maioria das principais técnicas já conhecidas, como por exemplo, o processo de TIG e MIG/MAG, que não conseguem soldar com facilidade este material. Além disso, a maioria dos processos acabam por degradar as propriedades mecânicas oriundas dos tratamentos térmicos, posteriormente aplicados no material.

Chapas de alumínio em alguns casos passam por processos de tratamento térmico posterior a sua fabricação, a fim de se obter uma melhora considerável em algumas propriedades mecânicas desejáveis. Os tratamentos térmicos mais comuns aplicados em ligas de alumínio são: Recozimento; envelhecimento natural; precipitação artificial sem prévia solubilização; solubilização com precipitação artificial; superenvelhecimento (CALLISTER, 2002). A maioria das ligas de alumínio fundidas podem ter suas propriedades mecânicas, estabilidade dimensional ou resistência à corrosão aperfeiçoada por meio destes tratamentos (VERRAN, 2005).

Uma solução para essa problemática vem sendo estudada desde a década de 90, na Inglaterra, especificamente no *The Welding Institute (TWI)* (MISHRA E MAHONEY, 2007) e apresenta-se como uma técnica de nome derivado do inglês *Friction Stir Welding (FSW)*. Este processo de soldagem consiste basicamente em uma solda realizada através de uma ferramenta

própria para a execução do processo de *FSW*, que possui corpo cilíndrico com pino e ombro de geometria variável, misturando mecanicamente as peças, sem atingir o ponto de fusão do material e sem metal de adição. Por isto, esta técnica possui baixo custo energético e pouco material residual, apresentando assim significativas vantagens ambientais.

Nesta técnica de soldagem uma ferramenta elaborada com um material de elevada resistência mecânica e com um perfil especial para o dado processo, utiliza o atrito entre a ferramenta e as peças a serem soldadas, gerando calor promovendo a mistura mecânica dos materiais envolvidos, resultando na realização da solda. Basicamente os possíveis parâmetros de variação na execução desta técnica são: Velocidade de soldagem, ângulo de inclinação, velocidade de rotação, penetração do ombro, força da fresa sobre a peça e ferramenta. No quesito ferramenta, é possível haver a variação da sua geometria em aspectos de: Comprimento do pino, geometria do pino, diâmetro do pino, geometria do ombro e diâmetro do ombro.

O presente trabalho tem como objetivo realizar o processo de soldagem por *FSW* variando o parâmetro de geometria da ferramenta (pino), e por fim analisando os produtos soldados quanto à dureza e resistência mecânica através da realização de ensaios mecânicos. Os outros parâmetros que envolvem o processo, entre eles, pode-se citar a velocidade de avanço, velocidade de solda, rotação, mesa de fixação da chapa, entre outros, foram fixados com base em resultados obtidos em trabalhos anteriores. A figura 1 representa um esquema do processo de *FSW*, demonstrando a fase de penetração do pino nas chapas, a mistura através da rotação da ferramenta e a remoção.

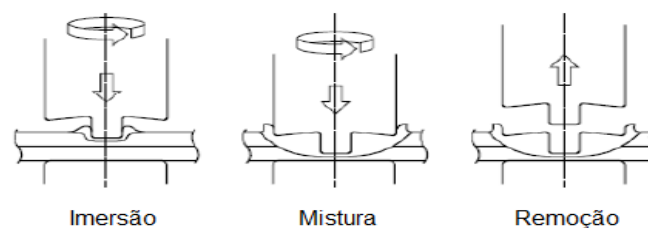


Figura 1 – Esquema representativo do processo de FSW. FONTE: (MISHRA e MAHONEY).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ALUMÍNIO E SUAS LIGAS

O alumínio é o terceiro material mais abundante do mundo e devido ao fato de possuir excelentes propriedades físico-químicas, entre elas principalmente o baixo peso específico, a alta condutividade térmica e elétrica e a reciclagem, tornou-se o metal não ferroso mais consumido atualmente (ABAL: Associação Brasileira do Alumínio, 2005).

O processo de obtenção do alumínio metálico é derivado da redução eletrolítica da alumina (Al_2O_3) dissolvida em criolita líquida. O alumínio foi descoberto por Sir Humphrey Davy em 1809, onde foi isolado pela primeira vez em 1825 por H. C. Oersted, porém, apenas em 1886 foi desenvolvido o processo industrial de obtenção do alumínio. (ABAL, 2004).

Uma vantagem deste material é a facilidade de ser transformado em vários formatos com facilidade. O alumínio pode ser laminado em diversas espessuras, pode ser extrudado em inúmeros perfis e trefilado em forma de arame de diversos diâmetros e comprimentos. Além disso, o alumínio pode ser fundido, usinado, soldado, entre outros. Devido a isto, o material se tornou bastante difundido nos mais diversos processos de produção.

2.1.1 Propriedades

As propriedades do alumínio e suas ligas também são fatores pelos quais o metal obteve crescente utilização na indústria. Devido a estas propriedades, o material vem substituindo outros metais, como por exemplo, a substituição do ferro fundido em blocos de motores por ligas de alumínio.

Segundo COUTINHO (1980), o alumínio puro (considera-se 99,5 – 99,996% de pureza), tem como arranjo dos átomos uma rede cristalina cúbica de faces centradas (CFC), possui altos valores de condutividade térmica e elétrica, é dúctil e maleável. A tabela 1 apresenta algumas das propriedades do alumínio.

Tabela 1 - Propriedades do alumínio puro

Número Atômico	13
Massa Atômica	26,9815
Valência	+ 3
Configuração Eletrônica	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 2p^1$
Peso específico	2,7 g/cm ³
Ponto de fusão	660°C
Ponto de ebulição	2450°C

Fonte: HISSA (2005)

Além disso, o alumínio não é ferromagnético, uma característica importante dependendo de sua aplicação. Outra vantagem do alumínio é a sua não toxicidade, podendo ser empregado para fins alimentícios.

2.1.2 Ligas

O alumínio considerado puro não possui elevada aplicação na indústria, pois, apresenta baixa dureza e resistência mecânica. Para que o alumínio tenha maior utilidade, é necessário que haja a combinação com outros elementos, que dão origem às ligas de alumínio.

Segundo CALLISTER (2002), estas ligas apresentam características diferentes daquelas apresentadas pelos seus materiais constituintes, como por exemplo, a dureza, ductilidade, condutividade, entre outras. Estas propriedades estão diretamente relacionadas da composição, da microestrutura e dos tratamentos térmicos ou mecânicos da liga. Os principais elementos de ligas e os efeitos ocasionados pela sua introdução são encontrados na tabela 2.

Tabela 2 - Principais elementos de ligas e seus efeitos.

Elementos	Efeitos Opcionados
Cobre (Cu)	Aumento progressivo da resistência e da dureza até adição de 12% de Cu. Confere à liga boas propriedades mecânicas e a temperaturas elevadas, porém diminui a resistência à corrosão.
Silício (Si)	Teores crescentes de Si, até o ponto eutético, aumentam a fluidez e a resistência mecânica da liga e diminuem a fragilidade a quente e a contração do material.
Magnésio (Mg)	Aumento do limite de resistência e dureza, além de aumento na resistência à corrosão, ao impacto e excelente usinabilidade.
Zinco (Zn)	Confere excelente limite de resistência e ductilidade à temperatura ambiente, porém, aumenta a susceptibilidade à corrosão sob tensão

Fonte: BRADASHIA (1988).

O alumínio ainda possui diversos elementos que podem formar liga. Entretanto, os mais usuais são estes citados na tabela 2, e também os que possuem maior aplicabilidade na indústria.

2.2. NOMENCLATURA DAS LIGAS

Assim como nos aços, as ligas de alumínio possuem uma nomenclatura de acordo com uma norma padrão. A tabela 3 apresenta as nomenclaturas das ligas de alumínio, em relação à sua composição.

Tabela 3 - Nomenclatura principais ligas

Nomenclatura	Liga
1xxx	Alumínio puro com no mínimo 99% de pureza
2xxx	Ligas contendo Cobre como elemento de liga principal e adições de outros elementos.
3xxx	Ligas contendo Manganês como principal ligante
4xxx	Ligas contendo Silício como elemento de liga principal
5xxx	Ligas contendo Magnésio como elemento de liga principal
6xxx	Ligas que possuem Magnésio e Silício como elementos de liga principais
7xxx	Ligas que possuem Zinco como elemento de liga principal e adições de Cobre, Magnésio, Cromo e Zircônio
8xxx	Ligas cujas composições apresentam diferentes elementos, como o Estanho ou Lítio

Fonte: BRADASHIA (1988)

Na série 1xxx, os dois últimos números da nomenclatura, são referentes à percentagem (%) de alumínio acima de 99%, como por exemplo a liga 1050, que possui 99,50% de alumínio. (ABAL: Associação Brasileira do Alumínio, 2005).

Nas séries 2xxx à 8xxx, os dois últimos dígitos não possuem significado numérico, apenas identificam diferentes ligas do mesmo grupo. Já o segundo dígito indica as modificações no limite de impureza ou a adição de outros elementos de liga.

2.3. SOLDABILIDADE

De acordo com a *American Welding Society (AWS)*, soldabilidade é “a capacidade de um material ser soldado nas condições de fabricação impostas

por uma estrutura específica projetada de forma adequada e de se comportar adequadamente em serviço”. Em outras palavras, segundo MODENESI (2011), soldabilidade poderia ser definida como “a facilidade relativa com que uma solda satisfatória, que resulte em uma junta similar ao metal sendo soldado, pode ser produzida”.

Quando se deseja determinar a soldabilidade de um material, deve-se sempre considerar o processo e procedimento de soldagem assim como sua aplicação. A maioria das ligas metálicas são soldáveis, mas certamente algumas possuem restrições, como no caso do alumínio, onde sua soldabilidade depende do processo e do procedimento a ser realizado (MODENESI, 2011).

Baseado nestes parâmetros de processo, a análise de uma junta soldada deve ser avaliada em relação a apresentar similaridade com as características do material adjacente. Assim, é desejado que a junta apresente resistência mecânica, ductilidade, tenacidade, resistências à fadiga e à corrosão semelhantes à do metal a ser soldado.

Na maioria dos casos, a soldagem de duas chapas – caso a ser priorizado neste trabalho – envolve o uso de calor e deformação plástica, o que resulta em uma mudança na estrutura do metal em relação ao metal base. Além disso, nos processos mais usuais, se a operação for realizada de maneira onde os parâmetros saiam do ponto ótimo para se obter uma boa junção, problemas como descontinuidades, trincas e impurezas são passíveis de serem encontrados na solda, fatores estes, que influenciam diretamente nas propriedades mecânicas da peça. (MISHRA e MAHONEY, 2007)

2.4. SOLDABILIDADE DO ALUMÍNIO E SUAS LIGAS

O alumínio e suas ligas possuem diferenças em suas propriedades físicas e químicas, fatores que levam a distinções no processo de soldagem em relação ao efetuados em aços.

Surge então uma dificuldade em soldar este metal pelos processos mais usuais, como MIG (*Metal Inert Gas*) /MAG (*Metal Active Gas*) ou TIG (*Tungsten Inert Gas*). Este empecilho se dá, pois, o alumínio possui elevada afinidade pelo oxigênio, gás este, que é usado em processos de gases inertes; possui elevada condutividade térmica e também elevado coeficiente de expansão térmica; baixo ponto de fusão (ASW, 1998).

Em relação à afinidade com o oxigênio, o alumínio reage com o gás, formando uma camada de óxido com ponto de fusão maior do que o do alumínio. Com isso, cria-se uma barreira que impede o contato e a mistura do metal base fundido e a do metal de adição.

A elevada condutividade térmica do alumínio também é um fator que dificulta a solda. Segundo CALLISTER (2002) o alumínio possui condutividade térmica de 3 a 5 vezes maior do que a do aço, por isso, o calor gerado na soldagem é menos eficiente, fazendo com que se faça necessário o pré-aquecimento da peça e também o uso de um maior aporte térmico para chapas mais grossas de alumínio.

O coeficiente de expansão do alumínio também é outro fator que implica na soldabilidade. Seu coeficiente de expansão é aproximadamente duas vezes maior que a do aço (CALLISTER 2002), por este motivo, o alumínio quando em contato com o calor, tende a expandir, favorecendo a ocorrência de distorções e o aparecimento de trincas.

Devido ao seu baixo ponto de fusão, o material não apresenta mudança na coloração quando se aproxima de sua temperatura de fusão, fato que dificulta o controle da temperatura em processos manuais. Com isto, é possível ocorrer um excesso de fusão na chapa, podendo ocasionar a perfuração da mesma.

Porém, estes não são os principais problemas metalúrgicos de soldabilidade do alumínio. De acordo com MODENESI (2011), os principais problemas envolvidos na solda de ligas de alumínio são “a formação de porosidade pela presença de hidrogênio (H₂), formação de trincas a alta temperatura (principalmente de solidificação), a perda de resistência mecânica

(para metal base encruado ou endurecido através de precipitação), além de que muitos processos podem causar danos em tratamentos térmicos e mecânicos devido à solda atingir o ponto de fusão do alumínio”.

Atualmente, os processos mais usados para a soldagem de ligas metálicas em alumínio são MIG (*Metal Inert Gas*) e TIG (*Tungsten Inert Gas*). Em ambos os processos de soldagem, a seleção do consumível é feita em relação à composição química e em aspectos mecânicos da liga. Esta seleção deve seguir as normas AWS A5.3 e A5.10.

Recentemente, outro processo que deve ser levado em conta na hora da realização da soldagem do alumínio, é o processo de “*Frictions Stir Welding (FSW)*”, de tradução livre: Soldagem por Atrito com Pino não Consumível (SAPNC).

2.5. TRATAMENTOS TÉRMICOS

Segundo CALLISTER (2011, cap 3), os tratamentos térmicos têm como finalidade promover modificações no tipo e na quantidade de fases presentes no material, através da mudança na morfologia dos microconstituintes ou pela variação da concentração e distribuição de defeitos cristalinos. Estes tratamentos são realizados através do aquecimento e resfriamento controlado do material. De acordo com a CST (Companhia Siderúrgica de Tubarão) (1997), um tratamento térmico é feito em três etapas: o aquecimento, manutenção da temperatura e resfriamento, fato que pode ser observado na figura 2.

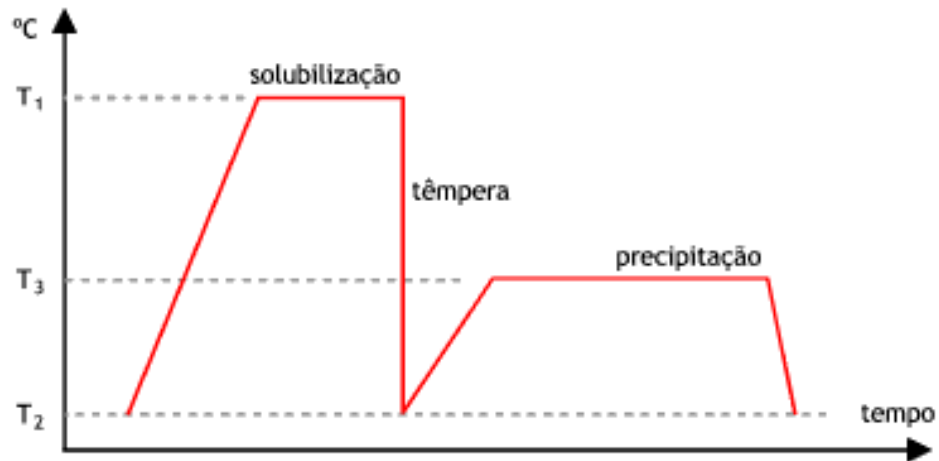


Figura 2 - Tratamento térmico de solubilização e envelhecimento FONTE: CALLISTER (2011, cap 3).

Na figura 1, o tratamento de solubilização/envelhecimento foi usado como exemplo a fim de demonstrar as 3 fases de um tratamento térmico. A imagem representa um gráfico onde está relacionado à temperatura e o tempo do processo.

2.6. TRATAMENTOS TÉRMICOS EM LIGAS DE ALUMÍNIO

Algumas ligas de alumínio (principalmente dos grupos 1XXX, 3XXX, 4XXX e 5XXX) não são tratáveis termicamente enquanto outras (principalmente dos grupos 2XXX, 6XXX e 7XXX) podem ser tratadas termicamente. As ligas não endurecíveis por tratamento térmico podem ser endurecidas por solução sólida ou por encruamento. (MODENESI 2011)

A tabela 4 é a apresentada de forma resumida a designação da condição para ligas não tratáveis termicamente. A designação para ligas tratáveis é apresentada na tabela 5 (MODENESI, 2011).

Tabela 4 - Designação da condição de ligas não tratáveis termicamente.

Designação	Condição
O	Recozido
F	Como fabricado
H1	Encruado
H2	Encruado e parcialmente recozido
H3	Encruado e estabilizado

Fonte: MODENESI (2011)..

Tabela 5 - designação da condição de ligas tratáveis termicamente.

Designação	Condição
O	Recozido
F	Como fabricado
W	Solubilizado
T1	Envelhecido (Resfriado da temperatura de trabalho a quente e envelhecido naturalmente até uma condição bem estável)
T2	Envelhecido (Resfriado da temperatura de trabalho a quente, encruado e envelhecido naturalmente até uma condição bem estável)
T3	Envelhecido (Solubilizado, encruado e envelhecido naturalmente até uma condição bem estável)
T4	Envelhecido (Solubilizado e envelhecido naturalmente até uma condição bem estável)
T5	Envelhecido (Resfriado da temperatura de trabalho a quente e envelhecido artificialmente)
T6	Envelhecido (Solubilizado e envelhecido artificialmente)
T7	Envelhecido (Solubilizado e envelhecido artificialmente até uma condição além da de resistência máxima)
T8	Envelhecido (Solubilizado, encruado e envelhecido artificialmente)
T9	Envelhecido (Solubilizado, envelhecido artificialmente e encruado)
10	Envelhecido (Resfriado da temperatura de trabalho a quente, encruado e envelhecido artificialmente)

Fonte: MODENESI (2011).

Para as ligas tratáveis termicamente, os principais tratamentos térmicos utilizados em ligas de alumínio são: homogeneização, recozimento e solubilização/envelhecimento.

2.6.1. Homogeneização

Tratamento térmico realizado a aproximadamente 500°C, dependendo da liga do material, que tem por objetivo remover ou reduzir as segregações, produzir estruturas estáveis e controlar algumas propriedades mecânicas, como tamanho de grão, entre outras. (CALLISTER 2002)

2.6.2. Recozimento pleno

É um tratamento térmico onde se busca o ganho de plasticidade do material, e corresponde a uma recristalização total deste. Neste processo, o material é aquecido a aproximadamente 350°C, permitindo um rearranjo para uma nova configuração cristalina, deixando o material em uma condição dúctil. (CALLISTER 2002)

2.6.3. Recozimento parcial

É um tratamento térmico que é realizado entre 200°C e 280°C, que corresponde a uma recristalização parcial do material, permitindo a obtenção de têmperas maiores, resultando em um produto final com maior resistência mecânica. (CALLISTER 2002)

2.6.4. Solubilização e envelhecimento

Tratamento térmico usado para obter melhora resistência mecânica nas ligas de alumínio. Como anteriormente mostrado na figura 1, metal é aquecido uniformemente a aproximadamente 500°C, onde ocorre a dissolução dos elementos de liga na solução sólida (solubilização). Após certo tempo, é realizada um resfriamento rápido em alguma solução (geralmente água), prevenindo que os constituintes da liga se precipitem. Esta condição é instável, onde conforme o passar do tempo, os constituintes se precipitem de forma fina, alcançando o máximo endurecimento e envelhecimento. Em algumas ligas o envelhecimento ocorre de maneira natural, já em outras isto se dá através do reaquecimento do material a uma temperatura aproximada de 175°C (precipitação). (CALLISTER 2002)

2.6.6. Superenvelhecimento

É caracterizado pela redução das propriedades mecânicas (principalmente da resistência mecânica) com o tempo de envelhecimento. Neste caso, o tempo de envelhecimento é superior ao ponto de resistência máxima do material, ou seja, o tempo de envelhecimento é excessivo, fazendo com que os precipitados possuam um tamanho incoerente, diminuindo a resistência.

2.7. JUNTAS METÁLICAS EM ALUMÍNIO

As técnicas de soldagem mais utilizadas para alumínio são:

2.7.1 Soldagem por arco gás-Tungstênio (*Gas Tungsten Arc Welding – GTAW*)

Também conhecido como TIG (*Tungsten Inert Gas*), este processo consiste em realizar a união dos corpos metálicos através do calor gerado pelo arco elétrico formado entre a peça e um eletrodo não consumível de tungstênio. A tocha que segura o eletrodo é conectada a um cilindro de gás de proteção, e também ligada à fonte alimentadora. Quanto à eficiência, é possível afirmar que o processo GTAW é mais eficiente do que o processo SMAW devido à proteção gerada pelo gás que, por sua vez é aplicada junto à poça de fusão. O gás protege a solda devido a sua capacidade de repelir o oxigênio próximo à região onde a solda está sendo aplicada, diminuindo fatores como oxidação instantânea da junta soldada (Kou, S. 2003).

Este processo, diferente dos citados até agora, pode ser realizado em materiais reativos como alumínio e titânio, além de ser um processo considerado limpo. Porém, é recomendado para soldagens de pequenas espessuras (Kou, S. 2003).

2.7.2 Soldagem por arco gás-metal (*Gas-Metal Arc Welding – GMAW*)

Processo cujo arco elétrico é gerado entre o metal base e um arame que alimenta a solda continuamente. Neste caso, a região de aplicação da solda também é protegida com gás e por isso é conhecido como *Metal Inert Gas – MIG*. Este processo possui uma taxa de deposição mais elevada comparada ao processo TIG, que o torna mais interessante para uso em soldas mais

espessas. Tem como principal desvantagem o tamanho da pistola utilizada na aplicação, podendo ser de difícil uso em determinadas situações (Kou, S. 2003).

2.8 FRICTION STIR WELDING

Dos diversos processos de soldagem usados para chapas de alumínio e de suas ligas, o mais usuais (como os processos GMAW, GTAW, TIG, MIG/MAG) ainda apresentam maiores tendências a problemas de soldabilidade. Quando empregados na soldagem de chapas, onde a probabilidade de empenamento é grande, a escolha de um processo pode ser determinante para um resultado satisfatório (WELDING HANDBOOK, 2004).

O processo de soldagem por *Friction Stir Welding* (FSW), também conhecido como Soldagem por Atrito com Pino não Consumível, é um processo relativamente novo na indústria. Este método foi desenvolvido na Inglaterra no ano de 1991, no *The Welding Institute* (TWI), e apresenta bons resultados quanto a propriedades mecânicas e metalúrgicas (MISHRA E MAHONEY, 2007).

Como o processo FSW é feito por fricção, o material é misturado mecanicamente, sem que haja a necessidade de fusão do mesmo. Por este motivo, as distorções são minimizadas neste processo.

A realização de uma soldagem pelo processo FSW, envolve a união de chapas através de uma ferramenta com geometria definida. A ferramenta (geralmente feita de aço ferramenta para soldas em alumínio), possui um perfil composto basicamente por um pino (não consumível) e um ombro, onde a mesma é colocada em contato com as chapas, fazendo com que o pino penetre na peça e o ombro permaneça em contato com a superfície, promovendo aquecimento através do atrito. A figura 3 representa o processo de soldagem por FSW (MISHRA E MAHONEY, 2007).

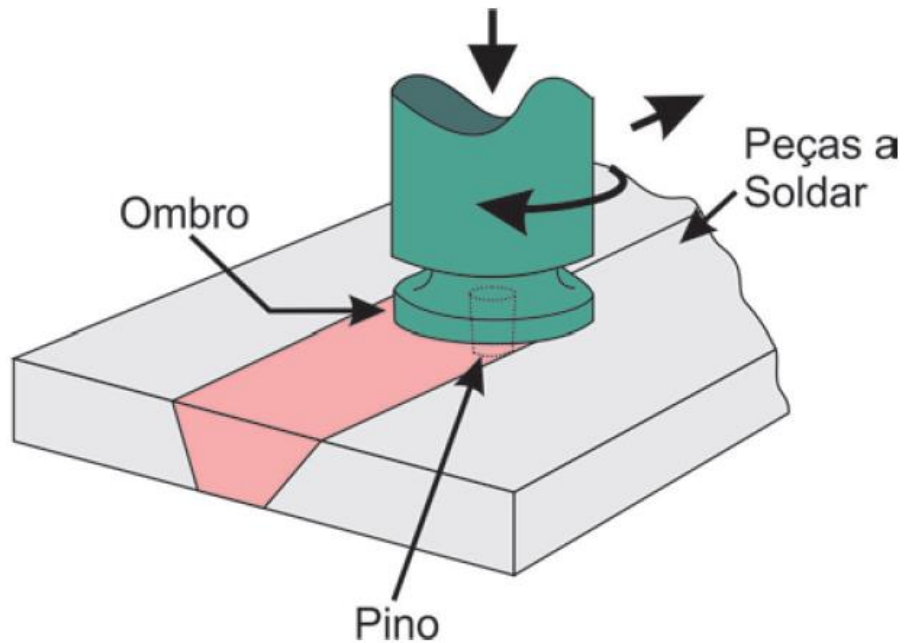


Figura 3 - Processo FSW. FONTE: ROSADO, 2003.

Com as chapas a serem soldadas devidamente fixadas, a ferramenta em rotação é inserida na junta. Com o contato entre o ombro e a superfície da peça (ombro aquece o material através do atrito), o processo é iniciado, então a ferramenta caminha pelas chapas, promovendo a mistura em estado plástico do material. A figura 4 apresenta o resultado de uma solda realizada por este processo. É importante ressaltar que a força axial exercida pela ferramenta, assim como sua rotação, velocidade de avanço e sua geometria, são fatores que influenciam na qualidade da solda final, por isto, devem ser previamente planejados (KASPARY, 2005).

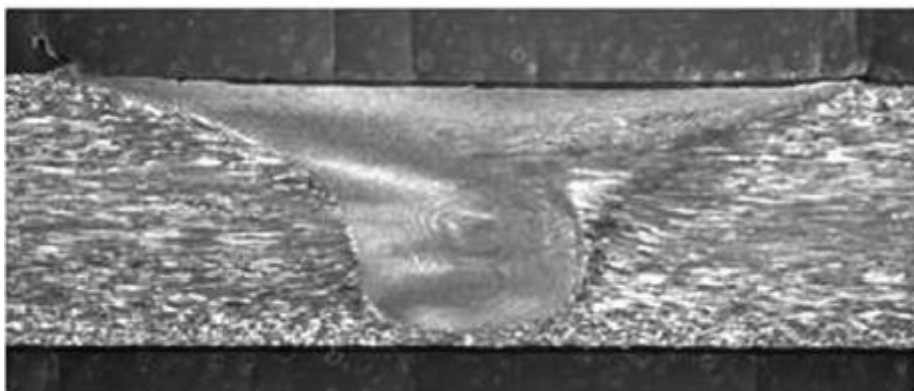


Figura 4 - União de juntas realizadas pelo processo de FSW. FONTE: CAPELARI e MAZZAFERRO, 2009.

Este tipo de união entre jutas, pode ser realizado em diversos perfis, diferentemente da soldagem por atrito convencional, onde o perfil é limitado. A figura 5 mostra alguns perfis possíveis de serem soldados pelo processo.

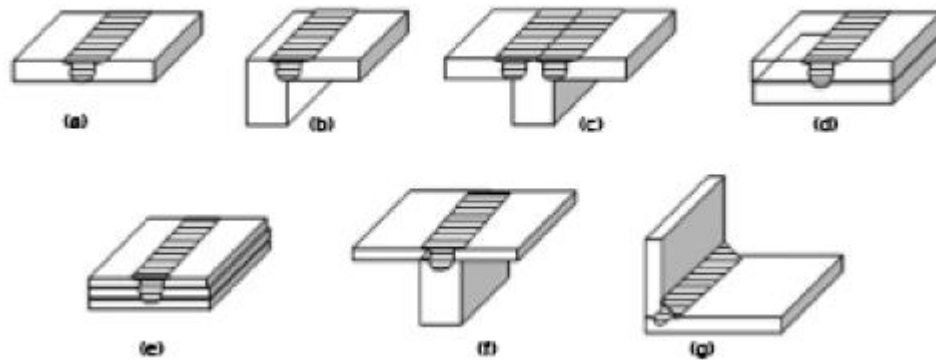


Figura 5 - Diferentes configurações de juntas que podem ser realizadas pelo processo FSW. (a) Topo. (b) Canto. (c) Perfil "T". (d) Chapas sobrepostas. (e) Mais de duas chapas sobrepostas. (f) Perfil "T" sobreposto. (g) Filete de canto. FONTE: MISHRA e MAHONEY.

2.8.1. Vantagens FSW

Além de não efetivar a fusão do material, o processo FSW ainda apresenta várias outras vantagens em relação aos processos mais usuais. Por não elevar a temperatura até o ponto de fusão do material, a soldagem acaba por não degradar o tratamento térmico previamente realizado na peça, fazendo com que não haja perda de propriedades mecânicas. Em outras palavras, segundo ROSADO (2003), através do processo, são evitadas “imperfeições e defeitos microestruturais associados aos processos de fusão e solidificação como trincas a quente, porosidades, dendritas, segregações”. Outro fator relevante é que este tipo de solda não exige material de adição para ser realizada, isto significa, além de certa economia, a não adição de peso na peça. Além disto, a soldagem pode ser realizada entre diferentes materiais, independentemente de sua compatibilidade. A tabela 6 mostra as vantagens do processo FSW em relação a diversos fatores. (MISHRA e MAHONEY, 2007); (ROSADO, 2003).

Tabela 6 - Benefícios do processo FSW.

Benefícios Metalúrgicos	Benefícios Ambientais	Benefícios Energéticos
Processo realizado em fase sólida	Ausência de gás inerte	Redução de peso nas juntas
Baixa distorção	Necessidade mínima de limpar a superfície	Somente 2,5% da energia utilizada em processos a laser
Boa estabilidade dimensional e repetição	Sem respingos	Menor consumo de combustíveis fósseis em aeronaves, automóveis, entre outros
Sem perda de elemento de liga	Ausência de solventes para a limpeza	
Excelentes propriedades mecânicas na junta	Ausência de material de adição	
Microestrutura recristalizada fina	Sem emissões prejudiciais	
Ausência de trincas		
Solda todas as ligas de alumínio		
Pós FSW formabilidade		

FONTE: MISHRA E MAHONEY, 2007.

Ainda em relação às vantagens, o processo pode ser realizado em diversas espessuras, podendo inclusive ser feito em dois passes, caso a peça possua espessura maior que o pino. Além disso, as juntas realizadas por FSW apresentam alta eficiência mecânica, o que permite a realização de juntas mais leves e resistentes (ROSADO, 2003).

2.8.2. Análise da zona soldada

Para que a análise da microestrutura na junta seja estudada, a mesma é dividida em algumas regiões. Estas divisões são feitas em relação a mudanças estruturais na região de solda, são elas (MISHRA E MAHONEY, 2007):

- A - Metal base ou material não afetado: região mais distante da junta. Sua microestrutura e propriedades mecânicas não são afetadas pela realização da solda;
- B - Zona termicamente afetada (*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 termomecanicamente afetada (*Thermomechanically affected zone* "TMAZ"): nesta região há influência do calor e da deformação plástica na microestrutura assim como nas propriedades mecânicas;
- D – Zona misturada: área totalmente recristalizada.

As regiões apresentadas estão dispostas na figura 6 e 7 (MISHRA E MAHONEY, 2007)



Figura 6 - Seção transversal de uma solda indicando as regiões afetadas pelo processo. FONTE: MISHRA E MAHONEY, 2007.

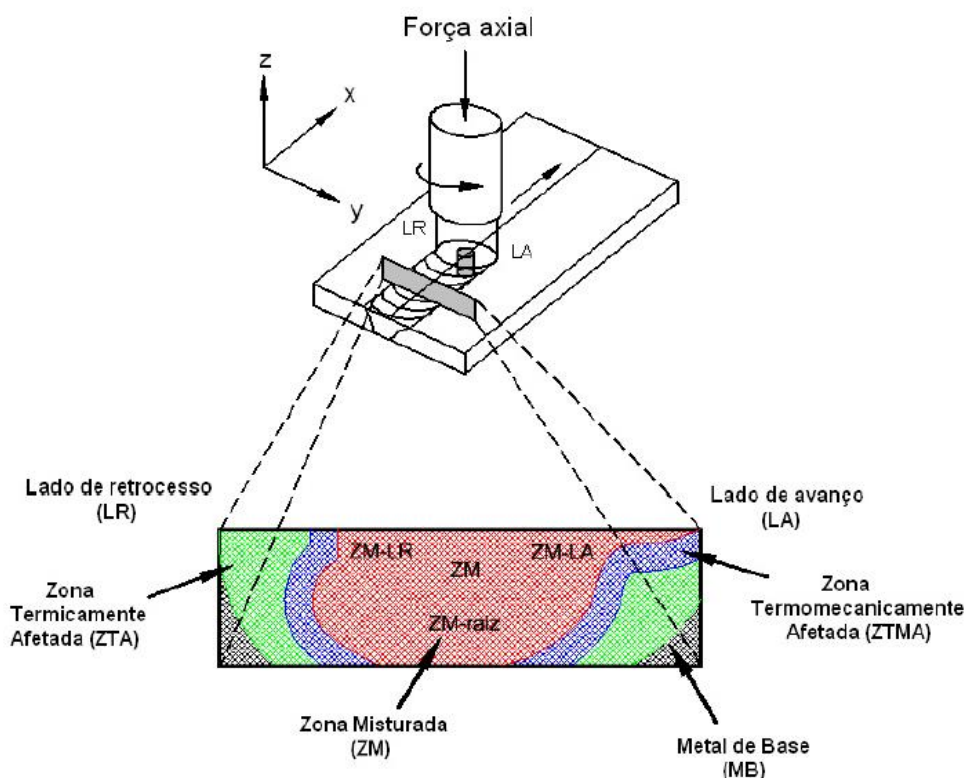


Figura 7 - Macrorregiões observadas na junta. FONTE: SANTOS, TORRES e RAMIREZ, 2015.

2.8.3. Ferramenta

A ferramenta para a realização do processo FSW necessita tanto aquecer o material como também promover mecanicamente sua mistura, por isso o seu material deve ser adequado para que não haja interferência no resultado final (MISHRA e MAHONEY, 2007).

Segundo MISHRA e MAHONEY 2007, além da disposição do material da ferramenta, este deve ser escolhido de maneira que sejam considerados alguns aspectos listados a seguir:

- Resistência a carregamentos em elevadas temperaturas – a ferramenta deve resistir a forças de compressão e cisalhamento em elevadas temperaturas, evitando distorções e fraturas quando utilizada;
- Estabilidade a elevadas temperaturas – o material deve manter a resistência e estabilidade dimensional em situações de trabalho
- Resistência ao desgaste – é importante evitar o desgaste da ferramenta, pois ele causa a alteração do formato e dimensões da ferramenta;
- Tenacidade – é importante para evitar fraturas na ferramenta devido às tensões locais no momento do mergulho e da permanência da ferramenta na região da junta;
- Coeficiente de expansão térmica (ferramentas bimetálicas) – uma grande diferença entre os coeficientes de expansão dos materiais do pino e do ombro gera aumento de tensões entre as duas partes, podendo levar a falha da ferramenta;
- Usinabilidade – determina a possibilidade da fabricação da ferramenta;
- Uniformidade na microestrutura e densidade – a uniformidade é importante para não ocorrerem regiões mais fracas na estrutura da ferramenta.

2.8.4. Geometria da ferramenta

A geometria da ferramenta é um parâmetro essencial para que a solda possua um resultado satisfatório e pode variar conforme a necessidade. Seu papel é o de promover aporte térmico à junta e também realizara a mistura de maneira eficaz do material (MISHRA e MAHONEY, 2007).

Por este motivo, o projeto e o dimensionamento da ferramenta é essencial para que não haja imperfeições na união das juntas, como por exemplo (MISHRA e MAHONEY, 2007):

- Vazios: onde geralmente ficam do lado de avanço da solda e é causado por baixa pressão de forjamento, velocidade de avanço elevada ou má fixação da ferramenta;
- Falhas de raiz: ocorrem quando a peça não é devidamente limpa antes da realização do processo, ou da deformação insuficiente entre as superfícies, devido ao posicionamento errado da ferramenta, ou da alta velocidade de avanço ou também do diâmetro de ombro muito grande.
- Penetração de raiz incompleta: ocorre quando o tamanho do pino é insuficiente, ficando distante da base da peça (MISHRA e MAHONEY, 2007).

Segundo CAPELARI e MAZZAFERRO (2009), “as dimensões básicas para uma ferramenta FSW devem contemplar um diâmetro de pino similar à espessura da chapa a ser soldada. O comprimento do pino deve ser um pouco inferior à espessura da chapa, já que a região soldada abaixo da ponta do pino estende-se por uma pequena região apenas. Além disto, o diâmetro do ombro deve corresponder a aproximadamente três vezes o diâmetro maior do pino”.

2.8.4.1 Ombro da ferramenta

O ombro da ferramenta é responsável por aquecer através do atrito a peça, para que então ocorra a mistura do material. A fim de aumentar a eficiência deste aquecimento, a geometria do ombro pode variar, conforma alguns exemplos representados na figura 8. (MISHRA e MAHONEY, 2007).

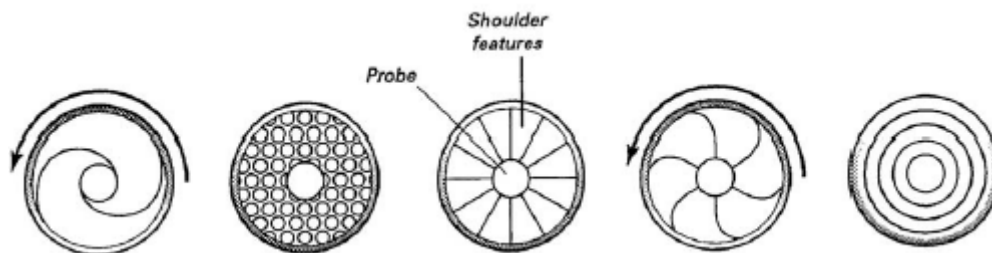


Figura 8 - Diferentes geometrias de ombro. FONTE: (MISHRA e MAHONEY, 2007).

Com a variação da geometria do ombro da ferramenta, é possível também variar o fluxo que o material possui, além de aumentar a quantidade de material deformado, a fim de maximizar a qualidade do processo.

2.8.4.2 Pino da ferramenta

O pino da ferramenta tem como objetivo promover a mistura do material, produzindo também aquecimento deformacional e de fricção à junta. É outro fator que pode ser alterado para a maximização da eficácia do processo. Diversas geometrias de pinos são mostradas na figura 9 (MISHRA e MAHONEY, 2007).

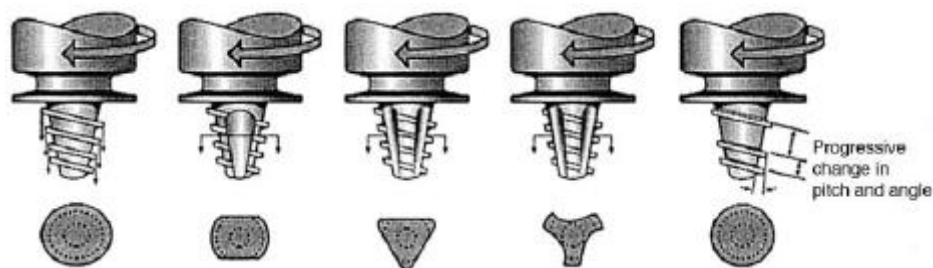


Figura 9 - Diferentes geometrias de pinos. FONTE: MISHRA E MAHONEY, 2007.

Além disto, o pino é o responsável por entrar em contato com o material na junção da chapa, e deve ser capaz de misturar a junta de maneira que mova o material da frente da ferramenta para trás. O pino também é um fator importante para se determinar a velocidade de soldagem, afim de que seu

trabalho seja feito com maior eficácia, para se minimizar os defeitos na solda (CAPELARI e MAZZAFERRO, 2009).

O pino é responsável por realizar a junta, unindo as duas chapas ou realizar o contato das duas superfícies de trabalho

- Cisalhando o material na frente da ferramenta;
- Mover o material para parte de trás em uma velocidade controlada;

O estudo da patente original do FSW é realizado usando um pino cilíndrico de fundo redondo (*Round-Bottom Cylindrical Pin*). Em seguida serão abordados os pinos mais utilizados na aplicação da técnica de FSW:

a) Pino cilíndrico de fundo redondo

Roscas são usadas para transportar o material do ombro do pino para o fundo. Por exemplo, uma ferramenta atuando no sentido horário requer uma rosca esquerda para realizar essa tarefa (MISHRA e MAHONEY, 2007).

Um fundo redondo pode ser usado na ferramenta para diminuir o desgaste da ferramenta no início da operação, melhorando a qualidade da solda abaixo da parte inferior do pino (MISHRA e MAHONEY, 2007).

O melhor raio a ser utilizado no fundo do pino é especificado como sendo 75% do diâmetro do pino (MISHRA e MAHONEY, 2007).

O pino cilíndrico de fundo arredondado garante uma boa versatilidade podendo ser alterado tanto no comprimento como no diâmetro da ferramenta. A inclusão do domo no fundo do pino garante uma boa durabilidade da ferramenta e uma boa qualidade na raiz da solda (MISHRA e MAHONEY, 2007) como demonstrado na Figura 10.



Figura 10 – Pino cilíndrico de fundo redondo com rosca esquerda FONTE: MISHRA e MAHONEY, 2007.

b) Pino cilíndrico de fundo plano

Contrariando as afirmações feitas na sessão passada, um estudo mostra que a maioria dos pinos utilizados no uso da técnica de FSW são pinos de fundo plano (MISHRA e MAHONEY, 2007).

A alteração de um pino cilíndrico de fundo arredondado para um pino cilíndrico de fundo plano (Figura 11) ocorre por questões geométricas. A velocidade de um cilindro em contato com uma superfície aumenta de zero no centro para a velocidade máxima nas bordas. A velocidade da superfície local juntamente com o coeficiente de atrito entre o pino e o metal base ditam a deformação durante a fricção. É altamente recomendável que seja aplicado um ângulo de 3° em relação ao ombro da ferramenta no fundo do pino, assim se garante que a velocidade de deslocamento de material no centro da ferramenta não seja nula, evitando qualquer tipo de dano à ferramenta e garantindo uma melhor qualidade da solda. Um raio de fundo redondo reduz o diferencial de velocidades verificado no fundo da ferramenta, enquanto um raio maior aumenta o diferencial de velocidade. Em outros estudos foi verificado que o pino de fundo plano tem uma velocidade de superfície de 27,9 vezes a do pino de fundo redondo. Uma maior velocidade do pino garante uma melhor partida do processo, mas a forma do pino muda a qualidade da solda no fundo da ferramenta. Além disso, o pino cilíndrico de fundo plano é mais fácil de manusear e os defeitos relacionados na sessão anterior podem ser eliminados

com os parâmetros de ferramenta corretos e uma carga de forjamento suficiente (MISHRA e MAHONEY, 2007).

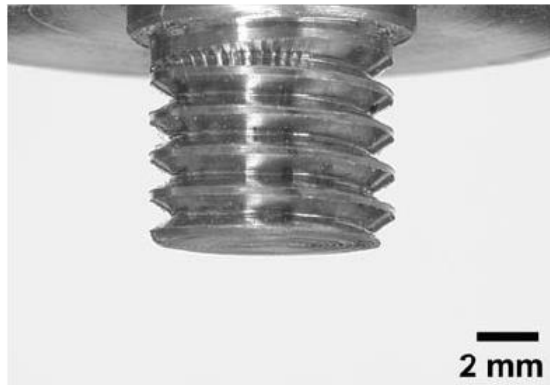


Figura 11 – Pino cilíndrico de fundo plano com rosca esquerda FONTE: MISHRA e MAHONEY, 2007.

c) Pino de cone truncado

Pinos cilíndricos (Figura 12) são suficientes para soldar chapas de alumínio de até 12mm de espessura, algumas pesquisas apontam que soldar chapas mais grossas com velocidades mais altas fazendo uso de pinos cilíndricos não garantem uma boa solda. Uma modificação bastante simples é a utilização de pinos cônicos (truncados), pinos cônicos garantem cargas transversais inferiores e a maior carga de momento de um cone cilíndrico está na base do cone, onde deve ser mais forte. A utilização de rosca para melhorar o fluxo de material removido do fundo para o ombro também é considerável. (MISHRA e MAHONEY, 2007).



Figura 12 – Pino cônico com rosca esquerda. FONTE: MISHRA e MAHONEY, 2007.

3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Neste tópico serão descritos os parâmetros, materiais e o passo a passo utilizados na execução da solda usando o método de *Friction Stir Welding*, bem como como foram realizados os ensaios de tração e de microdureza nas amostras obtidas.

3.1 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1.1 Metal Base

Para o presente trabalho, optou-se por utilizar uma liga de alumínio 1200 H14 de espessura de 3 mm disponível na Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Ponta Grossa.

A composição do material foi verificada através de trabalhos anteriores (FREITAS, 2015) por uma análise de espectrometria de emissão óptica por centelhamento. O resultado para esta análise é apresentado a seguir na figura 13.

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

Figura 13 – Composição da Liga de Alumínio. FONTE: FREITAS, 2015.

3.1.2 Pino da ferramenta

Para a fabricação dos pinos foi usado um aço comercial SAE 4340, sem tratamento térmico, usinado com perfil cilíndrico de fundo reto, cônico de fundo reto e cilíndrico também com fundo reto e em vários níveis. A escolha da ferramenta foi feita pela disponibilidade do material, pela sua fácil usinabilidade e também por garantir as características mecânicas necessárias para a realização do processo de FSW.

3.2.1 REALIZAÇÃO DA SOLDA

Para a execução do processo de soldagem, contou-se com o auxílio dos equipamentos listados abaixo:

- Equipamento: Fresadora Cardoso FC-30 (Figura 14)
- Mesa elaborada de aço 1020 com parafusos M12 de aço SAE 1020;
- Pinça para fresa;
- Porca para fixação *Clamping Nut* ER40 – UM;
- Prolongador para fixação da ferramenta FSW modelo ER 40 20-19;
- Ferramentas em SAE 4340 perfil cilíndrico de fundo reto, cônico de fundo reto e cilíndrico também com fundo reto e em vários níveis;
- Chapas de alumínio 1200 H4 de espessura 3 mm;
- Penetração do pino da ferramenta nas chapas: 2,4 mm.



Figura 14 – Figura ilustrativa da Fresadora Cardoso FC 30. FONTE: FREITAS, 2015.

Primeiramente as chapas a serem soldadas são dispostas e devidamente montadas na mesa de suporte da fresa. A fresa é, então, ligada a uma rotação 2100 rpm e em seguida a ferramenta é baixada de maneira que o pino penetre a peça sem ultrapassá-la, com penetração do pino de 2,4 mm. O limite para essa operação é o contato do ombro da ferramenta com a superfície, gerando determinado atrito que resultará em aquecimento local da

operação. O esquema inicial para execução da solda fica ilustrado na figura 15 abaixo.

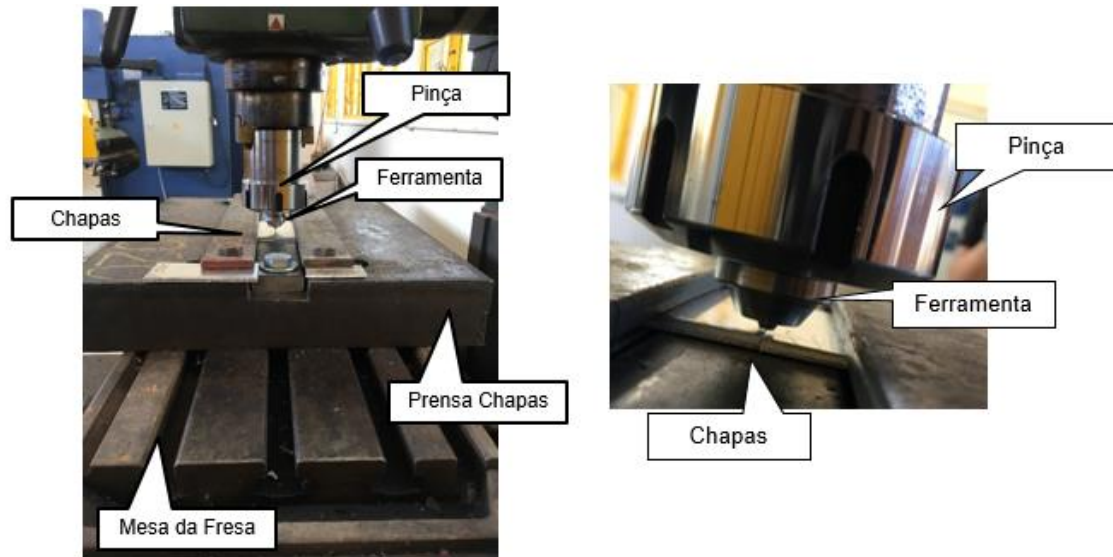


Figura 15 – Foto do *setup* inicial para execução da solda. FONTE: Autoria própria.

A mesa é deslocada para que a ferramenta tenha o seu devido avanço e realize a solda entre a união das chapas. Este deslocamento, por sua vez, é realizado com uma velocidade de soldagem constante de 30 mm/s para que a solda possua características uniformes ao longo de toda a sua extensão, garantindo assim propriedades mecânicas e metalúrgicas mais constantes ao longo da união.

Os parâmetros de máquina foram definidos conforme trabalho realizado anteriormente e seguem os resultados obtidos pelo método de OFAT (*One-factor-at-a-time method*), (FREITAS, 2015). São eles:

- Avanço (Velocidade de Soldagem): 30 mm/min;
- Rotação da Fresa: 2100 RPM;
- Altura do Pino: $2,1 \pm 1$ mm.
- Penetração do Pino nas chapas: 2,4 mm..

Todo o procedimento de soldagem foi realizado com um total de 9 soldas, compreendendo 3 amostras para cada geometria de ferramenta proposta neste trabalho.

Depois do término do procedimento de soldagem, a ferramenta é levantada e as chapas são retiradas da mesa para posteriormente uma análise visual do aspecto da solda, complementada com um ensaio de microdureza e ensaio de resistência à tração.

3.2.2 MÉTODO DE ENSAIO DE TRAÇÃO

Para a execução do ensaio de tração usou-se o seguinte equipamento e dispositivos:

- Equipamento: EMIC EL 10000;
- Célula: Trd 28;
- Extensômetro Trd 6;

Inicialmente o propósito deste ensaio seria utilizar os padrões para confecção dos corpos de prova conforme a norma ASTM E8. Porém, por conta de características geométricas não foi possível confeccionar um corpo de prova no padrão desta norma. Foi utilizado um corpo de prova de secção transversal com comprimento de 13mm e espessura de 3mm.

Como mencionado anteriormente, as chapas metálicas não permitem um ensaio de resistência à tração comum por limites geométricos. Para tal, foi utilizado um corpo de prova padrão que pode ser ilustrado na figura 16.

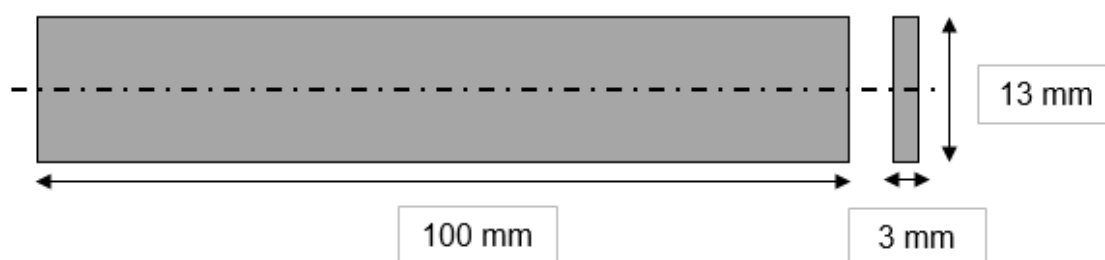


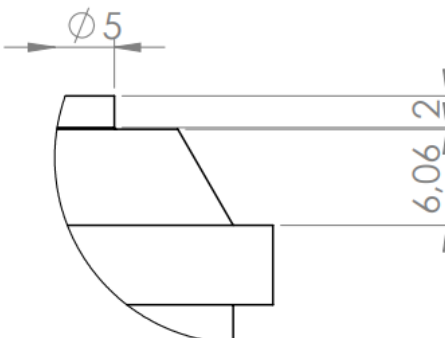
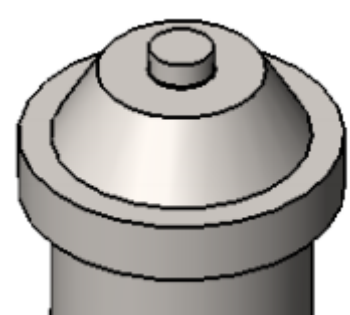
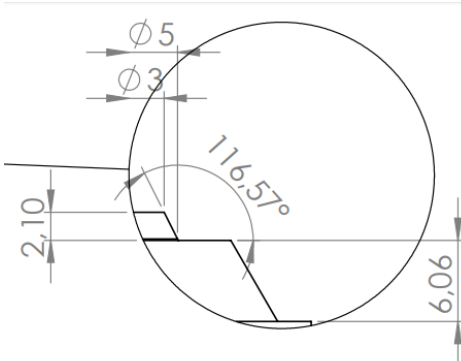
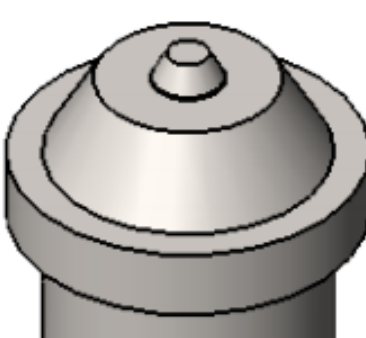
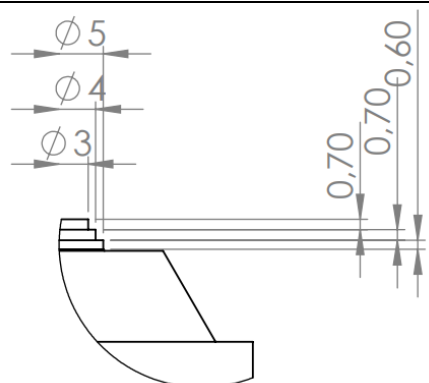
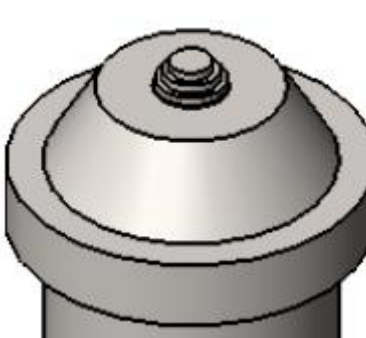
Figura 16 – Desenho esquemático do corpo de prova padrão. FONTE: Autoria Própria.

Para a confecção dos corpos de provas a chapa já soldada foi presa em uma morsa, onde o corte foi realizado com uma serra adaptada a fresa.

A região inicial da solda, onde ocorreu a penetração da ferramenta, foi cortada e descartada devido à descontinuidade gerada pelo início do processo. Após o descarte, a máquina foi zerada e um deslocamento de 13 mm foi considerado para a confecção dos corpos de prova para o ensaio de tração. Este procedimento foi realizado para todas as 9 amostras provenientes da etapa de soldagem.

Como produto final obteve-se um total de 12 corpos de prova, nomeados conforme mostra a tabela 7 abaixo:

Tabela 7: Correlação entre desenho de geometria da ferramenta e respectivas identificações de corpos de prova.

Ferramenta	Dimensões [mm]	Imagem da Ferramenta	Corpos de Prova
1			CP 1, 5 e 6
2			CP 2, 7 e 8
3			CP 3, 4 e 9
Chapa sem Solda	-	-	CP 10, 11 e 12

FONTE: Autoria própria.

Considerou-se pinos com altura de $2,0 \pm 0,1$ mm por conta da espessura da chapa utilizada (3 mm), entende-se que em aproximadamente 2,4 mm é possível penetrar suficientemente nas chapas e garantir que a mistura

mecânica seja realizada com sucesso de forma que o ombro da ferramenta encoste na superfície das chapas e as solde. Deve-se evitar o contato do fundo do pino com a base da fresadora para não danificar a ferramenta. O diâmetro de 5mm das superfícies de fundo plana foram escolhidas para que houvesse contato suficiente entre as chapas e o material seja misturado adequadamente. Além disto, foi determinado uma ferramenta cônica para diminuir as cargas transversais e outra em alguns desníveis para que o material retirado do fundo chegue ao ombro da ferramenta com mais facilidade.

Finalmente, após a confecção do corpo de prova, o ensaio de tração é realizado utilizando uma máquina Emic EL 10000 (Figura 17), célula Trd28, Extensômetro Trd 6, com método de ensaio nomeado TraçãoChapas2-(EXT25 mm) (10ft) conforme norma ASTM E-8M. Os dados deste ensaio foram plotados em curvas e analisados com uso do software Tesc versão 3.04.



Figura 17 - Máquina de ensaio de tração EMIC 10000. FONTE: A autoria própria.

3.2.3 MÉTODO DE REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE MICRODUREZA

Propôs-se a execução do ensaio de microdureza utilizando os equipamentos listados a seguir:

- Equipamento: Durômetro Mitutoyo WizHard
- Micrômetro Mitutoyo Digital
- Morsa

A região a ser cortada foi definida a partir da união das chapas. O objetivo era realizar o ensaio de maneira que abrangesse tanto a porção não afetada pela solda quanto a porção soldada. Para isso, definiu-se que as amostras deveriam possuir as dimensões de 20 mm de largura (Figura 20), devido à uma restrição da máquina de embutimento, sendo 10 mm para cada lado a partir da união das chapas.

O primeiro passo para a preparação das amostras para o ensaio de microdureza foi o corte das chapas soldadas. Foi necessário usar um arco de serra com uma lâmina Bi Metal Starret 140mm para cortar as chapas no tamanho de 20 mm de largura e 10 mm de altura (Figura 18).



Figura 18 – Preparação da amostra para embutimento. FONTE: Autoria própria.

As 3 amostras foram embutidas utilizando o material do fabricante Struers: “*Multifast - phenolic hot mounting resin*”, na cor preta. O embutimento foi realizado em uma máquina do fabricante Struers modelo CitoPress-1.

As amostras foram dispostas dentro do dispositivo para embutimento. A resina (baquelite) foi despejada sobre a amostra com a ajuda de um funil. Para a realização do processo, foram selecionados os seguintes parâmetros:

- Aquecimento: 180°C no tempo de 5 minutos e na pressão de 275 bar.
- Resfriamento: resfriamento médio com o tempo de 4 minutos.

Para o acabamento das amostras, foi utilizado uma politriz do fabricante Struers de modelo LaboPol-25. A rotação foi variada entre 100 e 500 rpm para a fase de acabamento. As folhas de lixas utilizadas foram as de *mesh* 600, 1200 e 1500. Para o polimento, foi usado um tecido em polímero e alumina líquida 1µm.

O ensaio de microdureza foi realizado nas 3 amostras embutidas (uma amostra de cada geometria de ferramenta) conforme norma ASTM E384-17: “*Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials.*”

Para a realização do ensaio de microdureza, foi utilizado um microdurômetro Vickers da marca Wizhard modelo HV-110. Os parâmetros selecionados para o ensaio estão expostos na tabela 8.

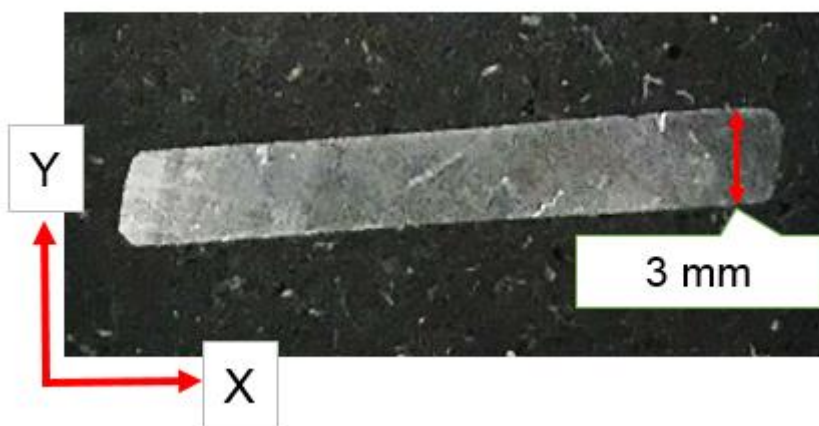
Tabela 8 – Parâmetros para microdureza.

Tempo de Carga [s]	10
Carga [N]	0,5
Velocidade [mm/s]	60
Lente de Aumento	50x

FONTE: Autoria própria.

As amostras foram dispostas em uma morsa anexa ao microdurômetro de maneira que a região da chapa por onde a solda foi realizada (contato com a ferramenta) permanecesse sempre do lado esquerdo.

Com o uso de dois micrômetros anexos ao aparelho, a peça foi zerada em uma posição onde não havia interferência da solda, em uma região distante da junta soldada. Inicialmente o teste proposto seria realizado variando apenas o comprimento referente ao eixo X, porém, para uma melhor representatividade, a coleta foi aferida variando também o eixo Y, de largura. O teste foi realizado variando o eixo X (comprimento) em 0,5 mm, totalizando 10 mm no comprimento e a largura definida pelo eixo Y alternando entre a posição de 0 mm e 0,5 mm, totalizando 20 aferições. A figura 19 esquematiza o referencial utilizado para a aplicação do ensaio.



**Figura 19 – Esquema representativo para a realização do ensaio de microdureza –
FONTE: Autoria Própria.**

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Resultados do ensaio visual do produto soldado

Após a execução das soldas foi avaliado primeiramente o aspecto visual das juntas soldadas em busca de compreender melhor sobre: O preenchimento da ferramenta, fixação do conjunto chapas-fresa e penetração do pino ao longo de toda a secção transversal das chapas. Ainda procurou-se evidências de empenamento das chapas e marcas oriundas de calor excessivo. Também se buscou porosidades ou falhas identificáveis a olho nu.

Após o processo de solda as chapas foram retiradas para inspeção visual, onde através da análise do aspecto da solda, preenchimento e presença ou não de impurezas, notou-se que o produto soldado da ferramenta 2 apresentava um aspecto de melhor penetração (verificado pela observação da raiz da solda) e preenchimento ao longo da junta, apesar de apresentar um acúmulo de metal na sua extremidade (Figura 20). Isso, provavelmente, é causado pelo sistema de alinhamento e fixação das chapas. No instante anterior a execução da solda propriamente dita, qualquer desalinhamento, resulta então, em um leve desnivelamento que pode resultar na remoção não uniforme do material no momento da execução da solda.

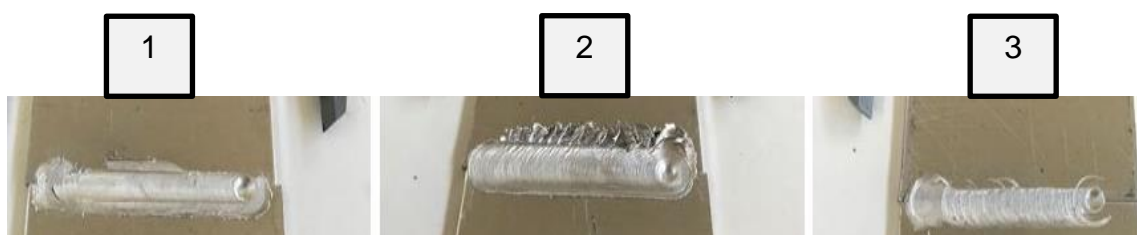


Figura 20 – Análise visual imediatamente após a solda. FONTE: Autoria própria.

Com a confecção das amostras em baquelite para o ensaio de microdureza foi possível realizar uma nova inspeção visual nos produtos soldados, avaliando principalmente o preenchimento e profundidade da solda. Adicionalmente, essa inspeção permite avaliação visual de uma secção transversal oriunda do corte da porção central da chapa soldada.

Nas amostras 1 e 2, soldas realizadas pelas ferramentas 1 e 2 respectivamente, Uma análise rápida da figura 21 (1 e 2) indica presença de vazios na porção média da lâmina metálica no preenchimento da região penetrada pelo pino das ferramentas. A amostra 3, oriunda da solda feita com ferramenta 3 apresenta melhor preenchimento, porém, ampliando-se a imagem é notável a presença de falhas menores que nas anteriores.

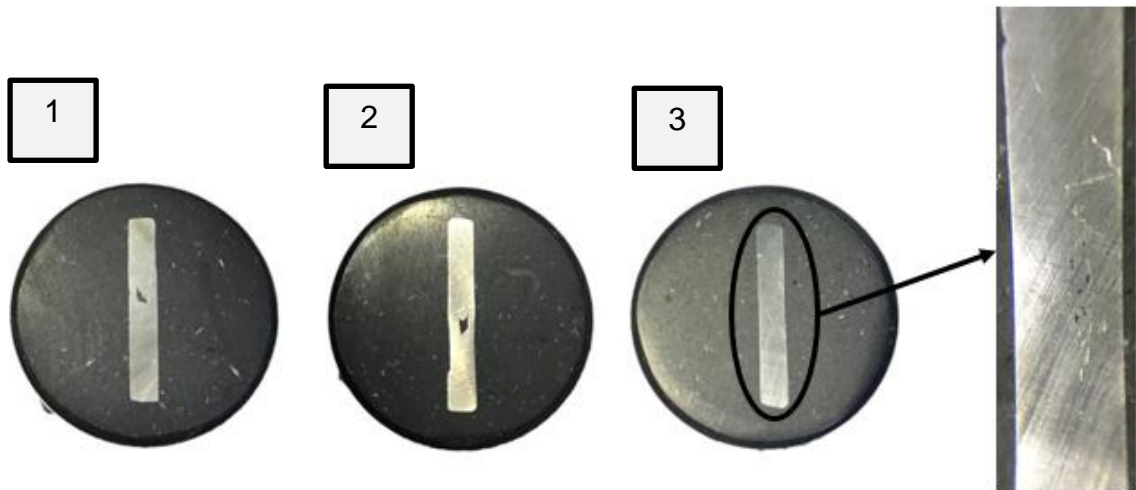


Figura 21 – Análise visual da secção transversal da solda com a ferramenta 1, 2 e 3 respectivamente. FONTE: Autoria própria.

4.2. Resultados do ensaio de tração

Buscando comparar os valores de tensão máxima entre metal base e do cordão da solda propriamente dito, foi realizado um ensaio de tração buscando compreender a níveis quantitativos, como a performance da solda quando comparado as chapas de alumínio base.

Ao analisar a figura 22 nota-se que há uma significativa diferença entre os valores de tensão máxima de tração encontrados nos corpos de prova contemplados com a solda (CP 1 ao CP 9) e os valores de tensão dos corpos de prova apenas com a chapa (CP 10 ao CP 12).

Fragilização por lacunas ou vazios oriundos de uma mistura não eficiente no processo ou até mesmo pouca força vertical aplicada pela

fersadora podem justificar o pouco ou nenhum alongamento da amostra durante o ensaio.

Pode-se perceber uma performance ligeiramente melhor dos corpos de provas soldados oriundos da solda com a ferramenta número 3, mas inferiores se comparados aos corpos de prova sem solda. A tabela 9 demonstra os valores obtidos de três corpos de prova para cada ferramenta e realizado o ensaio de tração em cada uma, para verificar a repetitividade do experimento.

Corpo de Prova	Espessura (mm)	Largura (mm)	Secção Transv. (mm ²)	Tensão Esc. Conv. 0,20% (MPa)	Tensão Máxima (MPa)	Along. Ruptura (%)	Módulo de Elasticidade (MPa)
CP 1	3.170	13.02	41.27	37.45	43.2	*	7127
CP 2	3.110	12.92	40.18	41.20	41.3	*	2717
CP 3	3.060	13.03	39.87	54.13	54.9	*	2363
CP 4	3.180	12.70	40.39	39.92	49.3	*	6031
CP 5	3.100	13.00	40.30	57.61	58.3	*	1612
CP 6	3.100	13.00	40.30	33.59	58.6	*	9204
CP 7	3.100	13.00	40.30	*	60.8	*	1407
CP 8	3.100	13.00	40.30	*	38.7	*	383
CP 9	3.100	13.00	40.30	*	47.1	*	885
CP 10	3.100	13.00	40.30	71.20	127.2	*	7016
CP 11	3.100	13.00	40.30	72.30	125.5	*	5968
CP 12	3.100	13.00	40.30	64.87	126.6	14.01	5089
Número CPs	12	12	12	9	12	1	12
Média	3.110	12.97	40.34	52.48	69.29	14.01	4150
Desv.Padrão	0.03275	0.08976	0.3206	14.97	35.17	*	2930
Coef.Var.(%)	1.053	0.6919	0.7946	28.53	50.76	*	70.59
Mínimo	3.060	12.70	39.87	33.59	38.74	14.01	383.1
Máximo	3.180	13.03	41.27	72.30	127.2	14.01	9204

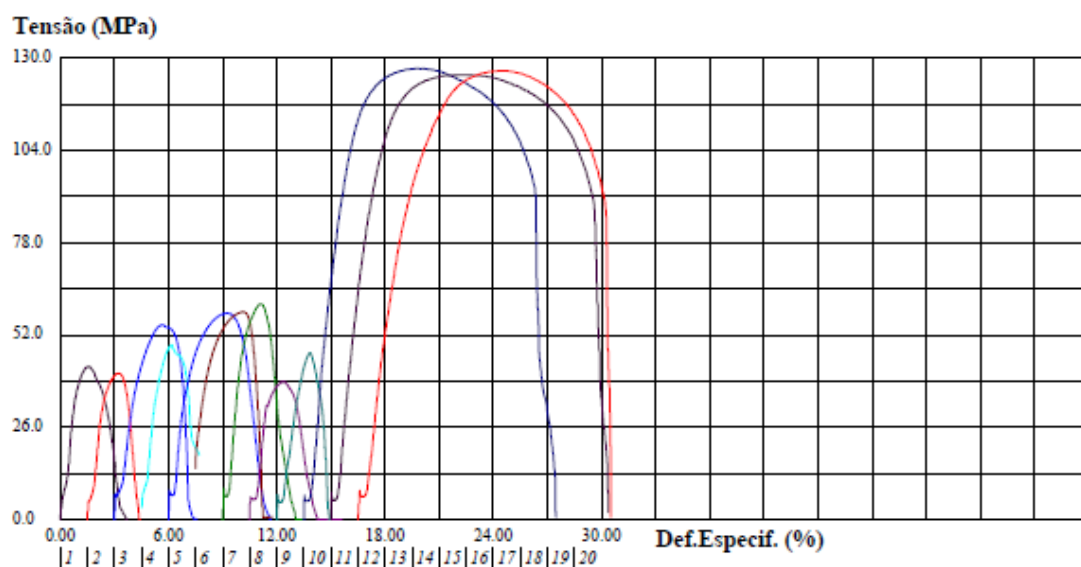


Figura 22 – Gráfico resultante do ensaio de tração. FONTE: Autoria própria.

Tabela 9 – Resultado ensaio de tração com tensões máximas e ferramenta utilizada.

Amostras	σ MÁX (Mpa)	Ferramenta
CP 1	43,2	1
CP 2	41,3	2
CP 3	54,9	3
CP 4	49,3	3
CP 5	58,3	1
CP 6	58,6	1
CP 7	60,8	2
CP 8	38,7	2
CP 9	47,1	3
CP 10	127,2	Chapa
CP 11	125,5	Chapa
CP 12	126,6	Chapa

FONTE: Autoria própria.

Em busca de compreender melhor a performance de cada ferramenta no quesito tensão máxima a tabela 10 representa uma média das tensões máximas bem como o desvio padrão e porcentagem do desvio padrão obtidas por ferramenta, incluindo a chapa sem solda.

Tabela 10 – Média das tensões máximas obtidas com uso das 3 ferramentas e chapa.

Ferramenta	Espessura	Largura	TENS. MÁXIMA (MPa)	TENS. MÁX MÉDIA	DESV. PADRÃO (MPa)	DESV. PADRÃO (%)
1	3,17	13,02	43,2	53,4	8,81	15,10%
	3,10	13,00	58,3			
	3,10	13,00	58,6			
2	3,11	12,92	41,3	46,9	12,08	29,25%
	3,10	13,00	60,8			
	3,10	13,00	38,7			
3	3,06	13,03	54,9	50,4	4,02	8,16%
	3,18	12,70	49,3			
	3,10	13,00	47,1			
Chapa	3,10	13,00	127,2	126,4	0,86	0,68%
	3,10	13,00	125,5			
	3,10	13,00	126,6			

FONTE: Autoria própria.

4.3. Resultados do ensaio de microdureza:

Para que os resultados possam se mostrar mais conclusivos foi realizado um perfil de dureza ilustrado pela figura 23. Os valores do ensaio de

microdureza para os corpos de prova obtidos do processo de soldagem com as 3 ferramentas escolhidas como alvo deste estudo, está ilustrado abaixo pela tabela 11. Dividiu-se a solda a partir da junta em 0,5 mm de para cada lado, onde o ponto 0 representa o valor de 0,5 mm em X e o ponto 9,5 representa o valor de -0,5 mm em X, ou seja, a distância de 5 mm é o centro da solda.

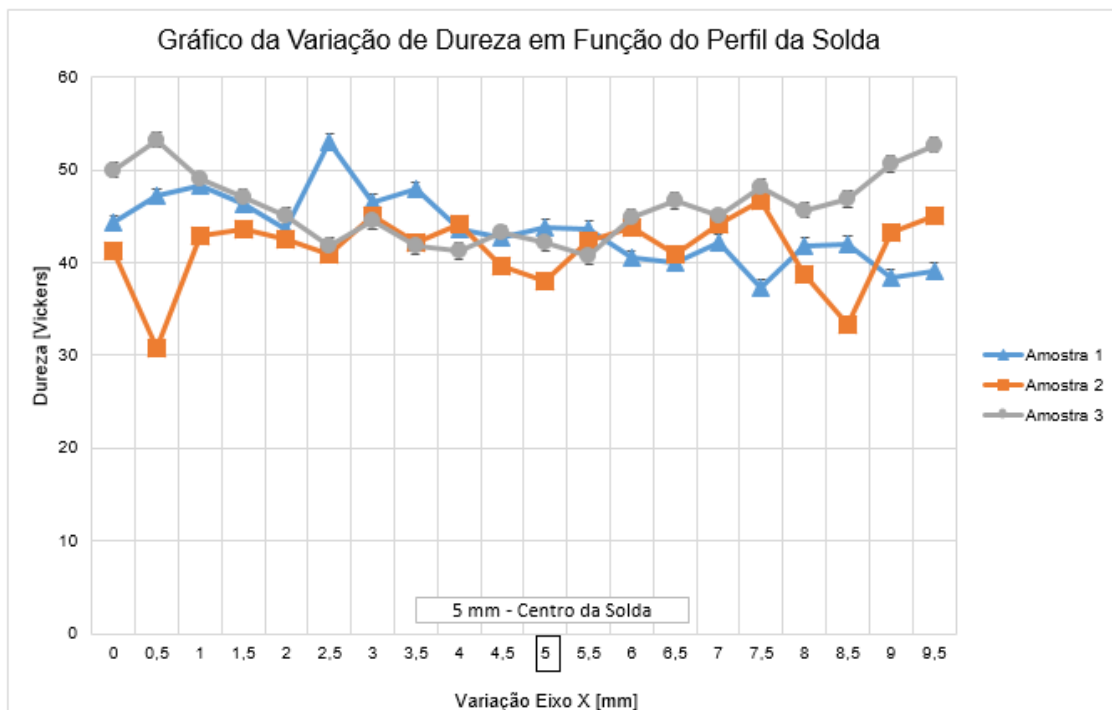


Figura 23 – Gráfico da dureza em 3 amostras distintas. FONTE: Autoria própria.

Afirma-se que não houve alteração significativa da dureza ao longo da solda entre as faixas de 2mm a 8mm toda dureza obtida no ensaio flutua em torno da dureza da chapa (45 HV). Também se notou que a dureza se manteve estável e similar para as 3 geometrias analisadas, tanto nas regiões adjacentes quanto no núcleo da chapa, isso indica que o processo de FSW não gerou significativas alterações microestruturais que fossem refletidas no ensaio de microdureza.

Ao analisar em conjunto os dados obtidos através dos ensaios de tração e em conjunto com a análise de inspeção visual dos produtos soldados, notou-se uma instabilidade no processo de FSW. Com um olhar mais crítico à análise de microdureza, nota-se que os valores do ensaio convergem no centro da

solda, ou seja, possuem menor divergência, o que representa uma maior estabilidade na solda na união das juntas.

Volta-se a atenção finalmente para o surgimento de vazios, já demonstradas na figura 21, principalmente nas amostras 1 e 2. Já na amostra 3, é possível somente enxergar os vazios através do auxílio de uma lupa. A presença destes vazios pode ser explicada devido aos parâmetros de rotação e avanço utilizados neste estudo, além da força vertical aplicada do pino nas chapas. Segundo MISHRA e MAHONEY, uma penetração de raiz incompleta pode fazer com que a solda não seja realizada na espessura total da chapa. Junto a isso, os parâmetros utilizados na fresa também influenciaram no preenchimento incompleto da junta soldada.

Segundo SANTOS, TORRES E RAMIREZ, a rotação e a velocidade de avanço influenciam na temperatura em que a solda é realizada. Assim, constatou-se que os parâmetros utilizados para a realização deste trabalho não foram ideais pois não promoveram uma mistura mecânica eficiente nas juntas soldadas.

De acordo com CAPELARI e MAZZAFERRO, os parâmetros de temperatura e força entre as chapas e a ferramenta, também são fatores que alteram o resultado do processo de Friction Stir Welding. Por este motivo, é possível determinar que a geometria 3, onde o pino possui maior área, (conforme mostrado na tabela 7 já citada) de contato com as chapas foi a que promoveu um maior atrito entre as partes, conseqüentemente uma maior temperatura e também uma melhor aparência e melhor resultado da solda.

5. CONCLUSÕES

Através das soldas realizadas e dos ensaios feitos no presente trabalho, conclui-se que:

- Deve-se evitar o uso de guilhotina para cortar as chapas, pois, no caso das adaptações utilizadas neste estudo, este processo de corte tem grande influência no alinhamento das chapas para iniciar o processo. As chapas acabam por ficarem curvadas nas bordas e o alinhamento e fixação na base da fresadora ficam comprometidos.
- Com as análises feitas neste trabalho, a ferramenta que apresentou um melhor resultado para o processo de soldagem utilizado neste foi a de número 3, mesmo com o ensaio de tração e o de microdureza apresentando pouca distinção entre as geometrias utilizadas. Ainda assim a ferramenta de número 3 apresentou um desvio padrão menor para os valores de tensão máxima quando analisadas suas amostras. Isto significa que a união apresentou maior estabilidade, quando comparado aos outros corpos de prova com soldas feitas com as demais ferramentas. Com base nesta afirmação pode-se concluir que, apesar de as amostras oriundas da ferramenta número 3 não terem apresentado os maiores valores quanto a tensão máxima, seu menor valor de desvio padrão torna a ferramenta com resultados mais confiáveis.
- Podemos afirmar que na média (Tabela 10) e através da análise de aspecto visual, a ferramenta 3 é a melhor escolha na aplicação deste processo.
- Quanto a dureza Vickers obtida pelo ensaio de microdureza, pode-se afirmar que este ensaio não provocou mudanças na microestrutura do metal base. Foi possível observar que na região

central da solda houve valor de menor variância em todas as amostras, o que mostra que o processo possui estabilidade.

Conclui-se que as ferramentas podem garantir uma estabilidade significativa da solda, porém, deve-se voltar a atenção aos parâmetros utilizados a fim de obter uma mistura eficiente evitando vazios e lacunas, isso possivelmente melhora a resistência mecânica dessa junta e garante a ela uma usabilidade mais ampla.

6. SUJESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Recomenda-se para os estudos futuros:

- Uma adaptação melhor para a fresadora utilizada para que possa ser maior a força vertical exercida pelo ombro do pino sobre as chapas. Esta força pode ser medida através de células de carga aplicadas na mesa.
- Medir a temperatura na junta soldada, pois este fator também está diretamente ligado com a mistura mecânica promovida pelo pino da ferramenta.
- Utilização de rosca no pino da ferramenta para aumentar o fluxo de material oriundo do fundo da chapa para o ombro, avaliando os resultados desta alteração.
- Avaliação da geometria do ombro da ferramenta, estudando a sua correlação com a temperatura no processo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAL: **Associação Brasileira do Alumínio**. Disponível em: <<http://www.abal.org.br/>> Acesso em: 28 nov. 2016.

AWS, **Welding Handbook, Materials and Applications – Part 1**, American Welding Society, 8a Edição, Vol. 3, 1996.

AWS, **Welding Handbook, Materials and Applications – Part 2**, American Welding Society, 8a Edição, Vol. 3, 1998.

AWS, **Welding Handbook, Materials and Applications – Part 2**, American Welding Society, 8a Edição, Vol. 4, 1998.

CALLISTER, W. D., **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. John Wiley & Sons, Inc., 2002.

CAPELARI T. V. e MAZZAFERRO J. A. E. **Avaliação Da Geometria De Ferramenta E Parâmetros Do Processo FSW Na Soldagem Da Liga De Alumínio AA5052**, 2009.

COUTINHO T de A. **Metalografia de não-ferrosos**. 2 ed. São Paulo: Edgard Blucher; 1980. 128p.

CST (COMPANHIA SIDERURGICA DE TUBARÃO); **Mecânica de Tratamentos Térmicos**. 1997..

FREITAS, P. V. H. **Adaptação do Processo de Soldagem Friction Stir Welding Para uma Fresadora Convencional**. 2015.

KASPARY, T.B. **Preenchimento do furo remanescente em soldas por fricção com mistura mecânica de reparo em alumínio 6056-T4**. Dissertação de Mestrado PPGEMUFRGS, 2005

KOU, S. **Welding Metallurgy**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2003

MISHRA, R. S.; MAHONEY, M. W. **Friction Stir Welding and Processing**, ASM

MOREIRA, M. **Alumínio e suas ligas**. São Paulo; 2008

ROSADO Jr. Abel. **Estrutura Integral por Soldagem por Atrito “Friction Stir Welding - FSW”**. Tese de Doutorado - Requisito Básico para o Projeto Estrutural, Ita – São José dos Campos. SP, Set 2003.

SANTOS, F.D. de A.; TORRES, E. A. e RAMIREZ A. J. **Soldagem Por Atrito Com Pino Não Consumível De Aços Inoxidáveis Duplex**, 2015

VERRAN, G.O.; KURZAWA, U. e PESCADOR, W.A. **Reciclagem de latas de alumínio visando melhor rendimento e qualidade metalúrgica no alumínio obtido**. Revista Matéria, 2005

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. **Soldagem - Processos e metalurgia**. São Paulo: Edgard Blucher. 1992.

ASTM E8 / E8M-11, **Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011, Disponível em: <<http://www.astm.org/>> Acesso em: 27 nov. 2017.

ASTM E384-17, **Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, Disponível em: <<http://www.astm.org/>> Acesso em: 27 nov. 2017.

8. ANEXOS

ANEXO 1 - Resultados obtidos no ensaio de microdureza.

Nº do Ensaio	Varição Eixo X	Varição Eixo Y	Amostra 1 (HV)	Amostra 2 (HV)	Amostra 3 (HV)
1	0	0	44,3	41,3	50
2	0,5	0,5	47,2	30,9	53,3
3	1	0	48,4	42,9	49
4	1,5	0,5	46,3	43,6	47,1
5	2	0	43,7	42,6	45,1
6	2,5	0,5	53,1	41	41,9
7	3	0	46,6	45	44,5
8	3,5	0,5	47,9	42,2	41,8
9	4	0	43,7	44,2	41,3
10	4,5	0,5	42,7	39,7	43,2
11	5	0	43,9	38	42,2
12	5,5	0,5	43,7	42,3	40,7
13	6	0	40,5	43,9	44,9
14	6,5	0,5	40	41	46,7
15	7	0	42,2	44,2	45
16	7,5	0,5	37,4	46,8	48,2
17	8	0	41,8	38,8	45,7
18	8,5	0,5	42	33,4	46,9
19	9	0	38,4	43,2	50,7
20	9,5	0,5	39,2	45	52,7

Fonte: Autoria própria.