



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ANANINDEUA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

KARYMME MAYARA BARBOSA DE OLIVEIRA

EFEITO DO TECIMENTO EM SOLDAGEM POR FRICÇÃO LINEAR (FSW)
APLICADO EM ALUMÍNIO NAVAL 5052 F

Ananindeua

2018

KARYMME MAYARA BARBOSA DE OLIVEIRA

**EFEITO DO TECIMENTO EM SOLDAGEM POR FRICÇÃO LINEAR (FSW)
APLICADO EM ALUMÍNIO NAVAL 5052 F**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do grau de Engenheira de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Deibson Silva da Costa

Coorientador: Me. Cristhian Ricardo Loayza Loayza

Ananindeua

2018

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

- O48e Oliveira, Karymme Mayara Barbosa.
EFEITO DO TECIMENTO EM SOLDAGEM POR FRICÇÃO LINEAR (FSW) APLICADO EM ALUMÍNIO NAVAL 5052 F / Karymme Mayara Barbosa de Oliveira. — 2018.
51 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof. Dr. Deibson Silva da Costa
Coorientador(a): Prof. Me. Cristhian Ricardo Loayza Loayza
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Campus Universitário de Ananindeua, Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.
1. Soldagem por Fricção Linear. 2. Ecológica. 3. Propriedades Mecânicas. 4. Alumínio 5052 F.
I. Título.

CDD 620.11

KARYMME MAYARA BARBOSA DE OLIVEIRA

**EFEITO DO TECIMENTO EM SOLDAGEM POR FRICÇÃO LINEAR (FSW)
APLICADO EM ALUMÍNIO NAVAL 5052 F**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia de Materiais, da
Universidade Federal do Pará, como requisito para
a obtenção do grau de Engenheira de Materiais.

Data da Aprovação: 30/11/2018

Conceito: Excelente

BANCA EXAMINADORA

Deibson Silva da Costa

Prof. Dr. Deibson Silva da Costa
FEMat/CAMPANIN/UFPA - Orientador

Alacid do Socorro Siqueira Neves

Prof. Me. Alacid do Socorro Siqueira Neves
FEMat/CAMPANIN/UFPA - Examinador Interno

Ednelson da Silva Costa

Prof. Dr. Ednelson da Silva Costa
FEI/CABAE/UFPA - Examinador Externo

Dedico este trabalho e tudo em minha vida a minha mãe, Vera Lúcia, que sempre acreditou em mim e no meu futuro me apoiando sempre em todos os momentos da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter me concedido a vida e ter me dado a oportunidade e forças para que alcance meus sonhos, hoje sendo parte dele realizado.

Agradeço a minha família por todo apoio que tem me dado. Principalmente minha avó Iolanda Barbosa e minha mãe Vera Lúcia por acompanharem minha jornada dia a dia sem me deixar desanimar.

Ao meu noivo, Carlos Eduardo pelo apoio e força incondicional que tem me dado durante esses anos de graduação, sempre estando comigo em momentos felizes e difíceis, acreditando e torcendo por mim a cada passo, dando uns empurrões e puxões de orelha quando necessário.

Ao Prof. Dr. Ednelson Costa por me apresentar ao Laboratório de Caracterização de Materiais Metálicos (LCAM) e incentivar o desenvolvimento da pesquisa.

Ao Prof. Dr. Eduardo Braga por ter me recebido e apoiado o trabalho.

A todos os colaboradores do LCAM que contribuíram com o meu trabalho, principalmente ao doutorando Tércio Cabral e ao graduando Francisco Ferreira pela disponibilidade e auxílio na confecção dos copos de prova e na realização dos ensaios.

Agradeço especialmente ao doutorando Cristhian Loayza e ao mestrando Jonathas Carmona por compartilharem seus conhecimentos e me direcionarem, a ajuda de vocês foi suma importância para o desenvolvimento do trabalho.

E por último, e não menos importante, agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Deibson Costa por aceitar me auxiliar e não ter desistido com os imprevistos que surgiram, acreditando em mim e no meu trabalho.

“Julgue seu sucesso pelas coisas que você teve que renunciar para conseguir”.

(Dalai Lama)

RESUMO

A Soldagem por Fricção Linear (SFL), ou Friction Stir Welding (FSW), surgiu com o objetivo de melhorar os materiais que comumente são soldados por fusão e que facilmente podem gerar vários defeitos, como falta de fusão por exemplo, que comprometem o seu desempenho mecânico. Além de ser considerada como uma soldagem ecológica, a SFL pode ser aplicável a maioria dos metais, causando uma menor modificação das propriedades originais, pela mistura do material abaixo da temperatura de fusão. O tecimento foi incluso neste tipo de soldagem em chapas de alumínio naval 5052 F para verificar possíveis contribuições nas propriedades das juntas, dando-se pela trajetória triangular, com as amplitudes de 0,5, 1,0 e 2,0 mm, e frequências de 0,116, 0,109 e 0,031 Hz, sendo comparadas ao processo sem tecimento, mantendo igual o restante dos parâmetros, como velocidade de rotação, ângulo de inclinação, entre outros. A partir da macroscopia, microdureza, dobramento, tração e fractografia, no microscópio eletrônico de varredura, realizados nas amostras de cada condição de soldagem, este método apresentou ganho nas propriedades mecânicas com as amplitudes 0,5 mm e 2,0 mm pela melhor densidade dessa mistura indicando uma boa parametrização, principalmente devido pressão aplicada pela ferramenta, o que não ocorreu com o tecimento de amplitude 1,0 mm, obtendo desempenho inferior a solda de sem tecimento.

Palavras – Chave: Soldagem por Fricção Linear. Ecológica. Propriedades Mecânicas. Alumínio 5052 F.

ABSTRACT

Linear Friction Welding (SFL), or Friction Stir Welding (FSW), has emerged with the aim of improving the materials that are commonly welded by fusion and which can easily generate several defects, such as lack of fusion for example, that compromise your mechanical performance. In addition to being considered as an environmentally friendly welding, SFL may be applicable to most metals, causing less modification of the original properties by mixing the material below the melting temperature. The fabrication was included in this type of welding in 5052 F naval plates to verify possible contributions in the properties of the joints, giving by the triangular trajectory, with the amplitudes of 0,5, 1,0 and 2,0 mm, and frequencies of 0,116, 0,109 and 0,031 Hz, being compared to the process without weighting, keeping the rest of the parameters equal, such as rotation speed, inclination angle, among others. From the macroscopy, microhardness, folding, traction and fractography, in the scanning electron microscope, performed in the samples of each welding condition, this method presented gain in the mechanical properties with the amplitudes 0,5 mm and 2,0 mm by the best density of this mixture indicating a good parameterization, mainly due to the pressure applied by the tool, which did not occur with the amplitude of 1,0 mm, obtaining a performance lower than the weld.

Keywords: Welding by Linear Friction. Ecological. Mechanical Properties. Aluminum 5052 F.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Máquina própria da SFL.	16
Figura 2: Máquina fresadora adaptada.	17
Figura 3: Desenho esquemático da SFL.	17
Figura 4: Zonas de trabalho entre ferramenta e material.	18
Figura 5: Geometria do ombro	20
Figura 6: Geometria do pino.	20
Figura 7: Tipos de juntas:	22
Figura 8: Seção transversal de uma junta soldada por fricção linear.	22
Figura 9: Defeito por rebarba.	23
Figura 10: Defeito por cavidade.	24
Figura 11: Defeito de raiz.	24
Figura 12: Trajetórias de tecimento.	27
Figura 13: Trajetórias de tecimento na SFL.	27
Figura 14: Trajeto da ferramenta.	28
Figura 15: Fresadora adaptada.	29
Figura 16: Dispositivo fixador.	30
Figura 17: Desenho esquemático da confecção dos corpos de prova.	31
Figura 18: Esquema de indentação das amostras:	32
Figura 19: Dobramento guiado de face.	33
Figura 20: Corpos de prova pós lixamento manual	33
Figura 21: Retirada da amostra para a fractografia.	34
Figura 22: Juntas após a soldagem.	35
Figura 23: Identificação de rebarbas.	36
Figura 24: Macroestrutura das amostras.	37
Figura 25: Perfil de microdureza.	38
Figura 26: CPs pós ensaio de dobramento.	40
Figura 27: CPs pós ruptura.	41
Figura 28: Gráfico Tensão x Deformação.	42
Figura 29: Análise no MEV.	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades das ligas de alumínio.	26
Tabela 2: Percentual dos elementos encontrados na liga.	28
Tabela 3: Parâmetros utilizados.....	30
Tabela 4: Comparação de dados da microdureza.	39
Tabela 5: Dados médios do ensaio de tração.....	41

LISTA DE QUADRO

Quadro 1: Relações dimensionais entre ferramenta e espessura da chapa.	21
Quadro 2: Vantagens e desvantagens da SFL.	25

LISTA DE ABREVIATURAS

CNC	Computer Numerical Control
CP	Corpo de prova
EFSW	Soldagem por Fricção Assistida por Corrente Elétrica
FSW	Friction Stir Welding
GMAW	Gas Metal Arc Welding
LCAM	Laboratório de Caracterização de Materiais Metálicos
MB	Metal de base
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
SEM	Scanning Electron Microscopy
SFL	Soldagem por Fricção Linear
TWI	The Welgins Institute
ZTA	Zona Termicamente Afetada
ZTMA	Zona Termo Mecanicamente Afetada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos	14
1.1.1	Objetivo geral	14
1.1.2	Objetivos específicos	14
1.2	Justificativa	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Soldagem por fricção linear	15
2.1.1	Equipamento	15
2.1.2	Princípios de funcionamento	17
2.1.3	Variáveis do processo de Soldagem por Fricção Linear	18
2.1.4	Fluxo plástico e junção termodinâmica do material	22
2.1.5	Zonas desenvolvidas pela Soldagem por Fricção Linear	22
2.1.6	Alguns defeitos na soldagem	23
2.1.7	Vantagens e desvantagens do processo	24
2.2	Ligas de alumínio	25
2.2.1	Considerações sobre o alumínio 5052 F	26
2.3	Tecimento no processo de soldagem	26
3	MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1	Equipamento e parâmetros utilizados para a realização da soldagem	29
3.2	Confecção dos corpos de prova	30
3.3	Macrogafia	31
3.4	Ensaio de microdureza Vickers	31
3.5	Ensaio de dobramento	32
3.6	Ensaio de tração	33
3.7	Preparação das amostras para a fractografia	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
4.1	Macroestrutura	36
4.2	Ensaio de Microdureza Vickers	38
4.3	Ensaio de dobramento	39
4.4	Ensaio de tração	40
4.5	Fractografia	42
5	CONCLUSÕES	45
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	46
	REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

Todos os processos de soldagem convencionais envolvem grandes modificações na microestrutura na região de trabalho do material original, sendo que a maior parte da alteração não é desejada. Através dessas mudanças, surgem consequências associadas à perda na qualidade nas propriedades do material, principalmente devido ao ciclo térmico do processo. Em busca de métodos que causem menores deteriorações ou uma melhor eficiência da junta soldada, foram desenvolvidas várias pesquisas, entre elas o desenvolvimento do processo de soldagem por fricção (HILLER, 2007).

A Soldagem por Fricção Linear (SFL), no inglês Friction Stir Welding (FSW), é um processo que vem se tornando cada vez mais atrativo por apresentar maiores benefícios quando comparado ao processo de soldagem por fusão tradicional. Com isso, pode suprir as necessidades do mercado atual ao diminuir o peso dos componentes com uma menor modificação da resistência mecânica de um produto (LOPES, 2017).

Por ser realizado no estado sólido, a SFL anula os problemas com a solidificação. Porém, com a ação termomecânica do processo ao longo da junta de solda, conseqüentemente ocorre a uma modificação interna que muda de acordo com o tipo de liga, tratamento térmico e processo de conformação nas peças, além de contar com as variáveis do processo (SACCON et al., 2010).

Este é um procedimento muito vantajoso em termos de qualidade da solda e controle dos parâmetros para a soldagem. Outra vantagem é quanto a exigência do número de operadores, geralmente necessita de apenas de um qualificado. Mesmo com um merecido destaque da técnica, poucos centros de estudo brasileiros têm-se proposto a investigar essa metodologia, e o principal fator é o custo do equipamento específico o trabalho, tornando-se um fator determinante para sua difusão (ALMEIDA, 2015; PAIVA, 2009).

Em termos de materiais, a SFL é aplicável a praticamente todos os metais. Porém, seu estudo tem se direcionado para ligas não ferrosas, principalmente as ligas de alumínio. Devido a sua alta condutividade térmica e a proteção da camada de óxido, o que faz dessa liga ter um processo de soldagem por fusão difícil, para a SFL esse problema é muito menor, além de ser mais econômico e menos complexo (HANDBOOK, 2009).

Visando ampliar os benefícios obtidos por este processo, o estudo deste trabalho se dá pelo uso do tecimento, com variações da amplitude e frequência, em SFL aplicado em chapas de alumínio naval, 5052 F, verificando seu efeito quando comparado a soldagem sem tecimento.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Determinar o efeito da variação da amplitude e frequência do tecimento na soldagem por fricção linear em chapas de alumínio naval 5052 F.

1.1.2 Objetivos específicos

- Soldar as chapas de alumínio naval variando amplitude e frequência do tecimento;
- Caracterizar as juntas soldadas por metalografia convencional;
- Realizar ensaios mecânicos de microdureza Vickers, dobramento e tração;
- Comparar as superfícies de fratura dos diferentes espécimes por microscópio eletrônico de varredura.

1.2 Justificativa

A soldagem por fricção linear é promissora principalmente por fatores como o econômico a longo prazo, tornando-se de interesse para indústrias. Apesar de obter um investimento inicial grande, também contribui com menor custo em reparos, não liberação de gases, não necessita de metal de adição e as propriedades originais da junta são menos modificadas, além da possibilidade da adaptação da maioria das máquinas fresadoras.

Com a capacidade do equipamento e os parâmetros adequados, pode abranger a maioria dos metais. Mas para este estudo, a liga de alumínio é a mais indicada, tanto pelas suas propriedades mecânicas quanto pelo seu custo e vasta aplicabilidade.

Atualmente os estudos sobre o assunto mostram-se satisfatórios, apresentando um bom desempenho do processo, e pouquíssimos têm sido produzido sobre os tipos de movimentação da ferramenta ao longo da junta. O uso tecimento, originalmente utilizado em processo de soldagem por fusão, foi incluído na SFL para verificar possíveis mudanças nas propriedades mecânicas da junta, quando comparado ao processo sem tecimento, podendo tornar-se uma variável promissora dentro deste processo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Soldagem por fricção linear

O processo de Soldagem por Fricção Linear (SFL), também conhecido como Friction Stir Welding (FSW), foi patenteado por Wayne Tomas no TWI (The Welding Institute) em dezembro de 1991 no Reino Unido (MISHIRA et al., 2005). É um processo de junção de material que ocorre abaixo do ponto de fusão, combinando extrusão e forjamento, sendo considerado ecológico pela eficiência energética e não emissão de fumos e gases. Tornou-se uma das inovações tecnológicas mais importantes na área da metalurgia da soldagem desde então, tem como desafio o aperfeiçoamento do equipamento para a realização das soldas. Esse procedimento vem sendo utilizado atualmente em aplicações de alta tecnologia como a aeroespacial, automotiva e naval (ANDRADE, 2009), até aplicações de alta precisão, como a microsoldagem, necessitando assim de um maior investimento inicial para a aquisição e instalação do sistema, além da capacitação do operador (OLIVIECKI ; BESKOW, 2013; VASAVA et al., 2017).

As peças são unidas pelo calor gerado da conversão da energia mecânica em térmica na área da junta pelo mergulho de ferramenta portadora de pino e ombro, que possui um longo período de utilização sendo fabricada por um material termo mecanicamente mais resistente que o metal de base, não adiciona material e não utiliza outra fonte de calor ou energia (HILLER, 2007). Contribuindo assim, com um menor custo de produção com relação aos outros procedimentos, por não exigir tantos elementos e possuir reparos com menores custos (FEISTAUER, 2014).

2.1.1 Equipamento

As máquinas e equipamentos podem dividir-se em máquinas exclusivas e fresadoras adaptadas. A distinção entre elas está quanto a sua movimentação, na primeira quem se movimenta são os eixos (x, y e z), no local da ferramenta SFL. Na segunda, a mesa é quem se movimenta, enquanto a ferramenta, geralmente, só possui locomoção no eixo z (SOUZA, 2010).

A máquina de SFL possui muitas similaridades com uma máquina fresadora convencional e CNC (Computer Numerical Control), onde o equipamento deve suportar altas cargas verticais aplicadas pela ferramenta nas peças e a possibilidade de movimentação do

cabeçote, além de alterações nas faixas de rotação e velocidade de deslocamento do processo. Por possuir elevados esforços mecânicos no procedimento, causados principalmente por esforços perpendiculares devido a penetração e direção de avanço, as máquinas apresentam características robustas (HILLER, 2007). Na Figura 1 está ilustrado uma máquina própria da SFL, da marca Legio e modelo UT.

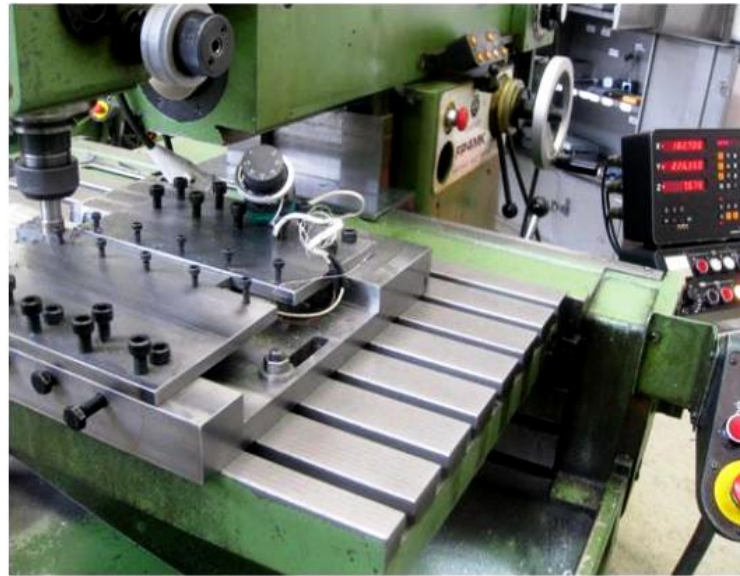
Figura 1: Máquina própria da SFL.



Fonte: ESAB (2018).

Devido a inúmeras vantagens quando comparado com a soldagem por fusão convencional, foi julgado necessário desenvolver um método eficaz e eficiente com um menor custo ao processo, dando-se a partir da adaptação da máquina fresadora, sendo mais comumente encontradas pelas universidades, facilitando estudos. A adequação, em maioria das fresadoras, podem ser bem sucedida e sem a exigência de equipamentos altamente especializados, levando-se em consideração um melhor custo, eficiência energética e montagem mais simples. Essa adaptação deve-se a inserção de um sistema de apoio e fixação para manter e conter um movimento mínimo durante o processo de soldagem e a ferramenta (AKINLABI; LEVY, 2013), como pode ser visto na fresadora Aciera F5 presente na Figura 2.

Figura 2: Máquina fresadora adaptada.

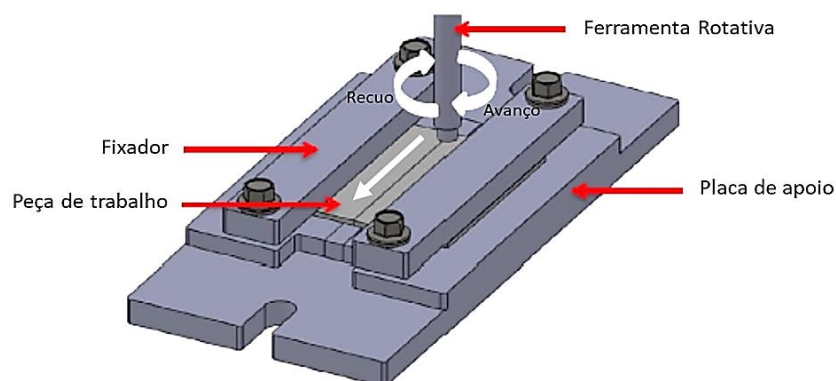


Fonte: MOSTAFAPOUR (2012).

2.1.2 Princípios de funcionamento

Na SFL, uma ferramenta cilíndrica não consumível portando um ombro e um pino é rotacionada e mergulhada, percorrendo linearmente na área de articulação entre duas peças de trabalho, sendo seguramente fixados, para evitar que se separem. O calor friccional faz com que as peças amoleçam sem atingir o ponto de fusão, permitindo que a ferramenta atravesse a junta a ser soldada (HANDBOOK, 2009). Na Figura 3, tem-se uma ilustração sobre o princípio de funcionamento do processo.

Figura 3: Desenho esquemático da SFL.

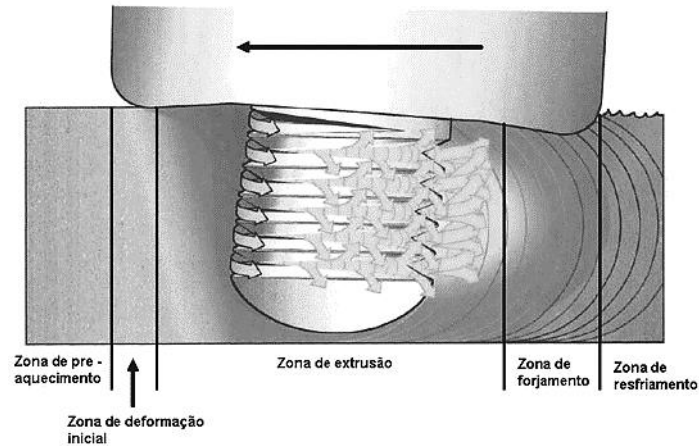


Fonte: Modificado de MOSHWAN et al (2015).

Através do aquecimento por atrito, o material é plasticamente deformado ao redor do pino, sendo extrudado e forjado na parte de trás, posteriormente resfriando e formando o passe

de solda, como mostra a Figura 4. Grande parte do calor gerado é transferido para a peça de trabalho, devendo ser quente o suficiente para permitir o fluxo plástico e reduzir os esforços da ferramenta, sem ocorrer a fusão das partes, como afirmam Moroz et al (2012).

Figura 4: Zonas de trabalho entre ferramenta e material.



Fonte: ARBEGAST (2003).

2.1.3 Variáveis do processo de Soldagem por Fricção Linear

De acordo com Khaled (2005) as propriedades da obtidas pelo processo são determinadas a partir da adequação das variáveis do processo ao tipo de liga, condição térmica, espessura do material e tipo de junta. Existem inúmeras variáveis, nos itens desta seção estão citadas algumas das mais importantes.

a) Velocidade de avanço e rotação

Possui relação direta com a produtividade do processo, e seu vínculo com a ferramenta define a geração de calor durante a soldagem, podendo ser observado na macrografia da seção transversal da junta. De modo geral, a velocidade de deslocamento e rotação mais lentos são mais utilizados em ligas mais duras ou seções mais espessas, no caso de uma grande velocidade de rotação ou baixa velocidade de deslocamento, a temperatura de soldagem tende a aumentar, devido ao maior atrito. De certo modo, As propriedades da junta podem ser desfavorecidas com a velocidade de deslocamento extremamente altas ou baixas (FEISTAUER, 2014).

b) Ângulo de inclinação da ferramenta

Para Andrade (2009) o ângulo de mergulho da ferramenta interfere em sua penetração na junta. Essa penetração deve aumentar gradualmente para que efeito do forjamento causado pelo ombro durante a passagem da ferramenta aumente gradativamente, evitando assim que o material em fluxo plástico escape, garantindo uma movimentação do material plasticamente modificado para parte de trás do pino.

c) Penetração da ferramenta

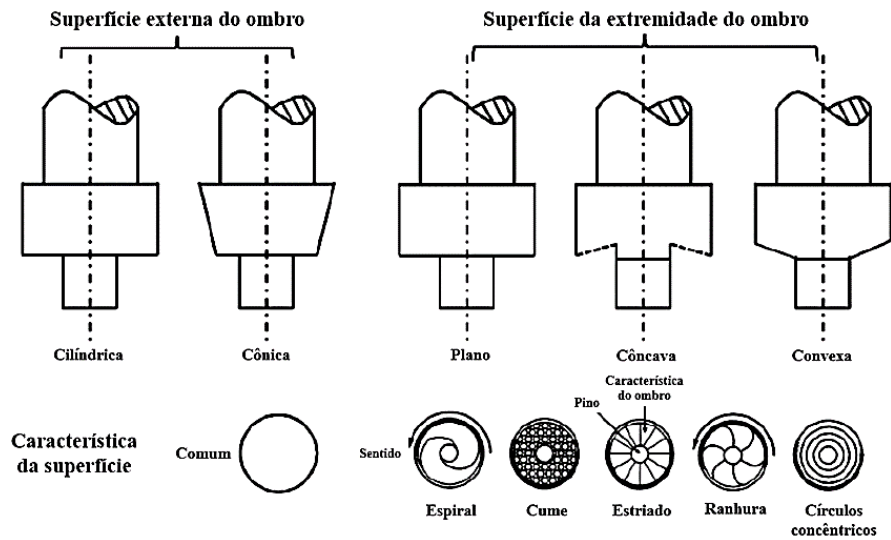
É dependente da geometria do pino e do ângulo de inclinação adotado. Quanto a velocidade, caso seja elevada, pode ultrapassar capacidade da máquina, e correr o risco de danificá-la (OLIVIECKI; BESKOW, 2013).

Dependendo da profundidade de inserção, caso seja rasa, o ombro da ferramenta não tem contato com a superfície do objeto a ser soldado, resultando um movimento do material agitado da parte dianteira para a parte traseira do pino ineficiente. Assim, haverá geração de soldas com sulco interno no canal da junta ou da superfície. De maneira contrária, com uma penetração grande, o ombro da ferramenta mergulha no objeto a ser soldado e causa rebarba excessiva, produzindo assim uma solda significativamente côncava (ALMEIDA, 2015). A ferramenta deve mergulhar até onde o ombro toca a peça e controla o fluxo do material ao agita-lo e move-lo, e a uniformidade da microestrutura e propriedades são consequências do seu trajeto e dos demais parâmetros.

d) Geometria da ferramenta

A Ferramenta é um dos responsáveis pela mistura do material, além de ser um fator que influencia na velocidade de andamento do processo. A escolha da geometria depende do material de fluxo, caso não seja a mais adequada, se tornará uma fonte geradora de defeitos, podendo comprometer sua integridade e a qualidade da junta (MISHRA, 2005). Na Figura 5 o desenho esquemático mostra as geometrias do ombro mais comumente utilizados.

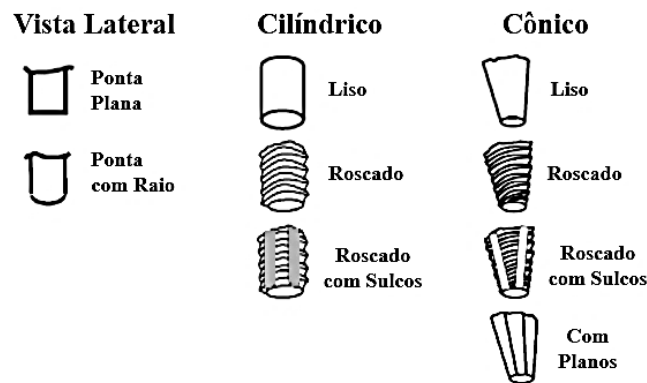
Figura 5: Geometria do ombro.



Fonte: Modificado de ZHANG et al (2012).

Segundo Zhang et al (2012), o pino tem como função forçar movimentação do material amolecido pela ferramenta. Quando em contato com uma liga de alumínio, pode fragmentar e dispensar possíveis óxidos ou impurezas que estejam presentes na linha da junta (THOMAS et al., 2005). Quanto a geometria, pode apresentar formas diferenciadas, como mostra a Figura 6, onde estão as formas mais utilizadas.

Figura 6: Geometria do pino.



Fonte: Modificado de KHALED (2005).

Na Quadro 1 estão descritas as principais relações dimensionais entre a ferramenta e a espessura da chapa, de acordo com Souza (2010).

Quadro 1: Relações dimensionais entre ferramenta e espessura da chapa.

Região da ferramenta	Relação com a espessura da chapa
Diâmetro do suporte	Três vezes a espessura
Diâmetro do pino	Igual a espessura
Comprimento do pino	Menor que a espessura

Fonte: SOUZA (2010).

e) Material da ferramenta

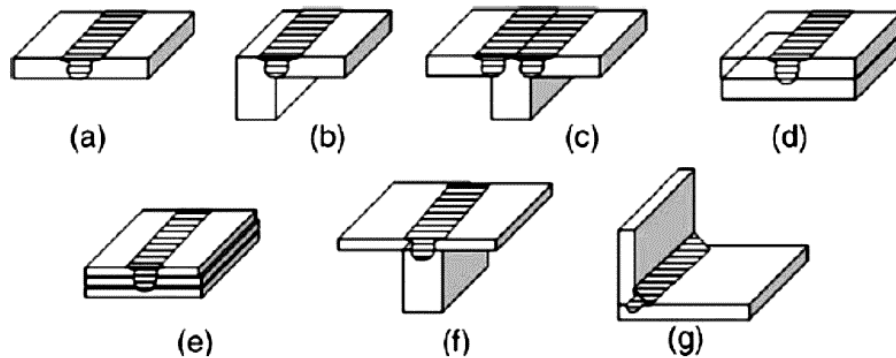
Deve ser mais resistente que o material de base, devido a sua submissão ao desgaste por atrito, apresentar longa durabilidade, resistência ao desgaste abrasivo e, principalmente apresentar dureza adequada para não ser consumido ao longo do processo. Sua maior parcela de desgaste e deformação ocorre durante a penetração na junta, devido a tensão causada pelo material a frio (SOUZA, 2010).

2.1.3.1 Tipos de juntas

Para a SFL duas chapas de espessuras iguais encostam-se e são fixadas com firmeza, evitando assim, que se movam-no momento de mergulho da ferramenta. Através dessa fixação, algumas configurações de juntas podem ser formadas, como mostra a Figura 7, sendo mais utilizada forma de topo devido a facilidade em posicionar e mante-la plana (MISHRA, 2005). Na Figura 5 tem-se os tipos mais utilizados.

Figura 7: Tipos de juntas:

(a) Topo, (b) Canto ou borda, (c) Duplo cordão de canto ou borda, (d) Sobreposta, (e) Sobreposição múltipla, (f) Junta T, (g) Em filete transversal.



Fonte: MISHRA (2005).

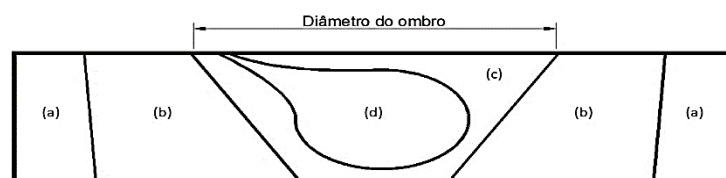
2.1.4 Fluxo plástico e junção termodinâmica do material

Influenciado pela geometria e rotação da ferramenta, o calor gerado por meio da fricção provoca a deformação devido as tensões causadas pela ferramenta que excedem as tensões críticas do material, causando a reorientação dos grãos no sentido do fluxo do material escoado, promovendo assim, uma condição de aderência por meio de deformação plástica. No resfriamento, uma fase sólida é criada a partir da recristalização dos grãos originados da mistura das peças de trabalho (FEISTAUER, 2014; PAPAZAFEIROPOULOS; TSAINIS, 2015).

2.1.5 Zonas desenvolvidas pela Soldagem por Fricção Linear

Fatores como a tensão transversal causada pela ferramenta, a velocidade de escoamento visco-plástico, níveis de temperatura e o tipo de liga modificam diretamente as zonas internas da junta. A consequência dessas interferências podem ser visualizadas em uma macrografia, em que seu estado mais adequado possui uma aparência próxima ao desenho esquemático da Figura 8, através de um recorte transversal da junta para demonstrar as áreas envolvidas no processo (FRATINI; BUFFA, 2005).

Figura 8: Seção transversal de uma junta soldada por fricção linear.



Fonte: Modificado de GRUJICIC et al (2010).

- (a) Metal de base (MB): Região não afetada no processo.
- (b) Zona Termicamente Afetada (ZTA): Nesta região o material é modificado em função do calor gerado (PAIVA, 2009).
- (c) Zona Termo-Mecanicamente Afetada (ZTMA): Região altamente deformada pelo calor fornecido mais intensamente e pela deformação inicial dos grãos, iniciando um fluxo plástico que se torna mais intenso no Nugget (CAPELARI; MAZZAFERRO, 2009).
- (d) Nugget: Região central da solda, localizada no centro da Zona Termo Mecanicamente Afetada, porém se difere por ser recristalizado e deformado plasticamente de forma mais dinâmica no processo (PAIVA, 2009).

2.1.6 Alguns defeitos na soldagem

Por ser realizado no estado sólido, geralmente ocorrem distorções, e a formação de descontinuidades pode ser previsível devido a relação com os parâmetros. Entre os defeitos, os mais comuns são a formação de rebarbas, cavidade e de raiz (POTOMATI, 2006).

A rebarba é um fenômeno que ocorre na superfície da solda, como mostra a Figura 9, geralmente no lado de recuo, possivelmente por ser o lado de maior fluxo de escoamento do material, que pode ser considerada como um defeito, porém possui o mínimo de efeito na propriedade mecânica da junta. Pode se tornar um problema quando é excessiva, causando um afinamento local da solda, e também levar à formação de cavidade pelo excesso de material retirado da junta. Geralmente ocorre devido ao excesso de calor ou penetração, mesmo com uma força de soldagem aceitável. Sua remoção é feita facilmente, como por uma fresagem (HILLER, 2007; PODRZAJ et al., 2015).

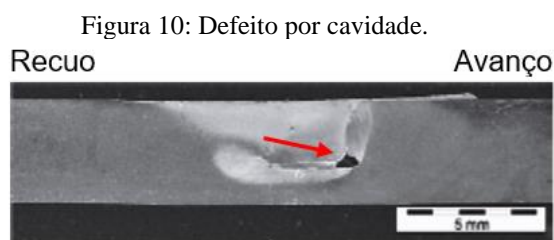
Figura 9: Defeito por rebarba.



Fonte: PODRZAJ et al (2015).

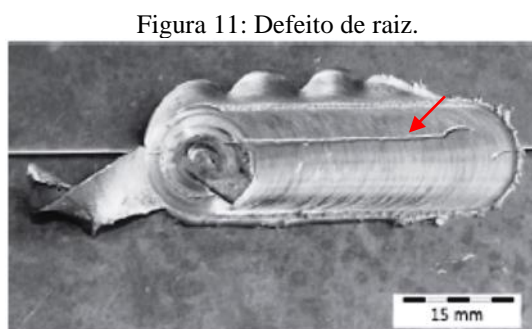
Geralmente a cavidade é formada no lado de avanço provavelmente pelo escoamento do material para o lado de recuo de acordo com o sentido de rotação e geometria da ferramenta, podendo ser fatores decisivos facilitar ou evitar este tipo de defeito, como aponta a Figura 10,

entre o núcleo da solda e zona termo mecanicamente afetada. Pode aparecer tanto na superfície como no interior, e sua ocorrência depende da pressão, quando inadequada, ou alta velocidade de deslocamento e baixa rotação da ferramenta. Para alguns autores essa ocorrência eventualmente estar associada a combinação de alta rotação e velocidade de avanço, tornando o fluxo do material plastificado anormal e descontínuo no interior da solda durante o processo (HILLER, 2007).



Fonte: PODRZAJ et al (2015).

Normalmente, os defeitos do tipo raiz, presente na Figura 11, são causados por penetração inadequada da ferramenta, causando um desalinhamento das arestas da junta. Outra formação deste tipo é devido a presença de uma espessa camada de óxidos na linha da junta que não é dispensada durante o processo. Devido a esses fatores esse é considerado o mais prejudicial nas propriedades mecânicas, podendo ser evitado com a adequação do pino, alinhamento da ferramenta na junta e a retirada da camada de óxido na superfície das peças (HILLER, 2007).



Fonte: PODRZAJ et al (2015).

2.1.7 Vantagens e desvantagens do processo

Na Quadro 2 apresenta-se algumas das vantagens e as desvantagens do processo de SFL. Nota-se que as vantagens são maiores, o que segundo Almeida (2015), justifica a procura desse procedimento pela diminuição de peso e conseqüentemente o consumo de combustível de veículos automotores, que apresentam cada vez mais ligas de alumínio na fabricação.

Quadro 2: Vantagens e desvantagens da SFL.

Vantagens	Desvantagem
<ul style="list-style-type: none"> • Ocorre em estado sólido; • Não utiliza metal de consumo; • Não utiliza gás de proteção; • Todas as ligas de alumínio permitem; • Causa menor alteração nas propriedades mecânicas; • Menor formação de porosidades e trincas • Sem metal de adição; • Capaz de soldar materiais difíceis em processos convencionais; • Utilização de equipamento próprio ou fresadora adaptada; • Permite réplicas mais próximas que o processo de soldagem por fusão. 	<ul style="list-style-type: none"> • Furo na peça ao fim do processo, necessitando de um processo de usinagem posteriormente; • Só permite soldagem manual em materiais muito finos; • Não é um processo prático quanto a locomoção do maquinário; • Custo do equipamento específico; • A ferramenta deve adequar-se ao material desejado.

Fonte: Modificado de ALMEIDA (2015).

2.2 Ligas de alumínio

Devido as suas características, o alumínio pode ter várias aplicações, tornando-se um dos metais mais utilizados no mundo. Os produtos que utilizam este metal ganham diversos atributos, como a leveza, condutibilidade elétrica e térmica, alta relação resistência/peso, durabilidade, resistência à corrosão e a reciclabilidade (ALCAN, 2015).

Por apresentar baixo peso específico, aliado à alta resistência mecânica de algumas ligas, o alumínio torna-se a primeira escolha em termos de material para atender às exigências em aplicações como a FSW (ALMEIDA, 2015). Na Tabela 1 tem-se alguns valores referentes às suas propriedades.

Tabela 1: Propriedades das ligas de alumínio.

Condutividade elétrica em temperatura ambiente [$(\Omega.m)^{-1}$]	$3,8 \times 10^7$
Temperatura de fusão ($^{\circ}C$)	660
Módulo de Elasticidade (GPa)	69
Densidade (g/cm^3)	2,68

Fonte: CALLISTER (2012).

No que se refere à soldabilidade, as ligas deste elemento facilmente formam uma camada apassivadora na superfície da peça de trabalho, o que exige limpeza antes do processo caso contrário torna a soldagem por fusão extremamente difícil, e se for uma camada grossa pode prejudicar o desempenho da junta pela FSW. Sua elevada condutibilidade térmica o torna sensível às variações dos parâmetros de soldagem, principalmente ao calor, dissipando-o facilmente (QUINTINO, 2012).

2.2.1 Considerações sobre o alumínio 5052 F

O alumínio puro apresenta baixa resistência mecânica para aplicações estruturais, tornando assim, a constituição da maioria de seus produtos formados a partir de ligas para atingir as propriedades desejadas. Os elementos mais utilizados para a constituição dessas ligas são o cobre (Cu), magnésio (Mg), manganês (Mn), silício (Si) e zinco (Zn). Caso haja a necessidade de obtenção de propriedades especiais, outros elementos podem ser inseridos em quantidades menores, e se elementos indesejáveis estiverem presentes, prejudicando o desempenho, são julgados impuros (ALCAN, 2015).

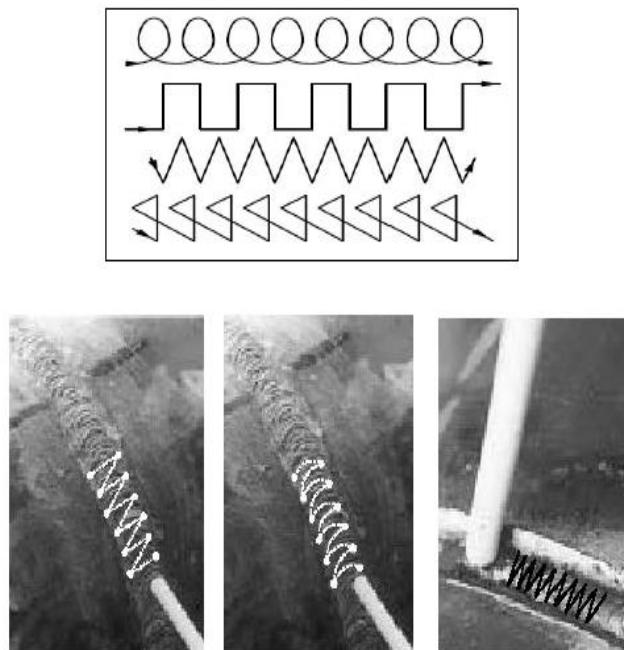
Baseando-se na norma ASTM B209M - 14, na classificação primária, o alumínio 5052 F possui como seu principal elemento de liga o magnésio, que de acordo com Camargo (2013), é utilizado para a redução do peso em estruturas. Quanto a classificação secundária, a letra indica F como resultante de qualquer tipo de processamento que não obteve controle da velocidade de resfriamento ou quantidade de encruamento.

2.3 Tecimento no processo de soldagem

Segundo Coraini (2011), para soldagem por arco elétrico com gás de proteção (GMAW), o tecimento é o deslocamento lateral do arame da tocha durante a operação sob o eixo do cordão de solda que pode seguir vários tipos de trajetória, como mostra a Figura 12,

sendo mais comumente utilizado neste tipo de processo, segundo Mondenesi (2004) para fazer flutuar a escória e garantir a fusão das paredes laterais da junta. Essa técnica varia com o tipo de solda, operação na junta e habilidade do soldador, e é de suma importância um movimento constante.

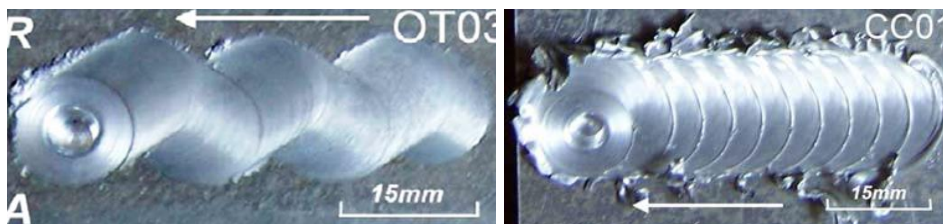
Figura 12: Trajetórias de tecimento.



Fonte: PLASMIC (2018).

Já para o tecimento em SFL, Hiller (2007) cita que a trajetória do movimento é dado pela ferramenta ao longo da linha de junta durante o processo, e seu trabalho mostrou que também pode ser diversificado, e seus efeitos ainda estão sob investigação. Na Figura 13 tem-se a imagem de como se apresenta a junta soldada por FSW com esse método, em dois tipos diferentes.

Figura 13: Trajetórias de tecimento na SFL.



Fonte: HILLER (2007).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A soldagem das chapas, assim como toda da preparação de amostras para as análises, foram realizadas no Laboratório de Caracterização de Materiais Metálicos (LCAM), na Universidade Federal do Pará.

O material utilizado para o processo é o alumínio 5052 F identificado pela norma ASTM B209M – 14 por sua composição química obtida através de um espectrômetro ótico da marca Oxford do modelo Foundry, conforme a Tabela 2. As chapas possuem as dimensões 113,5 x 50,0 x 2,5 mm cada, passaram por um controle de espessura e limpeza utilizando a fresadora Sempuco do modelo 220x440/I e álcool isopropílico, respectivamente.

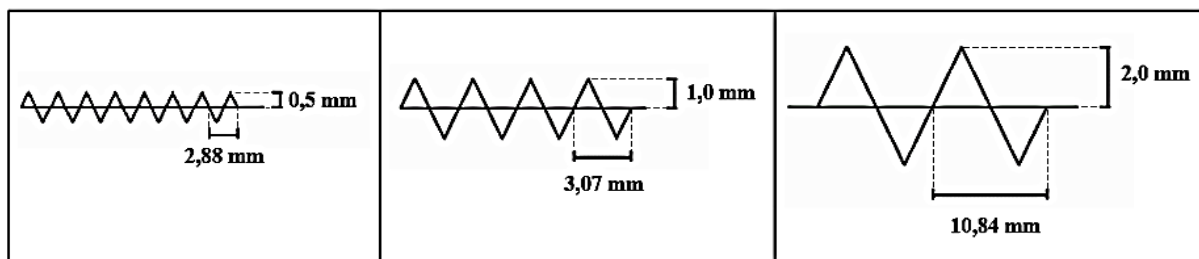
Tabela 2: Percentual dos elementos encontrados na liga.

Al	Mg	Cr	Fe	Outros
96,9	2,26	0,25	0,25	0,34

Fonte: Aatoria Própria (2018).

Por tratar-se de um estudo novo, é pouco encontrado na literatura a presença de tecimento em FSW, levando essa etapa do trabalho a uma série de testes preliminares empíricos, variando as amplitudes com 0,5 mm, 1,0 mm e 2,0 mm, como mostra a Figura 14 com seus respectivos comprimentos de onda. As frequências foram calculadas a partir da amplitude sobre a velocidade de rotação utilizada no processo, obtendo 0,116, 0,109 e 0,031Hz, respectivamente.

Figura 14: Trajeto da ferramenta.

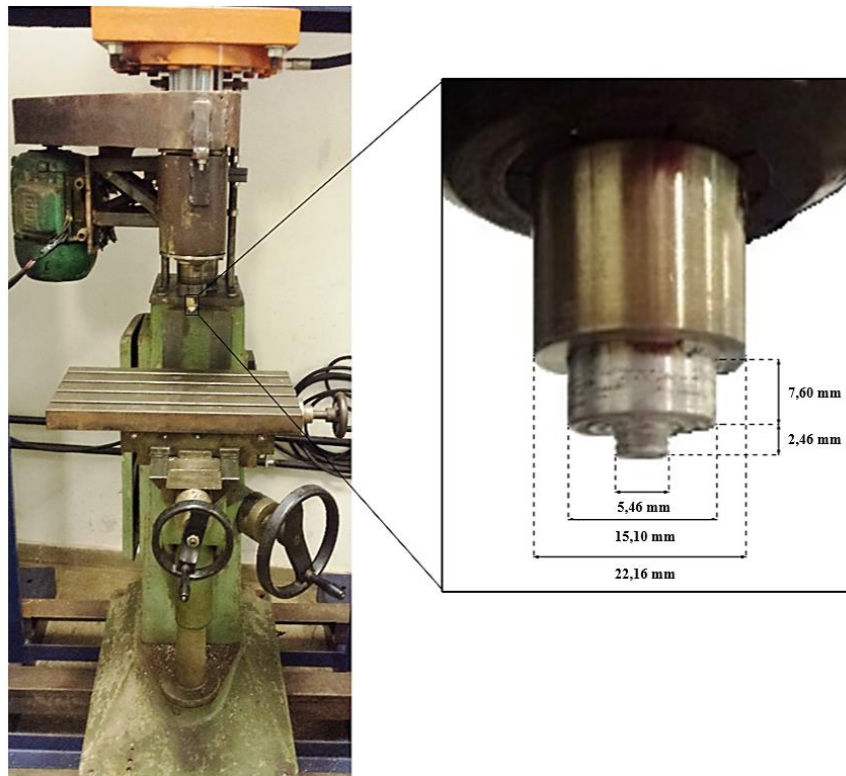


Fonte: Aatoria Própria (2018).

3.1 Equipamento e parâmetros utilizados para a realização da soldagem

Para o início da soldagem, a fresadora foi adaptada a partir da inserção de uma ferramenta cilíndrica composta por um ombro com círculos concêntricos e um pino cilíndrico roscado de ponta plana, conforme apresentado na Figura 15. Neste processo, levou-se em consideração as limitações do equipamento, como a falta ou excesso de pressão exercida, assim como a alteração do ângulo de inclinação aplicado.

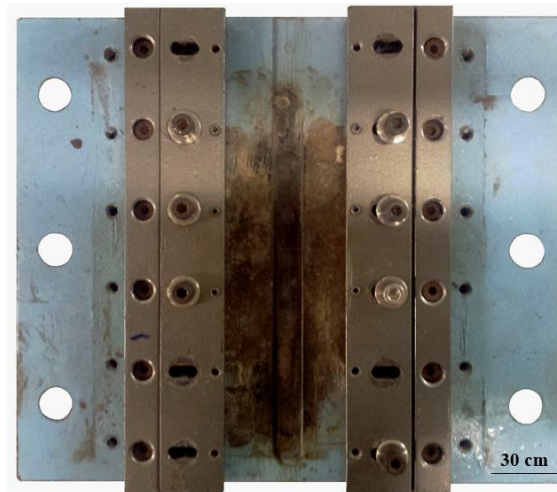
Figura 15: Fresadora adaptada.



Fonte: Autoria Própria (2018).

Também foi adicionado um dispositivo para fixar as juntas na mesa da fresadora, em forma de junta de topo, demonstrada na Figura 15, pois segundo Gipiela (2007), devem ser fixadas rigidamente para uma menor formação de defeitos. E os parâmetros utilizados descritos na Tabela 3, assim como a configuração da ferramenta estão de acordo com os melhores resultados obtidos por Carmona et al (2017).

Figura 16: Dispositivo fixador.



Fonte: Autoria Própria (2018).

Tabela 3: Parâmetros utilizados.

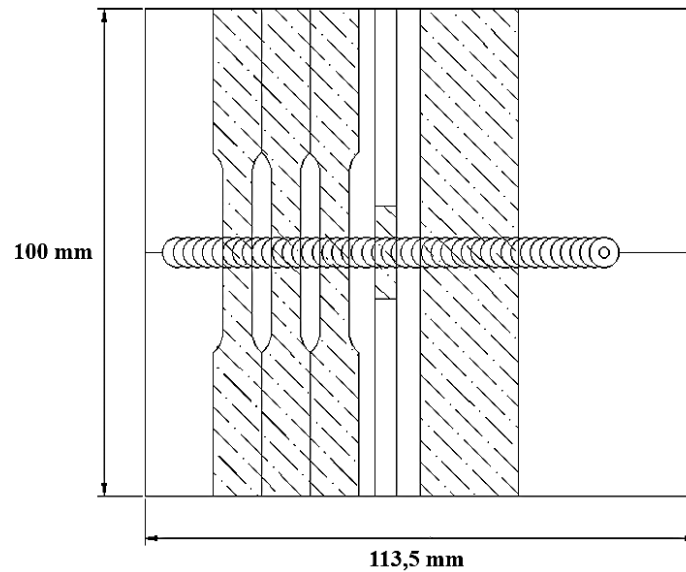
Velocidade de Avanço (mm/min)	Velocidade de Rotação (RPM)	Profundidade da Penetração (mm)	Sentido de rotação	Ângulo de inclinação (θ)
20,0	1600	2,46	Horário	0°

Fonte: Autoria Própria (2018).

3.2 Confeção dos corpos de prova

Após a união, as chapas passaram pela remoção da rebarba pela esmerilhadeira com disco flap reto de 100, para posteriormente serem levadas à confecção dos corpos de prova para os ensaios. Todos foram usinados transversalmente, onde para o ensaio de tração realizou-se pela a máquina de eletroerosão a fio FW 1U do fabricante +GF+ AgieCharmiles, Para o restante, as amostras necessárias foram retiradas pelo manuseio do arco de serra, destinando-se à macrografia retirando uma parcela central da junta contendo metal de base nas duas extremidades, e ao ensaio de dobramento. Na Figura 17 observa-se o desenho esquemático das amostras retiradas na área hachurada, onde nas quatro juntas selecionadas retirou-se três unidades para o ensaio de tração, e uma para macrografia e dobramento, respectivamente.

Figura 17: Desenho esquemático da confecção dos corpos de prova.



Fonte: Aatoria Própria (2018).

3.3 Macrogafia

O ensaio macrográfico busca examinar por inspeção direta ou pouca ampliação (até 50x) a superfície de uma amostra após lixamento, polimento e ataque químico com o reagente adequado (ROHDE, 2010).

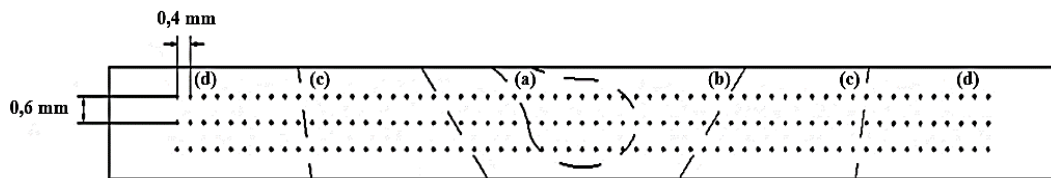
Para revelar a macroestrutura, as amostras passaram pela preparação metalográfica tradicional, através do embutimento com baquelite, lixamento com as lixas de carboneto de silício de 600 a 2000 mesh em uma politriz rotativa, seguindo para o polimento com alumina em suspensão de 0,5 μm . E por último, o ataque químico com o reagente Tucker (1 ml de HF, 45 ml de HCl, 15 ml de HNO₃ e 25 ml de água destilada) por imersão durante 5 segundos sendo posteriormente limpo com água corrente e álcool, e seco com jato de ar quente.

3.4 Ensaio de microdureza Vickers

Realizou-se este ensaio após a análise macroestrutural, para facilitar a identificação de cada região. Através da microdureza Vickers todos os materiais metálicos com quais quer durezas podem ser ensaiados (SANTOS, 2012). Por meio do microdurômetro Mitutoyo de modelo HM-1124 aplicou-se uma carga de 0,5 kgf por 5 segundos, causando impressões, ou indentações, por deformação plástica, sendo suficientemente nítida para permitir as leituras das diagonais pela lente do equipamento.

Tendo como base a norma ASTM E 92, os corpos de prova foram submetidos a 183 indentações cada. Na Figura 17 tem-se um esquema para a distribuição dos pontos, iniciando do centro da solda para o metal de base, almejando um mapeamento completo de cada peça.

Figura 18: Esquema de indentação das amostras:
(a) Nugget, (b) ZTMA, (c) ZTA, (d) MB.



Fonte: Aatoria Própria (2018).

3.5 Ensaio de dobramento

Este ensaio tem por objetivo analisar o quanto o corpo de prova pode ser dobrado sem sofrer ruptura, fissuras ou fendas na região tracionada. Através deste obtém-se informações sobre a ductilidade da solda. A carga e a velocidade aplicada no ensaio não é tão relevante, tornando o ângulo final do corpo de prova o fator crucial, porém se sua velocidade for extremamente alta pode ser enquadrado em ensaio dinâmico (DALCIN, 2007; SACCON, 2010).

Por meio do equipamento Servopulser do fabricante Shimadzu, com as adequações para o ensaio de dobramento, através da inserção de cilindros de apoio e cutelo, o ensaio se deu de forma guiada, através da aplicação de uma carga perpendicular na região central do corpo de prova em posição de face até atingir o ângulo de 180°, adequando-se a norma ASTM E 190, como apresenta a Figura 19.

Figura 19: Dobramento guiado de face.

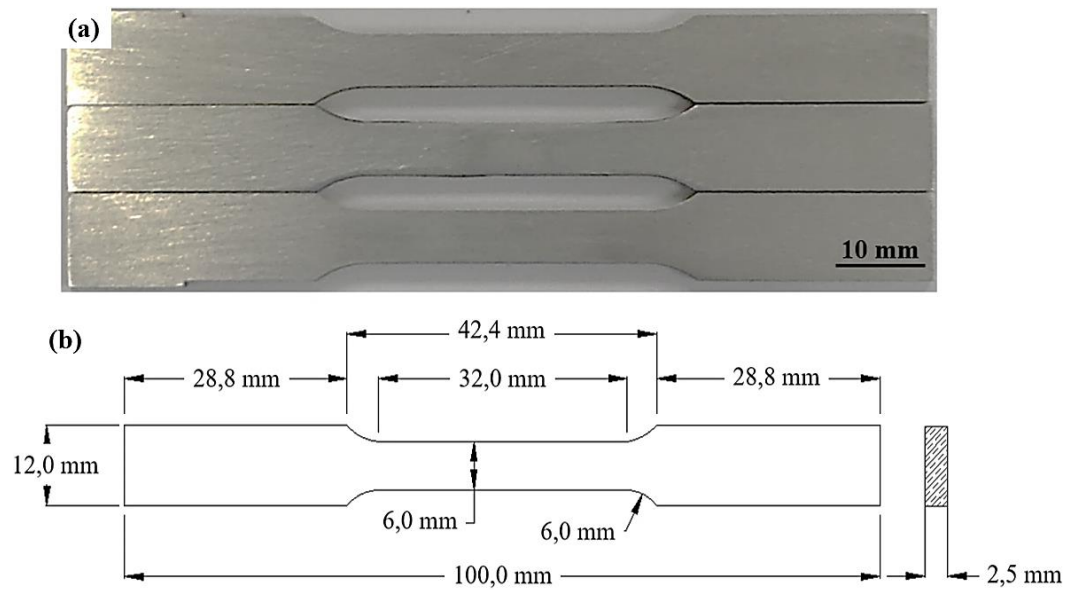


Fonte: Autoria Própria (2018).

3.6 Ensaio de tração

Após a confecção, a finalização do preparo consistiu em lixar manualmente os corpos de prova (CPs), para que a superfície e espessura apresentem uniformidade, todos apresentaram a aparência similar aos da Figura 20 (a) e as medidas na Figura 20 (b), sendo todos normatizados pela ASTM E 8M.

Figura 20: Corpos de prova pós lixamento manual



Fonte: Autoria Própria (2018).

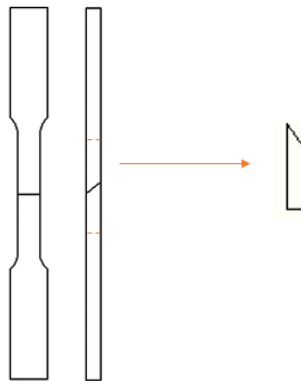
Através deste ensaio é verificado se as deformações no material estão igualmente distribuídas pelo corpo de prova. Essa uniformidade termina o quanto o material suporta a carga máxima até surgir a estrição, diminuindo a área desta região e levando-o à ruptura (DALCIN, 2007).

Pelo mesmo equipamento do ensaio de dobramento, porém com a retirada de roletes e cutelo e adição de garras, os CPs foram alongados sob a carga de 1kN com a velocidade de 2 mm/min.

3.7 Preparação das amostras para a fractografia

Consistiu basicamente na escolha aleatória de um corpo de prova de cada tipo de soldagem, retirando a área de ruptura de cada uma, como mostra Figura 21, devendo ter a altura suficiente para entrar no microscópio eletrônico de varredura. Essa amostra, passou por um rigoroso processo de limpeza com álcool isopropílico no agitador ultrassônico por 30 minutos e posteriormente seca com jato de ar quente conforme indica Dedavid (2007).

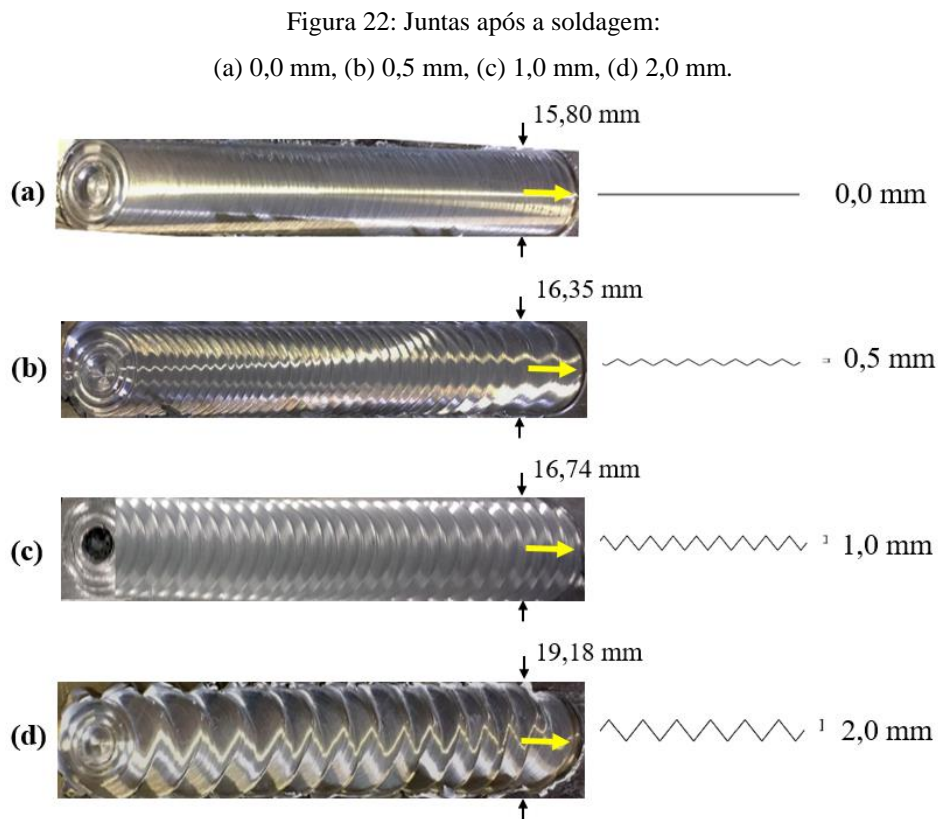
Figura 21: Retirada da amostra para a fractografia.



Fonte: Autoria Própria (2018).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 22 estão ilustradas as juntas selecionadas com o desenho das oscilações da ferramenta, os quais passaram por inspeção visual direta e tiveram como principal critério de seleção a não aparição dos defeitos de cavidade e raiz, sendo identificados por um corte na transversal e superficialmente, respectivamente, semelhante a Souza (2010).



Fonte: Autoria Própria (2018).

As setas em amarelo na Figura 22 apontam a região de inserção da ferramenta, que segundo Gipiela (2007) é praticamente inevitável uma formação de rebarba neste local devido ao maior esforço necessário para a penetração na junta, normalmente ocorre com o ombro plano, e para estas soldagens também mostrou-se inevitável com o ombro de anéis concêntricos. De acordo com Almeida (2015), a velocidade de avanço pode ser o fator que proporciona esse fluxo de material excessivo, facilitando a ejeção.

As juntas não se apresentaram livre de defeitos ao longo do cordão de solda, como mostra a Figura 23, através da formação de rebarbas nas juntas sem tecimento e com o tecimento das amplitudes de 0,5 e 2,0 mm. Similar a Campanelli (20103), os cordões de solda

apresentaram uma presença limitada de superfícies lisas e regulares com faixas semicirculares regularmente espaçadas.

Figura 23: Identificação de rebarbas:

(a) 0,0 mm, (b) 0,5 mm, (c) 2,0 mm.



Fonte: Autoria Própria (2018).

Na Figura 23, as imagens apresentam a formação e diferença de acúmulo da rebarba se deu, possivelmente, por uma maior pressão da ferramenta na junta, fazendo com que o ombro não controlasse perfeitamente o fluxo do material durante o movimento de avanço da ferramenta. E uma outra possibilidade, é a que segundo Hiller (2007), pode ser pelo efeito combinado da rotação e ferramenta.

4.1 Macroestrutura

As ilustrações da Figura 24 foram obtidas pelo microscópio Axio Scope A1 da marca Carl Zeiss por conjunto de 30 imagens com aumento de 5 vezes cada. De acordo com Almeida (2015), a análise de inspeção visual direta não possibilita visualizar a integridade do cordão de solda, fazendo da análise de macroestrutura na seção transversal da peça uma importante ferramenta para a visualização de defeitos internos.

Figura 24: Macroestrutura das amostras:
(a) 0 mm, (b) 0,5 mm, (c) 1,0 mm, (d) 2,0 mm.



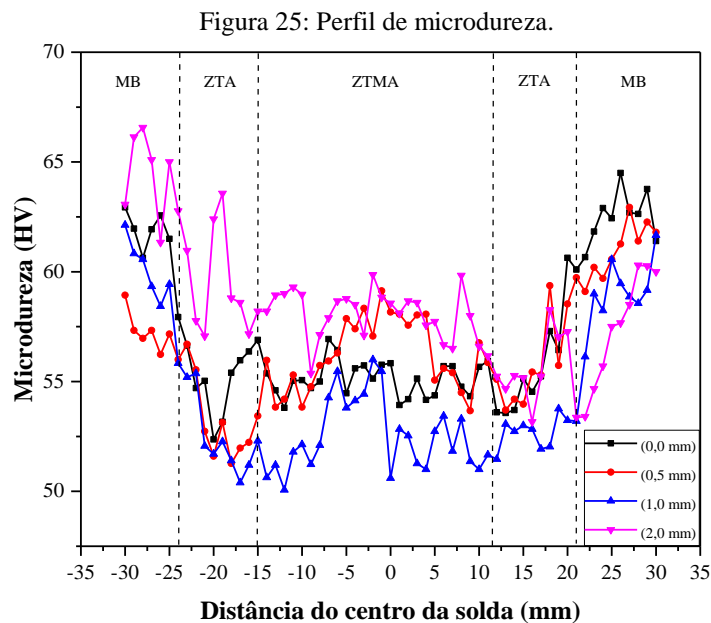
Fonte: Autoria Própria (2018).

A partir das imagens da Figura 24, pode-se observar a diferença morfológica causada pela variação dos movimentos da ferramenta em cada condição de soldagem, principalmente pelos diferentes diâmetros da ZTMA. Todas elas apresentam estruturas circulares em camadas similares ao de Andrade (2009), e que segundo Almeida (2015) pode ser devido ao movimento de rotação do material ao redor do pino, produzindo relevos. Não houve presença de vazios evidentes, além dos poros na Figura 24 (b), o que de acordo com Souza (2010), é resultado da eficiência do desempenho da geometria do pino. Porém, ainda sobre esta figura, por ser a peça que mais apresentou rebarba, justifica a menor espessura e a porosidade mais aparente quando comparada às outras, devido ao maior fluxo de material expulso pela ferramenta.

Para a Figura 24 (a) os níveis de deformação se apresentaram menos aparentes, por não apresentar nenhum tipo de oscilação. E, na Figura 24 (d), evidenciou-se um caráter eventual no processo, com a aparição dois nugget, não encontrado na literatura e é possivelmente resultante da maior movimentação da ferramenta.

4.2 Ensaio de Microdureza Vickers

Os dados obtidos pelo ensaio de micro dureza podem ser visualizados através do gráfico na Figura 25. Nele estão estimadas as zonas formadas pelo processo, levando em consideração a diferença do diâmetro de cada condição de soldagem, em que o eixo x representa os pontos medidos longitudinalmente no cordão de solda, do centro em direção ao metal de base, e no eixo y apresenta os valores de microdureza Vickers.



Fonte: Autoria Própria (2018).

A partir dos gráficos de microdureza Vickers, em cada processo pode-se aferir que os dados da oscilação 2,0 mm e 0,5 mm, mesmo este último revelando maior nível de porosidade apresentada pela micrografia, obtiveram os maiores picos de dureza na região central, configurando uma boa recristalização, pelo refino dos grãos causado pelo contato direto com a ferramenta em movimentação, sendo forjada e extrudada, justificando assim o desempenho. De modo geral, a região central, ZTMA, apresenta uma elevação de microdureza, quando comparada a ZTA por ser dinamicamente recristalizada, configurando aumento de resistência.

Na ZTA de todos os processos obtiveram queda de microdureza, que segundo a hipótese levantada por Gipiela (2007), pode ser causada devido a baixa densidade de discordâncias gerada na recristalização dos grãos, apresentando assim, valores menores que a ZTMA e o MB. Na Tabela 4 os dados foram enquadrados quanto aos seus maiores e menores valores e também quanto a média, para fins comparativos.

Tabela 4: Comparação de dados da microdureza.

	Média ZTMA (HV)	Média Total (HV)
Oscilação 0,0 mm	53,1 ± 2,8	54,3 ± 3,6
Oscilação 0,5mm	57,2 ± 2,1	56,6 ± 3,2
Oscilação 1,0 mm	53,2 ± 2,9	54,3 ± 4,1
Oscilação 2,0 mm	57,2 ± 3,8	58,5 ± 4,4
Metal de base	-	61,1 ± 1,6

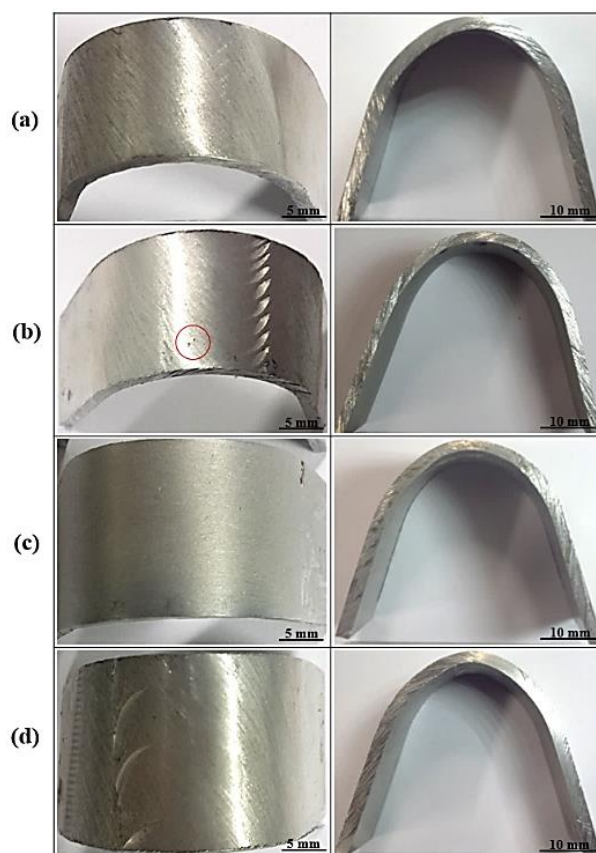
Fonte: Autoria Própria (2018).

Através da Tabela 4 pode se confirmar que as oscilações de 0,5 e 2,0 mm obtiveram grandes valores de microdureza e também muito próximos. Possivelmente o bom desempenho da solda com tecimento de 0,5 mm pode ser dada pela maior pressão da ferramenta nesta condição, fazendo o material seja mais intensamente trabalhado. Com relação a média geral, a amplitude de 2,0 mm apresentou os resultados da média de ZTMA bem próximo a média total e é a que mais se aproxima ao metal de base. Quanto para condição de soldagem, além da boa pressão aplicada, a presença de dois nugget mostrou uma maior região de mistura e os dados de microdureza apresentou os melhores resultados ao longo das zonas envolvidas.

4.3 Ensaio de dobramento

Na Figura 26, tem-se os CPs após o ensaio de dobramento, observando-se a face e a lateral de cada.

Figura 26: CPs pós ensaio de dobramento:
(a) 0 mm, (b) 0,5 mm, (c) 1,0 mm, (d) 2,0 mm.



Fonte: Aatoria Própria (2018).

Através da inspeção visual direta pode-se notar que o CP da Figura 26 (b), apresentou uma fissura de 1,74 mm, o tornando aceitável pela norma ASTM E 190, não permitindo trincas maiores que 3,2 mm. Nenhuma das amostras obtiveram a presença de trincas e apresentaram ductilidade adequada do cordão de solda, com resultados superiores ao de Oliviecki e Beskow (2013).

4.4 Ensaio de tração

Após o ensaio de tração, os CPs de cada junta foram inspecionados para verificar seu local de ruptura e as diferenças entre elas. Na Figura 25 tem-se um CP de cada procedimento de soldagem.

Figura 27: CPs pós ruptura:
(a) 0,0 mm, (b) 0,5 mm, (c) 1,0 mm, (d) 2,0 mm



Fonte: Autoria Própria (2018).

Pela Figura 27, nota-se que os CPs romperam aproximadamente no mesmo local, apresentaram um leve empensoamento antes da ruptura caracterizando uma ruptura dúctil e frágil, similar a Saccon (2010), comprovando boa qualidade da junta por este ensaio. Segundo Almeida (2015), pela localização da fratura a resistência das juntas não diminuiu com relação ao metal de base, pelo fato de não estar localizado no centro, devido a isso, estima-se que a fratura está na ZTA, por ser a região a apresentar menor microdureza, o que pode explicar a menor resistência.

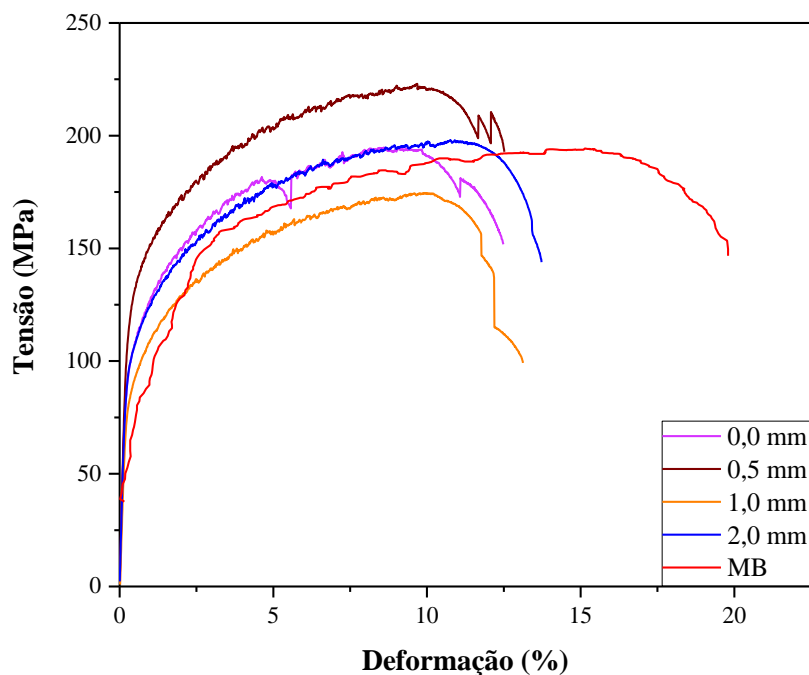
Na Tabela 7, encontram-se os dados dos valores médios dos três corpos de prova de cada solda obtidos por este ensaio em comparação com o metal de base (MB), em que essas médias também apresentaram-se em forma de gráfico na Figura 28. Esses dados foram coletados pelo software associado à máquina em que foram influenciados pelos componentes do equipamento, tais como as garras e o sistema hidráulico.

Tabela 5: Dados médios do ensaio de tração.

	0,0 mm	0,5 mm	1,0 mm	2,0 mm	MB
Tensão máxima (MPa)	193,76 ± 9,6	209,40 ± 6,7	167,13 ± 3,4	197,04 ± 12,3	194,95
Tensão de Ruptura (MPa)	151,80 ± 10,1	192,81 ± 6,0	99,20 ± 1,7	143,90 ± 9,7	146,75
Deformação (%)	12,48 ± 3,0	12,51 ± 0,4	13,12 ± 0,6	13,72 ± 0,1	19,80

Fonte: Autoria Própria (2018).

Figura 28: Gráfico Tensão x Deformação.



Fonte: Autoria Própria (2018).

Nota-se que a média das deformações diferenciam-se pouco, mas ainda devido a dureza fornecida pelo processo ainda são menos dúcteis que o MB. Quanto às tensões máximas, os resultados são bem expressivos, praticamente igual ao do MB na soldagem sem tecimento, e ultrapassando o valor como mostra o tecimento com as oscilações de 0,5 e 2,0 mm, obtendo os menores desvio padrão na deformação. Porém, o maior desvio padrão na oscilação 0,5 mm pode ter relação com a porosidade e a espessura mostrada na macrografia, variando assim, o desempenho entre essas amostras.

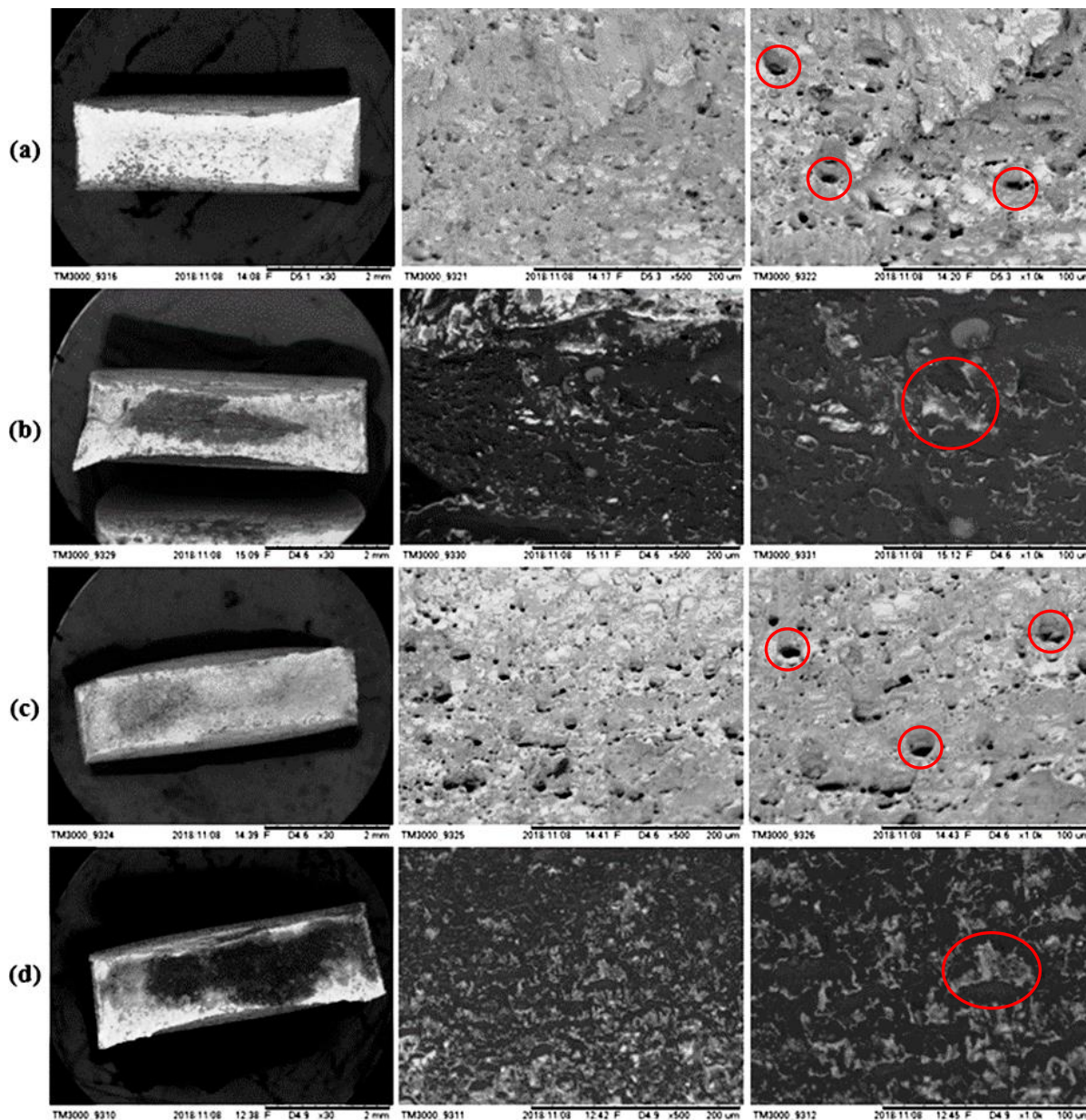
O lixamento manual na etapa de preparação dos corpos de prova foram de muita relevância para o seu desempenho, pois através da remoção das marcas deixadas pela trabalho da ferramenta, houve uma melhor distribuição das tensões no comprimento útil, o que deve ter ajudado a evitar a ruptura no cordão de solda.

4.5 Fractografia

A superfície da fratura foi analisada na região central a partir de imagens de 30 x, 500 x e 1000 x obtidas pelo Microscópio Eletrônico de Varredura, conforme mostra a Figura 29.

Figura 29: Análise no MEV:

(a) 0,0 mm, (b) 0,5 mm, (c) 1,0 mm, (d) 2,0 mm.



Fonte: Autoria Própria (2018).

Pelas imagens obtidas pelo MEV na Figura 29, as fraturas apresentaram microcavidades, sendo mais evidenciadas em menor quantidade na Figura 29 (a), e maior quantidade presente na Figura 29 (c). De acordo com Paiva (2009), a presença e a diferença de tamanho dessas microcavidades indica que as inclusões de óxidos no metal de base fragmentaram-se e foram distribuídos ao longo da junta. Ainda segundo o autor, a distribuição desses alvéolos influencia tanto na resistência mecânica quanto na ductilidade, podendo justificar o ocorrido com o tecimento de oscilação 1,0 mm, pelo seu desempenho inferior no ensaio de tração.

O que diferentemente ocorreu na Figura 29 (d), indicando que para este tecimento houve uma melhor mistura e uma maior resistência com identificação dos planos de deslizamento, na região escura da imagem, que também aparece no centro do CP da Figura 29 (b). As fractografias das oscilações de 0,5 e 2,0 mm explicam as tensões máximas obtidas no ensaio de tração, além de resultados próximos na região central do corpo de prova de microdureza na Figura 25.

5 CONCLUSÕES

Pode-se concluir que as juntas com o uso do tecimento de amplitude 0,5 mm e 2,0 mm apresentaram enormes ganhos pela qualidade da união do material dado pelas condições de soldagem, e conseqüentemente os melhores desempenhos mecânicos obtidos pelo ensaio de tração e microdureza Vickers, indicando uma boa parametrização, mesmo com a porosidade mais evidente da amplitude de 0,5 mm na macrografia.

Quanto ao processo de soldagem com tecimento de amplitude 1,0 mm, pela aparência no cordão de solda, e devido ao desempenho inferior nos ensaios mecânicos, além da análise da fractografia, pode ter ocorrido falta de penetração da ferramenta, já que os parâmetros foram iguais, exceto as amplitudes do tecimento, levando em consideração também as limitações do equipamento. E, vale ressaltar que todas as soldas apresentaram boa ductilidade pelo comportamento apresentado no ensaio de dobramento.

Portanto, quando comparado ao processo convencional da soldagem por fricção linear, o uso do tecimento apresentou ganho das propriedades mecânicas, quando bem parametrizado. Com isso, esse tipo de estudo, pouco encontrado até então, merece ser aprofundado para a melhora da qualidade das juntas dos produtos que já demandam desse tipo de processo.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar desgaste de ferramenta a partir dos parâmetros utilizados neste trabalho;
- Testar outras trajetórias de tecimento;
- Realizar soldagem em materiais dissimilares;
- Estudo da corrosão da solda em ambiente marítimo no alumínio 5052 F;
- Análise da porosidade.

REFERÊNCIAS

ARBEGAST, W. J. **Modeling Friction Stir Joing as a Metal Working Process. IN: Hot Deformation of Aluminium Alloy III.** TMS. Warendale. PA. USA. p. 310 – 327. 2003.

ASTM. Standard Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Sheet and Plate. ASTM B209M – 04. American Society for Testing and Materials, 2004.

ASTM. Standard Test Method for Guided Bend Test for Ductility of Welds. ASTM E190 – 14. American Society for Testing and Materials, 2014.

ASTM. Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials. ASTM E8/E8M – 16a. American Society for Testing and Materials, 2016.

ASTM. Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials. ASTM E92 – 82. American Society for Testing and Materials, 1982.

AKINLABI, E. T.; LEVY, A. C. S.; AKINLABI, S. A. **Design of a support system for a re-configured milling machine to achieve friction stir welds.** Lecture Notes in Engineering and Computer Science, v1 LNECS. 2013.

ALCAN ALUMÍNIO DO BRASIL. Manual de Soldagem. **Manual de soldagem**, v. 1, p. 141, 2015.

ALMEIDA, D. T. DE. Análise estrutural e avaliação mecânica de juntas soldadas por fricção e mistura mecânica FSW da liga de alumínio 5182-O. **Dissertação de Mestrado**, p. 120, 2015.

ANDRADE, E. **Desenvolvimento de Ferramenta Bobbin-Tool para o Processo de Soldadura por Fricção Linear - Caracterização e Análise da Liga de alumínio AA6061-T4.** Dem, v. Mestre. 2009.

CAMARGO, J. F. **Estudo da união de chapas sobrepostas de alumínio , utilizando o processo “ friction stir welding ”.** Horizontina - RS, 2013.

CAMPANELLY, S. et al. **Analyses and Comparision of Friction Stir Welding and Laser Assisted Friction Stir Welding of Aluminium Alloy.** Materials, 2013

CAPELARI, T. V.; MAZZAFERRO, J. A. E. **Avaliação da geometria de ferramenta e parâmetros do processo FSW na soldagem da liga de alumínio AA 5052.** Soldagem e Inspecao, v. 14, n. 3, p. 215–227, 2009.

CARMONA, J. S. et al. **Caracterização da Junta Soldada Pelo Processo FSW na Liga de Alumínio 5052 Aplicado a Construção Naval.** Belém - PA, 2017.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução.** LTC, v. 8º Edição, 2012.

CORAINI, R. **Soldagem GMAW-P Robotizada de Alumínio: Influência do Tipo de Chanfro, Tecimento e Sentido de Laminação na Distorção Angular.** Bauru - SP, 2011.

DEDAVID, B.A. **Microscopia Eletrônica de Varredura - Aplicações e preparação de amostras.** EDIPUCRS, 2007.

DALCIN, G. B. **Ensaio dos Materiais - Curso Engenharia Industrial Mecânica.** p. 1–41, 2007.

ESAB - ESAB Welding & Cutting Products AB. **Products.** Sweden. Disponível em: <http://products.esabna.com/index.html/screen/welding_automation_category_page>. Acesso em: 05 out. 2018.

FEISTAUER, E. E. **Propriedades mecânicas de juntas soldadas com diferença de espessura pelo processo de soldagem por atrito linear com mistura em ligas de Al-Mg para aplicação naval.** São Cristóvão -SE, 2014.

FRATINI, L.; BUFFA, G. **CDRX modelling in friction stir welding of aluminium alloys.** International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 45, n. 10, p. 1188–1194, 2005.

GARCIA, AMAURI; SPIM, JAIME ALVARES; DOS SANTOS, C. A. **Ensaio dos Materiais.** LTC, v. 2 ed, n. 2012, p. 378, 2012.

GIPIELA, M. L. **Influência dos parâmetros de processo na geração de defeitos na soldagem fsw da liga de alumínio 5052.** Curitiba - PR, 2007.

GRUJICIC, M. et al. **Modeling of AA5083 material-microstructure evolution during butt friction-stir welding.** Journal of Materials Engineering and Performance, v. 19, n. 5, p. 672–

684, 2010.

HANDBOOK, T. Friction Stir Welding. **Handbook of Plastics Joining**, p. 131–134, 2009.

HILLER, D. DE J. Estudo de Parâmetros e Percursos no Processo de Soldagem de Mistura por Atrito (FSW) Da Liga de Alumínio 5052. Rio de Janeiro - RJ, 2007.

KHALED, T.; PH, D. **An Outsider Looks At Friction Stir Welding**. Fed Aviat Admin, v. 25, n. July, p. 27–29, 2005.

LOPES, F. H. **Análise de uma Solda Linear de Topo por Fricção (FSW) Entre Alumínio (6060 T5) e Cobre (C110)**. Alegrete - RS, 2017.

MISHRA, R. S.; MA, Z. Y. **Friction stir welding and processing**. Materials Science and Engineering: R: Reports, 2005.

MODENESI, P. J. Técnica Operatória da Soldagem SMAW, UFMG, 2004.

MOSTAFAPOUR, A. **A study on the role of processing parameters in joining polyethylene sheets via heat assisted friction stir welding: Investigating microstructure, tensile and flexural properties**. International Journal of the Physical Sciences, v. 7, n. 4. 2012.

MOROZ, I. et al. Caracterização microestrutural e propriedades mecânicas da liga de alumínio 2198-T851 em configuração tailored blank soldada por FSW - friction stir welding. **Soldagem e Inspecao**, v. 17, n. 1, p. 19–25, 2012.

MOSHWAN, R. et al. **Effect of tool rotational speed on force generation , microstructure and mechanical properties of friction stir welded Al – Mg – Cr – Mn (AA 5052-O) alloy**. Materials and Design, v. 66, p. 118–128, 2015.

OLIVIECKI, N. J.; BESKOW, N. J. **Análise dos parâmetros do processo de solda por fricção em uma liga de alumínio**. Perspectiva, Erechim. v. 37138, p. 15–29, 2013.

PLASMIC - Como fazer uma solda segura com com eletrodo revestido. Disponível em: <<http://www.plasmac.com.br/blog/como-fazer-uma-boa-solda-eletrica-eletrodo-revestido.php>>. Acesso em: 08 out. 2018.

PAIVA, F. G. A. **Caracterização de junta soldada por atrito linear com mistura (FSW) da liga Al-Mg-Si AA 6063**. São Paulo - SP, 2009.

PAPAZAFEIROPOULOS, G.; TSAINIS, A. M. **Numerical modeling of the friction stir welding process : a literature review.** Coimbra, Portugal. 2015.

PODRZAJ, P. et al. **Welding Defects at Friction Stir Welding.** Journal of Metalurgija, v. 54, n. 2, p. 3, 2015.

POTOMATI, F. **Avaliação da qualidade final de juntas dissimilares de ligas de alumínio 2024-6056 e 7075-6056 soldadas por FSW - Friction Stir Welding.** São Carlos - SP, 2006.

QUINTINO, B. M. D. **Aplicação do processo de fricção linear (FSP) na melhoria da resistência à fadiga de juntas de topo soldadas por MIG na liga AA5083-H111.** Coimbra - Portugal, 2012.

ROHDE, R. A. **Metalografia preparação de amostras uma abordagem pratica.** Versão-3.0. 2010.

SACCON, V. T. et al. **Caracterização microestrutural e comportamento mecânico das ligas de alumínio aa2139 t3 e t8 soldadas por fricção rotativa com misturas soldagem e inspecao.** São Paulo - SP, 2010.

SANTOS, T.F.A. **Avaliação microestrutural e de desempenho de juntas soldadas de aços inoxidáveis duplex por atrito com pino não consumível.** 2012. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 189 p.

SOUZA, G. S. **Influência da geometria da ferramenta na soldagem da liga de alumínio 5052 pelo processo friction stir welding.** Curitiba -PR, 2010.

THOMAS, W. et al. **Friction Stir Welding – Process Developments and Variant Techniques.** The SME Summit 2005 Oconomowoc, Milwaukee, USA, 3-4 August, n. January 2005, p. 1–21, 2005.

VASAVA, A. S. et al. **A Review paper on Friction Stir Welding – Process and its Variables.** n. 1, p. 371–376, 2017.

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