

RENAN GIMENEZ BAZAN

Desenvolvimento de solda por fricção linear (FSW) em liga de alumínio

Renan Gimenez Bazan

Desenvolvimento de solda por fricção linear (FSW) em liga de alumínio

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento

Guaratinguetá - SP
2018

B362d	Bazan, Renan Gimenez Desenvolvimento de solda por fricção linear (FSW) em liga de alumínio/ Renan Gimenez Bazan – Guaratinguetá, 2018. 48 f : il. Bibliografia: f. 44-45 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2018. Orientador: Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento 1. Soldagem. 2. Fricção. 3. Ligas de alumínio. I. Título. CDU 669.715
-------	---

Luciana Máximo

Bibliotecária CRB-8/3595

unesp **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

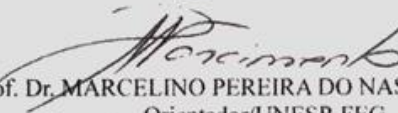
RENAN GIMENEZ BAZAN

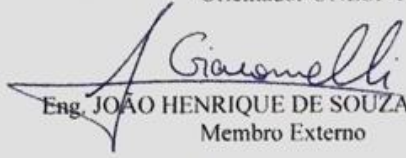
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA”

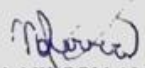
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM NOME DO CURSO


Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. MARCELINO PEREIRA DO NASCIMENTO
Orientador/UNESP-FEG


Eng. JOÃO HENRIQUE DE SOUZA GIACOMELLI
Membro Externo


Tecnol. NILSON ANEAS FERRAZ
Membro Externo

Dezembro/2018

DADOS CURRICULARES

RENAN GIMENEZ BAZAN

NASCIMENTO	24.11.1995 – Fernandópolis / SP
FILIAÇÃO	Ednan Marcio Bazan Fabiana Gimenez Bazan
2013/2018	Curso de Graduação Engenharia Mecânica - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”- Campus de Guaratinguetá

Dedico este trabalho, de modo especial, aos meus pais, Fabiana e Ednan, que sempre me forneceram educação, suporte e formação de caráter como homem.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a *Deus*, por ter me dado o privilégio de nascer em uma família que sempre me proporcionou conforto e educação de qualidade, e sei que devo retribuir isso à sociedade.

Agradeço a *Nossa Senhora Aparecida*, por ter sempre me acompanhado desde o Vestibular até os dias de hoje, sempre me consolando e servindo de alento nos momentos mais difíceis.

Agradecimentos aos meus pais, *Fabiana e Ednan*, que nunca deixaram de me suportar e sempre me deixaram livre para realizar as minhas escolhas e desenvolver a maturidade necessária para meu crescimento pessoal e profissional. Sou grato também por sempre terem me proporcionado educação em excelentes colégios e sempre preencherem minha vida de conhecimentos e valores que moldaram meu caráter.

À minha irmã, *Lara*, minha companheira de mais longa data, que sempre me apoiou e proporcionou seu estímulo para me fazer enxergar o mundo de outras formas.

Ao *Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento*, pelo conhecimento transmitido e também pelo suporte dado em todos estes meses de Trabalho de Graduação. Sou grato por ter me aceitado como seu orientado.

À *República HRomeu*, e todos que comigo ali moraram. Sem dúvida esta vivência foi essencial e teve grande influência na formação da minha personalidade e de quem sou hoje. Ali conheci amigos que levarei para a vida.

Aos amigos e amigas que fiz durante todos estes anos. Principalmente aqueles de infância, que me acompanharam por toda trajetória, parceiros nos momentos bons e também que dividiram os anseios deste curso, onde sempre suportamos uns aos outros.

Ao Vinicius Sales Cardoso, que me auxiliou por todo o desenvolvimento do processo, dividindo comigo tempo e expectativas, obrigado pela ajuda prestada. Também ao *Prof. Dr. Luís Rogério de Oliveira Hein*, pelos ensinamentos e tempo dedicado no auxílio do processo de microscopia óptica.

A *Regina Celia Ferreira da Silva Souza*, Diretora Técnica Acadêmica da FEG, que durante os meus anos de faculdade ensinou-me muito sobre a dinâmica de uma Universidade pública e como funciona o sistema, e que sempre prezou pelo puro desenvolvimento acadêmico dos discentes e pela promoção do nome da Faculdade sociedade afora.

“A cultura, sob todas as formas de arte, de amor e de pensamento, através dos séculos, capacitou o homem a ser menos escravizado.”

André Malraux

RESUMO

O processo de soldagem por fricção linear FSW (*Friction Stir Welding*) é um processo em que não ocorre a fusão dos materiais envolvidos, somente uma mistura mecânica do material base. Sendo muito utilizado na indústria aeronáutica, em vasos de pressão e na indústria automotiva, devido às características finais da junta soldada estar em conformidade com as características do metal base. Este trabalho de graduação visa desenvolver e estudar o processo de soldagem por fricção linear (FSW) em uma liga de alumínio comercial. Foi estudado o desenvolvimento de uma ferramenta, que respeitasse os parâmetros pré-estabelecidos da chapa de alumínio, tendo em vista que a ferramenta varia de acordo com o material e suas dimensões. Tal processo pode ser realizado por máquinas de elevado custo, as quais possuem, unicamente, a função de realizar este tipo de solda, ou por um equipamento alternativo, como o que foi utilizado neste projeto - uma fresadora. Com o desenvolvimento da ferramenta e os devidos parâmetros do processo, o material soldado foi estudado para que se pudesse analisar e entender a qualidade da junta soldada através de ensaios de tração, fadiga, micro dureza, além das análises macroscópicas e microscópicas. Atingindo-se tensão máxima à tração em torno de 90% do material base, porém com uma perda de ductibilidade de aproximadamente 59,5%, que está diretamente ligado com o acréscimo de 7,85% da dureza na região do *nugget*.

PALAVRAS-CHAVE: Soldagem por fricção linear. Mistura mecânica. Indústria aeronáutica. Ferramenta. Liga de alumínio. Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

The Friction Stir Welding (FSW) is a process that doesn't occur by means of melting the envolved materials, it happens by a mechanical mixture of the base material. Broadly used in the aeronautical industry, pressure vessels and automitive industry, due to the welded joint characteristics being in conformity with base metal. This works aims to develop e study the Friction Stir Welding in a comercial aluminum alloy. The development of a tool as studied, wich respected the pre-stabilished parameters of the aluminum plate, knowing that the tool differs according to the material and its dimension. Such process can be acheived using high cost machinery, wich possess, uniquely, the function of making this kind of weld, or by an alternative equipment, as the utilized in this project - a milling machine. With the development of the tool and tis due process parameters, the welded material was studied in order to analyse and understand the quality of the welded joint through traction, fatigue, microhardness test, futhermore macroscopic an microscopic analysis, to observe the struture. The welded joint has showed significant loss of mechanical properties, but it was satisfactory, reaching a maximum tensile stress around 90% of the base material, and with a ductility loss of approximately 59.5%, which is directly connected with the increase of 7.85% of the hardness in the nugget region, nevertheless it was satisfactory.

KEYWORDS: Friction stir welding. Mechanical mixture. Aeronautical industry. Tools. Aluminum alloy. Mechanical properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração do processo Friction Stir Welding.....	18
Figura 2 – Ferramenta de soldagem FSW.	21
Figura 3 – Perfil da temperatura em função dos ângulos do pino para avanço constante.....	22
Figura 4 – Geometria do pino da ferramenta.....	22
Figura 5 – Perfil generalizado da junta soldada	24
Figura 6 – Dispositivo de Fixação junto a uma junta soldada.....	26
Figura 7 – Ferramenta de titânio	26
Figura 8 – Ferramenta de aço VC 131.....	27
Figura 9 – Ferramenta de aço VC 131 - versão final.....	28
Figura 10 – DMG DMU 50 eco-line	28
Figura 11 – Mapa dos pontos de identações de microdureza	30
Figura 12 – Microscópio Ótico.....	31
Figura 13 – Soldas realizadas (a) 900 RPM, (b) 1000RPM, (c) 1150 RPM, (d) 1250 RPM..	32
Figura 14 – Falha Presente no Corpo de Prova da Solda 1150 RPM.....	33
Figura 15 – Propriedades Mecânicas- Material Base	33
Figura 16 – Propriedades Mecânicas Médias - Material Base	34
Figura 17 – Propriedades Mecânicas- Solda a 1250 RPM	34
Figura 18 – Propriedades Mecânicas Media - Solda a 1250 RPM.....	34
Figura 29 – Microdureza das regiões da solda FSW e metal base.	36
Figura 20 – Perfil de dureza da chapa soldada com desvio padrão amostral.	37
Figura 21 – Falha existente na amostra da solda a 1250 RPM (100x)	39
Figura 22 – Região de transição entre solda e material Base (50x)	39
Figura 23 – Região de Material Base (a) 100x, (b)200x, (c)500x e (d)1000x	40
Figura 24 – Centro da solda a 1250 RPM (a) 100x, (b) 200x, (c) 500x, (c) 1000x	40
Figura 25 – Região de transição da solda a 1250 RPM (a) 100x, (b) 200x, (c) 500x, (d) 1000x	41
Figura 26 – Corte transversal amostra a 1250 RPM com dimensões de 24x2,4mm (50x)	41
Figura 27 – Região de transição da solda a 1250 RPM (200x)	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades mecânicas processo FSW em material AA 2024.....	15
Tabela 2 – Relações dimensionais para construção da ferramenta FSW	21
Tabela 3 – Parâmetros de soldagem utilizados no pré-teste de GIPIELA.....	23
Tabela 4 – Parâmetros de soldagem de melhores resultados de GIPIELA	24
Tabela 5 – Composição química ligas de alumínio	25
Tabela 6 – Propriedades mecânicas obtidas no ensaio de tração	35
Tabela 7 – Valores de microdureza HV0,1 nas macrorregiões da chapa soldada.....	36
Tabela 8 – Valores médios de microdureza HV0,1 nas macrorregiões da chapa soldada	37

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	13
1.2	DELIMITAÇÃO E QUESTÃO DA PESQUISA.....	13
1.3	OBJETIVOS, ETAPAS E CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	14
1.4	JUSTIFICATIVA	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1	CARACTERÍSTICAS DO ALUMÍNIO	16
2.2	PROCESSOS DE SOLDAGEM	17
2.3	CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO FSW	18
2.4	VARIÁVEIS DO PROCESSO DE SOLDAGEM FSW	19
2.4.1	Geometria da ferramenta.....	20
2.4.2	Parâmetros de velocidade	22
2.5	REGIÕES AFETADAS PELO PROCESSO fsw.....	23
3	MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1	LIGA DE ALUMÍNIO DA CHAPA UTILIZADA	25
3.2	DISPOSITIVO DE FIXAÇÃO.....	25
3.3	DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA DE SOLDAGEM	26
3.4	PROCESSO DE SOLDAGEM FSW	28
3.5	ENSAIO DE TRAÇÃO	29
3.6	ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS	29
3.7	PREPARAÇÃO METALOGRÁFICA.....	30
3.8	MICROSCOPIA ÓPTICA.....	30
3.9	MICROSCOPIA ÓTICA DE REFLEXÃO.....	31
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	32
4.1	REALIZAÇÃO DAS SOLDAS	32
4.2	ENSAIO DE TRAÇÃO	33
4.3	ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS	35
4.4	MICROSCOPIA ÓPTICA.....	38
4.5	MICROSCOPIA ÓPTICA DE REFLEXÃO	41
5	CONCLUSÕES.....	43

5.1	VERIFICAÇÃO DOS OBJETIVOS E RESPOSTAS ÀS QUESTÕES DA PESQUISA	43
5.2	RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	44
	REFERÊNCIAS.....	45
	APÊNDICE A – Ferramenta do processo FSW – Titânio	47
	APÊNDICE B – Ferramenta cônica de aço VC 131	48
	APÊNDICE C – Ferramenta cônica de aço VC 131 (projeto final)	Erro! Indicador
	não definido.	

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Conforme a tecnologia avança, as indústrias buscam, cada vez mais, métodos e materiais que possuem alta capacidade de produção e redução de custos, atrelados com a qualidade do produto final.

Em razão disso, a solda por fricção linear caminha nesse segmento de avanço tecnológico para um aumento da produção e boa qualidade do produto, principalmente ao que diz respeito à solda em ligas de alumínio, pois estas representam um desafio contínuo para a área de fabricação. Há uma série de restrições associadas às ligas de alumínio, devido à própria natureza do material, como: presença de camada de óxido de alto ponto de fusão (2050°C); elevada condutividade térmica (em torno de seis vezes a do aço); condutividade elétrica variável; contração na solidificação de 6% do volume; elevada solubilidade de hidrogênio e outros gases quando no estado líquido; e susceptibilidade a trincas na solidificação para algumas de suas ligas (SQUILLACE et al., 2004; ASM v.2, 1995; ASM v.6, 1995).

Tais características do alumínio acabam por ser responsáveis por diversos defeitos, como: trincas, porosidades e perdas nas propriedades mecânicas. Estes defeitos ocorrem, geralmente, em processos de soldagem do alumínio através de arco elétrico, sendo assim, se tornam pouco atrativo tanto para indústria automobilística, quanto aeronáutica, que necessitam de materiais com alta responsabilidade. Desta forma, o processo de solda por fricção linear ganha uma importância muito grande, tendo em vista que neste processo não há necessidade da fusão dos materiais, mas sim, o que ocorre, é uma mistura mecânica do material base, tornando o processo *Friction Stir Weldin* (FSW), um processo com uma boa visibilidade para estas indústrias (GIPIELA, 2007).

Por não gerar fusão localizada do material base, muitos dos problemas metalúrgicos associados à fase líquida causada por processos de soldagem por fusão, não são observados em soldas executadas pelos processos de soldagem no estado sólido (GIPIELA, 2007).

1.2 DELIMITAÇÃO E QUESTÃO DA PESQUISA

Várias técnicas de soldagem pertencentes ao grupo de processos de união por fusão ou estado sólido podem unir as ligas de alumínio, porém alguns fatores como óxido de elevado ponto de fusão e trincas na solidificação limitam a soldabilidade das mesmas (ASM v.2, 1995).

Dentre as técnicas disponíveis para soldagem de alumínio por fusão, há os processos de soldagem baseados em arco elétrico, feixe de elétrons e por laser. Em princípio, existe uma forma alternativa para a superação dos obstáculos, que é a utilização de processos de soldagem no estado sólido (COOK et al., 2004), como é o caso do processo FSW (*Friction Stir Welding*), que vem se tornando um campo de pesquisas de grande potencial, principalmente desde o surgimento do processo na Inglaterra em 1991 no TWI (*The Welding Institute*) e seu respectivo registro de patente (KALLEE et al., 2001; JOHN et al., 2003).

No processo de solda por fricção linear (FSW), por não haver fusão do material, evitam-se problemas que ocorrem durante o processo de mudança de fase, permitindo a obtenção de microestruturas com propriedades mecânicas, em muitos casos, superiores às obtidas por processos convencionais (MISHRA, 2003).

Demanda-se um projeto específico de ferramenta e determinação dos parâmetros desejados exclusivos para cada liga e situação em particular a ser unida pelo processo FSW, sendo complexa a relação entre a ferramenta utilizada e o resultado, conforme já verificado por BUFFA et al. (2006) e PRADO et al. (2003).

1.3 OBJETIVOS, ETAPAS E CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

O objetivo geral foi desenvolver uma solda por fricção linear em uma liga de alumínio comercial (AA 3104) e, então, realizar uma avaliação detalhada das alterações microestruturais resultantes e das propriedades mecânicas do material soldado, analisando as regiões de material base, *nugget*, além das áreas termicamente e termo mecanicamente afetadas pelo processo de soldagem.

Estes dados, coletados e estudados, permitirão:

- Alcançar e estabelecer uma otimização estrutural.
- Avaliar, de forma ampla e confiável, a viabilidade de uso dessa tecnologia.

1.4 JUSTIFICATIVA

O processo FSW apresenta suas vantagens em aplicações de larga escala, devido ao custo inicial ser relativamente elevado. Comparado aos custos de solda por fusão, o processo em questão se apresenta significativamente menor (DEFALCO J., 2006).

Um ponto positivo do uso do solda por fricção linear (FSW) consiste na redução do peso da aeronave, o que, consequentemente, ocasiona a redução de custos operacionais para

aeronaves de categorias de longo alcance e regional, devido à diminuição no uso de combustível, justificando, também, o investimento inicial de produção (IRVING B., 1997).

A solda obtida pelo processo FSW possui resistência mecânica de 30% a 50% maior que no processo de solda por arco, comparando-se, também, a vida em fadiga, a mesma apresenta-se igual o superior à obtida em painéis rebitados (MENDEZ P. F.; EAGAR T. W., 2001).

O coeficiente de resistência de uma união rebitada é calculado levando em consideração a distância entre centro dos rebites (t), o diâmetro do rebite (d) e o coeficiente de concentração de tensões (K), os quais, para união rebitada das longarinas nas chapas de fuselagem de uma aeronave, assumem valores de: $d=3\text{mm}$, $t=20\text{mm}$ e $K=1$, aonde se encontra o valor de coeficiente de resistência igual a 0,85 (DOBROVOLSKI V. et al, 1976).

De acordo com Khaled T., diversos autores testaram as propriedades mecânicas do material AA 2024 sujeito ao processo FSW. Os resultados obtidos foram calculados a partir da razão entre os valores de resistência mecânica dos materiais unidos pelo processo de soldagem por fricção linear em relação ao material base, e podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas processo FSW em material AA 2024

AA 2024	Kumagai et al	Zettler et al	Talwar et al	Biallas et al	Von Strombeck et al
Eficiência da União	83%	70% a 97%	88%	90%	83%
Resistência a Tração	79%		91%		77%
Alongamento	19%		41%	30% a 50%	27%
Resistência à fadiga				80%	

Fonte: consolidado de Khaled T. (2005).

De acordo com a Tabela 1, a eficiência do material em questão está compreendida entre 70% e 97% do metal base, enquanto as uniões rebitadas apresentam eficiência na ordem de 85%, conforme discutido. Assim, o processo FSW, se realizado com parâmetros adequados, pode produzir uniões com eficiência estrutural iguais ou maiores à utilização de rebites.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CARACTERÍSTICAS DO ALUMÍNIO

O alumínio é um elemento metálico com um grande campo de aplicação que vai desde utensílios de cozinha até aplicações aeroespaciais. É empregado nas indústrias química e elétrica, bem como na arquitetura, transporte e armazenagem de diferentes produtos. O alumínio e suas ligas, por terem baixo peso específico, pertencem à classe das chamadas ligas leves (OKUMURA; TANIGUCHI, 1982).

O termo soldabilidade está associado à facilidade com que uma liga pode ser soldada, produzindo uma junta com adequada resistência mecânica, resistência à corrosão e outras propriedades quando necessárias (PÓVOA, 1988).

Como o uso do alumínio vem sendo largamente expandido em diversas áreas de aplicações, aumenta a necessidade de estudos na área de fabricação desse material, principalmente na soldagem. Contudo, no início, o alumínio foi considerado um material de difícil soldabilidade devido ao fato de se empregar técnicas de soldagem semelhantes às empregadas para materiais ferrosos, obtendo soldas de baixa qualidade (REIS, 1996; SAUNDERS, 1989; BILONI et al, 1981).

Um exemplo do alto grau de dificuldade de soldabilidade das ligas de alumínio pode ser observado na camada de óxido que forma em sua superfície com um alto ponto de fusão(2050°C), além da porosidade da mesma, podendo reter umidade e sujeira que podem contaminar o cordão de solda. Deve-se considerar também a condutividade elétrica variável do alumínio, a contração na solidificação de, aproximadamente, 6% no volume, a elevada solubilidade de hidrogênio e outros gases quando no estado líquido, além da susceptibilidade a trincas na solidificação para algumas de suas ligas (SQUILLACE et al., 2004; ASM v.2, 1995; ASM v.6, 1995).

A influência da condutividade térmica no processo de solda é outro ponto em questão da dificuldade da soldagem, devido à mesma, no alumínio, ser quase cinco vezes mais elevada do que no aço, por exemplo. Desta forma, é necessário cinco vezes mais calor para aumentar a temperatura local de uma mesma massa (AWS, 1996; ALCAN, 1993).

2.2 PROCESSOS DE SOLDAGEM

O desenvolvimento de produtos manufaturados está, diretamente, ligado aos processos de união de materiais e soldagem. O modo de unir um material varia de acordo com sua necessidade e aplicação, como no caso das ligas de alumínio utilizadas em grande volume pela indústria aeronáutica. Adesivos, fixação mecânica ou soldagem são formas de realizar as junções necessárias, contudo, o uso em larga escala está atrelado aos custos resultantes da utilização de cada processo (ASM v.6, 1995).

Existem duas divisões para os processos de união de materiais, os ocasionados pela atuação de forças microscópicas entre as partes a unir (intermoleculares e interatômicas), o qual seria o caso da soldagem, e os ocasionados pela atuação de forças macroscópicas, sendo o caso da utilização de parafusos e rebites (MARQUES et al, 2005).

Tecnologicamente, de acordo com os desafios de projeto, a amplitude da área de fabricação por soldagem é evidente, devido à quantidade de processos já desenvolvidos, sendo que, ao mesmo tempo, os requisitos de resistência mecânica da união e da qualidade do processo se expandem (EAGAR, 1990).

Para a realização da solda em alumínio pode-se utilizar a maioria dos processos conhecidos, ao exemplo dos métodos: com Eletrodo Revestido, TIG (*Tungsten Inert Gas*), Plasma, MIG (*Metal Inert Gas*), etc., devido à evolução das últimas décadas. A escolha do processo varia conforme a qualidade exigida para a junta a se unir, apresentando, em cada método, vantagens e desvantagens a serem analisadas (REIS, 1996).

A soldagem no estado sólido é o grupo de interesse neste estudo, no qual se encontra o processo de soldagem FSW, desenvolvido devido a uma variação da soldagem por atrito convencional.

A eficiência da fonte termo-mecânica é o ponto principal do uso métodos de união de juntas por atrito. São observadas algumas aplicações do atrito para gerar calor, conformar o material e permitir a união do mesmo, na Rússia, pela década de 1950. Contudo, a utilização na esfera global ocorreu somente na década de 1960 devido às necessidades da indústria automobilística neste dado momento da história (NICHOLAS, 2003).

Em 1991, Thomas Wayne, do instituto TWI, fez o desenvolvimento e a patente do processo de soldagem por fricção linear FSW. Observando-se o material utilizado no presente estudo, alumínio, o processo em questão pode ser realizado em chapas com espessuras entre 1,6 e 75mm (NICHOLAS, 2003; TWI, 2007).

2.3 CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO FSW

Neste tópico é possível encontrar um descritivo do processo de soldagem FSW, com exemplo ilustrado, uma classificação das zonas que ocorrem devido ao processo, a explicação das variáveis necessárias, as definições da geometria da ferramenta utilizada e as vantagens apresentadas.

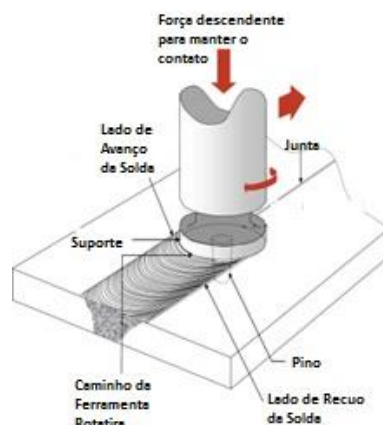
O Processo de soldagem por fricção possui um funcionamento relativamente simples, em vista do grau de tecnologia em que é aplicado, em que uma ferramenta rotativa, não consumível, composta por um pino e um suporte (ombro), é inserida nas bordas adjacentes das chapas metálicas a serem soldadas, percorrendo linearmente a extensão da junta (OLIVIECKI, N.J.; BESKOW A.B., 2013).

A ferramenta cilíndrica é dotada de um pino, que penetra entre as partes a serem unidas, e um suporte, comumente nominado de “ombro”, que exerce pressão sobre os materiais. O processo ocorre sob uma velocidade de rotação (VR) e avanço (VS) constante, gerando calor suficiente para que haja uma facilitação da deformação das duas juntas, resultando na soldagem (CHEN, 2003).

Devido a não geração de fusão localizada do material base, muitos dos problemas metalúrgicos associados à fase líquida, causada por processos de soldagem por fusão, não são observados em soldas executadas pelos processos de soldagem no estado sólido (GIPIELA, 2007).

A Figura 1 apresenta um esquema de soldagem por fricção, aonde se pode observar a relação entre o ombro e o pino, que são os principais responsáveis pela geração do calor térmico e aonde os principais esforços são exercidos.

Figura 1- Ilustração do processo Friction Stir Welding.



Fonte: Adaptado de Thomas; Nicholas (1991).

Resulta-se, então, em uma solda inteiramente no estado sólido, por meio de uma mistura mecânica, onde as temperaturas de trabalho que afetam o processo são próximas, mas inferiores, ao ponto de fusão do material. O projeto da ferramenta define o complexo funcionamento do fluxo dos materiais, onde a parte majoritária da deformação é devido ao cisalhamento do material em torno da rotação do pino e ombro (NORMAN A.F.; BROUGH I.; PRAGNELL P.B., 2000)

O material é transferido da parte frontal para a parte traseira do pino, devido ao movimento de translação (Burford, D., Widener, C., Tweedy, B., 2006). Somado ao movimento de rotação, onde há movimentação de metal de um lado para o outro da junta, dá-se origem a uma microestrutura de grande homogeneidade (VILAÇA et al, 2005).

2.4 VARIÁVEIS DO PROCESSO DE SOLDAGEM FSW

É de extrema importância que se determine as variáveis do processo de soldagem por fricção e atrito – FSW, pois, desta forma, o processo pode ser simplificado. Os parâmetros de processo mais importantes, segundo Ericsson; Sandstrom (2003) e James et al, (2005), são:

- Velocidade de soldagem (VS)
- Velocidade de rotação da ferramenta (VR)
- Força axial no eixo z (Fz)
- Força de avanço no eixo x (Fx)
- Penetração da ferramenta
- Ângulo de inclinação da ferramenta no eixo z(θ)
- Geometria da ferramenta

Estes parâmetros devem ser, individualmente, para cada liga, determinados e combinados, para se resultar em um processo de boa qualidade (SOUZA, GISMAR, 2010).

Os principais parâmetros abordados neste estudo foram a geometria, a velocidade de soldagem e a velocidade de rotação da ferramenta. Desta forma, os demais parâmetros citados serão discutidos posteriormente, porém não foram levados em consideração no processo de soldagem por fricção linear – FSW - que foi desenvolvido.

Os demais parâmetros, possuem relevância para a geração de calor necessária para que a mistura mecânica ocorra, portanto são utilizados, somente, por meio de equações para haver um meio de comparação do calor gerado com outras técnicas de soldagem existentes, tendo-se, assim, uma referência de calor gerado. Como exemplo, uma das equações apresentadas, presente nos estudos de Potomati (2006), pode ser vista na Equação 1.

$$Q = \frac{\pi * VR * Fz * (R^2 + (R * r) + r^2)}{45 * (R + r)} \quad (1)$$

Onde:

Q - Quantidade de calor [J]

VR-velocidade de rotação[rad./s]

R - Raio do suporte da ferramenta[m]

r - raio do pino da ferramenta[m]

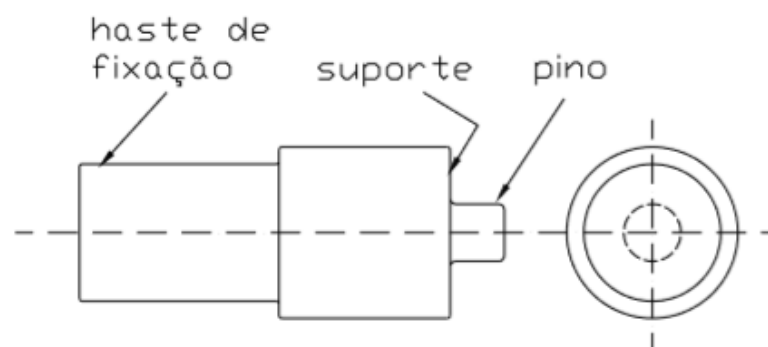
Fz-força axial[N]

2.4.1 Geometria da ferramenta

Os resultados finais do processo FSW dependem, em grande parte, da ferramenta utilizada para a solda, assim é de suma relevância que se defina a geometria da mesma, devido à influência no calor gerado e na movimentação do material, fatores que interferem nas propriedades mecânicas da junta soldada (ZHAO, 2005).

A composição geométrica da ferramenta utilizada no processo FSW consiste, basicamente, em três partes, sendo elas: o pino, parte que incide diretamente no material base e, segundo Song e Kovacevic (2003), possui como função a geração de trabalho mecânico de deformação do metal base e, também, fazer com que o material tenha um fluxo rotativo em torno desta parte da ferramenta; o suporte ou “ombro”, que, segundo BUFFA et al. (2005), possui como função a geração de calor por atrito e controla o fluxo do material abaixo do mesmo; e a haste de fixação, utilizada para se acoplar à máquina que realiza o processo de soldagem FSW. Pode-se observar uma ilustração esquemática da geometria descrita na Figura 2.

Figura 2- Ferramenta de soldagem FSW



Segundo Guerra (2003), para uma simplificação da ferramenta FSW, a espessura do material a ser soldado deve ser décimos de milímetro maior que o comprimento do pino da ferramenta, da mesma forma que o diâmetro do último deve apresentar a mesma dimensão da espessura da primeira.

Na Tabela 2 se apresentam as principais relações entre as dimensões de uma ferramenta genérica FSW.

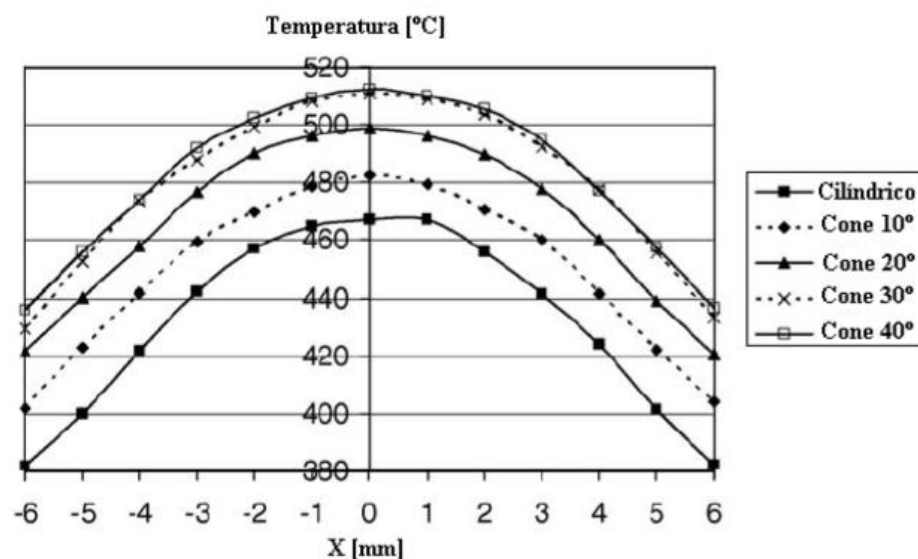
Tabela 2- Relações dimensionais para construção da ferramenta FSW

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, Gismar (2010).

Neste presente trabalho, houve uma alteração na geometria da ferramenta utilizada para se alterar os esforços atuantes na mesma. Desta forma, o pino utilizado teve seu formato modificado para um cone, ao invés de um cilindro, como padrão, fazendo com que houvesse um ganho de temperatura, como pode ser observado na Figura 3.

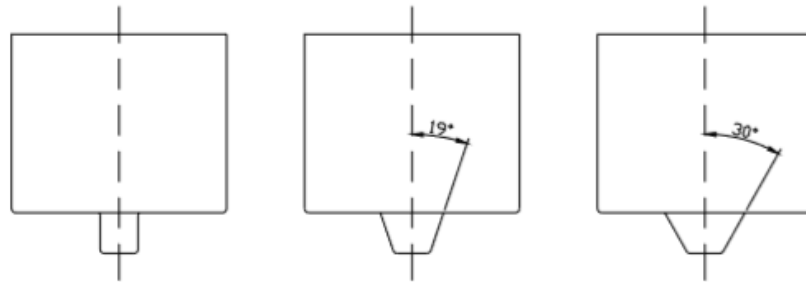
Figura 3- Perfil da temperatura em função dos ângulos do pino para avanço constante.



Fonte: Buffa et al (2006).

Para facilitar o entendimento do funcionamento da variação angular, foi demonstrado na Figura 4 um explicativo visual. Foi utilizado, neste trabalho, uma variação angular da ordem de 20°.

Figura 1- Geometria do pino da ferramenta



Fonte: Buffa et al (2006).

2.4.2 Parâmetros de velocidade

De suma importância para o processo de soldagem FSW, os parâmetros de velocidade de rotação (VR) e velocidade de soldagem (VS), em combinação com as forças atuantes (força de avanço e força axial), são responsáveis por gerar calor através do atrito entre a ferramenta e o metal base. De acordo com ensaios de GIPIELA (2007), pode-se relacionar as velocidades atuantes no processo de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3- Parâmetros de soldagem utilizados no pré-teste de Gipiela

VR (rpm)			VS (mm/min)			
2000	80	112	160	224	315	450
1400	80	112	160	224	315	450
1000	80	112	160	224	315	450
740	80	112	160	224	315	450
500	80	112	160	224	315	450
355	80	112	160	224	315	450
250	80	112	160	224	315	450
180	80	112	160	224	315	450

Fonte: Gipiela (2007).

Com esses dados, é possível ter um maior entendimento para executar a soldagem, porém a máquina a ser utilizada para realizar o processo acaba influenciando na utilização dos parâmetros observados. Devido ao objetivo deste trabalho ser a realização do processo, optou-se por utilizar os parâmetros que apresentaram um maior desempenho segundo os ensaios de GRIPIELA (2007), como pode ser observado na Tabela 4.

Tabela 4- Parâmetros de soldagem de melhores resultados de Gipiela

Parâmetros de soldagem	Nível alto	Nível baixo
VR (rpm)	250	180
VS (mm/min)	450	112

Fonte: Gipiela (2007).

2.5 REGIÕES AFETADAS PELO PROCESSO FSW

Em todos os processos de soldagem o fator variável de calor afeta o material e, mesmo que no processo em questão (FSW) não haja fusão do material, ocorre uma considerável variação da temperatura, o que acaba por gerar uma zona termicamente afetada estreita quando em comparação com outros métodos de soldagem.

Nas ligas de alumínio, FSW pode produzir até quatro zonas microestruturais distintas, segundo Khaled, T. (2005):

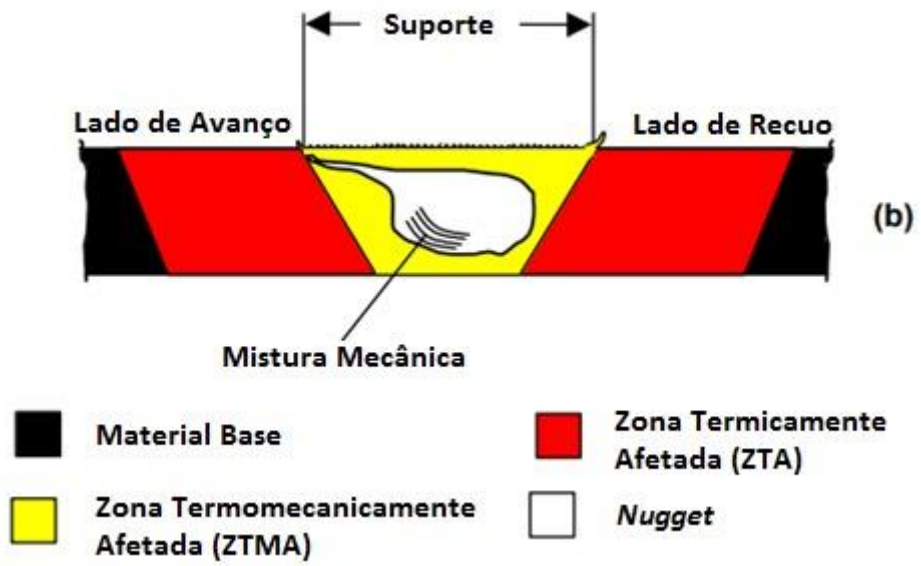
- **Metal Base (MB):** Região não afetada pelo calor ou deformação plástica provocada pela ferramenta do processo FSW.

- **Zona Termicamente afetada (ZTA):** Região intermediária entre o metal base e a zona termomecanicamente afetada, que é afetada pela variação térmica, mas não sofre deformação plástica.

- **Zona Termomecanicamente afetada (ZTMA):** Região próxima ao Nugget, na qual não houve o cisalhamento do metal pela ferramenta de solda, porém foi indiretamente afetada, ocasionando na deformação local.

- **Nugget:** Região central da solda, local da passagem do pino da ferramenta, onde, normalmente, há presença de grãos finos recristalizados.

Figura 5- Perfil generalizado da junta soldada



Fonte: Adaptado de Khaled, T. (2005).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 LIGA DE ALUMÍNIO DA CHAPA UTILIZADA

No presente trabalho, foi utilizado, para o processo de soldagem, a liga de alumínio AA3104, dispostas na forma de chapas laminadas com dimensão 2,4x400x400mm (espessura x largura x comprimento). A composição deste material é definida pela *Aluminium Association*, podendo ser observado na Tabela 5.

Tabela 5- Composição Química Ligas de Alumínio

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS LIGAS NOVELIS												
ELEMENTO - % EM PESO (1)												
Liga Novelis	Silício	Ferro	Cobre	Manganês	Magnésio	Cromo	Zinco	Titânio	Outros		Al	OBS.
									Cada	Total	(min.)	
1050	0,25	0,40	0,05	0,05	0,05	-	0,05	0,03	0,03	-	99,50	*Exceto H e Si
E1050	-	-	-	-	-	-	-	-	*0,05	*0,15	99,50	
1100A	0,20	0,45	0,10-0,20	-	-	-	-	-	0,05	0,15	99,10	-
1200	1,00 Si + Fe		0,05	0,05	-	-	0,10	0,05	0,05	0,15	99,00	-
1350A	0,10	0,40	0,05	0,01	-	0,01	0,05	*	0,03	0,10	99,50	*Ti + V ≤ 0,02%
3003	0,60	0,70	0,05-0,20	1,00-1,50	-	-	0,10	-	0,05	0,15	2	-
3004	0,30	0,70	0,25	1,00-1,50	0,80-1,30	-	0,25	-	0,05	0,15	2	-
3104	0,60	0,80	0,05-0,25	0,80-1,40	0,80-1,30	-	0,25	0,10	0,05	0,15	2	-
3105	0,60	0,70	0,30	0,30-0,80	0,20-0,80	0,20	0,40	0,10	0,05	0,15	2	-
5052	0,25	0,40	0,10	0,10	2,20-2,80	0,15-0,35	0,10	-	0,05	0,15	2	-
5082	0,20	0,35	0,15	0,15	4,00-5,00	0,15	0,25	0,10	0,05	0,15	2	-
5083	0,40	0,40	0,10	0,40-1,00	4,00-4,00	0,05-0,25	0,25	0,15	0,05	0,15	2	-
5086	0,40	0,50	0,10	0,20-0,70	3,50-4,50	0,05-0,25	0,25	0,15	0,05	0,15	2	-
5182	0,20	0,35	0,15	0,20-0,50	4,00-5,00	0,10	0,25	0,10	0,05	0,15	2	-
5454	0,25	0,40	0,10	0,50-1,00	2,40-3,00	0,05-0,20	0,25	0,20	0,05	0,15	2	-
6351	0,70-1,30	0,50	0,10	0,40-0,80	0,40-0,80	-	0,20	0,20	0,05	0,15	2	3
8011	0,65-0,85	0,65-0,85	0,03	-	-	-	0,02	0,03	0,03	0,10	2	-

(1) Quando não se menciona uma faixa, a porcentagem indicada é a máxima.

(2) A porcentagem de alumínio é a diferença entre 100% e a somatória dos demais elementos metálicos com porcentagem superior a 0,010%, expressa até a segunda casa decimal.

(3) Liga tratável termicamente, solubilização a 506 ± 3°C com resfriamento brusco; envelhecimento a 170 ± 3°C por 8 horas.

Fonte: Novelis (2018).

As chapas laminadas foram cortadas, para haver facilitação na fixação e retirada dos corpos de prova, em placas de 60x200 mm (largura x comprimento), obtendo-se assim um maior número das mesmas, para realização do processo em parâmetros diversos.

3.2 DISPOSITIVO DE FIXAÇÃO

Devido à pequena espessura das placas, não sendo comportada pela morsa utilizada no centro de usinagem, houve uma adaptação para poder se fixar as chapas, automatizando-se, assim, o processo. A adaptação citada é observada na Figura 6.

Figura 2-Dispositivo de Fixação junto a uma junta soldada.



Fonte: Autoria própria (2018).

3.3 DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA DE SOLDAGEM

Para a realização do processo de soldagem FSW é preciso projetar e desenvolver uma ferramenta que possa suportar os esforços e, ao mesmo tempo, gere atrito e calor suficiente para que ocorra a solda. Tendo isso em vista, primeiramente, desenvolver-se a ferramenta em titânio, mas a mesma não conseguiu resistir aos esforços necessários para realização do processo, ocasionando a fratura do pino, na região entre este e o suporte (“ombro”), como se pode ver na Figura 7. Pode-se observar, também, a geometria primária no Anexo A.

Figura 7-Ferramenta de titânio



Fonte: Autoria própria (2018).

Devido ao ocorrido com a primeira ferramenta, decidiu-se fazer a troca do material utilizado por uma liga de aço VC 131, considerado um aço ferramenta, que possui uma ótima resistência ao desgaste e uma alta estabilidade dimensional. Somando-se à troca de material, optou-se também por modificar a geometria do pino da ferramenta de um cilindro para um cone de 20° , por ser observado uma fratura inicial (Ferramenta de titânio) por concentração de tensão, ocasionando o cisalhamento. Além disso, com a modificação no desenho do pino da ferramenta é possível ter um ganho de temperatura, como foi observado na Figura 3. A geometria dessa ferramenta cônica pode ser encontrada no Anexo B.

Figura 3- Ferramenta de aço VC 131

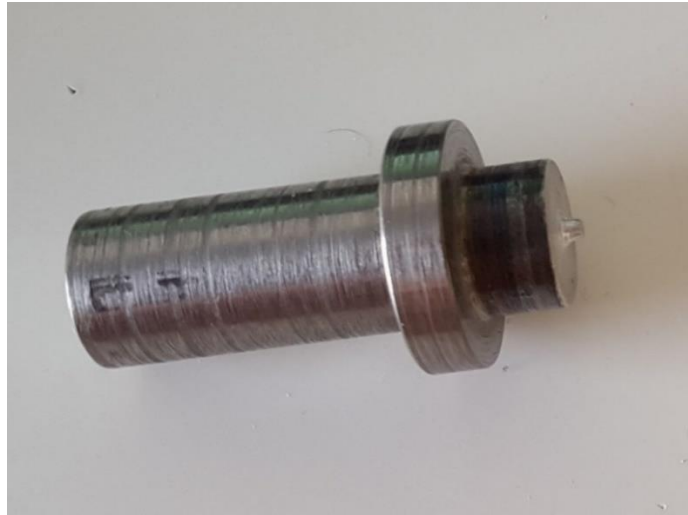


Fonte: Autoria própria (2018)

A nova ferramenta teve um ganho de volume e perda de aletas, para que a mesma pudesse trabalhar com um acúmulo maior de calor. O novo modelo permitiu que houvesse uma boa resistência aos esforços, porém o atrito presente não estava sendo suficiente e, ao invés de soldar as chapas, estava ocorrendo o corte das mesmas.

De acordo com a literatura, a relação geométrica entre ombro e pino deve ser de 3:1, mas com o descrito anteriormente, optou-se por dobrar o diâmetro do ombro da ferramenta, com uma nova relação entre ombro e pino de 6:1. Dessa forma, foi possível observar um aumento na área de contato e atrito entre a ferramenta e o material a ser soldado. Pode ser observado na Figura 9 a nova ferramenta desenvolvida e, no Anexo C, o desenho da mesma.

Figura 4-Ferramenta de aço VC 131, versão final



Fonte: Autoria própria (2018)

3.4 PROCESSO DE SOLDAGEM FSW

O equipamento que foi utilizado para realizar o processo de soldagem foi um centro de usinagem da DMG, modelo DMU 50 eco-line, que se encontra no Departamento de Materiais e Tecnologia da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – UNESP. Devido ao tipo de máquina, comando numérico computadorizado (CNC), foi atingido um ótimo controle do avanço e da rotação, conforme desejado, fixando-se assim, o primeiro, em 100mm/min, e realizada variações na rotação, com testes a 900, 1000, 1150 e 1250 RPM, conforme valores presentes nas Tabelas 2 e 3.

Figura 5- DMG DMU 50 eco-line.



Fonte: Interempresas (2018).

3.5 ENSAIO DE TRAÇÃO

Para o ensaio de tração foram retiradas três amostras diferentes, a primeira, referente ao material base e, as outras duas, das lâminas já soldadas a 1150 RPM e 1250 RPM, cortadas de forma que a solda estivesse no centro do corpo de prova.

O processo de corte das amostras foi realizado por meio de eletro-erosão a fio, da AGIECHARMILLES, modelo FW2U, não sendo necessário nenhum acabamento da superfície posteriormente, devido à precisão do corte utilizado.

As medidas da espessura e da largura na região útil foram retiradas, com o auxílio de um paquímetro digital da MITUTOYO, para se calcular a área da seção de cada corpo de prova obtido. Seguiu-se com o ensaio em um equipamento de tração da INSTRON, modelo 8801, sendo as amostras marcadas 12,5mm e 25mm abaixo e acima do centro, que foi utilizado como referência, ocorrendo assim a facilitação para medir-se o alongamento. O ensaio de tração realizado seguiu a norma ASTM E8M, com uma velocidade de deslocamento de 2mm/min.

3.6 ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS

O ensaio de micro dureza foi realizado, na chapa soldada a 1250 RPM, utilizando um equipamento de marca Wilson Instruments, modelo 401 MVD, na escala Vickers, com carga aplicada de 100g por um período equivalente a 10 segundos, utilizando-se da norma ASTM E384 como referência.

Foram realizadas medições do perfil de micro dureza na seção transversal da chapa soldada, englobando trinta e seis pontos, que abrangeram quatro diferentes áreas: o material base, a zona termo mecanicamente afetada de entrada, a zona termo mecanicamente afetada de saída e a região central da solda (*nugget*).

Em cada área foram realizadas nove impressões distintas, sendo três delas à espessura de 0,4mm abaixo da superfície superior e três delas 0,4mm acima da superfície inferior da chapa, além de três outros pontos na região central da espessura. Pode-se observar os pontos de microimpressões através do mapa apresentado na Figura 11.

Figura 11- Mapa dos pontos de identações de microdureza

	Metal Base	ZTA - Entrada da Ferramenta	Nugget	ZTA - Saída da Ferramenta	
Superior	• • •	• • •	• • •	• • •	
Centro	• • •	• • •	• • •	• • •	
Inferior	• • •	• • •	• • •	• • •	
	1 2 3	4 5 6	7 8 9	10 11 12	

Fonte: Autoria própria (2018).

3.7 PREPARAÇÃO METALOGRÁFICA

Uma amostra transversal, de uma polegada de largura, foi retirada da lâmina soldada a 1250 RPM, a partir do auxílio de uma serra de fita vertical. Na sequência, foi realizado o embutimento à quente em baquelite, com o uso de uma prensa adequada para o procedimento.

Iniciou-se, então, o processo de lixamento da amostra, de forma manual, utilizando-se água, através de uma combinação sequencial de lixas, sendo suas granulometrias: 100, 220, 320, 400, 600, 1000, 1200, 1500 e 2000 μm . A cada avanço nas lixas, as amostras eram giradas em 90°. O próximo passo foi o polimento, realizado em um feltro de 1 μm , utilizando-se pasta de diamante de granulometria de 6 μm , seguida da pasta de diamante de 1 μm e, posteriormente, após lavagem em água corrente, em pasta de sílica de 0,02 μm .

Para revelar a microestrutura do material, as amostras sofreram um ataque químico com ácido Keller, por 25 segundos sequenciais, com uma composição de 1ml de ácido fluorídrico (HF), 3ml de ácido clorídrico concentrado (HCL), 5ml de ácido nítrico concentrado (HNO₃) e 190 ml de água destilada (H₂O). Através de água corrente, por cerca de 1 minuto, houve o corte do ataque, com posterior secagem pelo uso de um secador convencional. Todo o processo realizado utilizou-se da norma ASTM E3.

3.8 MICROSCOPIA ÓPTICA

A partir da amostra obtida da chapa soldada a 1250 RPM, foi realizada a caracterização por meio de microscopia ótica, utilizando-se de luz polarizada para melhor visualização. Fez-se uso, nesta etapa, um microscópio ótico NIKON, modelo EPOPHOT200, com uma câmera digital ZEISS, modelo AxioCam ICC5, que pode ser observado na Figura 12.

Figura 12-Microscópio Ótico



Fonte: Autoria Própria (2018).

Foram realizadas imagens com diferentes ampliações: 100x, 200x, 500x e 1000x para cada área distinta da junta soldada, sendo elas: *nugget*, zona termicamente afetada e material base.

3.9 MICROSCOPIA ÓTICA DE REFLEXÃO

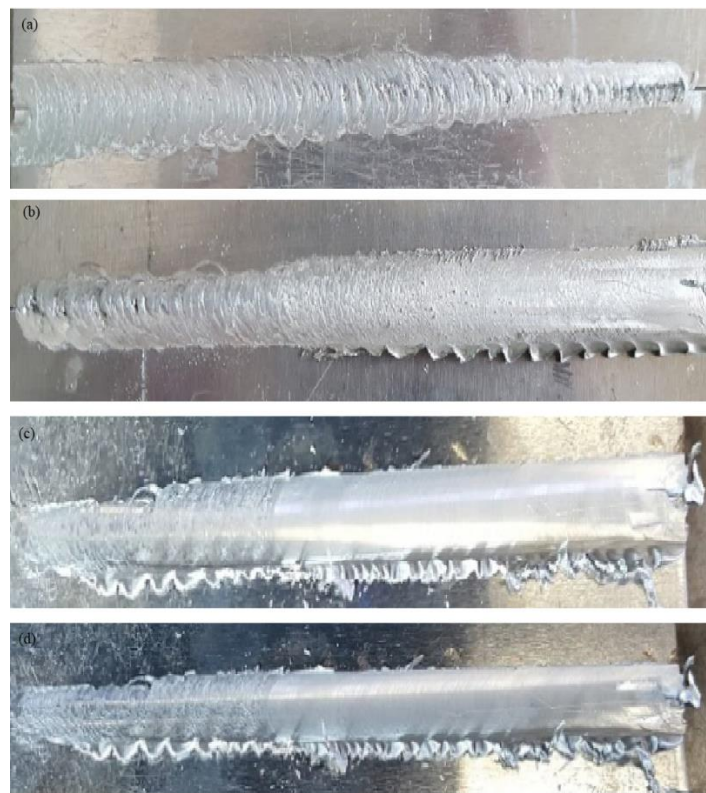
Com a amostra obtida através da chapa soldada a 1250 RPM, com a metalografia e o ataque químico por keller, foi realizada uma microscopia de varredura para visualização completa resultante do processo de soldagem FSW, por meio de um equipamento da marca ZEISS, modelo Axio Imager.Z2m, com uma câmera digital ZEISS, modelo AxioCam ICc 3. Foi realizada uma captura de toda a extensão da amostra a 50x, com ajuste de foco de imagem a cada quadrante, e também uma imagem da região central, englobando a área de transição do nugget para a zona termicamente afetada, com uma aplicação de 200x, com foco ajustado a cada quadrante.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 REALIZAÇÃO DAS SOLDAS

Realizaram-se testes em várias diferentes rotações e avanços, mas os resultados se apresentaram de forma mais satisfatória com o avanço mantido em 100 mm/min, em quatro rotações distintas, sendo elas: 900, 1000, 1150 e 1250 RPM. As soldas podem ser observadas na Figura 13, aonde os parâmetros foram eficazes.

Figura 13-Soldas realizadas (a) 900 RPM, (b) 1000RPM, (c) 1150 RPM, (d) 1250 RPM.



Fonte: Autoria Própria (2018).

É possível observar uma qualidade melhor de soldagem com o aumento da rotação da ferramenta. No primeiro caso, a 900 RPM, houve expulsão do material devido à ausência de penetração do ombro da ferramenta, caso em que este somente tangenciou as chapas. Já no segundo caso, a 1000 RPM, ocorreu penetração de 0,1mm do ombro da ferramenta, melhorando a junta soldada, porém ainda houve expulsão de material. Por fim, tanto na rotação de 1150 e 1250 RPM, houve um bom acabamento superficial, com uma mistura bem mais eficaz, a não ser pelo trecho inicial, devido ao empenamento das chapas, não sendo possível manter a penetração constante do ombro em 0,1mm em todo o comprimento do processo de soldagem.

4.2 ENSAIO DE TRAÇÃO

Das soldas realizadas a 1150 RPM e 1250 RPM, além do material base, foram preparados três corpos de prova de cada um, para o ensaio de tração, realizando-se posteriormente uma média para cada amostragem.

É importante ressaltar que para a solda efetuada a 1150 RPM houve uma desconsideração do ensaio de tração realizado, devido ao baixo valor encontrado, tanto de deformação, quanto de tensão, possivelmente pela mistura mecânica não ter se dado de forma correta, como pode ser observado na Figura 14.

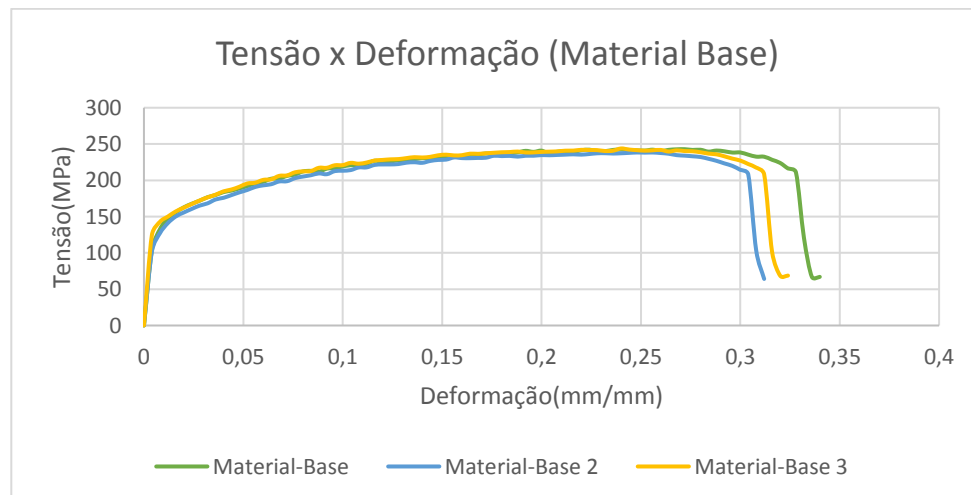
Nas Figuras 15 e 16 são encontradas as propriedades mecânicas do material base e, nas Figuras 17 e 18, as propriedades mecânicas da solda a 1250 RPM.

Figura 14- Falha Presente no Corpo de Prova da Solda 1150 RPM



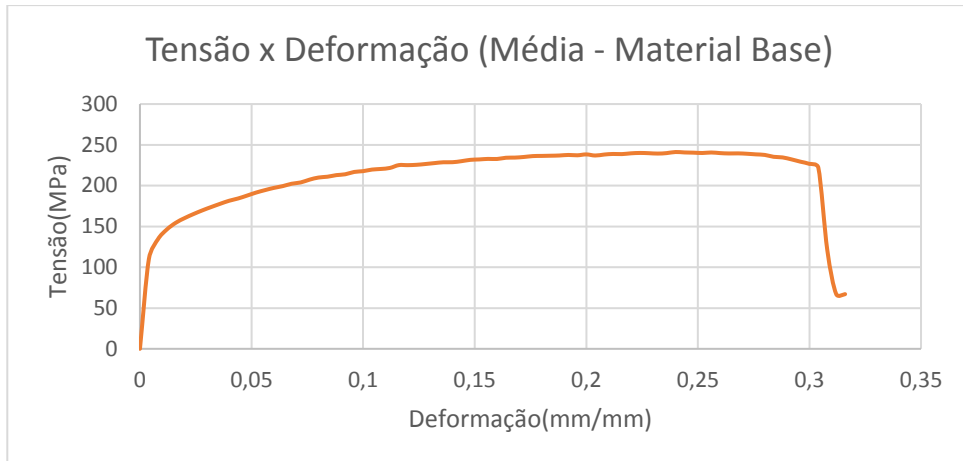
Fonte: Autoria Própria (2018).

Figura 15-Propriedades Mecânicas- Material Base



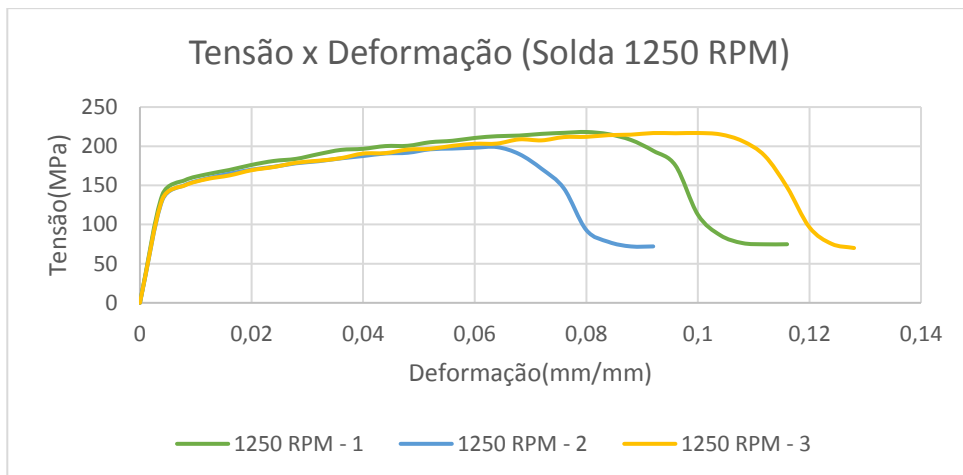
Fonte: Autoria Própria (2018).

Figura 16-Propriedades Mecânicas Médias - Material Base



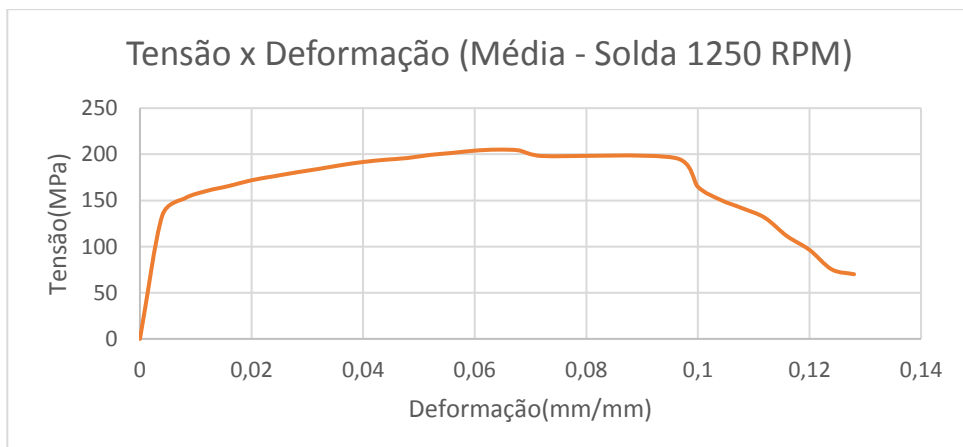
Fonte: Autoria Própria (2018).

Figura 17-Propriedades Mecânicas- Solda a 1250 RPM



Fonte: Autoria Própria (2018).

Figura 18-Propriedades Mecânicas Média - Solda a 1250 RPM



Fonte: autoria Própria (2018).

A partir dos gráficos anteriores, foi possível a criação da Tabela 6, onde são apresentadas as propriedades mecânicas do material base e da solda a 1250 RPM, de acordo com os valores máximos e os valores médios encontrados. Pode-se, então, observar uma queda nas tensões máximas e médias na solda a 1250 RPM, alcançando-se valores próximos à 90% e 87,6% do material base, respectivamente. E, através dos alongamentos obtidos, é perceptível a perda de ductibilidade que ocorreu no processo de soldagem a 1250 RPM em relação ao metal base.

Tabela 6- Propriedades Mecânicas Obtidas no Ensaio de tração

Amostra	σ_t (MPa)	$\sigma_{t(média)}$ (MPa)	Along. Máx. em 50mm(%)	Along. Médio em 50mm (%)
Material Base	242	241±2,11	32,4	31,6±1,06
Solda 1250 RPM	218	211±10,78	12,8	11,2±1,83

Fonte: Autoria Própria (2018).

É importante salientar que esta possível perda de resistência mecânica tenha se dado pela falta de penetração da ferramenta de solda, resultando-se assim em uma área menor que foi submetida aos esforços de tração realizados, devido à mistura mecânica não ter ocorrido em toda a espessura da chapa.

4.3 ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS

Foram realizadas medições de micro dureza na seção transversal da amostra, abrangendo a região central, as regiões de entrada e de saída da ferramenta, e o material base.

Através das dimensões da ferramenta foi possível referenciar as distâncias para a caracterização de cada área para o ensaio de micro dureza Vickers. Assim, o nugget foi definido através do diâmetro do pino da ferramenta, que tem o valor de 2,4mm, a zona termo mecanicamente afetada até as delimitações do ombro da ferramenta e, o material base, na extremidade máxima da amostra.

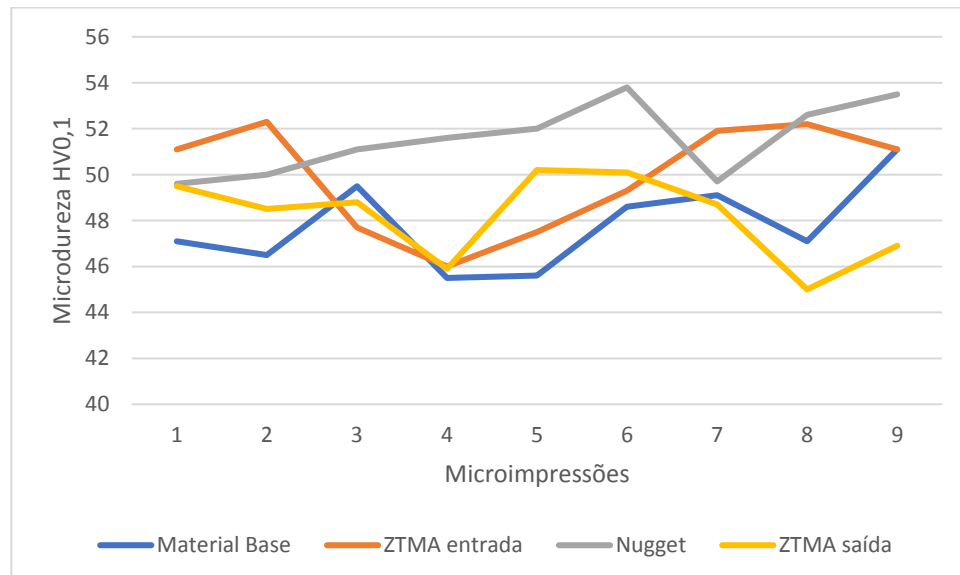
Tabela 7 – Valores de microdureza HV0,1 nas macrorregiões da chapa soldada

	Medida	Região Superior	Região Central	Região Inferior
Material Base	1	47,1	45,5	49,1
	2	46,5	45,6	47,1
	3	49,5	48,6	51,1
ZTMA (Entrada da Ferramenta)	4	51,1	46	51,9
	5	52,3	47,5	52,2
	6	47,7	49,3	51,1
Nugget	7	49,6	51,6	49,7
	8	50	52	52,6
	9	51,1	53,8	53,5
ZTMA (Saída da Ferramenta)	10	49,5	45,9	48,7
	11	48,5	50,2	45
	12	48,8	50,1	46,9

Fonte: Autoria Própria (2018).

A Tabela 7 exibe os valores de microdureza em cada ponto em que a mesma foi imprimida, onde pode-se verificar que a dureza máxima obtida na região do *nugget* foi de 53,8HV, enquanto a máxima dureza na região do material base foi de 51,1HV. É possível, também, visualizar a comparação gráfica entre os perfis de dureza obtidos através da Figura 19.

Figura 19 – Microdureza das regiões da solda FSW e metal base.



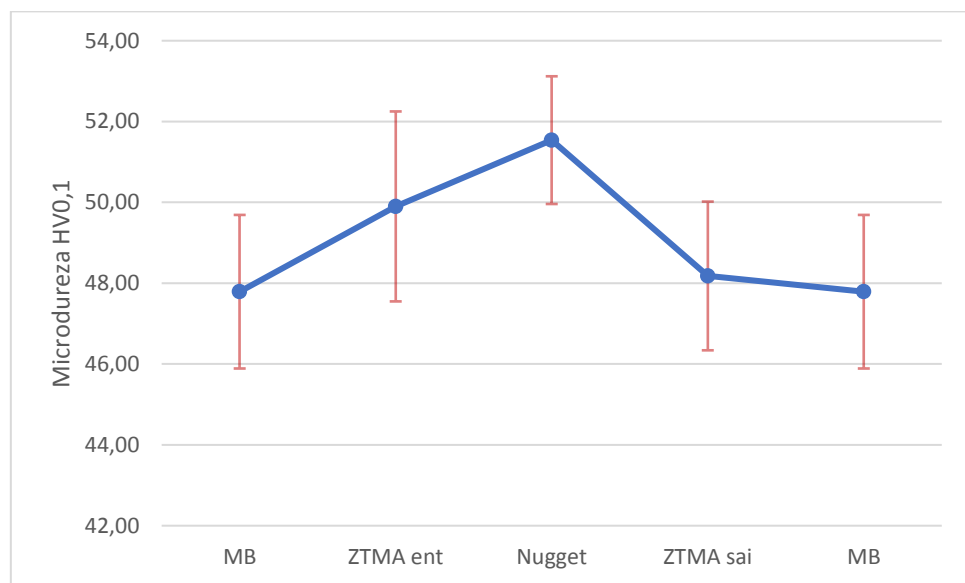
Fonte: Autoria própria (2018).

Tabela 8 – Valores médios de microdureza HV0,1 nas macrorregiões da chapa soldada

	Valor Médio	Desvio Padrão	Valor Mínimo	Valor Máximo
Material Base	47,79	1,90	45,50	51,10
ZTMA (Entrada da Ferramenta)	49,90	2,35	46,00	52,30
Nugget	51,54	1,58	49,60	53,80
ZTMA (Saída da Ferramenta)	48,18	1,84	45,00	50,20

Fonte: Autoria Própria (2018).

Figura 20 – Perfil de dureza da chapa soldada com desvio padrão amostral



Fonte: Autoria própria (2018).

A Tabela 8 e a a Figura 20 exibem os valores médios de microdureza e os respectivos desvios padrão em cada área e região na espessura, onde pode ser observado que a média da dureza na região do nugget resultou-se em $51,54 \pm 1,58 \text{HV}$, enquanto a média da dureza encontrada no material base foi de $47,79 \pm 1,90 \text{HV}$. Atenta-se aos baixos valores dos desvios padrão encontrado, indicando a elevada precisão e exatidão das medições.

É possível verificar que há um incremento no valor da dureza do metal base para o nugget, mesmo que pequeno, que corresponde à região de atuação do pino da ferramenta, isto

significa que ocorreu um encruamento, nesta área, devido à deformação localizada por trabalho mecânico.

As regiões ZTMA de entrada e saída da ferramenta apresentaram valores médios de $49,9 \pm 2,35\text{HV}$ e $48,18 \pm 1,84\text{HV}$, respectivamente. Ambos os valores, devido ao desvio padrão calculado, estão em conformidade com as características de dureza do material base, representando que não houveram modificações significativas em relação ao mesmo.

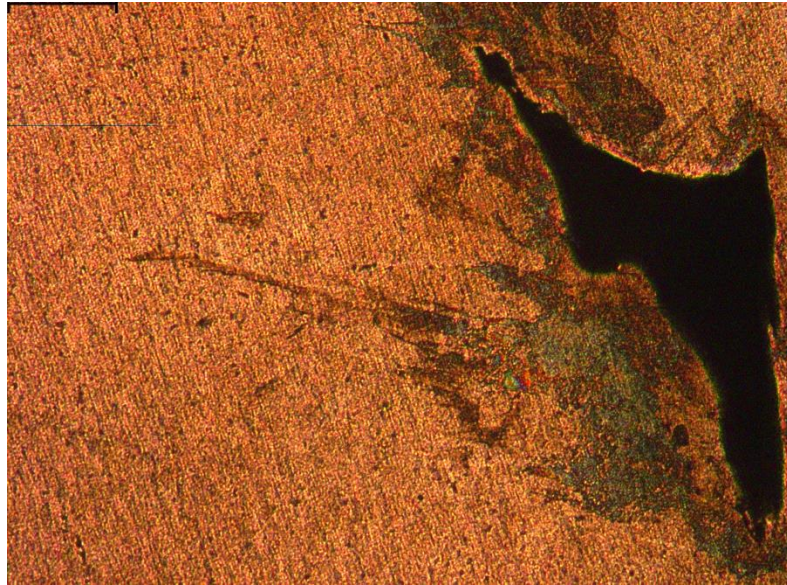
4.4 MICROSCOPIA ÓPTICA

As Figuras 21 a 25, caracterizam a amostra da solda a 1250 RPM, aonde é possível observar tanto as características do material base, quanto as características da solda pelo processo FSW. As micrografias foram obtidas com aumento de 50, 100, 200, 500 e 1000 vezes, variando os pontos de observação na mesma amostra: nas extremidades para o metal base, nas regiões intermediárias para observação da zona termicamente afetada, e na região central da amostra, onde ocorreu a mistura mecânica.

Foi possível observar com a metalografia a presença de precipitados, compostos intermetálicos, com vários tamanhos, formatos e com uma distribuição não homogênea. Sabe-se que pela composição das ligas de alumínio 3XXX, é possível afirmar que os dois principais precipitados intermetálicos que se encontram nas amostras são o $Al_{12}(Fe, Mn)_3Si$ e o $Al_6(Fe, Mn)$. A quantidade de um ou de outro depende apenas da composição química da liga. Pode ser observado os precipitados com a cor preta e formato mais esféricos, seria o composto intermetálico $Al_{12}(Fe, Mn)_3Si$, enquanto o precipitado mais claro e com formato elipsoide é o composto intermetálico $Al_6(Fe, Mn)$, e os pontos menores presentes na estrutura são dispersóides presentes na matriz (MARTINZ, 2014).

Pode-se também observar, a partir da Figura 21, a falha que foi gerada com a realização da solda, mostrando que a mistura mecânica não se deu completamente, mas ainda assim, sendo a menor falha encontrada nas rotações testadas.

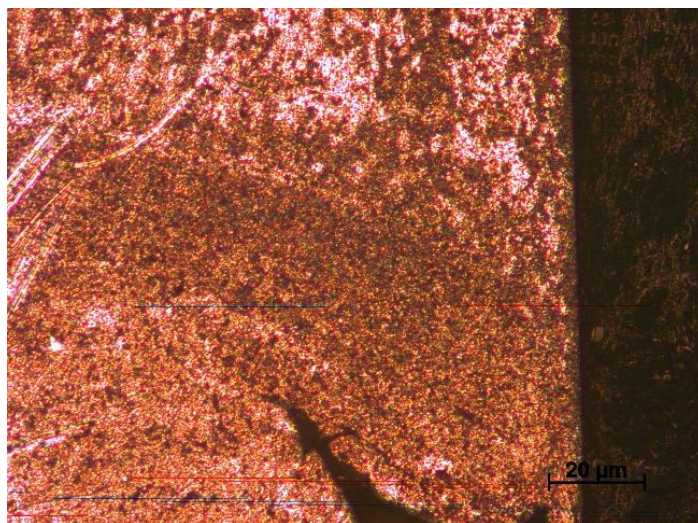
Figura 21 - Falha existente na amostra da solda a 1250 RPM (100x)



Fonte: Autoria Própria (2018).

Na Figura 22 foi possível observar a região de transição do material base e a solda realizada, podendo se perceber que a estrutura laminada foi perdida e, abaixo da Zona Termicamente Afetada (ZTA), foi gerada uma estrutura diferente devido ao fluxo de material pelo movimento rotativo da ferramenta. Quando comparado a outros processos de soldagem, a ZTA apresentada é pequena.

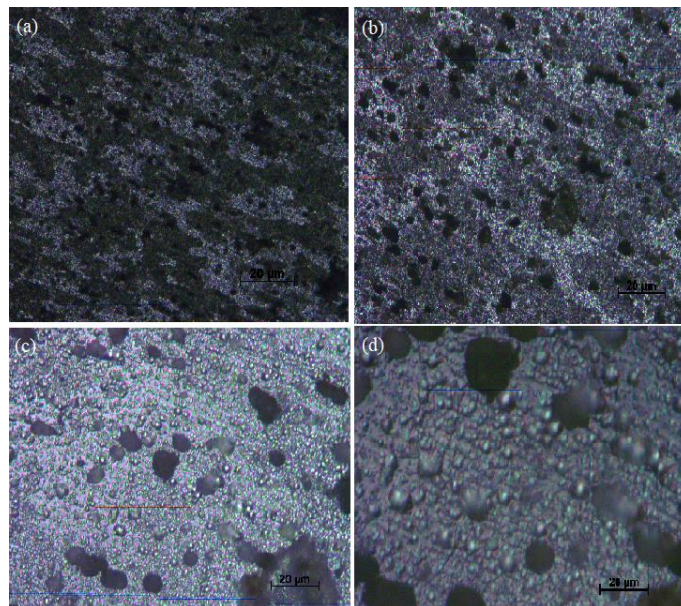
Figura 22- Região de transição entre solda e material Base (50x)



Fonte: Autoria própria (2018).

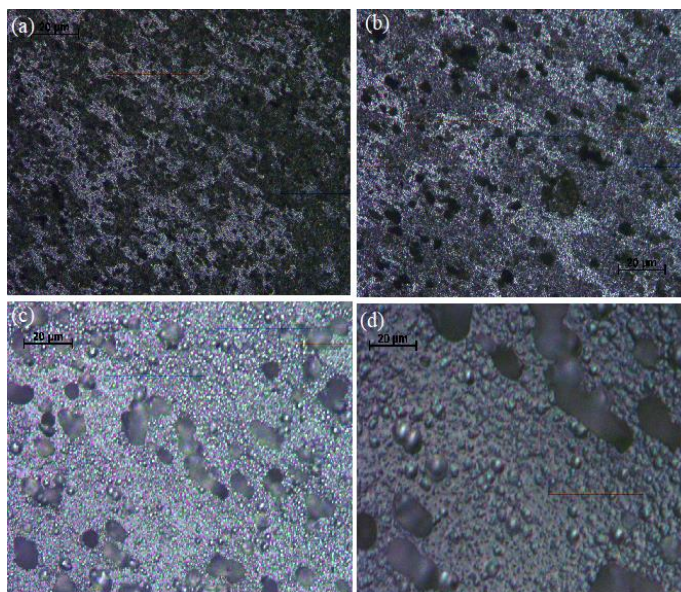
A partir das Figuras 23, 24 e 25 é possível comparar a região do material base, que possui uma estrutura mais achatada devido à laminação, à região de transição, que detém uma estrutura achatada, mas ao mesmo tempo com regiões disformes geradas pelo processo de soldagem. Na área central da solda (Nugget) pode-se observar que os grãos não possuem mais características do sentido de laminação que antes era apresentado no metal base, característico pela mistura realizada pelo processo FSW.

Figura 23- Região de Material Base (a) 100x, (b)200x, (c)500x e (d)1000x



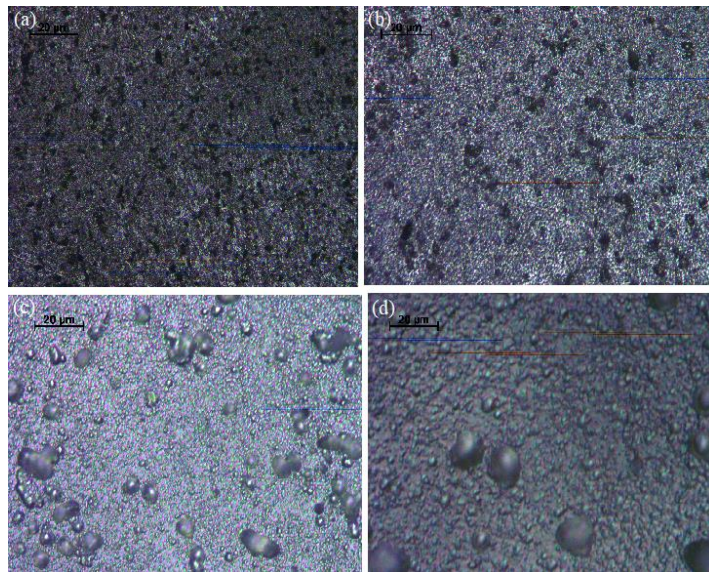
Fonte: Autoria Própria (2018).

Figura 24-Centro da solda a 1250 RPM (a) 100x, (b) 200x, (c) 500x, (c) 1000x



Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 25-Região de transição da solda a 1250 RPM (a) 100x, (b) 200x, (c) 500x, (d) 1000x



Fonte: Autoria própria (2018).

4.5 MICROSCOPIA ÓTICA DE REFLEXÃO

Através da Figura 26 obtida, pode-se observar toda a extensão da amostra transversal da solda, compreendendo-se, assim, a amplitude da falha na região central da chapa.

Figura 26- Corte transversal amostra a 1250 RPM com dimensões de 24x2,4mm (50x)



Fonte: Autoria própria (2018).

Pode-se, também, compreender mais claramente as regiões, como apresentado na Figura 27, aonde é possível encontrar uma região ao lado direito (Região A) que os grãos se apresentam de forma difusa (região do *nugget*), logo após uma marca de transição por onde limita a passagem do pino da ferramenta (Região B) e, então, uma área mais laminar, com propriedades ainda um tanto quanto difusas também (Região C), que seria a ZTMA de saída da ferramenta.

Figura 27 – Região de transição da solda a 1250 RPM (200x)



Fonte: Autoria própria (2018).

5 CONCLUSÕES

5.1 VERIFICAÇÃO DOS OBJETIVOS E RESPOSTAS ÀS QUESTÕES DA PESQUISA

A partir dos testes e ensaios realizados, com diferentes ferramentas e diferentes parâmetros, foi possível tirar as seguintes conclusões a respeito da solda *Friction Stir Welding* (FSW):

Para chapas de pequena espessura, como a utilizada neste trabalho, a relação entre o diâmetro do ombro e do pino da ferramenta de 3 para 1 não foi satisfatória, desta forma, foi necessário que se modificasse esta relação de modo que o ombro tivesse seu diâmetro dobrado, estabelecendo-se então a relação de 6 para 1. Isso se deve, principalmente, pelo ombro da ferramenta, quando utilizado para soldagem em chapas finas, ser o agente principal na geração de atrito, o que em chapas de maiores espessuras não ocorre, pois nestas o pino seria o principal agente para a realização do processo FSW.

Foi possível observar que, para os parâmetros de rotação ensaiados, não foi possível eliminar a falha de soldagem, fazendo com que a mistura não se desse por completo por toda a extensão da espessura. Uma possível solução para este problema seria modificar a velocidade de rotação, pois conforme a rotação foi aumentada, verificou-se que a falta de penetração da ferramenta na chapa laminada foi sendo sanada gradualmente. Também seria favorável utilizar-se de um equipamento, para a realização do processo FSW, com a capacidade de aplicar uma força axial e força de avanço que pudessem ser controladas, além de outros testes com a modificação da inclinação da ferramenta para aplicação direta nas chapas a serem soldadas.

Com relação ao teste de microdureza, verificou-se que houve um incremento de 7,85% do valor médio na região do *nugget* em relação ao material base aonde, considerando o desvio padrão de cada amostragem, ainda se apresentaria com maior valor. Isto ocorre devido ao encruamento do material, através de deformação localizada por trabalho mecânico. As regiões de entrada e saída da ferramenta da ZTMA não apresentaram valores significativos que diferissem do metal base quando considerados a média e o desvio padrão.

Apesar da perda de resistência mecânica que pode ser observada no ensaio de tração, a junta soldada a 1250RPM se aproximou bastante das características do metal, alcançando-se valores de tensões máximas e médias na ordem de 90% e 87,6% do material base, respectivamente. Houve, também, uma redução significativamente grande no alongamento da chapa soldada, com valores de 39,5% para o alongamento máximo, em relação ao material base, e 35,4% para o alongamento médio. o que pode ser explicado pelo aumento das discordâncias

e imperfeições, que impendem o escorregamento de planos atômicos, causando uma perda de ductibilidade. É importante salientar que os resultados estão diretamente ligados com a falta de penetração total da solda, que, com a falha, gerou um concentrador de tensão na junta.

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Conforme a justificativa, o presente estudo veio explorar uma área relativamente nova de pesquisa. Sendo assim, acredita-se que ainda existem muitos campos a serem cobertos relacionando os assuntos propostos com diversas aplicações.

Pode-se, por exemplo, reproduzir este estudo para união de materiais distintos, como também executar o processo com parâmetros que não foram discutidos neste trabalho, lê-se: forças axiais e de avanço; ou então trabalhar com diferentes geometrias e angulações da ferramenta visando uma possível otimização dos resultados.

REFERÊNCIAS

- ALCAN. **Manual de soldagem**. São Paulo: ALCAN Alumínio do Brasil, 1993. 141 p.
- AMERICA SOCIETY FOR METALS. Metals Handbook: **Welding, brazing and soldering**. Ohio: ASM International, 1995. 2873 p. v.6.
- BURFORD, D.; WIDENER, C.; TWEEDY, B. **Advances in friction stir welding for aerospace applications**. Disponível em: <<http://www.niar.wichita.edu/media/pdf/nationalpublication/Nov2-06.pdf>>. Acesso em: 23 set. 2018.
- CHEN, C. M.; KOVACEVIC, R. Finite element modeling of friction stir welding: thermal and thermomechanical analysis. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Richardson, v.43, p. 1319–1326, 2003.
- COOK, G. E. et al. Robotic friction stir welding. **Industrial robot: an international journal**, Nashville, v.31, n.1, p. 55–63, 2004.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 4. ed. São Paulo: Artliber editora Ltda, 2003. 248 p.
- DOBROVOLSKI, V. et al. **Elementos de Máquinas**. 3.ed. Moscou: Mir, 1980. 594 p.
- ERICSSON, M.; SANDSTROM, R. Influence of welding speed on the fatigue of friction stir welds, and comparison with MIG and TIG. **International Journal of Fatigue**, Estocolmo, v. 25, p. 1379–1387, 2003.
- GIPIELA, M. L. **Influência dos parâmetros de processo na geração de defeitos na soldagem FSW da liga de alumínio 5052**. 2007. 127 f. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Mineral) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2007.
- GUERRA, M. et al. Flow patterns during friction stir welding. **Materials Characterization**, Huntsville, v. 49, p. 95– 101, 2003.
- KALLEE, S. W.; NICHOLAS, E. D.; THOMAS, W. M. Friction stir welding invention, innovations and applications. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON JOINTS IN ALUMINUM, 8., 2001, Munich, Germany. **Proceedings...** Munich: Institut National Des Langues Et Civilisations Orientales – INALCO, 2001.
- KHALED, T. **An outsider looks at friction stir welding**. Disponível em: <http://www.faa.gov/aircraft/air_cert/design_approvals/csta/publications/media/friction_stir_welding.pdf>. Acesso em: 11 set. 2018.
- MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3.ed. Belo Horizonte: UFMG, 2005, 363 p.
- MISHRA, R. S. Friction stir processing technologies. **Advanced materials and process**. Rolla, v.161, p. 5, 2003.

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

NORMAN, A.F.; BROUGH, I.; PRAGNELL, P.B. High resolution EBSD analysis of the grain structure in an AA 2024 friction stir weld: aluminum alloys: their Physical and Mechanical Properties. **Materials Science Forum**, Uetikon-Zurich, v. 331-337, p. 1713 – 1718, 2000.

OLIVIECKI, N.J.; BESKOW, A.B. **Análise dos parâmetros do processo de solda por fricção em uma liga de alumínio**. 2013. Disponível em: <http://www.uricer.edu.br/site/pdfs/perspectiva/138_344.pdf>. Acesso em: 07 jul. 2018.

POTOMATI, F. **Avaliação da qualidade final de juntas dissimilares de ligas de alumínio 2024-6056 e 7075-6056 soldadas por FSW: friction stir welding**. 2006. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.

PRADO, R. A. et al. Self-optimization in tool wear for friction-stir welding of Al 6061 + 20% Al₂O₃ MMC. **Materials Science and Engineering A**, 349, p. 156-165, 2003.

SONG, M.; KOVACEVIC, R. Thermal modeling of friction stir welding in a moving coordinate system and its validation. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Richardson, v.43, p. 605–615, 2003.

SOUZA, G.S. **Influência da geometria da ferramenta na soldagem da liga de Alumínio 5052 pelo processo Friction Stir Welding**. 2010. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

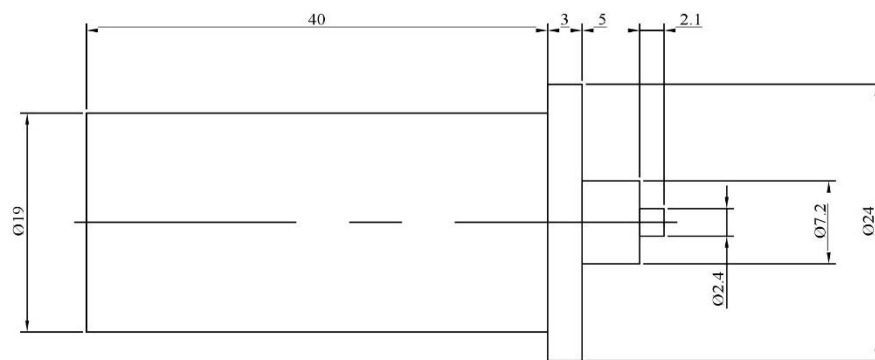
SQUILLACE, A. et al. A comparison between FSW and TIG welding techniques: modifications of microstructure and pitting corrosion resistance in AA 2024-T3 butt joints. **Journal of Materials Processing Technology**, Nápoles, v.152, p. 97–105, 2004.

TWI (Inglaterra). **THOMAS, W.N. et al.** Friction Stir Welding. ENG International patent application no. PCT/GB92/02203 and GB patent application no. 9125978.8, 1991.

TWI. **Friction stir welding: materials and thicknesses**. 2007. Disponível em: <http://www.twi.co.uk/j32k/unprotected/band_1/fswmat.html>. Acesso em: 10 out. 2008.

ZHAO, Y. et al. The influence of pin geometry on bonding and mechanical properties in friction stir weld 2014 Al alloy. **Materials Letters**, Harbin, v.59, p. 2948–2952, 2005.

APÊNDICE A – Ferramenta do processo FSW – Titânio



FEG

Nome: Renan Bazan

Numero:

Turma:

Professor: Marcelino Pereira do Nascimento

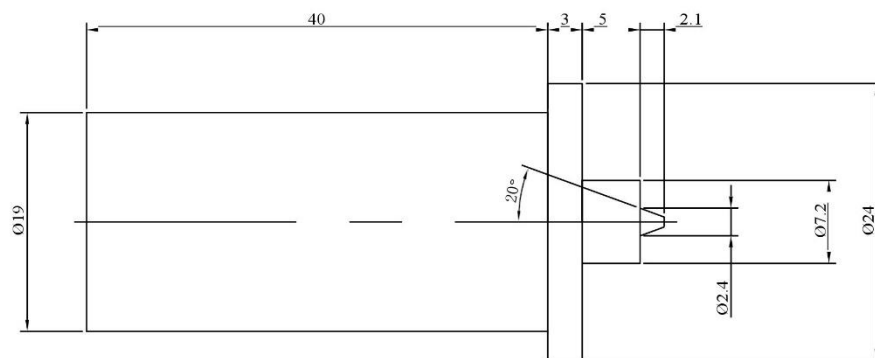
Escala: 2:1

Data:

Título: Ferramenta FSW

Folha nº:

APÊNDICE B – Ferramenta cônica de aço VC 131



FEG

Nome: Renan Bazan

Numero:

Turma:

Professor: Marcelino Pereira do Nascimento

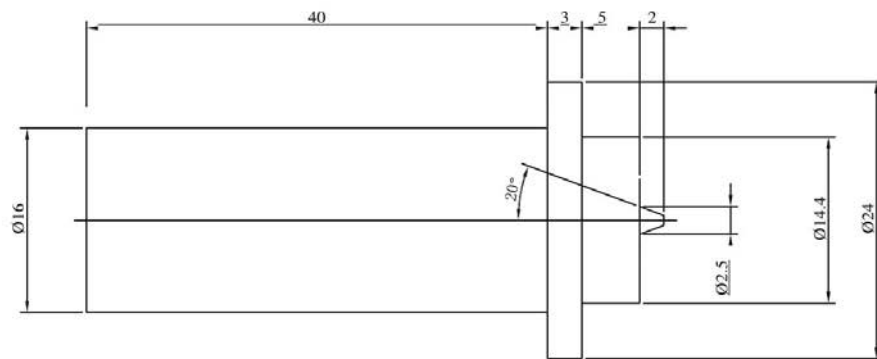
Escala: 2:1

Data:

Título: Ferramenta FSW- Ponta cônica

Folha nº:

APÊNDICE C – Ferramenta cônica de aço VC 131 (projeto final)



FEG

Nome: Renan Bazan

Numero:

Turma:

Professor: Marcelino Pereira do Nascimento

Escala: 2:1

Data:

Título: Ferramenta FSW- Ponta cônica

Folha nº: