

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO
GRANDE DO SUL - CAMPUS ERECHIM
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA MECÂNICA

Jonas Sachet

ANÁLISE DA SOLDAGEM DA LIGA AA 5083 PELO PROCESSO FSW

Erechim

2024

Jonas Sachet

ANÁLISE DA SOLDAGEM DA LIGA AA 5083 PELO PROCESSO FSW

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – campus Erechim como requisito para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica.
Orientador: Prof. Luciano Aparecido Kempinski
Coorientador: Prof. Arthur B. Beskow

Erechim

2024

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, expresso minha gratidão aos meus pais, Valdir e Marli, cujo apoio e orientação estiveram presentes em todas as fases da minha vida. Quero destacar que vocês foram essenciais em todas as realizações alcançadas até agora, e nunca encontrarei palavras suficientes para agradecer pela dedicação e empenho que demonstraram como pais.

Agradeço também aos meus irmãos, Julio e Julia, que sempre estiveram ao meu lado ao longo dessas etapas. Quero enfatizar o orgulho que sinto pela trajetória que estão construindo; vocês possuem um potencial incrível para alcançar grandes feitos.

Quero expressar minha gratidão à minha ex-namorada, Marina, que esteve constantemente ao meu lado, fornecendo apoio e compreensão em todas as situações em que precisei dedicar total atenção aos estudos. É importante ressaltar que você é uma pessoa maravilhosa e admirável.

Gostaria de expressar meu agradecimento a todos os amigos que fiz ao longo destes anos. Se fosse mencionar todos, ocuparia considerável espaço neste trabalho, mas, em particular, quero agradecer ao Felipe Salini, Ezequiel Balsanelo, Rafael Dlugokinski, Alysson Souza, entre tantos outros. Também quero estender meu agradecimento a todos os professores e colaboradores do IFRS Erechim, que dedicam suas carreiras à formação profissional de seus alunos. Em especial, agradeço ao professor Luciano Kempinski, que me auxiliou nesta etapa do Trabalho de Conclusão de Curso.

Agradecer em especial ao meu coorientador Professor da URI, Arthur Beskow que dispôs de seu tempo e empenho para me ceder conhecimento, e ajudar a realizar as soldas necessárias para este trabalho, além de realizar os ensaios de tração, dureza e dobramento presentes no trabalho devido a máquina do IFRS não estar funcionando.

E por fim agradecer à todas as pessoas que fizeram parte desta jornada do curso e também de minha vida.

RESUMO

O presente trabalho tem por finalidade a análise de duas ferramentas com geometrias diferentes (ombro espiral e ombro liso) pelo processo de soldagem FSW (Friction Stir Welding). Será realizado a soldagem de chapas da liga AA 5083 de 4mm de espessura, uma para cada ferramenta. Na sequência serão realizados ensaios de dureza e ensaios de tração, o ensaio de dobramento será tanto para a face da solda como para a raiz. Nos ensaios realizados foi possível obter: ensaio de tração o ombro espiral atingiu uma tensão máxima de 207,28 MPa ($\pm 24,23$ MPa); o ombro liso atingiu uma tensão máxima de 266,66 MPa ($\pm 14,41$ MPa); os ensaios de dureza ficaram todos acima da dureza do material base; no ensaio de dobramento, o ombro liso apresentou vazios internos comprometendo, os resultados do ensaio; para o ombro espiral foi possível que todos os corpos de prova conseguissem ser dobrados até os 150 graus, que é exigido pela norma de qualificação. Apenas o corpo de prova 7 teve um trinco superior a norma.

Palavras-chave: Soldagem por Fricção e Mistura Mecânica. Alumínio. AA 5083. FSW.

ABSTRACT

The purpose of this work is to analyze two tools with different geometries (spiral shoulder and smooth shoulder) using welding FWS (Friction Stir Welding) process. The welding will be realized in 4mm thick sheets of AA 5083, one for each tool. In the sequence hardness and tensile tests will be realized, the bending test will be carried out on both to weld face and the root. In the realized tests it was possible to obtain: on the tensile tests the spiral shoulder reached a maximum stress of 207,28 MPa ($\pm 24,23$ MPa); the smooth shoulder reached a maximum stress of 266,66 MPa ($\pm 14,41$ MPa); all the hardness tests were above the hardness base material; in the bending tests, the smooth shoulder presented internal voids compromising the tests results, for the spiral shoulder all the specimens were able to bent up to the 150 degrees required by the qualification standard. Only the specimen 7 had a higher latch than the standard.

Keywords: Friction Welding and Mechanical Mixing. Aluminum. AA 5083. FSW

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Desenho esquemático do processo FSW.....	17
Figura 2 – Principais parâmetros de FSW.....	18
Figura 3 – Parâmetros de soldagem no processo FSW.....	20
Figura 4 – Vários formatos de suporte.....	24
Figura 5 – Exemplos de projetos de ponta e ombro de ferramentas FSW.....	25
Figura 6 – Perfil de chapas unida por FSW.....	26
Figura 7 – Defeitos em cordões de solda FSW.....	28
Figura 8 – Centro de Usinagem CNC de três eixos, SKYBULL 600.....	30
Figura 9 – Suporte para fixação das chapas.....	31
Figura 10 – (A) Ferramenta com ombro espiral e em (B) Ferramenta com ombro liso.....	32
Figura 11 – Pino cônico.....	32
Figura 12 – Posicionamento dos corpos de prova e a correspondente indicação dos mesmos.....	33
Figura 13 – Durômetro Vickers.....	35
Figura 14 – Dimensões do corpo de prova.....	36
Figura 15 – Máquina universal de ensaios SHIMADZU.....	36
Figura 16 – Cutelo de dobramento.....	37
Figura 17 – Processo de Soldagem.....	38
Figura 18 – Ferramenta para soldagem, ombro espiral (Experimento Espiral).....	39
Figura 19 – Ferramenta com ombro liso.....	40
Figura 20 – Comparação entre as chapas.....	40
Figura 21 – Corpos de provas 08, (A) ferramenta ombro espiral e em (B) ferramenta ombro liso.....	41
Figura 22 – Distribuição dos pontos de dureza.....	42

Figura 23 – Experimento Liso, em (A) vista lateral do rompimento e em (B) vista superior em detalhe da região ensaiada.....	43
Figura 24 – Corpo de prova 12, (A) Ferramenta espiral e em (B) Ferramenta lis.....	45
Figura 25 – Corpos de prova, após realização do ensaio de tração do Experimento ombro Espiral.....	47
Figura 26 – Corpos de prova, após a realização do ensaio de tração do Experimento ombro Liso.....	48
Figura 27 – Corpos de provas após dobramento Experimento Espiral.....	50
Figura 28 – Corpo de prova 7, com a medição do tamanho da trinca.....	50
Figura 29 – Cp 06.....	52
Figura 30 – Corpos de provas após dobramento Experimento Liso.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação das ligas de alumínio.....	15
Tabela 2 – Classificação secundaria ligas de alumínio.....	16
Tabela 3 – Parâmetros do Experimento RT2.....	22
Tabela 4 – Parâmetros de soldagem utilizados no experimento JU2.....	23
Tabela 5 – Porcentagem dos Elementos Químicos (AA 5083).....	29
Tabela 6 – Propriedades Mecânicas (Norma).....	30
Tabela 7 – Ficha técnica do centro de usinagem SKYBULL 600.....	31
Tabela 8 – Parâmetros utilizados durante a soldagem.....	39
Tabela 9 – Valores ensaio de dureza Cps 1.....	42
Tabela 10 – Valores ensaio de dureza Cps 12.....	44
Tabela 11 – Valores do ensaio de tração Experimento Espiral.....	46
Tabela 12 – Resultados teste de tração ExpL1.....	46
Tabela 13 – Valores do ensaio de tração Experimento Liso.....	48
Tabela 14 – Valores Dobramento Experimento Espiral face.....	51
Tabela 15 – Valores Dobramento Experimento Espiral raiz.....	51
Tabela 16 – Valores Dobramento Experimento Liso face.....	53
Tabela 17 – Valores Dobramento Experimento Liso raiz.....	54

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	14
2.1	OBJETIVO GERAL	14
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
3.1	ALUMÍNIO E SUAS LIGAS	15
3.2	SOLDAGEM POR FRICÇÃO	17
3.3	MAQUINAS UTILIZADAS NO PROCESSO FSW	19
3.4	PARÂMETROS DO PROCESSO	19
3.4.1	<i>Penetração da ferramenta</i>	<i>20</i>
3.4.2	<i>Força axial.....</i>	<i>21</i>
3.4.3	<i>Inclinação da ferramenta</i>	<i>22</i>
3.4.4	<i>Velocidade de avanço.....</i>	<i>22</i>
3.4.5	<i>Rotação da ferramenta</i>	<i>23</i>
3.5	PERFIL DO SUPORTE (FERRAMENTA)	24
3.5.1	<i>Profundidade de penetração do ombro da ferramenta.....</i>	<i>26</i>
3.6	DEFEITOS FSW	27
4	METODOLOGIA.....	29
4.1	MATERIAL BASE.....	29
4.2	EQUIPAMENTO PARA A REALIZAÇÃO DO PROCESSO FSW	30
4.2.1	<i>Sistema de fixação das amostras.....</i>	<i>31</i>
4.3	FERRAMENTA DE SOLDAGEM	32
4.3.1	<i>Características</i>	<i>32</i>
4.4	OBTENÇÃO DAS AMOSTRAS.....	33
4.5	ANALISE METALOGRAFICA	34
4.6	ENSAIOS MECÂNICOS.....	34
4.6.1	<i>Ensaio de dureza</i>	<i>34</i>
4.6.2	<i>Ensaio de tração</i>	<i>35</i>
4.6.3	<i>Ensaio de dobramento.....</i>	<i>36</i>
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	38
5.1	PARÂMETROS E OMBRO DAS FERRAMENTAS.....	38
5.2	RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE METALOGRAFIA	41
5.3	RESULTADOS DE DUREZA	41
5.4	RESULTADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO	45

5.5	ENSAIO DE DOBRAMENTO	50
6	CONCLUSÕES	57
7	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	59
	REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

O ato de soldagem geralmente consiste no processo de unir duas peças, normalmente com adição de material, parecido com o material base. Temos dois processos mais utilizados na indústria atualmente: MIG/MAG (*Metal Inert Gas/Metal Active Gas*) e o Eletrodo Revestido. No processo MIG/MAG é utilizado um arame parecido com o material a ser soldado e um gás para proteção do arco elétrico, já o outro processo é utilizado um eletrodo com revestimento para fazer a proteção do arco elétrico.

Já no processo FSW (*Friction Stir Welding*), não precisa ser feita a proteção do arco elétrico e para o material fundido, pois esse processo é feito por fricção, não utilizando o arco elétrico, no caso a ferramenta penetra a peça com uma rotação predefinida e com isso vai aumentando a temperatura até chegar no estado plástico do material. Esse processo faz a mistura entre o material. Deixando o processo mais fácil de ser aplicado e com maior repetibilidade dos resultados.

Desenvolvido na década de 1990, na Inglaterra, o processo conhecido como Soldagem por Fricção e Agitação representou uma das mais significativas inovações tecnológicas na metalurgia da soldagem. Diferentemente dos métodos tradicionais de soldagem por arco elétrico, que envolvem fusão e frequentemente resultam em microestruturas com propriedades mecânicas inferiores, o FSW ocorre no estado sólido do material. Esse diferencial preserva as propriedades mecânicas da liga utilizada.

No processo de FSW, uma ferramenta de alta resistência mecânica, com um perfil apropriado, é posta em rotação, esse movimento rotacional gera atrito entre as peças a serem soldadas, provocando o aquecimento das mesmas. Esse calor gerado é suficiente para aumentar a ductilidade do material e promover a mistura das regiões adjacentes na junta de solda. É importante ressaltar que essa mistura ocorre no estado plástico do material, evitando a fusão completa. Portanto, o processo FSW não apenas oferece uma alternativa ao problema das baixas propriedades mecânicas frequentemente associadas aos métodos convencionais de soldagem, mas também

permite a união de peças sem os riscos e problemas associados à fusão completa do material.

Segundo Oliveira (2018) na criação do cordão de solda no processo de Soldagem por Fricção e Agitação (FSW), a ferramenta é submetida a consideráveis cargas axiais e transversais, resultando em desgaste devido ao atrito. Portanto, uma parte significativa dos investimentos em pesquisa e desenvolvimento é direcionada para projetos que visam geometrias mais eficientes, além de materiais que agreguem valor e tornem a relação custo/benefício mais favorável. Isso inclui o aumento da vida útil da ferramenta e a redução do tempo necessário para configurar o equipamento.

Para Reis (2021) na FSW, as uniões acontecem devido à energia friccional gerada por uma ferramenta rotativa e não consumível localizada na área da junta. Esse processo resulta em uma mistura mecânica dos materiais no estado sólido, devido ao calor gerado pelo atrito. Cada liga, ao ser unida no estado sólido por meio da Soldagem FSW, demanda um projeto de ferramenta específico e a ajustagem de parâmetros de maneira exclusiva. (MISHRA e MA, 2005).

Uma das principais vantagens deste processo é que existe a possibilidade de unir diversos materiais, obtendo excelentes propriedades mecânicas na junta soldada, pelo fato de não ocorrer fusão, segundo ABAL (2006), a ausência de fusão nesses processos elimina defeitos, como porosidades, bolhas, rebaixos, inclusões e microestruturas indesejáveis, que frequentemente aparecem na solda e nas zonas afetadas pelo calor, em processos de soldagem por fusão.

Segundo vários autores como Lopes (2017), Müller (2021) e Oliveira (2018), um dos principais parâmetros para obter uma junta de boa qualidade neste processo é a geometria da ferramenta a ser utilizada. Que posteriormente é o principal fator que define uma qualidade final do produto.

De acordo com DA SILVA (2016), a forma do ombro e do pino tem sido meticulosamente pesquisada e desenvolvida, visando expandir as possíveis aplicações da técnica. Isso se deve ao fato de que a geometria da ferramenta desempenha um papel fundamental na determinação da qualidade do produto final. No caso do ombro, existem diferentes formatos, incluindo planos, côncavos e usinados, enquanto o pino pode apresentar variações como cônicos, cilíndricos, com ou sem rosca, e até mesmo rosqueados com canais. Essas variações são

cuidadosamente estudadas e projetadas para ampliar as áreas de aplicação da técnica.

Por tanto, como podemos entender a FSW tem a especificidade que a ferramenta é um requisito importante do processo, a influência da mesma, afeta drasticamente nas propriedades obtidas dos materiais. Por esse motivo iremos fazer a comparação entre duas ferramentas: ombro liso e ombro espiral, na chapa de liga AA 5083 de 4 mm de espessura.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Analisar as propriedades mecânicas na soldagem da liga AA 5083 de 4 mm pelo processo FSW, usando dois tipos de ferramentas.

2.2 Objetivos Específicos

Para cumprir o objetivo geral é necessário cumprir os seguintes objetivos específicos.

- Realizar o processo de soldagem FSW com a ferramenta de ombro espiral;
- Realizar o processo de soldagem FSW com a ferramenta de ombro liso;
- Obter os corpos de provas padronizados;
- Realizar ensaios macrográficos e de dureza no material base;
- Desenvolver os ensaios mecânicos de tração e dobramento;
- Analisar os resultados obtidos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo estão descritas o desenvolvimento das tecnologias. Também abordaremos a evolução deste processo industrial e por final mostraremos a diferença entre as ferramentas e quais iremos usar.

3.1 Alumínio e suas ligas

O alumínio emergiu como o metal mais amplamente utilizado na indústria recente, devido à sua baixa densidade e alta resistência mecânica. Uma vantagem significativa desse metal é a capacidade de reciclagem; aproximadamente 90% do alumínio presente em automóveis pode ser recuperado e reutilizado, proporcionando benefícios tanto ambientais quanto econômicos. (SANGALLI, 2018).

A nomenclatura das ligas de alumínio, referida como séries, abrange os números de 1xxx a 8xxx, dependendo da composição química de cada liga. A série 1xxx se destaca das demais por representar ligas de alumínio puro. Nessa série, o segundo dígito indica as impurezas presentes, sendo 0 indicativo de impurezas naturais do processo de fabricação. Os terceiro e quarto dígitos indicam o percentual de alumínio, além dos 99% já presentes nessa série. Por exemplo, uma liga de alumínio AA 1070 possui um percentual de alumínio de 99,70%, sendo o restante composto por impurezas do processo. (ABNT, 2006, NBR 6834). A Tabela 1 apresenta a classificação do alumínio com base no elemento de liga predominante.

Tabela 1 – Classificação das ligas de alumínio.

Série	Elemento de liga
1xxx	Alumínio - Al \geq 99%
2xxx	Cobre - Cu
3xxx	Manganês - Mn
4xxx	Silício - Si
5xxx	Magnésio - Mg
6xxx	Magnésio/Silício (Mg/Si)
7xxx	Zinco - Zn
8xxx	Outros elementos

Fonte: Sangalli (2018).

Além do sistema de classificação por séries, as ligas de alumínio recebem uma classificação adicional quando são submetidas a tratamento térmico ou deformação mecânica durante o processo produtivo, o que altera suas propriedades. Um caractere maiúsculo é utilizado para identificar o tipo específico de tratamento térmico ou deformação ao qual a liga de alumínio foi submetida (ALMEIDA, 2013).

Ainda temos a tabela 2 que mostra a classificação conforme o tratamento térmico ou deformação mecânica.

Tabela 2 – Classificação secundária ligas de alumínio.

Designação	Tipo	Descrição
F	Como fabricado	Aplica-se a produtos fabricados por deformação à frio, à quente ou fundição, onde nenhum controle especial foi empregado sobre as condições térmicas ou endurecimento pelas deformações ocorridas.
O	Recozido	Aplica-se a produtos que passaram por recozimento a fim de obter-se redução da resistência mecânica e a produtos fundidos para aumentar a ductilidade e estabilidade dimensional.
H	Endurecido por deformação	Indica que o produto teve sua resistência mecânica aumentada através de encruamento, com ou sem tratamento térmico posterior.
W	Tratamento térmico de solubilização	Aplicável às ligas cuja resistência espontaneamente modifica-se em temperatura ambiente durante um período de meses ou mesmo anos após tratamento térmico de solubilização. Esta designação só é válida quando especificar o período de duração do envelhecimento natural.
T	Tratamento térmico de solubilização	Aplicável às ligas cuja resistência estabiliza-se em um período de até algumas semanas após a realização de tratamento térmico de solubilização. Se as propriedades se estabilizam em temperatura ambiente, diz-se que a liga é envelhecida naturalmente. Caso o material seja submetido à temperatura, diz-se envelhecido artificialmente.

Fonte: Sangalli (2018).

Dentro do âmbito desta pesquisa, a série 5xxx é caracterizada pelo magnésio como seu principal elemento de liga. Esta série é empregada em aplicações que demandam uma resistência mecânica considerável, aliada a uma excelente resistência à corrosão. Encontra vasta aplicação na fabricação de componentes para vasos de pressão e caldeiras, cascos de navios, painéis de automóveis, tanques de

armazenamento, entre outros. (FULLER et al., 2002; TOROS et al., 2008; LEAL, 2015).

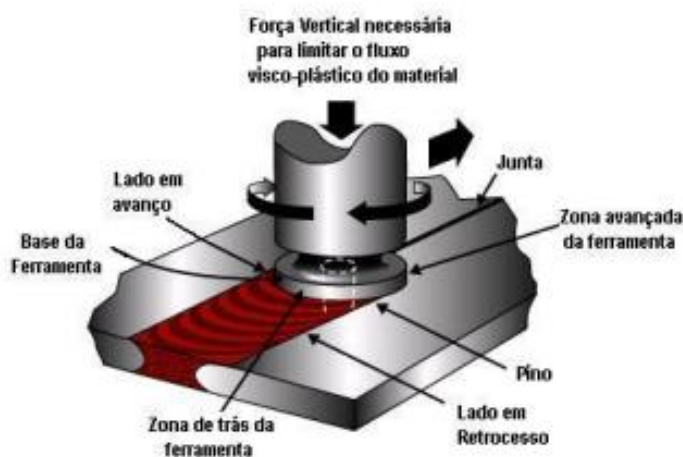
A série 5xxx faz parte de um grupo significativo de ligas não tratáveis termicamente, que exibem a melhor combinação de resistência mecânica, resistência à corrosão e ductilidade. Elas apresentam propriedades mecânicas intermediárias entre as ligas da série 3xxx e as ligas das séries 2xxx, 6xxx e 7xxx, que são conhecidas por sua alta resistência. A presença de magnésio nestas ligas permite manter um nível elevado de ductilidade, juntamente com uma excelente resistência à corrosão e boa soldabilidade (HATCH, 2005).

3.2 Soldagem por fricção

O processo FSW se destaca por superar muitos problemas associados as técnicas tradicionais de soldagem em chapas. É um método que produz soldas de alta qualidade em materiais que apresentam dificuldades para serem soldados pelos métodos tradicionais, ultimamente bastante utilizado em chapas de alumínio.

Como podemos ver na Figura 1, temos a ferramenta em rotação penetrando a chapa com um avanço pré-determinado, geralmente o avanço utilizado no eixo Z da máquina é bem baixo para fazer com que o atrito vá gerando calor até chegar na temperatura suficiente, onde a ductilidade do material aumenta e promove a mistura das regiões adjacentes na junta de solda.

Figura 1 – Desenho esquemático do processo FSW.



Fonte: AIRES (2007).

De acordo com Mishra e Ma apud Verástegui (2012) o processo FSW reduz as distorções em chapas finas de maneira mais eficaz do que os métodos de soldagem convencionais, uma vez que a união dos materiais ocorre sem atingir o ponto de fusão.

Segundo Junior *et al* (2013), a energia térmica gerada pelo atrito leva à têmpera dos materiais a serem unidos, os quais passam por uma intensa deformação plástica devido à ação da ferramenta rotativa. O movimento dos materiais ao redor do eixo de soldagem promove a "interação" dos materiais no estado sólido a serem unidos, resultando na soldagem efetiva após o resfriamento.

De acordo com Murari (2017) para realizar a Friction Stir Welding, é essencial manter controle sobre os parâmetros de soldagem. Existem diversas variáveis envolvidas, que podem ser categorizadas em: tipo de junta, propriedades dos materiais a serem unidos, máquina-ferramenta e ferramenta de soldagem. Qualquer modificação desses parâmetros afeta diretamente as características finais do processo. Como a figura 2 pode mostrar, além dos parâmetros citados por Murari, temos as 3 principais variáveis.

Figura 2 – Principais parâmetros de FSW.



Fonte: Murari (2017).

3.3 Máquinas utilizadas no processo FSW

Nos primeiros estudos documentados na literatura, máquinas dedicadas exclusivamente ao processo FSW não eram comuns. Em vez disso, ferramentas como fresadoras de Controle Numérico Computadorizado (CNC), centros de usinagem e até mesmo fresadoras universais eram frequentemente modificadas para esse propósito. Embora atualmente existam máquinas desenvolvidas especificamente para o processo FSW, ainda persiste a prática de adaptar máquinas CNC e usar braços robóticos para essa finalidade (ALMEIDA, 2015).

As máquinas projetadas ou modificadas para o processo FSW geralmente compartilham uma característica fundamental: a robustez. Isso se deve à necessidade de suportar consideráveis esforços mecânicos gerados durante o processo, especialmente na direção perpendicular à superfície de contato da ferramenta, além das forças decorrentes do movimento rotativo e de avanço da ferramenta (HILLER, 2007; ALMEIDA, 2015).

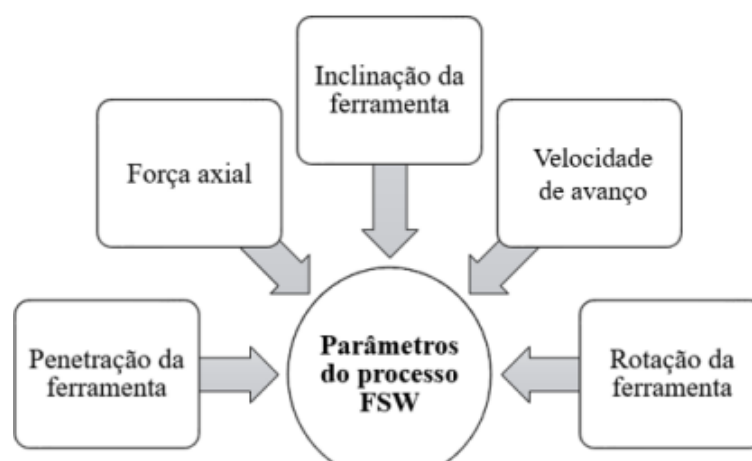
O custo elevado das máquinas especializadas em soldagem por atrito e mistura mecânica tem levado a um aumento na adaptação de braços robóticos, anteriormente empregados em processos de soldagem por fusão. Isso permite manter a precisão das soldas tridimensionais, mas em equipamentos mais acessíveis economicamente (COOK et al., 2004). Por outro lado, certas máquinas desenvolvidas para o processo FSW podem ser adaptadas para realizar trabalhos de fresamento, bastando substituir o conjunto de ferramentas. Isso permite a integração de diferentes processos em um único equipamento (KUKA, 2017a).

3.4 Parâmetros do processo

Os parâmetros no processo de soldagem por atrito e mistura mecânica têm um impacto significativo na quantidade de calor transferido para o metal base. Esse excesso de calor pode resultar em degradação excessiva das propriedades e da microestrutura do alumínio. Além disso, ao soldar materiais dissimilares, é crucial controlar cuidadosamente a quantidade de calor aplicada ao metal base (CAPELARI e MAZZAFERRO, 2009).

Segundo Mishra e Ma (2005), nos processos FSW, os parâmetros de soldagem são cruciais para garantir a qualidade da junta soldada. Como pode ser visto na figura 3.

Figura 3 - Parâmetros de soldagem no processo FSW.



Fonte: Sangalli (2018).

3.4.1 Penetração da ferramenta

A penetração da ferramenta depende do comprimento do pino e do ângulo de inclinação escolhido. Se o comprimento do pino exceder a espessura da chapa, o ombro da ferramenta não terá contato adequado com a junta a ser soldada. Isso leva a uma diminuição na temperatura de soldagem e reduz a pressão exercida pelo ombro sobre a junta, frequentemente resultando em soldas defeituosas (CAPELARI e MAZZAFERRO, 2009; OLIVIECKI e BESKOW, 2013).

Segundo Fioravanti (2008), a penetração da ferramenta é determinada pela pressão aplicada sobre o material na parte posterior da ferramenta durante a soldagem, sendo uma função do comprimento do pino e do ângulo de inclinação adotado. Quando o pino é maior do que o necessário para o processo, ocorre um contato insuficiente do ombro com o material base. Essa falta de contato resulta em uma solda defeituosa devido à insuficiência de calor durante o processo.

Assim, para obter uma solda adequada, é crucial que o comprimento do pino esteja na faixa de 80 a 99% a menos que a espessura do material base, enquanto o

diâmetro do pino deve ser aproximadamente três vezes menor que o diâmetro do ombro (CAPELARI,2009).

3.4.2 Força axial

A força exercida durante o processo tem um impacto direto na quantidade de calor envolvida e pode resultar em defeitos na junta soldada. Quando a máquina de solda não possui um método para controlar ativamente essa força, isso pode levar à diminuição da qualidade da junta e a defeitos na superfície do material soldado e (OLIVIECKI e BESKOW, 2013).

A força axial exerce uma influência significativa na geração de calor durante a soldagem e na formação de defeitos. Segundo Kim *et al.*, 2006, para cada valor de força axial, existem velocidades de rotação e de avanço apropriadas que garantem uma solda sem defeitos. Quanto maior a força axial, maior é o intervalo de condições ideais para uma junta FSW sem falhas. No entanto, uma força axial elevada resulta em uma maior formação de rebarbas. Na Figura 17 ilustra como foi realizada uma soldagem em uma chapa de 4 mm de espessura, com uma velocidade de rotação de 1450 RPM e um avanço de 20 mm/min.

Conforme Murugan e Dinaharan (2009), o calor de fricção, gerado entre o ombro da ferramenta e a superfície das chapas a serem soldadas, é influenciado pelo coeficiente de atrito resultante da força axial. A combinação do calor de fricção e da forja do material plastificado são elementos essenciais para formar uniões. Quando essa condição é alcançada durante o processo de soldagem, a junta adquire resistência. O aumento da força axial também implica um aumento na geração de calor por atrito. Menos calor é gerado com forças axiais inferiores a 4 kN e 5 kN, mas ainda o suficiente para consolidar o material. Aplicar forças axiais inferiores resulta em microvazios, causando desgaste. O calor gerado aumenta quando as forças axiais ultrapassam o nível desejado, situado entre 7 kN e 8 kN. Forças axiais mais elevadas provocam uma maior penetração da ferramenta na superfície da chapa soldada.

3.4.3 Inclinação da ferramenta

O ângulo de inclinação da ferramenta em relação ao eixo da peça, até certo limite, contribui para a consolidação da solda devido ao aumento do esforço de forjamento exercido pelo ombro da ferramenta, especialmente na parte traseira. Isso ajuda a diminuir a presença de descontinuidades por falta de material no núcleo da solda, (Souza, 2010). Neste trabalho como a soldagem será realizada por um centro de usinagem de 3 eixos, não possuiremos inclinação na ferramenta.

Segundo Silvestrini (2018), que realizou uma solda com a inclinação de 3 graus na ferramenta, utilizou um braço robótico articulado de 6 eixos modelo YS165G3, com a tentativa de aumentar a força, ocorreu a ruptura do pino de soldagem, provavelmente devido ao excesso de força gerado pelos parâmetros adotados. O pino foi realocado, e a avaliação da qualidade da soldagem no experimento RT2 não pôde ser realizada. Os parâmetros estão detalhados na Tabela 8.

Tabela 3 - Parâmetros do Experimento RT2.

Ângulo de inclinação (°)	Velocidade de rotação (rpm)	Velocidade de avanço (mm/min)	Velocidade e de penetração (mm/min)	Posição do ombro programada (mm)	Tempo de aquecimento (s)	Altura do pino (mm)	Sentido de rotação
3	1900	40	5	-8	25	2,6	Anti - Horário

Fonte: Silvestrini (2018).

Como pode ser observado, a inclinação nesse caso gerou um excesso de força, podendo ser por questões também de avanço de ferramenta, pouco tempo de aquecimento, ou mesmo muita RPM (rotações por minutos).

3.4.4 Velocidade de avanço

A velocidade de avanço representa a distância percorrida pela ferramenta em uma unidade de tempo. Ela tem uma relação inversa com a geração de calor durante

o processo de soldagem. Ou seja, baixas velocidades de avanço resultam em maior produção de calor, enquanto velocidades mais altas geram menos calor por unidade de comprimento da solda (OLIVIECKI e BESKOW, 2013).

Segundo Flores (2016), que realizou vários experimentos levando em consideração a velocidade de avanço, JU2 (experimento 2) utilizou o avanço de 30 mm/min (liga 5052), com o intuito de diminuir o tempo que o material fica exposto ao atrito da ferramenta durante o processo.

Tabela 4 - Parâmetros de soldagem utilizados no experimento JU2.

Ângulo de inclinação (°)	Velocidade de rotação (rpm)	Velocidade de avanço (mm/min)	Velocidade de penetração (mm/min)	Penetração do ombro (mm)	Tempo de aquecimento (s)	Altura do pino (mm)	Sentido de rotação
0	1450	30	8	0,4	60	6,2	Anti - Horário

Fonte: Flores (2016).

Após a conclusão dos testes de dureza, os corpos de prova 3P, 6P, 9P e 12P foram usinados para os ensaios de tração uniaxial. Em comparação com o metal base, todos os corpos de prova exibiram uma tensão de escoamento significativamente inferior, com uma média de 90,94 MPa, isso devido a tempera do material (FLORES,2016). Sequência de corpos de prova do Flores são iguais a deste trabalho.

3.4.5 Rotação da ferramenta

A quantidade de calor gerada durante o processo de soldagem está diretamente relacionada à velocidade de rotação da ferramenta, medida em rotações por minuto (rpm). Em geral, quanto maior a velocidade de rotação e menor a velocidade de avanço, maior será o calor gerado pela solda devido ao atrito entre a ferramenta e a peça de trabalho.

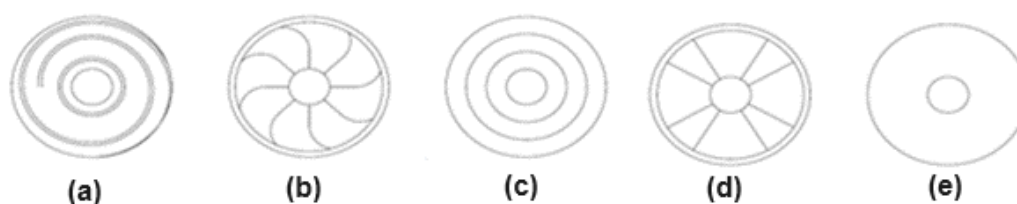
Durante a união por meio do processo FSW, a ferramenta está sujeita a condições extremas de desgaste devido ao atrito, ao calor e às forças de reação causadas pela deformação do material. No entanto, é imperativo que a ferramenta

seja incrivelmente rígida e resistente para suportar as elevadas temperaturas do processo. Além disso, ela deve ter excelente resistência à oxidação e baixa condutividade térmica para minimizar a perda de calor e evitar a propagação do calor até a máquina ferramenta (SOUZA,2010).

3.5 Perfil do suporte (ferramenta)

Segundo Junior (2013) diversos tipos de perfis de suporte estão disponíveis e são projetados para atender às diversas necessidades de materiais a serem unidos e às condições específicas do processo. O perfil do suporte desempenha uma função mecânica crucial, agindo como uma ferramenta de conformação do material, ao mesmo tempo em que desempenha um papel na gestão das rebarbas geradas durante a soldagem. Uma abordagem inovadora envolve o uso de ferramentas com reentrâncias negativas, nas quais o material, em seu estado de fluidez plástica, se encaixa. Isso resulta na expulsão de uma quantidade menor de material para fora da zona de contato, aprimorando assim a qualidade da junta de solda e reduzindo a formação de rebarbas. A Figura 4 (a, b, c, d) apresenta alguns modelos de perfis com reentrâncias, enquanto a Figura 4 (e) exibe um suporte convencional com superfície plana. No trabalho em questão usaremos dois tipos de ferramentas (a) e (e).

Figura 4 – Vários formatos de suporte.



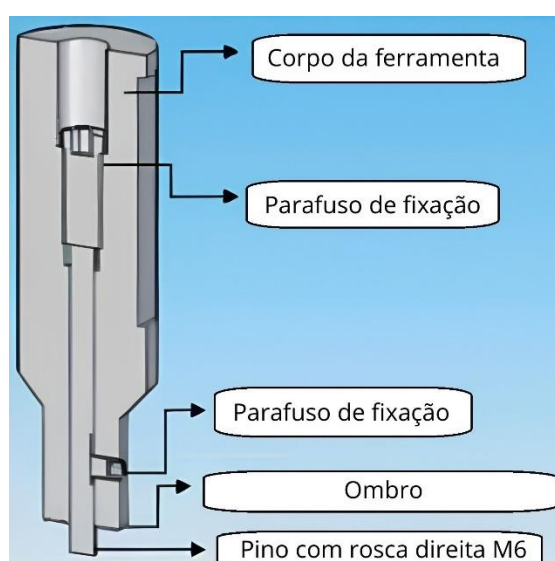
Fonte: Adaptado de Junior 2013.

O suporte (a) na figura acima apresenta uma superfície plana que inclui reentrâncias negativas, dispostas em um padrão espiral em relação ao eixo de simetria da ferramenta. Essas reentrâncias foram projetadas para absorver o volume

de material que normalmente seria expelido para fora da área do suporte, evitando assim a formação de pequenas rebarbas.

Já o suporte (e) na figura acima é o mais frequentemente encontrado no estudo do processo FSW. Ele consiste em uma superfície plana ou côncava, projetada para minimizar a quantidade de material expelido do suporte, resultando em uma melhoria na qualidade da solda. Será apresentado a seguir na figura 5, o corpo da ferramenta.

Figura 5 - Exemplos de projetos de ponta e ombro de ferramentas FSW.



Fonte: Adaptado de OLIVIECKI (2013).

No processo FSW em ligas de alumínio, tem a capacidade de gerar até quatro zonas microestruturais diferentes. (KHALED,2005 apud GENICOLO,2007):

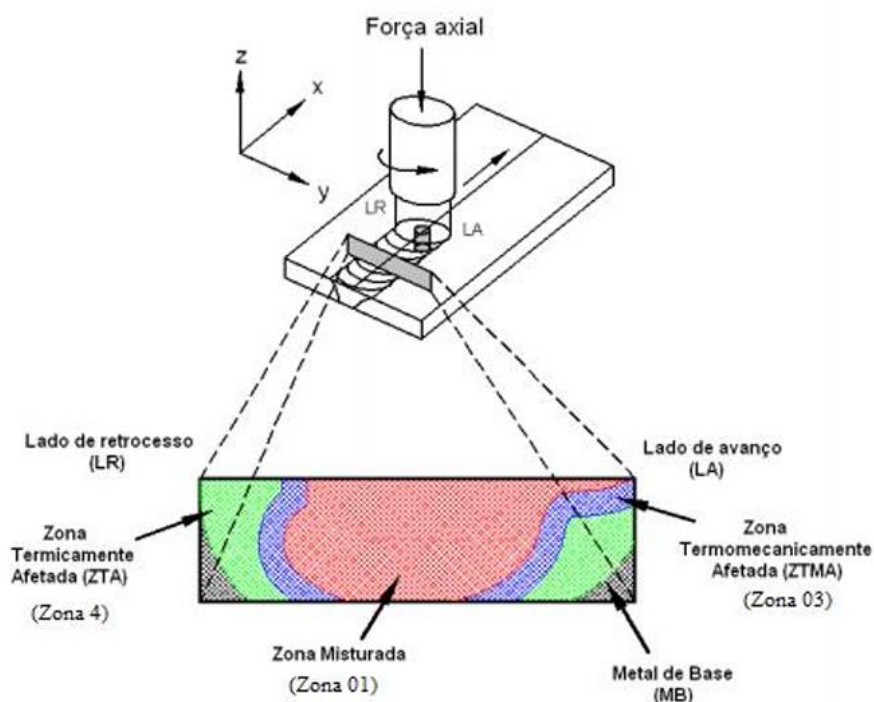
Zona 1 - O termo "Nugget" refere-se à região central da solda, que é o local por onde o pino passa, geralmente caracterizado por grãos finos recristalizados. Embora a tradução mais próxima em português para "nugget" seja a palavra "grão", optou-se por manter o termo em inglês neste texto para evitar conflito com a mesma palavra utilizada na metalurgia com um significado diferente.

Zona 2 - Esta é a área de contato do ombro, caracterizada por uma zona de deformação com uma extensa área e uma profundidade limitada.

Zona 3 - Zona Termomecanicamente Afetada, localizada imediatamente adjacente à região do "Nugget", onde o material não foi diretamente cisalhado pela ferramenta, mas ainda assim sofreu deformação durante sua passagem.

Zona 4 - Região Afetada Termicamente - Esta área apresenta degradação térmica, mas não sofreu deformação plástica.

Figura 6 – Perfil de chapas unida por FSW.



Fonte: SILVESTRINI (2018).

3.5.1 Profundidade de penetração do ombro da ferramenta

A profundidade de penetração da ferramenta depende do comprimento do pino e do ângulo de inclinação adotado. Ela determina a pressão exercida sobre o material na parte posterior da ferramenta durante o processo de soldagem. Se o comprimento do pino exceder a espessura da chapa, o ombro da ferramenta terá pouco contato com a superfície a ser soldada. Isso reduz a temperatura de soldagem e a pressão exercida pelo ombro sobre a chapa, frequentemente resultando em soldas defeituosas (OLIVIECKI e BESKOW, 2013).

De acordo com Fioravanti (2008), o comprimento ideal do pino é aquele que impede o contato com o suporte de fixação abaixo da chapa e, ao mesmo tempo, permite uma pressão adequada do ombro sobre a superfície da chapa. Isso resulta em uma solda com penetração total para um determinado ângulo de inclinação.

A falta adequada de penetração do pino da ferramenta e o desalinhamento desta em relação à linha de junta são as principais causas da maioria dos defeitos de raiz. Esses defeitos são particularmente desafiadores de serem identificados e têm uma influência significativa nas propriedades mecânicas do material, conforme destaca Hiller (2007).

3.6 Defeitos FSW

No método de soldagem por fricção e mistura (FSW), a ocorrência de defeitos é relativamente baixa em comparação com os processos convencionais de solda. Alguns dos parâmetros cuja aplicação inadequada pode resultar em defeitos incluem a geometria da ferramenta, a velocidade de rotação e de avanço, as dimensões do pino, o espaçamento entre as chapas a serem soldadas e o ângulo de ataque. (MARCONATO, 2009).

Vazios internos, conforme ilustrado na Figura 7, são falhas potenciais no processo de soldagem por fricção e mistura (FSW). Essas imperfeições se apresentam na forma de um túnel longitudinal na área onde ocorreu a mistura mecânica do material. Geralmente, são ocasionadas por velocidades de avanço excessivas, falta ou excesso de tensão axial e uma geometria inadequada do pino. A presença desse defeito resulta em uma redução significativa das propriedades mecânicas da junta soldada (MARCONATO, 2009).

Figura 7 – Defeitos em cordões de solda FSW.



Fonte: Marconato (2009).

4 METODOLOGIA

Neste capítulo, são descritos os procedimentos adotados na condução da parte experimental deste estudo. O capítulo atual está estruturado em seções que abrangem desde a apresentação dos materiais e equipamentos empregados, bem como a infraestrutura desenvolvida para a realização do trabalho, até a execução de testes preliminares para a determinação dos parâmetros de soldagem, análises metalográficas, ensaios de dureza, ensaios de tração e testes de dobramento.

4.1 Material base

Foram utilizadas chapas de alumínio, com dimensões de 300 mm de comprimento, 100 mm de largura e 4 mm de espessura, liga AA 5083, que possui como principal elemento o magnésio, conforme apresentado na tabela 5.

Tabela 5 - Porcentagem dos Elementos Químicos (AA 5083)

Elemento	Mínimo	Máximo
Si	0,00	0,40
Fe	0,00	0,40
Cu	0,00	0,10
Mn	0,40	1,00
Mg	4,00	4,90
Cr	0,05	0,25
Zn	0,00	0,25
Ti	0,00	0,15
Outro	0,00	0,05
Al	Restante	Restante

Fonte: Metalthaga (2023).

Nesta Tabela 6 apresenta-se os valores médios das propriedades mecânicas para a liga estudada.

Tabela 6 - Propriedades Mecânicas (Norma).

Propriedade mecânica	Unidade	Mínimo/Máximo
Limite de escoamento $R_{p0,2}$	(MPa)	110-130
Limite de Resistência' à tração R_m	(MPa)	230-290
Alongamento	(%)	10-15
Dureza HB	(2,5/62,5)	68-78

Fonte: Metalthaga (2023).

4.2 Equipamento para a realização do processo FSW

Ultimamente máquinas como centro de usinagem estão sendo modificados para serem utilizadas com sucesso no desenvolvimento de pesquisas no processo FSW. Os centros de usinagem podem ser facilmente adaptados para a execução de soldas por FSW por possuírem características úteis ao processo, como rigidez estrutural, e uma grande gama de velocidades de avanço e de rotações que podem ser desenvolvidas pela máquina.

Neste trabalho o equipamento utilizado para a realização da solda, foi um centro de usinagem de três eixos (X,Y,Z) da marca Deb'Maq, serie Diplomat modelo Skibull 600, como mostra a Figura 8.

Figura 8 – Centro de Usinagem CNC de três eixos, SKYBULL 600.



Fonte: O AUTOR.

Este equipamento possui estrutura robusta, porém é muito exigido para poder realizar esta solda. Na Tabela 7 mostra as suas principais características.

Tabela 7 - Ficha técnica do centro de usinagem SKYBULL 600.

Item	SKYBULL 600	Unidade
Potência do fuso	7,5 - 11	kW
Potência eixo Z	4	kW
Potência eixo X	2	kW
Potência eixo Y	3,5	kW
Velocidade rotação fuso	50 - 8000	rpm
Avanço rápido eixos X, Y e Z	24000	mm/min
Avanço trabalho eixos X, Y e Z	1 - 5000	mm/min

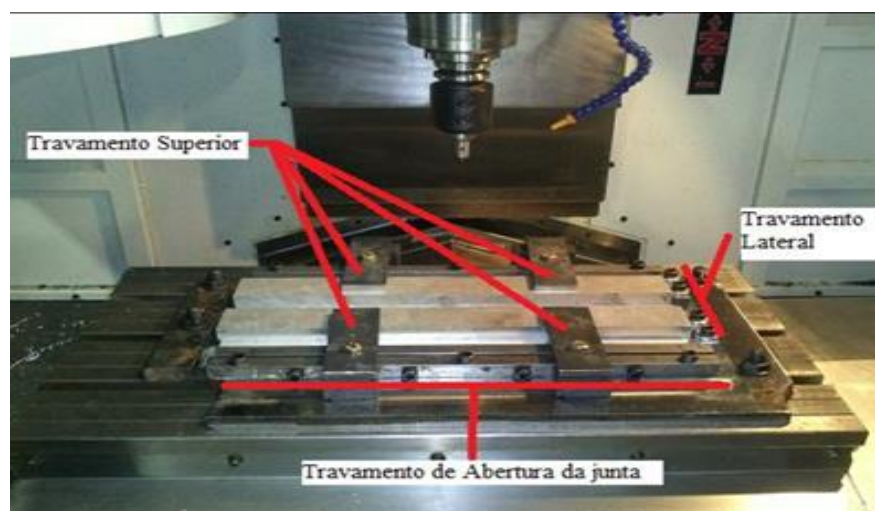
Fonte: O AUTOR.

4.2.1 Sistema de fixação das amostras

O suporte utilizado para fixar as chapas durante o processo de soldagem foi planejado para evitar qualquer deslocamento das peças, tanto no sentido transversal quanto no sentido da soldagem, bem como na direção vertical, que poderia ser causada pela pressão lateral das chapas ou pelo movimento do pino no final da solda.

O mecanismo de fixação precisa ser resistente para resistir à força exercida pela ferramenta, tanto na direção longitudinal quanto na transversal. O dispositivo utilizado, desenvolvido por Vettori (2014), é apresentado na Figura 9.

Figura 9 - Suporte para fixação das chapas.



Fonte: SEGATTI (2011).

4.3 FERRAMENTA DE SOLDAGEM

4.3.1 Características

As ferramentas utilizadas nos experimentos apresentam um ombro com diâmetro de 18 mm, acompanhado por um chanfro de $2 \times 45^\circ$. Uma dessas ferramentas possui uma superfície com estrias em espiral, enquanto a outra possui uma face plana.

Como apresentado neste trabalho, iremos utilizar duas ferramentas diferente, como mostra a Figura 10.

Figura 10 – (A) Ferramenta com ombro espiral e em (B) Ferramenta com ombro liso.



Fonte: O AUTOR.

Além do ombro, o pino utilizado tem uma forma cônica rosqueada, com 6 mm de diâmetro na base, 4 mm de diâmetro na ponta e um comprimento efetivo de 6,2 mm. Ele possui um perfil de rosca M6, com sentido direito, ao longo de toda a sua extensão. Tanto o ombro quanto os pinos das ferramentas são fabricados em aço AISI D6.

Figura 11 – Pino cônico.



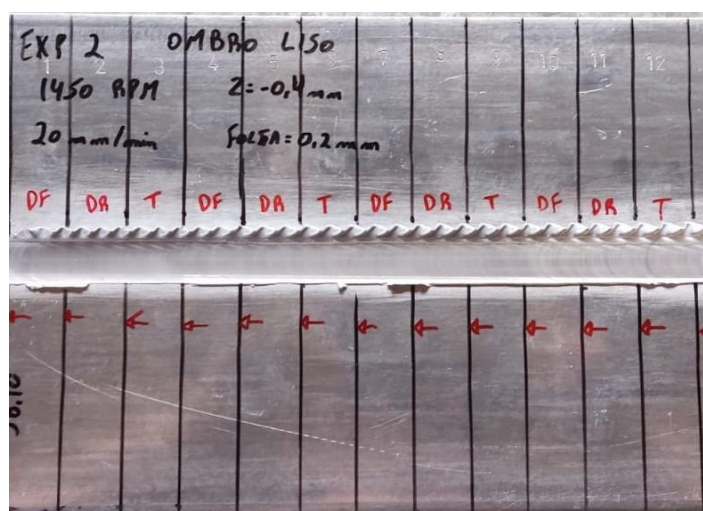
Fonte: O AUTOR.

4.4 Obtenção das amostras

Com o objetivo de avaliar as propriedades da solda ao longo da junta, foram fabricados quatro corpos de prova para cada tipo de ensaio mecânico (tração, dobramento de face e dobramento de raiz) de cada amostra soldada, uma para cada ferramenta. Todos os corpos de prova para a análises macrografias.

De acordo com as diretrizes da Norma ISO 25239-4:2011 para Soldagem por Fricção com Agitação - Alumínio - Especificação e Qualificação de Procedimentos de Soldagem, os primeiros e últimos 50 mm de cada solda foram eliminados. Contudo, os ensaios mecânicos foram conduzidos ao longo de toda a extensão da amostra soldada. Mesmo na presença de defeitos no início ou no final da solda, está ainda pode ser considerada válida. Como é apresentado na Figura 12.

Figura 12 - Posicionamento dos corpos de prova e a correspondente indicação dos mesmos.



Fonte: O AUTOR.

Como podemos observar na chapa acima soldada, as amostras 1,4,7,10 serão utilizadas para o dobramento de face, já as amostras 2,5,8,11, utilizaremos para o dobramento de raiz no final as amostras 3,6,9,12 usaremos para realizar os ensaios de tração. Exatamente como está marcado na Figura 12.

4.5 Análise metalográfica

Com a finalidade de avaliar a qualidade da solda por meio da macroestrutura do material, foram conduzidos ensaios metalográficos em todas as juntas soldadas.

Para conduzir o ensaio, as amostras das juntas soldadas foram preparadas por meio de cortes transversais. Inicialmente, as amostras foram submetidas a um processo de lixamento com lixas de carbetto de silício de granulometria 220, 320, 400 e 600. Posteriormente, foram tratadas com um reagente composto por um terço de água destilada, um terço de ácido nítrico (HNO₃) e um terço de ácido clorídrico (HCl). As macrografias foram capturadas por um scanner para análise (scanner de uma impressora).

4.6 Ensaios mecânicos

Os ensaios mecânicos são procedimentos utilizados para avaliar as propriedades mecânicas dos materiais. Entre eles, destacam-se o ensaio de tração, que mede a resistência à tração do material; o ensaio de dobramento, que avalia a ductilidade e a flexibilidade; e o ensaio de dureza, que mensura a resistência à penetração. Esses ensaios proporcionam informações cruciais sobre a força, elasticidade, tenacidade e outras características mecânicas dos materiais.

4.6.1 Ensaio de dureza

O ensaio de dureza é uma técnica empregada para avaliar a resistência de um material à deformação plástica permanente, geralmente causada por indentação ou penetração. Ele fornece informações valiosas sobre a capacidade do material em resistir a riscos, abrasões e deformações durante processos de fabricação, ajudando a determinar sua durabilidade e adequação para determinadas aplicações.

Existem vários métodos de dureza, como Vickers, Brinell e Rockwell, cada uma aplicando diferentes cargas e métodos de medição. No ensaio de dureza, um penetrador é pressionado contra a superfície do material com uma força específica. A

profundidade ou a largura da indentação resultante é medida e usada para calcular a dureza do material.

Foi empregado um dispositivo da Digimess, modelo HV-30, conforme ilustrado na Figura 13, operando na escala HV10. O teste envolveu a aplicação de uma carga de 10 kgf por um período de dez segundos, Figura 22 mostra a distribuição dos pontos de dureza.

Figura 13 – Durômetro Vickers.



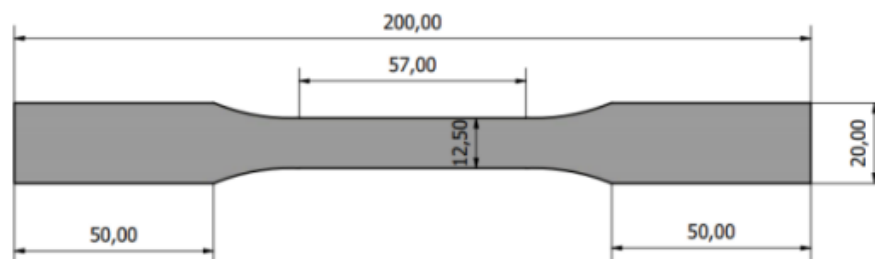
Fonte: FLORES (2016).

4.6.2 Ensaio de tração

Um ensaio de tração envolve submeter um corpo de prova a uma carga de tração gradual até sua ruptura. Durante esse ensaio, são medidas propriedades mecânicas do material, incluindo tensão de ruptura, tensão de escoamento, máxima tensão antes da ruptura, e comportamento durante deformações elásticas e plásticas (PRESOTTO, 2013).

Para cada chapa soldada, foram preparados corpos de prova para ensaios de tração, seguindo as diretrizes da ABNT NBR 7549:2008 - Alumínio e suas ligas - Produtos laminados, extrudados e fundidos - Ensaio de tração. Esses corpos de prova foram fabricados na direção transversal à solda. O propósito era determinar o limite de resistência à tração, a tensão de escoamento e o alongamento percentual do material após a soldagem. Isso permitiu avaliar as perdas de resistência do material soldado em relação ao seu estado original. Na Figura 14 podem ser observadas as dimensões do corpo de prova.

Figura 14 – Dimensões do corpo de prova.



Fonte: Muller (2021).

Equipamento utilizado para realização dos ensaios de tração, foi máquina universal de ensaios, da fabricante SHIMADZU, que pode ser vista da Figura 15.

Figura 15 – Máquina universal de ensaios SHIMADZU.



Fonte: O AUTOR.

4.6.3 Ensaio de dobramento

Logo após é realizado ensaio de dobramento envolve a aplicação de uma deformação plástica por flexão a um corpo de prova. Este corpo de prova é posicionado sobre dois apoios distantes a uma medida de 50 mm, em seguida, dobrado usando um cutelo. O cutelo aplica uma força de flexão no centro do corpo até que o ângulo de dobramento desejado seja alcançado, geralmente 90°, 120° ou 180° (INFOSOLDA, 2013). O equipamento empregado para este ensaio é idêntico ao mostrado na Figura 13, exceto pela modificação da garra de tração para incorporar o

cutelo de dobramento, conforme ilustrado na Figura 16. O cutelo utilizado possui um diâmetro de 19 mm.

Figura 16 – Cutelo de dobramento.



Fonte: O AUTOR.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são expostos os resultados das soldagens, ensaios de tração, macrografias, micro dureza e de dobramento realizados nas soldas, tanto aquelas com ombro espiral (Experimento Espiral) como na com ombro liso (Experimento Liso).

5.1 Parâmetros e Ombro das Ferramentas

Dado que o propósito deste estudo foi empregar o processo FSW na liga AA 5083 e identificar as potenciais alterações na solda resultante entre o ombro espiral e ombro liso, o trabalho teve início com a soldagem de duas chapas de alumínio da referida liga, utilizando o processo FSW. Nesse método, é a própria fricção da ferramenta contra a peça que gera o calor necessário para a realização da solda.

A execução das soldas ocorreu nas instalações do Laboratório de Usinagem da URI Câmpus II, e os parâmetros empregados no processo estão detalhados na Tabela 8, foram usados os mesmos parâmetros para os dois experimentos. Esses parâmetros têm sido empregados de maneira bem-sucedida no processo FSW, como demonstrado na Figura 17, onde é possível observar o andamento do processo de soldagem.

Figura 17 - Processo de Soldagem.



Fonte: O AUTOR.

Neste contexto, "ombro espiral" indica que a parte da ferramenta que entra em contato com o material durante o processo de soldagem possui uma configuração em espiral ou rosqueada, conforme Figura 18.

Figura 18 – Ferramenta para soldagem, ombro espiral (Experimento Espiral).



Fonte: O AUTOR.

Tabela 8 – Parâmetros utilizados durante a soldagem

Descrição		Unidade
Tempo de aquecimento	60	segundos
Comprimento do pino	3,4	mm
Penetração do ombro na peça	0,4	mm
Velocidade de penetração na peça	10	mm/min
Sentido de rotação	Anti-horário	
Velocidade de avanço da ferramenta	20	mm/min
Velocidade de rotação da ferramenta	1450	rpm
Inclinação da ferramenta	0	graus

Fonte: O AUTOR.

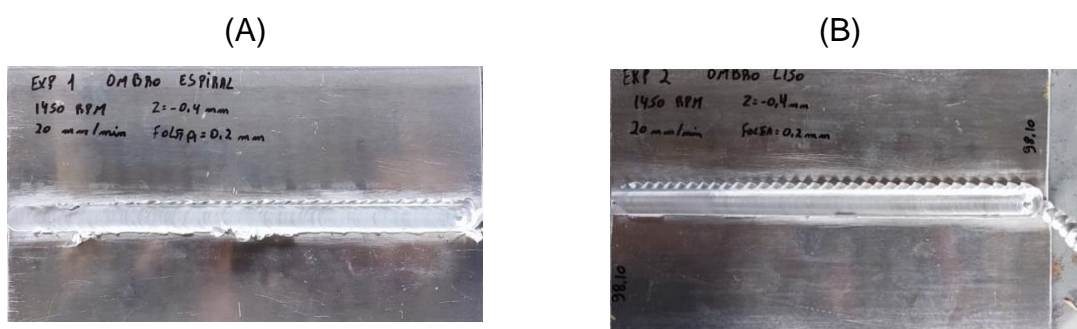
A ferramenta empregada no Experimento Liso possui um diâmetro de ombro de 18 mm, chanfro de 2x45° e ombro liso. A qualidade da superfície da solda é satisfatória, com uma quantidade aumentada de rebarbas em comparação com o Experimento Espiral, conforme ilustrado na Figura 20, que compara as chapas soldadas. Já na Figura 19 podemos visualizar com qual ferramenta foi realizado essa solda. Os parâmetros de soldagem por FSW no Experimento Liso são os mesmos do Experimento Espiral, que podemos ver na Tabela 8.

Figura 19 – Ferramenta com ombro liso.



Fonte: O AUTOR.

Figura 20 - Comparação entre as chapas, (A) ferramenta ombro espiral, (B) ombro liso.



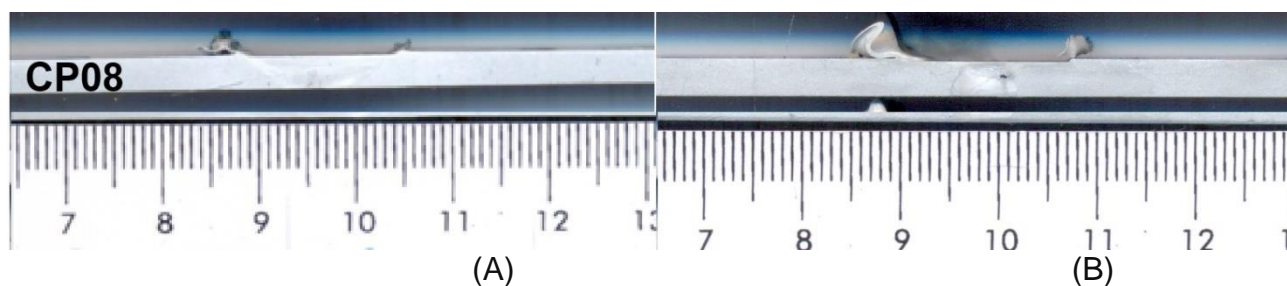
Fonte: O AUTOR.

Ao analisar a solda nas duas chapas, notaremos que o experimento ombro liso possui uma quantidade elevada de rebarbas comparando com o primeiro. A ferramenta com ombro em espiral facilita o processo de forjamento do material, direcionando o material extrudado para o centro do pino. Resulta em uma mistura mais homogênea do material. A ferramenta de ombro liso, comumente encontrada no processo FSW, contribui na geração de calor e na conformação plástica, facilitando a formação na junta soldada.

5.2 Resultados Obtidos no Ensaio de Metalografia

O ensaio metalográfico revela a macroestrutura da seção transversal da solda, tornando-a visível a olho nu, conforme ilustrado na Figura 21. Observa-se que não há evidência aparente de falhas, vazios ou trincas na região da solda, indicando as características de uma solda de qualidade no experimento espiral. Já o ombro liso como podemos observar, foram encontrados em alguns CP (corpos de prova) vazios internos, por causa do excesso de rebarba criado pela ferramenta, consequentemente resultou em falta de material interno, notando-se algumas falhas que ficaram durante o cordão de solda, a princípio ficou um túnel vazio. Provavelmente essa falha aconteceu durante todo o cordão, mas só conseguimos ver em alguns corpos de prova. Com esses detalhes o cordão já é reprovado por norma, como apresenta na Figura 21. E a macrografia ajuda posteriormente no ensaio de dureza, pois podemos observar no microscópio.

Figura 21 – Corpos de provas 08, (A) ferramenta ombro espiral e em (B) ferramenta ombro liso.

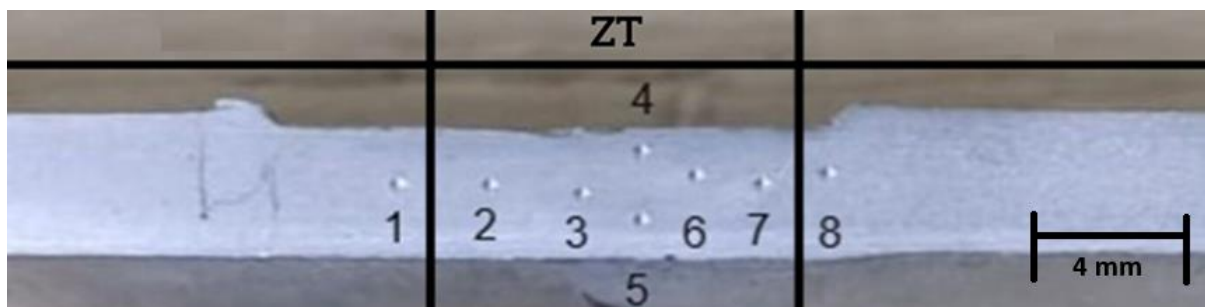


Fonte: O AUTOR.

5.3 Resultados de Dureza

Após ser realizado a macrografia, podemos realizar os ensaios de micro dureza, como mostra a Figura 22, foram realizados 8 ensaios de dureza no cp01 e no cp12. Com isso conseguiremos ver as diferenças entre o material base e a região afetada pela solda.

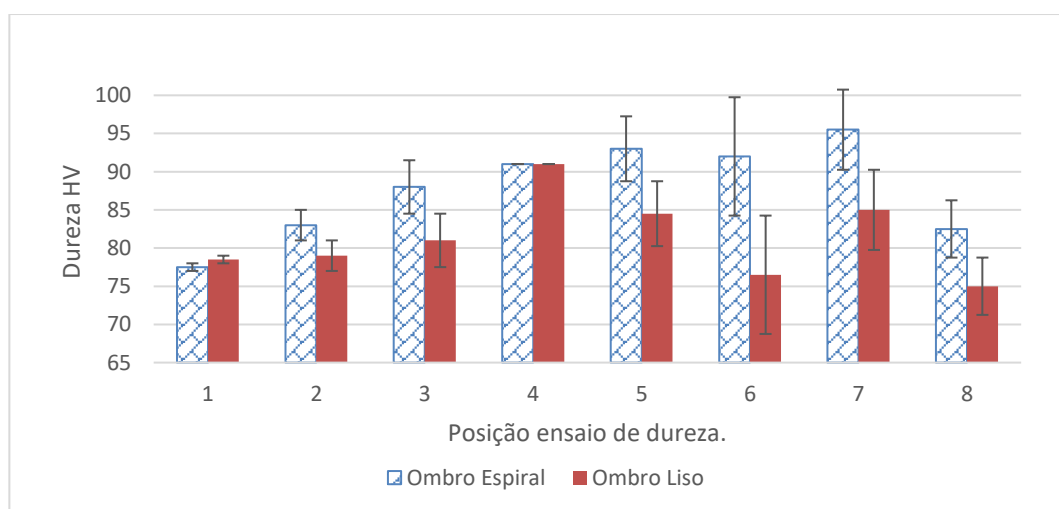
Figura 22 – Distribuição dos pontos de dureza.



Fonte: O AUTOR.

A Figura 22, ilustra a localização dos 8 pontos de microdureza Vickers HV10 Kgf com sua respectiva numeração. Os pontos 2,3,4,5,6 e 7 ilustrados na figura 22, foram os que mais receberam alterações, afetados pela temperatura, já os dois pontos mais afastados são para comparação com o material base. O gráfico a seguir mostra como ficou a distribuição de dureza entre os cp01 e cp12.

Gráfico 1 – Dureza cp01.



Fonte: O AUTOR.

Tabela 9 - Valores ensaio de dureza CP 1.

cp/Hv10	1	2	3	4	5	6	7	8	Desvio padrão	Média
cp01/Espiral	77,5	83	88	91	93	92	95,5	82,5	5,83	87,81
cp01/Liso	78,5	79	81	91	84,5	76,5	85	75	4,92	81,31

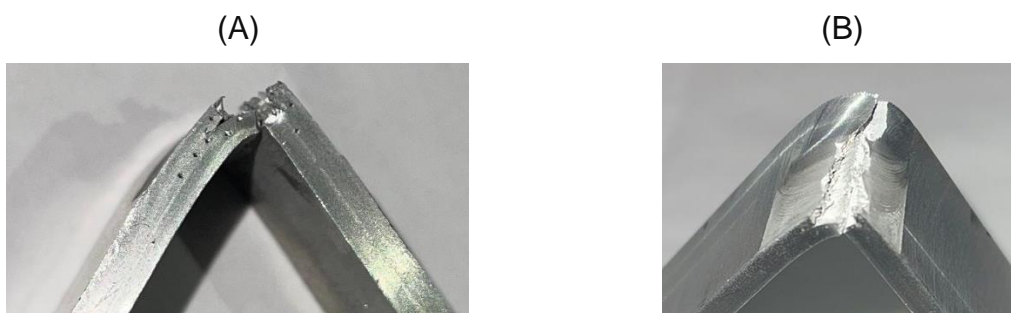
Fonte: O AUTOR.

Analisando o Gráfico 1, foi possível verificar que o experimento com a ferramenta de ombro espiral obteve valores médios mais altos na região de solda,

esse fato ocorreu devido ao maior atrito gerado e maior agitação mecânica, fazendo com que a mistura fique mais homogênea. Além do fato de que as estrias do ombro espiral ajudam a conter o material plastificado no cordão de solda. Como visto em outras bibliografias, a dureza do cordão de solda ficou a cima do metal base. Com média de 87,8125 HV10 Kgf e desvio padrão de 5,83 HV10 Kgf ficando com valores superiores do MB (material base).

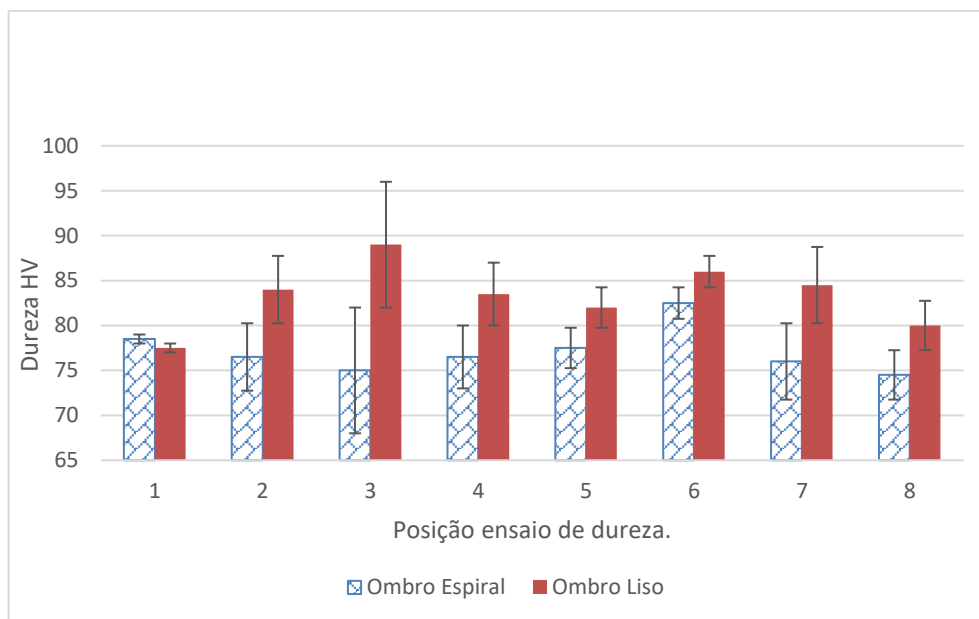
No ponto 6 do experimento liso (Figura 23) pode-se observar que a dureza de 76,5 HV10 Kgf ficou abaixo dos demais pontos da região de solda, isto ocorreu devido a um defeito caracterizado por um túnel longitudinal. Possivelmente por excesso de tensão axial, já que o cp01 foi retirado do início do cordão de solda onde ocorre um pré-aquecimento por volta de 60 segundos sem velocidade de avanço e somente a após a isto iniciou-se o avanço. Este defeito foi possível visualizar no ensaio de dobramento realizado, conforme Figura 23. Próximo a este ponto 6 ocorreu o rompimento do material no dobramento.

Figura 23 – Experimento Liso, em (A) vista lateral do rompimento e em (B) vista superior em detalhe da região ensaiada.



Fonte: O AUTOR.

Gráfico 2 – Dureza cps 12.



Fonte: O AUTOR.

Tabela 10 - Valores ensaio de dureza cps 12.

cp/HV10	1	2	3	4	5	6	7	8	Desvio padrão	Média
cp12/Espiral	78,5	76,5	75	76,5	77,5	82,5	76	74,5	2,36	77,12
cp12/Liso	77,5	84	89	83,5	82	86	84,5	80	3,32	83,31

Fonte: O AUTOR.

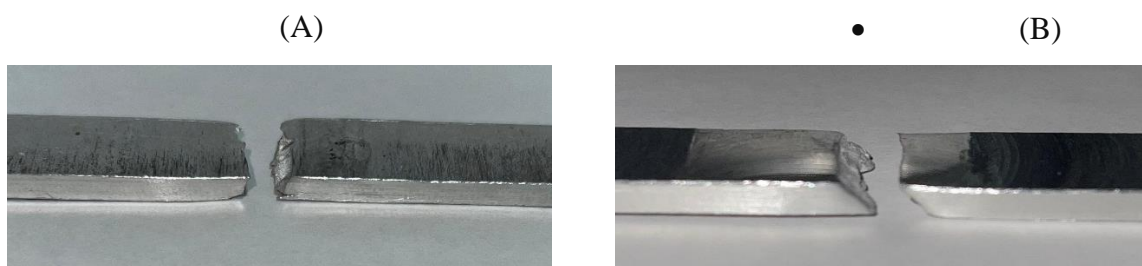
No experimento com a ferramenta com ombro espiral, os valores obtidos acabaram sendo influenciados por terem ficados próximo a saída da ferramenta (fim do cordão). Porém ainda assim é possível verificar que os pontos 1 e 8 ficaram com os valores próximos ao do metal base. Os pontos 2 e 7 localizados na ZTA ficaram pouco a cima do metal base, já os pontos na zona de mistura ficaram com valores abaixo do esperado se comparado ao cp01.

No experimento ombro liso, obtivemos dados de dureza entre 82 e 89 HV10 Kgf na região de solda ficando a cima da dureza do metal base, conforme pontos 1 e 8. Já nos pontos 3 e 6, localizados na zona de mistura obtivemos as durezas mais elevadas, isso se deve a alta mistura mecânica ocorrida no local. Por outro lado, nas ZTAs (pontos 2 e 7) obtivemos valores de 84,00 e 84,50 HV10 Kgf sendo menores que os citados anteriormente.

5.4 Resultados do Ensaio de tração

No ensaio de tração realizado nos corpos de prova cp12 dos experimentos ombro espiral e ombro liso, onde o rompimento ocorreu próximo dos pontos onde a dureza obtida foi menor. Ponto 3 no experimento ombro espiral, onde obtivemos dureza de 75,00 HV10 Kgf e no experimento ombro liso o rompimento ocorreu a cima do ponto 5 com valores médios de 82,00 HV10 Kgf. Como podemos visualizar na Figura 24. O relatório do experimento Espiral, gerado pelo software da máquina de ensaios de tração, pode ser encontrado no Apêndice A, enquanto os resultados dos ensaios de dobramento estão disponíveis no Apêndice B.

Figura 24 – Corpo de prova 12, (A) Ferramenta espiral e em (B) Ferramenta liso.



Fonte: O AUTOR.

Apesar da aparência favorável da superfície superior das soldas, os resultados dos testes de tração foram insatisfatórios para as quatro amostras avaliadas. Estas apresentaram uma média de 207,27 MPa (ferramenta espiral), ou seja, resistência à tração inferior à do material base. Já para o limite ao escoamento das 4 amostras ficaram com média de 133,52 MPa, ou seja, dentro dos valores aceitos pelo material base (110 a 130 MPa), como podemos observar na Tabela 11.

Tabela 11 - Valores do ensaio de tração Experimento Espiral.

Nome	Módulo de Elasticidade	Tensão Escoamento	Ruptura_SG 50-50 %	Máx_Tensão
Parâmetros	Tensão 20 - 100	0,20%	Nivel(€/Máx) 95	Cálculo de áreas completas
Unidade	MPa	MPa	%	MPa
cp03	79660,60	135,85	3,08	181,65
cp06	76141,90	134,16	6,94	239,23
cp09	68190,30	129,57	5,36	209,41
cp12	68070,20	134,47	4,00	198,71
Média	73015,80	133,52	4,84	207,27
Desvio Padrão	5821,52	2,72	1,68	24,23
Faixa	11590,40	6,28	3,86	57,66

Fonte: O AUTOR.

Para fins de comparação dos resultados podemos ver que Junior (2024), fez o processo de soldagem por FSW, na liga AA 5083-0 de 5 mm de espessura com ferramenta de ombro espiral. Obteve resultados parecidos. Conforme podemos ver na Tabela 12.

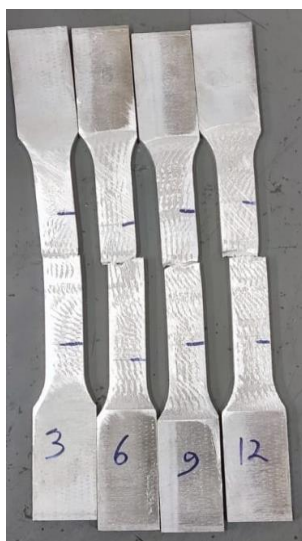
Tabela 12 – Resultados teste de tração ExpL1.

Nome	Módulo de Elasticidade	Tensão Escoamento	Ruptura_SG 50-50 %	Máx_Tensão
Parâmetros	Força 2000 - 6000 N	0,20%	Nivel(€/Máx) 95	Cálculo de áreas completas
Unidade	MPa	MPa	%	MPa
cp03	77347,10	127,94	17,78	285,35
cp06	86467,10	127,56	19,20	281,38
cp09	67097,90	126,22	18,04	282,37
cp12	69379,80	121,50	14,78	271,93
Média	75073,00	125,90	17,45	280,26
Desvio Padrão	8775,19	2,96	1,88	5,80
Faixa	19369,20	6,43	4,42	13,41

Fonte: Junior (2024).

Conforme ilustrado na Tabela 11, todas as amostras exibiram resultados que superaram o limite de escoamento do material base, atingindo em média 133,52 MPa, com um desvio padrão de 2,72 MPa. Todos os corpos de prova apresentaram falha na região da solda, como evidenciado na Figura 25.

Figura 25 - Corpos de prova, após realização do ensaio de tração do Experimento ombro Espiral.



Fonte: O AUTOR.

No ensaio de tração do experimento ombro liso, percebe-se que a tensão de escoamento se manteve superior a máxima tensão para o metal base, que apresentou a média de 134,43 MPa \pm 2,60 MPa. Também pode-se observar que a média de tensão máxima ficou dentro dos valores do material base, atingindo uma média de 266,66 MPa, com desvio padrão de 14,41 MPa, mostrado na Tabela 13. Na Figura 26 notaremos que apenas o cp09 teve uma ruptura que não se localizou no cordão de solda.

Tabela 13 - Valores do ensaio de tração Experimento Liso.

Nome	Módulo de Elasticidade	Tensão Escoamento	Ruptura_SG 50-50 %	Máx_Tensão
Parâmetros	Tensão 20 - 100	0,20%	Nivel(%/Máx) 95	Cálculo de áreas completas
Unidade	MPa	MPa	%	MPa
cp03	69702,70	130,84	8,17	250,61
cp06	81147,70	135,80	14,34	276,80
cp09	74799,90	136,79	19,53	280,70
cp12	75564,80	134,28	9,78	258,54
Média	75303,80	134,43	12,95	266,66
Desvio Padrão	4584,92	2,60	5,10	14,41
Faixa	11445,00	5,94	11,36	30,08

Fonte: O AUTOR.

Como podemos observar na Figura 26, apenas o cp09 tem uma fratura no material base, já os outros corpos de prova tem a fratura localizada no cordão de solda.

Figura 26 - Corpos de prova, após a realização do ensaio de tração do Experimento ombro Liso.



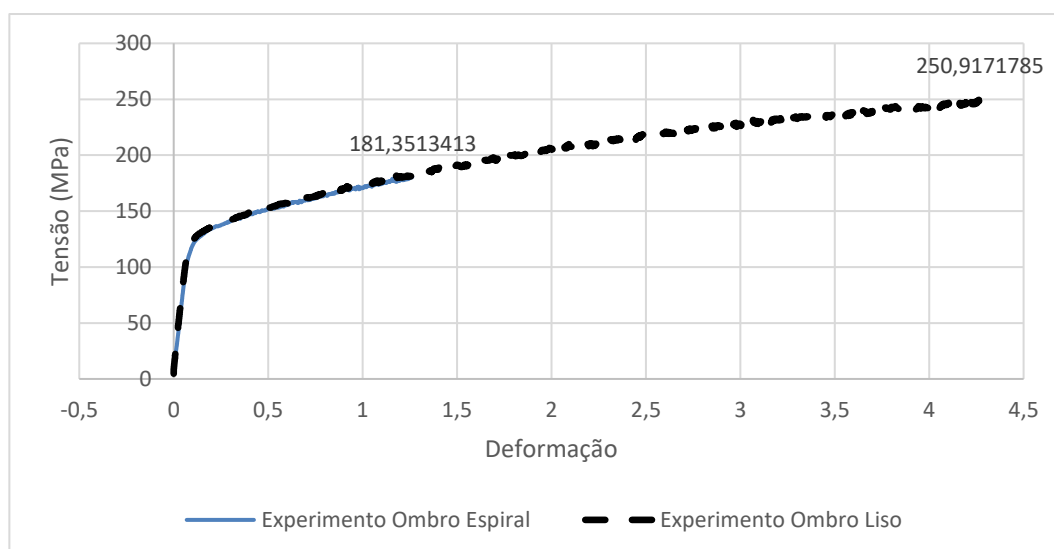
Fonte: O AUTOR.

Como apresentou-se uma falha durante o cordão de solda, possivelmente foi por falta de material. Como a ferramenta utilizada tem um ombro liso, acabou expelindo muito material para fora do cordão de solda, ocasionando uma rebarba relativamente grande. Com isso aconteceu uma falha, tipo túnel no cordão de solda, como está representado na Figura 29.

Ao comparar os ensaios de tração do experimento espiral e experimento liso, foi possível observar que a média de tensão de escoamento do experimento ombro espiral ficou 133,52 MPa enquanto do experimento ombro liso ficou em 134,43 MPa, ficando aproximadamente 1% maior do que o experimento do ombro espiral.

Já na tensão máxima o experimento ombro espiral ficou aproximadamente 22% abaixo do experimento 2, com valores médios de 207,27 MPa e 266,66 MPa respectivamente. Ou seja, o ombro liso acabou obtendo valores mais aceitáveis e dentro da faixa de limite de resistência à tração da norma para o AA 5083. Propriedade mecânicas do metal base estão na Tabela 6.

Gráfico 3 – Média Ensaio de tração Ombro Espiral x Ombro Liso



Fonte: O AUTOR

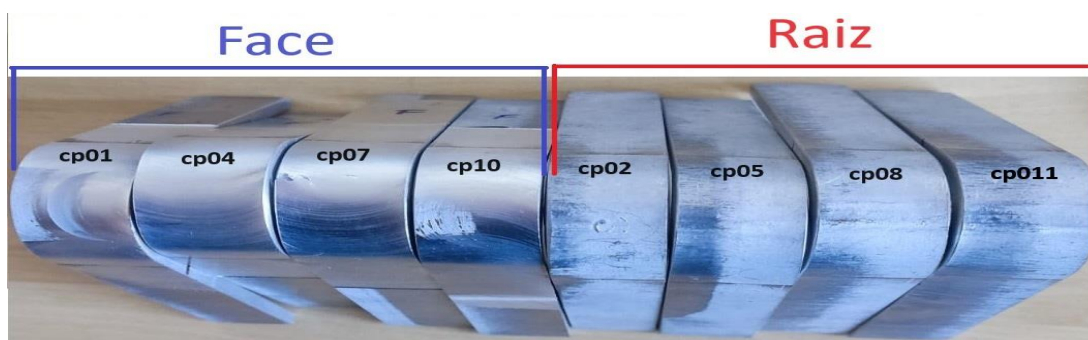
Conforme apresentado no gráfico 3, foi possível verificar que a deformação máxima para o experimento ombro espiral foi de aproximadamente $1,26 \pm 0,39$ mm, já para o ombro liso foi de $4,27 \pm 1,35$ mm. Percebe-se que o experimento ombro liso

tem maior conformação plástica, facilitando a formação da junta perante a ombro espiral.

5.5 Ensaio de dobramento

Depois de concluir o teste de tração, a máquina foi preparada para realizar o teste de dobramento na face e na raiz. Foram utilizadas quatro amostras de cada tipo, nas quais as dobras atingiram 150°, apenas o corpo de prova 7 apresentou trincas, gerando uma trinca superior aos 3 mm estabelecidos pela norma, conforme ilustrado na Figura 28.

Figura 27 – Corpos de provas após dobramento Experimento Espiral.



Fonte: O AUTOR.

Como podemos ver na Figura 28, o corpo de prova 07 sofreu uma trinca maior que a permitida pela norma, a norma permite uma trinca ≤ 3 mm, portanto analisando o corpo de prova podemos ver que teve uma trinca de aproximadamente 6,92 mm. Mostrado em detalhe na Figura 28.

Figura 28 – Corpo de prova 7, com a medição do tamanho da trinca.



Fonte: O AUTOR.

Tabela 14 e 15 apresentam os valores máximos, médios e desvio padrão para cada amostra do ensaio.

Tabela 14 – Valores dobramento experimento espiral face.

Nome Parâmetros	Máx_Força Cálculo de áreas completas
Unidade	N
cp01	2442,84
cp04	2476,07
cp07	2474,83
cp10	2493,19
Média	2471,73
Desvio Padrão	21,00
Faixa	50,34

Fonte: O AUTOR.

Tabela 15 – Valores dobramento experimento espiral raiz.

Nome Parâmetros	Máx_Força Cálculo de áreas completas
Unidade	N
cp02	2614,83
cp05	2418,66
cp08	2328,92
cp11	2374,79
Média	2434,30
Desvio Padrão	125,80
Faixa	285,91

Fonte: O AUTOR.

Na Tabela 14 e 15 são os valores máximos de força, aplica-se uma carga em uma área específica da amostra, provocando a flexão do material. A carga é aumentada progressivamente até que ocorra a falha por fratura ou trincamento.

Durante o teste, são registrados parâmetros como a carga aplicada, a deformação e o ângulo de dobramento atingido antes da falha.

Comparando os resultados obtidos com outros trabalhos, como Junior (2024) no ensaio de dobramento com o mesmo formato de ombro da ferramenta e mesmos parâmetros do processo, única diferença que a chapa usada por Junior (2024) é de 5 mm, já a que é utilizada desse trabalho é de 4 mm. Como é apresentado na tabela 14, a média do ensaio de dobramento de face é de 3042,70 N com o desvio padrão de 670,21 N, já o ensaio realizado nesse trabalho conseguimos obter a força média de 2471,73 N com o desvio padrão de 21,00 N.

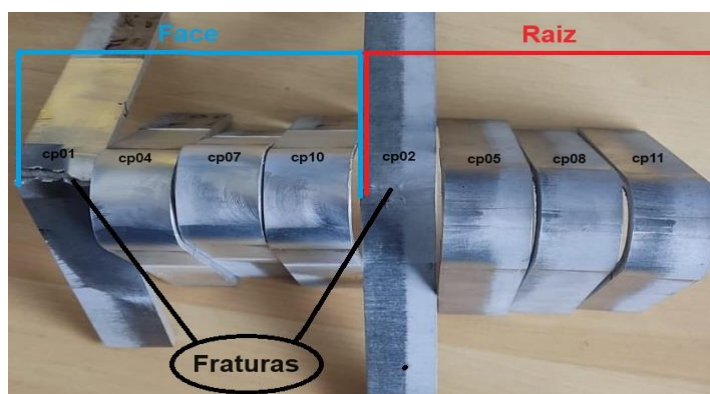
Figura 29 – Cp 06, corpo de prova apresentando vazios internos.



Fonte: O AUTOR.

Considerando os resultados do ensaio de tração, aonde foram encontradas falhas no cordão de solda, mas mesmo assim foram conduzidos ensaios de dobramento para analisar o desempenho do cordão de solda obtido. Esses ensaios revelaram fraturas e trincas na região soldada, indicando que a ferramenta com diâmetro de ombro liso de 18 mm e chanfro de $2 \times 45^\circ$ não foi adequada para produzir uma solda de qualidade satisfatória pelo processo FSW. Como será observado na Figura 30, apenas dois corpos de prova não atingiram a inclinação para ser aprovados.

Figura 30 – Corpos de provas após dobramento Experimento Liso.



Fonte: O AUTOR.

Mesmo com a falha, os dois únicos corpos de prova que sofreram uma fratura foi o cp01 e cp02, que é o início do cordão de solda.

Tabela 16 – Valores dobramento experimento liso face.

Nome	Máx_Força
Parâmetros	Cálculo de áreas completas
Unidade	N
cp01	1362,94
cp04	2247,76
cp07	2377,61
cp10	2475,79
Média	2116,16
Desvio Padrão	510,66
Faixa	1112,85

Fonte: O AUTOR.

Tabela 17 – Valores dobramento experimento liso raiz.

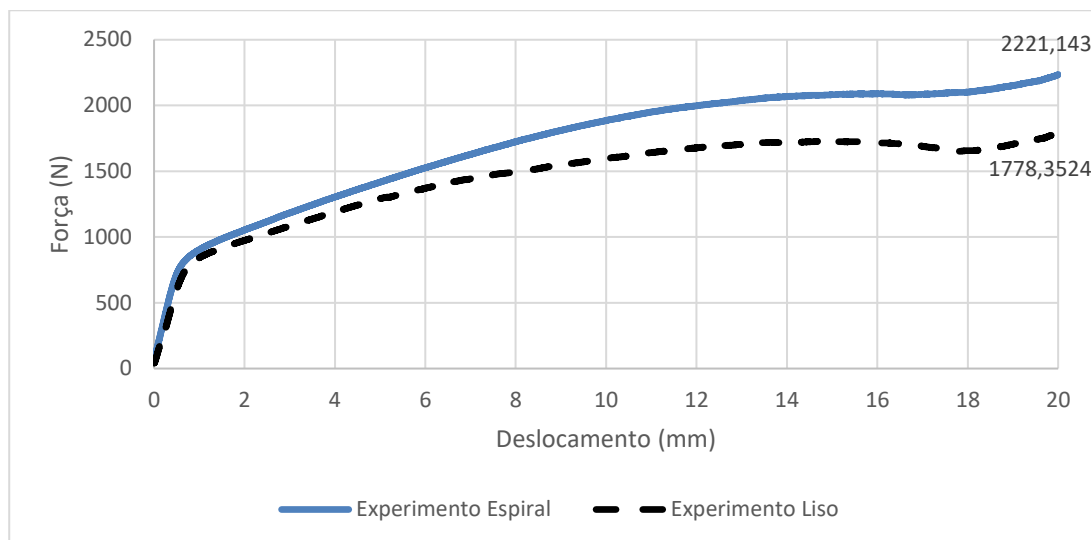
Nome	Máx_Força
Parâmetros	Cálculo de áreas completas
Unidade	N
cp02	1726,25
cp05	2754,55
cp08	2203,85
cp11	2328,40
Média	2253,26
Desvio Padrão	423,13
Faixa	1028,30

Fonte: O AUTOR.

Comparando os experimentos, conseguimos observar que o experimento ombro espiral, teve os melhores valores para o ensaio de dobramento, conseguindo uma média de $2221,14 \pm 439,68$ N para o ensaio de dobramento de face, já o experimento ombro liso obteve $1778,35 \pm 328,00$ N. Com isso podemos analisar que a falha no cordão de solda afetou bastante os resultados de dobramento.

Já no dobramento de raiz, o experimento ombro espiral conseguiu valor de média de $2423,84 \pm 473,47$ N, comparando com o ensaio de dobramento de face tivemos valores parecidos, mostrando que tanto na face como na raiz a mistura homogenia ajuda a qualidade da solda. No experimento ombro liso, dobramento de raiz, obtivemos uma média de $1752,26 \pm 361,64$ N, podendo analisar que pelo desvio padrão se alto teve uma grande variação nos ensaios de dobramento de raiz.

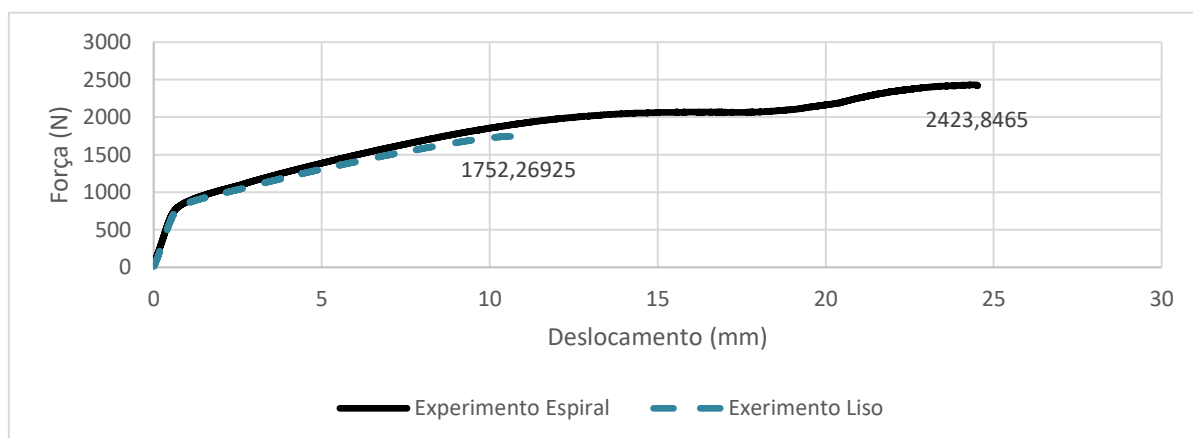
Gráfico 4 - Média Ensaio Dobramento Face Experimento Espiral x Experimento Liso



Fonte: O AUTOR

Como é possível observar no gráfico 4, nos primeiros 2 mm a diferença da média de cada ensaio é um valor pequeno, mas a partir desses 2 mm de deslocamento é possível observar que o experimento ombro espiral tem que ser aplicada uma força maior para ter o mesmo deslocamento, em 20 mm de deslocamento podemos observar que temos uma diferença de 442,8 N.

Gráfico 5 - Média Ensaio dobramento Raiz Experimento Espiral X Experimento Liso



Fonte: O AUTOR.

Como podemos observar no gráfico acima, o experimento ombro liso conseguiu atingir a maior das medias em aproximadamente 11 mm de descolamento, já o experimento ombro espiral conseguiu chegar perto dos 24 mm de deslocamento. Isso pode ter acontecido pois o experimento ombro liso teve algumas falhas de material.

6 CONCLUSÕES

O propósito deste trabalho de conclusão de curso foi explorar e analisar o método de Soldagem por Fricção e Mistura Mecânica, comparando dois modelos de ferramentas diferentes. Além disso, a intenção foi aprofundar o conhecimento sobre o tema e contribuir para a disseminação e o crescimento dessa tecnologia nas indústrias. Ao adquirir mais informações sobre o assunto, tornou-se evidente que a FSW desempenha um papel crucial em estudos científicos, sendo um processo emergente em centros industriais, especialmente em aplicações envolvendo o alumínio e suas ligas, onde o processo é predominantemente empregado atualmente. Nesse contexto, o trabalho busca contribuir para a ampliação dos estudos sobre o tema, destacando a importância de explorar processos alternativos que enriqueçam o campo da soldagem com novas possibilidades, superando desafios previamente existentes.

A influência da geometria do ombro da ferramenta se mostrou significativa para os resultados, no Experimento Espiral apenas o cp07 foi que falhou no ensaio de dobramento, já nos outros ensaios passou conforme os valores indicados para liga, mesmo que os valores de máxima tensão ficaram pouco abaixo do metal base, para um projeto mecânico um material nunca pode passar desse limite. Já o Experimento Liso (ombro liso) tivemos vários fatores que ajudaram a reprovar a solda, como a falha que ficou visível após a macrografia, nos corpos de prova: cp01, cp06, cp07 e cp08. E também no teste de dobramento que teve dois corpos de prova que aconteceu uma ruptura, não conseguindo chegar as 150° de dobramento.

Desta forma podemos afirmar que o ombro espiral faz com que a mistura mecânica gerada e o calor fornecido pelo atrito sejam mais adequadas para que a região de solda não apresente defeitos que ocorreram com mais frequência no experimento ombro liso, resistindo a rompimento nos ensaios de dobramento. Essa maior ausência de defeitos se dá devido ao melhor aprisionamento do material plastificado no cordão de solda obtido no experimento ombro espiral.

Para fins de conclusão apresenta-se os seguintes dados gerados pelos ensaios; ensaio de tração obtivemos a tensão de escoamento de $133,52 \pm 2,72$ MPa para a ferramenta ombro espiral, já a ferramenta ombro liso conseguiu suportar uma

tensão de escoamento de $134,43 \pm 2,60$ MPa, as duas a cima dos valores exigidos por norma para o material base; ensaio de dureza todos os valores ficaram acima do material base; e no ensaio de dobramento obtivemos resultados relevantes para a ferramenta ombro espiral, tivemos apenas um corpo de prova que apresentou um trinco superior ≤ 3 mm, possibilitando assim o dobramento de todos até os 150° .

7 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar testes com parâmetros diferentes: tais como rpm, avanço e força axial;
- Investigar qual seria a melhor geometria de ferramenta para a chapa de 4mm (espessura);
- Explorar técnicas de adaptação de máquinas CNC para sua utilização no processo de soldagem por fricção e mistura mecânica (fsw);
- Desenvolver modelos de ferramentas para empregar na soldagem por fricção e mistura mecânica de materiais diversos.

REFERÊNCIAS

ABAL, **Associação Brasileira do alumínio**. A sustentabilidade da indústria brasileira do alumínio. 2012.

ABNT - **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS**. NBR 6834: Alumínio e suas ligas - Classificação da composição química. Rio de Janeiro, 2006.

AIRES, L. **Análise experimental do comportamento à fadiga em juntas soldadas por fricção linear de ligas de alumínio para a indústria aeronáutica**. 2007. Dissertação de Mestrado para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2007.

ALMEIDA, D. T. **Análise microestrutural e avaliação mecânica de juntas soldadas por fricção e mistura mecânica (FSW) da liga de alumínio 5182-O**. 2015. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Faculdade de Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7549:2008 - **Alumínio e suas Ligas – Produtos laminados, extrudados e fundidos – Ensaio de tração**. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

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 Inspeção, vol. 14, p. 215-227, 2009.

COOK, G. E.; CRAWFORD, R.; CLARK, D. E.; STRAUSS, A. M. **Robotic friction stir welding. Industrial Robot: An International Journal**, vol. 31, p. 55-63, 2004.

DA SILVA, Erenilton Pereira. **Fundição, Laminação e Soldagem por Fricção e Mistura Mecânica de Ligas de Magnésio com adição de Mischmetal**. 2016. Tese

(PósGraduação) - Universidade de São Paulo, [S. l.], 2016. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/>. Acesso em: 06 out. 2023.

FIORAVANTI, Artur S., **Soldagem por FSW de ligas de alumínio alclad AA2024-T3 E AA7075-T6**, Dissertação de Mestrado em Engenharia - 2008. Porto Alegre: Escola de Engenharia da UFRGS.

FLORES, J. **Estudo dos parâmetros de soldagem FSW em chapas de alumínio da liga AA 5052**. 2016. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Erechim, 2016.

FULLER, C. B.; KRAUSE, A. R.; DUNAND, D. C.; SEIDMAN, D. N. **Microstructure and mechanical properties of a 5754 aluminum alloy modified by Sc and Zr additions**. Materials Science and Engineering, vol. 338, p. 8-16, 2002.

GENICOLO, Marco Aurélio Cestari. **Estudo de viabilidade para implementação de uniões soldadas pelo método friction stir welding em estruturas aeronáuticas**. 2007. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

HATCH, J. E. **Aluminum: Properties and physical metallurgy**. Ohio: ASM Metals Park, 2005.

HILLER, D. J. **Estudo de parâmetros e percursos no processo de soldagem de mistura por atrito (FSW) da liga de alumínio 5052**. 2007. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2007.

HILLER, D. J. **Estudo de Parâmetros e Percursos no Processo de Soldagem de Mistura por Atrito (FSW) da Liga de Alumínio 5052**, COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Mecânica Dissertação – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro, 2007.

INFOSOLDA. **Ensaio Mecânico: Dobramento**. Disponível em, 2023: < <https://infosolda.com.br/213-ensaio-mecanico-dobramento/> > . Acessado em: 28 de outubro de 2023.

ISO 25239-4:2011. **Friction Stir Welding – Aluminium – Part 4: Specification and Qualification of Welding Procedures**. International Standard Organization. Suisse, Geneva, 15 dec. 2011.

F. JUNIOR, Anael *et al.* **Solda por Fricção linear (FSW – FRICTION STIR WELDING) na indústria aeronáutica**. Info Solda, Osasco, v. 1, n. 1, p. 1-32, 19 nov. 2013. Disponível em: https://infosolda.com.br/wp-content/uploads/Downloads/Artigos/processos_solda/2013-11-19-FSW-na-industria-aeronautica.pdf. Acesso em: 08 out. 2023.

VIEIRA JUNIOR, Luis Otávio. **ANÁLISE DAS SOLDAS FSW EM CHAPAS DE ALUMÍNIO AA 5083-O UTILIZANDO DUAS FERRAMENTAS DIFERENTES**. 2024. 73 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – Câmpus de Erechim, Erechim, 2024. Cap. 1.

KHALED, Terry. **An outsider looks at friction stir welding**. Fed Aviat Admin, v. 25, p. 27- 29, 2005.

KUKA S. **Solda por fricção e mistura**. 2017a. Disponível em: < <https://www.kuka.com/ptbr/tecnologias/tecnologias-de-processo/2016/07/solda-por-fricção-e-mistura>>. Acesso em: 14 jul. 2018.

LEAL, L. P. **Estudo comparativo do efeito da aplicação de zinco como camada intermediária em soldas dissimilares produzidas por soldagem a ponto por fricção (FSpW) entre as ligas AA 5754 e AZ31**. 2015. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Faculdade de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre, 2015.

LOPES, F.H. **Análise de uma solda linear de topo por fricção (fsw) entre alumínio (6060 T5) e cobre (C110)**. Trabalho de conclusão de curso. 2017. UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA.

MARCONATO, Eduardo. **Influência de defeitos nas propriedades mecânicas de juntas soldadas por FSW da liga AA6013 - T6**. 2009. Dissertação (Pós-Graduação) - UFSCar, [S. l.], 2009.

METALTHAGA. **Ligas de Alumínio 5083**. Disponível em, 2023 <<https://metalthaga.com.br/wp-content/uploads/2015/11/4-METALCAST-3-Ligas-de-Aluminio-5083.pdf>>. Acessado em 28 de outubro de 2023.

MISHRA, R. S; Z.Y. **Friction stir welding and processing Materials Science and Engineering**. v. 50,78,2005.

MULLER, J.M.V. **Análise comparativa entre soldagem fsw e tig: propriedades mecânicas e processuais**. 2021. Trabalho de conclusão de curso. IFRS Campos Erechim.

MURARI, M. L. M. **Estudo da influência dos parâmetros de soldagem fsw sobre as propriedades mecânicas de soldas em chapas da liga de alumínio aa 5083 em juntas de topo com ferramenta de ombro liso e com inclinação**, 2017. Uri Erechim.

MURUGAN, N. DINAHARAN, I. **Influence of Friction Stir Welding Parameters on Sliding Wear Behavior of AA6061/0-10 wt. % ZrB₂ in-situ Composite Butt Joints**. 2009. 19 p. Department of Mechanical Engineering, Karunya University, Coimbatore. India, Tamil Nadu, 2009.

OLIVEIRA, P. R. **Avaliação do Recobrimento de TiN Aplicado em Ferramenta de Aço AISI 1045 para o Processo de Soldagem por Atrito, FSW**. 2018. Dissertação

para o título de mestre. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Centro de Tecnologia e Ciências faculdade de engenharia.

OLIVIECKI, N. J. e BESKOW, A. B; **Análise dos Parâmetros do Processo de Solda por Fricção em uma Liga de Alumínio** 2013. 16 p. Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Erechim, 2013.

PRESOTTO, M. L. **Avaliação de Ferramentas e Parâmetros do Processo de Soldagem por Fricção e Mistura Mecânica em Liga de Alumínio**. 2013. Trabalho de Final de Curso realizado como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Mecânico, Departamento de Engenharias e Ciência da Computação da URI, Erechim, 2013.

REIS, M.V.M. **Projeção do ferramental para soldagem por fricção de pino rotativo e análise microestrutural do cordão de solda da liga aa1050**. 2021. Dissertação para o título em Mestre. Universidade do estado do Rio de Janeiro.

SANGALLI, G. **Processo de soldagem fsw aplicado a ligas de alumínio similares aa 5083-o e aa 5052-o**. 2018. Trabalho de final de curso, Engenharia Mecânica, Uri Erechim.

SOUZA, G, S. **Influência da Geometria da Ferramenta na Soldagem da Liga de Alumínio 5052 Pelo Processo Friction Stir Welding**, 2010. 125 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

SEGATTI, Fabio. **SOLDAGEM POR FRICÇÃO E MISTURA MECÂNICA: AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE PROCESSO ATRAVÉS DA ANÁLISE DO PERFIL DE TEMPERATURA AO LONGO DA SOLDA, MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UMA LIGA DE ALUMÍNIO**. 2011. 71 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – Câmpus de Erechim, Erechim, 2011. Cap. 1.

SILVESTRINI, T. **Estudo dos parâmetros de soldagem para a liga aa 5083 utilizando o processo fsw em braço robótico**. 2018. Trabalho final de curso. Universidade regional integrada do alto Uruguai e das missões pró-reitoria de ensino, pesquisa e pós-graduação Câmpus de Erechim.

TOROS, S.; OZTURK, F.; KACAR, I. **Review of warm forming of aluminum–magnesium alloys**. Journal of Materials Processing Technology, vol. 207, p. 1-12, 2008.

VANZ, A. **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO DO OMBRO E SEU POLIMENTO NA SOLDA FSW EM CHAPAS DE ALUMÍNIO DA LIGA AA 5083**. 2018. Trabalho de final de curso, Engenharia Mecânica, Uri Erechim.

VETTORI, E. C. **Análise do Perfil de Temperaturas Durante o Processo de Soldagem por Fricção de Chapas de Alumínio da Liga AA 5083**. 2014. Trabalho de Final de Curso 48 realizado como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Mecânico, Departamento de Engenharias e Ciência da Computação da URI, Erechim, 2014.

APÊNDICES

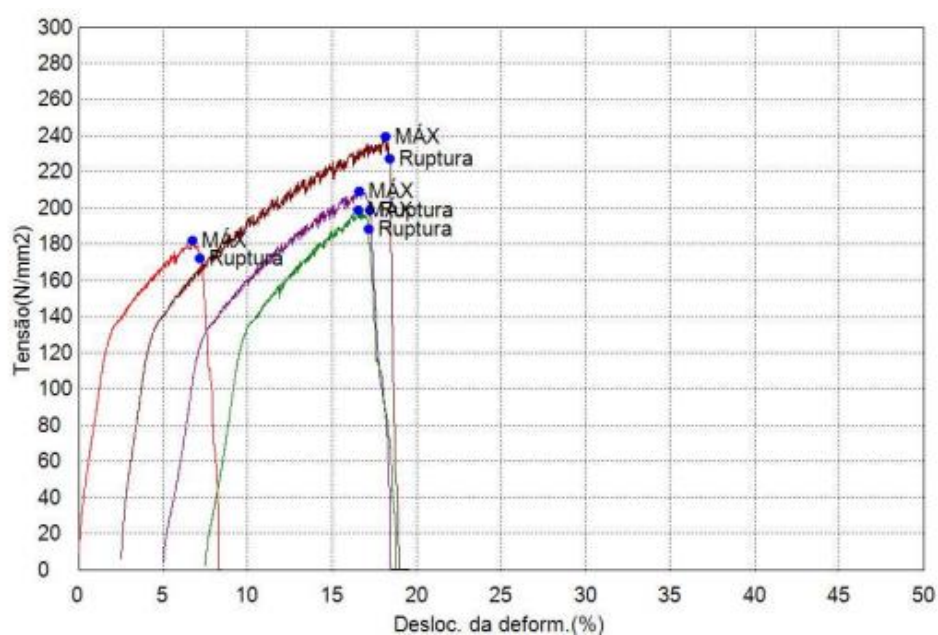
APÊNDICE A – Ensaio de Tração Experimento Espiral.

Palavra-chave	FSW; Tração; AA5083	Nome do produto	Experimento 01 Jonas
Nome do arquivo do ensaio	Teste1045 – Tração.xtas	Nome do arquivo do método	URI Tração Retangular com Extensometro – FSW3.xmas
Data do relatório	30/10/2023	Data do ensaio	30/10/2023
Modo de ensaio	Simplex	Tipo de ensaio	Tração
Velocidade	10mm/min	Placa	Placa
Lote No:	1	Sub-Lote No:	4

Nome	Espessura	Largura	Gauge Length
Unidade	mm	mm	mm
CP03	3,8000	12,8000	50,0000
CP06	3,7000	12,8000	50,0000
CP09	3,7000	12,8000	50,0000
CP12	3,6000	12,7000	50,0000

Nome	Módulo de Elasticidade	Tensão Escoamento	Máx_Força	Máx_Tensão
Parâmetros	Tensão 20 – 100 N/mm2	0,2 %	Cálculo de áreas completas	Cálculo de áreas completas
Unidade	N/mm2	N/mm2	N	N/mm2
CP03	79660,6	135,857	8835,65	181,654
CP06	76141,9	134,169	11334,3	239,323
CP09	68190,3	129,577	9918,07	209,419
CP12	68070,2	134,475	9085,37	198,718
Média	73015,8	133,520	9793,35	207,279
DesvioPadrão	5821,52	2,72899	1126,72	24,2303
Faixa	11590,4	6,28000	2498,65	57,6690

Nome	Força Ruptura	Tensão Ruptura	Ruptura_SG 50-50 %
Parâmetros	Nível(%/Máx) 95	Nível(%/Máx) 95	Nível(%/Máx) 95
Unidade	N	N/mm2	%
CP03	8382,51	172,338	3,08000
CP06	10763,4	227,268	6,94200
CP09	9420,59	198,914	5,36200
CP12	8616,64	188,465	4,00800
Média	9295,79	196,746	4,84800
DesvioPadrão	1074,68	23,0985	1,68132
Faixa	2380,89	54,9300	3,86200

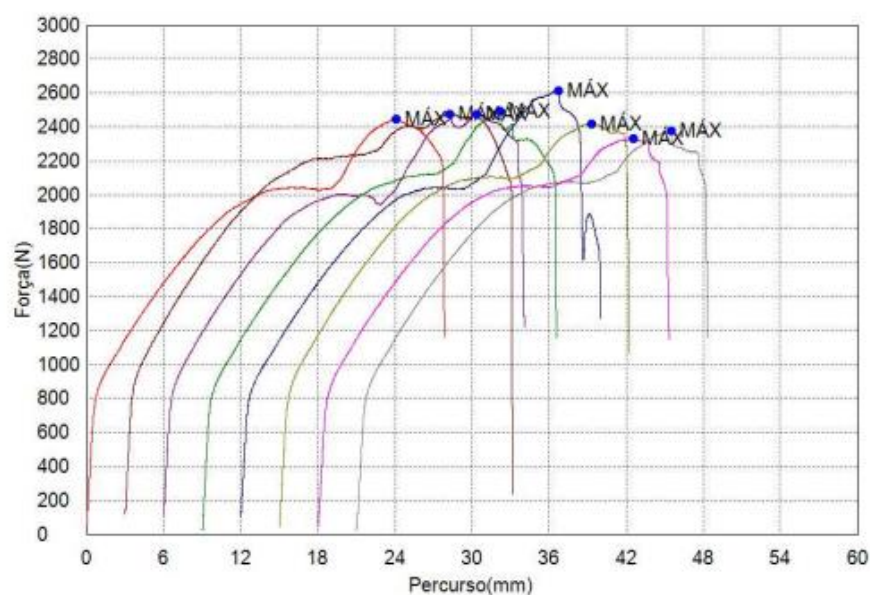


APÊNDICE B – Ensaio de Dobramento Experimento Espiral.

Palavra-chave	FSW, AA5083, Dobramento	Nome do produto	AA 5083; Experimento 1 Jonas
Nome do arquivo do ensaio	Teste1053 – Dobramento.xtas	Nome do arquivo do método	URI Dobramento 3 Pontos – FSW.xmas
Data do relatório	17/11/2023	Data do ensaio	06/11/2023
Modo de ensaio	Simplex	Tipo de ensaio	Dobr.3ptos
Velocidade	10mm/min	Placa	Placa
Lote No:	2	Sub-Lote No:	4

Nome	Espessura	Largura	Suporte inferior
Unidade	mm	mm	mm
CP01 – Face	3,8000	20,1000	59,3000
CP04 – Face	3,8000	21,8000	59,3000
CP07 – Face	3,7000	21,6000	59,3000
CP10 – Face	3,7000	20,7000	59,3000
CP02 – Raiz	3,9000	19,9000	59,3000
CP05 – Raiz	3,8000	21,0000	59,3000
CP08 – Raiz	3,7000	21,1000	59,3000
CP11 – Raiz	3,7000	21,5000	59,3000

Nome	Máx_Força	Ruptura_Deslocamento
Parâmetros	Cálculo de áreas completas	Sensibilidade: 10
Unidade	N	mm
CP01 – Face	2442,84	--
CP04 – Face	2476,07	--
CP07 – Face	2474,83	--
CP10 – Face	2493,19	--
Média	2471,73	--
DesvioPadrão	21,0048	--
Faixa	50,3499	--
CP02 – Raiz	2614,83	--
CP05 – Raiz	2418,66	--
CP08 – Raiz	2328,92	--
CP11 – Raiz	2374,79	--
Média	2434,30	--
DesvioPadrão	125,807	--
Faixa	285,910	--
TotalMédia	2453,02	--
TotalDesvioPadrão	85,8638	--
TotalFaixa	285,910	--



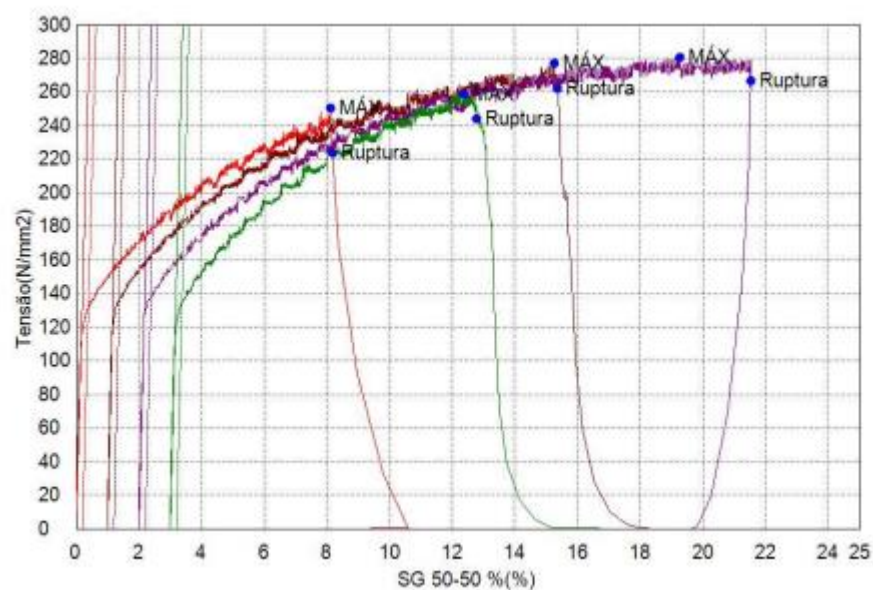
APÊNDICE C – Ensaio de Tração Experimento Liso.

Palavra-chave	FSW; Tração; AA5083	Nome do produto	Experimento 02 Jonas
Nome do arquivo do ensaio	Teste1070 – Tração.xtas	Nome do arquivo do método	URI Tração Retangular com Extensometro – FSW3.xmas
Data do relatório	17/11/2023	Data do ensaio	17/11/2023
Modo de ensaio	Simplex	Tipo de ensaio	Tração
Velocidade	10mm/min	Placa	Placa
Lote No:	1	Sub-Lote No:	4

Nome	Espessura	Largura	Gauge Length
Unidade	mm	mm	mm
CP03	3,6700	12,8000	50,0000
CP06	3,6500	12,8000	50,0000
CP09	3,6400	12,8000	50,0000
CP12	3,6000	12,7000	50,0000

Nome	Módulo de Elasticidade	Tensão Escoamento	Máx_Força	Máx_Tensão
Parâmetros	Tensão 20 – 100 N/mm2	0,2 %	Cálculo de áreas completas	Cálculo de áreas completas
Unidade	N/mm2	N/mm2	N	N/mm2
CP03	69702,7	130,846	11772,7	250,611
CP06	81147,7	135,806	12932,3	276,804
CP09	74799,9	136,792	13078,4	280,700
CP12	75564,8	134,280	11820,7	258,546
Média	75303,8	134,431	12401,0	266,665
DesvioPadrão	4684,92	2,60385	700,633	14,4156
Faixa	11445,0	5,94601	1305,70	30,0890

Nome	Força Ruptura	Tensão Ruptura	Ruptura_SG 50–50 %
Parâmetros	Nível(%/Máx) 95	Nível(%/Máx) 95	Nível(%/Máx) 95
Unidade	N	N/mm2	%
CP03	10499,8	223,513	8,17000
CP06	12250,8	262,217	14,3460
CP09	12423,8	266,651	19,5300
CP12	11167,1	244,251	9,78800
Média	11585,4	249,158	12,9585
DesvioPadrão	912,720	19,6493	5,10201
Faixa	1924,00	43,1380	11,3600



APÊNDICE B – Ensaio de Dobramento Experimento Liso.

Palavra-chave	FSW, AA5083, Dobramento	Nome do produto	AA 5083; Experimento 2 Jonas
Nome do arquivo do ensaio	Teste1069 - Dobramento.xtas	Nome do arquivo do método	URI Dobramento 3 Pontos - FSW.xmas
Data do relatório	17/11/2023	Data do ensaio	17/11/2023
Modo de ensaio	Simplex	Tipo de ensaio	Dobr.3ptos
Velocidade	10mm/min	Placa	Placa
Lote No:	2	Sub-Lote No:	4

Nome	Espessura	Largura	Suporte inferior
Unidade	mm	mm	mm
CP01 – Face	3,8000	21,3000	59,3000
CP04 – Face	3,6500	19,7500	59,3000
CP07 – Face	3,6200	20,1700	59,3000
CP10 – Face	3,6700	20,7800	59,3000
CP02 – Raiz	3,6300	20,9300	59,3000
CP05 – Raiz	3,7300	21,5600	59,3000
CP08 – Raiz	3,6200	20,0400	59,3000
CP11 – Raiz	3,6400	20,4800	59,3000

Nome	Máx_Força	Ruptura_Deslocamento
Parâmetros	Cálculo de áreas completas	Sensibilidade: 10
Unidade	N	mm
CP01 – Face	1362,94	--
CP04 – Face	2247,76	--
CP07 – Face	2377,61	--
CP10 – Face	2475,79	30,1862
Média	2116,03	30,1862
DesvioPadrão	510,669	--
Faixa	1112,85	0,00000
CP02 – Raiz	1726,25	--
CP05 – Raiz	2754,55	28,1763
CP08 – Raiz	2203,85	--
CP11 – Raiz	2328,40	--
Média	2253,26	28,1763
DesvioPadrão	423,131	--
Faixa	1028,30	0,00000
TotalMédia	2184,64	29,1813
TotalDesvioPadrão	440,314	0,53717
TotalFaixa	1391,61	2,00990

