

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

Anderson Willian Araujo

Marcos Schneider

**AVALIAÇÃO DA SOLDAGEM DISSIMILAR A PONTO POR FRICÇÃO AGITAÇÃO
EM LIGAS DE ALUMÍNIO E AÇO GALVANIZADO**

**GUARAPUAVA
2023**

Anderson Willian Araujo

Marcos Schneider

**AVALIAÇÃO DA SOLDAGEM DISSIMILAR A PONTO POR FRICÇÃO AGITAÇÃO
EM LIGAS DE ALUMÍNIO E AÇO GALVANIZADO**

**EVALUATION OF DISSIMILAR WELDING BY FRICTION STIR IN ALUMINIUM
ALLOYS AND GALVANIZED STEEL**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Tecnólogo em Tecnologia em Manutenção Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientadora: Dr^a. Sílvia do Nascimento Rosa

Coorientador: Dr. Hipólito Domingo Carvajal Fals

GUARAPUAVA

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

AVALIAÇÃO DA SOLDAGEM DISSIMILAR A PONTO POR FRICÇÃO AGITAÇÃO EM LIGAS DE ALUMÍNIO E AÇO GALVANIZADO

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Tecnólogo em Tecnologia em
Manutenção Industrial da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 13/junho/2023

Sílvia do Nascimento Rosa
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Aldo Przybysz
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Carlos Bernardo Gouvea Pereira
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

GUARAPUAVA

2023

AGRADECIMENTOS

Eu e meu colega gostaríamos de agradecer as pessoas que nos ajudaram a desenvolver esse importante trabalho.

À professora Sílvia Rosa Nascimento, nossa orientadora, que durante 1 ano, nos acompanhou, auxiliando em tudo que era possível.

Ao nosso coorientador Hipólito Domingo Carvajal Fals, ajudando-nos com muito conhecimento, materiais e auxílio nos experimentos.

Aos técnicos da UTFPR, Lucas e a Adriana, sempre presentes nos equipamentos, demonstrando funcionamento e auxiliando nos ensaios.

Ao professor David Lira Nuñez pelas inúmeras contribuições nos projetos das peças utilizadas no trabalho.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Guarapuava que nos entregou toda a estrutura e nos propiciou ambiente para trabalhar com qualidade.

RESUMO

A união de peças por décadas vem sendo extremamente necessária em processos de fabricação, buscando versatilidade e sustentabilidade. Para satisfazer e proporcionar novas alternativas de processos, a soldagem a ponto por fricção agitação com boas aplicações na área aeroespacial e automotiva, tem possibilitado a soldagem dissimilar. Essa pesquisa teve como objetivo verificar se haveria possibilidade de soldagem a ponto com chapas sobrepostas de ligas de alumínio e aço galvanizado. Para o estudo utilizou-se chapas de ligas de alumínio 1040 e 5052-H34 ambas com 3 mm de espessura e chapa de aço galvanizado com 0,8 mm de espessura. Em um centro de usinagem realizou-se a soldagem nos corpos de prova, variando as rotações em 1100, 1300 e 1500 rpm, respectivamente, e com tempo de permanência de 5 s para todos os parâmetros. A ferramenta utilizada foi fabricada em aço ferramenta H13. Ensaios de tração, dureza e metalografia foram as análises realizadas no estudo. Nas condições utilizadas neste estudo foi possível verificar que há possibilidade de soldagem entre as ligas de alumínio 1040 com o aço galvanizado, na rotação de 1300 rpm, na qual atingiu a maior força média de tração. Já na liga 5052-H34 com o aço galvanizado a possibilidade de soldagem ocorreu na rotação de 1500 rpm.

Palavras-chave: resistência à tração; soldagem dissimilar; ligas de alumínio; interface soldada.

ABSTRACT

The joining of parts has been extremely necessary in manufacturing processes for decades, seeking versatility and sustainability. To satisfy and provide new process alternatives, friction stir spot welding has shown good applications in the aerospace and automotive industries, enabling dissimilar welding. This research aimed to verify the possibility of spot welding overlapped sheets of aluminum alloys and galvanized steel. The study used 3 mm thick sheets of alloys aluminum 1040 and 5052-H34, as well as a 0,8 mm thick galvanized steel sheet. Welding was performed on the test specimens using a machining center, with rotational speeds of 1100, 1300, and 1500 rpm, respectively, and a dwell time of 5 s for all parameters. The tool used was made of H13 tool steel. Tensile testing, hardness testing, and metallography were performed for analysis. Under the conditions used in this study, it was possible to observe that welding between aluminum alloy 1040 and galvanized steel is possible at a rotational speed of 1300 rpm, which resulted in the highest average tensile strength. Welding between alloy 5052-H34 and galvanized steel was possible at a rotational speed of 1500 rpm.

Keywords: tensile strength; dissimilar welding; aluminum alloys; welding interface.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração do processo FSW (a) demonstrativo da ferramenta (b) representação do funcionamento da ferramenta.....	17
Figura 2 - Ilustração das variáveis da ferramenta	18
Figura 3 - Zonas típicas do processo FSW.	18
Figura 4 - Aplicações do processo FSW	19
Figura 5 - Ilustração do processo FSSW: (a) mergulho (b) agitação (c) retração	20
Figura 6 - Máquina para soldagem FSSW da marca Stirtec.	21
Figura 7 - Diagrama esquemático de tensão deformação.....	24
Figura 8 - Fluxograma de sequência de atividades.....	28
Figura 9 - Suporte para soldagem FSSW	30
Figura 10 - Ferramenta utilizada no processo de soldagem a ponto.....	31
Figura 11 - Esquema do ensaio de tração	32
Figura 12 - Valor médio da força máxima para a liga Al1040.....	37
Figura 13 - Valor médio da força máxima para a liga Al5052-H34	38
Figura 14 - Comparativo geral dos resultados para soldagem similar (Si) e dissimilar (Di).....	39
Figura 15 - Interface da soldagem na liga Al1040 no parâmetro de 1100 r.p.m.	40
Figura 16 - Interface de soldagem na liga Al1040 no parâmetro de 1300 r.p.m.	40
Figura 17 - Interface da soldagem Al1040 parâmetro 1500 r.p.m.	41
Figura 18 - Interface da soldagem Al5052-H34 parâmetro 1300 r.p.m.	42
Figura 19 - Interface da soldagem do Al5052-H34 parâmetro 1500.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ligas das séries de alumínio.....	22
Tabela 2 - Dimensões dos corpos de prova soldados de acordo com a ISO 14273.....	26
Tabela 3 - Parâmetros do processo	29
Tabela 4 - Composição química das ligas utilizadas em percentagem (%) dos elementos.....	34
Tabela 5 - Aspecto visual dos pontos de solda Al1040	35
Tabela 6 - Aspecto visual dos pontos de solda Al5052-H34	35
Tabela 7 - Aspecto visual lateral dos corpos de prova em função do tipo de soldagem e rotação.....	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA	<i>Aluminum Association</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al	Alumínio
C	Carbono
CNC	Controle Numérico Computadorizado
Fe	Ferro
FHPP	<i>Friction Hydro Pillar Processing</i>
FSP	Processo de Fricção Linear
FSPW	Soldagem Pontual por Fricção
FSW	<i>Friction Stir Welding</i>
FSSW	<i>Friction Stir Spot Welding</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LA	Lado de Avanço
LR	Lado de Retrocesso
MB	Metal Base
Mg	Manganês
NBR	Normas Brasileiras
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
ZM	Zona Misturada
ZTA	Zona Termicamente Afetada
ZTMA	Zona Termomecanicamente Afetada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivos	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	PROCESSO DE SOLDAGEM	13
2.1.1	Soldagem por fricção e agitação	15
2.1.2	Soldagem a ponto por fricção e agitação	19
2.2	Ligas de alumínio	21
2.3	Ensaio de tração	24
2.4	Estudos de casos	26
3	MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1	Materiais dos corpos de prova	29
3.2	Pré-testes e definição de parâmetros de processo	29
3.3	Processo FSSW	30
3.4	Ensaio de tração	31
3.5	Análise do material e das chapas soldadas	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
4.1	Análise das ligas	34
4.2	Análise do processo de solda a ponto	35
4.3	Interface soldada	39
5	CONCLUSÕES	44
	REFERÊNCIAS	45
	APÊNDICE A – PROJETO DO SUPORTE	49
	APÊNDICE B – SUPORTES DE FIXAÇÃO CHAPA DE ALUMÍNIO E AÇO	51
	APÊNDICE C – DESENHO COM VISTA EXPLODIDA DO SUPORTE	53
	APÊNDICE D – IMAGENS DOS CORPOS DE PROVA SOLDADOS COM VISTA PARA O LADO DO AÇO GALVANIZADO	55
	APÊNDICE E – CÓDIGO ISO UTILIZADO PARA A SOLDA A PONTO NO CENTRO DE USINAGEM	57

1 INTRODUÇÃO

Os processos de soldagem é uma das principais operações na produção industrial para unir diferentes peças entre si. O processo visa manter as propriedades do material e aquelas dependem tipicamente do contorno da temperatura ao longo do tempo exposta na área soldada. A soldagem pode ser realizada em temperatura acima ou abaixo da temperatura de fusão, e neste último caso se diz que a soldagem ocorre no estado sólido. Os processos de estado sólido tornam-se muito interessantes para soldar metais sensíveis à temperatura e diferentes entre si, o que é uma tarefa desafiadora recorrente em pesquisa e aplicação (BERGMANN, KÖHLER, PÖTHING, 2021).

Na soldagem em estado sólido o que tem se destacado é o processo de soldagem por fricção, do inglês Friction Stir welding (FSW). Neste processo não há poça de fusão, sendo uma das suas grandes vantagens. Com isso se diminui o risco de contaminação da solda e obtém uma excelente soldagem, reduzindo acentuadamente a região denominada ZTA - zona termicamente afetada (CAPELARI, MAZZAFERRO, 2009).

Com o avanço tecnológico da união e recuperação de peças, acarretou na derivação de novos processos através do FSW. Uma delas é a soldagem a ponto por fricção e agitação (FSSW - Friction Stir Spot Welding), que utiliza uma ferramenta rotativa como no FSW, mas não há movimento linear na direção do cordão de solda (BACKER; VERHEYDEN; 2009). Esta variação é aplicada em uma variedade de metais e não metais, pois o objetivo da sua invenção foi competir com a soldagem por ponto por resistência e rebitagem de ligas leves nas indústrias aeroespacial, automobilística e naval (SHEN; DING; GERLICH; 2019).

Em busca de adquirir e agregar novos conhecimentos nesta área, visto que o mercado exige cada vez mais versatilidade e simplicidade em processos de fabricação, utilizou-se o processo FSSW para desenvolvimento da pesquisa pelas características positivas que ele oferece, como baixo custo comparado a outros processos, possibilidade de testes em chapas finas e dissimilares, riscos de contaminação e região de ZTA extremamente reduzida, pois este processo

não necessita de poça de fusão. No trabalho foi utilizado ligas de alumínio e aço galvanizado, com o intuito de avaliar a possibilidade de unir duas ligas em um único processo (ROSENDO, 2009; BRZOSTEK, 2012).

1.1 Objetivos

Este trabalho de pesquisa tem como principal objetivo comparar a resistência à tração de chapas de aço galvanizado e ligas de alumínio soldadas a ponto por fricção utilizando diferentes valores de rotações. Para alcançar este objetivo foi necessário:

- soldar chapas sobrepostas com liga de alumínio 5052-H34 e aço galvanizado, e liga de alumínio 1040 com aço galvanizado;
- soldar chapas de liga de alumínio similares para comparar com a soldagem dissimilar;
- realizar ensaio de tração;
- analisar interface da solda por microscopia.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse tópico serão abordadas as definições do que é o processo de soldagem, diversidade entre os processos, apresentação de um conceito novo de soldagem, FSW, e variações que se originaram a partir desse conceito, como o FSSW e suas aplicações nas áreas mencionadas no texto, além da avaliação de dureza dos materiais, a qual serão submetidos aos testes no FSSW.

2.1 PROCESSO DE SOLDAGEM

O processo de soldagem é um método utilizado para unir peças do mesmo material ou materiais diferentes, em que pela aplicação adequada de calor e/ou pressão as peças são coalescidas em suas superfícies de contato. A união dos materiais é de forma permanente, ou seja, é produzida uma junta que não se pode separar com facilidade. Para facilitar essa união, em alguns procedimentos são utilizados materiais de adição (GROOVER, 2014).

Quando se combinam metais com propriedades quimicamente diferentes, ou ligas metalurgicamente diferentes para formar a solda propriamente dita, a soldagem é conhecida como soldagem dissimilar (NORTON, 2006). Exemplos de soldagem dissimilar incluem soldagem de: ligas de NiTi e aço inoxidável AISI 304 (OLIVEIRA., 2018); aço ASTM A-508 e aço inoxidável 316L (LIMA et al., 2019); dentre outras.

Na Sociedade Americana de Soldagem (do inglês, American Welding Society - AWS) estão catalogados cerca de 50 tipos de processos de soldagem diferentes. Porém esses processos estão inseridos em dois grupos principais (GROOVER, 2014):

- Soldagem por fusão: utiliza calor para fundir os metais de base. Exemplo: soldagem a arco submerso, soldagem com eletrodo revestido, soldagem a plasma, soldagem TIG (Tungsten Inert Gas), soldagem por feixe de elétron, etc.
- Soldagem no estado sólido: utilizam pressão ou a combinação de calor e pressão para obter a união das peças. Exemplo: soldagem por

fricção, soldagem por ultrassom; soldagem por difusão; soldagem por pressão; soldagem a frio, etc (BADAVATH; CHATTOPADHYAY; SHANKAR, 2021).

As técnicas dos processos de soldagem têm sido utilizadas não somente para unir peças, mas para recuperar peças com desgastes, criar revestimentos superficiais em chapas metálicas e alterar propriedades superficiais (MARQUES, 2015; HEIDARZADEH et al., 2019).

Os processos de soldagens são utilizados frequentemente no setor operacional de uma empresa, principalmente quando é necessário a correção imediata de um problema que surgiu em meio a produção, ocasionando a parada total ou parcial. Devido a essa necessidade, a soldagem deixou de ser exclusiva para união de peças, e passou a ser usada como um meio de extrema agilidade para a recuperação de uma peça que poderia ser utilizada por mais algum tempo

Conforme visto anteriormente, as combinações e métodos em soldagem, têm como objetivo obter o melhor resultado na recuperação ou fabricação de peças. Estes processos são muito importantes para resolver problemas de manutenção em uma empresa.

Um exemplo da importância da soldagem na manutenção de uma empresa foi constatado por um dos autores do trabalho em 2019. Na indústria de pré-fabricados de concreto onde atuava, um dos eixos de uma ponte rolante foi submetido a um esforço acima do dimensionado e se rompeu. Após a desmontagem do equipamento, observou-se que a usinagem do eixo era complexa. A opção foi unir as partes rompidas pelo processo de soldagem por fusão, com eletrodo revestido, e posteriormente usinar o eixo para obter as dimensões de projeto. Com essa prática, a produção não parou e o eixo foi substituído em uma parada programada.

Métodos como soldagem por fusão são excelentes alternativas para solucionar um problema a curto prazo, porém em alguns casos, as propriedades mecânicas do material são afetadas, devido ao aquecimento excessivo formado pela poça de fusão, e o fato da contaminação da soldagem, que é outro ponto negativo (MARQUES, 2015; HEIDARZADEH et al., 2019).

Novas alternativas têm ganhado força dentro do ambiente fabril, e esses novos métodos vêm com uma filosofia diferente a fim de sanar os pontos negativos dos processos atuais.

2.1.1 Soldagem por fricção e agitação

O processo de soldagem por fricção e agitação foi desenvolvido no final de 1991 no The Welding Institute, em Cambridge, Reino Unido, patenteado com o nome de Friction Stir Welding (Soldagem por Fricção). É um processo realizado no estado sólido em que uma ferramenta cilíndrica, rotativa e não consumível é deslocada com alta pressão entre os materiais a serem soldados. (THOMAS, NICHOLAS, KALLE 2001; KIMINAMI, DE CASTRO, DE OLIVEIRA, 2013).

A soldagem por fricção e agitação tem sido utilizada para superar problemas comuns associados às metodologias convencionais de soldagem por fusão, como grandes distorções, estruturas dendríticas grosseiras, formação de intermetálicos frágeis, poluição ambiental, dentre outros (HEIDARZADEH et al., 2019). A principal vantagem do FSW é que ocorre abaixo da temperatura de fusão dos materiais a serem soldados e dessa forma, é possível soldar materiais com diferentes temperaturas de fusão. Outras vantagens do processo são (BACKER, VEHEYDEN, 2009; KIMINAMI, DE CASTRO, DE OLIVEIRA, 2013; GROOVER, 2014; HEIDARZADEH et al., 2019):

- baixa distorções, contrações e tensão residual;
- excelentes resultados nos testes de tração e fadiga;
- sem porosidade;
- utilizada nas posições vertical e horizontal;
- não há geração de gases tóxicos, fumos ou salpicos - sem poluição ambiental;
- eficiente energeticamente;
- boa aparência, sem oxidação ou descoloração da superfície;
- baixa zona afetada pelo calor;
- número reduzido de parâmetros (somente cinco) se comparado com processos como MIG e soldagem a plasma.

Quanto às desvantagens do processo pode-se citar: (BACKER, VEHEYDEN, 2009; KIMINAMI, DE CASTRO, DE OLIVEIRA, 2013; GROOVER, 2014; HEIDARZADEH et al., 2019):

- velocidade de soldagem mais lenta;
- deixa um furo no final do processo de solda;
- dificuldade em soldar materiais com alta dureza;
- As peças devem ser fixadas rigidamente.

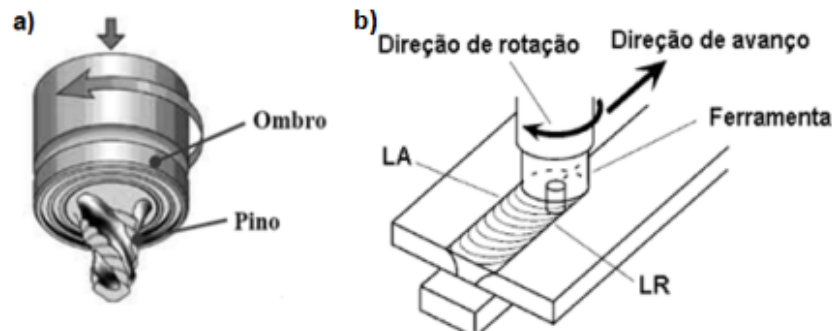
Para conseguir os resultados esperados no processo de FSW é importante se atentar à escolha dos parâmetros. Estes influenciam nas zonas geradas durante o processo, o que resulta em defeitos ou melhor qualidade. Estas escolhas são:

- Geometria da ferramenta: é um dos pilares do processo, pois é através dos vários tipos de ferramentas, que se pode trabalhar com diferentes materiais, ajustando o ferramental conforme a necessidade. Dessa maneira, não existe uma ferramenta universal para a aplicação.
- Parâmetros de soldagem: o procedimento exige parâmetros específicos dependendo do material a ser soldado, dentre os parâmetros, precisa-se levar em consideração as velocidades de rotação, avanço e o ângulo da ferramenta, assim como penetração e força aplicada do ombro.
- Juntas de aplicação FSW: pode-se utilizar diferentes configurações de juntas, sendo a mais utilizada a junta de topo, ainda que possuindo inúmeras limitações (MISHA, MA, 2005).

Na Figura 1 é ilustrado o processo FSW, onde se pode observar que a ferramenta é constituída por um pino e um ombro. A função específica de cada característica da ferramenta é:

- Ombro trabalha em contato com a superfície da junta a ser soldada, possuindo uma carga aplicada exata para o tipo de material escolhido.
- Pino tem como função misturar o material e aquecê-lo através da fricção, deixando o material maleável o suficiente para assim, a ferramenta deslocar-se através da junta superficial.

Figura 1 - Ilustração do processo FSW (a) demonstrativo da ferramenta (b) representação do funcionamento da ferramenta



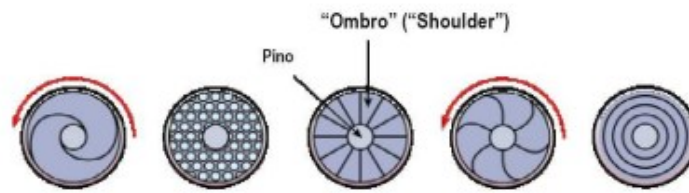
Fonte: Plaine (2013)

A ferramenta é usada para o desenvolvimento da solda de duas superfícies, unindo-as formando o cordão de solda entre as peças. Durante a operação, as peças são fixadas rigidamente para não ter escorregamento e afetar a solda, e após isso, a ferramenta se move entre as duas peças com uma determinada velocidade de rotação, misturando e plastificando os materiais. Dessa maneira, o pino e o ombro geram calor e atrito suficiente para amolecer o material, fazendo o material ser empurrado para trás da ferramenta, formando o cordão de solda propriamente dito (NANDAN; DEBROY; BHADSHIA, 2008). Assim, temos também o lado de avanço (LA) e lado de retrocesso (LR) conforme a Figura 1, em que o LA demonstra o deslocamento do material no mesmo sentido de giro da ferramenta, ou seja, no sentido horário de deslocamento da junta de solda. Já o LR demonstra o oposto do LA, onde pode-se observar que o material se desloca do sentido anti-horário em relação a rotação da ferramenta.

As variações de geometria do pino podem trazer melhores resultados. Porém, dependendo do material a ser trabalhado pode-se resultar em excesso de rebarba através do tipo de ombro, assim como também pode acarretar um desgaste prematuro da ferramenta, utilizando ombro incorreto para a aplicação desejada. Algumas geometrias de pinos podem ser vistas na Figura 2.

Assim como ocorre nos processos de soldagem tradicionais, na técnica FSW, também são formadas as diferentes zonas afetadas durante a operação.

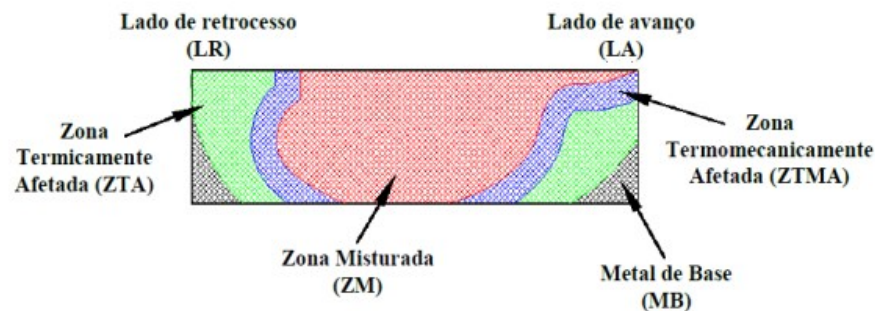
Figura 2 - Ilustração das variáveis da ferramenta



Fonte: Junior (2003)

Os diferentes níveis de alterações microestruturais do metal base, estão ilustrados na Figura 3.

Figura 3 - Zonas típicas do processo FSW.



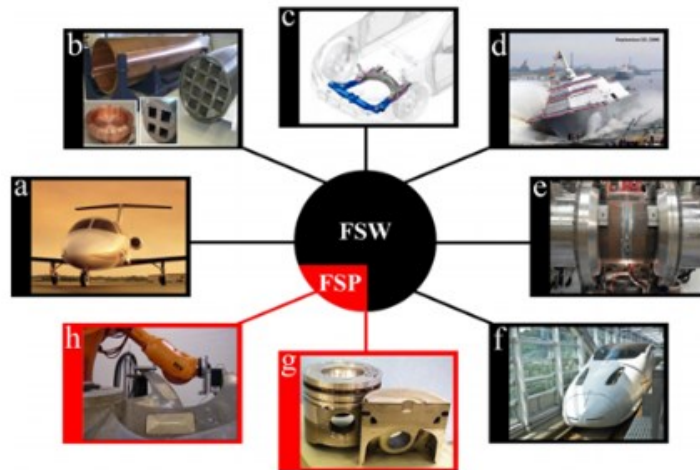
Fonte: Plaine (2013)

O metal de base (MB) é a região que não sofreu nenhuma alteração durante o processo de solda, mantendo sua estrutura original. Já a zona termicamente afetada (ZTA) é a região do material que foi minimamente afetada pelo processo, levando a uma modificação microestrutural das propriedades mecânicas do metal. A ZTA ainda apresenta estrutura cristalina bastante similar à MB (PLAINE, 2013).

A zona termomecanicamente afetada (ZTMA) é a região do material que há uma alteração mais significativa do metal base, ocasionando uma deformação plástica do metal, em temperaturas consideradas medianas. Na zona de mistura (ZM) ocorre uma alteração microestrutural significativa do metal de base, favorecendo a recristalização e formação de grãos menores, resultando em melhores propriedades mecânicas (PLAINE, 2013).

Aplicações desse processo estão relacionadas às indústrias aeroespacial, automotiva, ferroviária e naval, como exemplificado na Figura 4.

Figura 4 - Aplicações do processo FSW



Fonte: Elsevier, *apud* Heidarzadeh et al. (2019)

O processo FSW tem sido realizado em fresadoras convencionais e de comando numérico computadorizado (JUNIOR et al 2020; MISHA, MA 2008). A fresadora realiza a rotação e o avanço necessário para a soldagem, mas perde capacidade quando se utiliza materiais com espessuras acima de 6 mm, pois as reações impostas na máquina para o processo de usinagem (com ferramentas e parâmetros de corte específicos) diferem dos parâmetros do processo de soldagem por fricção (MAZZAFERRO, 2009).

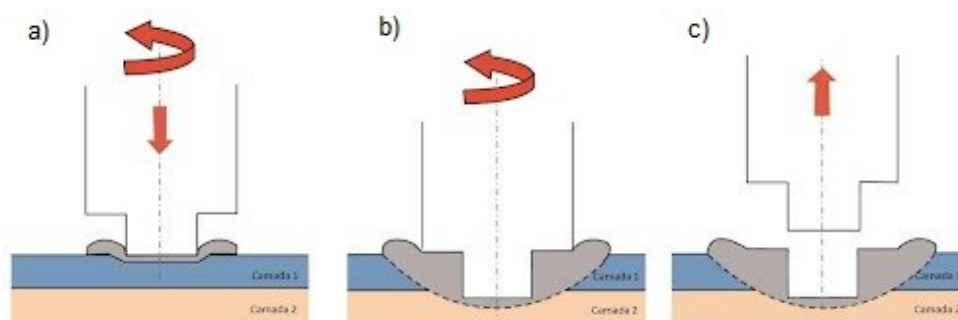
2.1.2 Soldagem a ponto por fricção e agitação

A soldagem a ponto por fricção agitação (*Friction Stir Spot Welding - FSSW*) ocorre pela rotação da ferramenta sobre a área a ser soldada a uma determinada pressão, sendo uma variante do FSW (YANG, FU, LI; 2014). Essa metodologia vem sendo utilizada em empresas automobilísticas e aeronáuticas por ter um alto custo-benefício e ótima qualidade e sustentabilidade. O método se difere ao do FSW apenas por não haver translação de ferramentas durante o processo de soldagem (LATHABAI et al., 2006).

No *FSSW* é necessário um avanço vertical e rotação por parte da ferramenta. Já no *FSW*, a solda ocorre ao longo da junção das peças, enquanto na união por *FSSW*, a ferramenta mantém-se em um ponto (SANTOS, 2019).

A soldagem se inicia com a ferramenta rotacionando em alta velocidade, entrando em contato com a superfície superior da peça a ser trabalhada para formar um ponto de solda, como ilustrado na Figura 5(a). O movimento radial ocasiona um mergulho na junta, gerando uma rebarba do material base. Após o mergulho da ferramenta, inicia-se o processo de agitação do metal base (Figura 5b), ocorrendo em configurações pré-estabelecidas. O terceiro estágio ocorre a retração da ferramenta, deixando um ponto visível no material, como pode ser observado pelo Figura 5(c). De acordo com YANG, FU, LI (2014), essa retração ocasiona uma perda considerável das propriedades mecânicas do material.

Figura 5 - Ilustração do processo FSSW: (a) mergulho (b) agitação (c) retração



Fonte: Adaptado Yang, Fu, Li (2014)

De acordo com Gerlich, Avramovic-cingara e North (2006), a temperatura aumenta devido à velocidade de rotação, o que acarreta na perda da adesão devido a fusão local gerada pelo superaquecimento. Neste caso é simples, pois só necessita de um avanço vertical e rotação por parte da ferramenta. Já no *FSW*, a solda ocorre ao longo da junção das peças, enquanto na união por *FSSW*, a ferramenta mantém-se em um ponto. Outra divergência dos processos é que pela união por *FSSW* a solda fica esteticamente mais bonita, enquanto que no *FSW*, a solda fica mais resistente (SANTOS, 2019).

Para o processo *FSSW* foi desenvolvido um equipamento específico para realizar a soldagem por ponto. Há modelos de equipamento com o objetivo de aperfeiçoar cada vez mais o procedimento, influenciando diretamente em uma solda de qualidade. Isso porque, as necessidades para uma solda *FSSW*

ter qualidade são: máquina robusta com baixa vibração e baixa deformação durante o processo, o controle da velocidade de rotação e avanço da ferramenta (variantes do FSSW) segundo (PARCIANELLO, ROSENDO. 2013). A Figura 6 ilustra um equipamento de soldagem por fricção.

Figura 6 - Máquina para soldagem FSSW da marca Stirtec.



Fonte: QUEIROGA (2022)

O processo FSSW tem sido também realizado em fresadoras convencionais e de comando numérico computadorizado (JUNIOR et al. 2020; MISHA, MA 2008). A fresadora realiza a rotação e o avanço necessário para a soldagem, mas perde capacidade quando se utiliza materiais com espessuras acima de 6 mm, pois as reações impostas na máquina para o processo de usinagem (com ferramentas e parâmetros de corte específicos) diferem dos parâmetros do processo de soldagem por fricção (CAPELARI, MAZZAFERRO, 2009).

2.2 Ligas de alumínio

As ligas de alumínio possuem característica de alta condutividade térmica e elétrica, assim, como também possui ótima resistência à corrosão devido a formação de um filme de óxido na superfície. Dentre os metais, o alumínio é um metal dúctil, puro e apresenta baixa resistência, podendo receber novos elementos em sua estrutura, melhorando as propriedades da liga, e alavancando sua aplicação dentro da área industrial (CAPELARI, MAZAFERRO 2009).

O alumínio pode ser combinado com outros elementos químicos como cobre, manganês, zinco, etc., para alterar propriedades mecânicas formando suas respectivas ligas. Estas ligas podem ser trabalhadas termicamente, resultando em uma resistência mecânica consideravelmente maior, assim como também possui ligas não tratáveis termicamente, sendo melhoradas apenas por trabalho a frio, como acontece no encruamento da liga Al (Alumínio) e Mg (Manganês) (SANTOS, 2015).

As séries de ligas de alumínio foram criadas através de um sistema internacional, composto pela *Aluminium Association* (AA) e *Internacional Organization for Standardization* (ISO). A classificação das ligas resultou em duas categorias distintas, sendo divididas em: composições para fundição e composições para trabalho mecânico.

A Tabela 1 identifica as oito séries das ligas de alumínio.

Tabela 1 - Ligas das séries de alumínio.

Série	Principal elementos de liga
1xxx	AL >_99%
2xxx	Cu
3xxx	Mn
4xxx	Si
5xxx	Mg
6xxx	Mg/Si
7xxx	Zn
8xxx	outros elementos

Fonte: ASM, 1992

Na série 1xxx, o segundo algarismo quando igual a zero significa que todas as impurezas são naturais do processo de fabricação. Quando o valor tabelado é diferente de zero, significa que houve um controle especial na concentração de impureza da liga. O terceiro e quarto dígitos, demonstram o percentual de alumínio existente, além dos 99% da liga em si (CAPELARI, MAZAFERRO 2009).

Além da classificação por série dos principais elementos, pode-se subdividir as séries de alumínio pelas propriedades de endurecimento, dureza e resistência mecânica da liga. Dessa maneira, as ligas de séries 2, 6 e 7 são

classificadas como tratáveis termicamente, e as ligas de séries 3, 4 e 5 são conhecidas por ser endurecíveis por deformação (CAPELARI, MAZAFERRO 2009).

Nos grupos de ligas de 2xxx a 7xxx, o segundo dígito na designação indica liga modificação. Se o segundo dígito for zero, indica que a liga é original; dígitos de 1 a 9, atribuídos consecutivamente, indicam modificações da liga original. Os últimos dois dos quatro dígitos nos grupos de 2xxx a 8xxx não têm significado especial, mas servem apenas para identificar as diferentes ligas de alumínio no grupo. Outras nomenclaturas para as ligas de alumínio são referentes ao tratamento das ligas: F (como fabricada), O (recozida), H (endurecida) e W (tratada termicamente). Essa nomenclatura aparece depois da designação da liga, separada por hífen e seguida de um ou dois dígitos.

A liga de alumínio 5052-H34, por exemplo, apresenta como elemento de liga principal o magnésio e as impurezas presentes são naturais do processo de fabricação. Essa liga possui condição de propriedades mecânicas correlacionado ao tratamento térmico chamado H3, que significa deformação plástica a frio e estabilizada. O segundo dígito da liga está correlacionado ao seu grau de encruamento em uma escala de 1 a 8, e quanto mais próximo de 8, maior o grau de encruamento. Assim, a liga 5052-H34 possui uma resistência à tração considerada grau de encruamento leve (COTA e ALEXANDRE, 2020). De acordo com a norma ABNT NBR21 2018, materiais plasticamente deformados a frio, cuja propriedades se estabilizam termicamente a frio, resulta-se a uma resistência à tração levemente menor, e apresenta uma maior ductilidade.

A liga exemplificada (Al-5052) possui boa resistência mecânica, alta resistência à corrosão e uma ótima soldabilidade, tornando-se um material versátil, por ser um material extremamente leve em relação a aços e metais. Algumas das principais aplicações dessa liga são: no setor automobilístico, por sua resistência e leveza; na construção civil, na fabricação de telhas, pisos antiderrapantes e no setor naval (CAPELARI, MAZAFERRO 2009).

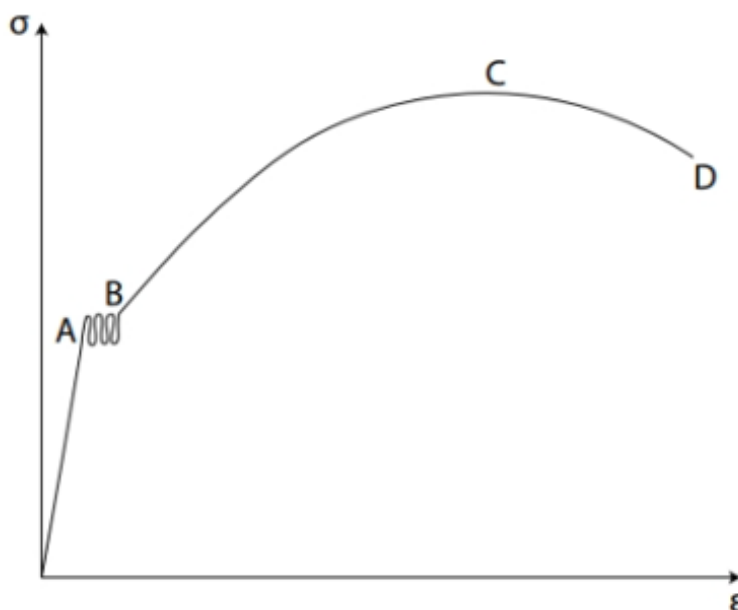
2.3 Ensaios de tração

No ensaio de tração, os corpos de prova utilizados em testes mecânicos possuem seções retangulares ou circulares, dependendo da forma e espessura do material a ser testado. Os fixadores são duas garras na máquina de ensaio e uma região útil onde são medidas as propriedades mecânicas. Um raio de concordância é incorporado entre as garras e a região útil para evitar a concentração de tensões e garantir que a ruptura ocorra na parte útil do corpo de prova. O corpo de prova é submetido a uma força de tração uniaxial, resultando no seu alongamento até a ruptura, em uma velocidade constante a um pequeno período de tempo (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

Esse ensaio é realizado em uma máquina específica e adequada para tal operação, conhecida como máquina universal de ensaios. No ensaio o material, denominado corpo de prova, é fixado pelas suas extremidades no equipamento, obedecendo a programação do ensaio, estabelecida por normas. Desta maneira, enquanto o material é tracionado, o software específico armazena os dados e gera uma curva de esforços do material até o rompimento.

A Figura 7 mostra um diagrama esquemático dos limites (regiões) que o material é submetido durante o ensaio.

Figura 7 - Diagrama esquemático de tensão deformação



Fonte: Garcia, Spim e Santos (2012)

Da origem do gráfico ao ponto A, tem-se por definição a região de comportamento elástico para material dúctil; de A ao B, região de deslizamento de discordâncias; de B ao C, região de encruamento uniforme e de C ao D, região de encruamento não uniforme.

A região de comportamento elástico, corresponde ao primeiro local a sofrer deformação. Nesta área é observado o fenômeno de efeito elástico, no qual, ao retirar a carga aplicada, o corpo de prova retorna ao seu estado original. A região de deslizamento de discordâncias, corresponde ao início da deformação plástica do material, e no início dessa deformação, a tensão pode variar, dependendo do comportamento das discordâncias no interior da rede cristalina do material. Já a região de encruamento uniforme, corresponde a deformação permanente do corpo de prova. Nesse estado a interação entre discordâncias e suas interações com obstáculos, como solutos, contornos de grãos, etc., impede o livre movimento das discordâncias. Conforme os planos cristalinos escorregam e deslizam entre si, possibilitando o escoamento, essas continuidades são travadas devido à ancoragem desses planos pelas discordâncias que ocorrem diretamente nos contornos de grãos. E por fim, a região de encruamento não uniforme, corresponde à última região de deformação, e neste estado, passa a existir o processo de ruptura do corpo de prova, decrescendo a carga à medida que a deformação avança, até a ruptura total (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012).

A tensão pode ser definida seguindo a Equação (1):

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (1)$$

Na Equação (1) P é a força de tração (a carga aplicada no momento na direção perpendicular do corpo de prova) e A é área da secção transversal do corpo de prova (parte útil fora das garras da máquina de ensaios).

A deformação, por sua vez, se entende pela variação da extensão do corpo de prova, sendo definida pela Equação (2).

$$\varepsilon = \frac{L_i - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2)$$

Na Equação (2) L_i o comprimento depois do ensaio e L_0 o comprimento inicial da parte útil do corpo de prova, antes da aplicação da carga (MENDES; SILVEIRA, 2018).

As dimensões dos corpos de prova são obtidas pela norma ISO 14273. A Tabela 2 mostra as dimensões em função da espessura do material utilizado.

Tabela 2 - Dimensões dos corpos de prova soldados de acordo com a ISO 14273.

Espessura	Sobreposição	Largura da Amostra	Comprimento da Amostra	Comprimento livre entre garras	Comprimento de teste de corpo individuais
$0,5 \leq t \leq 1,5$	35	45(30)	175	95	105
$1,5 \leq t \leq 3$	46	60	230	105	136
$3 \leq t \leq 5$	60	90	260	120	160
$5 \leq t \leq 7,5$	80	120	300	140	190
$7,5 \leq t \leq 10$	100	150	320	160	210

Fonte: ISO 14273 (2020)

Vale ressaltar que, a norma considera materiais similares, sendo o corpo de prova fabricado de uma chapa ou tarugo com dimensões padrões. Quando se trabalha com solda dissimilar, nem sempre os materiais possuem espessura iguais.

2.4 Estudos de casos

Neste tópico serão apresentados dois resultados de trabalhos utilizando o processo de soldagem por fricção e mistura em ligas de alumínio, de forma similar, a fim de compreender melhor sobre a influência dos parâmetros do processo em diferentes situações.

FRIEDRICH (2021) analisou o processo *FSSW* na liga de alumínio 6060-T com juntas sobrepostas quanto ao desempenho da solda e resistência mecânica. No experimento foi utilizado três níveis de velocidade de rotação (1000, 1250 e 1500 r.p.m.); de velocidade de penetração (200, 300 e 400 mm/min) e tempo de permanência (2, 4 e 6 s). A ferramenta utilizada possuía pino cônico de aço ferramenta M2, a espessura da chapa era de 3,2 mm e o equipamento utilizado para soldagem foi um centro de usinagem ROMI D600. Os resultados do experimento mostraram que em 1500 r.p.m., 200 mm/min e 6 s de tempo de permanência houve a maior carga média, de 364,4 N com o menor desvio padrão, quando comparado ao restante das amostras. O tempo de

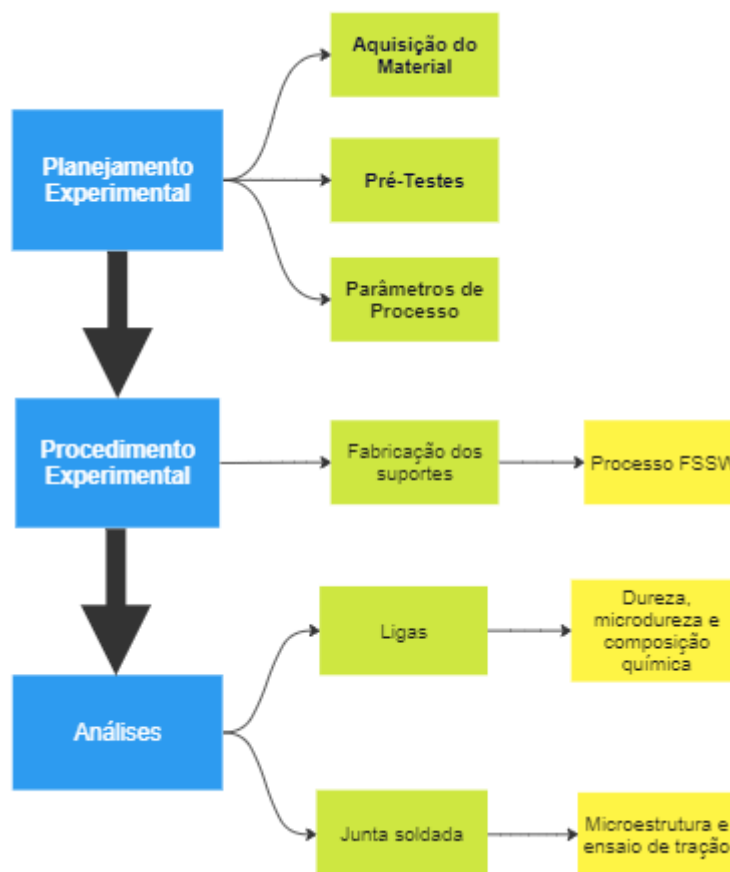
permanência foi o parâmetro que mais influenciou nos resultados e o valor de 6 s foi o mais significativo.

SANTOS (2021) estudou a formação de corrosão na junta de soldagem do processo *FSSW*, na liga de alumínio 6060-T5. Para esse experimento foi utilizada, velocidade de rotação 1500 r.p.m., velocidade de penetração de 120 mm/min) e tempo de permanência de 4 s, utilizando uma ferramenta de aço M2 de formato cilíndrico. Os corpos de provas foram expostos em condições propícias para corrosão, em um ambiente simulando a água do mar, em diferentes tempos de imersão, para avaliação da resistência à tração. Em todos os corpos de prova houve uma incidência de corrosão nas zonas da junta da seção transversal, e quanto maior tempo de imersão dos corpos de provas no ambiente corrosivo, maior foi a ocorrência da corrosão. Os resultados do ensaio foram para os corpos de prova sem exposição ao ambiente corrosivo, e também para os corpos de prova submetidos a esse ambiente, sendo eles em tempo de imersão de 336 h, 672 h e 1008 h. Os resultados dos ensaios mostraram que os corpos de prova sem exposição ao ambiente corrosivo apresentaram força média de 2757,78 N. Já os corpos de prova imerso em 336 h, 672 h e 1008 h apresentaram força média de 3061 N, 2815,37 N e 3134,43N, respectivamente. Nos resultados do ensaio de cisalhamento não houve variações consistentes, demonstrando que não há interferência da corrosão no comportamento uniforme das juntas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico serão abordadas as atividades realizadas para que os objetivos do trabalho sejam alcançados. A Figura 8 mostra o planejamento adotado para realização da parte experimental.

Figura 8 - Fluxograma de sequência de atividades.



Fonte: Autoria própria.

Como mostrado na Figura 8, o trabalho experimental foi dividido em três etapas, contemplando a aquisição das ligas e finalizando com a análise da solda a ponto.

3.1 Materiais dos corpos de prova

Para o desenvolvimento do trabalho foram utilizadas três ligas: aço galvanizado (AG) com espessura de 0,8 mm, liga de alumínio 1040 (Al1040) e liga de alumínio 5052-H34 (Al5052-H34), ambas com espessura de 3 mm.

As chapas foram adquiridas com as dimensões 30 × 30 cm. Para obter as dimensões dos corpos de prova foi utilizada uma guilhotina da marca Shears e modelo TG 306, com os ajustes da faca conforme espessura das chapas. Após o corte, as chapas possuíam dimensões próximas à 138 mm de comprimento por 30 mm de largura (conforme Tabela 2), e a espessura variava de acordo com a liga.

3.2 Pré-testes e definição de parâmetros de processo

Pré-testes foram realizados com as chapas de Al1040 e os parâmetros iniciais foram baseados em trabalhos anteriores. Com esses parâmetros pré-estabelecidos foi possível definir os parâmetros indicados na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros do processo

Material	Al1040 /AG e Al1040 / Al5052-H34		
Rotação (r.p.m.)	1100	1300	1500
v_f (mm/min)	2		
Profundidade (mm)	3,5		
Tempo de permanência (s)	5		

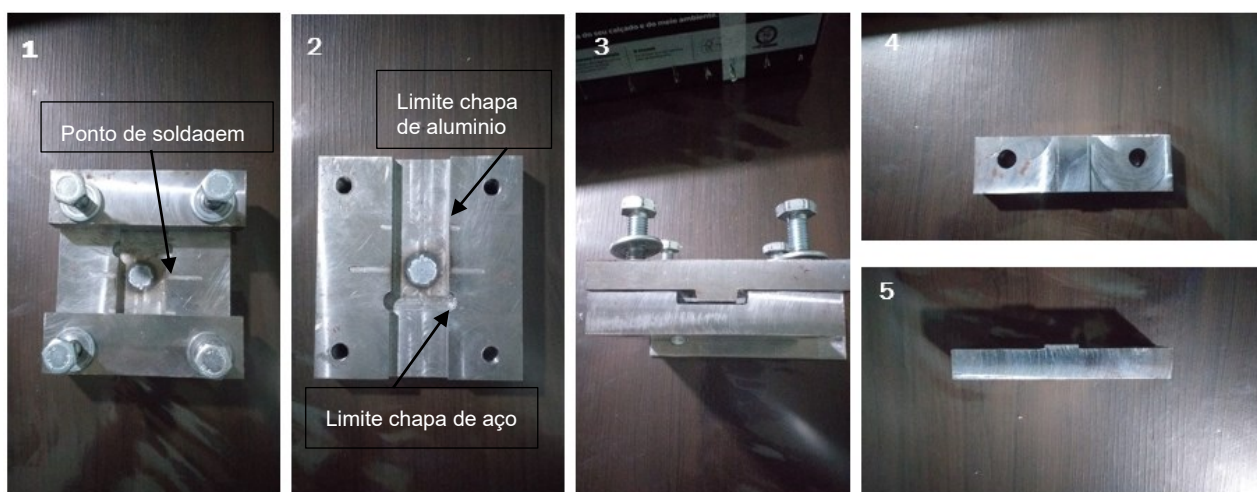
Fonte: Autoria própria

Com o objetivo de avaliar o potencial da soldagem dissimilar, foi realizada também uma soldagem similar utilizando os mesmos materiais. Essa abordagem permitiu a comparação da resistência à tração entre os dois processos de soldagem, utilizando os mesmos parâmetros empregados na soldagem dissimilar.

3.3 Processo FSSW

Para a realização da soldagem foi utilizado um centro de usinagem CNC, da marca Romi e modelo D600, com rotação máxima de 8000 r.p.m. O suporte, para fixação das chapas, foi usinado utilizando uma fresadora convencional. O posicionamento das chapas no suporte sempre obedeceu a seguinte ordem: liga de alumínio por cima e o aço por baixo. A Figura 9 ilustra o suporte com as três partes que o compõe, base (Figura 9.2) e apoios (Figuras 9.4 e 9.5). A Figura 9.1 e 9.3 mostram o suporte montado, em uma vista frontal e lateral, respectivamente.

Figura 9 - Suporte para soldagem FSSW



Fonte: Autoria própria

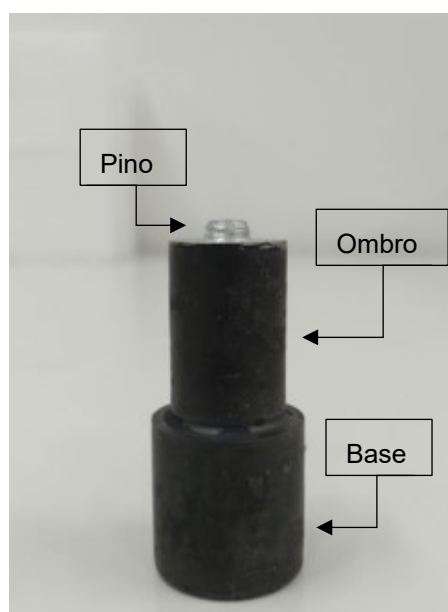
Na Figura 9.2 pode-se observar alguns rebaixos fabricado com a finalidade de evitar a movimentação das chapas durante a realização da soldagem e na Figura 9.1 dois canais rasos para indicar os limites de sobreposição das chapas e o posicionamento do pino da ferramenta.

O suporte foi fabricado em aço 1020 utilizando uma fresadora convencional Diplomat, FVF 2500, com o auxílio de um cabeçote fresador com quatro pastilhas de metal duro revestidas (GC 3210), fresas de aço rápido (HSS) com 16 mm, 10 mm e 6 mm de diâmetro, com rotação de 250 r.p.m. e velocidade de avanço 275 mm/min no eixo Y e 192 mm/min no eixo X. A mesma máquina foi utilizada para fabricar os furos, utilizando brocas de HSS sem revestimento

de 10 mm, 8,5 mm e 6,5 mm de diâmetro. Para a usinagem da rosca foram utilizados machos manuais M10 x 1,5 mm de aço rápido.

A ferramenta utilizada na soldagem foi fabricada no Laboratório de Usinagem da UTFPR de Ponta Grossa, resultado de um trabalho de Iniciação Científica orientado pelo professor Dr. Hipólito, coorientador do trabalho. O material da ferramenta é o aço temperado H13 revenido baixo e a Figura 10 mostra o aspecto da ferramenta.

Figura 10 - Ferramenta utilizada no processo de soldagem a ponto



Fonte: Autoria própria

O projeto suporte, das partes do mesmo e da ferramenta encontra-se nos Apêndices A, B e C.

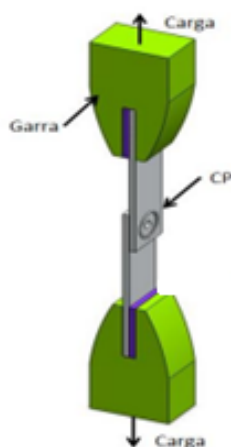
3.4 Ensaio de tração

Para o ensaio de tração foi utilizada uma máquina de tração universal, marca Emic, modelo GR048, com capacidade de até 300 kN. Uma ilustração da forma de fixação das chapas está representada na Figura 11.

Para as amostras de liga de alumínio 1040 e aço, as garras da máquina eram mais finas, possibilitando uma melhor aderência entre as duas chapas e evitando o escape destas durante a realização do ensaio. Naquela liga a pré carga utilizada estava em um intervalo entre 20 a 40 N. Para o ensaio da liga de

alumínio 5052-H34 e o aço, foi necessário substituir as garras por outras mais espessas, possibilitando uma melhor aderência desta liga. Nesse ensaio utilizou-se uma pré carga entre 40 a 60 N.

Figura 11 - Esquema do ensaio de tração



Fonte: Adaptado Góss, Aita, Rosendo (2017)

Ao todo foram utilizados trinta e três corpos de prova da soldagem dissimilar para o ensaio da liga de Al1040 com o aço galvanizado e trinta e dois corpos de prova da soldagem dissimilar para Al5052-H34 com aço galvanizado, sendo onze para cada parâmetro, totalizando sessenta e cinco ensaios. Desse total, cinco foram soldados para análise de metalografia, sendo três para Al 1040 nos três parâmetros e dois para os parâmetros de 1300 e 1500 r.p.m. do Al5052-H34. Por falta de material, o parâmetro de 1100 r.p.m não foi analisado na microscopia ótica. Referente a soldagem similar foram soldados quinze corpos de prova, nove para a liga Al1040 e seis para a liga Al 5052-H34. No caso do Al5052-H34, faltou material para o parâmetro 1100 rpm, sendo esse o parâmetro descartado, pois foi o parâmetro com pior resultado, assim, foi escolhido os dois melhores parâmetros da soldagem do Al1040, para ser aplicado no Al5052-H34 similar.

Para todos os ensaios foram utilizados o critério de Chauvenet (para análise de dados espúrios) e posteriormente realizada média e desvio padrão das medidas. Essa análise foi utilizada pelo fato de possuir ensaios com valores discrepantes, podendo distorcer ou prejudicar a interpretação dos dados obtidos.

3.5 Análise do material e das chapas soldadas

Para determinar a composição química das ligas utilizadas para realização do ensaio, foi utilizado um espectrômetro de emissão ótica da marca Shimadzu, modelo PDA-7000, do Laboratório de Materiais da UTFPR - Ponta Grossa. Para obter os dados de cada material analisado, foram recortados das chapas originais, amostras de dimensões 20 × 20 mm.

Para a análise metalográfica das amostras foi utilizado um policorte modelo CM40 da marca *Precision*; lixadeiras manuais e automáticas modelo PL02 da marca Teclago; embutidora EM30D marca Teclago e um microscópio óptico da marca Olympus. As lixas utilizadas foram 220, 320, 400, 600 e 1200 mesh; polimento com alumina e o ataque químico com Nital 10% por 5 segundos.

O ensaio de dureza nas amostras do Al1040 e Al5052 H34 foi realizado em um durômetro Digimess analógico, conforme a norma vigente ABNT NBR ISO 6508-1:2019, obtendo dez indicações, aplicando uma carga de 100 kgf com um indentador de geometria esférica de 1/16 polegadas. Para medir a dureza do aço foi utilizado um microdurômetro Digimess modelo 400.310, utilizando carga 245 mN e 15 segundos de aplicação de carga.

A região da interface do material das ligas soldadas foi analisada no microscópio óptico, após a amostra ser atacada com Nital 10%. Um projetor de perfil da marca Mitutoyo e modelo PJ-A3000 foi utilizado para obter a imagem macro da secção transversal das amostras.

As imagens obtidas no projetor foram analisadas através do software ImageJ, utilizando para cada cm² o equivalente a 883 pixel, para estimar a área do ponto de solda dos corpos de prova.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico serão apresentados os resultados da análise das ligas utilizadas e do processo FSSW.

4.1 Análise das ligas

A Tabela 4 mostra as composições químicas das ligas utilizadas no experimento.

Como indicado pela literatura, a liga Al5052-H34 é uma liga de alumínio magnésio e possui os mesmos elementos químicos da liga de Al1040 (exceto o manganês). Pode-se observar também pela Tabela 4 que, os elementos de liga ferro, titânio e cobre estão em porcentagens menores que da liga Al5052-34.

Tabela 4 - Composição química das ligas utilizadas em porcentagem (%) dos elementos

<i>Liga</i>	<i>Fe</i>	<i>Mn</i>	<i>C</i>	<i>W</i>	<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>Ni</i>	<i>Cr</i>	<i>Mo</i>
Aço G	85.5	3.46	2.65	2.87	2.04	1.09	0.77	0.77	0.61

<i>Liga</i>	<i>Al</i>	<i>Fe</i>	<i>Ti</i>	<i>Zn</i>	<i>Si</i>	<i>Ni</i>	<i>Cu</i>	<i>Cr</i>	<i>Mn</i>
1040	99.0	0.61	0.20	0.10	0.10	0.10	0.09	0.009	0.006

<i>Liga</i>	<i>Al</i>	<i>Mg</i>	<i>Fe</i>	<i>Cr</i>	<i>Zn</i>	<i>Si</i>	<i>Ni</i>	<i>Ti</i>	<i>Cu</i>
5052H34	96.9	2.06	0.34	0.27	0.17	0.16	0.13	0.011	0.01

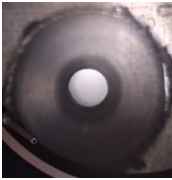


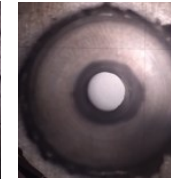
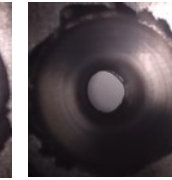
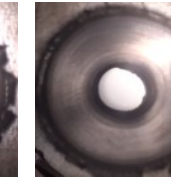
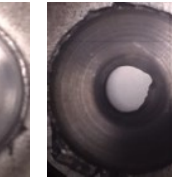
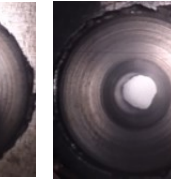
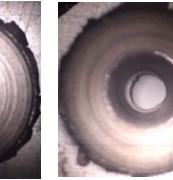
Fonte: Autoria própria

Quanto à dureza média das ligas foi obtido um valor de $(13,3 \pm 1,7)$ HV para a liga Al1040; $(72,2 \pm 3,3)$ HV para Al5052-H34 e $(190 \pm 25,5)$ HV para o aço galvanizado. Percebe-se que a dureza da liga Al5052-H34 é quase cinco vezes maior que a dureza da liga Al1040.

4.2 Análise do processo de solda a ponto


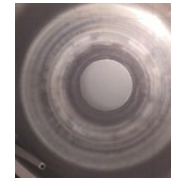
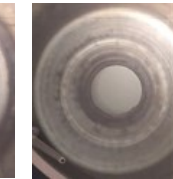
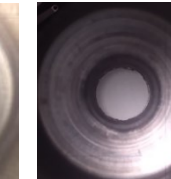
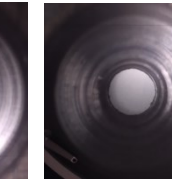
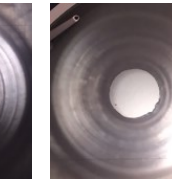

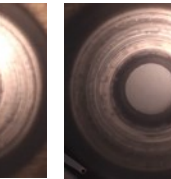
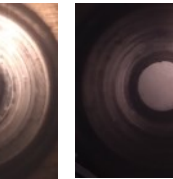
Após os ensaios de tração, os corpos de prova foram rompidos para realizar uma análise da área de solda. Nas Tabelas 5 e 6 pode-se observar os pontos de solda gerado pela ferramenta e a variação das áreas entre as ligas. Os corpos de prova das imagens se referem àqueles que obtiveram menor força de tração (F_m), próxima de média ($F_{m\acute{e}dia}$) e a maior (F_M), respectivamente.

Tabela 5 - Aspecto visual dos pontos de solda Al1040

Força	$F_m / 1100$	$F_{m\acute{e}dia} / 1100$	$F_M / 1100$	$F_{m\acute{e}dia} / 1300$	$F_m / 1300$	$F_M / 1300$	$F_m / 1500$	$F_{m\acute{e}dia} / 1500$	$F_M / 1500$
									
Área	0.089 cm ²	0.102 cm ²	0.085 cm ²	0.086 cm ²	0.078 cm ²	0.096 cm ²	0.100 cm ²	0.074 cm ²	0.101 cm ²

Fonte: Autoria própria

Tabela 6 - Aspecto visual dos pontos de solda Al5052-H34

Força	$F_m / 1100$	$F_{m\acute{e}dia} / 1100$	$F_M / 1100$	$F_m / 1300$	$F_{m\acute{e}dia} / 1300$	$F_M / 1300$	$F_m / 1500$	$F_{m\acute{e}dia} / 1500$	$F_M / 1500$
									
Área	0.122 cm ²	0.127 cm ²	0.092 cm ²	0.111 cm ²	0.157 cm ²	0.095 cm ²	0.097 cm ²	0.119 cm ²	0.124 cm ²

Fonte: Autoria própria

Na liga Al1040, é notável a deformação dos pontos de soldagem e a maioria dos corpos de prova apresenta uma área significativamente menor que o do Al5052-H34. A exceção está nos corpos de prova a 1300 e 1500 r.p.m., na maior e menor força, respectivamente. Já na liga Al5052-H34, a deformação dos pontos é menor, gerando uma área dos pontos de solda superior. Uma hipótese para deformações diferentes nas ligas pode estar relacionada à temperatura elevada e desgaste da ferramenta durante a soldagem dos corpos de prova anteriores. A temperatura não foi medida durante os ensaios, mas durante percebeu-se durante a trocas das chapas que, na liga Al5052 a temperatura era superior.

Na Tabela 7 mostra o comportamento das chapas após o ensaio de tração, relativo ao perfil das chapas na região deformada. No apêndice D estão ilustradas as imagens dos corpos de prova soldados.

Tabela 7 - Aspecto visual lateral dos corpos de prova em função do tipo de soldagem e rotação

Alumínio 1040 e aço galvanizado						Alumínio 5052-H34 e aço galvanizado				
Dissimilar (r.p.m.)			Similar (r.p.m.)			Dissimilar (r.p.m.)			Similar (r.p.m.)	
1100	1300	1500	1100	1300	1500	1100	1300	1500	1300	1500



Fonte: Autoria própria

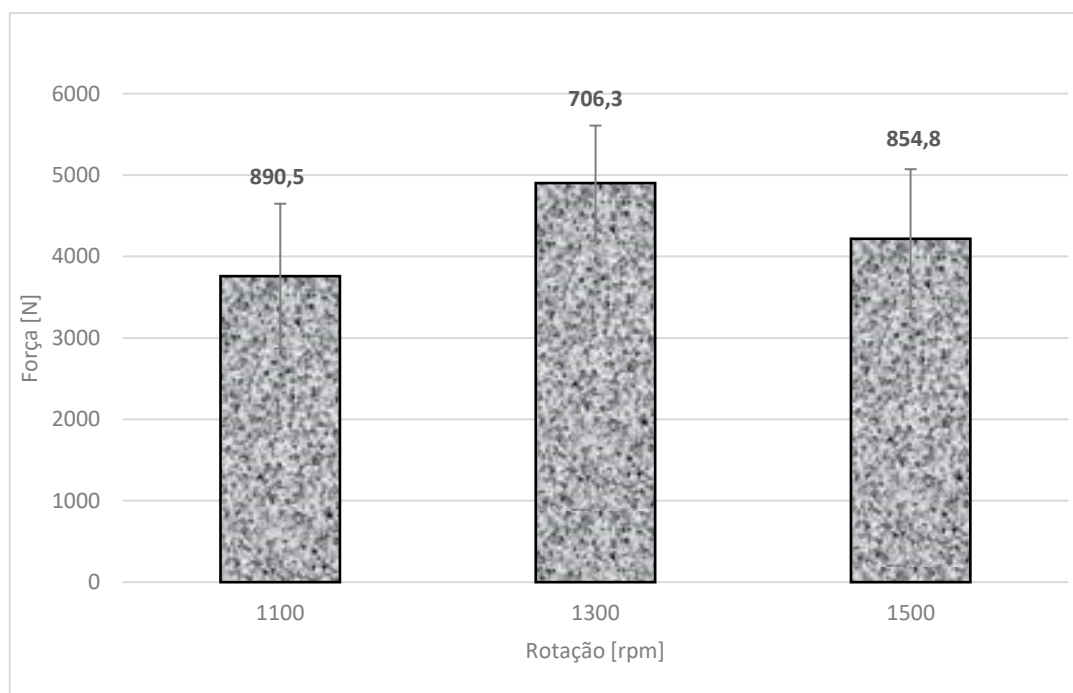
Percebe-se nas imagens da Tabela 7 que com o aumento da rotação, há uma tendência de maior deformação. Para a liga Al1040, a deformação é maior na soldagem a ponto similar do que na soldagem dissimilar. Ao passo que, na

liga Al5052-H34 há pouca deformação nos corpos de prova. Ao analisar as ligas, a Al1040 por possuir menor dureza, conforme indicado anteriormente, essa deformação é amplificada conforme a rotação aumenta, tanto na soldagem similar como na dissimilar. Todavia, na liga Al5052-H34 não se verifica essa tendência, conforme pode-se visualizar na rotação de 1500 r.p.m., tanto dissimilar como similar, pois a deformação longitudinal é mínima, possivelmente ocasionada pela maior dureza dessa liga.

Pela Tabela 7 observa-se que os corpos de prova apresentaram ruptura de forma dúctil. Provavelmente, essa forma de ruptura ocorreu porque a resistência da junta foi distribuído em toda a região abaixo do ombro da ferramenta, não havendo fratura total da região central abaixo do pino (BARBOSA, 2021).

Quanto à força máxima de tração, esta será representada nas Figuras 12 e 13. O valor da força máxima obtida pelo ensaio de tração da liga Al1040 na soldagem dissimilar está indicado na Figura 12.

Figura 12 - Valor médio da força máxima para a liga Al1040



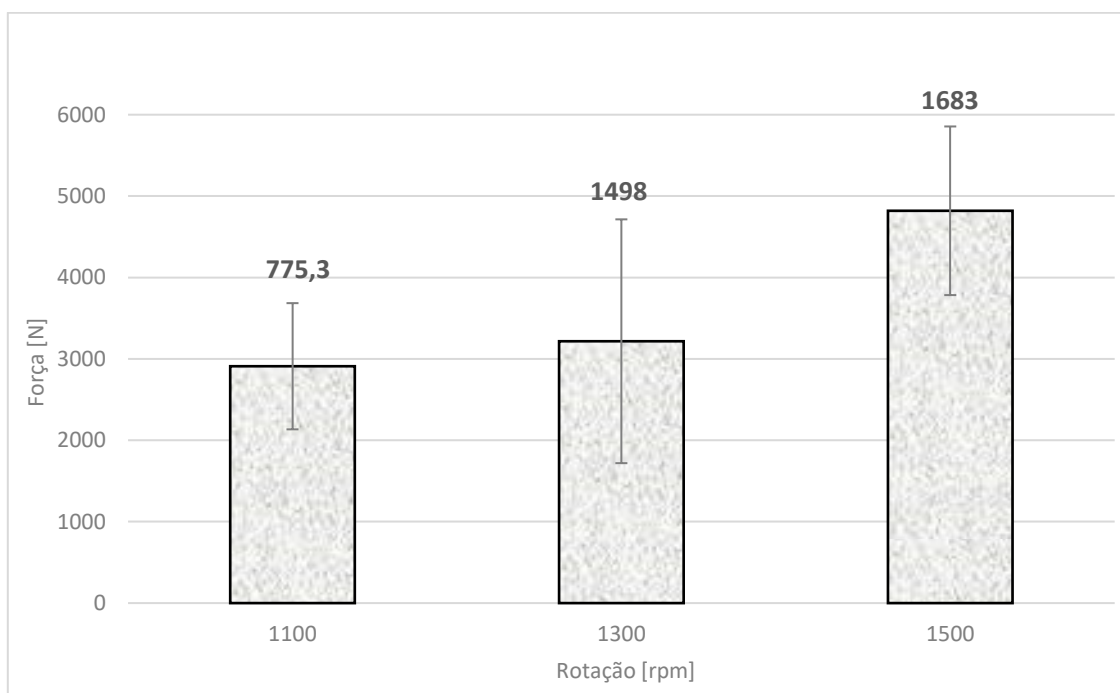
Fonte: Autoria própria

Observa-se na Figura 12, que a força máxima de tração foi obtida na rotação de 1300 r.p.m. Estatisticamente, a menor força se deu na rotação de 1100 r.p.m. Todos os parâmetros estão dentro da margem do desvio padrão,

apesar da rotação de 1300 atingir uma força média superior aos demais, os resultados desses parâmetros são similares.

A Figura 13 indica os valores médios da força máxima para a liga Al5052-H34 nas três rotações utilizadas.

Figura 13 - Valor médio da força máxima para a liga Al5052-H34



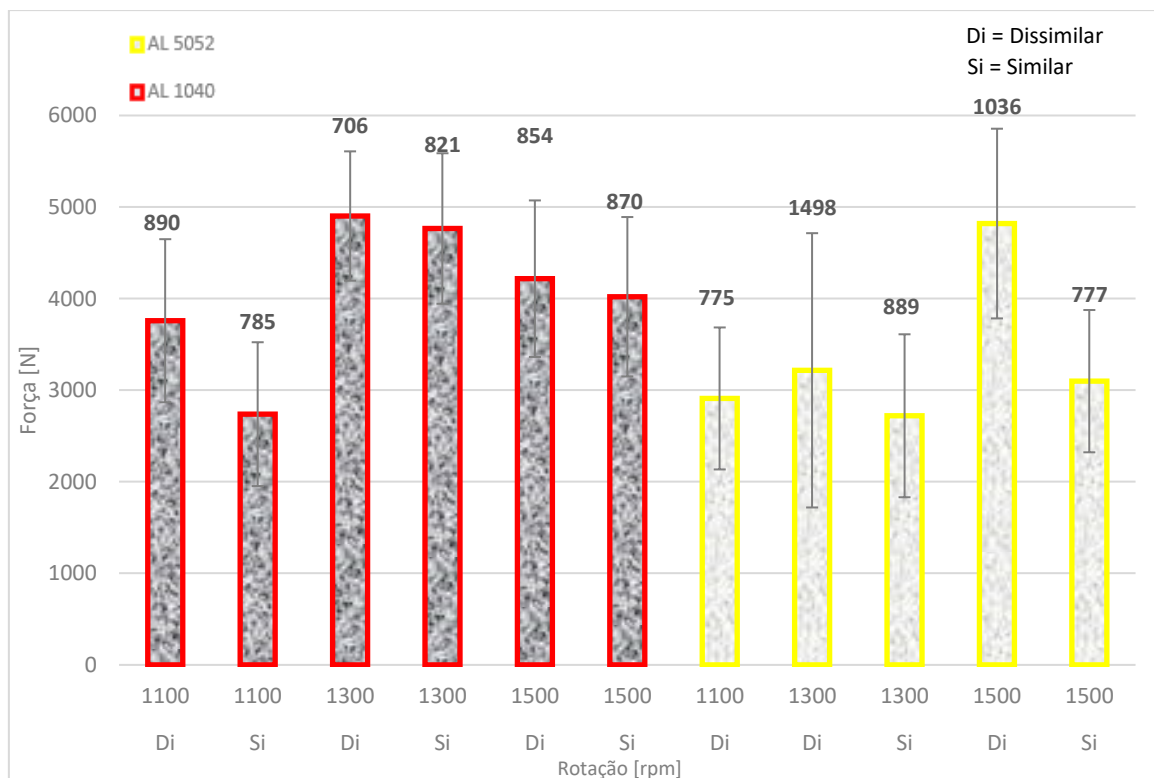
Fonte: Autoria própria

Observa-se na Figura 13 que a maior força média foi atingida na rotação de 1500 r.p.m. No ensaio anterior o desvio padrão das forças foram inferiores a 23% da força média, já na liga Al5052-H34 as forças apresentaram desvio padrão maior que 25%. Nota-se nesta liga que à medida que a rotação aumenta há um crescimento na força média da tração, mas é possível verificar que em 1500 r.p.m. a força é maior que nos demais ensaios. O ensaio com a rotação de 1300 r.p.m. atinge o mesmo valor do 1500 r.p.m., quando se analisa a margem de desvio padrão, mas na rotação de 1100 r.p.m. o maior valor é inferior ao menor valor da força na condição de 1500 r.p.m.

A Figura 14 mostra o comparativo entre todas as forças geradas pelos ensaios, tanto similar como dissimilar. Percebe-se que a maior força na soldagem similar foi obtida no parâmetro de 1300 r.p.m., para a liga Al1040. Quando se compara com a soldagem dissimilar, apenas na rotação de 1100 r.p.m. a força média foi a maior. Nas outras rotações as forças foram

estatisticamente iguais. Na liga Al5052-H34 as forças foram estatisticamente iguais nas rotações de 1300 e 1500 r.p.m., tanto na soldagem similar como na dissimilar; com exceção da rotação de 1500 r.p.m. na soldagem dissimilar, em que ocorreu a maior força média.

Figura 14 - Comparativo geral dos resultados para soldagem similar (Si) e dissimilar (Di).



Fonte: Autoria própria

Observa-se que na liga Al1040 a força tende a aumentar de 1100 r.p.m. a 1300 r.p.m., e volta a decrescer na rotação de 1500 r.p.m. Já na liga de Al5052-H34 não há essa tendência, porque a força quase que se mantém constante e há um pico em 1500 r.p.m.

Possivelmente, na rotação de 1300 r.p.m. ocorreu maior adesão tanto entre Al1040 com Al1040 como na Al1040 com aço galvanizado. Já na liga Al5052-H34 essa maior adesão ocorreu na soldagem dissimilar.

4.3 Interface soldada

Para melhor compreensão dos resultados da força de tração, a interface da solda dissimilar foi analisada no microscópio óptico após o ataque químico.

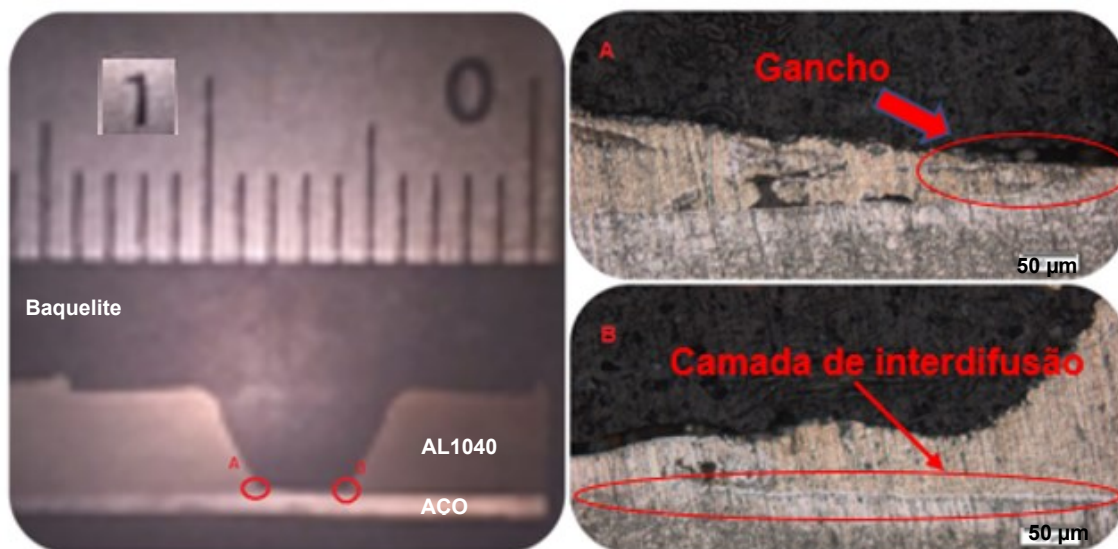
Nas Figuras 15 a 17 pode-se notar características semelhantes da imagem macro da soldagem, ou seja, o formato cônico do pino nas três imagens. Porém, quando ampliada a região da interface, há diferenças nas soldas. Na Figura 16, nos pontos A e C, não apresenta nenhuma característica de gancho, ou seja, situação em que o aço sobrepõe o alumínio. Já nas Figuras 16 e 17, houve uma tendência para a formação de gancho, mas este é pouco perceptível. Na Figura 15 a Banda de deformação tomaram a mesma direção do sentido de rotação da ferramenta, característica essa visualizada apenas na rotação de 1100 r.p.m.

Figura 15 - Interface da soldagem na liga Al1040 no parâmetro de 1100 r.p.m.



Fonte: Autoria própria

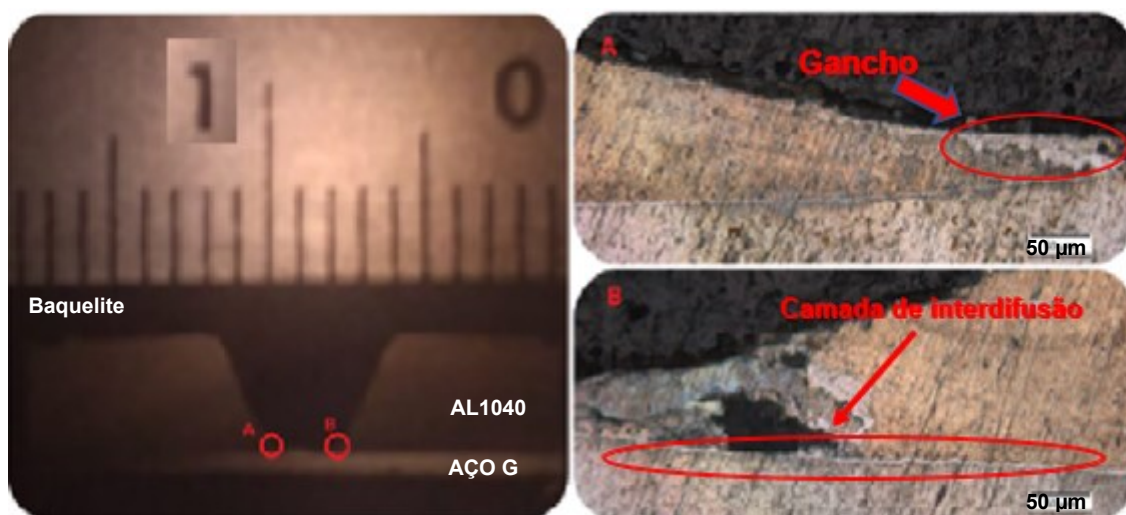
Figura 16 - Interface de soldagem na liga Al1040 no parâmetro de 1300 r.p.m.



Fonte: Autoria própria

Nas figuras 16 e 17 no ponto B nota-se um filete de cor mais clara entre os materiais. Segundo SHEN et al. (2018) e MAITY, RACHERLA (2023), esse filete é caracterizado como uma camada de interdifusão.

Figura 17 - Interface da soldagem Al1040 parâmetro 1500 r.p.m.



Fonte: Autoria própria

Se tratando da liga Al1040 com o aço galvanizado, observa-se que os melhores resultados foram obtidos justamente nos parâmetros em que a soldagem ficou mais homogênea, com poucas irregularidades (descontinuidades), possibilitando a transferência de partículas de aço à liga de alumínio, possibilitando maiores áreas de ancoragem, tornando assim o ponto de solda com maior resistência à tração. Analisando as Figuras essa condição ocorreu justamente no parâmetro de 1300 r.p.m, que apresentou maior força de tração.

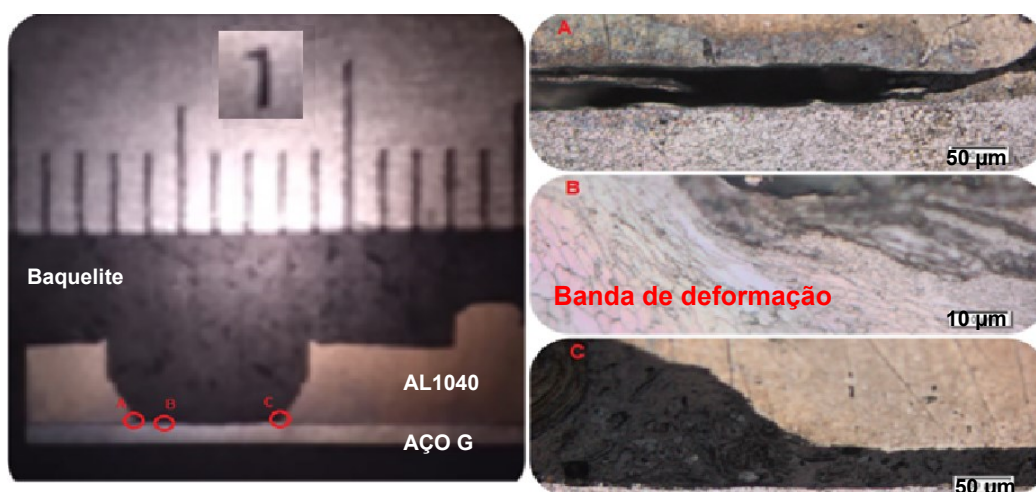
Possivelmente, na rotação de 1500 r.p.m. às partículas de deposição no aço não teve ancoragem suficiente, devido às irregularidades provenientes do processo, o que ocasionou a “quebra” daquelas partículas tornando a solda mais frágil. Porém, a solda é mais resistente do que na rotação de 1100 r.p.m, em que houve mais descontinuidades na interface.

Nas Figuras 18 e 19 estão indicadas a interface da soldagem na liga Al 5052-H34. Se comparada com a liga Al1040, percebe-se que a marca do pino da ferramenta na liga possui formato e a dimensão diferentes. Essa diferença

possivelmente se deve ao desgaste da ferramenta durante os ensaios, resultando em um aspecto de abaulamento na ferramenta.

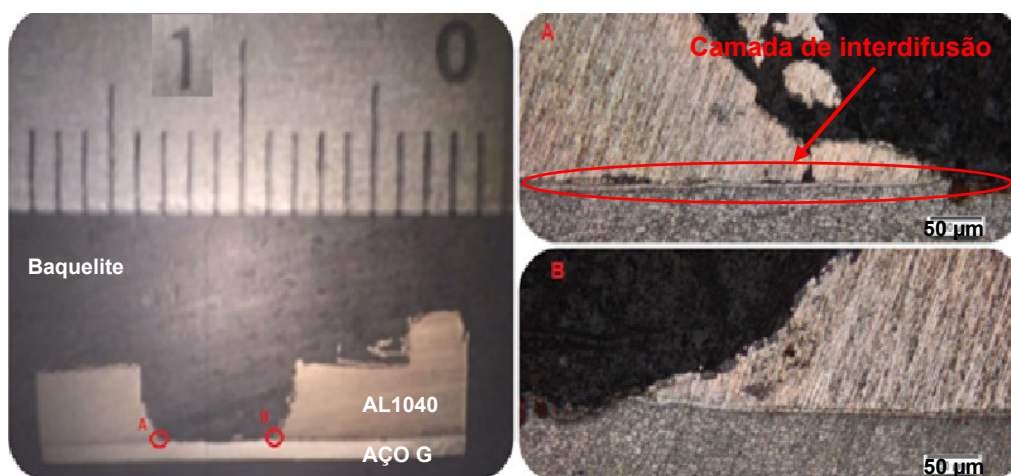
Ao analisar a Figura 19, é possível observar as mesmas camadas de interdifusão visualizadas no Al1040 e a banda de deformação na mesma direção da rotação. Porém, não houve evidência de formação de gancho em nenhum dos parâmetros do Al5052-H34. Na rotação de 1500 r.p.m. a descontinuidade da interface é menor, o que provavelmente levou à maior força média.

Figura 18 - Interface da soldagem Al5052-H34 parâmetro 1300 r.p.m.



Fonte: Autoria própria

Figura 19 - Interface da soldagem do Al5052-H34 parâmetro 1500



Fonte: Autoria própria

Por fim, conclui-se que quanto maior a descontinuidade da interface menor é a resistência da solda; que a presença da camada de interdifusão tende a aumentar a resistência do ponto de solda e que nas condições deste trabalho,

somente na soldagem dissimilar das ligas Al5052-H34 e aço galvanizado a soldagem a ponto confere maior resistência.

5 CONCLUSÕES

Para o processo de soldagem a ponto por fricção agitação realizado no presente trabalho e com os parâmetros de processo utilizados (máquina e ferramenta), pode-se obter as seguintes conclusões:

- ✧ a amostra soldada com as ligas Al1040 e aço galvanizado, na rotação de 1300 r.p.m., obteve a maior força atingindo aproximadamente 4902 N;
- ✧ para todas as rotações, as amostras soldadas com a liga Al5052-H34 e aço galvanizado atingiram forças estatisticamente iguais;
- ✧ na interface da região soldada das ligas Al1040, Al5052-H34 e aço galvanizado foi possível observar uma pequena deformação na microestrutura, onde os grãos tendiam a acompanhar o mesmo sentido de rotação da ferramenta;
- ✧ a presença de uma camada de interdifusão entre os materiais confere ao ponto de solda maior resistência;
- ✧ se comparada a soldagem dissimilar com a similar, somente as ligas Al5052-H34 e aço galvanizado confere maior resistência na soldagem dissimilar.

Sugestões para futuras pesquisas

Com o objetivo de agregar conhecimento e destinar novos caminhos para trabalhos de pesquisas futuras, sugere-se alguns tópicos para futuros estudos:

- testar outros parâmetros principalmente para a liga Al5052-H34, variando as rotações e a penetração no material;
- utilizar resfriamento durante o processo para minimizar o aquecimento dos materiais e suporte;
- utilizar outra geometria e material de ferramenta.

REFERÊNCIAS

ASM - American Society for Metals. **Metals Handbook**. v.2 Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. ASM International, 10ª Ed., Metals Park-Ohio, 3470 p., 1992

BACKER, J.D.; VERHEYDEN, B. **Robotic Friction Stir Welding for Automotive and Aviation Applications**. Master Thesis. Department of Engineering Science, University West, Trollhättan, Sweden, 2009. Disponível em: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:288986/FULLTEXT01.pdf>. Acesso em: 20 de junho de 2022

BADAVATH,H.J.;CHATTOPADHYAY, S.; SHANKAR, S.Soldagem no estado sólido e suas aplicações: uma revisão metodológica. 2022 **Anais** [...] da Conferência AIP 17.

BARBOSA, C.E.C. **Solda por fricção e mistura mecânica a ponto em chapas automotivas de aço de baixo teor de carbono**. Dissertação – Centro Universitário FEI, São Paulo, 2021.

BERGAMAN, J.P; Köhler, T.; Pöthig, P. **Advanced Joining Processes: Welding, Plastic Deformation, and Adhesion**. Chapter 7 - Ultrasonic welding. Imprint Elsevier. p.239-267. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/book/9780128207871/advanced-joining-processes>. Acesso em 19 de junho de 2022.

BRZOSTEK, R.C. **Estudo da fratura em solda ponto por fricção em alumínio ALCLAD 2024-T351 e alumínio 2024-T351**: uma abordagem numérica e experimental. 2012. 204 f. Dissertação (Mestrado) – UFRGS, Porto Alegre, 2012.

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 & Inspeção**. 2009; 14 (3) <https://doi.org/10.1590/S0104-92242009000300005>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/si/a/fHgLMMGc4brB7Wcsh8pLyVK/>. Acesso em: 20 de julho, 2022.

COTA, B.S.; BRACARENSE, A.Q. Soldagem Dissimilar da Liga de Alumínio 5052 H34 e do Aço SAE 1020 pelo Processo Hybrid Friction Stir Welding Assistido por Plasma: Análise da Resistência Mecânica, do Desgaste da Ferramenta e dos Esforços de Soldagem. **Soldagem & Inspeção**. 2020; 25. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI25.09>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/si/a/WzNTzvp7d7RBKm5QVjFGLL/?lang=pt>. Acesso em: 25 de junho, 2022.

FRIEDRICH, A. **Estudo do processo de soldagem ponto por fricção e mistura mecânica (FSSW) da liga de alumínio 6060-T5**. Santa Catarina, 2021. Trabalho de Conclusão de Curso. Coordenação de Engenharia Mecânica. Instituto Federal de Santa Catarina, Xanxerê, 2021.

GARCIA, A.; SPIM, J.A.; SANTOS, C.A. **Ensaio dos Materiais**, 2ª edição. Grupo GEN, 2012. ISBN 978-85-216-2114-0. E-book Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-2114-0/>. Acesso em: 04 abr. 2023.

GÓSS, I.; AITA, C.; DE SOUZA ROSENDO, T. FRICTION STIR SPOT WELDING: ESTUDO DOS EFEITOS DOS PARAMETROS DE SOLDAGEM NA LIGA AA6060-T5. In do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão, v. 9, n. 2, 3 mar. 2017. **Anais** [...], Santa do Livramento: UNIPAMPA..

GROOVER, M.P. **Introdução aos Processos de Fabricação**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2014. E-book. ISBN 978-85-216-2640-4. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-2640-4/>. Acesso em: 12 mai. 2023.

HEIDARZADEH, A. et al. Friction stir welding/processing of metals and alloys: A comprehensive review on microstructural evolution. **Progress in Materials Science**. v.117, April 2021. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100752>

JÚNIOR, A. R., “**Estrutura integral por Soldagem por Atrito “Friction Stir Welding - FSW - Requisitos básicos para o projeto estrutural”**”, Dissertação de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2003.

KIMINAMI, C.S.; CASTRO, W.B.; OLIVEIRA, M.F. **Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos**, São Paulo, Blucher, 2013. E-book Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/002490450>

LATHABAI, S. et al. Friction Spot Joining of an Extruded Al-Mg-Si Alloy. **Scripta Materialia**. Volume 55, Issue 10, November 2006, Pages 899-902. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2006.07.046>

LIMA, J. S. et al. Influence of FSW Process Parameters on The Magnitude of Residual Stresses In AA7075-T651 Aluminum Alloy Welded Joints. Proceedings of the 25th International Congress of Mechanical Engineering. **Anais** [...] Uberlândia: ABCM, 2019. E-book Disponível em: <https://abcm.org.br/>. Acesso em: 15 junho 2022.

MAITY, D.; RACHERLA, V. A new friction processing method for welding of dissimilar metals. **Material Today Communications**. V. 35, June 2023, 106095. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.106095> MARQUES, P.V.; MODENISE, J.P.;

BRACARENSE, A.Q.; **Soldagem: fundamentos e tecnologia** – Belo Horizonte: Universidade Federal Minas Gerais, 2009. E-book: Disponível em: <https://demet.eng.ufmg.br/laboratorios/laboratorio-de-soldagem/soldagem-fundamentos-e-tecnologia/>. Acesso em: 18 junho 2022.

MENDES, C.L.; SILVEIRA, A.M. **Ensaaios mecânicos**. Porto Alegre, Grupo A. 2018. E-book Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595025028/>. Acesso em: 24 fev. 2023.

MISHA, R. S.; MA, Z. Y. Friction Stir Welding and Processing. **Materials Science and Engineering**, vol. 50, Issues 1–2, 31 August 2005, p. 1-78. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2005.07.001>

NANDAN, R.; DEBROY, T.; BHADESHIA, H. K. D. H. Recent advances in Friction Stir Welding – process, weldment structure and properties. **Progress in Materials Science**. Vol. 53, Issue 6, August 2008, p. 980-1023. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2008.05.001>

NORTON, S. J. **FERROUS FRICTION STIR WELD PHYSICAL SIMULATION**. Columbus, Ohio: The Ohio State, Dissertação, University, 2006.

OLIVEIRA, K.M.B. **Efeito do tecimento em Soldagem por Fricção Linear (FSW) aplicado em alumínio naval 5052**. 2019. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Materiais) – Campus Universitário de Ananindeua, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2018.

PARCIANELLO, C.T; ROSENDO, T.S. Projeto de uma máquina de solda ponto por fricção (FSSW). In.: XXV CONGRESSO REGIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA EM ENGENHARIA – CRICTE 2013. **Anais [...]** Passo Fundo - RS. Disponível em: http://cricte.upf.br/papers/paper_29.pdf. Acesso em: 05 de maio, 2022.

PLAINE, A. H. **Soldagem por Fricção e Mistura (FSW) no Aço Inoxidável Austenítico AISI 304**. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciências Exatas e da Terra). Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013.

QUEIROGA, F. A. **Solda a ponto por atrito e mistura em juntas similares de aço ao boro 22MnB5**. 2022. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo, 2022.

ROSENDO, T.S. **Estudo do Desempenho Mecânico de Solda(s) Ponto por Fricção (FSpW) da Liga AA6181-T4**. 2009. 132 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2009

SANTOS, C.E.F.D. **Processos de Soldagem - Conceitos, Equipamentos e Normas de Segurança**. São Paulo: Saraiva, 2015. E-book. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536520063/>. Acesso em: 20 junho 2022

SANTOS, F. Aumentando as possibilidades em design e corte de custos. **FSW Brasil**. 5 de abril de 2019. Disponível em: <http://fswbrasil.com.br/site/processo-fsw-friction-stir-welding-aumentando-as-possibilidades-em-design-e-corte-de-custos/>. Acesso em: 20 junho 2022.

SANTOS, H.N. **Avaliação do efeito da corrosão em juntas sobrepostas da liga AL6060-T5 soldadas pelo processo FSSW**. 2021. 119p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete, Alegrete, 2021.

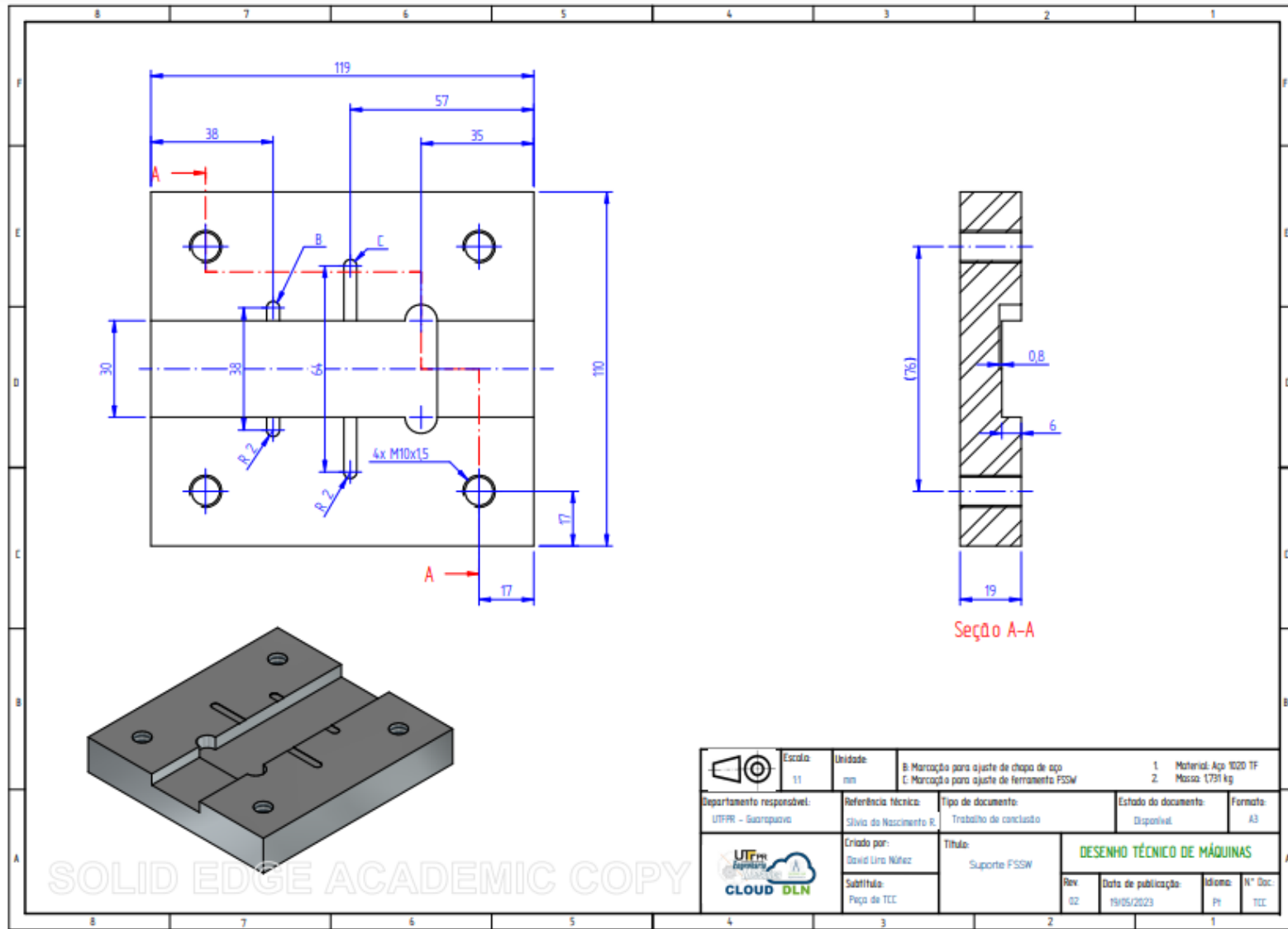
SHEN, Z. et al. Effects of tool design on the microstructure and mechanical properties of refill friction stir spot welding of dissimilar Al alloys. **Journal of Materials Processing Technology**. V. 252, February 2018, p. 751-759. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.10.034>

SHEN, Z.; DYNG, Y.; GERLICH, A.P. Advances in friction stir spot welding. **Critical Reviews in Solid State and Material Sciences**. V. 45, Issue 6, p. 457-534. Published online: 09 Oct. 2019. <https://doi.org/10.1080/10408436.2019.1671799>

THOMAS, W.M.; NICHOLAS, E.D.; KALLEE, S. W. **Friction based technologies for joining and processing**. TMS Friction Stir Welding and Processing Conference, November 2001, Indianapolis. Disponível em: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/friction-based-technologies-for-joining-and-processing-september-2001>. Acesso em: 05 de maio, 2022

YANG, X.W.; FU, T.; LI, W.Y. Friction stir spot welding: a review on joint macro and microstructure, property, and process modelling. **Advances in Friction Welding**. V. 2014, Article ID 697170. <https://doi.org/10.1155/2014/697170>. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/amse/2014/697170/>. Acesso em:

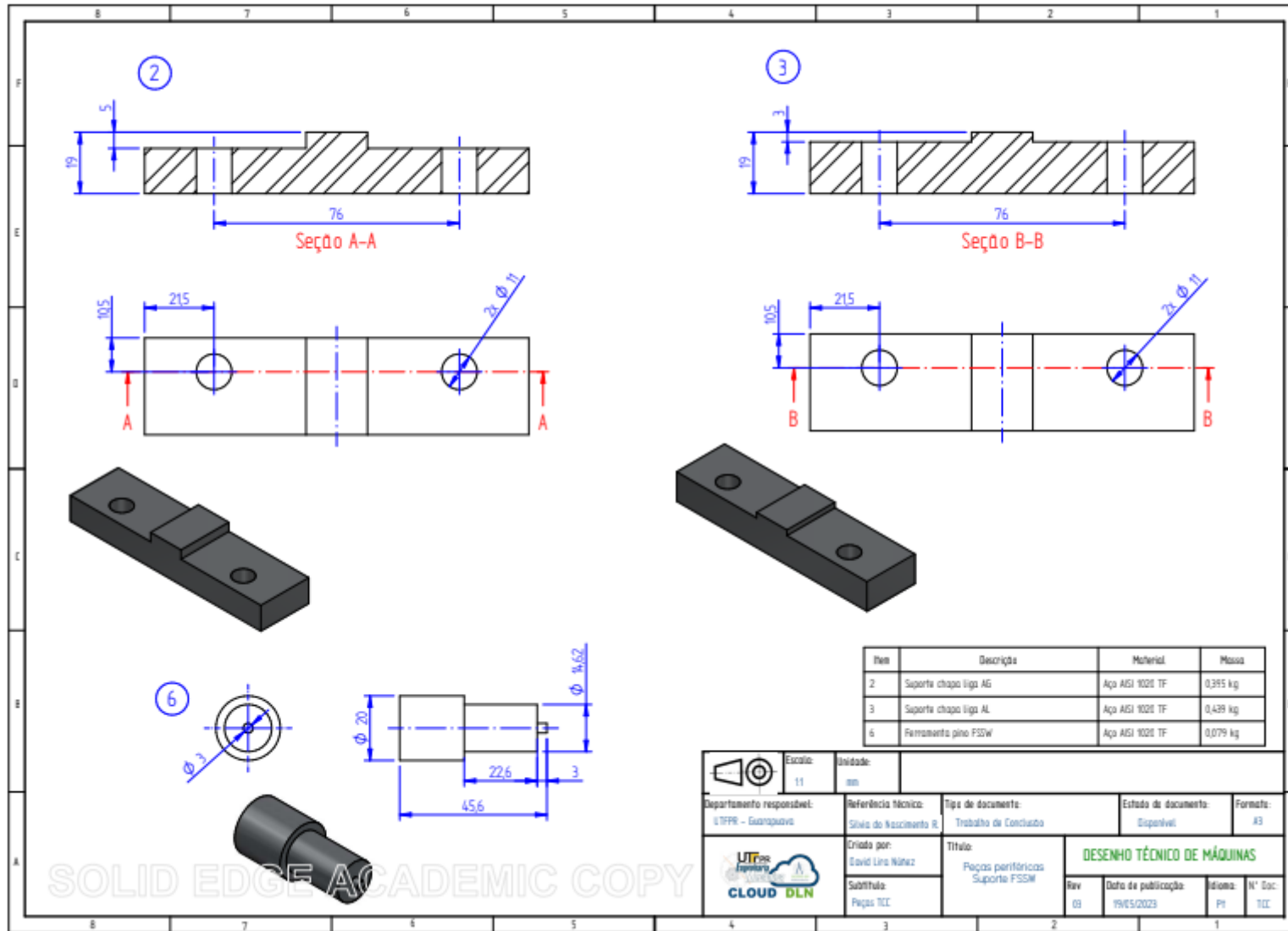
APÊNDICE A - PROJETO DO SUPORTE



	Escala: 1:1	Unidade: mm	B: Marcação para ajuste de chipa de aço C: Marcação para ajuste de ferramenta FSSM	1 Material: Aço 1020 TF 2 Massa: 1,751 kg
	Departamento responsável: UTFPR - Guarapuava	Referência técnica: Sílvia do Nascimento R.	Tipo de documento: Trabalho de conclusão	Estado do documento: Disponível
Criado por: David Lino Nêmez		Título: Suporte FSSM	DESENHO TÉCNICO DE MÁQUINAS	
Subtítulo: Peça de TCC		Rev: 02	Data de publicação: 19/05/2023	Idioma: PT
				N° Doc: TCC

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

APÊNDICE B – SUPORTES DE FIXAÇÃO CHAPA DE ALUMÍNIO E AÇO

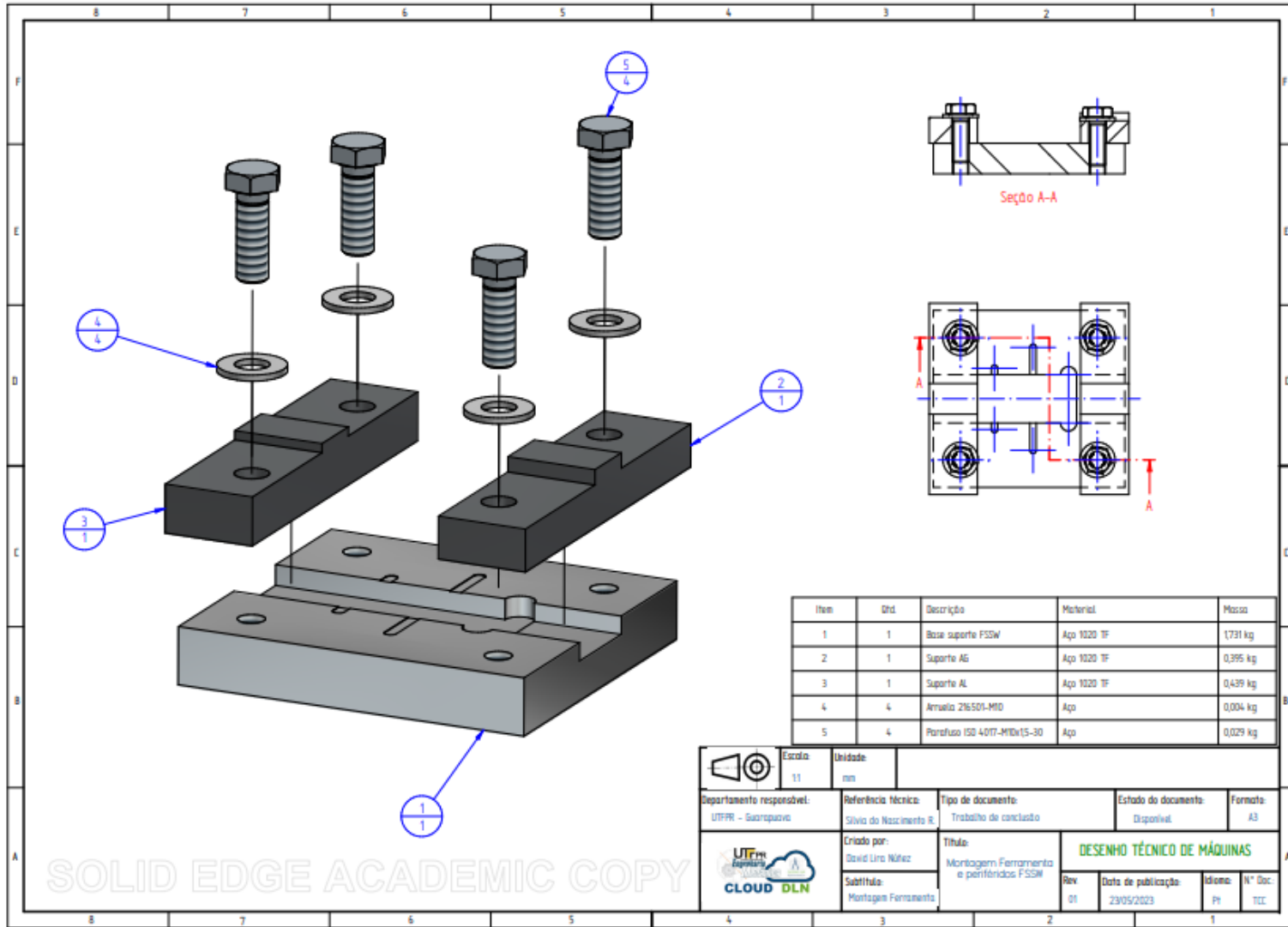


Item	Descrição	Materiais	Massa
2	Suporte chapa liga AG	Aço AISI 1020 TF	0,395 kg
3	Suporte chapa liga AL	Aço AISI 1020 TF	0,429 kg
6	Ferroamento pino FSSW	Aço AISI 1020 TF	0,079 kg

Escala: 1:1 Unidade: mm	Departamento responsável: UFRP - Guarapuá Referência técnica: Símbolo do Nascimento R. Tipo de documento: Trabalho de Conclusão Estado do documento: Disponível Formato: A3	Criado por: David Lima Nêze Substituído: Peças TIC Título: Peças periféricas Suporte FSSW DESENHO TÉCNICO DE MÁQUINAS
	Rev: 03 Data de publicação: 19/05/2023 Folha: 01 N° Esc: TIC	

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

APÊNDICE C – DESENHO COM VISTA EXPLODIDA DO SUPORTE



APÊNDICE D – IMAGENS DOS CORPOS DE PROVA SOLDADOS COM VISTA PARA O LADO DO AÇO GALVANIZADO



APÊNDICE E – CÓDIGO ISO UTILIZADO PARA A SOLDA A PONTO NO CENTRO DE USINAGEM

O0023 (soldagem a ponto)

N10 G17 G21 G90 G94;

N15 G53 G00 Z0 H0 M05;

N20 T11;

N25 M06;

N30 G54 S1500 M03;

N40 G43 Z1 H11 D 11;

N45 G01 Z-3.4 F3;

N50 G04 X5;

N55 G01 Z2 F100;

N60 G40;

N65 G53 G00 Z0 H0 M05;

N70 M30;