

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE-FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

VINÍCIUS AMARO DA SILVEIRA ARPINO

**CARACTERIZAÇÃO DE JUNTA SOLDADA DE LIGA DE ALUMÍNIO AA5052
USANDO PROCESSO DE SOLDAGEM POR FRICÇÃO E MISTURA (FSW)**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

RIO GRANDE, RS

2025

VINÍCIUS AMARO DA SILVEIRA ARPINO

**CARACTERIZAÇÃO DE JUNTA SOLDADA DE LIGA DE ALUMÍNIO AA5052
USANDO PROCESSO DE SOLDAGEM POR FRICÇÃO E MISTURA (FSW)**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG como requisito para obtenção do título de “Mestre em Engenharia de Mecânica” – Área de Concentração: Engenharia de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Augusto Dornelles do Amaral

Co-orientador: Prof. Dr. Mario César Sánchez Orozco (professor visitante)

RIO GRANDE, RS

2025

Ficha Catalográfica

A772c Arpino, Vinícius Amaro da Silveira.

Caracterização de junta soldada de liga de alumínio AA5052 usando processo de soldagem por fricção e mistura (FSW) / Vinícius Amaro da Silveira Arpino. – 2025.
60 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Rio Grande/RS, 2025.

Orientador: Dr. Fábio Augusto Dornelles do Amaral.

Coorientador: Dr. Mario César Sánchez Orozco.

1. Soldagem por fricção e mistura 2. Liga de alumínio AA5052
3. Caracterização mecânica 4. Eficiência da junta soldada I. Amaral, Fábio Augusto Dornelles do II. Orozco, Mario César Sánchez
III. Título.

CDU 621

Catálogo na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
PPGEMec



Ata nº **01/2025** da Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Aos vinte e um dias do mês de fevereiro de dois mil e vinte e cinco, foi instalada a Banca de Defesa de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, às oito horas e trinta minutos, online via web conferência, a que se submeteu o mestrando **VINÍCIUS AMARO DA SILVEIRA ARPINO**, nacionalidade brasileiro, dissertação ligada a linha de pesquisa de Simulação e Controle de Processos de Fabricação, com o seguinte título: **CARACTERIZAÇÃO DE JUNTA SOLDADA DE LIGA DE ALUMÍNIO AA5052 USANDO PROCESSO DE SOLDAGEM POR FRICÇÃO E MISTURA (FSW)**. Referendada pela Câmara Assessora do Curso, os seguintes Professores Doutores: Fábio Augusto Dornelles do Amaral, orientador, Mario César Sánchez Orozco, Coorientador, Henara Lilliam Costa Murray e o convidado Hipólito Domingo Carvajal Fals sob a presidência do Professor Fábio Augusto Dornelles do Amaral. Analisando o trabalho, os Professores da Banca Examinadora o consideraram:

1. Fábio Augusto Dornelles do Amaral: APROVADO
2. Henara Lilliam Costa Murray: APROVADO
3. Hipólito Domingo Carvajal Fals: APROVADO

Foi concedido um prazo de 30 dias para o candidato efetuar as correções sugeridas pela Comissão Examinadora (anexo) e apresentar o trabalho em sua redação definitiva, sob pena de não expedição do Diploma. A ata foi lavrada e vai assinada pelos membros da Comissão.

Assinaturas:

Documento assinado digitalmente
gov.br **FABIO AUGUSTO DORNELLES DO AMARAL**
Data: 21/02/2025 11:41:26-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

1. _____
CPF: 905.700.220-53

Documento assinado digitalmente
gov.br **HENARA LILLIAN COSTA MURRAY**
Data: 21/02/2025 11:55:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

2. _____
CPF: 847.358.106-20

Documento assinado digitalmente
gov.br **HIPOLITO DOMINGO CARVAJAL FALS**
Data: 21/02/2025 11:21:18-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

3. _____
CPF: 188.217.068-77

Documento assinado digitalmente
gov.br **VINICIUS AMARO DA SILVEIRA ARPINO**
Data: 21/02/2025 12:52:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Vinícius Amaro da Silveira Arpino: _____

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho á meu pai,
minha mãe e
minha irmã.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a meu pai, Claudemar (*in memorian*), que me inspirou a seguir a profissão que ele exerceu por tantos anos.

Agradeço a minha mãe, Cláudia, que sempre me deu suporte enquanto dispendia muitas horas de pesquisa e estudo.

Ao meu orientador, Dr. Fábio Amaral e ao meu co-orientador, Dr. Mário Orozco, pela confiança e auxílio na condução da pesquisa.

Aos técnicos Bruno Laner, Jorge de Oliveira e Cristiano Celente, pelo auxílio na utilização dos laboratórios de Metalografia e Usinagem.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da FURG – PPMEC.

À FURG e ao IFRS – Campus Rio Grande, por todo o conhecimento técnico que recebi ao longo dos últimos anos.

A empresa Favorit: Aços especiais, por ter doado o aço H13 utilizado neste trabalho.

E a todos, que de forma indireta, contribuíram para a execução deste trabalho e para minha formação.

RESUMO

O aumento significativo da utilização das chamadas ligas leves na indústria, nas últimas décadas, requer que sejam desenvolvidos processos de fabricação para alterar sua forma e uni-las. Ligas de alumínio, magnésio e titânio vem tomando espaço em diversas aplicações, com intuito de reduzir massa das estruturas e consumo de energia de máquinas e equipamentos. O processo de soldagem não convencional FSW (*Friction Stir Welding*) executa uniões em materiais por atrito e mistura mecânica do material amolecido quando em contato com uma ferramenta rotativa, sem transições líquido-sólido. Neste trabalho, foram estudados os parâmetros de soldagem a serem utilizados no FSW para união da liga leve AA5052-H32, utilizando uma ferramenta confeccionada em aço H13. As juntas soldadas, executadas com 5 conjuntos de parâmetros distintos foram caracterizadas mecanicamente por microscopia, microdureza e ensaio de tração a fim de se encontrar a rotação da ferramenta e velocidade de avanço ótimas, maximizando a eficiência da junta. A eficiência da junta é a divisão da tensão última da junta pela tensão última do metal base. Foi verificado um comportamento decrescente da eficiência da junta a partir de 800 RPM de rotação da ferramenta e de 40 mm/min de velocidade de avanço. Conseguiu-se 83,1% de eficiência de junta utilizando 800 RPM e 40 mm/min como parâmetros de soldagem, sendo estes considerados ótimos no intervalo experimentado. As juntas de menor resistência mecânica geradas alcançaram 71,8% de eficiência.

Palavras-chave: Soldagem por fricção e mistura, liga de alumínio AA5052, caracterização mecânica, eficiência da junta soldada

ABSTRACT

The significant increase in the use of so-called light alloys in industry in recent decades requires that manufacturing processes be developed to change their shape and unite them. Aluminum, magnesium and titanium alloys are taking advantage of space in various applications with the aim of reducing the mass of structures and energy consumption of machines and equipment. The unconventional FSW (Friction Stir Welding) welding process performs unions in materials by friction and mechanical mixing of the softened material when in contact with a rotating tool, without liquid-solid transitions. In this work, the welding configurations to be used in FSW to join the light alloy AA5052-H32 were trained, using a tool made from H13 steel. The welded joints, performed with 5 sets of different characteristics, were mechanically characterized by microscopy, microhardness and tensile testing to find improved tool speed and feed speed, maximizing joint efficiency. Joint efficiency is the division of the ultimate stress of the joint by the ultimate stress of the base metal. A decreasing behavior of joint efficiency was selected from 800 RPM of tool rotations and 40 mm/min of feed speed. Through other works, a parabolic behavior for joint efficiency related to these parameters is pointed out. 83.1% joint efficiency was achieved using 800 RPM and 40 mm/min as welding intervals, which were considered optimal in the range experimented. The joints with the lowest mechanical resistance generated achieved 71.8% efficiency.

Keywords:

Friction stir welding, AA5052 aluminum alloy, mechanical characterization, weld joint efficiency

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Movimentos e forças envolvidas no processo de soldagem por FSW	4
Figura 2 – Regiões distintas geradas em junta soldada por FSW	5
Figura 3 - Algumas geometrias de ferramentas utilizadas no processo FSW	7
Figura 4 – Processo FSW e linhas de pesquisa atualmente em destaque	9
Figura 5 - Defeitos de falta de penetração, furo no fim e túnel de superfície	15
Figura 6 - Classificação das ligas de alumínio	16
Figura 7 - Fluxograma experimental do trabalho	23
Figura 8 - Ferramenta fabricada	26
Figura 9 - Sistema de fixação e chapas fixadas na máquina CNC	27
Figura 10 - Trajeto da Ferramenta de Soldagem	28
Figura 11 - Corpos de prova e amostras a serem usinados da junta	29
Figura 12 - Junta soldada por FSW aprovada qualitativamente	30
Figura 13 - Experimentos realizados	31
Figura 14 - Usinagem de corpos de prova de tração e amostras	33
Figura 15 - Grãos alongados na direção de laminação - material como recebido	35
Figura 16 - Superfície das juntas soldadas por FSW: (a) Experimento 1 (avanço = 40 mm/min e rotação = 800 RPM), (b) Experimento 2 (avanço = 80 mm/min e rotação = 800 RPM), (c) Experimento 3 (avanço = 40 mm/min e rotação = 1000 RPM), (d) Experimento 4 (avanço = 80 mm/min e rotação = 1000 RPM) e (e) Experimento 5 (avanço = 60 mm/min e rotação = 900 RPM).	36
Figura 17 - Experimento 1 – Rotação da ferramenta = 800 RPM	38
Figura 18 - Experimento 2 - Rotação da ferramenta = 800 RPM	38
Figura 19 - Experimento 3 - Rotação da ferramenta = 1000 RPM	39
Figura 20 - Experimento 4 - Rotação da ferramenta = 1000 RPM	39
Figura 21 - Experimento 5 - Rotação da ferramenta = 900 RPM	40

Figura 22 - Perfis de microdurezas das juntas soldadas	41
Figura 23 – Perfil de microdureza variando o avanço e	42
Figura 24 – Perfil de microdureza variando a rotação e	43
Figura 25 - Curva tensão x deformação das juntas	44
Figura 26 - Tensões de escoamento das juntas ensaiadas	45
Figura 27 - Tensões últimas das juntas ensaiadas	45
Figura 28 - Eficiências de juntas	46
Figura 31 - Ductilidade do metal base e das juntas soldadas	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Faixa de parâmetros tipicamente utilizados no processo FSW	8
Tabela 2 - Refinamento de grão conseguido utilizando FSP	12
Tabela 3 - Ligas de alumínio soldadas por FSW x material da ferramenta	14
Tabela 4 - Propriedades físico-mecânicas de ligas de alumínio	17
Tabela 5 - Requisitos de composição química para AA5052 segundo ASTM B-209-14	18
Tabela 6 - Requisitos para propriedades mecânicas da liga AA5052	19
Tabela 7 - Composição química do aço ferramenta H13	21
Tabela 8 - Perda de dureza do H13 sob altas temperaturas	22
Tabela 9 - Máquinas e equipamentos utilizados nos experimentos	24
Tabela 10 - Níveis dos Experimentos Realizados	31
Tabela 11 - Valores para o níveis experimentados	32
Tabela 12 - Propriedades Mecânicas do Alumínio AA5052-H32 caracterizado	34
Tabela 13 - Resultado da espectrometria de massa - AA5052	35
Tabela 14 – Resultado da espectrometria de massa – H13	36
Tabela 15 - Tamanho de grão nas <i>Nugget Zones</i> em cada experimento realizado	40
Tabela 16 - Eficiência das Juntas soldadas	46

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AA	Aluminum Association
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CNC	Computer Numeric Control
FSP	Friction Stir Process
FSW	Friction Stir Welding
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
HAZ	Heat Affected Zone
HSS	High Speed Steel
ISO	International Organization for Standardization
LBW	Laser Beam Welding
LCA	Life Cycle Assessment
NZ	Nugget Zone
PCBN	Polycrystalline Cubic Boron Nitride
SPR	Shoulder to pin ratio
TMAZ	Thermo-mechanically affected zone
TWI	The Welding Institute
UWFSW	UnderWater Friction Stir Welding

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVOS	3
1.2. Objetivos Específicos	3
2. ESTADO DA ARTE	4
2.1. Conceito e definições	4
2.2. Variáveis no processo FSW	6
2.3. Linhas de pesquisa utilizando FSW ou FSP	8
2.4. Alumínio e suas ligas	15
2.5. Liga AA5052	17
2.6. FSW aplicado a liga AA5052	19
2.7. Aço ferramenta H13	20
3. MATERIAIS E MÉTODOS	22
3.1. Materiais	23
3.2. Metodologia	24
3.2.1. Caracterização dos Materiais Metálicos	24
3.2.2. Projeto e Fabricação da Ferramenta de Soldagem	24
3.2.3. Preparação das Juntas Soldadas	25
3.2.4. Testes Iniciais de Soldagem	28
3.2.5. Procedimento Experimental para Soldagem	29
3.2.6. Soldagem e Extração dos Corpos de Tração e Amostras	31
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
4.1. Resultados da Caracterização dos Materiais como recebidos	33
4.2. Resultados da Caracterização das Juntas Soldadas	35
4.2.1. Análise por Inspeção Visual	35

4.2.2.	Análise por Microscopia Ótica	36
4.2.3.	Análise de Microdureza	39
4.2.4.	Ensaio de Tração.....	43
5.	CONCLUSÕES	49
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	50
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
7.1.	Referências Nominais	51
7.2.	Referências por Estrato	57
7.3.	Referências por Qualis.....	57
7.4.	Referências por Data dos Artigos	58

1. INTRODUÇÃO

Entre uma ampla gama de processos de fabricação voltados a forma de união dos metais, as uniões permanentes são frequentemente utilizadas em aplicações onde não se deseja uma desmontagem posterior ou até mesmo quando há um risco a segurança. Técnicas de união permanente com fusão dos metais, como os processos a arco elétrico são limitadas, quando materiais com médio ou alto teor de carbono, média ou alta liga, são soldados. O chamado *carbono equivalente* de um material determina a facilidade em soldá-lo (soldabilidade), a probabilidade de geração de defeitos e a necessidade de pré e/ou pós-tratamentos térmicos (Odebiyi *et al.*, 2019).

O investimento necessário em técnicas de inspeção, destrutivas e não destrutivas, das juntas soldadas a arco elétrico, em materiais de baixa soldabilidade, visam garantir a confiabilidade da resistência mecânica da junta. Técnicas mais precisas e menos invasivas a junta tornam pouco econômico esse tipo de união. As altas temperaturas atingidas na poça de fusão criam regiões com alterações microestruturais, devido as taxas de resfriamento atingidas e a solidificação. Estes últimos são os principais causadores de defeitos, como trincas induzidas por hidrogênio, distorções, segregações, compostos intermetálicos fragilizadores e porosidade relacionada ao efeito de gases (Givi, 2014) .

Outro fator inibidor da utilização da união dos metais por arco elétrico em alguns materiais são as questões energéticas e ambientais que, no mínimo há três décadas ganharam evidência, visto os sinais de degradação do planeta Terra. Nesta linha de pesquisa, Shrivastava (2015) relatou que a soldagem da liga de alumínio AA6061-T6 por FSW (*Friction Stir Welding*) consumiu apenas 58% da energia quando comparada a soldagem por *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), utilizou 10% a menos de material para fabricação da junta e emitiu 31% menos gases durante o processo.

A utilização de energia advinda de fontes não renováveis e o desperdício de grande parte dessa energia qualificam os processos que utilizam grande aporte térmico como inimigos do meio ambiente. Há também questões relacionadas a

geração de resíduos e necessidade de metais de adição para o preenchimento de juntas. Em Bevilacqua et al., (2020), é comparado o LCA (*Life Cycle Assessment*) de juntas soldadas por FSW, por GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) e LBW (*Laser Beam Welding*). É demonstrado que existe mais entradas energéticas e de insumos em GTAW (gases, varetas de adição) do que em FSW. O LCA do FSW é fortemente influenciado pela velocidade de avanço e, mesmo considerando o gasto energético com pré e/ou pós-tratamento térmico da junta em ligas de alumínio, possui grande sustentabilidade.

A necessidade de “fazer mais com menos”, em termos de consumo de energia e de materiais, fez indústrias com grande participação na economia global, como ferroviária, aviária, naval, aeronáutica, espacial e automotiva, optarem pela utilização de materiais de alta resistência, automaticamente, diminuindo espessuras e o consumo. Reduzir o consumo energético de meios de transporte como navios, automóveis, trens e aeronaves, através da redução de massa, também tem a atenção dessas indústrias atualmente. São necessárias técnicas de processamento sustentáveis, como processos união dos metais com baixo aporte térmico, para adequar-se à nova realidade do planeta. Algumas vantagens da FSW são: menor quantidade de energia utilizada, diminuição de pós processamento, como remoção de rebarbas e qualidade das juntas superiores, principalmente na soldagem de materiais dissimilares e de alta liga (Mehta, 2019).

Mishra (2005) relatou que o processo FSW foi desenvolvido inicialmente para soldagem de ligas de alumínio (baixos pontos de fusão e de amolecimento) e atendeu a todos os requisitos citados anteriormente quanto ao racionamento de recursos do planeta. Para se ter ideia, a soldagem por FSW de juntas finas em ligas de alumínio com o processo de soldagem Laser consome apenas 2,5% da energia requerida pelo último. Através do que foi exposto, fica evidente que a linha de pesquisa em torno do processo FSW e todas as suas variações deve ser exaurida ao máximo, até que sejam conhecidas todas as variáveis que influenciam na qualidade das juntas soldadas por este processo, como materiais, geometrias de ferramentas, formas de fixações das peças, ligas tecnicamente viáveis de serem soldadas, parâmetros de soldagem ótimos, etc.

1.1.OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho é caracterizar a junta soldada por FSW da liga de alumínio AA5052, conhecida como alumínio naval, quanto a resistência mecânica, correlacionando com os parâmetros de soldagem utilizados.

1.2.Objetivos Específicos

A fim de alcançar o objetivo geral deste trabalho, os objetivos específicos deste trabalho são:

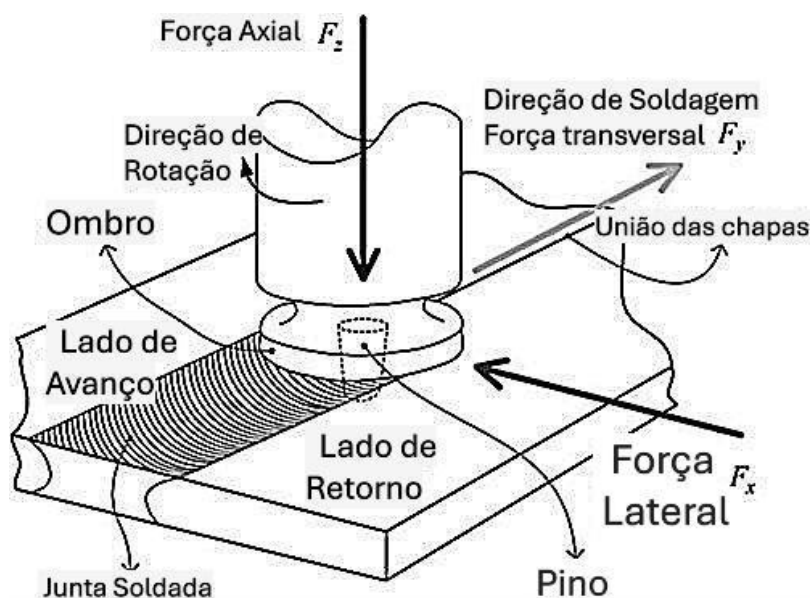
1. Desenvolver o projeto e fabricar uma ferramenta de soldagem por FSW que resista na sua aplicação
2. Estudar a relação da variação na rotação da ferramenta com as propriedades mecânicas da junta soldada através de microscopia, microdureza e ensaio de tração
3. Estudar a relação da variação na velocidade de avanço durante a soldagem com as propriedades mecânicas da junta através de microscopia, microdureza e ensaio de tração
4. Definir parâmetros ótimos de soldagem dentro das faixas de rotação da ferramenta e velocidade de avanço pesquisadas que maximizem a eficiência da junta

2. ESTADO DA ARTE

2.1. Conceito e definições

O FSW é um processo que cria uma junta soldada através da mistura do material no estado sólido, fazendo uma ferramenta rotativa (ombro) com ou sem pino friccionar a superfície do material gerando calor suficiente para o amolecimento e a mistura mecânica, sem alcançar temperaturas de fusão do metal (Padhy, 2017). A Figura 1 mostra o princípio do processo.

Figura 1 – Movimentos e forças envolvidas no processo de soldagem por FSW



Fonte: Adaptado de (Mendes *et al.*, 2016)

Pode-se ver que a ferramenta gira com seu ombro em contato com os materiais a serem unidos, enquanto se desloca na direção de soldagem. Isto gera grande quantidade de calor, que provoca o amolecimento do material, misturando-o. Há um lado de avanço da ferramenta (*advancing side – AD*) e um lado de retorno (*retreating side – RS*) em relação a direção de soldagem, que promovem a mistura puxando material da frente para região posterior através do giro da ferramenta.

De acordo com Padhy (2017), FSW permitiu principalmente a soldagem de materiais de difícil união por arco elétrico e baixo ponto de fusão. O processo FSW criou diversas outras vertentes de pesquisa, como FSP (*Friction Stir Process*), em

que não há junta soldada e sim alterações de propriedades físicas e mecânicas superficiais em materiais através também de fricção e mistura mecânica.

De acordo com Meng et al. (2021), a partir da invenção da soldagem por fricção e mistura (FSW) no ano de 1991 pelo TWI (*The Welding Institute*), foram compreendidas as características amigáveis do processo com o meio ambiente, como: eficiência energética, não utilização de metal de adição, alta qualidade de juntas para ligas leves como alumínio, titânio, magnésio, polímeros, etc. A ampla utilização de ligas leves nas indústrias aeronáutica, ferroviária, naval, automotiva e aeroespacial, obtendo ótimos resultados de juntas, ocasionou a difusão do processo em linhas de produção que requerem altíssima confiabilidade, mas também mostrou a necessidade de pesquisas quanto a solução de três dificuldades reconhecidas: suportes/métodos de fixação do material, soldagem de materiais extremamente finos e defeito de vazio (furo) na saída da ferramenta.

Em uma junta soldada por FSW pode-se observar e definir 4 regiões bem distintas, analisando sua seção transversal. Uma região não afetada pelo calor e não deformada plasticamente – metal base (BM), uma região que passou por um ciclo térmico, mas não sofreu mistura ou deformação – zona afetada pelo calor (HAZ), uma região que sofreu mistura e passou por ciclo térmico com temperaturas superiores – zona termo mecanicamente afetada (TMAZ), e uma região central de mistura mecânica (NZ). Esta última trata-se da região da solda onde ocorreu deformação plástica intensa, mas o ciclo térmico favorece um certo refino de grão (Heidarzadeh et al., 2021).

A Figura 2 apresenta a localização de cada região em uma junta soldada feita por FSW.



Fonte: Adaptado de (Sinhmar; 2017)

Através da Figura 2 observa-se que é justificável o perfil microestrutural obtido na junta, principalmente quanto ao refinamento de grão. Temperaturas relativamente altas (região NZ), porém inferiores à de fusão do metal base, são obtidas próximo da ferramenta e decrescem rapidamente ao se afastar dela. A NZ experimenta uma taxa de resfriamento que não permite o crescimento de grão.

Segundo Mishra (2005), os benefícios chave ao se utilizar o processo FSW podem ser classificados em metalúrgicos, ambientais e energéticos, como: processo ocorre no estado sólido, há baixa distorção da peça soldada, boa repetitividade, estabilidade dimensional, sem perda de elementos de liga durante o processo, excelentes propriedades mecânicas na área da junta, microestrutura fina, ausência de trincas, diminuição de fixações por parafusos e rebites, economia de gases de proteção, não utilização de solventes e decapantes para limpeza da junta, sem escórias para descartes posterior, economia de metais de adição como eletrodos e arames, economia energética principalmente em juntas finas (quando comparado a união por laser), diminuição do consumo de combustíveis em aeronaves, automóveis e navios devido a possibilidade de soldar ligas de alta resistência (menores espessuras).

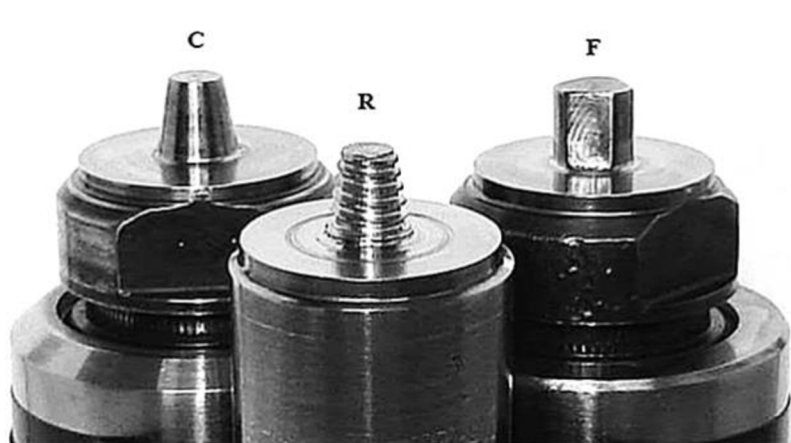
A indicação da qualidade da junta fabricada por FSW (ISO, 2011) se dá principalmente pelo critério eficiência da junta com relação a tensão última do metal base. Ligas de alumínio tratáveis termicamente devem ter uma eficiência mínima a partir de 60% da condição inicial do metal base, geralmente já temperado. Ligas não tratáveis termicamente, endurecidas a frio, devem ter 100% de eficiência da junta, considerando a condição recozida (O) do metal base para tensão última. A ISO (*International Organization for Standardization*) padronizou o processo FSW através das normas ISO 25239, partes 1 a 5 (vocabulário, projeto de juntas soldadas, qualificação de soldadores, especificação e qualificação de procedimentos de soldagem e qualidade e requisitos de inspeção).

2.2. Variáveis no processo FSW

O fluxo de material e o perfil de temperatura na junta soldada são fortemente influenciados pela geometria da ferramenta, parâmetros de soldagem e projeto

geométrico da junta. Com relação a ferramenta de soldagem, ela deve ter um tamanho de ombro e pino que gerem o calor necessário para amolecimento do material e uma geometria que cause arrasto, provocando a mistura. Os parâmetros de soldagem mais influentes são rotação da ferramenta (RPM), velocidade de avanço (mm/min) e o ângulo de inclinação da ferramenta (*tilt angle* - °), que mantém o material amolecido na região em torno do pino (Mishra, 2005). A Figura 3 mostra algumas das principais variações na geometria das ferramentas aplicadas ao FSW.

Figura 3 - Algumas geometrias de ferramentas utilizadas no processo FSW



Fonte: Adaptado de (Capelari, 2009)

Várias pesquisas vêm sendo realizadas com pinos lisos, roscados, com ranhuras ou roscados com ranhuras. Também é possível a criação de perfis na superfície inferior do ombro, como helicoides. Uma superfície inferior do ombro, que mantenha o material amolecido perto do pino, como superfícies côncavas, tem se mostrado útil a mistura do material e altera o perfil de temperatura que ocorre na junta (Hoyos, 2021).

O projeto da geometria da junta deve ser o mais conveniente, de acordo com o elemento a ser soldado, mas também deve possibilitar o acesso da ferramenta, principalmente quanto ao contato da face inferior do ombro com a superfície da junta. Diversas variações no processo FSW veem sendo desenvolvidas, com grande diversidade nos parâmetros de soldagem utilizados. Estes são direta e fortemente limitados pela combinação do material da ferramenta utilizada e do material a ser soldado (Gite, 2019). As faixas de parâmetros utilizados no FSW podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1 - Faixa de parâmetros tipicamente utilizados no processo FSW

Parâmetros gerais de soldagem no processo FSW	
Parâmetros	Faixa de valores
Diâmetro do ombro	10-25 mm
Diâmetro do pino	4-7,5 mm; 3-4 mm ponta
Comprimento do pino	2,5-7,5 mm
Ângulo de inclinação (<i>Tilt</i>)	0-12°
Rotação da ferramenta	300-5400 RPM
Velocidade de avanço	20-475 mm/min
Força axial exercida pela ferramenta	220-12.000 N

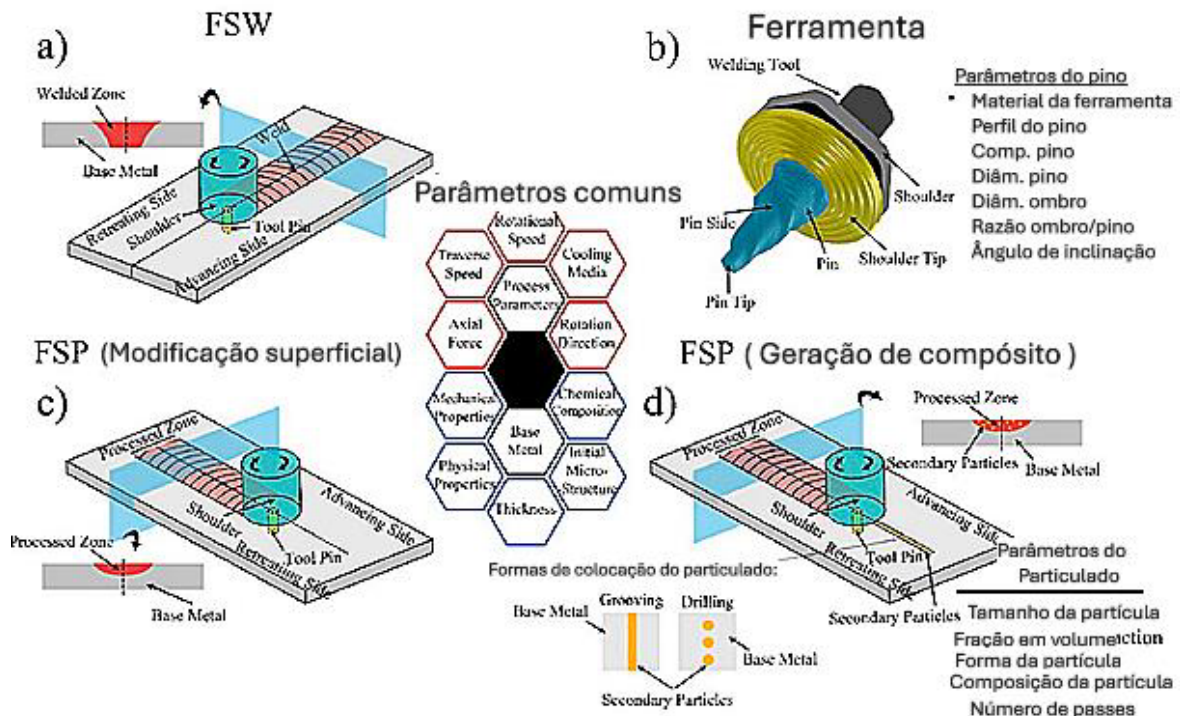
Fonte: (Gite, 2019)

Pode-se verificar que, tanto as dimensões da ferramenta quanto parâmetros de soldagem, são relativamente baixos visto que o processo gera uma elevada força axial da junta sobre a ferramenta e, portanto, sobre a máquina utilizada. Este é um fator certamente limitante quanto as espessuras de juntas soldáveis e quanto a resistência ao amolecimento dos materiais a serem soldados. As ligas de alumínio podem possuir temperaturas de fusão/amolecimento relativamente baixas (soldável por FSW), enquanto ligas ferrosas, resistentes ao calor podem ter essas temperaturas relativamente altas (difícil a soldagem por FSW), ocasionando desgaste acentuado da ferramenta e necessidade de maquinário mais robusto.

2.3. Linhas de pesquisa utilizando FSW ou FSP

Diversas linhas de pesquisa relacionadas a utilização do processo FSW e suas variações, como o *Friction Stir Process (FSP)* foram exploradas nas últimas três décadas. No processo FSP não há união de materiais, mas alteração física e mecânica da superfície destes, utilizando fricção e mistura mecânica para obter propriedades melhoradas. Visto FSW/FSP ser um processo recém desenvolvido (1991) quando comparado a outros processos de fabricação, há ainda várias questões a serem elucidadas. Algumas questões de pesquisa sobre o processo podem ser vistas na Figura 4.

Figura 4 – Processo FSW e linhas de pesquisa atualmente em destaque



Fonte: Adaptado de (Heidarzadeh *et al.*, 2021)

Relacionar diretamente a influência dos parâmetros de soldagem com a resistência mecânica e/ou resistência a corrosão da junta soldada, otimizar características físicas e superficiais de materiais através do FSP, definir geometrias e materiais das ferramentas de soldagem que otimizem a mistura mecânica e aumentem a vida útil da ferramenta de soldagem, estudar os mecanismos que guiam a formação microestrutural nas juntas a fim de controlar as propriedades mecânicas, investigar as causas dos defeitos de soldagem comumente encontrados na FSW e formas de mitiga-los, desenvolver sistemas de controle precisos e robustos para máquinas utilizadas em FSW e FSP, criar soluções para dificuldades encontradas na soldagem de peças de geometria complexa ou grande volume, como formas de fixação, estudar formas de preenchimento adequadas ao furo resultante da saída da ferramenta ao final do cordão de solda etc. são algumas das linhas de pesquisa que vem sendo desenvolvidas ao redor do mundo. Essas pesquisas, assim como a ampla divulgação dos seus resultados, apontam soluções para as indústrias quanto a soldagem no estado sólido de ligas leves. A soldagem de materiais ferrosos ainda é muito difícil, visto as forças e temperaturas atingidas no processo. O desgaste acentuado da ferramenta nessas situações

requer um investimento alto com materiais para ferramentas, como o PCBN (Nitreto de Boro cúbico policristalino).

Logo abaixo serão relatadas pesquisas desenvolvidas nos últimos anos que aumentaram significativamente o controle dos resultados obtidos soldando por FSW ou melhorando superfícies por FSP.

Segundo D'Urso *et al.* (2017), variações em parâmetros como velocidade de avanço (mm/min) e rotação da ferramenta (RPM) mostraram uma variação significativa na resistência mecânica e a corrosão da junta. Durante a soldagem das ligas de alumínio AA7075-T6, AA2024-T3 e uma junta dissimilar das duas, verificou-se que a menor velocidade de avanço (10 mm/min) influenciou positivamente a resistência mecânica, sendo justificado pela maior contribuição de calor por unidade de comprimento da junta. Com relação a resistência a corrosão das juntas, mostrou ter direta relação com a dureza após a soldagem. Uma região de menor dureza tem um comportamento mais anódico. A soldagem de uma junta dissimilar acentuou muito a possibilidade de corrosão galvânica.

De acordo com Malopheyev *et al.* (2016), a recuperação da resistência mecânica de ligas de alumínio envelhecidas, como AA6061-T6, não foi significativa, tornando o parâmetro eficiência da junta (comparação entre resistência da junta soldada com a resistência do metal base) desvantajoso. Executou a soldagem do material tratado termicamente (envelhecido artificialmente) e comparou sua resistência mecânica com a liga envelhecida pós soldagem. Sua pesquisa descobriu que o aumento da velocidade de avanço (760 mm/min) e da rotação da ferramenta (1100 RPM) possibilita um resfriamento mais abrupto, causando a dissolução dos precipitados endurecedores na região de mistura (NZ) e a perda de dureza. Entretanto, a região afetada pelo calor (HAZ) tem seu endurecimento praticamente mantido. Isto possibilita que o pós-tratamento da junta recupere a resistência mecânica da junta até eficiências que alcançam 93%.

Na pesquisa de Mironov *et al.* (2015), folhas de 4 mm de alumínio puro (AA1050) laminado a frio foram soldadas pelo processo FSW. Variou-se a rotação da ferramenta (200 RPM até 2000 RPM) com o objetivo de relacionar as temperaturas atingidas com a evolução microestrutural e resistência mecânica da junta. A velocidade de avanço foi de 600 mm/min e o ângulo de inclinação da

ferramenta foi de 3°. Conforme há um aumento na temperatura de soldagem, acontece uma tendência da morfologia do grão em se alterar de lamelar para equiaxial na região de mistura (NZ). Menores rotações, como 200 RPM (menores temperaturas) obtiveram maiores durezas visto o efeito da temperatura não ter amolecido o material suficiente e não ter ocasionado a perda do direcionamento dos grãos do material laminado a frio. Temperaturas menores são benéficas quando já existe um grau de encruamento no material soldado por FSW.

Rao (2015) pesquisou a soldagem da liga de alumínio AA7075-T651 utilizando FSW, devido sua baixa soldabilidade quando soldado a arco elétrico (geração de trincas a quente). Chapas de 10 e 16 mm foram soldadas utilizando ferramenta de aço M2. Devido ao calor na soldagem, criou-se regiões livres de precipitados endurecedores, com redução na resistência mecânica da junta. Também foi verificado que juntas mais espessas perdem mais dureza, o que é explicado pelo fato de que com o aumento da junta, a necessidade de maior velocidade de avanço ou maior rotação da ferramenta é crucial para o amolecimento do material. Então, o excesso de envelhecimento da liga torna a HAZ com menor resistência mecânica. Ainda assim, foi conseguida uma eficiência da junta de 53% (16 mm) e 70% (10 mm). Outros pesquisadores alcançaram 90% (juntas de 3 a 6 mm). Isso demonstra que a liga 7075-T651 é soldável por FSW, substituindo processos a arco elétrico.

O FSP não gera uma junta soldada, mas modifica propriedades físicas e mecânicas superficiais de um material. Ele atua principalmente como refinador de grãos, criador de camadas compósitas, modificador de microestruturas superficiais e no aumento da qualidade de juntas pós soldagens. É amplamente reconhecida a equação de *Hall-Petch* que relaciona a tensão resistente de um material cristalino com o seu tamanho de grão. A possibilidade de utilizar técnicas multipasses (MP) de forma intermitente (IMP) ou contínua (CMP) se mostrou eficaz em controlar a taxa de resfriamento, com tendência a diminuir o tamanho de grão. Pode-se verificar na Tabela 2, uma redução significativa no tamanho de grão para várias ligas pesquisadas.

Tabela 2 - Refinamento de grão conseguido utilizando FSP

Exemplos de utilização de FSP para refinamento de grão		
Material/Liga	Tamanho médio antes do FSP	Tamanho médio após FSP
Aço 13Cr4Ni	25 μm	0,6 μm
Al-4Mg-0,8Sc-0,08Zr	19 μm	0,49 μm
Al-7Si-0.3Mg	188 μm	1,3 μm
5086	48 μm	6 μm
AZ91	150 μm	4 μm
Aço D2	40 μm	1,6 μm
Ti-6Al-4V	500 μm	1 μm

Fonte: Adaptado de (Węglowski, 2017).

O processo FSP é utilizado para criar camadas compósitas, que modificam propriedades superficiais das ligas, através da adição de material junto a fricção e mistura. Esse processo é nomeado de FSA (*Friction Stir Alloying*) e na ampla maioria dos casos os materiais de adição são: óxido de silício, carboneto de silício, alumina, níquel, nano tubos de carbono, óxido de titânio, sulfeto de molibdênio e cobre, adicionados a ranhuras no material base. Devido a deposição de material extra duro, deve-se ter um cuidado especial com o desgaste da ferramenta de soldagem. Algumas tecnologias assistivas como submeter a ferramenta ou material no FSP a uma vibração ultrassônica (UaFSW/FSP) tem mostrado ótimos resultados, sem necessidade de maior aporte térmico (Węglowski, 2017).

Shah (2017) apontou diversos materiais utilizados em ferramentas para soldagem por FSW que mantenham o processo econômico. Esses materiais devem possuir características como alta resistência mecânica e ao desgaste em elevadas temperaturas, baixa reatividade, alta resistência a fratura frágil, boa usinabilidade e serem acessíveis no mercado. Aços ferramentas (alto carbono e cromo) como H13, HSS (aço para alta velocidade) M2, aços liga com alto teor de cobalto e níquel, metais refratários como tântalo, tungstênio e molibdênio e PCBN (nitreto de boro cúbico policristalino) são materiais apropriados. Para a soldagem de ligas de alumínio por FSW diversas pesquisas mostram que aços ferramentas com durezas

entre 40 e 62 HRC (tratados termicamente ou não) atendem os requisitos do processo. Questões geométricas, como comprimento do pino, diâmetro do pino, diâmetro do ombro e razão do diâmetro ombro/pino (SPR – Shoulder to pin ratio) são fatores determinantes para geração de calor e de uma junta de qualidade. O processo FSW aplicado a ligas de alumínio tem utilizado um SPR entre 2,5:1 – 4,5:1. É convergente entre diversos pesquisadores que a geração de calor na junta tem como fator principal o raio do ombro da ferramenta, como vê-se na Equação 1.

$$Q = \frac{4}{3} \pi^2 \mu P N R^3 \quad (1)$$

Q é o calor gerado (Watts), μ é o coeficiente de atrito entre o material da ferramenta e o material da junta (adimensional), P é a pressão da ferramenta sobre a peça – calculada pela força axial e área da ferramenta - (MPa), N é a rotação da ferramenta (RPM) e R o raio do ombro da ferramenta (mm).

Na Tabela 3 pode-se ver um levantamento feito por Shah (2017) sobre combinações entre ligas de alumínio soldadas por FSW, parâmetros de soldagem e materiais de ferramentas utilizados economicamente.

Tabela 3 - Ligas de alumínio soldadas por FSW x material da ferramenta
x parâmetros de soldagem

Liga de alumínio soldada por FSW	Espessura da junta	Material da ferramenta	Parâmetros de soldagem utilizados
AA6061	4 mm	Aço médio carbono (58 HRC),	1750 RPM, 60 mm/min, SPR 4,5:1
AA6062-T6	5 mm	HSS - M2	800 RPM, 4°
AA6056-T451	4.2 mm	H13	960 RPM máx., 612 mm/min máx., SPR 2,73:1
AA7075-T6	5 mm	Aço alto carbono e HSS-M2	1800 RPM máx., 100 mm/min máx.
AA7075-T7651	6,35 mm	H13	600 RPM máx.,

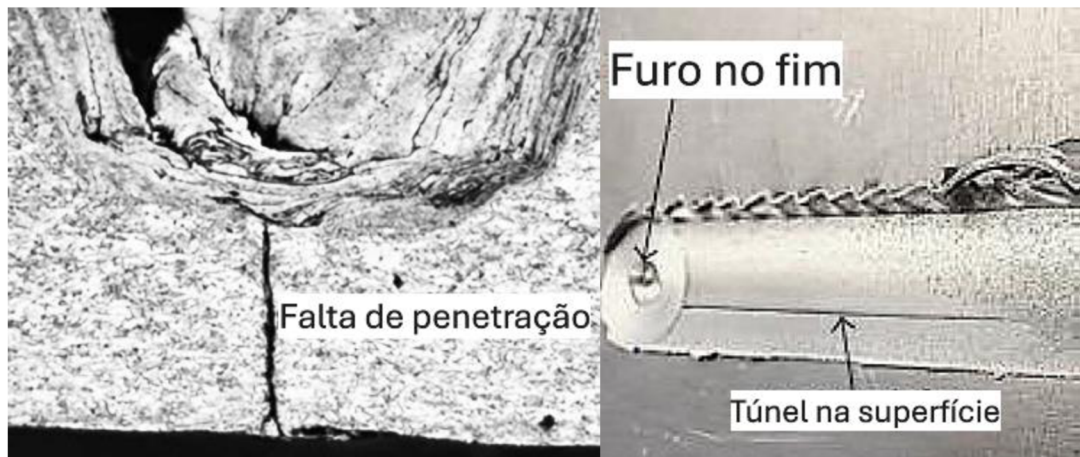
			109 mm/min máx., SPR 3,08:1
AA2024-T351	6.4 mm	H13	360 RPM máx., 267 mm/min máx., SPR 2,73:1
Alumínio fundido 4,2%Mg, 0,45%Si	8 mm máx.	Aço alto carbono	1600 RPM máx., 150 mm/min máx.
AA2198-T3	3.2 mm	Aço Cr-Mo	900 RPM máx., 2° 300 mm/min, SPR 6:1

Fonte: Adaptado de (Shah, 2017)

Orozco (2013) realizou um estudo com intenção de otimizar a resistência de juntas de AA1050-H24 soldadas por FSW utilizando a medição de vibrações mecânicas para prever a qualidade da junta. Através de inteligência artificial, correlacionou a variação da geometria da ferramenta e dos parâmetros de soldagem, na busca de parâmetros ótimos para cada combinação. Concluiu que há uma faixa de frequência, de 0 a 100 Hz em que a vibração do conjunto pode prever qualidade final obtida da junta, e essa foi uma variável de processo de interesse técnico em ferramentas como CEP (Controle Estatístico de Processo).

No estudo de Kah et al., (2015), são relatados diversos defeitos que podem ocorrer na solda gerada por FSW. Alguns destes defeitos são microestrutura em forma de “anéis de cebola”, falta de penetração, falta de união, formação de vazios, defeitos zig-zag (correlacionados a baixa dispersão da alumina), formação de túnel e formação de rebarba em excesso. Todos esses defeitos são relacionados à geometria da ferramenta ou parâmetros de soldagem. Na Figura 5, pode-se ver alguns destes.

Figura 5 - Defeitos de falta de penetração, furo no fim e túnel de superfície



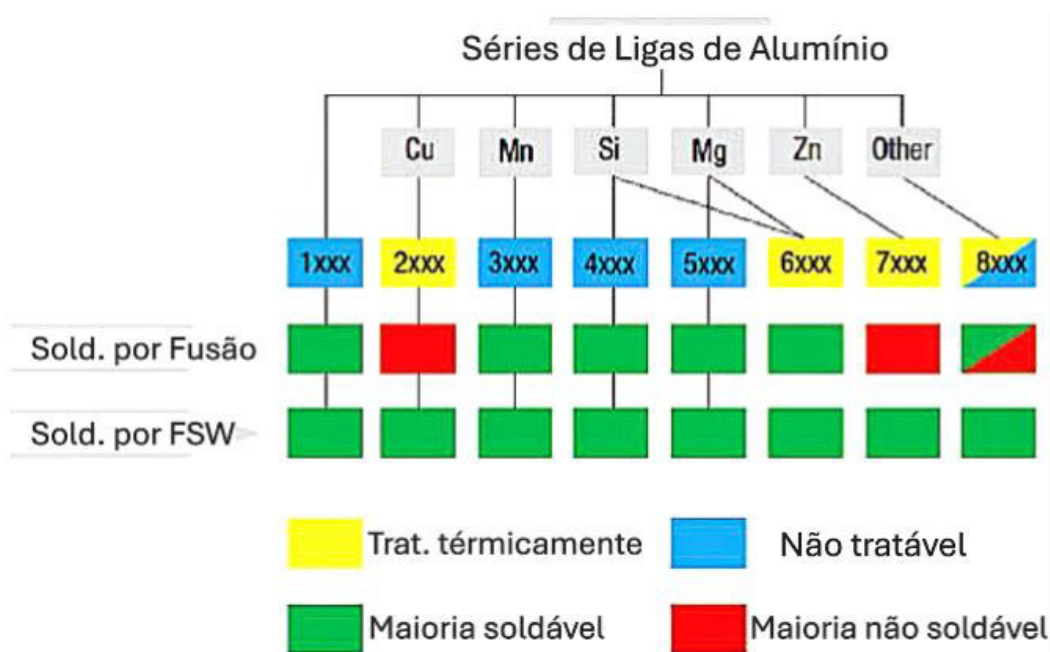
Fonte: Adaptado de (Albannai, 2020)

2.4. Alumínio e suas ligas

A codificação utilizada para padronizar as ligas de alumínio na indústria foi desenvolvida pela Aluminum Association (AA) – órgão norte americano regulador. Essa organização criou um acordo internacional com os países mais desenvolvidos do mundo para que cada nova liga de alumínio com aplicações específicas tenha uma codificação internacional de 4 dígitos que aponte sua composição química. Sendo as ligas classificadas em séries de acordo com o elemento de liga majoritário. A série 1XXX trata do alumínio com alto grau de pureza, entretanto, com baixas propriedades mecânicas (The Aluminum Association, 2015b).

Na Figura 6 pode-se verificar quais séries de ligas de alumínio são soldáveis por FSW, qual o principal elemento químico ligado ao alumínio na série e se a liga é endurecível por tratamento térmico.

Figura 6 - Classificação das ligas de alumínio



Fonte: Adaptado de (Shah, 2017)

As ligas de alumínio podem ser tratáveis ou não termicamente. As tratáveis são frequentemente endurecidas pelo chamado *envelhecimento* e as que o tratamento térmico não causa significativo aumento de dureza, costumam ser endurecidas por deformação plástica (encruamento). As últimas são facilmente soldadas por processos a arco elétrico, entretanto, perdem dureza na zona afetada pelo calor. Também costumam apresentar porosidade e trincas devido a mais alta solubilidade do hidrogênio no estado líquido quando comparado ao estado sólido, pois as temperaturas atingidas no processo a arco elétrico fundem o material. Quando FSW é aplicado a essas ligas, esse problema é evitado devido ao processo ocorrer no estado sólido (Shah, 2017).

ABNT (2008) padroniza a codificação utilizada para o endurecimento das ligas de alumínio. Esse endurecimento é conhecido como têmpera, mesmo quando inclui outros métodos que não térmicos. A codificação padronizada utiliza letras e/ou números. As letras “F” (como fabricada), “O” (recozida), “H” (encruada), “W” (solubilizada) e T (endurecidas de outras formas) devem acompanhar a codificação da liga de alumínio, assim como dígitos adicionais para variações específicas no método de endurecimento. De acordo com *The Aluminum Association* (2015a), as principais propriedades físicas do alumínio não se alteram significativamente,

dependendo do material ligado ao alumínio. Entretanto, as propriedades mecânicas são fortemente influenciadas (Tabela 4).

Tabela 4 - Propriedades físico-mecânicas de ligas de alumínio

Propriedade	Símbolo	Valor
Razão de Poisson	ν	0,33 (adim.)
Módulo de Elasticidade	E	70 GPa
Módulo de Elasticidade transversal	G	26 GPa
Coeficiente térmico de expansão	α	$23 \times 10^{-6} / ^\circ C$
Densidade	γ	2.700 kg/m ³
Tensão de escoamento sob tração	F_e	Depende da liga
Tensão última sob tração	F_u	Depende da liga
Tensão de escoamento ao cisalhamento	F_{ec}	$0,6F_e$
Tensão última no cisalhamento	F_{uc}	$0,6F_u$

Fonte: Adaptado de (The Aluminum Association, 2015a).

A versatilidade do alumínio ligado a outros elementos é uma de suas melhores características. É fácil de conformar, moderadamente fácil de soldar, possui excelentes características de aparência, condução de calor, condução de eletricidade e resistência a corrosão, sendo aplicado desde utensílios domésticos a aeronaves e foguetes. Algumas de suas ligas ultrapassam a resistência mecânica do aço, mas apresentam apenas 1/3 da densidade (ASM, 1990b).

2.5. Liga AA5052

A liga AA5052 possui grande aplicabilidade. Os teores de magnésio e manganês possibilitam endurecimento moderado por encruamento, o que possibilita ser aplicada em estruturas. A alta resistência a corrosão, principalmente em ambientes marinhos, mas também à atmosfera, torna essa liga muito utilizada em navios e embarcações, estruturas marinhas, arquitetura, tubos hidráulicos, etc. A sua soldabilidade é alta, quando comparada a soldagem a gás e a arco elétrico, o que permite a construção de vasos de pressão, reservatórios, estruturas como

passarelas e outros. A boa conformabilidade torna a liga aplicável a chassis de eletrônicos, estruturas de veículos, ventiladores, containers, trailers, parafusos, equipamentos médicos e outros. Também possui boa resistência ao aparecimento de trincas sob tensão, sendo necessário cuidado com as temperaturas máximas de trabalho. Possui péssima usinabilidade, o que não permite ser aplicada a peças que necessitem deste processamento (ASM, 1990b).

ASTM International (2014) através da norma ASTM B-209-14, estabelece a composição química aceitável para a liga AA5052 (Tabela 5) assim como requisitos de propriedades mecânicas (Tabela 6). Devido a liga não ser termicamente tratável, é comumente comercializada nas condições F (como fabricada), O (recozida) e H (encruada).

Tabela 5 - Requisitos de composição química para AA5052 segundo ASTM B-209-14

	Composição Química aceitável (% em peso)								
Liga	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Outros	Al
AA5052	0,25	0,40	0,10	0,10	2,2-2,8	0,15-0,35	0,10	0,15	Rem.

Fonte: Adaptado de (ASTM International, 2014).

Através da Tabela 5, pode-se verificar o alto teor de magnésio e o médio teor de cromo da junta. Esses são elementos responsáveis pela alta resistência a corrosão da junta. O teor de cobre, mesmo que relativamente baixo, é responsável também por conferir dureza e média resistência mecânica a liga.

Tabela 6 - Requisitos para propriedades mecânicas da liga AA5052 segundo ASTM B-204-14

	Propriedades Mecânicas (mín.)				
Liga	Têmpera	Espessura (mm)	Tensão última (MPa)	Tensão no escoamento (MPa)	Alongamento em 50,8 mm (%)
AA5052	O	2,89-6,35	172	65	20
AA5052	H32	2,89-6,35	214	159	11
AA5052	H34	2,89-6,35	234	179	7

AA5052	H36	0,81-4,11	255	200	4
AA5052	H38	0,81-3,25	269	221	4
AA5052	F	6,35-76,2	-	-	-

Fonte: Adaptado de (ASTM International, 2014).

Através da Tabela 6 pode-se verificar que com o pós-tratamento conferido a liga, é possível alterar significativamente a sua resistência a tração, assim como ductilidade.

2.6. FSW aplicado a liga AA5052

A soldagem de juntas de topo de AA5052 foi realizada por diversos pesquisadores, visto a ampla gama de aplicações desta liga, como já mencionado previamente. Kumar et al. (2018) correlacionaram a resistência da junta de AA5052 com o perfil da ferramenta de soldagem utilizada. Usando uma ferramenta de aço H13, com perfis quadrado e pentagonal, variaram a velocidade de avanço e mantiveram a rotação da ferramenta constante em 1120 RPM. Concluíram que, ferramentas com mais lados geram eficiência de junta maior e que o aumento da velocidade de avanço não aumenta constantemente a eficiência da junta. Shanavas (2017) comparou a resistência obtida em juntas soldadas por FSW da liga AA5052-H32 com juntas soldadas por TIG. Utilizou uma ferramenta com perfil quadrado cônico, velocidade de rotação de 600 RPM e *tilt angle* de 1,5° e conseguiu eficiência de juntas soldadas por FSW maiores que as soldadas por TIG, mesmo este último com parâmetros ótimos.

Datta *et al.* (2023) soldaram juntas de AA5052 pelo FSW convencional e por *UWFSW* (*UnderWater Friction Stir Welding*). Foram comparadas as propriedades mecânicas e conformabilidade das juntas. Foi utilizada uma ferramenta de *High Speed Steel* (*HSS – aço para alta velocidade*), cilíndrica e com ombro de 10 mm. Concluiu-se que a imersão da junta em água durante o processo aumenta o refino de grão através do diferente gradiente de temperatura, o que aumentou a resistência com relação ao FSW convencional. Tufaro (2015) soldou juntas de 3 mm de AA5052-H32, variando o diâmetro do ombro da ferramenta para avaliar o

calor gerado. Utilizou velocidade de avanço de 98 mm/min, rotação da ferramenta de 514 RPM e uma ferramenta de aço H13. Levantou o perfil de temperaturas geradas na junta com uso de termopares e concluiu que o aumento da geração de calor com um ombro maior não é precisamente calculado por equações analíticas como apontado em algumas referências, pois outros parâmetros considerados constantes são dependentes da temperatura nas equações.

Em seu trabalho, Moshwan *et al.* (2015) investigaram a força gerada na ferramenta, as propriedades mecânicas e a microestrutura da junta. Foi variada a rotação da ferramenta durante a soldagem de chapas de 3 mm de AA5052-O. Uma ferramenta de aço carbono, com ombro de 8 mm e pino de 4,5 mm temperada foi utilizada. O valor ótimo para resistência da junta (eficiência de 74%) foi alcançado com rotação da ferramenta de 1000 RPM e velocidade de avanço de 120 mm/min. O aumento da rotação da ferramenta após 1000 RPM diminuiu a qualidade da junta, entretanto, causou a diminuição da força sobre a ferramenta. Capelari (2009) comparou o desempenho de três ferramentas de soldagem com perfis diferentes – cônica lisa, cônica roscada, cilíndrica com três faces – na soldagem de AA5052-H34. Também comparou os resultados de resistência mecânica com soldas realizadas pelo processo MIG. Concluiu que as ferramentas facetada e cônica roscada, com rotação da ferramenta de 1000 RPPM, velocidade de avanço de 75 mm/min e 3° de *tilt angle* geraram juntas de boa qualidade. Juntas similares feitas pelo processo MIG devem ter seus parâmetros otimizados para aumentar o refino de grão e assim, resistência da junta.

2.7. Aço ferramenta H13

De acordo com a ABNT (2005), os aços ferramenta são aqueles materiais ferrosos com características que possibilitem sua utilização como matrizes de injeção, ferramentas de corte, estampos, etc. Suas principais características são dureza, resistência ao desgaste, ao impacto mecânico, ao choque térmico e a deformação a quente. O aço H13, classificado como aço ferramenta para trabalho a quente, possui características que o tornam resistente ao choque térmico. A dureza do material como recozido não deve ultrapassar 255 HB (*Hardness Brinell*)

e temperado e revenido, 450 HB. Os limites de composição química para o aço H13 estão estabelecidos na Tabela 7.

Tabela 7 - Composição química do aço ferramenta H13

	Limites para composição química (% em peso)							
Liga	C	P	S	Mn	Si	Cr	Mo	V
H13	0,32 - 0,45	0,03	0,03	0,20 - 0,50	0,80 - 1,20	4,75 - 5,5	1,10- 1,75	0,80 - 1,20

Fonte: (ABNT, 2005)

Os aços ferramenta do grupo “H” foram desenvolvidos para suportar calor, pressão e desgaste por abrasão em operações de processamento. Mais especificamente o H13 (aço ferramenta ao cromo) possui grande resistência ao amolecimento quando aquecido devido aos carbonetos de tungstênio, vanádio e molibdênio que possui. Pode ser endurecido profundamente ao ar e apresenta boa tenacidade devido ao teor de vanádio. Na Tabela 8 pode ser visto a perda de dureza após 100 horas de exposição aquelas temperaturas.

Tabela 8 - Perda de dureza do H13 sob altas temperaturas

Material	Dureza inicial (HRC)	Perda de dureza após 100 horas de exposição a temperaturas elevadas					
		480°C	540°C	595°C	650°C	705°C	760°C
H13	50,2	48,7	45,3	29	22,7	20,1	13,9

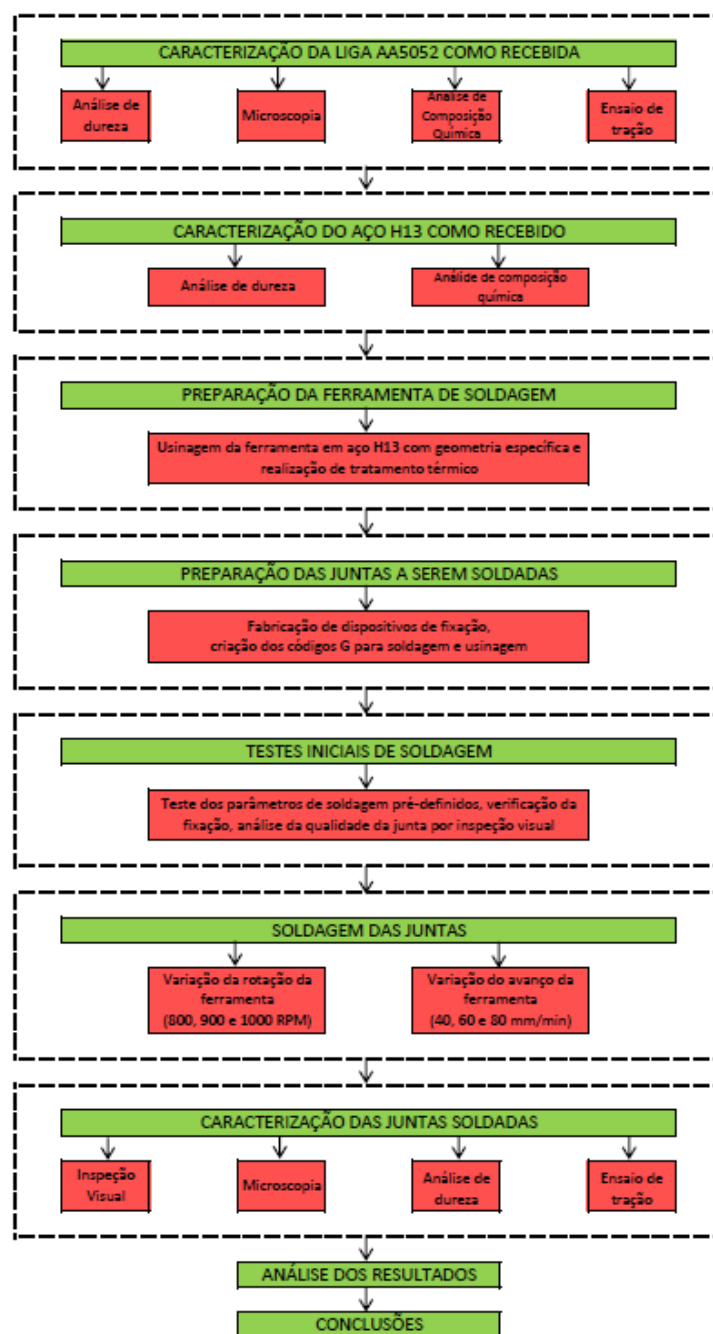
Fonte: Adaptado de (ASM, 1990a).

Através da Tabela 8 pode-se verificar que há um alto decréscimo da dureza do H13 quando exposto a temperaturas próximas de 600°C, durante 100 horas. Pode-se dizer que essa é uma temperatura crítica em suas possíveis aplicações.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, serão abordados os materiais e métodos utilizados na execução deste trabalho. Na Figura 7, pode-se ver a organização do trabalho experimental realizado, seguindo a cronologia de sua execução.

Figura 7 - Fluxograma experimental do trabalho



Fonte: Autor.

3.1. Materiais

Na confecção deste trabalho foram utilizadas as máquinas, equipamentos e materiais metálicos apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Máquinas e equipamentos utilizados nos experimentos

Item	Descrição
1	Liga de Alumínio 5052-H32 em chapas de 150x150x4mm
2	Aço ferramenta H13 recozido em barra laminada de $\varnothing 19,05\text{mm} \times 240\text{mm}$
3	Centro de Usinagem CNC 5 eixos, marca Haas®, modelo VF-2
4	Durômetro multe escala marca ZWICK/ROELL®, modelo 8187.5LKV
5	Máquina de ensaio de tração, marca EMIC® com capacidade de 600 KN, modelo DL60000
6	Espectrômetro de emissão ótica, marca Oxford Instruments®, modelo Foundry Master Pro
7	Microscópio ótico marca Olympus, modelo GX51
8	Microscópio eletrônico de varredura (MEV), marca Jeol, modelo JSM-6610LV com microsonda de Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)
9	Serra fita industrial marca FRANHO®, modelo FM1600
10	Forno tipo Box, para tratamentos térmicos, FCL 25-25-45 (tombamento nº31136)
11	Forno mufla, marca EDG®, modelo 3000
12	Torno mecânico convencional, marca NARDINI®, modelo MS 205AS

Fonte: Autor.

Todos os equipamentos na Tabela 9 estão localizados nos laboratórios da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande – FURG, com exceção da Máquina de ensaio de tração, que foi utilizada nos laboratórios do IFRS – Campus Rio Grande.

3.2. Metodologia

O método experimental foi definido levando em conta diversos fatores como: facilidade de execução, facilidade de fabricação de ferramental, existência de estrutura nos laboratórios da Universidade, confiança estatística e facilidade de replicação.

3.2.1. Caracterização dos Materiais Metálicos

Para caracterização do aço ferramenta H13, recebido como doação da empresa Favorit Aços Especiais (aqui nosso agradecimento), este foi submetido ao ensaio de dureza Brinell e a espectrometria de massa.

Para caracterização da liga de alumínio AA5052, foram realizados ensaios de tração, espectrometria de massa, dureza Brinell, dureza Vickers e análise por micrografia.

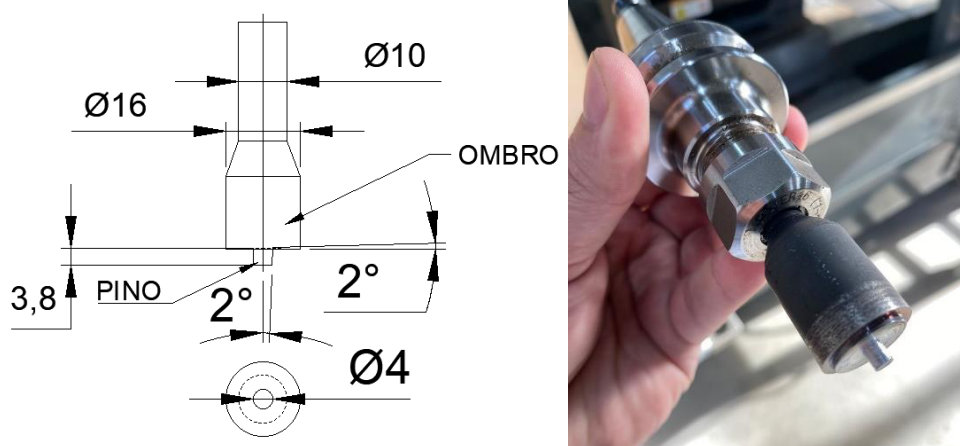
Os resultados das caracterizações mencionadas são apresentados em “Resultados e Discussões”.

3.2.2. Projeto e Fabricação da Ferramenta de Soldagem

Com relação ao material da ferramenta de soldagem, optou-se pelo aço ferramenta H13 devido a facilidade de aquisição, economicidade, temperabilidade e a dureza obtida após têmpera ser significativamente maior que a liga AA5052, a ser soldada. Também devido a revisão de Singh et al., (2020) que relataram como material mais utilizado para soldagem de ligas de alumínio por FSW.

Com relação a geometria da ferramenta, optou-se pela da Figura 8, com pino cilíndrico cônico liso e ombro com face inferior sem ranhuras. A relação área ombro/área pino (*SPR*) utilizada foi de 4, valor entre os 2,5 e 4,5 recomendados por Shah (2017).

Figura 8 - Ferramenta fabricada



Fonte: Autor.

A angulação de 2° na face inferior do ombro, auxilia o material amolecido a continuar na zona de soldagem, e evita sua expulsão para longe quando a ferramenta se desloca, como relatado em Mironov et al., (2015). A angulação de 2° no pino da ferramenta diminui o esforço de penetração inicial (*plunging*) na liga de alumínio.

A ferramenta foi usinada em um torno convencional, a partir de uma barra de aço H13 laminada, de 20,00 mm de diâmetro. Após a usinagem, a ferramenta foi aquecida até 1000°C em forno com temperatura controlada, mantida por 1 hora para enxarque e resfriada em óleo para endurecimento por têmpera. A ferramenta foi duplamente revenida, a uma temperatura de 500°C, por 1 + 1 horas. Foi alcançada uma dureza de 395 HBW 2,5/187,5/20 (40 HRC).

3.2.3. Preparação das Juntas Soldadas

Para a soldagem e usinagem de corpos de prova e amostras, foi utilizado um Centro de Usinagem CNC (*Computer Numeric Control*) 5 eixos Haas® modelo VF-2.

Foi necessário fabricar uma base suporte e fixações para as chapas de alumínio na máquina CNC, assim como utilizar grampos fixadores extras, conforme Figura 9.

Figura 9 - Sistema de fixação e chapas fixadas na máquina CNC



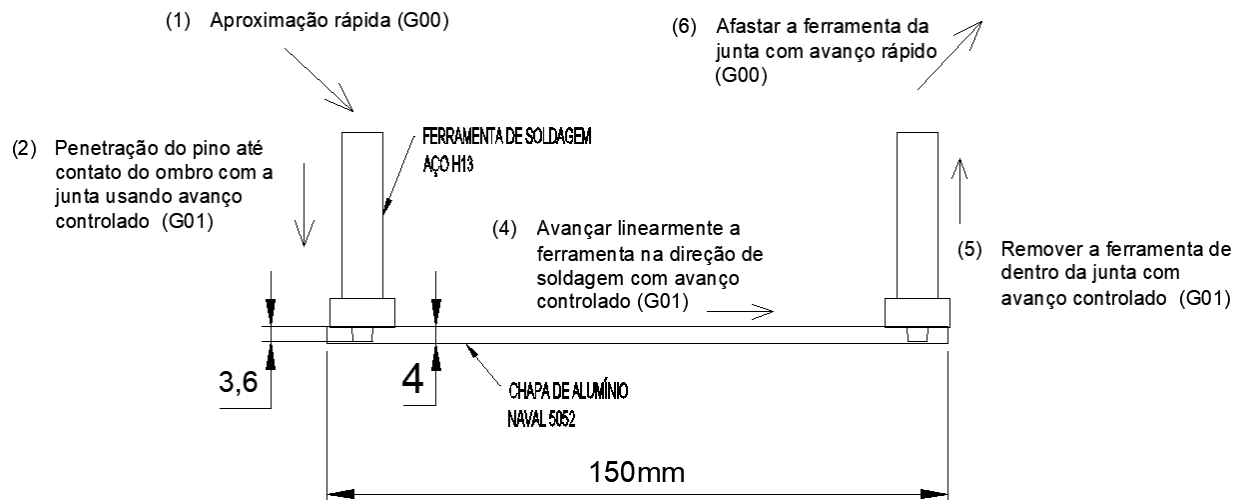
Fonte: Autor.

O código G para soldagem pode ser escrito via modo MDI (Entrada Manual de Dados) diretamente no teclado da máquina CNC, sem o auxílio de um *software* CAM (*Computer-Aided Manufacturing*) para geração da trajetória da ferramenta, devido sua simplicidade. Foi nomeado como “O5000” e salvo na memória interna da máquina.

O trajeto a ser percorrido pela ferramenta pode ser compreendido nos passos abaixo e através da Figura 10:

1. Aproximação da ferramenta de soldagem até a junta, com avanço rápido;
2. Penetração do pino da ferramenta na junta (avanço lento) até o ombro entrar em contato com a superfície superior das chapas, e penetrando-as 0,1mm;
3. Aguarda alguns segundos enquanto o atrito do ombro causa a plasticização do alumínio (sem atingir a fusão);
4. Avança linearmente a ferramenta na direção de soldagem, com o avanço e rotação controlados, até o fim da junta;
5. Remove a ferramenta de dentro da junta com avanço controlado (lento);
6. Afastar a ferramenta da junta com avanço rápido.

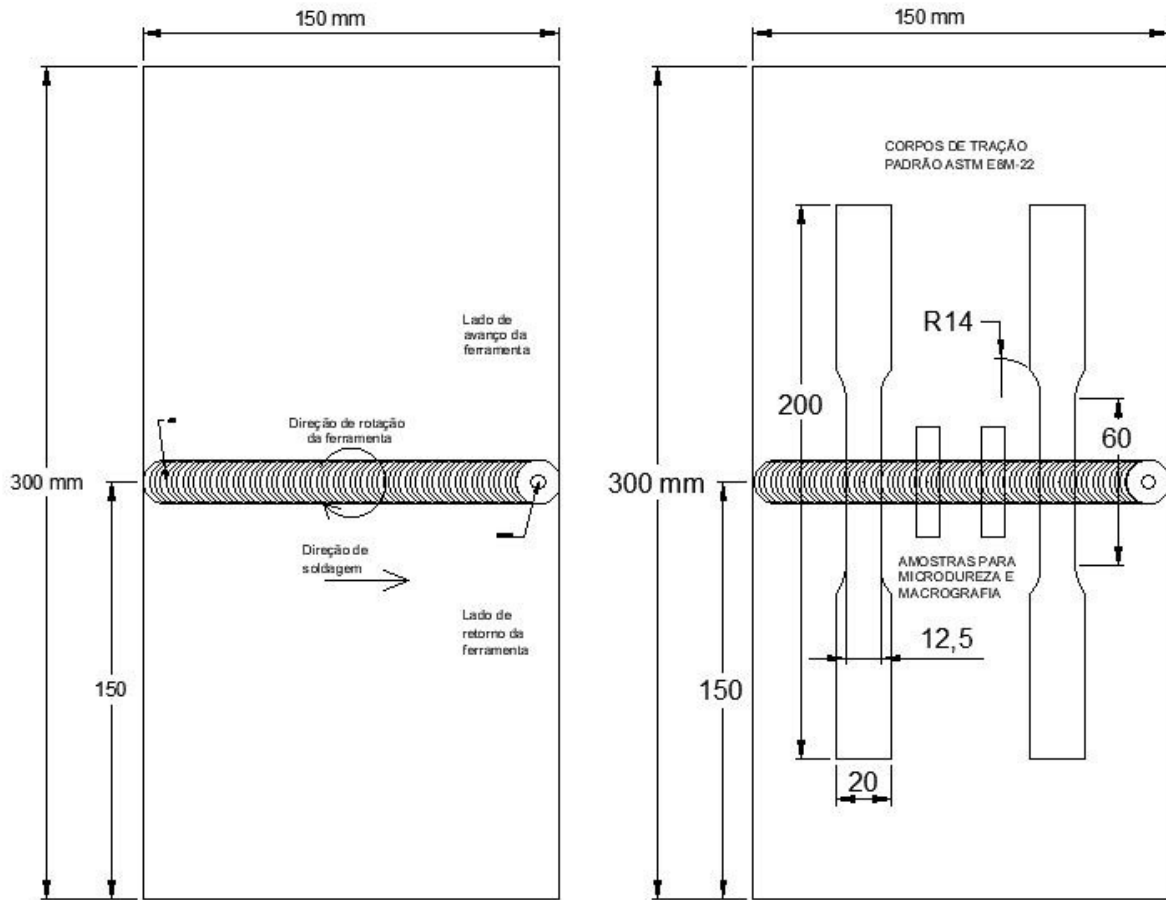
Figura 10 - Trajeto da Ferramenta de Soldagem



Fonte: Autor.

Para a usinagem, foi necessária a combinação dos softwares AutoCad LT® (software CAD - *Computer Aided Design*) para o desenho da geometria dos corpos de tração e amostras e Fusion 360® (software CAM – *Computer Aided Manufacturing*) para geração do código G de trajeto da ferramenta de corte, visto sua complexidade, conforma Figura 11.

Figura 11 - Corpos de prova e amostras a serem usinados da junta



Fonte: Autor.

3.2.4. Testes Iniciais de Soldagem

Foram realizadas diversas soldagens testes, com parâmetros definidos preliminarmente, para verificação inicial de que todo o sistema montado, como base, fixações e ferramenta fabricada possibilitariam a união da liga de alumínio AA5052. Os níveis dos parâmetros frequência de rotação da ferramenta de soldagem (RPM) e velocidade de avanço (mm/min) pré-definidos foram experimentados conforme a literatura.

O sistema de fixação não deveria apresentar movimentação/flexão. A ferramenta projetada deveria suportar as cargas aplicadas durante a soldagem e seu ombro, gerar calor suficiente para amolecimento da liga, possibilitando a solda.

Foram conseguidas juntas que, qualitativamente, sugerem uniformidade na união e minimização de defeitos, conforme Figura 12.

Figura 12 - Junta soldada por FSW aprovada qualitativamente



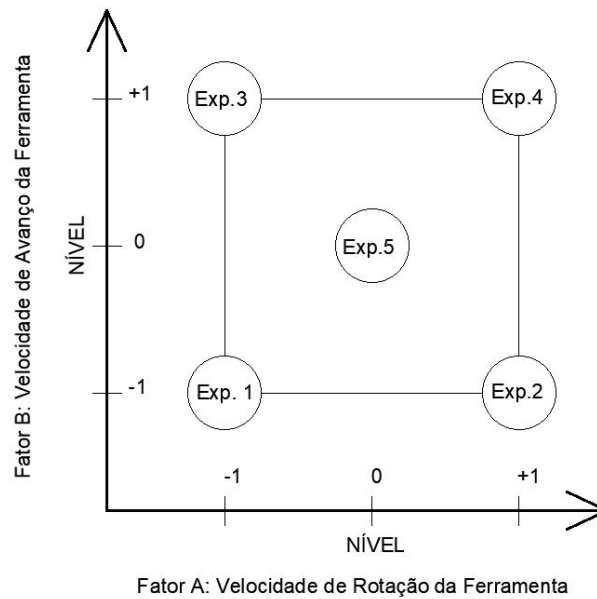
Fonte: Autor.

3.2.5. Procedimento Experimental para Soldagem

Para a soldagem das juntas e obtenção dos dados de resistência mecânica com confiabilidade estatística, foi definido um método experimental fatorial 2^k , sendo “k” a quantidade de fatores variados e “2” o número de níveis estudados para cada fator. Para aumento da confiabilidade estatística, também foi executado um único experimento com os fatores em níveis intermediários aos estudados.

Neste experimento, a Velocidade de Rotação da Ferramenta de Soldagem – fator A e a Velocidade de Avanço – fator B foram os fatores variados. Estes fatores foram experimentados em 2 níveis cada (-1 e +1), somando-se a estes um experimento com os fatores em níveis centrais (0 e 0), totalizando 5 experimentos conforma Figura 13.

Figura 13 - Experimentos realizados



Fonte: Autor.

Para posterior análise do desvio entre experimentos com mesmos níveis, foram realizadas 2 réplicas, totalizando 15 experimentações. Os níveis em que cada experimento foi realizado, podem ser vistos na Tabela 10.

Tabela 10 - Níveis dos Experimentos Realizados

Experimento	Nível do Fator A (Rotação da Ferramenta)	Nível do Fator B (Avanço da Ferramenta)
1, 6, 11	-1	-1
2,7,12	+1	-1
3,8,13	-1	+1
4,9,14	+1	+1
5,10,15	0	0

Fonte: Autor.

De acordo com a revisão do estado da arte sobre FSW aplicada a liga AA5052, decidiu-se por avaliar a resistência da junta nos valores na Tabela 11,

através da Equação 2, que compara a tensão última do metal base com a tensão última obtida nos ensaios de tração.

$$eficiência\ da\ junta = \frac{\sigma_{ult.\ experimento}}{\sigma_{ult.\ metal\ base}} [\%] \quad (2)$$

Tabela 11 - Valores para o níveis experimentados

	Níveis do Fator A (Rotação da ferramenta)			Níveis do Fator B (Velocidade de avanço da ferramenta)		
	-1	0	+1	-1	0	+1
Valor do Nível	800 RPM	900 RPM	1.000 RPM	40 mm/min	60 mm/min	80 mm/min

Fonte: Autor.

3.2.6. Soldagem e Extração dos Corpos de Tração e Amostras

Foram executados, ao todo, 15 experimentos. De cada junta, foram extraídos 2 corpos de prova de tração e 2 amostras da zona soldada. A partir de 2 corpos de prova de tração de uma junta e 2 réplicas (3 juntas), pode-se avaliar o desvio da resistência da junta de um total de 6 corpos de prova com parâmetros em níveis iguais e a região de falha. Também foram extraídos os corpos de prova do material base, conforme Figura 14.

Figura 14 - Usinagem de corpos de prova de tração e amostras



Fonte: Autor.

As amostras para análise metalográfica foram preparadas de forma convencional, através de lixamento (girando a amostra 90° ao trocar de lixa), polimento com pasta de diamante de 1 μm e ataque químico próprio para revelar a granulometria do alumínio série 5xxx. Após o preparo, as amostras foram analisadas por microscopia ótica com aumento de 50x (macrografia).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Resultados da Caracterização dos Materiais como recebidos

Os ensaios de dureza na liga AA5052 apontaram uma dureza média próxima a sugerida em *The Aluminum Association* (2015), com valor de 60,5 HBW 1/10/20 (65,1 HV).

Os ensaios de tração na liga AA5052 como recebida apresentaram os resultados conforme Tabela 12. Valores médios de 214 MPa para tensão última e 159 MPa para tensão de escoamento foram verificados. A ductilidade se apresentou maior que em *The Aluminum Association* (2015), sendo esperado 11% e medido 16,2%.

Tabela 12 - Propriedades Mecânicas do Alumínio AA5052-H32 caracterizado

Corpo de Prova nº	Tensão de Escoamento (MPa)	Tensão Última (MPa)	Ductilidade (%)
1	152,5	204,8	15,5
2	156,6	216,7	16,6
3	153,2	210,3	16,5
4	165,3	206,4	16,1
Valor Médio	156,9	209,5	16,2
Desvio padrão	5,9	5,3	0,5

Fonte: Autor.

A espectrometria de massa é apresentada na Tabela 13, assim como os teores esperados conforme ASTM International (2014). Os elementos majoritários da liga AA5052, Magnésio e Cromo, se encontram dentro das faixas esperadas. Elementos como Ferro, Cobre e Zinco se apresentaram em menor quantidade.

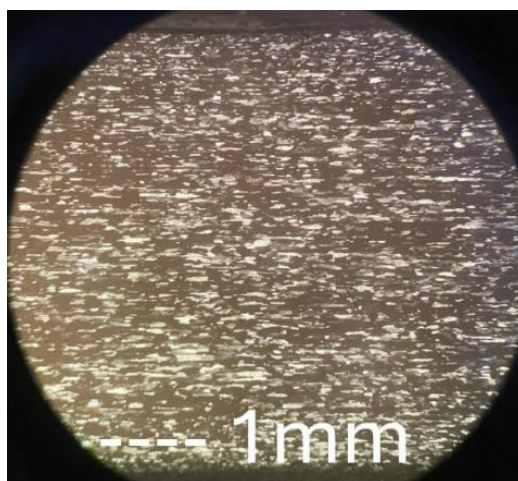
Tabela 13 - Resultado da espectrometria de massa - AA5052

Elemento	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Al
% Esperado	0,25	0,40	0,10	0,10	2,20-2,80	0,15-0,35	0,10	Rem.
% Medido	0,06	0,27	0,04	0,06	2,78	0,21	0,03	Rem.

Fonte: Autor.

A análise por microscopia ótica demonstrou alto grau de deformação a frio na direção de laminação, conforme Figura 15. Visto o material possuir 4 mm de espessura, o direcionamento dos grãos na laminação atingiu toda a seção transversal da chapa. Foi medido um tamanho de grão médio de 113 μm .

Figura 15 - Grãos alongados na direção de laminação - material como recebido



Fonte: Autor.

Os ensaios de dureza no aço ferramenta H13 como recebido apontaram a dureza média de 209,1 HBW 2,5/187,5/20 (16 HRC). Após têmpera e revenimento, a ferramenta fabricada apresentou 395 HBW.

Os resultados da espectrometria de massa do H13, apresentados na Tabela 14, demonstraram que os elementos majoritários estão dentro das faixas esperadas conforme ASM (1990a).

Tabela 14 – Resultado da espectrometria de massa – H13

Elemento	C	P	S	Mn	Si	Cr	Mo	V
% Esperado	0,32 - 0,45	0,03	0,03	0,20 - 0,50	0,80 - 1,20	4,75 - 5,50	1,10 - 1,75	0,80 - 1,20
% Medido	0,12	0,01	0,01	0,33	0,94	4,98	1,19	>0,90

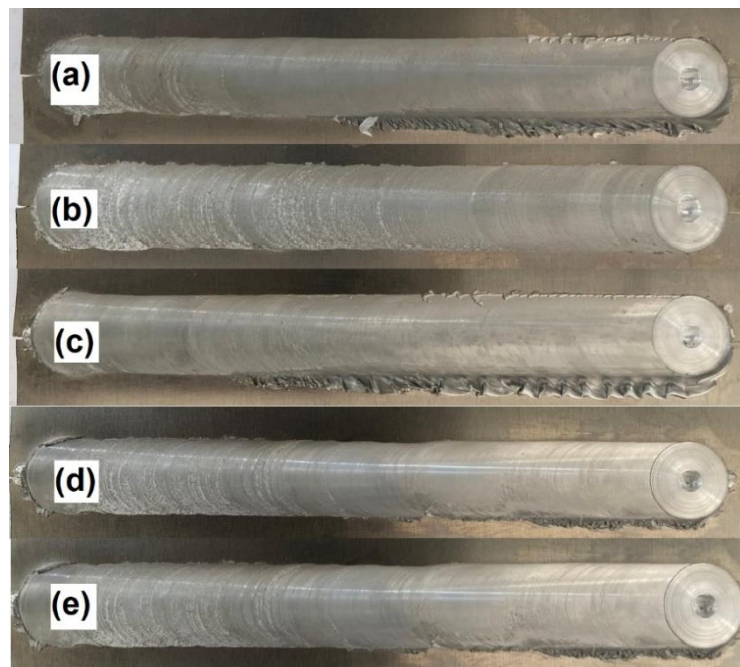
Fonte: Autor.

4.2. Resultados da Caracterização das Juntas Soldadas

4.2.1. Análise por Inspeção Visual

A inspeção visual da face superior das juntas e da raiz, mostrou uniformidade da união na faixa de parâmetros experimentados. Conseguiu-se penetração total da solda e uma superfície superior plana sem apresentação de macro defeitos, conforme a Figura 16.

Figura 16 - Superfície das juntas soldadas por FSW: (a) Experimento 1 (avanço = 40 mm/min e rotação = 800 RPM), (b) Experimento 2 (avanço = 80 mm/min e rotação = 800 RPM), (c) Experimento 3 (avanço = 40 mm/min e rotação = 1000 RPM), (d) Experimento 4 (avanço = 80 mm/min e rotação = 1000 RPM) e (e) Experimento 5 (avanço = 60 mm/min e rotação = 900 RPM).



Fonte: Autor.

Houve o defeito rebarba mais acentuado, nos experimentos 1 e 3 – 16(a) e (c) - o que pode ser consequência do excesso de amolecimento e da dificuldade da ferramenta em manter o material amolecido na região de soldagem conforme Tufaro (2015). Ele utilizou um ângulo de inclinação da ferramenta de $1,5^\circ$, o que tende a manter o material preso na região de soldagem e diminuir a geração de rebarba. Neste estudo, não houve ângulo de inclinação da ferramenta devido a impossibilidade de adaptação na máquina CNC utilizada.

Não foram experimentadas velocidades de rotação maiores que 1000 RPM. A qualidade das juntas fabricadas, verificadas através da inspeção visual, qualificou-as para técnicas de inspeção e análises adicionais.

4.2.2. Análise por Microscopia Ótica

Foram realizadas as análises macroscópicas das juntas, em que foi necessário atacá-las com ácido flúor-bórico (5g em 200ml de água) em meio eletrolítico (30 Vcc) por 3 minutos, onde foi revelada a estrutura dos seus grãos apenas sob luz polarizada.

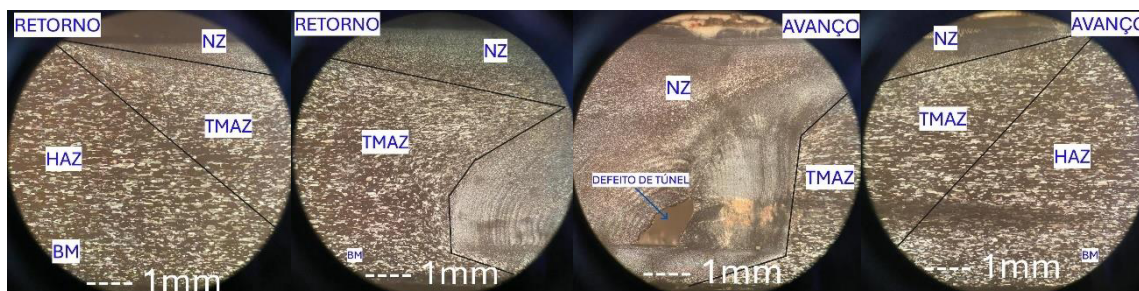
Através das Figura 17, 18, 19, 20 e 21, nota-se a ocorrência do defeito de túnel próximo as raízes das juntas, centralizadamente, em todas as combinações de rotação da ferramenta e velocidade de avanço. Visto a ocorrência dos defeitos de túnel em todos os experimentos, associou-se ele a baixa entrada de calor da junta como em Mishra (2005). A combinação de parâmetros que não geram amolecimento suficiente, impede o preenchimento do vazio deixado pelo avanço da ferramenta.

Outra hipótese seria um comprimento de pino insuficiente para a espessura da chapa soldada. Entretanto, folgas da ordem de 1, 2 e 3 décimos de mm entre o pino e a raiz da junta foram utilizadas em Tufaro; (2015), Capelari; (2009) e outros, com sucesso, assim como neste estudo (0,2 mm).

O experimento 1 (Figura 17) demonstrou um maior refino de grão quando comparado com os experimentos 2, 3, 4 e 5. Os parâmetros utilizados propiciaram aporte térmico que não facilitou o crescimento dos grãos, mantendo os grãos

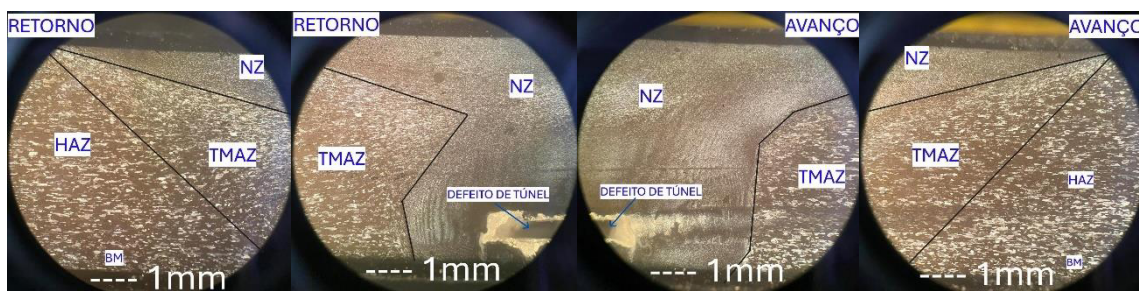
recristalizados com tamanhos reduzidos assim como discutido em Bodaghi (2017). Ele relata que o tamanho final dos grãos está diretamente conectado ao ciclo térmico experimentado por eles. O tamanho não foi mensurado, entretanto, a diferença de tamanho foi evidente.

Figura 17 - Experimento 1 – Rotação da ferramenta = 800 RPM
e Velocidade de Avanço = 40 mm/min.



O experimento 2 (Figura 18) utilizou parâmetros de soldagem que geraram o menor aporte térmico entre todos e não apresentou características de baixo grau de amolecimento e baixa qualidade de mistura mecânica do material plasticizado como era previamente esperado. Em Shanavas (2017b), ele substituiu um maior aporte térmico (parâmetros favoráveis ao amolecimento) por uma ferramenta de características “mais misturadora do metal” (não lisa). Parâmetros de 700 RPM e 65 mm/min geraram juntas de boas características mecânicas usando uma ferramenta quadrada.

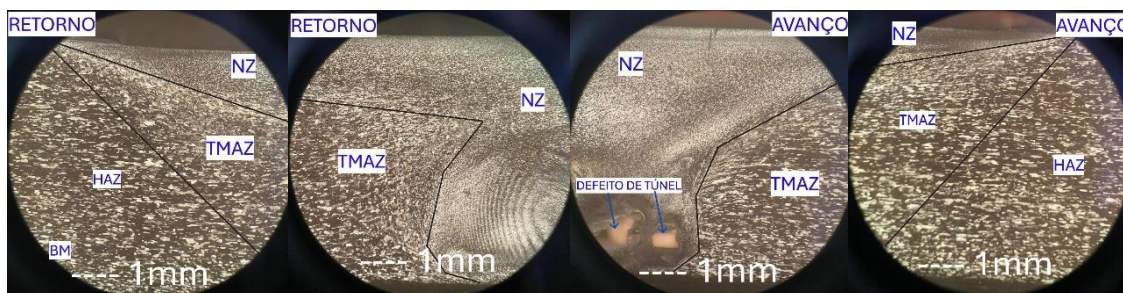
Figura 18 - Experimento 2 - Rotação da ferramenta = 800 RPM
e Velocidade de Avanço = 80 mm/min.



O experimento 3 (Figura 19) com rotação da ferramenta = 1000 RPM e velocidade de avanço = 40 mm/min, apresentou o menor defeito de túnel. Uma hipótese é que o grau de plasticização com esses parâmetros possibilitou uma

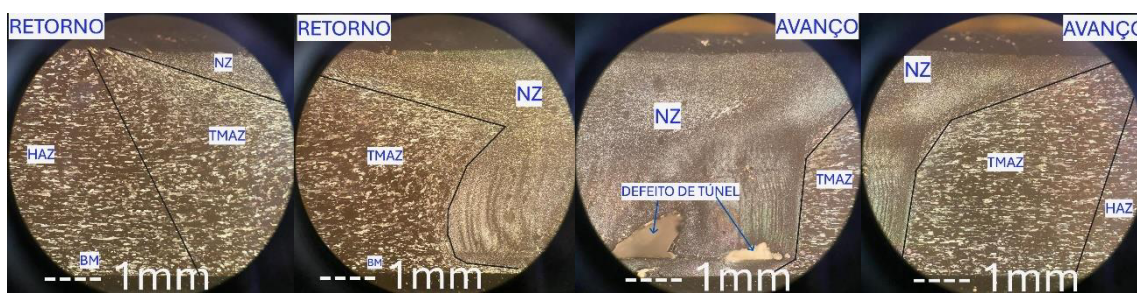
maior movimentação vertical do material plasticizado. Capelari (2009) também conseguiu juntas com melhores características microestruturais com 1000 RPM, entretanto, utilizando 75 mm/min de velocidade de avanço.

Figura 19 - Experimento 3 - Rotação da ferramenta = 1000 RPM
e Velocidade de avanço = 40 mm/min.



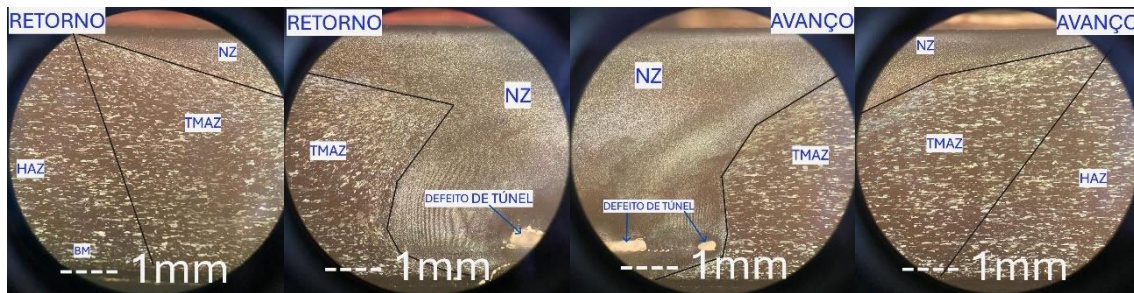
O experimento 4 (Figura 20) apresentou um maior defeito de túnel, assim como certa irregularidade da solda ao redor do pino. Isto pode ter ocorrido em decorrência da velocidade de avanço de 80 mm/min não plasticizar o material suficientemente. Datta (2023b) relata em seus experimentos, a ocorrência de uma forma “anéis de cebola” acentuada na NZ e se estendendo até a TMAZ, resultante de um fluxo material amolecido adequado. Velocidades de avanço mais altas, diminuem o aporte térmico por mm de junta e o amolecimento do metal.

Figura 20 - Experimento 4 - Rotação da ferramenta = 1000 RPM
e Velocidade de avanço = 80 mm/min.



O experimento 5 (Figura 21) demonstrou a formação uniforme de “anéis de cebola” (boa mistura mecânica) e grão refinado na região NZ utilizando 60 mm/min de velocidade de avanço e 900 RPM de velocidade de rotação da ferramenta, estando em acordo com a considerada ótimas velocidade de avanço por Bodaghi (2017) e Datta (2023b).

Figura 21 - Experimento 5 - Rotação da ferramenta = 900 RPM
e Velocidade de avanço = 60 mm/min.



Na Tabela 15, pode-se ver o tamanho de grão médio medido nas NZ's das juntas soldadas e o tamanho de grão do metal base, inicialmente.

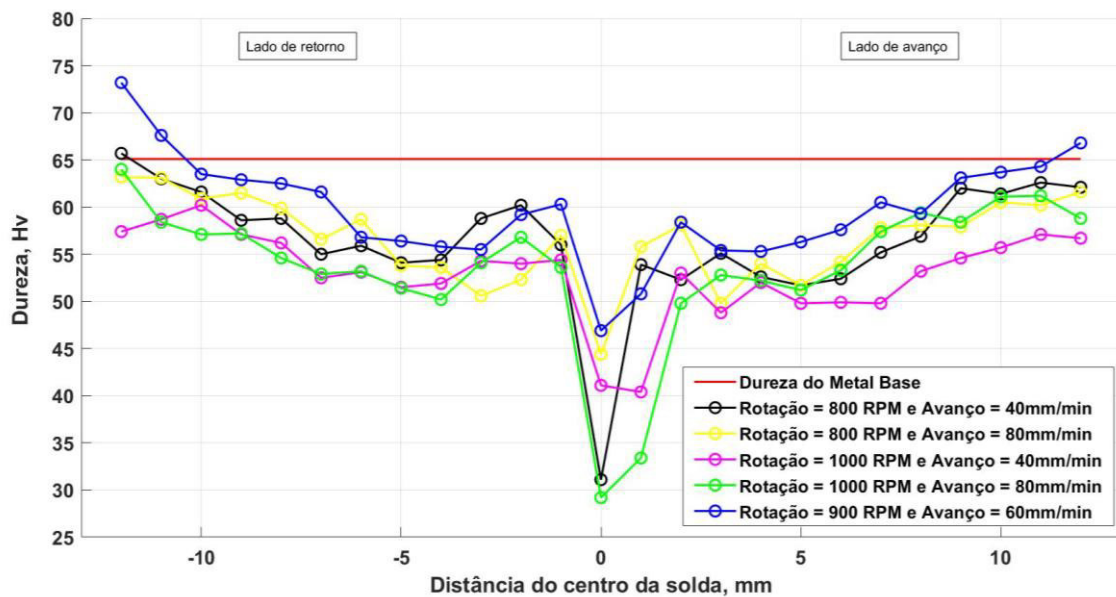
Tabela 15 - Tamanho de grão nas *Nugget Zones* em cada experimento realizado

	Tamanho de grão
Metal base como recebido	113 μm
Experimento 1 (800 RPM e 40 mm/min)	1,8 μm
Experimento 2 (800 RPM e 80 mm/min)	1,9 μm
Experimento 3 (1000 RPM e 40 mm/min)	2,5 μm
Experimento 4 (1000 RPM e 80 mm/min)	2,7 μm
Experimento 5 (900 RPM e 60 mm/min)	2,2 μm

4.2.3. Análise de Microdureza

Através dos perfis de micro dureza (Figura 22), alterações de dureza ao longo da região soldada são apresentadas, desde o centro até o metal base.

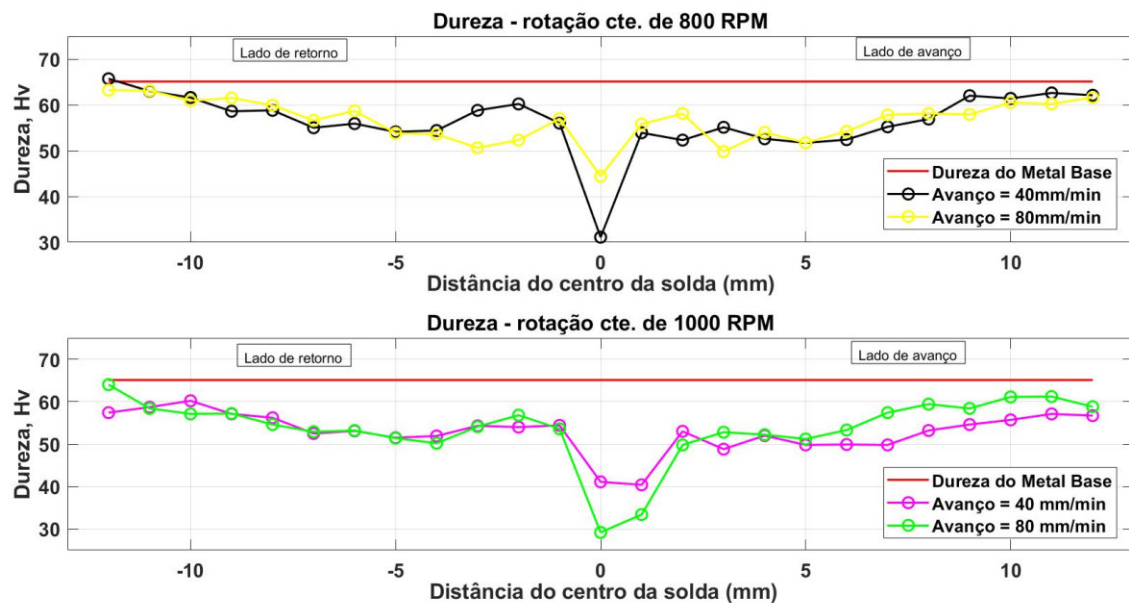
Figura 22 - Perfis de microdurezas das juntas soldadas comparados com o metal base



Uma variação da dureza entre os experimentos ocorreu, entretanto, de relativa baixa magnitude e não aparentando se alterar significativamente mesmo quando comparados experimentos com parâmetros de soldagem distintos. Isso pode ter ocorrido pelo fato do material AA5052-H32 não ser sensível a tratamento térmico, como outras “famílias” de ligas de alumínio. Esses resultados estão em acordo com Datta (2023b) e Mishra (2005). Sendo a dureza resultante da junta menor que a dureza do metal base inicial, pois houve uma diminuição da têmpera a frio inicial (encruamento) como consequência da recristalização dos grãos.

Na Figura 23, nota-se uma maior dureza longe do centro das soldas. Isso provavelmente devido ao fato de que o aporte térmico nessas regiões não foi suficiente para desfazer a têmpera inicial do material (encruamento) longe do ombro da ferramenta.

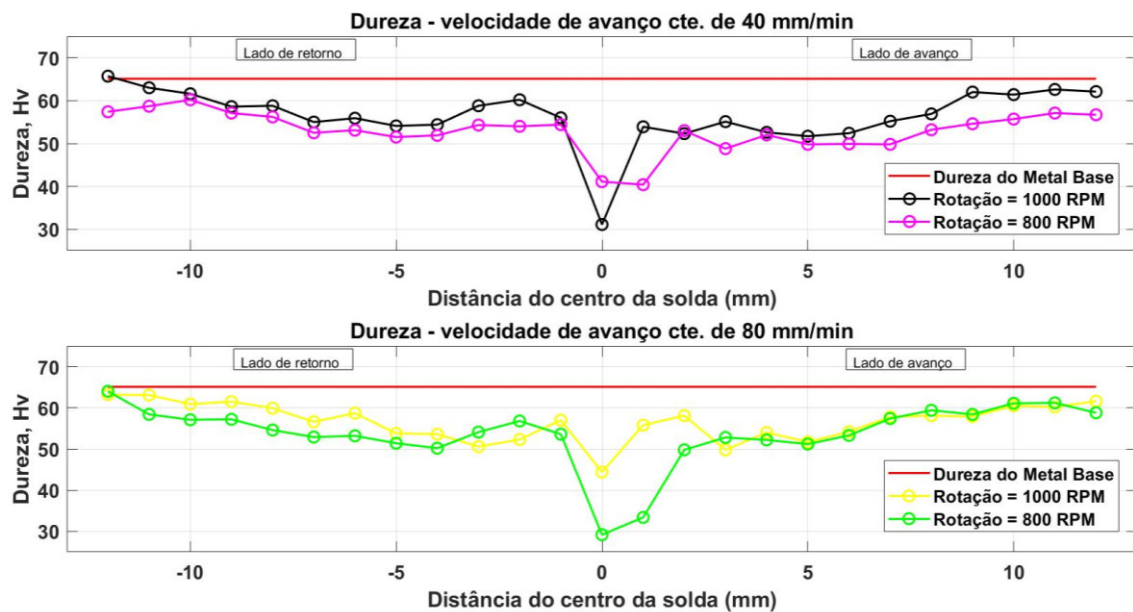
Figura 23 – Perfil de microdureza variando o avanço e mantendo a rotação constante



Em concordância com o apresentado em Bodaghi (2017), não foi possível ver variação de dureza significativa, entre os lados de avanço e retorno da ferramenta, e entre experimentos com variação da velocidade de avanço. Também explicado pelo fato do material não ser sensível a taxa de resfriamento durante a soldagem.

Conforme a Figura 24 é visto que não houve mudança no perfil de dureza variando-se a velocidade de rotação da ferramenta enquanto a velocidade de avanço foi mantida constante. Houve apenas redução da dureza do metal base, justificado pela diminuição do encruamento inicial durante a soldagem.

Figura 24 – Perfil de microdureza variando a rotação e mantendo a velocidade de avanço constante

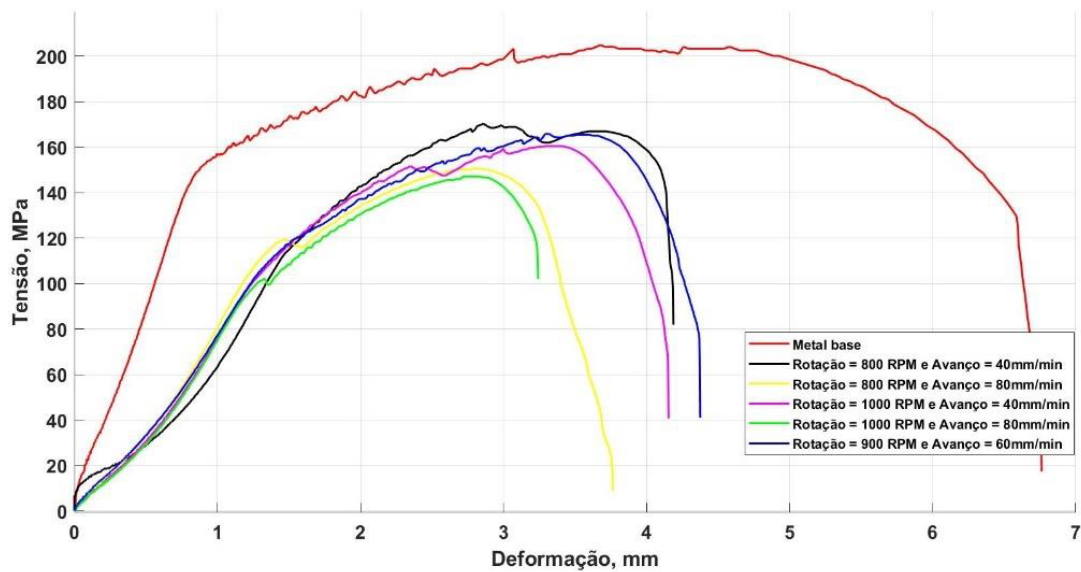


Shanavas (2018) também analisou a dureza do AA5052-H32 antes e depois da soldagem por FSW. Medindo uma dureza do metal base de 67 Hv, muito próximo dos 65 Hv medidos neste experimento. Verificou o decréscimo de dureza após a soldagem, principalmente na região NZ, que não estaria de acordo com a relação de *Hall-Petch*. Também justificou devido a recuperação e recristalização do material que causou refino de grão, não ser fator dominante com relação a dissolução de fases duras iniciais.

4.2.4. Ensaio de Tração

Na Figura 25, pode-se ver as curvas obtidas nos ensaios de tração, para o metal base e para as juntas soldadas.

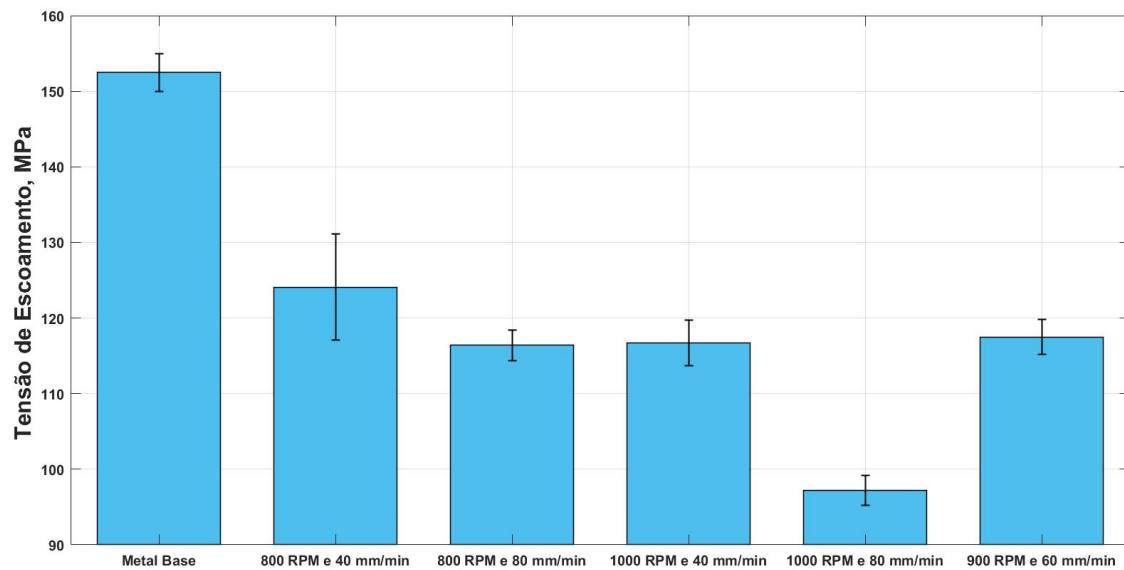
Figura 25 - Curva tensão x deformação das juntas soldadas sob ensaio de tração



Fonte: Autor.

São apresentados os valores de tensões de escoamento e tensões última obtidos nos ensaios de tração através da Figura 26 e Figura 27. As eficiências das juntas, calculadas a partir da Equação 2, podem ser vistas através da Figura 28 e Tabela 15.

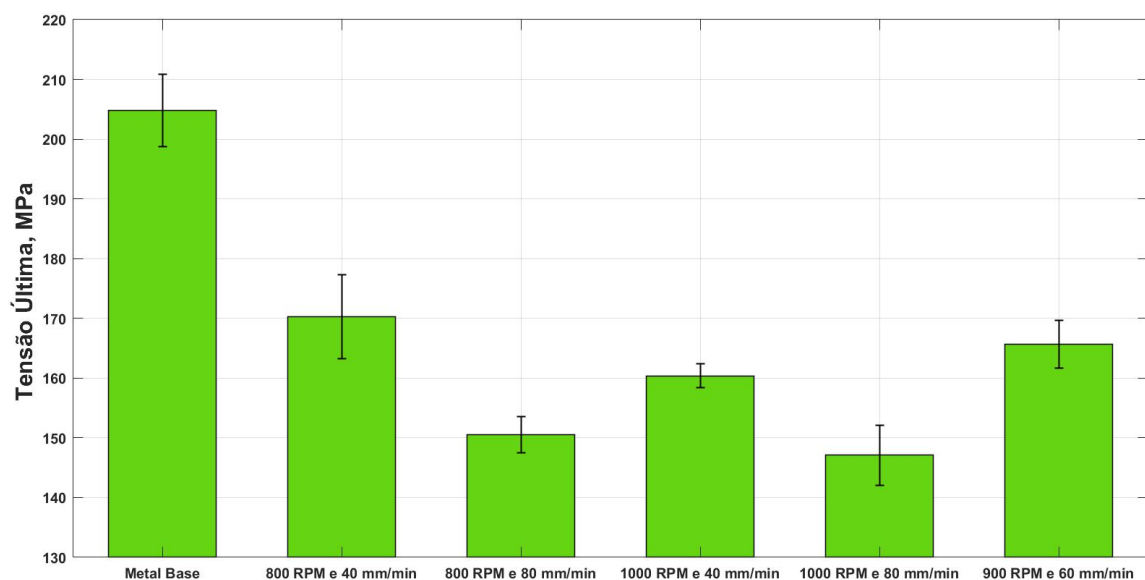
Figura 26 - Tensões de escoamento das juntas ensaiadas



Fonte: Autor.

De acordo com a Figura 26, pode-se ver que houve uma diminuição significativa da tensão de escoamento do material após a soldagem. Também resultado da diminuição de dureza verificada na seção 4.2.3.

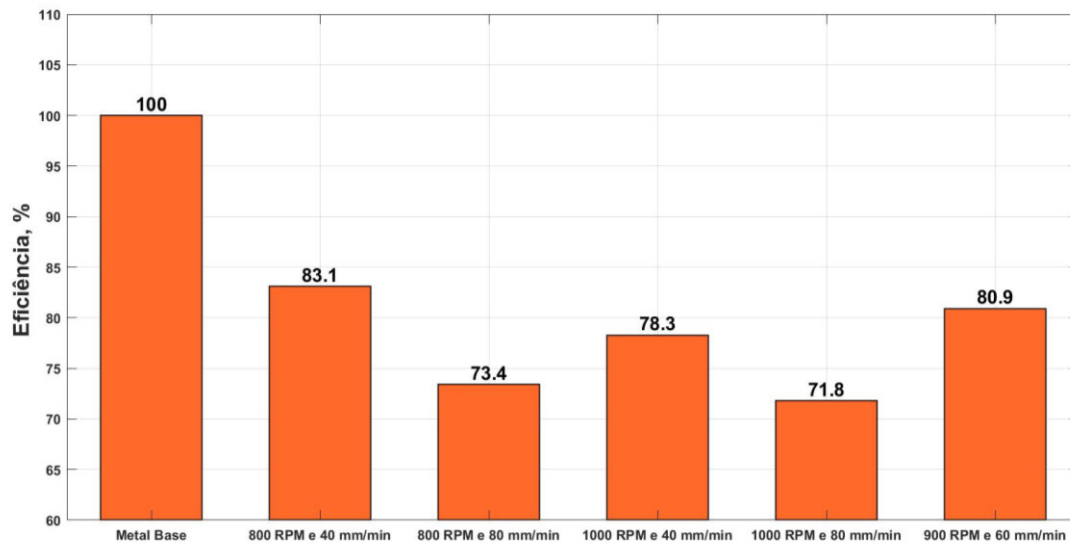
Figura 27 - Tensões últimas das juntas ensaiadas



Fonte: Autor.

Assim como a tensão de escoamento, a tensão última das juntas foi reduzida, sendo utilizadas para o cálculo da eficiência das juntas.

Figura 28 - Eficiências de juntas



Fonte: Autor.

Tabela 16 - Eficiência das Juntas soldadas

Junta	Tensão de escoamento (MPa)	Tensão última (MPa)	Tensão última metal base (Mpa)	Eficiência da junta (%)
Experimento 1 (800 RPM e 40 mm/min)	124,1	170,3	204,8	83,1
Experimento 2 (800 RPM e 80 mm/min)	116,4	150,5	204,8	73,4
Experimento 3 (1000 RPM e 40 mm/min)	116,7	160,4	204,8	78,3
Experimento 4 (1000 RPM e 80 mm/min)	97,2	147,1	204,8	71,8
Experimento 5 (900 RPM e 60 mm/min)	117,5	165,7	204,8	80,9

Fonte: Autor.

O experimento 1 (800 RPM e 40 mm/min) conseguiu a maior eficiência de junta (83,1%) – Figura 28. Esta velocidade de avanço foi a geradora de maior aporte térmico e a rotação da ferramenta, de menor aporte térmico nos experimentos. Kumar et al. (2018) também conseguiu 83% de eficiência, mas com 60 mm/min e

1120 RPM, mas usando uma ferramenta mais misturadora, de forma pentagonal. Comparando os níveis dos parâmetros de soldagem de Kumar et al. (2018) com o experimento 1, é lógico concluir que pode haver um aporte térmico ideal para soldagem do AA5052-H32, que não depende do nível de um parâmetro de soldagem individualmente.

O experimento 2 (800 RPM e 80 mm/min) obteve a segunda menor eficiência de junta - 73,4% - Figura 28. Estes resultados estão em acordo ainda com Kumar et al. (2018), que verificou queda abrupta da eficiência usando 80 mm/min de velocidade de avanço. O aumento demasiado da velocidade de avanço não possibilita o amolecimento adequado, a recristalização e recuperação do material.

O experimento 3 (1000 RPM e 40 mm/min) obteve a terceira maior eficiência (78,3%) – Figura 28. Gerou maior aporte térmico que os experimentos 1 e 2, sinalizando que talvez o excesso de rotação e plasticização possa causar turbulências na região de mistura e agitação, diminuindo a eficiência de junta, como relatado por Moshwan et al. (2015).

O experimento 4 (1000 RPM e 80 mm/min) obteve a menor eficiência de junta entre todos os testes (71,8%) – Figura 28. Novamente, indicando uma piora na resistência quando o parâmetro de 80 mm/min é utilizado para soldagem. Foi observável durante o experimento (qualitativamente) a junta com características de amolecimento insuficiente do material.

O experimento 5 (900 RPM e 60 mm/min) alcançou a segunda maior eficiência de junta (80,9%) – Figura 28. Os parâmetros utilizados geraram um aporte térmico intermediário quando comparado com experimento 3 (de maior aporte térmico) e experimento 2 (de menor aporte térmico). É observável, novamente, que pode haver uma correlação da resistência da junta com aporte térmico, independente dos parâmetros de soldagem.

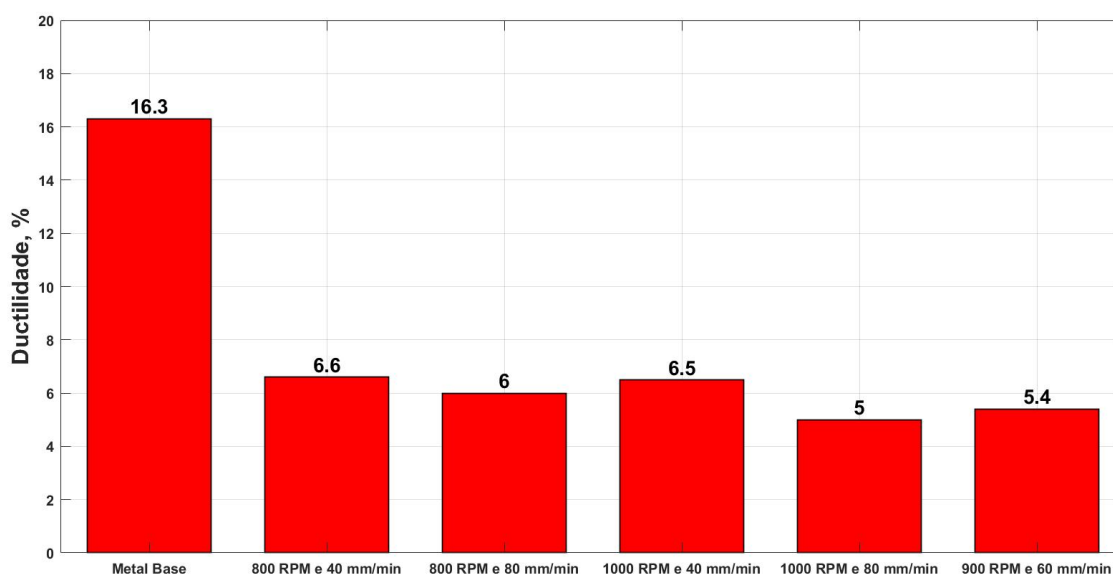
A hipótese de Moshwan et al. (2015) de que o endurecimento por refino de grão (efeito Hall-Petch) aumenta a resistência da junta (grão refinado após a soldagem) mas existe diminuição de dureza (resistência), por dissolução de compostos intermetálicos, pode ser uma justificativa para queda de eficiência com aportes térmicos demasiados.

Na Figura 28 é possível ver uma tendência na diminuição da resistência da junta com o aumento da velocidade de rotação da ferramenta, acima de 800 RPM. Também é possível ver uma diminuição da resistência da junta quando o parâmetro velocidade de avanço foi aumentado, acima de 40 mm/min.

Uma hipótese é que o efeito da diminuição do aporte térmico com o aumento do avanço, gerou soldas com características de “mistura fria”, com baixa uniformidade de mistura mecânica. O aumento do avanço da ferramenta em 100% (40 para 80 mm/min) diminuiu a eficiência da junta em até 12%. Shanavas (2018) também verificou essa queda, mas a partir de 55 mm/min de velocidade de avanço.

Na Figura 29 é apresentado o alongamento até a falha dos corpos de prova, revelando alterações na ductilidade do material após a soldagem.

Figura 31 - Ductilidade do metal base e das juntas soldadas



Como relatado em 4.2.2, todos os experimentos apresentaram defeito de túnel próximo a raiz da solda. Sendo assim, a seção transversal real da junta submetida a tração foi reduzida de forma que as eficiências das juntas provavelmente estejam em patamares superiores aos apresentados na Tabela 16.

A menor queda de ductilidade após a soldagem ocorreu para o experimento 1 (800 RPM e 40 mm/min) com uma queda de 59,5%. Essa queda acentuada pode estar ligada ao que concluiu Mejbél (2021) sobre a formação de vazios em juntas.

A existência de defeitos como vazios e túneis, pode provocar a falha precoce em testes de tensão pelo fator de concentração de tensão, mascarando os resultados, visto o refino de grão ser benéfico para ductilidade.

5. CONCLUSÕES

1. A ferramenta de soldagem desenvolvida com o pino liso, possui características de pouca “mistura mecânica” do material amolecido, necessitando talvez de ranhuras ou rosca que aumentem a região NZ da junta. A dureza da ferramenta em H13 temperado e revenido foi suficiente para a ferramenta resistir mecanicamente a soldagem do AA502-H32.
2. O aumento da rotação da ferramenta foi prejudicial para a eficiência da junta a partir de 800 RPM, gerando juntas de menores eficiências. O excesso de plasticização provavelmente torna a mistura mecânica turbulenta e não uniforme.
3. O aumento da velocidade de avanço da ferramenta foi prejudicial a eficiência da junta, a partir de 40 mm/min. A diminuição da plasticização parece ser muito sensível ao aumento do avanço, prejudicando a mistura mecânica.
4. A maior eficiência de junta, considerando a tensão última, foi conseguida no experimento 1 (Rotação da ferramenta = 800 RPM e Velocidade de avanço = 40 mm/min). Foi alcançada uma eficiência de 83,1%. Sendo considerados estes os parâmetros ótimos dentro das faixas experimentadas.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se para o desenvolvimento de trabalhos futuros:

1. O estudo de geometrias de ferramentas de soldagem com características mais “misturadoras”, como ferramentas com ranhuras ou rosca no pino da ferramenta.
2. O estudo das temperaturas que ocorrem no processo, por exemplo, através da instrumentação por termopares, visto outras ligas de alumínio serem sensíveis a endurecimento por tratamento térmico.
3. O estudo das forças envolvidas na soldagem, também através da instrumentação, por exemplo, com dinamômetros. O conhecimento mais preciso dessas forças possibilita a realização da soldagem em equipamentos menores e que não sejam exclusivamente para soldagem por FSW, como fresadoras convencionais e CNC's para usinagem.
4. O estudo das fases presentes e seus percentuais, antes e depois da soldagem, devido ao efeito de refino de grão e dissolução de fases ser relevante quanto a eficiência da junta.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

7.1. Referências Nominais

ABNT. **NBR ISO 2107 - Alumínio e suas ligas — Produtos trabalháveis — Designações das têmperas**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2008.

ABNT. **NBR NM122 Aços ferramentais – Parte 1: Classificação, designação e composição química**. [S. l.: s. n.], 2005.

ALBANNAI, Abdulaziz; ALBANNAI, Abdulaziz I. Review The Common Defects In Friction Stir Welding. **Article in International Journal of Scientific & Technology Research**, [s. l.], 2020. Disponível em: www.ijstr.org.

ASM. **Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys**. 10. ed. [S. l.]: ASM International, 1990a. v. 1

ASM. **Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials**. 10. ed. [S. l.: s. n.], 1990b. v. 2

ASTM INTERNATIONAL. **Standard Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Sheet and Plate**. [S. l.: s. n.], 2014. Disponível em: <http://www.aluminum.org/tealsheets>.

BEVILACQUA, M. *et al.* Comparison among the environmental impact of solid state and fusion welding processes in joining an aluminium alloy. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, [s. l.], v. 234, n. 1–2, p. 140–156, 2020.

BODAGHI, Mohsen; DEHGHANI, Kamran. Friction stir welding of AA5052: the effects of SiC nano-particles addition. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 88, n. 9–12, p. 2651–2660, 2017.

CAPELARI, Tiago Valdameri; MAZZAFERRO, José Antônio Esmerio. Avaliação da geometria de ferramenta e parâmetros do processo FSW na soldagem da liga de alumínio AA 5052. **Soldagem & Inspeção**, [s. l.], v. 14, n. 3, p. 215–227, 2009.

DATTA, Rahul; KUMAR GUPTA, Suneel; BHARGAVA, Marrapu. Comparison of underwater friction stir welded and conventional friction stir welded AA 5052 alloys based on the mechanical, formability and microstructure behaviour. **Materials Today: Proceedings**, [s. l.], 2023a.

DATTA, Rahul; KUMAR GUPTA, Suneel; BHARGAVA, Marrapu. Comparison of underwater friction stir welded and conventional friction stir welded AA 5052 alloys based on the mechanical, formability and microstructure behaviour. **Materials Today: Proceedings**, [s. l.], 2023b.

D'URSO, G. *et al.* The Effects of Process Parameters on Mechanical Properties and Corrosion Behavior in Friction Stir Welding of Aluminum Alloys. *In:* , 2017. **Procedia Engineering**. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2017. p. 270–276.

GITE, Rishikesh Arun; LOHARKAR, Praveen Kumar; SHIMPI, Rajendra. Friction stir welding parameters and application: A review. *In:* , 2019. **Materials Today: Proceedings**. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2019. p. 361–365.

GIVI, Mohammad; ASADI, Parvis. **Advances in Friction Stir Welding and Process**. [S. l.]: Elsevier, 2014.

HEIDARZADEH, A. *et al.* Friction stir welding/processing of metals and alloys: A comprehensive review on microstructural evolution. **Progress in Materials Science**, [s. l.], v. 117, p. 100752, 2021.

HOYOS, Elizabeth; SERNA, María Camila. Basic tool design guidelines for friction stir welding of aluminum alloys. **Metals**, [s. l.], v. 11, n. 12, 2021.

ISO. **ISO 25239-4:2011 - Friction stir welding - Aluminium Part 4: Specification and qualification of welding procedures**. [S. l.: s. n.], 2011.

KAH, Paul *et al.* **Investigation of weld defects in friction-stir welding and fusion welding of aluminium alloys**. [S. l.]: Springer, 2015.

KARUN KUMAR, K *et al.* **Experimental Investigation of Friction Stir Welded AA5052 using Square and Pentagonal Tool Pins** **Materials Today: Proceedings**. [S. l.: s. n.], 2018. Disponível em: www.sciencedirect.com/proc/proceedings2214-7853. .

KARUN KUMAR, K.; KUMAR KAVITI, Ajay; KIRAN KUMAR, N. Experimental investigation of friction stir welded AA5052 using square and pentagonal tool pins. *In:* , 2018. **Materials Today: Proceedings**. [S. l.]: Elsevier Ltd, 2018. p. 18230–18237.

MALOPHEYEV, Sergey *et al.* Optimization of processing-microstructure-properties relationship in friction-stir welded 6061-T6 aluminum alloy. **Materials Science and Engineering: A**, [s. l.], v. 662, p. 136–143, 2016.

MEHTA, Kush P. Sustainability in Welding and Processing. *In:* [S. l.]: Srpingar, 2019. p. 125–145.

MEJBEL, Mohanad Kadhim; TAREQ, Isam. **Void Formation in Friction Stir Welding of AA5052 Butt Joining**Article in **Journal of Mechanical Engineering Research and Developments**. [S. l.: s. n.], 2021. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/351116882>. .

MENDES, Nuno *et al.* Machines and control systems for friction stir welding: A review. **Materials and Design**, [s. l.], v. 90, p. 256–265, 2016.

MIRONOV, Sergey *et al.* Effect of Welding Temperature on Microstructure of Friction-stir Welded Aluminum Alloy 1050. **Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science**, [s. l.], v. 46, n. 2, p. 783–790, 2015.

MISHRA, R. S.; MA, Z. Y. Friction stir welding and processing. **Materials Science and Engineering: R: Reports**, [s. l.], v. 50, n. 1–2, p. 1–78, 2005. Disponível em: Acesso em: 3 abr. 2024.

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

ODEBIYI, Oluwasegun S. *et al.* A review of weldability of carbon steel in arc-based welding processes. **Cogent Engineering**, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 32, 2019.

OROZCO, Mario. **Modelado del proceso de soldadura por fricción – agitación aplicando técnicas de análisis de señales vibroacústicas e inteligencia artificial**. 2013. 1–160 f. - Universidad de Oriente, Santiago, 2013.

PADHY, G. K.; WU, C. S.; GAO, S. Friction stir based welding and processing technologies - processes, parameters, microstructures and applications: A review. **Journal of Materials Science and Technology**, [s. l.], v. 34, n. 1, p. 1–38, 2017.

RAO, T. Srinivasa; REDDY, G. Madhusudhan; RAO, S. R.Koteswara. Microstructure and mechanical properties of friction stir welded AA7075-T651 aluminum alloy thick plates. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)**, [s. l.], v. 25, n. 6, p. 1770–1778, 2015.

SHAH, Pratik H.; BADHEKA, Vishvesh J. **Friction stir welding of aluminium alloys: An overview of experimental findings – process, variables, development and applications**. [S. l.]: SAGE Publications Ltd, 2017.

SHANAVAS, S.; EDWIN RAJA DHAS, J.; MURUGAN, N. Weldability of marine grade AA 5052 aluminum alloy by underwater friction stir welding. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 95, n. 9–12, p. 4535–4546, 2018.

SHANAVAS, S.; RAJA DHAS, J. Edwin. Weldability of AA 5052 H32 aluminium alloy by TIG welding and FSW process - A comparative study. *In:* , 2017a. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. [S. l.]: Institute of Physics Publishing, 2017.

SHRIVASTAVA, Amber; KRONES, Manuela; PFEFFERKORN, Frank E. Comparison of energy consumption and environmental impact of friction stir welding and gas metal arc welding for aluminum. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, [s. l.], v. 9, p. 159–168, 2015.

SINGH, Virendra Pratap *et al.* Recent research progress in solid state friction-stir welding of aluminium–magnesium alloys: A critical review. **Journal of Materials Research and Technology**, [s. l.], v. 9, n. 3, p. 6217–6256, 2020.

SINHMAR, S.; DWIVEDI, D. K. Enhancement of mechanical properties and corrosion resistance of friction stir welded joint of AA2014 using water cooling. **Materials Science and Engineering: A**, [s. l.], v. 684, p. 413–422, 2017.

THE ALUMINUM ASSOCIATION. **ALUMINUM DESIGN MANUAL**. [S. l.: s. n.], 2015a.

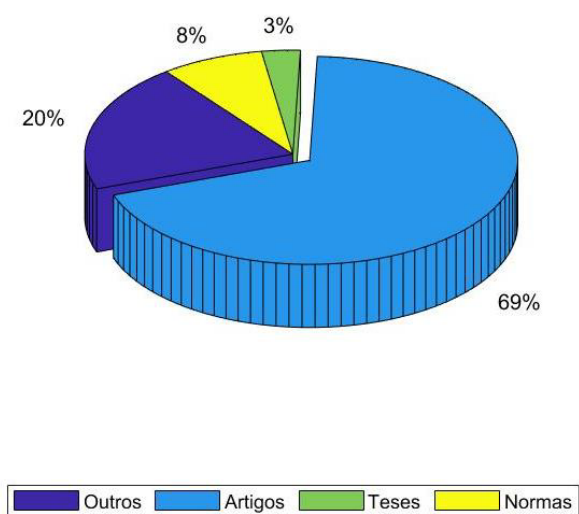
THE ALUMINUM ASSOCIATION. **International Alloy Designations and Chemical Composition Limits for Wrought Aluminum and Wrought Aluminum Alloys**. [S. l.: s. n.], 2015b.

TUFARO, Leonardo N.; MANZONI, Iván; SVOBODA, Hernán G. Effect of Heat Input on AA5052 Friction Stir Welds Characteristics. **Procedia Materials Science**, [s. l.], v. 8, p. 914–923, 2015.

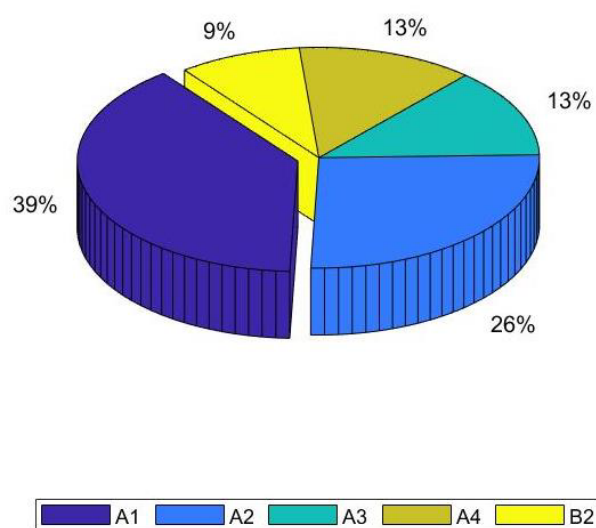
VALDAMERI CAPELARI, Tiago; ANTÔNIO ESMERIO MAZZAFERRO, José. **Avaliação da Geometria de Ferramenta e Parâmetros do Processo FSW na Soldagem da Liga de Alumínio AA 5052 (Process Parameters and Tool Geometry Evaluation in the FSW of AA 5052 Aluminum Alloy)**. [S. l.: s. n.], 2009.

WEĞŁOWSKI, Marek Stanisław. **Friction stir processing – State of the art**. [S. l.]: Elsevier B.V., 2017.

7.2. Referências por Estrato



7.3. Referências por Qualis



7.4. Referências por Data dos Artigos

