

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

ALEXANDRE LOURENÇÃO CASELATTO

CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DE LIGAS DE ALUMÍNIO
DISSIMILARES SOLDADAS POR FRICÇÃO E MISTURA (FSW).

São Carlos

2016

ALEXANDRE LOURENÇÃO CASELATTO

CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DE LIGAS DE ALUMÍNIO
DISSIMILARES SOLDADAS POR FRICÇÃO E MISTURA (FSW).

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Materiais e Manufatura, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro de Materiais e Manufatura.

Área de Concentração: Metais

Orientador: Prof. Dr. Waldek Bose Filho

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos

2016

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

C381c Caselatto, Alexandre
CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DE LIGAS DE ALUMÍNIO
DISSIMILARES SOLDADAS POR FRICÇÃO E MISTURA (FSW). /
Alexandre Caselatto; orientador Waldek Bose Filho;
coorientador Carla Maciel. São Carlos, 2016.

Monografia (Graduação em Engenharia De Materiais e
Manufatura) -- Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo, 2016.

1. Solda fricção em materiais dissimilares. 2.
Ligas de alumínio. 3. Caracterização microestrutural.
I. Título.

FORMULÁRIO PARA RELATÓRIO DE DEFESA DE TCC

Relatório de defesa pública de Trabalho de Conclusão de Curso da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo.

Nome: Alexandre Lourenção Caselatto		Nº USP: 8085372
Orientador: Waldek Wladimir Bose Filho		Nº USP:
Título do TCC: CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DE LIGAS DE ALUMÍNIO DISSIMILARES SOLDADAS POR FRICÇÃO E MISTURA (FSW)		
Curso: Engenharia de Materiais e Manufatura		
Disciplina: SMM0325 - Trabalho de Conclusão		
Local da defesa:	Data de defesa: 24/11/2016	Hora da defesa: 14:30:00

Após declarada aberta a sessão, o(a) Sr(a) Presidente passou a palavra aos examinadores para as devidas arguições. Em seguida, a Comissão Julgadora proclamou o resultado:

Membros da Comissão Julgadora	Vínculo	Sigla Unidade	Nota
Waldek Wladimir Bose Filho	EESC	SMM	9,0
Carla Isabel dos Santos Maciel	EESC	SMM	9,0
Lauralice de Campos F. Canale	EESC	SMM	9,0

Média= 9,0 (nove)		
Resultado final	<input checked="" type="checkbox"/> Aprovado	<input type="checkbox"/> Reprovado

Eu, Ana Fabricis Aux Acadêmica lavrei o presente relatório que assino com os(as) senhores(as). São Carlos, 24/11/2016.

 Carla Isabel dos Santos Maciel	 Lauralice de Campos F. Canale
 Waldek Wladimir Bose Filho	 Ana Fabricis

*A minha família pela compreensão,
carinho e apoio incansável.*

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Cassius Olívio Figueiredo Terra Ruchert, que muito me ensinou contribuindo para o meu crescimento científico e profissional.

A professora Carla Isabel dos Santos Maciel, pela co-orientação, me ensinando, incentivando e apoiando em todos os momentos de dificuldade.

Ao professor Dr. Waldek Waldimir Bose Filho, por me acolher como orientador e me auxiliar durante toda a pesquisa.

Ao técnico Wagner Correr por toda a paciência e ajuda nos ensinamentos de preparação de amostras e microscopia.

Aos técnicos Douglas Bon e Ricardo Pereira por todo auxílio na preparação e execução dos ensaios mecânicos.

E a todo o grupo de pesquisa NEMAF pela boa companhia e o excelente aprendizado que tive junto a vocês.

“Procure ser um homem de valor, em vez de ser um homem de sucesso. ”

Albert Einstein

RESUMO

Caselatto, A. L. **Caracterização Microestrutural de Ligas de Alumínio Dissimilares Soldadas por Fricção e Mistura (FSW)**. 2016. 93 p. Monografia – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

A pesquisa por novos materiais e processos que possam garantir aeronaves mais leves e operacionalmente mais viáveis, têm-se dado praticamente em todos os componentes de uma aeronave, com consequência direta no menor consumo de combustível, beneficiando o fabricante, os operadores e a população em geral, pois aplica o conceito de ‘aeronave verde’. Nestes quesitos, materiais/processos, destacam-se as ligas de alumínio (2xxx e 7xxx) e a solda por fricção mistura (FSW- *Friction Stir Welding*) por sua relação custo/benefício. Esse estudo tem por objetivo principal determinar os parâmetros de soldagem por FSW de uma junta de topo de material dissimilar e caracterizar a região da solda termicamente e termomecânica afetada e o ‘*nugget*’. Sendo assim, inicialmente foi projetada a ferramenta em aço H13, determinados os parâmetros de soldagem e realizada a caracterização por Microscopia Ótica (MO) e traçado o perfil de Microdureza Vickers (HV) na seção transversal da junta soldada. Esses dados iniciam a determinação de evidências amplas e confiáveis sobre a viabilidade de uso dessa tecnologia e permitem prever o comportamento de uma junta desse tipo durante a operação de uma aeronave. Essa pesquisa propiciará o avanço no conhecimento para uso desse processo na estrutura da janela, substituindo o atual processo de rebitagem. Além disso, tal projeto possui o desafio de fornecer as informações que compõem a base da pirâmide no conceito de desenvolvimento tecnológico por ‘building block’.

Palavras chave: Solda fricção em materiais dissimilares; Ligas de alumínio; caracterização microestrutural.

ABSTRACT

Caselatto, A. L. **Microstructural characterization of a friction stir welded 2050 and 7050 aluminum alloys.** 2016. 93 p. Monografia – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

The research for new materials and processes that ensure reduction of weight and more operationally viable aircrafts, have been given in all components of an aircraft, resulting in reduction of fuel consumption, benefiting the manufacturer, operators and the population in general, it applies the concept of 'green aircraft'. In these questions, materials/processes, there are the aluminum alloys (2xxx and 7xxx) and the friction stir welding (FSW) for its cost/benefit relation. This study's main objective is to characterize, in detail, the base material, the weld region thermally and thermomechanically affected (nugget) of both materials. Therefore, it was initially designed the H13 steel tool, determined welding parameters and performed the characterization by optical microscopy (OM) and mapped the Vickers Microhardness profile (HV) in the cross section of the welded joint. These data begin determining comprehensive and reliable evidence on the feasibility of use of this technology and allow to predict the behavior of a joint of this type during the operation of an aircraft. This research will provide the advance of knowledge to use this process in the window frame, replacing the current riveting process. Furthermore, this project has the challenge of providing information that make up the base of the pyramid on the concept of technological development for 'building block'.

Key-words: Friction welding of dissimilar materials; Aluminum alloys; corrosion potential.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ilustração do processo friction stir welding. (THOMAS, 1997). Adaptado.	42
Figura 2. Geometrias de junta onde o processo FSW pode ser utilizado: (a) junta de topo, (b) junta de topo a 90°, (c) junta de topo em T tripartida, (d) junta sobreposta, (e) junta sobreposta múltipla, (f) junta de topo em T bipartida e (g) junta de topo em ângulo. (MISHRA; MA, 2005).....	46
Figura 3. Ferramenta com destaque para as regiões do pino e do ombro (CAPELARI, 2006). Adaptado.	47
Figura 4. (a). Trinca contínua na superfície ($\alpha = 1^\circ$), (b). Defeito tipo vazio ($\alpha = 1,5^\circ$), (c). Sem defeitos aparentes ($\alpha = 3,5^\circ$), (d). Defeito tipo túnel ($\alpha > 4,5^\circ$).	50
Figura 5. Efeito da força axial na formação da solda em ADC12 fundido (Al-Si-Cu) (KIM et. al., 2006).	51
Figura 6. Diferentes seções transversais decorrentes dos parâmetros utilizados (KIM et. al., 2006).	52
Figura 7. Zonas formadas durante a FSW: centro da solda ou “stir zone”, zona termomecânicamente afetada (ZTMA) e zona termicamente afetada (ZTA). (MISHRA; MA, 2005).	53
Figura 8. Morfologia dos grãos do material de base (a) micrografia óptica tridimensional e (b) mapa EBSD (CAI et. al., 2005).	54
Figura 9. Visão microscópica mostrando a secção transversal da junta soldada (CAI et. al., 2005).	55
Figura 10. A estrutura apresentada pelo grão no centro da solda (CAI et. al., 2005).	56
Figura 11. Região de transição entre a região do centro da solda e da zona termomecânicamente afetada (CAI et. al., 2005).	57
Figura 12. Identificação da região termomecânicamente afetada em sua nova divisão (SU et. al., 2003). Adaptado.	57
Figura 13. Microestrutura presente em diferentes regiões de solda: (a) metal base, (b) imagem de campo escuro da região (a), (c) zona termicamente afetada, (d) zona termomecânicamente afetada I, (e) zona termomecânicamente afetada II, e (f) centro da solda. (SU et. al., 2003).	58
Figura 14. Estrutura de deslocamento nas regiões ZTMA I (a, b, c) e na ZTMA II (d): (a) elevada densidade de deslocamento, (b) estrutura celular de deslocamento, (c) deslocamentos presos por partículas de segunda fase, (d) estrutura recuperada. (SU et. al., 2003).	60
Figura 15. Estruturas de deslocamento no interior dos grãos recristalizados dinamicamente: (a) deslocamento de baixa densidade com estrutura helicoidal, (b) alta densidade de deslocamento, (c) recuperar as células que contêm uma densidade deslocamento baixo, e (d) as fases iniciais da formação subgrãos. (SU et. al., 2003).	61
Figura 16. Preparo da junta de topo a ser soldada. (1) Ferramenta. (2) Base do dispositivo. (3) Grapas. (4) Parafusos de ajuste e fixação lateral da junta. (5) Apoios de fixação das grapas. (6) Junta de topo. (7) Apoio de alinhamento.	63
Figura 17. Ferramenta fabricada para soldagem através do processo FSW.	63
Figura 18. Geometria de dimensões das chapas utilizadas nas juntas de topo para soldagem por FSW.	64
Figura 19. Junta de topo das ligas dissimilares de alumínio-lítio 2050-T84 e alumínio 7050-T7451 soldadas por FSW.	65
Figura 20. Projeto da ferramenta com todas as dimensões.	69
Figura 21. Projeto do pino com todas as dimensões.	70
Figura 22. Testes preliminares realizados no metal base da liga 7050 para determinação dos parâmetros de soldagem, evidenciando os problemas com a penetração do pino no material.	72
Figura 23. Testes preliminares realizados no metal base da liga 7050 para determinação dos parâmetros de soldagem.	72

Figura 24. Testes realizados para a determinação de parâmetros das juntas de topo das ligas de alumínio-lítio 2050-T84 com 7050-T7451 por FSW.....	73
Figura 25. Verificação da penetração da solda através do ensaio não destrutivo de líquidos penetrantes.	73
Figura 26. Ensaio de dobramento para verificação da efetividade da solda.....	74
Figura 27. Teste de dobramento na junta dissimilar soldada por FSW. (a) Vista da espessura da junta. (b) Vista superior da junta ensaiada.	75
Figura 28. Gráfico de Carga x Deslocamento do processo de soldagem por FSW em uma junta dissimilar de alumínio-lítio 2050-T84 com alumínio 7050-T7451. Detalhe A indica momento de variação de carga durante início de formação de rebarba excessiva.	76
Figura 29. Junta de topo dissimilar soldada por FSW. Detalhe B indicando início de formação de rebarba excessiva.....	76
Figura 30. Imagem macroscópica do topo da solda por FSW da junta dissimilar AA2050-T84 com AA7050-T7451.	77
Figura 31. Imagem por microscopia ótica da seção transversal da junta de topo dissimilar soldada por FSW.....	77
Figura 32. Microscopia ótica da interface das ligas de alumínio na região do cordão de solda.....	78
Figura 33. Microscopia ótica das regiões de microestruturas afetadas da junta dissimilar soldada por FSW. (a) lado de retrocesso; (b) lado de avanço. Aumento 10x.....	79
Figura 34. Perfil de Microdureza Vickers da seção transversal da junta de topo dissimilar soldada por FSW.....	80
Figura 35. Perfil de Microdureza Vickers da seção transversal da junta similar AA2050 soldada por FSW (GEUSER et al, 2014).	81
Figura 36. Fração de precipitados T_1 (pontos pretos) em relação ao valor de microdureza Vickers (círculos vermelhos) da seção transversal da junta similar AA2050 soldada por FSW (GEUSER et al, 2014).	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Especificação da composição química da liga de alumínio AA 2050 (% em peso). (SAE AMS 4413).	38
Tabela 2. Propriedades mecânicas da liga AA2050 T84. (SAE AMS 4413).	39
Tabela 3. Especificação da composição química da liga de alumínio AA7050 (% em peso). (SAE AMS 4050H).	40
Tabela 4. Propriedades mecânicas das ligas AA7050-T84. (SAE AMS 4050H).	41
Tabela 5. Principais dimensões da geometria das ferramentas.	64
Tabela 6. Especificações da junta dissimilar soldada por FSW das ligas de alumínio-lítio 2050-T84 e 7050-T7451.	65
Tabela 7. Relações dimensionais da ferramenta FSW com espessura da chapa para ferramenta convencional (SOUZA, 2010). Adaptado.	68
Tabela 8. Propriedades do aço H13 utilizado na fabricação da ferramenta para soldagem por FSW de ligas de alumínio.	71
Tabela 9. Parâmetros de soldagem por FSW das ligas de alumínio aeronáuticas de alta resistência.	74

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	18
LISTA DE TABELAS	20
1. INTRODUÇÃO	25
2. OBJETIVOS.....	28
3. JUSTIFICATIVA.....	28
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	31
4.1. Características do alumínio e suas ligas	31
4.1.1. Alumínio	31
4.1.2. Ligas de Alumínio	32
4.1.3. Ligas de Alumínio da Série 2XXX.....	37
4.1.3.1. Al-Cu-Mg	37
4.1.3.2. Al-Cu-Li	37
4.1.4. Ligas de Alumínio da Série 7XXX.....	39
4.2. Friction Stir Welding.....	41
4.2.2. Vantagens e desvantagens do processo.	42
4.2.2.1. Vantagens	42
4.2.2.2. Desvantagens	43
4.2.3. Aplicações	44
4.2.4. Parâmetros do Processo	45
4.2.4.1. Geometria da Ferramenta	46
4.2.4.2. Parâmetros de Soldagem	48
4.2.5. Características macroscópicas da região da solda.....	52
4.2.5.1. Definição das zonas macroscópicas da solda.....	52
4.2.6. Características microestruturais e perfis de dureza.....	53
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	62
5.1. Processo de Soldagem por Fricção e Mistura (FSW) de Ligas de Alumínio Aeronáuticas de Alta Resistência	62
5.1.1. Procedimento Geral.....	62
5.1.2. Projeto da Ferramenta FSW	63
5.1.3. Soldagem da junta de topo das ligas dissimilares alumínio-lítio 2050-T84 e alumínio 7050-T7451	64

6.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	68
6.1.	Projeto do ferramental e determinação dos parâmetros de soldagem	68
6.1.1.	Projeto da ferramenta	68
6.1.2.	Determinação dos parâmetros de soldagem	71
6.2.	Macro e Microscopia	76
6.3.	Microdureza	80
7.	CONCLUSÕES	83
8.	PROPOSTAS PARA FUTUROS TRABALHOS	85
9.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

1. INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico proporcionou o desenvolvimento de combinações de propriedades de materiais para aplicações aeronáutica. Para esses tipos de materiais, rotas de processamento foram otimizadas, bem como novas ligas têm sido investigadas. Mantendo os níveis de resistência exigidos pela indústria aeroespacial, novas rotas de processamento proporcionaram melhorias importantes na ductilidade, resistência mecânica, desempenho à fadiga e diminuição da tensão residual. Um outro objetivo almejado em tais aplicações é a redução do peso e a tendência para novas técnicas de união como a solda FSW em estruturas de aeronaves. Essas novas técnicas de união requerem diferentes combinações de propriedades em comparação com as ligas aeroespaciais convencionais.

No mundo globalizado e cada dia mais competitivo em que vivemos, a busca incessante pelo desenvolvimento de novas tecnologias e técnicas, que propiciam redução de custo e tempo de fabricação associada à melhoria do produto e/ou processo, ocorre em todos os setores da economia, desde as indústrias “pesadas” até de bens e serviços.

A indústria aeronáutica, um dos símbolos desta “geração tecnológica”, tem buscado melhorias no conceito de integridade estrutural para garantir aeronaves mais seguras e com menores custos de fabricação, manutenção e operação. A pesquisa de projetos mais otimizados e que possam garantir aeronaves mais leves com consequência direta no menor consumo de combustível e, portanto, operacionalmente mais viáveis, têm-se dado em praticamente em todos os componentes de uma aeronave. Tais vantagens podem beneficiar desde o fabricante, os operadores e a população em geral, pois aplica o conceito de ‘aeronave verde’. Sendo assim, num mercado altamente competitivo e dinâmico, como é o da indústria aeronáutica, somente o desenvolvimento de novas tecnologias podem permitir a concepção de aeronaves mais modernas. Portanto para tais benefícios uma das atuais alternativas é a aplicação do processo de soldagem por fricção e mistura (FSW- *Friction Stir Welding*).

A solda por fricção oferece um benefício exclusivo de ser um processo de soldagem em estado sólido aplicável para as ligas de alumínio endurecíveis por precipitação que são consideradas "não soldáveis" por processos convencionais que envolvem a fusão do material. Para a aplicação deste processo, destacam-se as ligas de alumínio da série 2xxx e 7xxx, tais como 2024, 2050, 2198, 7475, 7050, que são ligas muito utilizadas na indústria aeronáutica e que são soldadas por atrito.

A soldagem por fricção de elementos estruturais formados de materiais dissimilares que possuem propriedades mecânicas distintas e, de espessuras variadas, que são selecionados por requisitos variados é de grande interesse para a indústria aeronáutica, devido aos ganhos de peso e de custo de operação que esse tipo de junção pode gerar. A aplicação da solda por fricção em materiais dissimilares e de espessuras variadas pode permitir a utilização do conceito de “projetar para”.

Até o momento o processo FSW apresenta-se como uma das alternativas mais viáveis a soldagem de alumínio, pois se trata de um processo derivado do processo soldagem por fricção, o que significa que não há fusão do material durante a soldagem, eliminando assim os defeitos associados a utilização de processos que envolvem a fusão do material.

O processo FSW apresenta um grande potencial de aplicação para um grande volume de produção no ambiente da indústria aeronáutica, automobilística, naval e etc., pois proporciona a obtenção de soldas de boa qualidade com baixo índice de rejeito aliado com propriedades mecânicas iguais ou geralmente melhores do que as obtidas pelos processos convencionais de fusão.

No entanto, um dos grandes problemas que surge, da aplicação dos processos de soldagem em geral, é a introdução de tensões residuais nas peças e componentes soldados. Quanto aos processos de soldagem convencionais já existe extensa literatura relatando o problema bem como sua influência no comportamento das estruturas soldadas e diversas metodologias para a solução dos mesmos. Em se tratando de novos e recentes processos de soldagem, tais como FSW e etc., o assunto “tensões residuais”, fadiga e corrosão-fadiga ainda são bastantes obscuros, necessitando de estudos criteriosos no intuito esclarecer a influência destes comportamentos nos componentes, principalmente quanto a vida e propagação de trincas por fadiga nas condições reais de operação dos mesmos.

Estruturas aeronáuticas em operação recebem solicitações de cargas típicas de voo como pressurização, sustentação, acelerações (empuxo, arrasto, direcionamento, etc), que por sua vez geram esforços dos mais variados tipos e suas combinações, como tração, compressão, fadiga, torção, flexão, flambagem, cargas aeroelásticas, vibrações, 'flutter', entre outras, que podem ter seu efeito somado a tensões residuais geradas durante o processo de fabricação tornando ainda mais importante o estudo criterioso destas partes estruturais. Esses carregamentos diferenciados exigem a combinação de propriedades mecânicas dos materiais para uma melhor otimização estrutural, gerando ganhos de peso e consequentemente, maior eficiência de consumo de combustível, menores custos de manufatura, aumento da escala de produção além de ganhos na manutenção e operação. Por exemplo, um material de alta resistência estática e relativamente baixa tenacidade e resistência à fadiga pode ser soldado a um material de alta resistência à propagação de trinca por fadiga, resultando em junções que combinem o melhor dos dois materiais para cada aplicação em uma única peça.

Além disso, a substituição da rebitagem pela solda FSW em uma aeronave permite uma economia de peso em torno de 30% por moldura em comparação com molduras rebitadas, segundo dados fornecidos pela EMBRAER. Adicionalmente tal processo irá eliminar concentradores de tensão e proporcionar uma melhora na eficiência estrutural, aumentando da vida em fadiga, os intervalos de inspeção nessa região específica, reduzindo a susceptibilidade à corrosão e melhorando acabamento da aeronave (pintura e acabamento final).

2. OBJETIVOS

Tal estudo tem por objetivo principal desenvolver o projeto do ferramental utilizado no processo FSW e a determinação dos parâmetros da soldagem, bem como a caracterização microestrutural do material base, cordão de solda e zonas termicamente (ZTA) e termomecânicamente afetadas (ZTMA), resultantes do processo de solda por atrito e mistura (FSW) em ligas de alumínio dissimilares de alta resistência.

3. JUSTIFICATIVA

No mundo globalizado e cada dia mais competitivo em que vivemos, a busca incessante pelo desenvolvimento de novas tecnologias, que propiciam redução de custo e tempo de fabricação associada à melhoria do produto e/ou processo, ocorre em todos os setores da economia, desde as indústrias “pesadas” as de bens e serviços.

A indústria aeronáutica, um dos símbolos desta “geração tecnológica”, tem buscado melhorias no conceito de integridade estrutural, para garantir aeronaves mais seguras e com menores custos de fabricação, manutenção e operação. A pesquisa de projetos mais otimizados e que possam garantir aeronaves mais leves, com consequência direta no menor consumo de combustível e, portanto, operacionalmente mais viáveis, têm-se dado praticamente em todos os componentes de uma aeronave. Tais vantagens podem beneficiar desde o fabricante, os operadores e a população em geral, pois aplica o conceito de ‘aeronave verde’. Sendo assim, num mercado altamente competitivo e dinâmico, como é o da indústria aeronáutica, somente o desenvolvimento de novas tecnologias podem permitir a concepção de aeronaves mais modernas com tais benefícios.

Seguindo nesta linha de raciocínio, a soldagem por fricção-mistura (FSW - Friction Stir Welding) têm surgido como uma excelente opção de junção/união de materiais, inclusive dissimilares. Esse processo oferece um enorme potencial para reduzir custos de junções em estruturas de alumínio. A solda por atrito oferece um benefício exclusivo de ser um processo de soldagem em estado sólido, aplicável para ligas de alumínio endurecíveis por precipitação que são consideradas "não soldáveis" por processos convencionais de fusão.

Para a validação e certificação da aplicação de FSW em aeronaves é fundamental que haja uma campanha de ensaios que possam caracterizar o comportamento mecânico em situações corrosivas de juntas soldadas por FSW de materiais dissimilares. Para tal, a

proposição deste projeto de pesquisa tecnológica, que irá beneficiar de forma direta tanto a comunidade científica como as empresas que trabalham nesta área do conhecimento e beneficiará também, de forma indireta, toda a população em geral devido a otimização de processo e material que acarretará em uma melhor relação custo/benefício para o setor.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Características do alumínio e suas ligas

4.1.1. Alumínio

O alumínio (Al) é o metal não ferroso de maior consumo em todo o mundo e segundo colocado na produção mundial de metal, perdendo apenas para o ferro (Fe). Ele é obtido a partir da extração da alumina (Al_2O_3) de um mineral denominado bauxita, passando, posteriormente, pelo processo de extração do oxigênio a altas temperaturas em fornos eletrolíticos com banho químico a base de fluoretos (MACIEL, 2013).

Mesmo com os avanços tecnológicos e, portanto, com as novas oportunidades de mercado para outros tipos de materiais, o Al mantém-se competitivo pois, além do custo relativamente baixo, comparado a outros metais, oferece boas propriedades quando relacionado a aplicações estruturais e a indústria aeronáutica (TOTTEN; MACKENZIE, 2003).

Dentre as propriedades que tornam o alumínio um metal importante na busca de soluções de engenharia aeronáutica destacam-se a baixa densidade (leveza) e elevada condutividade elétrica (BONAZZI, 2013).

Outra importante característica do alumínio comercialmente puro é sua elevada resistência à corrosão, devido à formação de uma camada fina, transparente e extremamente aderente de alumina (óxido de alumínio - Al_2O_3), que confere tal característica ao proteger toda a camada abaixo dela, evitando, assim, que a oxidação e, principalmente, a remoção dos óxidos prossigam. O fenômeno descrito anteriormente é comumente conhecido como passivação (GOMES; FILHO, 1987).

Todavia, o Al quando puro também apresenta dureza e resistência mecânica baixas, não tendo tanta aplicabilidade para a indústria aeronáutica (BONAZZI, 2013). Outro fator que restringe seu uso é sua baixa temperatura de fusão, cerca de 660°C (1220°F). Assim, suas aplicações ficam restritas a componentes de sistemas térmicos e/ou elétricos, nos quais é exigido alta condutividade sem que haja o mesmo tipo de exigência com relação às propriedades mecânicas (GOMES; FILHO, 1987).

Dessa forma, a solução encontrada para aumentar a resistência mecânica do alumínio puro e, assim, poder utilizar este metal em aplicações aeronáuticas ocorreu do desenvolvimento de ligas, que não alteram significativamente suas propriedades mais vantajosas, entretanto, aumentam consideravelmente suas propriedades mecânicas (MORETO, 2012).

Escolher uma liga para exercer uma determinada função tanto em uma aplicação em componentes estruturais quanto em engenharia aeronáutica significa selecionar o material que apresenta as propriedades primordiais com o menor custo relativo. Em vista disso um grande número de ligas foi desenvolvido como resposta (MACIEL, 2013).

4.1.2. Ligas de Alumínio

A metalurgia consiste na criação de combinações de elementos para a elaboração de ligas. A partir de um metal base, são adicionadas quantidades determinadas de elementos pré-selecionados, a fim de que modificações e/ou melhorias, desejáveis no metal base, sejam obtidas (MORETO, 2012).

As características dos elementos de liga adicionados ao Al são descritas por Gomes e Bresciani (1976) da seguinte forma:

Al + Cu – quando submetido a tratamento térmico essa liga terá resistência a tração equivalente ou maior que alguns aços e ótima usinabilidade. É indicada para indústria aeronáutica e automobilística, na estrutura e revestimento de asas e rodas de aviões.

Al + Mn – é resistente a corrosão, possui elevada condutividade térmica e baixa resistência mecânica. Esta liga é utilizada na fabricação de latas de bebida, placas de carro, telhas, equipamentos químicos, refletores, trocadores de calor e como elementos decorativos na construção civil.

Al + Si – Quando o teor de Silício (Si) está presente na liga em torno de 12%, é adequada para produzir peças fundidas e pode servir como material de enchimento em processos de soldagem e brasagem. Possui baixo ponto de fusão e boa resistência a corrosão.

Al + Mg – muito bom para utilização em soldagens e resistente a corrosão, principalmente em relação a água marinha. Por este aspecto é utilizado na fabricação de barcos, carrocerias de ônibus, recipientes para armazenar gases ou líquidos sob baixas temperaturas.

Quando há adição do manganês esta liga torna-se menos resistente, no entanto são facilmente moldáveis, usináveis e soldáveis.

Al + Sn – são empregados na confecção de mancais e buchas devido ao seu limite de fadiga e boa resistência a corrosão e usinabilidade.

Al + Zn + Mg + Cu – depois de solubilizada e envelhecida esta liga é utilizada em aplicações de relação entre peso e resistência, principalmente na construção de aviões. Nesta liga ainda pode ser acrescentado: Bismuto (Bi), Chumbo (Pb), Titânio (Ti), Estanho (Sn) ou Níquel (Ni).

Al+Li – é amplamente utilizada na indústria aeroespacial devido a sua alta resistência mecânica, resistência a corrosão sob tensão, bom comportamento quando sujeito a criogenia e principalmente pela sua baixa densidade. A cada 1% de Li adicionado a densidade da liga é reduzida por cerca de 3% e o módulo de elasticidade aumenta em 6%.

As ligas de alumínio podem ser classificadas, diferenciando-as pelo método de obtenção, em dois grandes grupos: as ligas de fundição e as ligas trabalhadas. A obtenção de peças de ligas de alumínio fundidas geralmente é feita em areia, sob pressão e precisão. Este grupo pode, ainda, ser subdividido em duas classes, distinguindo-as pelo número de elementos de liga adicionados ao alumínio:

- a) Ligas binárias – Com um elemento de liga adicionado (Al-Cu, Al-Si, Al-Mn, etc.).
- b) Ligas complexas – Com dois ou mais elementos de ligas adicionados (Al-Cu-Si, Al-Cu-Si-Mg).

Já as ligas trabalhadas representam as ligas que passaram por algum tipo de processos de conformação como laminação, extrusão, forjamento e estiramento. Dentre estas ligas existe também uma possível subdivisão, relacionada a possibilidade e/ou eficácia de tratamentos térmicos. Assim estas ligas podem ser subdivididas em:

- a) Tratáveis termicamente: como as ligas Al-Cu, Al-Cu-Si, Al-Mg-Si, Al-Zn-Cu e Al-Li, que apresentam ótimas propriedades mecânicas quando são submetidas a determinados tratamento térmico.
- b) Não Tratáveis Termicamente ou Ligas Encruáveis: que não respondem aos tratamentos térmicos, como as ligas Al-Mg, Al-Mn e Al-Si e, portanto, suas

propriedades mecânicas são determinadas pelo grau de trabalho a frio e encruamento.

As principais preocupações quanto à metalurgia física das ligas de alumínio incluem os efeitos da composição química, do trabalho mecânico, e/ou tratamento térmico que irão influenciar diretamente nas propriedades mecânicas e físicas (BONAZZI, 2013). Como mencionado anteriormente, o aumento na resistência mecânica é um dos principais objetivos para a concepção das ligas de Al, visto que a baixa resistência do alumínio puro limita a sua utilização comercial. Segundo ASM Specialty Handbook, (1993) os métodos mais utilizados para aumentar a resistência das ligas de alumínio são:

- ✓ Dispersando constituintes ou elementos em uma segunda fase ou em solução sólida, e posterior trabalho a frio da liga (para o caso de ligas trabalhadas não-tratáveis termicamente ou ligas encruáveis);
- ✓ Dissolvendo os elementos ligantes em solução sólida e precipitando-os como partículas sub-microscópicas coerentes (para o caso de ligas trabalhadas tratáveis termicamente ou que endureçam por precipitação).

A classificação das ligas de alumínio, em “Séries” ou “Famílias”, está baseada na modificação das propriedades específicas que os elementos adicionados – isoladamente ou em conjunto – proporcionam (MORETO, 2012).

A ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT (2006), em conjunto com a “*The Aluminum Association Inc.*”, especifica que para a nomenclatura de ligas trabalhadas deve ser utilizado quatro dígitos. Desta forma, para a série 1XXX, o segundo dígito indica modificações no limite de impurezas. Caso dígito seja de valor igual a zero, isso indica que o alumínio não foi ligado. Os últimos dois dígitos para esta série indicam a porcentagem de alumínio acima de 99%. Já para as séries 2XXX a 8XXX a nomenclatura sofre algumas alterações. Nesse caso, o segundo dígito passa a indicar a adição de elementos, enquanto os dois últimos dígitos identificam diferentes ligas do mesmo grupo (ASM HANDBOOK, 1990). Assim, de acordo com (ASM SPECIALTY HANDBOOK, 1993) as ligas de Al trabalhadas podem ser classificadas da seguinte maneira:

1XXX – Composta por alumínio puro, não ligado. Os materiais desta família caracterizam-se por possuírem as menores propriedades mecânicas, porém possuem maior

condutividade térmica e elétrica, e também maior conformabilidade plástica. Essas ligas são utilizadas apenas por conformação mecânica a frio.

2XXX - Esta série de ligas tem como principal elemento de liga o Cu, e as principais características desta família são: maior resistência (na condição T6), reduzida taxa de propagação de trincas por fadiga (na condição T4), resistência térmica e facilidade de usinagem.

3XXX - Contém como elemento básico de liga o Mn. A liga 3003 é a liga mais representativa desta série, pois a adição de Cu aumenta um pouco o limite de resistência, e juntamente com a adição de Fe possibilita a obtenção de uma estrutura granular mais fina. Apresentam alta conformabilidade.

4XXX - As ligas desta série se subdividem em duas categorias: baixo teor de Si (abaixo de 2% com ou sem Mn) e alto teor de Si (5 a 13%, com uma grande variedade de elementos adicionais de liga). As de baixo teor são utilizadas na confecção de utensílios domésticos e as de alto teor são utilizadas na fabricação de trocadores de calor. Ambas possuem resistência à corrosão.

5XXX - As ligas industriais desta série raramente contêm Mg em excesso a 5%, pois além deste limite a estabilidade destas ligas decresce, particularmente sob influência da temperatura. Possuem como propriedades mecânicas de destaque: excelente soldabilidade, alta resistência à corrosão, mesmo nas regiões soldadas, e boa conformabilidade a frio.

6XXX – Contêm como elementos de liga Si e Mg. São caracterizadas pelas seguintes propriedades mecânicas: grande aptidão para trabalho a quente (extrusão, laminação, forjamento), boa resistência à corrosão atmosférica (nível de propriedades mecânicas que pode ser incrementado pela adição de Si), boa soldabilidade (arco e brasagem), boa conformabilidade à frio (no estado O) e boa aptidão para tratamento de superfícies (anodização).

7XXX – Esta série de ligas tem como principal elemento de liga o Zn e Mg, são aquelas que possuem maiores resistência mecânicas, e são subdivididas em duas categorias: com ou sem adição de Cu. As ligas com adição de cobre são as mais resistentes que podem ser produzidas na condição T6. São largamente utilizadas na indústria aeroespacial, na fabricação de moldes para conformação de termoplásticos e em estruturas nas quais se necessita de baixa densidade e alta resistência mecânica.

8XXX – A adição simultânea de Fe, Si e Li proporcionam grãos mais refinados e limites de resistência melhorados. Com a estrutura granular refinada e boa isotropia, estas ligas apresentam boa conformabilidade, especialmente em condições de grande dificuldade (produtos muito finos, com espessuras entre 50-200 μ).

O sistema utilizado para designar os tratamentos térmicos realizados em ligas de alumínio, tanto fundidas como trabalhadas, é baseado na sequência de tratamentos básicos, os quais foram usados para produzir as alterações microestruturais e, conseqüentemente, das propriedades mecânicas. Este sistema é representado por letras e números (MORETO, 2012). O primeiro caractere na designação é uma letra maiúscula que indica a classe geral do tratamento térmico. A título de exemplo, a letra T é usada para identificar ligas, as quais são termicamente tratadas, com e sem encruamento, a fim de produzir têmperas posteriormente estáveis. A letra T é sempre seguida por um ou mais dígitos, especificando, assim, a sequência de tratamentos básicos realizados, como segue (ASM HANDBOOK, 1991):

T1 – resfriamento através de um processo de conformação plástica a altas temperaturas e envelhecimento à temperatura ambiente, ou seja, envelhecida naturalmente.

T2 – resfriamento através de um processo de conformação plástica a altas temperaturas, trabalho à frio e natural envelhecimento.

T3 – solução tratada termicamente, trabalho a frio e natural envelhecimento.

T4 – solução tratada termicamente e naturalmente envelhecida.

T5 – resfriamento através de um processo de conformação plástica a altas temperaturas e envelhecimento artificial.

T6 – solução tratada termicamente e envelhecimento artificial.

T7 – solução tratada termicamente e estabilizada.

T8 – solução tratada termicamente, trabalhada a frio e envelhecida artificialmente.

T9 – solução tratada termicamente, artificialmente envelhecida e trabalhada a frio.

T10 – resfriamento através de um processo de conformação plástica à altas temperaturas, trabalho à frio e artificialmente envelhecido.

No caso das ligas estudadas, o segundo dígito da designação do tratamento da liga 2050-T84 indica que a liga sofreu aproximadamente 4% de redução por laminação. Dessa forma, a liga deve, necessariamente, ter passado pelas seguintes etapas: solução tratada termicamente, trabalhada a frio (aproximadamente 4% de redução) e, por fim, envelhecida artificialmente

(SAE AS 1990 – REV C). Já na liga 7050 que recebeu o tratamento térmico T7451 foi realizada uma solubilização seguida de resfriamento rápido, estiramento nominal permanente de até 2% em relação as dimensões originais e, por fim, duplo envelhecimento artificial.

4.1.3. Ligas de Alumínio da Série 2XXX

4.1.3.1. Al–Cu–Mg

Nas ligas de alumínio da série 2XXX o aumento de resistência é proporcionado pela adição dos elementos cobre (Cu) e magnésio (Mg). Além do aumento da resistência mecânica, o Cu melhora as propriedades em fadiga e aumenta a resistência a elevadas temperaturas das ligas na qual está presente (NAFSIN, 2013; XIAO, 2002).

Entretanto, a presença de cobre na liga afeta negativamente a sua resistência a corrosão, pois o cobre tem tendência a se depositar nos contornos de grão, tornando o metal muito susceptível a corrosão por pite, intergranular e sob tensão (GIRISHA; SHARMA, 2012).

As ligas contendo Cu e Mg são trabalhadas e reforçadas por meio de endurecimento por precipitação ou envelhecimento, produzindo os precipitados através de um tratamento térmico e cujas partículas constituintes mais comuns são Al_2Cu ou Al_2CuMg (PASCOAL JUNIOR, 2014).

Segundo (ASM METALS HANDBOOK, Vol. 8) as ligas da série 2XXX são apropriadas para partes estruturais que requerem uma alta razão entre resistência e peso e são utilizadas na fabricação da fuselagem de aeronaves, recobrimento das asas e em partes que necessitem de boa resistência a temperaturas inferiores a 150°C.

4.1.3.2. Al-Cu-Li

As pesquisas por ligas de Al-Li se iniciaram por volta de 1920, nos Estados Unidos e, principalmente, na Alemanha. Nessa mesma década, foi desenvolvida a primeira liga comercial de Al contendo Li, cuja composição era Al-12%Zn-3%Cu-0,6%Mn-0,1%Li. No entanto, não se atingiu os resultados esperados e, como as ligas sem Li ainda se apresentavam mais eficazes, o projeto foi abandonado (PRASAD, 2014).

Mais adiante, na década de 1950, a Alcoa Corporation se notabilizou por desenvolver uma liga de alumínio de alta resistência contendo lítio. A liga em questão, denominada AA2020, era composta basicamente por Al-4,5%Cu-1,1%Li-0,5%Mn-0,2%Cd, proporcionando assim, alta resistência a elevadas temperaturas (entre 150 a 200°C). Em meados da década seguinte, a então União Soviética foi responsável pelo desenvolvimento da liga AA1420 que continha em sua composição Al-2%Li-5,5%Mg-0,1%Zr (PRASAD, 2014). Já na década de 1980 foram desenvolvidas as ligas AA2090, AA2091 e AA8090, dentre outras, denominadas segunda geração das ligas de Al-Li (PASCOAL JUNIOR, 2014).

Esse grande despertar de interesse no lítio, que durante décadas incentivou diversas pesquisas, reside no fato desse elemento ser um excelente ligante, mais leve que todos os elementos metálicos conhecidos (com densidade de 0,54 g/cm³) e de número atômico 3 e que apresenta elevada solubilidade no alumínio, ficando atrás apenas do hidrogênio e do hélio. Estudos indicam que para cada 1% de Li adicionado ao alumínio, a densidade da liga pode diminuir em até 3%, enquanto que, simultaneamente, o Li aumenta a rigidez ou o módulo de elasticidade em até 6% (FENDONI, 2009).

A liga AA2050 é uma liga da terceira geração das ligas AL-Li-Cu e sua composição química, segundo a norma SAE AMS 4413, deve obedecer às faixas impostas pela **Tabela 1** a seguir.

Tabela 1. Especificação da composição química da liga de alumínio AA 2050 (% em peso). (SAE AMS 4413).

Li	0,7 – 1,3
Cu	3,2 – 3,9
Mg	0,2 – 0,6
Ag	0,2 – 0,7
Zr	0,06 – 0,14
Mn	0,2 – 0,5
Si	0,08
Fe	0,10
Zn	0,25

Essa liga possui como principais características o melhoramento da resistência a tração, da tenacidade a fratura e, conseqüentemente, ao crescimento de trinca por fadiga, além de excelente resistência a corrosão sob tensão (HAFLEY, 2011). Além disso, a liga apresenta outras importantes características que valem ser ressaltadas, como menor densidade e maior módulo de elasticidade, quando comparadas a ligas convencionais 2XXX e 7XXX (PASCOAL JUNIOR, 2014).

A **Tabela 2** apresenta as propriedades mecânicas da liga AA2050-T84 de acordo com a norma SAE AMS 4413.

Tabela 2. Propriedades mecânicas da liga AA2050 T84. (SAE AMS 4413).

LIGA	σ_Y (MPa)	σ_u (MPa)	E (GPa)	e_T (%)	KIC (MPa*m ^{0,5})	Densidade (g/cm ³)
AA2050-T84	441,3	489,5	75,2	3	42	2,71

4.1.4. Ligas de Alumínio da Série 7XXX

Caracterizadas pela elevada resistência mecânica, alta tenacidade à fratura e boa resistência à corrosão e corrosão sob tensão (LUO, et. al. 2011), as ligas de alumínio da série 7XXX apresentam o zinco (Zn) como principal elemento de liga. Todavia, outros elementos são comumente encontrados nestas ligas, como o Magnésio (Mg), Cobre (Cu) e Cromo (Cr). Dentre as principais ligas desta série, algumas merecem destaque como a AA7075, AA7475 e AA7050.

Desenvolvida na década de 1943, a liga AA7075 é muito requisitada para componentes estruturais e veículos aeronáuticos. Contendo 0,40%Si-0,50%Fe-2%Cu-0,30%Mn-2,9%Mg-0,28%Cr-6,1%Zn-0,20%Ti em sua composição, essa liga de alumínio foi a pioneira a obter sucesso em termos de alta resistência, utilizando-se dos efeitos benéficos da adição de Cr na elevada resistência a corrosão sob tensão. Apesar do desenvolvimento de outras ligas 7XXX com melhores propriedades específicas, a AA7075 continua tendo sua importância no setor aeroespacial devido ao bom equilíbrio entre as propriedades necessárias para este tipo de aplicação (ALCOA).

Mais tarde, no final da década de 1970, a liga AA7475, com composição química 0,10%Si - 0,12%Fe - 1,9%Cu - 0,06%Mn - 2,6%Mg - 0,25%Cr - 6,2%Zn - 0,06%Ti, foi

desenvolvida com intuito de contribuir elevada resistência e boa tenacidade à fratura. Além disso, a resistência à propagação de trinca por fadiga e a resistência a corrosão da liga AA7475 é equivalente e, por vezes, superior quando comparada a liga AA7075 (ALCOA).

Por fim, a liga AA7050 é uma das ligas mais usadas na indústria aeronáutica atualmente, uma vez que possui boa combinação entre resistência mecânica, à corrosão sob tensão e tenacidade (PASCOAL JUNIOR, 2014). Desenvolvida para ser a sucessora da pioneira AA7075, a liga AA7050 possui alto teor de cobre e zinco. A diferença entre as ligas AA7050 e AA7075 está centrada no elemento inibidor de recristalização. Na AA7075, o elemento de liga adicionado é o cromo, enquanto que na AA7050 adiciona-se zircônio (KAI, 2009). A **Tabela 3**, de acordo com a norma SAE AMS 4050H, apresenta a composição química da liga AA7050.

Tabela 3. Especificação da composição química da liga de alumínio AA7050 (% em peso). (SAE AMS 4050H).

Si	0,12
Fe	0,15
Cu	2,0 - 2,6
Mn	0,10
Mg	1,9 – 2,6
Cr	0,04
Zn	5,7 – 6,7
Ti	0,06
Zr	0,08 - 0,15
Outros	0,15

Como mencionado anteriormente, a liga 7050 é amplamente empregada na indústria aeronáutica devido a elevada resistência mecânica e boa resistência a corrosão. Tais propriedades são efeito direto do alto teor de cobre, da distribuição espacial e do tamanho dos precipitados. A **Tabela 4** apresenta as propriedades mecânicas da liga AA7050-T7451 (SAE AMS 4050H), além do valor de tenacidade à fratura, no qual o elevado valor é resultado da fração de volume controlado de partículas intermetálicas grosseiras e estrutura de grão não

cristalizado. Outro fator que contribui para a melhoria da tenacidade é o alto teor de zinco e baixo conteúdo de cobre (PASCOAL JUNIOR, 2014).

Tabela 4. Propriedades mecânicas das ligas AA7050-T84. (SAE AMS 4050H).

LIGA	σ_Y (MPa)	σ_u (MPa)	E (GPa)	e_T (%)	KIC (MPa*m ^{0,5})	Densidade (g/cm ³)
AA7050-T7451	448,2	517,1	71	9	31	2,77

4.2. Friction Stir Welding

A soldagem por fricção e mistura (“*friction stir welding*” – FSW), desenvolvida e patenteada pelo Instituto de Soldagem do Reino Unido (“*The Welding Institute*” – TWI) na década de 1991, é uma técnica de união no estado sólido que foi inicialmente aplicada para ligas de alumínio endurecíveis por precipitação, como os da série 2XXX e 7XXX, devido aos problemas que estas ligas apresentavam quando submetidas a soldagem por fusão, tal como a formação de porosidade e/ou trincas de solidificação associadas à composição química das mesmas (GUPTA, 2013).

4.2.1. Princípio de Operação

O conceito básico deste tipo de soldagem é extremamente simples. Inicialmente, para efetuar uma solda FSW em juntas de topo ou sobreposta. As partes a serem unidas devem estar fixadas em um dispositivo de apoio, a fim de evitar que as faces da junta, ao serem forçadas, se separem. Em seguida, uma ferramenta rotacional não consumível e de elevada resistência mecânica, com geometria de pino e ombro especialmente desenvolvida, penetra lentamente na linha da junta, realizando um furo. No momento em que o pino da ferramenta rotativa entra em contato com a superfície do material, este é rapidamente aquecido no ponto de contato, diminuindo sua resistência mecânica. Aplica-se, então, uma força compressiva no pino, fazendo-o forjar e extrudar o material, até que o ombro do pino esteja em total contato com a superfície do corpo de prova. Dessa forma, o calor gerado pelo atrito da ferramenta produz metal plastificado nas regiões de contato metal-ombro e metal-pino. Com o movimento do pino contra a peça de trabalho, o material plastificado é comprimido pela parte frontal do perfil e transportado para a linha de arraste do pino, sendo forjado pelo contato do perfil do pino e do ombro da ferramenta. Consequentemente, como a ferramenta caminha na junta o ombro

aquece, as bordas das faces da junta antecipando-se ao pino e transformando o material em um estado plástico maleável antes da soldagem. Na soldagem de ligas de alumínio, a ferramenta irá comprimir a região da junta quebrando o filme de óxido, além de misturar e recombinar o material no lado anterior, onde o material forma um cordão de solda no estado sólido, abaixo do ponto de fusão da liga (MISHRA; MAHONEY, 2007; DAWES et. al., 1996; PAIVA, 2009). A **Figura 1** apresenta a união de duas chapas pelo processo FSW.

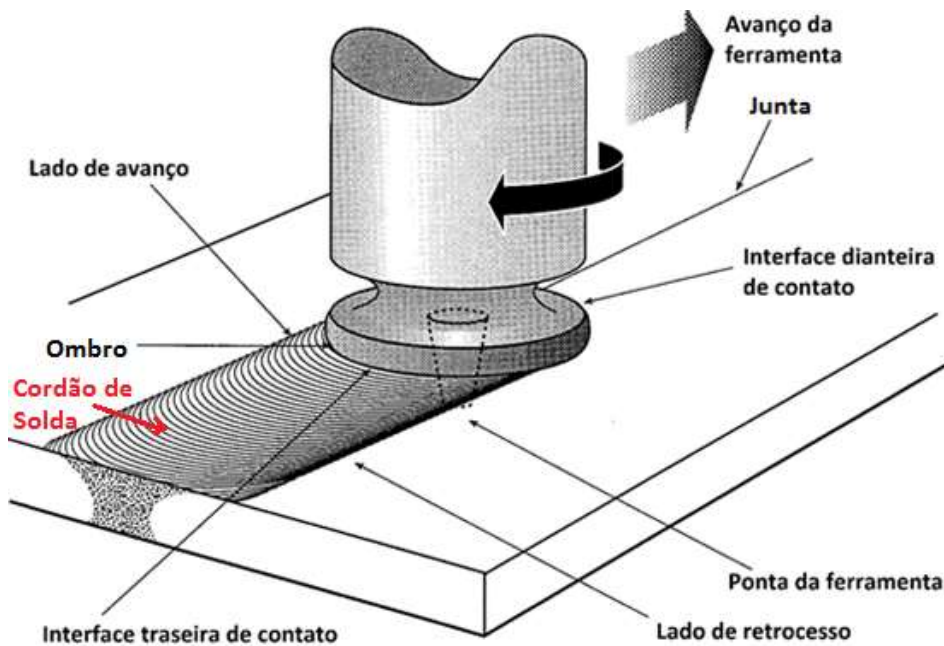


Figura 1. Ilustração do processo *friction stir welding*. (THOMAS, 1997). Adaptado.

4.2.2. Vantagens e desvantagens do processo.

Como em todos os outros processos de união, a soldagem por fricção e mistura também possui suas vantagens e limitações, como será detalhado a seguir.

4.2.2.1. Vantagens

Basicamente, as vantagens encontradas na soldagem FSW estão relacionadas ao fato da união ocorrer no estado sólido, ou seja, sem atingir a temperatura de fusão dos metais envolvidos no processo.

Como já mencionado, a soldagem FSW possui como característica importante a facilidade para soldar materiais que são difíceis de unir através dos processos convencionais por fusão, como as ligas de alumínio aeronáuticas das séries 2XXX e 7XXX, além de juntas dissimilares, eliminando eventuais porosidades, trincas de solidificação e perda de elementos (PETERS, 2006; Mc KEOWN, 2002; THREADGILL et. al., 2009).

Outras características significativas do processo são a baixa distorção apresentada mesmo em longos comprimentos de solda (BRIDE et. al. 2006), além de excelentes propriedades mecânicas, como mostrado por (JOHNSON; THREADGILL, 2003; THOMAS, 1998; THOMAS; NICHOLAS, 1996) em testes de fadiga, tração e dobramento.

A união por fricção e mistura pode ser realizada a partir de equipamentos próprios para este tipo de soldagem ou, ainda, utilizar de fresadoras ou outras máquinas ferramenta que estejam adaptadas para este fim. Atualmente, o processo já está adequado para ser mecanizado e automatizado empregando, inclusive, a utilização de robôs, sendo a intervenção manual raramente necessária (SMITH; HINRICHS; CRUSAN, 2003; THREADGILL et. al., 2009).

Por ser um processo que não utiliza arco elétrico, a soldagem FSW não produz fumos prejudiciais, não emite radiações eletromagnéticas nocivas e não produz respingos de metal líquido, preservando a saúde e integridade do operador/soldador. Além disso, produz uma solda com um ótimo acabamento, não requer preparação de chanfro, não produz escória e emprega uma ferramenta praticamente não-consumível, visto que não é necessário a utilização de metais de adição, pois a solda se forma da mistura do próprio material (THREADGILL et. al., 2009).

Quanto a economia, sabe-se, atualmente, que a soldagem FSW reduz drasticamente os custos de preparação de solda, dos requisitos de soldador qualificado e taxas de reparo. No entanto, a análise do consumo de energia eficiente depende do tamanho da máquina a ser usada em relação ao tamanho da soldagem que está sendo realizada. Dessa forma, o processo é considerado economicamente favorável, embora ainda haja muita pesquisa a ser realizada nesta área (THREADGILL et. al., 2009).

4.2.2.2. Desvantagens

Todavia, o processo de soldagem por fricção e mistura também apresenta desvantagens em relação a sua utilização. Algumas vantagens citadas anteriormente podem ser entendidas

como limitações em certas circunstâncias. O fato do processo utilizar a mistura dos próprios materiais a serem soldados impossibilita, por exemplo, a solda de juntas em ângulo ou filetes, uma vez que nestes tipos de união faz-se necessário a utilização de um metal de adição.

Outro ponto importante a se destacar negativamente resulta da alta mecanização e automatização do processo, limitando-o onde a região de solda não é acessível ou quanto a geometrias complexas, dificultando a soldagem mecanizada e, portanto, tornando-se necessário a soldagem manual. Além disso, como já mencionado anteriormente, o processo necessita da aplicação de grandes torques implicando, assim, na utilização de um sistema capaz de aguentar esse alto torque e manter as peças unidas. Por fim, uma última limitação encontrada é o furo deixado pela ferramenta ao final do cordão de solda, fato que vem gerando interesse para novas pesquisas com alguns resultados satisfatórios (THREADGILL et. al., 2009).

4.2.3. Aplicações

Atualmente, de acordo com a literatura, o processo FSW já se encontra presente em diversos setores industriais, sendo os principais as indústrias naval, a automobilística e a aeronáutica, como será visto mais adiante. Primeiramente, vale a pena ressaltar que a soldagem por fricção e mistura não restringe a liga de alumínio quanto a sua temperatura de utilização, com aplicações que vão desde as temperaturas criogênicas (como tanques de combustíveis de oxigênio e/ou hidrogênio líquido presente nos foguetes) até temperaturas relativamente elevadas (como trocadores de calor em sistemas de aquecimento) (THREADGILL et. al., 2009).

Acredita-se que a primeira aplicação comercial da soldagem FSW foi a união de liga extrudadas da série 6XXX para utilização em instalações de navios pesqueiros. Atualmente a soldagem FSW tem sido amplamente utilizada em superestruturas de alumínio em navios de cruzeiro, como o “*Seven Seas Navigator*” e o “*Ogasawara*”, ambos contendo uma grande quantidade de quilômetros soldados (THREADGILL et. al., 2009).

Na indústria aeronáutica, a grande maioria dos fabricantes de estruturas estão investigando o uso de FSW (comparado a outros processos de soldagem, como soldagem a laser) para a substituição dos rebites. A primeira aeronave a fazer uso extensivo de FSW na sua estrutura foi a Eclipse 500 da empresa “*ONE Aviation*”, desde que recebeu a aprovação da *Federal Aviation Administration* (FAA) em 2002. Nessas aeronaves, foram substituídos mais

de 7300 elementos de fixação (aproximadamente 60% do total) por aproximadamente 128 m de solda FSW (CHRISTNER; MCCOURY; HIGGINS, 2003).

A NASA, em conjunto com a *Lockheed-Martin*, vem estudando exaustivamente a utilização de solda por fricção e mistura na união das partes de tanques de combustível externos do Ônibus Espacial (Space Shuttle). O metal utilizado nestes tanques é uma liga Al-Li 2195, conhecida pela sua alta resistência mecânica e baixa densidade comparado com outros metais (THREADGILL et. al., 2009).

As necessidades do setor automotivo, como lidar com formas complexas e de alta produção contra o baixo custo deste mercado, têm impulsionado o desenvolvimento da robótica FSW. Como na maioria dos veículos deste setor existem poucas retas aplicáveis ao processo FSW, o estudo agora tem se voltado para a soldagem a ponto por fricção (*“friction stir spot welding”*), onde a movimento linear da ferramenta é praticamente nulo. A soldagem a ponto por fricção está rapidamente ganhando aceitação como um método eficiente união de chapas de alumínio, e já está em produção, por exemplo no carro Mazda RX-8, onde é usado sobre o capô de alumínio e nas portas traseiras. Tal processo também está sendo desenvolvido para veículos blindados leves, onde a capacidade para soldar materiais de espessura em torno de 25-40mm em uma passagem está sendo explorado (THREADGILL et. al., 2009).

4.2.4. Parâmetros do Processo

De acordo Mishra e Ma, 2005, o processo de soldagem por FSW envolve os seguintes parâmetros: geometria da ferramenta, parâmetros de soldagem e o projeto da junta, definidos da seguinte maneira:

- a) A geometria da ferramenta é considerada com um dos parâmetros de maior importância dentro do processo. Inúmeras são as variações disponíveis de ferramental dentro da literatura, não sendo possível destacar uma geometria ideal para o processo. No projeto do ferramental, devem ser levadas em conta as seguintes variáveis: material da ferramenta, diâmetro do ombro, diâmetro do pino, comprimento do pino, geometria do ombro e do pino.
- b) Os parâmetros de soldagem de maior importância dentro do processo são a velocidades de rotação e avanço e o ângulo da ferramenta. Outros parâmetros que merecem destaque são a força axial da ferramenta e a penetração do ombro.

- c) O projeto da junta envolve a disposição dos perfis e chapas durante o processo de soldagem. A junta de topo é considerada a junta mais conveniente de ser soldada por FSW. As configurações de juntas que podem ser utilizadas neste processo de soldagem são mostradas na **Figura 2**.

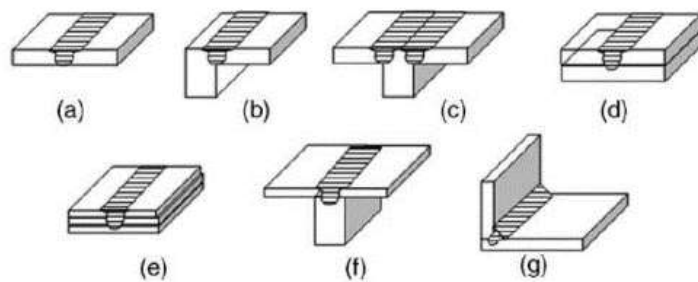


Figura 2. Geometrias de junta onde o processo FSW pode ser utilizado: (a) junta de topo, (b) junta de topo a 90°, (c) junta de topo em T tripartida, (d) junta sobreposta, (e) junta sobreposta múltipla, (f) junta de topo em T bipartida e (g) junta de topo em ângulo. (MISHRA; MA, 2005)

4.2.4.1. Geometria da Ferramenta

A geometria da ferramenta, como já mencionado, é o aspecto mais influente no desenvolvimento do processo FSW pois, desempenha um papel crítico no fluxo de material e, por sua vez, controla a velocidade de deslocamento no qual o processo pode ser conduzido (MISHRA; MA, 2005). De acordo com THOMAS et. al. (1999) a ferramenta é composta por duas partes principais, sendo elas:

- Ombro – parte que entra em contato íntimo com a superfície das peças a serem unidas, por meio da ação de uma força de contato, responsável pela geração de calor através de atrito, que plastifica o material das peças. Além disso, atua no sentido de impedir a expulsão do material plastificado da região da solda, impedindo a formação de defeitos conhecidos como “vazios”.
- Pino – parte que se interpõe às peças, por quase toda a espessura de soldagem, que tem a função de trabalhar mecanicamente o material plastificado das peças base, levando-o para trás e para baixo da ferramenta, conforme esta é transladada. O diâmetro do pino é da mesma ordem da espessura da peça a ser soldada, enquanto seu comprimento é cerca de 3 a 5 décimos menor (para soldas com penetração total). A **Figura 3** apresenta as regiões do ombro e do pino.



Figura 3. Ferramenta com destaque para as regiões do pino e do ombro (CAPELARI, 2006).

Adaptado.

De acordo com Mishra e Ma (2005) a geometria do ombro assume um papel extremamente importante no aquecimento e confinamento do volume de material aquecido e pode ser plana, côncava ou convexa, lisa ou estriada. Em relação às planas, as bases côncavas, cuja concavidade é relativa a um pequeno ângulo entre periferia da base e o pino, permitem maior confinamento de material aquecido, atuando como escape ou reservatório do material base ejetado pelo pino. As bases estriadas usualmente consistem numa superfície plana caracterizada por conter estrias concêntricas, ou em espiral, direcionadas desde a extremidade até ao centro. As referidas estrias encaminham o material desde a periferia da base até ao pino, eliminando assim a necessidade de um ângulo de ataque da ferramenta (FULLER, 2007; KHALED, 2005).

Já o pino pode ser cilíndrico ou cônico, liso ou roscado de extremidade plana ou convexa. Comparado aos pinos cilíndricos, os cônicos estão sujeitos a menores esforços transversais e a base do cone recebe o maior momento de carga, justamente onde o pino apresenta a maior resistência. Assim, os pinos cônicos permitem a soldagem de maiores espessuras a velocidades superiores. A presença de rosca na superfície dos pinos aumenta o transporte vertical do material. Quanto às extremidades do pino, as planas possuem em relação às convexas maiores velocidades superficiais, que junto com o atrito existente entre o pino e o material realizam a deformação. Dessa forma, os pinos que possuem base plana têm maior capacidade em afetar o material. Todavia, bases convexas estão associadas a menor desgaste da ferramenta e à obtenção de soldagem com melhor qualidade da raiz (FULLER, 2007; KHALED, 2005).

Outro aspecto influente do processo FSW no projeto do ferramental é o material no qual é produzido. De acordo com Hiller (2007) o material da ferramenta deve apresentar resistência térmica e mecânica maior que o metal base e não deve contribuir com o processo sob o ponto de vista da adição de material. Além disso, a ferramenta deve, idealmente, possuir um longo período de utilização enquanto que o material deve possuir resistência à abrasão a elevadas temperaturas, e aliar dureza e resistência mecânica para que não deformem nem rompam por fratura sob as condições de operação. Outro requisito do material da ferramenta é de que deva, no mínimo, ser menos condutor que o material da peça base.

Por fim, ombro e pino podem ser fabricados em materiais distintos, uma vez que, como já visto, eles apresentam diferentes funções. Entretanto, neste caso deve-se ter cuidado no projeto da ferramenta, com relação a ao processo de expansão térmica. Na soldagem FSW de ligas não ferrosas, têm sido usados comumente aços ferramenta para trabalho a quente como o aço AISI H13 (THREADGILL; NUNN, 2003).

4.2.4.2. Parâmetros de Soldagem

Dentre os parâmetros citados, a velocidade de rotação está estritamente relacionada à geração de calor durante o processo de soldagem. Quanto maior a velocidade de rotação, maior será a temperatura atingida no processo devido ao aumento do aquecimento por fricção. A rotação da ferramenta resulta na agitação e mistura do material ao redor do pino (MISHRA E MA, 2005). Já a velocidade de avanço ou de soldagem da ferramenta [mm/min] está diretamente relacionada com o aporte de calor durante o processo. Para baixas velocidades de avanço observa-se um maior aporte de calor e temperaturas mais elevadas. Renck, 2005; Gharacheh et. al., 2006 e Hirata et. al., 2007 demonstraram, em suas pesquisas, que a variação da velocidade de avanço implica consideravelmente nas propriedades mecânicas, microestruturais, no tamanho de grão e no tamanho e forma da região forjada.

A inclinação da ferramenta também é um importante parâmetro a ser considerado no processo, pois o ângulo, além de auxiliar na consolidação do material plastificado após a passagem da ferramenta devido a maior pressão existente nesta região, também auxilia na movimentação do material ao redor do pino (CAPELARI, 2006). Chen et. al. (2006), em seu estudo sobre o comportamento da liga AA5456 unida por FSW, observou que para um ângulo de inclinação da ferramenta muito pequeno ($\alpha=1^\circ$), a solda não será consolidada e será ocasionado

um defeito superficial como mostrado na **Figura 4 (a)**. Já para um ângulo no valor crítico de $1,5^\circ$ não serão observados defeitos superficiais, porém analisando a seção transversal observa-se o aparecimento de um vazio na superfície da solda, no lado de avanço como mostrado na **Figura 4 (b)**. Para um ângulo um pouco maior ($\alpha = 3,5^\circ$), não se observa a formação de defeitos como mostrado na **Figura 4 (c)**. Por fim, para o caso de ângulos maiores ou igual a $4,5^\circ$, aumenta-se a pressão relativa entre o ombro e a chapa, resultando na formação de grande quantidade de rebarba e falta de material plastificado para preencher as cavidades da zona central da solda, conforme a **Figura 4 (d)**.

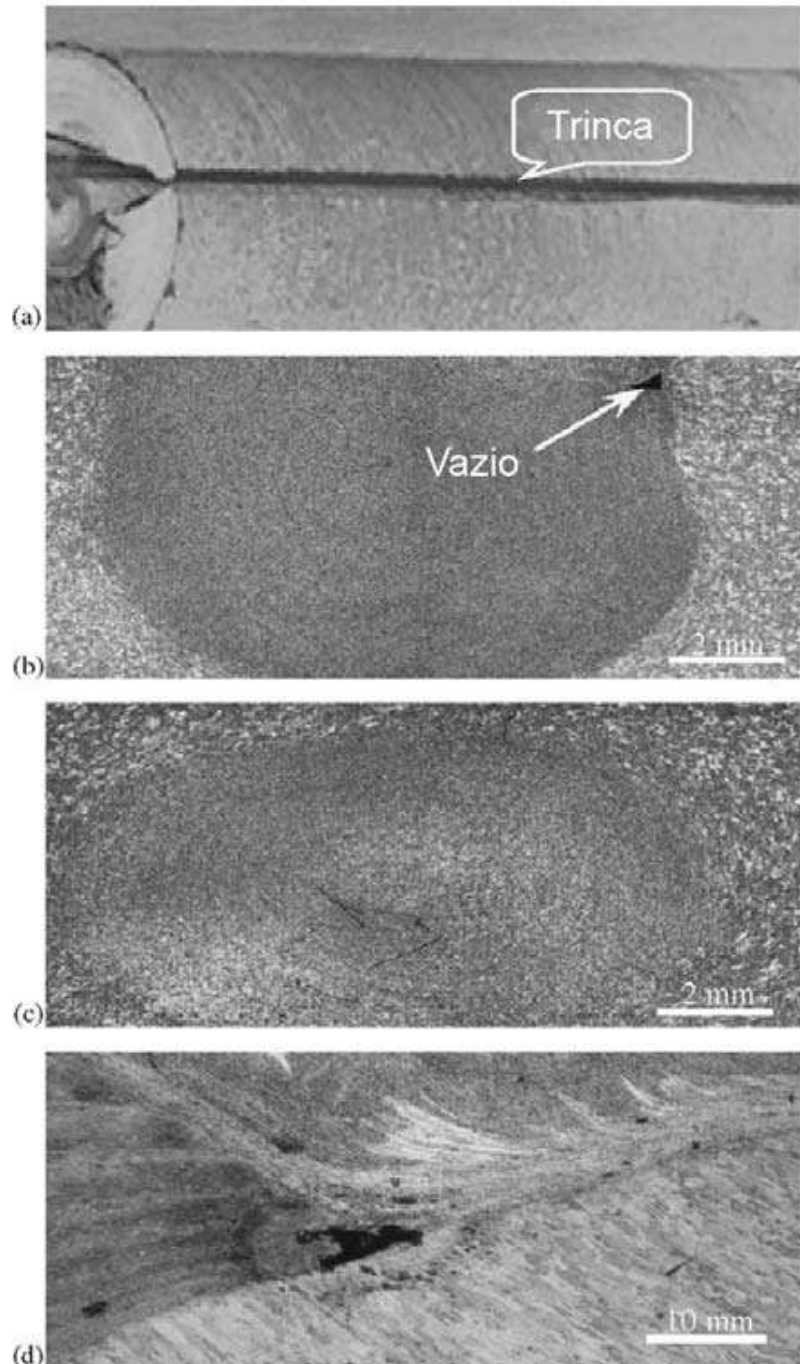


Figura 4. (a). Trinca contínua na superfície ($\alpha = 1^\circ$), (b). Defeito tipo vazio ($\alpha = 1,5^\circ$), (c). Sem defeitos aparentes ($\alpha = 3,5^\circ$), (d). Defeito tipo túnel ($\alpha > 4,5^\circ$).

A penetração da ferramenta é importante pois irá definir a pressão exercida sobre o material na parte posterior do ferramental durante a soldagem. Este parâmetro é uma função do comprimento do pino em relação ao ângulo de inclinação adotado. Quando o pino é extremamente comprido, o ombro da ferramenta e a chapa a ser soldada apresentam pouco

contato, fazendo com que a temperatura de soldagem e a pressão na parte posterior do ombro sobre a chapa diminua, resultando, na maioria das vezes, em soldas defeituosas, uma vez que a fricção entre o ombro e a chapa é a principal fonte de calor para a solda (ZHU; CHAO, 2004). A dimensão ideal do pino é aquela que, como já dito, evita o contato com o suporte de fixação abaixo da chapa e, para um dado ângulo de inclinação, permite uma pressão suficiente do ombro sobre a chapa resultando em uma solda com penetração total (CAPELARI, 2006).

Por último, a força axial é um parâmetro que exerce influência na geração de calor durante o processo e na formação de uma solda sem defeitos. Segundo Kim et. al. (2006), a força axial está intimamente ligada as velocidades de rotação e avanço. Dessa forma, para cada força axial exercida, existe uma velocidade de rotação e avanço apropriadas que resultam em uma solda livre de defeitos. Outro ponto importante destacado por Kim et. al. (2006) é que quanto maior a força axial aplicada, maior é o intervalo de condições próprias para uma junta FSW livre de defeitos. Contudo, uma força axial alta também irá resultar em uma maior quantidade de rebaras. As **Figuras 5 e 6** ilustram os resultados citados anteriormente.

FSW, ADC12, 4 mm de espessura, 1500rpm-250mm/min		
Força axial (kN)	Microestrutura	Final
6.9		
9.3		
11.8		
14.2		

Figura 5. Efeito da força axial na formação da solda em ADC12 fundido (Al-Si-Cu) (KIM et. al., 2006).

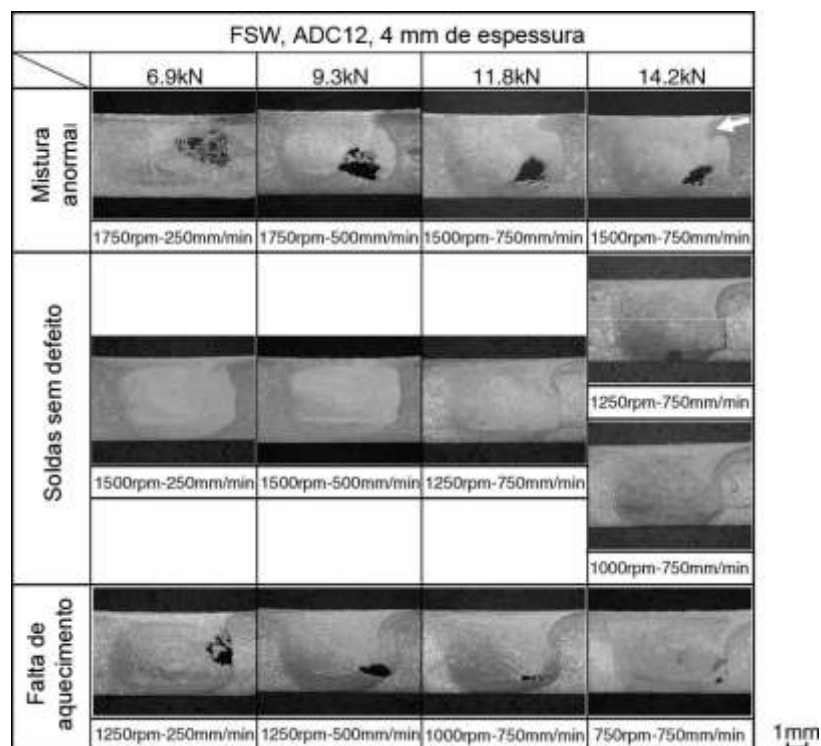


Figura 6. Diferentes seções transversais decorrentes dos parâmetros utilizados (KIM et. al., 2006).

4.2.5. Características macroscópicas da região da solda

4.2.5.1. Definição das zonas macroscópicas da solda

Três zonas com características microestruturais distintas podem ser encontradas após a soldagem FSW: zona termicamente afetada (ZTA), zona termomecânica afetada (ZTMA) e o centro da solda ou *cordão de solda*. Tais zonas se formam devido a deformação plástica intensa causada pela rotação da ferramenta e devido a exposição do material a altas temperaturas, resultando na recristalização do material e no desenvolvimento de uma textura característica no centro da solda, além da dissolução de precipitados com crescimento de grão no centro e nas adjacências da solda (MISHRA; MA, 2005). A **Figura 7** exemplifica as regiões formadas durante a FSW.

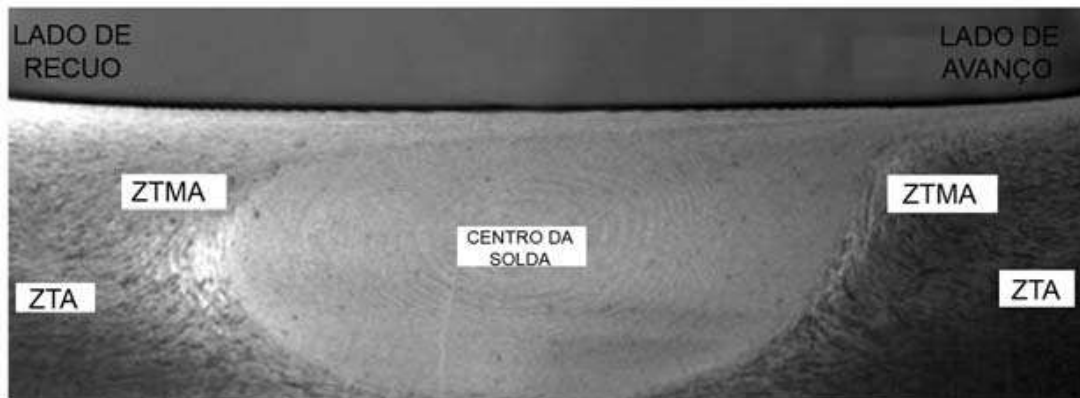


Figura 7. Zonas formadas durante a FSW: centro da solda ou “*stir zone*”, zona termomecânica afetada (ZTMA) e zona termicamente afetada (ZTA). (MISHRA; MA, 2005).

O cordão de solda ou zona central da solda é a área recristalizada (ROLDO, 2004), na qual o material foi submetido a altas temperaturas devido ao calor gerado pela fricção da ferramenta e sofreu intensa deformação plástica, resultando em uma microestrutura de grãos refinados (MISHRA; MA, 2005). Já a zona termomecânica afetada também sofre influência tanto do calor gerado pela fricção quanto da deformação plástica realizada pela ferramenta (ROLDO, 2004). Entretanto, o calor gerado pela ferramenta nesta zona é superior ao encontrado no centro da solda, ultrapassando a temperatura de recristalização do material e formando precipitados em solução sólida (JÚNIOR, 2003). Por fim, a zona termicamente afetada não sofre deformações plásticas, experimentando, apenas, o ciclo térmico que modifica sua microestrutura e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas (ROLDO, 2004).

4.2.6. Características microestruturais e perfis de dureza

Em todo o processo de união, as propriedades e o desempenho da solda são definidas pela sua microestrutura, que por sua vez, é determinada pelo ciclo térmico do processo de soldagem, o qual pode ser modificado alterando-se os parâmetros de soldagem. Dessa forma, os parâmetros de soldagem devem ser determinados de modo que se obtenha a microestrutura mais próxima da desejável, além de uma solda livre de defeitos ou outras características indesejáveis (THREADGILL et. al., 2009).

Em seus estudos, Cai et. al. (2015), caracterizaram a microestrutura de uma liga de alumínio 2060-T8 unida pelo processo FSW. Os parâmetros utilizados na soldagem foram a velocidade de rotação de 2400 rpm (rotações por minuto) e avanço de 100 mm/min, além de um sistema

de arrefecimento à água. A **Figura 8 (a)** apresenta uma micrografia óptica tridimensional, e a **Figura 8 (b)** mostra o mapa por meio da técnica de difração de elétrons retroespalhados (EBSD – “*electron backscatter diffraction*”) do material de base no plano perpendicular à direção de laminação. O metal de base consiste de grãos finos e alongados ao longo da direção de laminação. A proporção de recristalização é muito baixa.

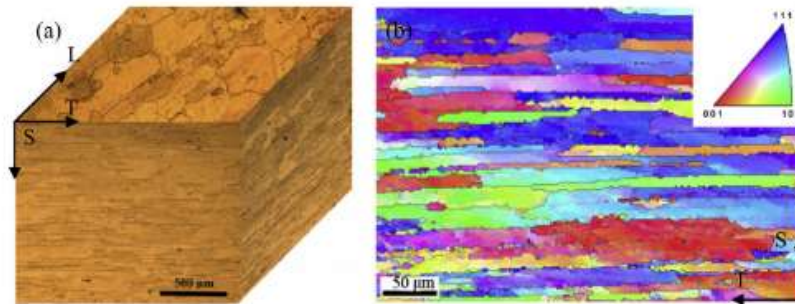


Figura 8. Morfologia dos grãos do material de base (a) micrografia óptica tridimensional e (b) mapa EBSD (CAI et. al., 2005).

A **Figura 9** mostra uma visão microscópica da junta soldada, na qual não se observou nenhum tipo de porosidade. Além disso, como já visto, a **Figura 9** identifica as três principais zonas encontradas após a soldagem por fricção e mistura, sendo o centro da solda, a zona termomecânicamente afetada (ZTMA) e a zona termicamente afetada (ZTA). A zona termicamente afetada apresenta uma morfologia de grãos semelhante à do material base. O centro da solda apresenta uma forma assimétrica do tipo “bacia”. A interface entre o centro da solda e a zona termomecânicamente afetada se mostra mais definida no lado de avanço quando comparada ao lado de retrocesso demonstrando, assim, assimetria durante o processo de soldagem (CAI et. al., 2015).

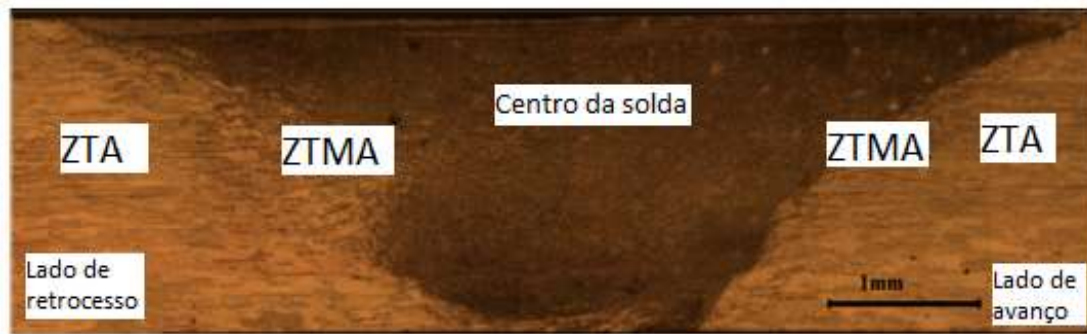


Figura 9. Visão microscópica mostrando a secção transversal da junta soldada (CAI et. al., 2005).

A **Figura 10** mostra o mapeamento EBSD da morfologia dos grãos do centro da solda. Foram observados grãos finos recristalizados, com uma média de tamanho de grão de aproximadamente 2,3 μm . A recristalização ocorre devido ao aquecimento por fricção e do elevado fluxo plástico durante a soldagem (CAI et. al., 2015). Estudos revelam que uma elevada taxa de resfriamento pode acarretar na diminuição do tamanho do grão na região central da solda. Estruturas nanométricas foram obtidas através do arrefecimento via nitrogênio líquido (SU et. al., 2011). Entretanto, para os resultados de Cai et. al. (2015) o resfriamento a água utilizado no processo não teve grande influência quanto ao refinamento do grão, visto que o poder de resfriamento da água é consideravelmente menor ao do nitrogênio líquido.

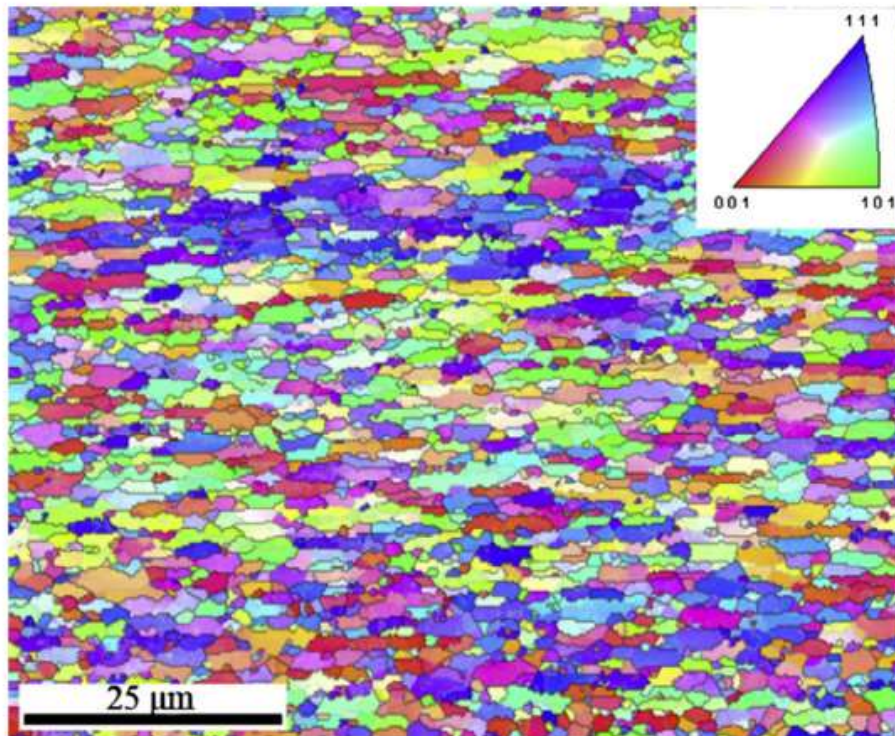


Figura 10. A estrutura apresentada pelo grão no centro da solda (CAI et. al., 2005).

A **Figura 11** mostra a região de transição entre a região do centro da solda e da zona termomecânica afetada. Nessa última região, é possível observar os grãos distorcidos devido a deformação ocasionada pelo movimento rápido da ferramenta e finos grãos próximos a região de transição para o centro da solda. Além disso, observa-se uma variação da orientação dos grãos nestes grãos distorcidos, deixando claro que houve a rotação dos grãos e, conseqüentemente, o desprendimento do contorno de grão nesta região Cai et. al. (2015).

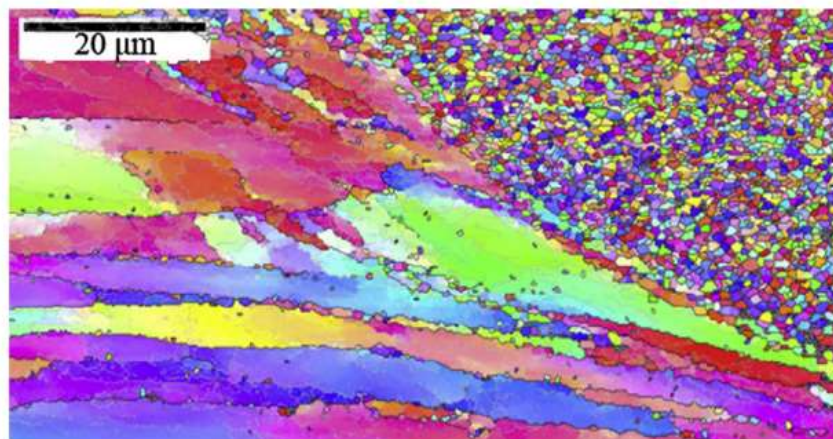


Figura 11. Região de transição entre a região do centro da solda e da zona termomecânica afetada (CAI et. al., 2005).

Su et. al. (2003), em suas pesquisas, investigaram a microestrutura de ligas de alumínio 7050-T651 unidas pelo processo FSW. Os parâmetros utilizados na soldagem foram a velocidade de rotação de 350 rpm e avanço de 15 mm/min e as chapas unidas continham 6,35 mm de espessura. A fim de facilitar o estudo da microestrutura da região termomecânica afetada, a mesma foi dividida em duas, como mostra a **Figura 12**, junto com as outras regiões já mencionadas anteriormente.

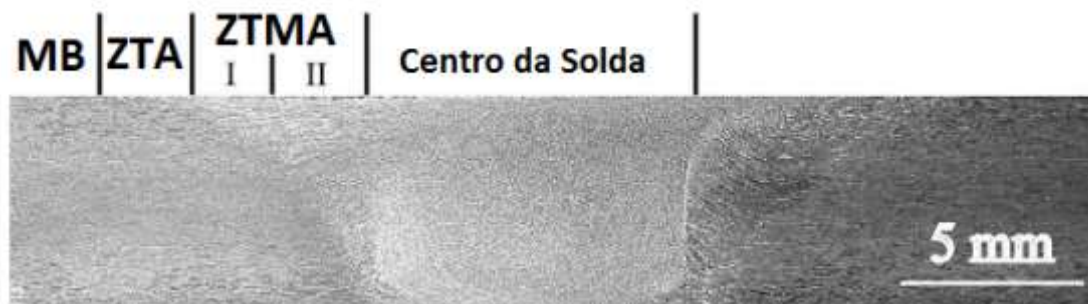


Figura 12. Identificação da região termomecânica afetada em sua nova divisão (SU et. al., 2003). Adaptado.

A **Figura 13** apresenta as imagens obtidas via microscópio eletrônico de transmissão evidenciando as microestruturas do metal base e das diversas regiões da solda.

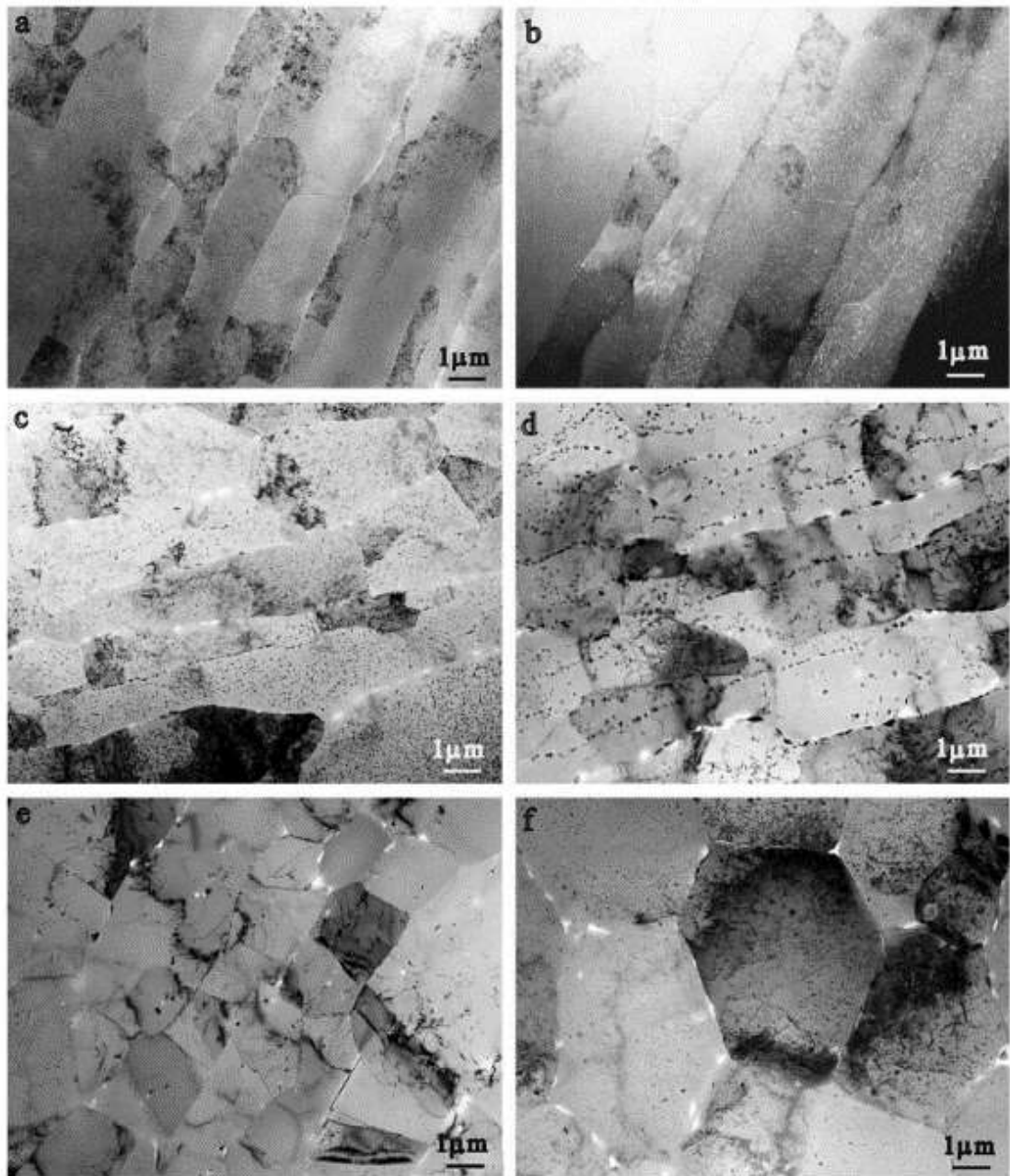


Figura 13. Microestrutura presente em diferentes regiões de solda: (a) metal base, (b) imagem de campo escuro da região (a), (c) zona termicamente afetada, (d) zona termomecânica afetada I, (e) zona termomecânica afetada II, e (f) centro da solda. (SU et. al., 2003).

A microestrutura do metal base apresenta grãos parcialmente recristalizados em forma de "panquecas" com regiões não cristalizadas contendo sub grãos de cerca de 1-5 μm (**Fig. 13 (a)**). A pequena diferença de contraste de difração entre os grãos vizinhos na imagem de campo escuro mostra a predominância das fronteiras de baixo ângulo (**Fig. 13 (b)**). A estrutura do grão na região da ZTA, que não foi perturbada mecanicamente, é semelhante à do metal de base

(**Fig. 13 (c)**). Tais grãos apresentam uma densidade relativamente baixa de deslocamento (SU et. al., 2003).

A zona termomecânica afetada situada entre o ZTA e o centro da solda, é caracterizada por uma estrutura altamente deformada. Com engrossamento dos subgrãos, os grãos alongados do metal base foram preservados na ZTMA I (**Fig. 13 (d)**). Adicionalmente, a grande maioria dos grãos na ZTMA I continha uma elevada densidade de deslocamento (**Fig. 14 (a)**). Alguns grãos com paredes de deslocamento em seu interior (**Fig. 14 (b)**) sugerem que a recuperação não foi concluída ou ocorreu de forma contínua. Da mesma forma, também foram encontrados deslocamentos presos por partículas da segunda fase (**Fig. 14 (c)**). Já a região ZTMA II é caracterizada por grãos recuperados contendo uma elevada densidade de subgrãos (**Fig. 13 (e)**). Esses subgrãos são equiaxiais, com cerca de 1 a 2 μm de tamanho, e contêm uma baixa densidade de deslocamento (**Fig. 14 (d)**). No processo de recuperação dinâmica, não houve evidência de contornos de elevados ângulos que envolvem estes subgrãos (SU et. al., 2003).

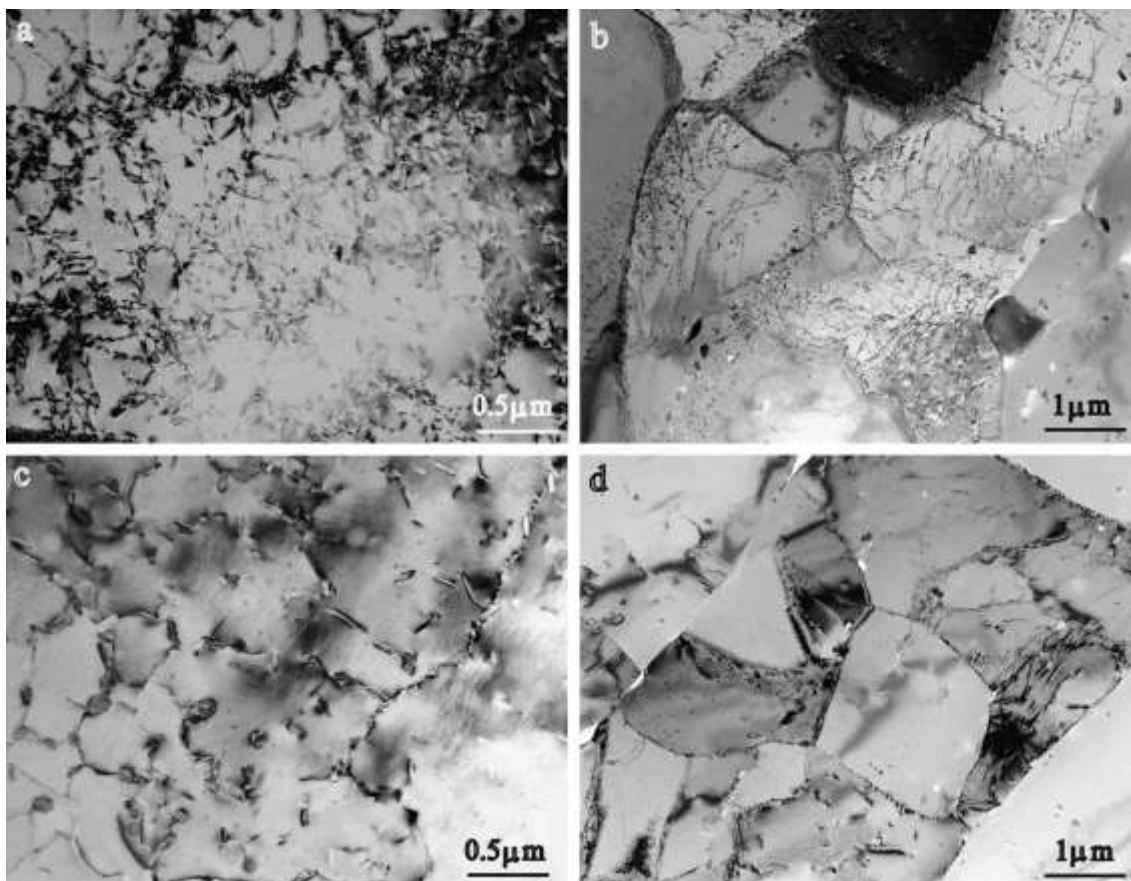


Figura 14. Estrutura de deslocamento nas regiões ZTMA I (a, b, c) e na ZTMA II (d): (a) elevada densidade de deslocamento, (b) estrutura celular de deslocamento, (c) deslocamentos presos por partículas de segunda fase, (d) estrutura recuperada. (SU et. al., 2003).

O centro da solda tem uma estrutura de grãos finos, equiaxiais e recristalizados da ordem de 1-4 μm de diâmetro (**Fig. 13 (f)**). A difração de elétrons ilustra que estes grãos são separados por contornos de ângulos elevados. Várias estruturas de deslocamento puderam ser observadas nos grãos recristalizados (**Fig. 15**). Deslocamentos helicoidais foram encontrados em alguns grãos que possuíam uma baixa densidade de deslocamento (**Fig. 15 (a)**). Provavelmente, tais estruturas podem ter sido geradas durante a têmpera que ocorreu a partir da elevada temperatura da soldagem até a temperatura ambiente. Uma elevada densidade de deslocamentos com estrutura de rede foi observada em diversos grãos (**Fig. 15 (b)**), concluindo que a deformação plástica pode ter sido introduzida por FSW após a recristalização dinâmica. Além disso, existem grãos no processo de recuperação, adjacentes a grãos que exibem uma elevada densidade de deslocamento, que contêm uma densidade de deslocamento baixa (**Fig. 15 (c)**). Outro ponto a se destacar é que na região central da solda existem grãos adjacentes com diferentes graus de

recuperação. A **Figura 15 (d)** mostra os deslocamentos de alinhamento formando as fronteiras dos subgrãos.

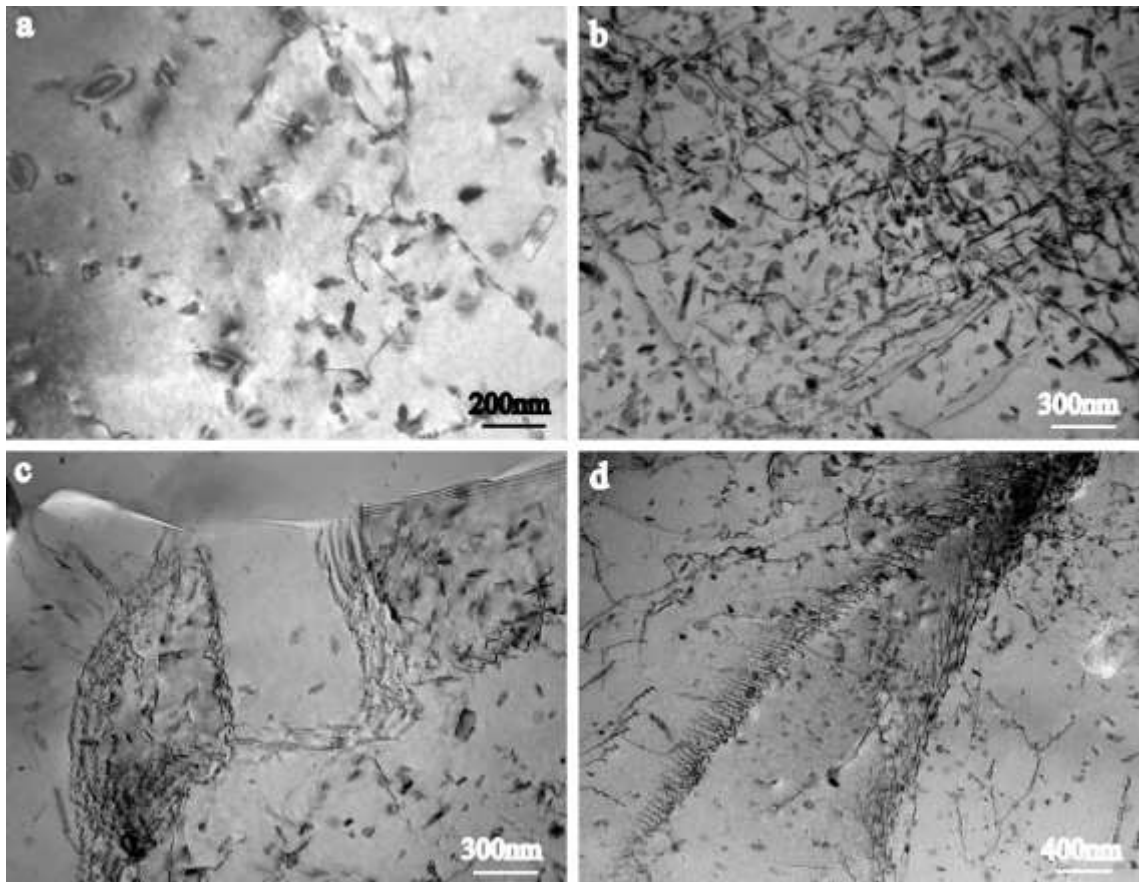


Figura 15. Estruturas de deslocamento no interior dos grãos recristalizados dinamicamente: (a) deslocamento de baixa densidade com estrutura helicoidal, (b) alta densidade de deslocamento, (c) recuperar as células que contêm uma densidade deslocamento baixo, e (d) as fases iniciais da formação subgrãos. (SU et. al., 2003).

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção será apresentado o detalhamento dos equipamentos, materiais e procedimentos utilizados para realização de soldagens pelo processo FSW em chapas de alumínio das ligas AA2050 e AA7050, com o objetivo de se investigar a influência da natureza do percurso de soldagem na consolidação e propriedades mecânicas das soldas produzidas.

5.1. Processo de Soldagem por Fricção e Mistura (FSW) de Ligas de Alumínio Aeronáuticas de Alta Resistência

5.1.1. Procedimento Geral

A soldagem por FSW nas ligas de alumínio de alta resistência foram executas no Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM) - Laboratório Nacional de Nano Tecnologia (LNNano). Foram soldadas juntas de topo com as ligas dissimilares de alumínio-lítio AA2050-T84 com alumínio AA7050-T7451.

As **Figuras 16 (a)** e **(b)** mostram o preparo do equipamento e da junta para a execução da soldagem. A **Figura 16 (a)** mostra a ferramenta feita de aço H13 em movimento realizando a soldagem por fricção e mistura (1). Em (2) está indicada a base do dispositivo feita de cerâmica, onde o material a ser soldado é apoiado e posicionado. O item (3) corresponde às grapas que são fixadas por parafusos de ajuste (4) e posicionadas entre apoios de fixação (5). Como este processo de soldagem envolve altos níveis de forças aplicadas, para evitar que a junta de topo (6) se movimente e resulte em descontinuidades, são fixadas entre as grapas apoios de alinhamento (7).

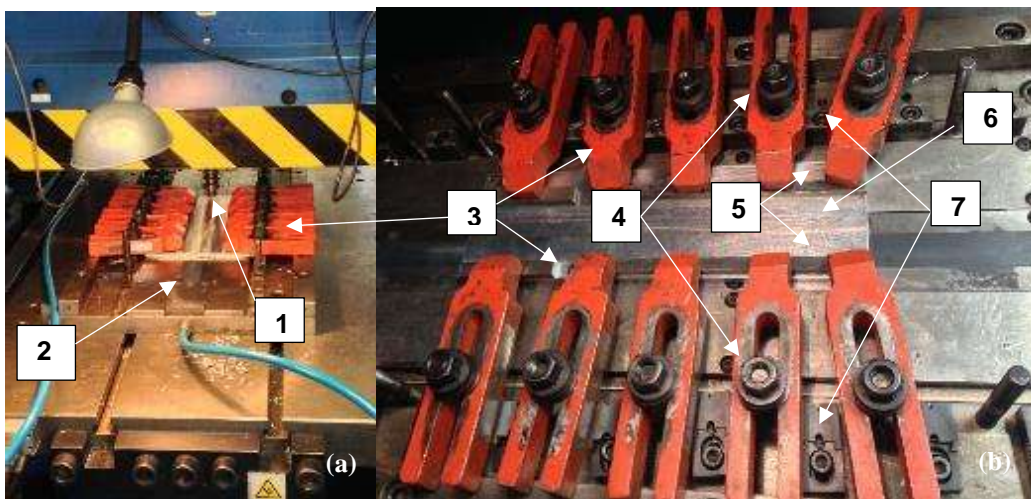


Figura 16. Preparo da junta de topo a ser soldada. (1) Ferramenta. (2) Base do dispositivo. (3) Grapas. (4) Parafusos de ajuste e fixação lateral da junta. (5) Apoios de fixação das grapas. (6) Junta de topo. (7) Apoio de alinhamento.

5.1.2. Projeto da Ferramenta FSW

A ferramenta utilizada na soldagem FSW foi projetada e fabricada com geometria de pino cônica. A **Figura 17** mostra a ferramenta fabricada para soldagem através do processo FSW.



Figura 17. Ferramenta fabricada para soldagem através do processo FSW.

As principais dimensões da geometria da ferramenta estão mostradas na **Tabela 5** abaixo. Para se atingir tais dimensões, bem como definir qual material seria utilizado na confecção do

ferramental, um estudo aprofundado da literatura tornou-se imprescindível. Todo este estudo e o projeto da ferramenta está discorrida na próxima sessão (Resultados e Discussões).

Tabela 5. Principais dimensões da geometria das ferramentas.

	Diâmetro do ombro	Diâmetro do pino	Comprimento do pino	Haste
Ferramenta	18 mm	6 mm	60 mm	(Ø34 x 94,9) mm

5.1.3. Soldagem da junta de topo das ligas dissimilares alumínio-lítio 2050-T84 e alumínio 7050-T7451

As ligas de alumínio-lítio AA2050-T84 e alumínio AA7050-T7451 foram recebidas em placas espessas de 510 x 230 x 50,8 mm e 1 m² por 25,4 mm de espessura respectivamente. Foram extraídas cinco chapas de cada material com as mesmas dimensões de comprimento e largura e também mesmo sentido de laminação (**Figura 18**), além da espessura de 6,5 mm.

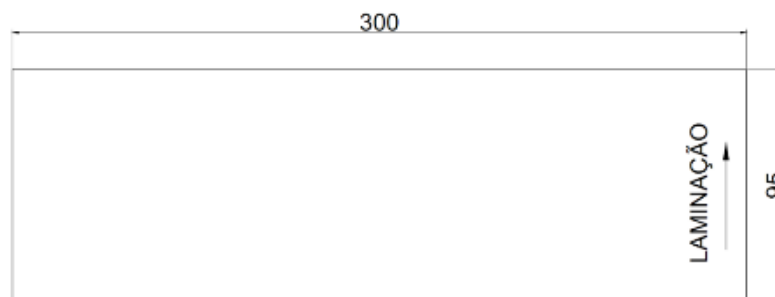


Figura 18. Geometria de dimensões das chapas utilizadas nas juntas de topo para soldagem por FSW.

Os sentidos de laminação e de retrocesso e o comprimento da solda estão indicados na **Figura 19** e a **Tabela 6** mostra as dimensões da junta soldada.

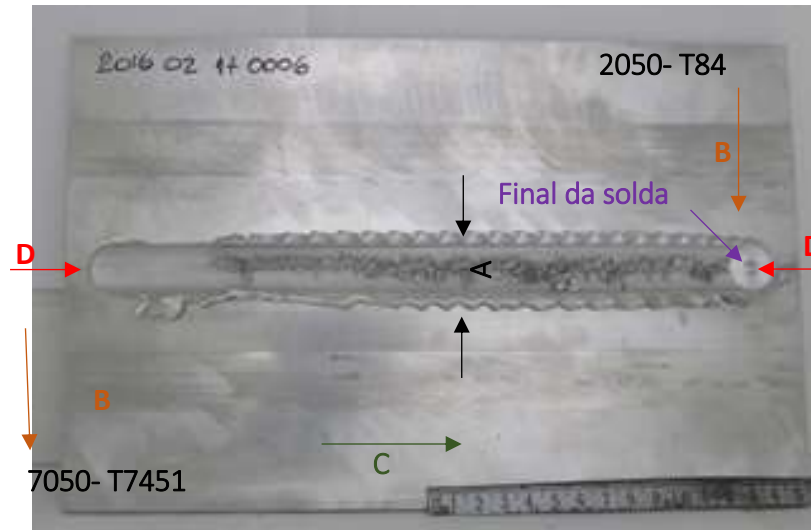


Figura 19. Junta de topo das ligas dissimilares de alumínio-lítio 2050-T84 e alumínio 7050-T7451 soldadas por FSW.

Tabela 6. Especificações da junta dissimilar soldada por FSW das ligas de alumínio-lítio 2050-T84 e 7050-T7451.

		Dimensões (mm)
A	Largura do cordão de solda	20
B	Sentido de laminação de cada chapa	LT
C	Sentido da soldagem e lado de retrocesso	7050-T7451
D	Comprimento do cordão de solda	200

Da mesma forma que para o projeto do ferramental, para atingir os parâmetros do processo, que garantiu uma junta soldada relativamente eficiente, foi realizado um estudo com base na literatura e diversos testes foram necessários. Todo este estudo, os testes e os parâmetros definidos se encontram na próxima sessão.

5.2. Caracterização microestrutural

5.2.1. Macro e Microscopia

Foram extraídas amostras da região da solda com dimensões 22,5 x 6,5 mm. Para uma macro análise da solda, com auxílio de um estereomicroscópio da marca ZEISS modelo discovery V8. Tais imagens foram feitas entre as interfaces de metal base e no cordão de solda, com o objetivo de verificar o lado de avanço e retrocesso.

Para a micrografia, as amostras foram embutidas em baquelite e preparadas de acordo com a Norma ASTM E3-11 com lixas de granulometrias 1200, 1500 e 2000 e posteriormente polidas com pasta de diamante Tipo S de 15 μ m; 3 μ m; 1 μ m e 1/4 μ m. Em seguida foram atacadas durante o tempo de 1(un) minuto, com reagente Keller diluído a 10 vezes.

Após a preparação foram feitas imagens por Microscopia Ótica (MO) com um Microscópio da marca ZEISS, modelo Scope A1 com resolução máxima de 100 vezes no Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de São Carlos.

5.2.2. Microdureza

As medidas de microdureza foram realizadas linhas na seção transversal da solda conforme as Normas ASTM E384-16 e ASTM E92-16. Foram utilizadas carga de 50gf, tempo de 15 segundos e distância entre as identações 50 μ m.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. Projeto do ferramental e determinação dos parâmetros de soldagem

Como a soldagem de ligas dissimilares por FSW é um assunto relativamente novo, ainda mais se tratando das ligas estudadas neste projeto, AA7050 e AA2050, sabe-se pouquíssimo sobre a geometria das ferramentas e os parâmetros ideais do processo. Da mesma forma que, tanto a ferramenta, quanto os parâmetros são fatores fundamentais para se obter uma solda com penetração total, bom acabamento e boa mistura. Assim, para viabilizar o projeto, fez-se necessário utilizar um longo período de tempo para a determinação desses fatores.

6.1.1. Projeto da ferramenta

Para o projeto do ferramental, foi-se em busca de informações na literatura. As características dimensionais apresentadas no projeto da geometria da ponta da ferramenta foram baseadas na espessura da chapa a ser soldada, como mencionado em diversas literaturas. O comprimento do pino deve ser pouco inferior à espessura da chapa, uma vez que apenas uma pequena região abaixo da extremidade da ponta é soldada. Além disso, o diâmetro do pino deve ser semelhante a espessura da chapa, enquanto o diâmetro do ombro da ferramenta deve corresponder, pelo menos, a três vezes o diâmetro maior do pino.

A **Tabela 7** apresenta resumidamente as relações dimensionais da ferramenta FSW com espessura da chapa para ferramenta convencional (COLLIGAN, 1999; CEDERQVIST; REYNOLDS, 2001; GUERRA, 2003; ZHAO; LIN; QU, 2005; SOUZA, 2010). O projeto dimensionado, tanto da ferramenta quanto do pino, pode ser visto nas **Figuras 20 e 21**, respectivamente, sendo que suas principais dimensões já foram apresentadas na **Tabela 5**.

Tabela 7. Relações dimensionais da ferramenta FSW com espessura da chapa para ferramenta convencional (SOUZA, 2010). Adaptado.

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

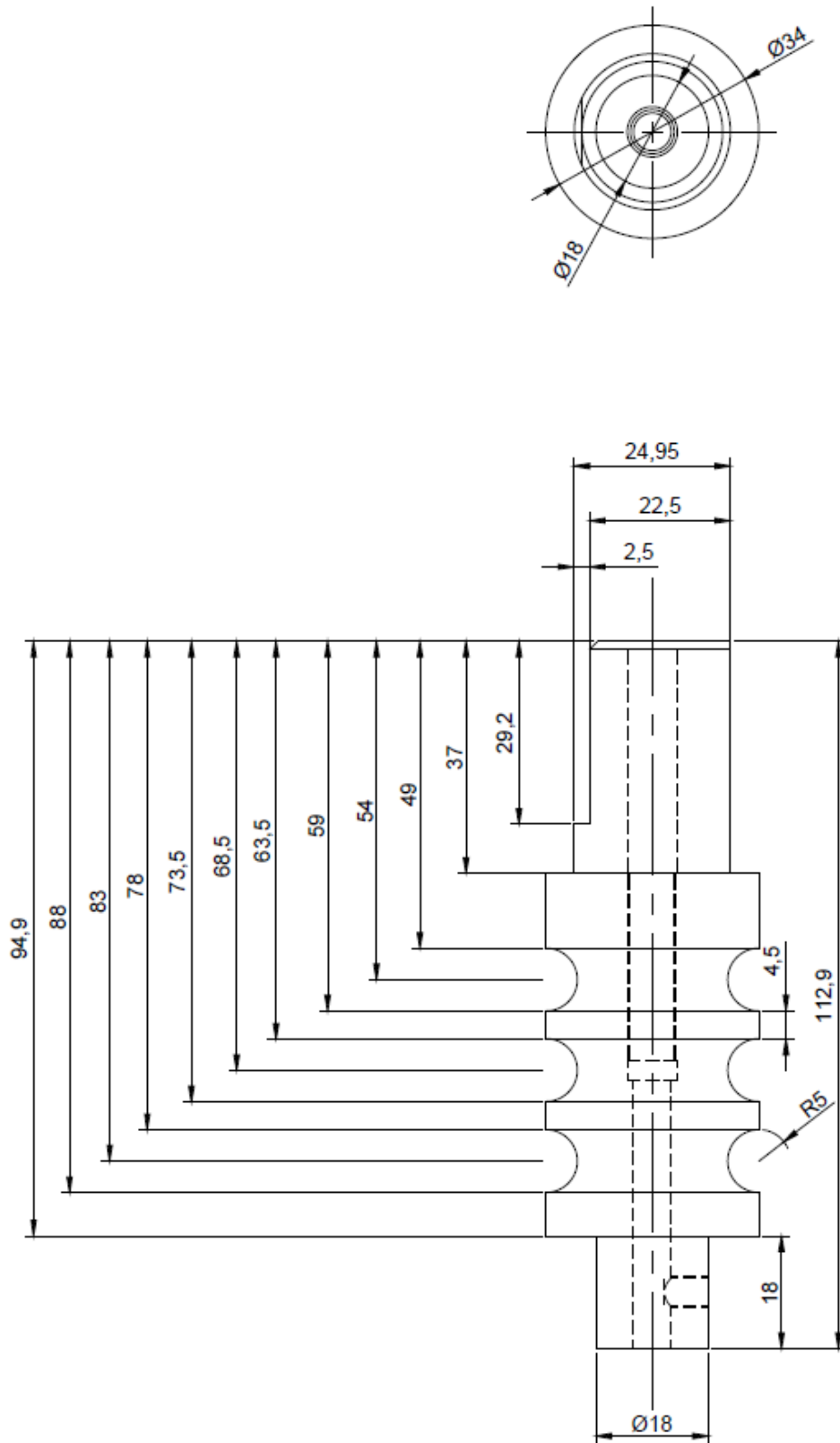


Figura 20. Projeto da ferramenta com todas as dimensões.

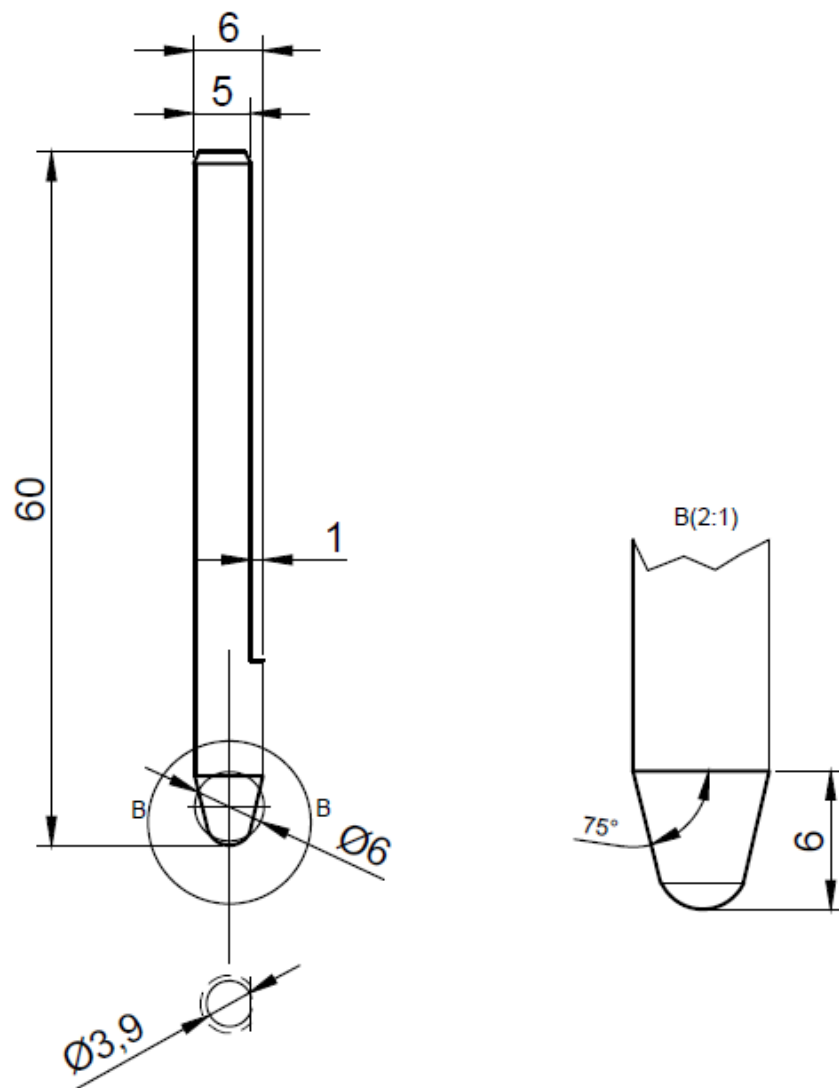


Figura 21. Projeto do pino com todas as dimensões.

Além disso, como já visto, a vida da ferramenta é uma variável importante a ser considerada durante seu projeto, pois a relação custo benefício deve considerar além do baixo desgaste, a excelente qualidade da junta soldada. Para tanto, as ferramentas utilizadas foram usinadas em aço AISI H13 temperado e revenido que segundo Matweb (2013) apresenta propriedades mecânicas adequadas para a soldagem de ligas de alumínio. Tais propriedades estão descritas na **Tabela 8** abaixo.

Tabela 8. Propriedades do aço H13 utilizado na fabricação da ferramenta para soldagem por FSW de ligas de alumínio.

Propriedades	Valores
Dureza após têmpera (HRC)	51 - 53
Módulo de Elasticidade (GPA)	210
Impacto Charpy (J) – ASTM E23	22
Abrasão – ASTM G65 (mm ³)	460

6.1.2. Determinação dos parâmetros de soldagem

Com a ferramenta pronta, o outro fator fundamental do projeto que teve que ser determinado foram os parâmetros do processo de soldagem. Da mesma forma que para a ferramenta, foi necessário estudar a literatura em busca de valores de parâmetros de soldagem das juntas similares (7050/7050 e 2050/2050) para se ter uma base preliminar para o início dos testes.

Geuser et al 2014, encontraram os seguintes parâmetros para a soldagem FSW da liga 2050: 400 rotações por minuto e velocidade de avanço de 200 mm por minuto. Já Bertoncello, 2014, em uma solda de topo das ligas dissimilares 7050/2024 com 1,3 mm de espessura cada utilizou os seguintes parâmetros: 960 mm por minuto de velocidade de avanço e 1700 rotações por minuto da ferramenta.

A partir dos parâmetros encontrados na literatura e adaptando-se a espessura das chapas deste projeto, diversos testes foram realizados nos metais base para pré-determinar os parâmetros adequados a junta estudada neste projeto. A **Figura 22** apresenta o primeiro teste realizado no metal base da liga AA7050-T84. Nota-se que, num primeiro momento, sugeriram alguns problemas com o pino ajustável da ferramenta, não sendo possível obter penetração no material.

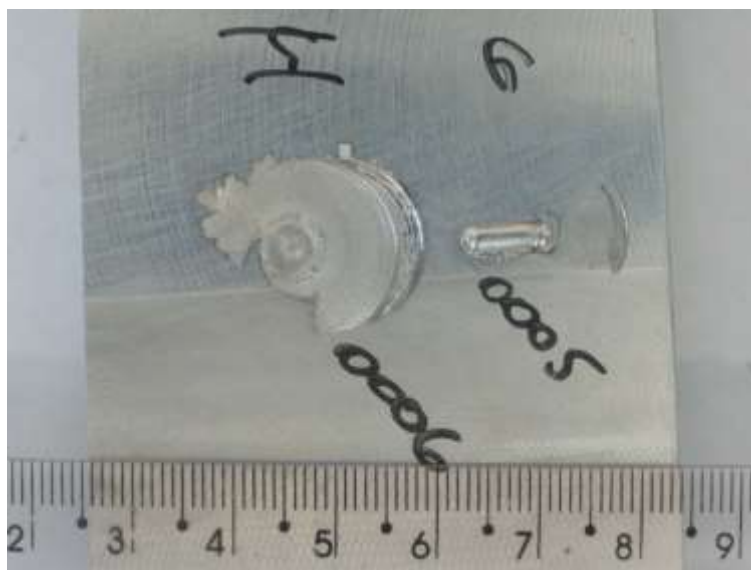


Figura 22. Testes preliminares realizados no metal base da liga 7050 para determinação dos parâmetros de soldagem, evidenciando os problemas com a penetração do pino no material.

Corrigido o ajuste do pino e acertado alguns parâmetros, novos testes no metal base da mesma liga foram realizados, dessa vez houve soldagem e a penetração, como mostra a **Figura 23**.



Figura 23. Testes preliminares realizados no metal base da liga 7050 para determinação dos parâmetros de soldagem.

Como os parâmetros previamente obtidos nos testes preliminares, foi a vez de testá-los na junta dissimilar. Como os principais testes foram realizados na liga AA7050-T84, foi determinado que essa liga seria colocada no lado do retrocesso, uma vez que este é o lado que sofre maiores tensões do processo. A **Figura 24** mostra os testes realizados na junta dissimilar.



Figura 24. Testes realizados para a determinação de parâmetros das juntas de topo das ligas de alumínio-lítio 2050-T84 com 7050-T7451 por FSW.

Para certificação de que a junta soldada estava com penetração total e como havia pouco disponibilidade de material a ser soldado, foi realizado primeiramente o ensaio não destrutivo de líquidos penetrantes (LP). A **Figura 25** mostra a chapa sendo ensaiada.

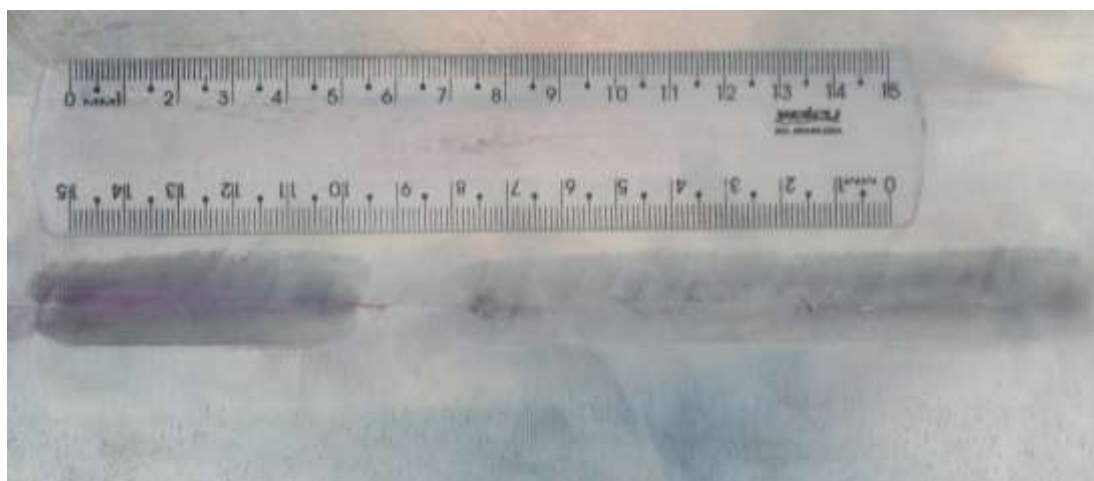


Figura 25. Verificação da penetração da solda através do ensaio não destrutivo de líquidos penetrantes.

Entretanto, apenas com o ensaio não destrutivo não foi possível verificar a efetividade da solda. É possível identificar que o LP foi revelado indicando que o processo de soldagem não foi com penetração total e resultou em falta de fusão na raiz da solda. Dessa forma, foi realizado um ensaio de dobramento cujo resultado está mostrado na **Figura 26**, que evidenciou os resultados do ensaio de LP.



Figura 26. Ensaio de dobramento para verificação da efetividade da solda.

Outros testes foram realizados, alterando os parâmetros de soldagem e o tamanho do pino da ferramenta, até que se atingisse uma boa qualidade de solda e uma penetração total. Os parâmetros em que características as características desejadas foram atingidas estão listados na **Tabela 9** e o ensaio de dobramento comprovando a efetividade da nova solda pode ser visto na **Figura 27**.

Tabela 9. Parâmetros de soldagem por FSW das ligas de alumínio aeronáuticas de alta resistência.

Itens	Material soldado
	2050-T84 com 7050-T7451
Penetração (mm)	5,95
Ângulo de Inclinação (°)	3
Velocidade de Rotação (rpm)	400
Velocidade Transversal (mm/min)	100
Força axial (KN)	20

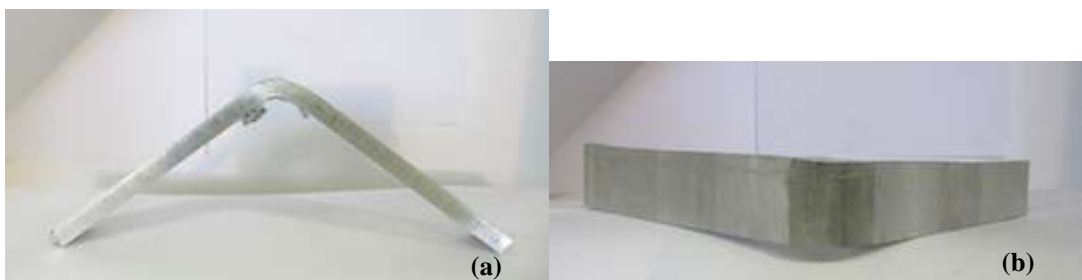


Figura 27. Teste de dobramento na junta dissimilar soldada por FSW. (a) Vista da espessura da junta. (b) Vista superior da junta ensaiada.

Além disso, outros pontos importantes para se destacar na determinação dos parâmetros atingidos, estão descritas abaixo.

Definiu-se que o processo de soldagem dessa junta seria realizado em controle de carga e penetração total. A **Figura 28** mostra um gráfico de carga aplicada durante o deslocamento da ferramenta de solda. Pode-se verificar que a carga inicial aplicada foi de aproximadamente 25KN e finalizou com 20KN. Durante a soldagem observa-se uma rápida variação da carga, **Detalhe A**, à medida que a ferramenta se desloca a carga reduz até tornar-se estável.

Essa variação de carga ocorreu a partir de aproximadamente 60mm de comprimento de solda, formando uma rebarba excessiva nas laterais e no centro do cordão de solda, como mostra o **Detalhe B** da **Figura 29**. Provavelmente esse problema foi recorrente do aumento da temperatura gerada pelo processo de soldagem associada a penetração da ferramenta. Além disso, poderia ser resolvido com a usinagem de uma superfície côncava do suporte para reduzir o volume de material expelido, melhorando a qualidade da solda (SOUZA, 2010).

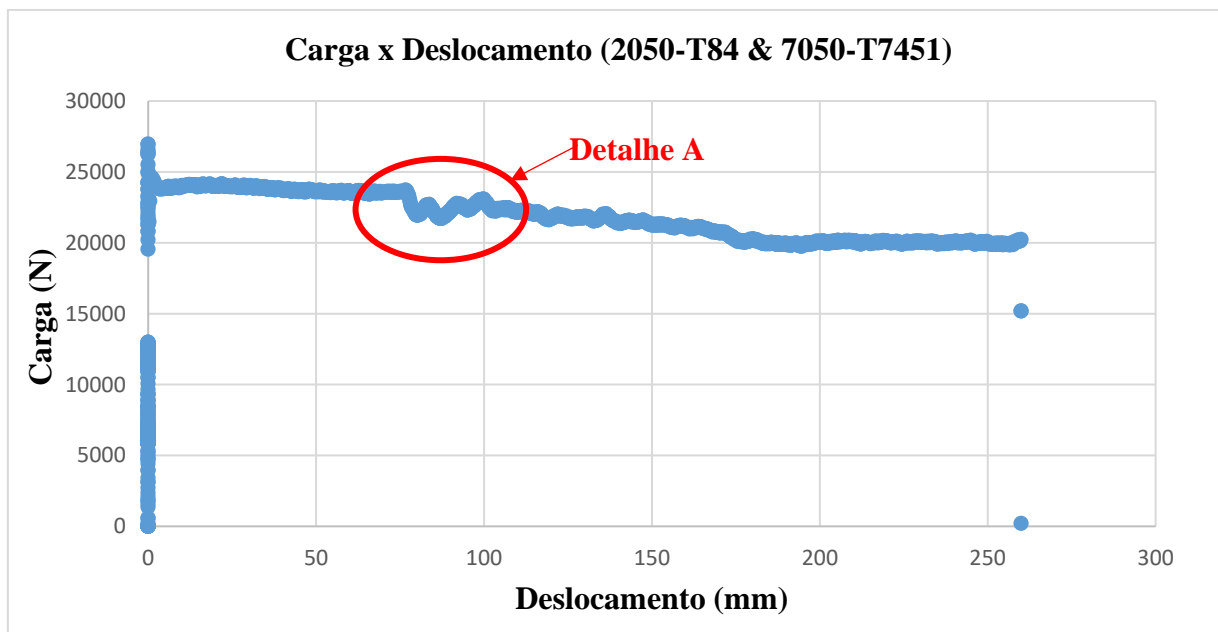


Figura 28. Gráfico de Carga x Deslocamento do processo de soldagem por FSW em uma junta dissimilar de alumínio-lítio 2050-T84 com alumínio 7050-T7451. **Detalhe A** indica momento de variação de carga durante início de formação de rebarba excessiva.

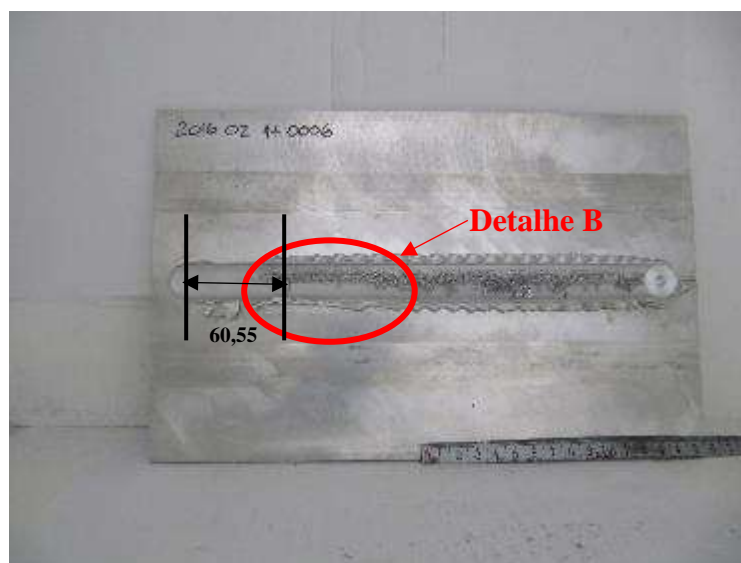


Figura 29. Junta de topo dissimilar soldada por FSW. **Detalhe B** indicando início de formação de rebarba excessiva.

6.2. Macro e Microscopia

Foram feitas imagens macrográficas do topo da junta dissimilar soldada. Na **Figura 30** estão identificadas em [1] o metal base do lado de avanço onde se encontra a liga AA2050-T784 sem alteração microestrutural, desse lado há intensa formação de rebarba devido ao fluxo

do material amolecido neste sentido, em [2] o metal base da liga AA7050-T7451 localizada no lado de retrocesso. Em [3] é observado o cordão de solda resultante de uma fusão entre os materiais.

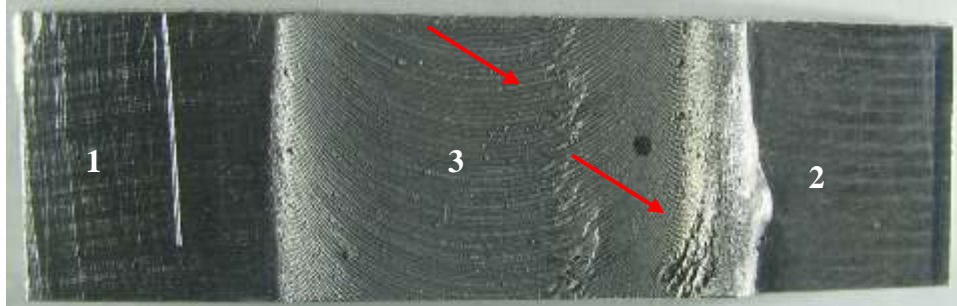


Figura 30. Imagem macroscópica do topo da solda por FSW da junta dissimilar AA2050-T84 com AA7050-T7451.

A **Figura 31** mostra uma imagem que detalha a seção transversal da junta soldada obtida por microscopia ótica. A região do cordão de solda apresenta grãos equiaxiais, homogêneos e recristalizados. Estudos feitos por Geuser et. al. (2010), de mapeamento de microestrutura da liga de AlLi AA2050 soldada por FSW evidenciaram que a formação da fase T_1 é muito sensível ao deslocamento mecânico e é facilmente encontrado na ZTMA. Entretanto para a liga AA7050 estudada por Su et. al. (2002), o cordão de solda também apresenta grãos equiaxiais finos e recristalizados.

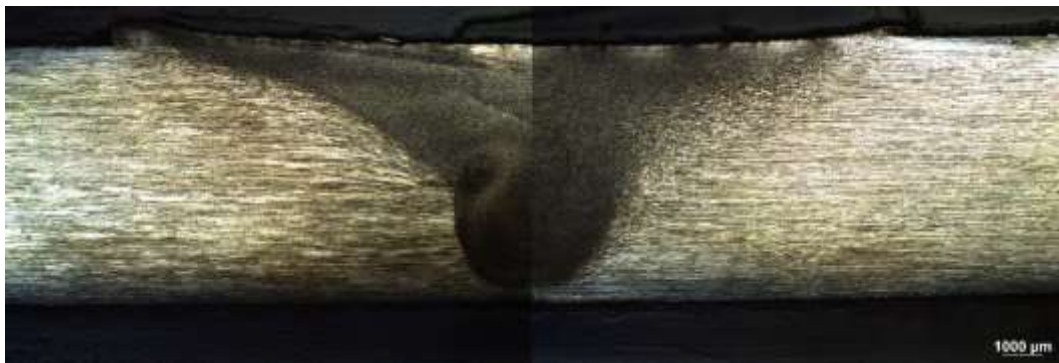


Figura 31. Imagem por microscopia ótica da seção transversal da junta de topo dissimilar soldada por FSW.

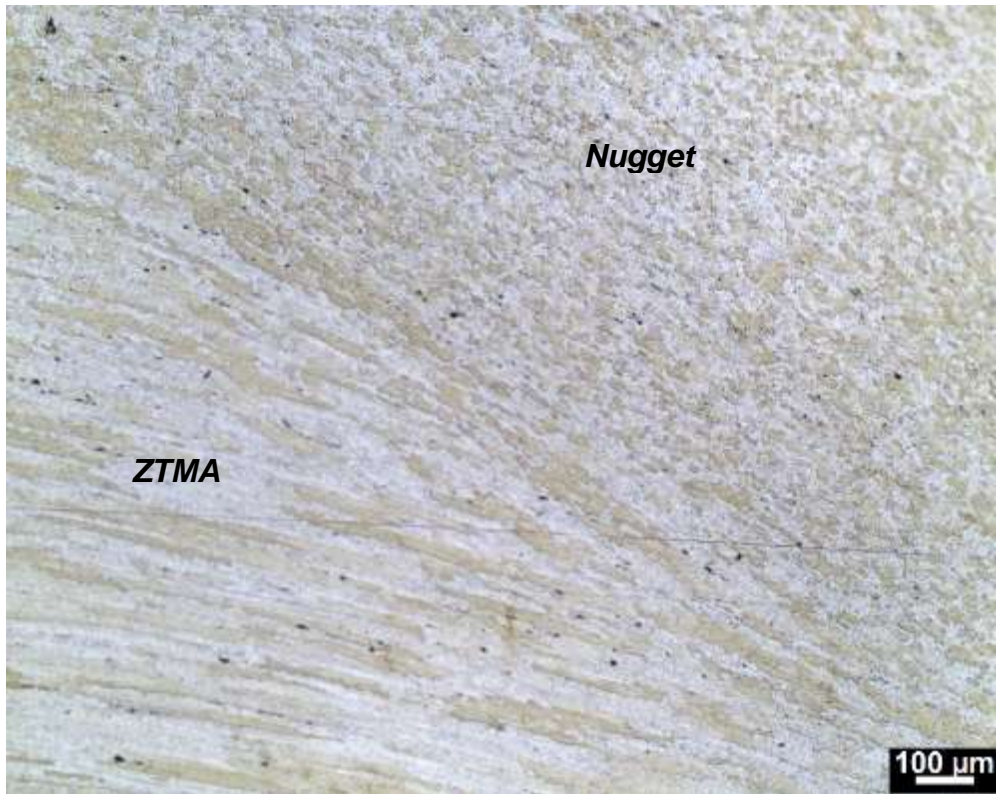
Fuller et. al. (2010) estudaram a evolução microestrutural das ligas 7050 e 7075 soldadas por FSW e envelhecidas artificialmente. Os autores verificaram que para ambas ligas soldadas a ZTA apresentou microestrutura similar ao material base com grãos alongados.

Na **Figura 32** é mostrada a região central do cordão de solda apresentando uma zona dinâmica com boa união dos materiais sendo que do lado da liga AA2050-T84 apresenta óxidos globulares sem bandeamento e do lado de retrocesso da liga AA7050-T7451 há surgimento de inclusões bandeadas do tipo sulfeto.

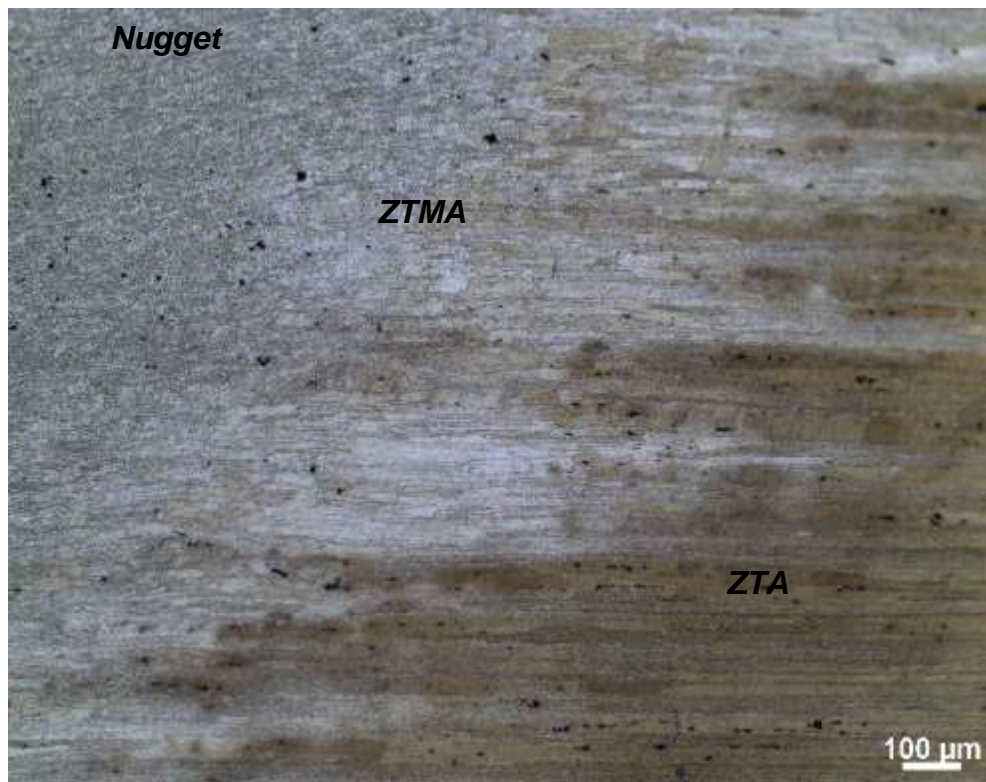


Figura 32. Microscopia ótica da interface das ligas de alumínio na região do cordão de solda.

A **Figura 33 (a)** mostra a região da solda do lado do avanço, onde também é possível identificar a ZTMA localizada entre o cordão de solda e a ZTA, caracterizada com alta deformação na estrutura, com grãos do metal base alongados. A **Figura 33 (b)** mostra o lado do retrocesso, com maior intensidade dos efeitos de temperatura na ZTA, com baixa densidade de deslocamento dos grãos e alta influencia na formação de precipitados.



(a)



(b)

Figura 33. Microscopia ótica das regiões de microestruturas afetadas da junta dissimilar soldada por FSW. (a) lado de retrocesso; (b) lado de avanço. Aumento 10x.

6.3. Microdureza

A **Figura 34** mostra o gráfico com os valores do perfil da microdureza determinado na linha média da seção transversal da junta de topo dissimilar. Os resultados obtidos condizem com o comportamento visto na literatura em que se nota queda da microdureza em toda região de contato com o ombro da ferramenta. Para a soldagem apresentado nessa figura temos uma média de 170 HV para a liga AA2050 e uma média de 200 HV para a liga AA7050. Percebe-se que houve uma diminuição de aproximadamente 26% na região da interface mais próxima da liga AA2050 e de aproximadamente 29% na região da interface da liga AA7050. Notou-se um grande aumento da dureza na região próxima ao centro da solda com valores próximos ao encontrado no metal base da liga 7050. Isso pode indicar uma maior quantidade de mistura da liga desta liga nesta região que, como mostrada no gráfico da **Figura 34**, tem o valor mais elevado. A **Figura 35** mostra o mapeamento de microdureza Vickers obtido por Geuser et al na soldagem por fricção e mistura da liga AA2050. Nota-se que para esta soldagem de liga similar a dureza do centro da solda ficou por volta de 120 HV, enquanto na liga dissimilar estudada neste projeto, o valor da região central ficou próximo dos 180 HV, evidenciando o fato que foi proposto anteriormente.

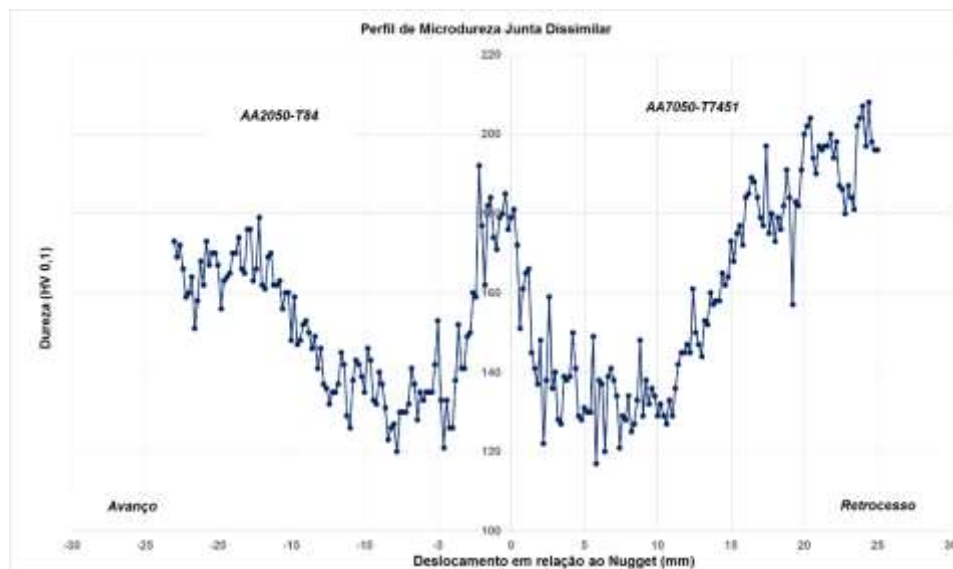


Figura 34. Perfil de Microdureza Vickers da seção transversal da junta de topo dissimilar soldada por FSW.

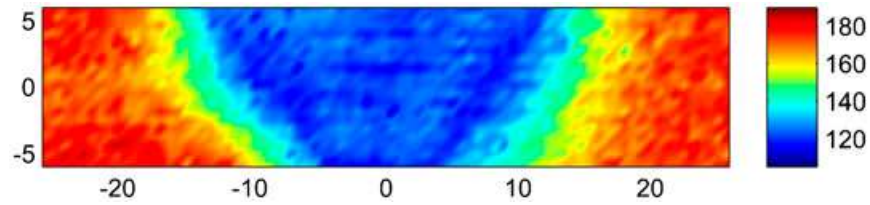


Figura 35. Perfil de Microdureza Vickers da seção transversal da junta similar AA2050 soldada por FSW (GEUSER et al, 2014).

Uma outra possível conclusão para esse aumento brusco da dureza na interface dos materiais é que possivelmente houve a formação de precipitados da fase T_1 que são precipitados coerentes da forma (Al_2CuLi) . Tal fato pode ser comprovado analisando a **Figura 36** a seguir.

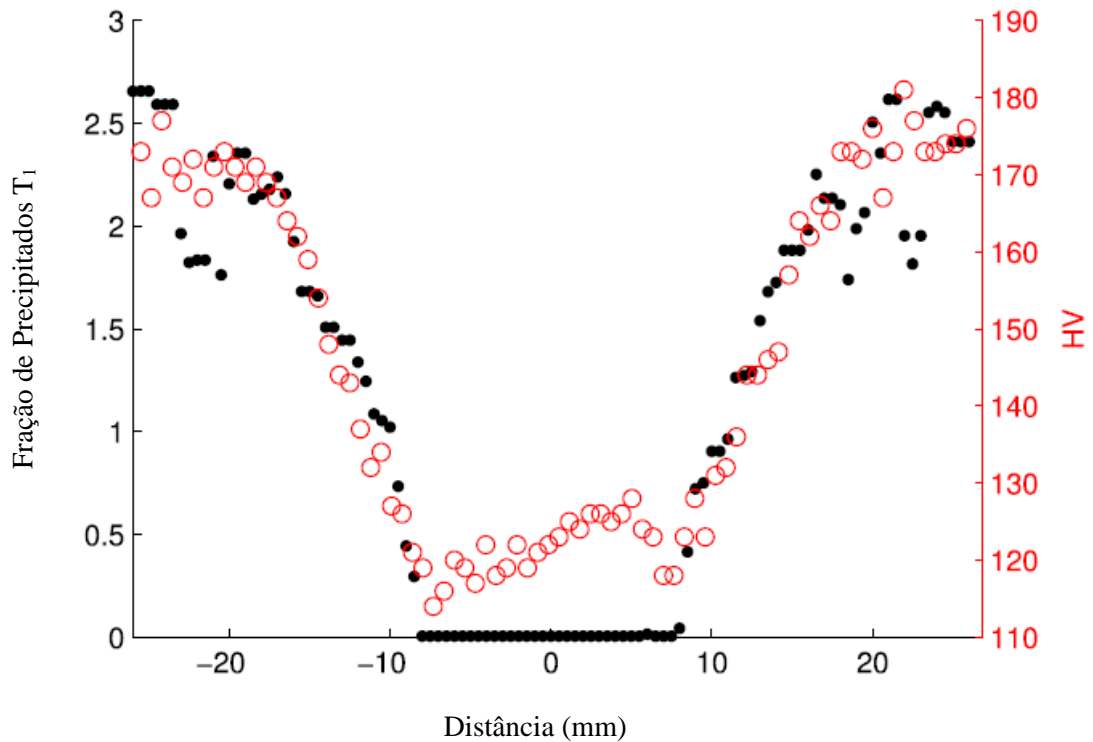


Figura 36. Fração de precipitados T_1 (pontos pretos) em relação ao valor de microdureza Vickers (círculos vermelhos) da seção transversal da junta similar AA2050 soldada por FSW (GEUSER et al, 2014).

De acordo com a **Figura 36**, é possível perceber que quanto maior a concentração deste tipo de precipitado, maior é o valor de dureza. No centro da solda, não há precipitados, por isso o valor de dureza encontrado é tão baixo. Desta forma, como foi dito anteriormente, a formação

ou não diluição dos precipitados T_1 na soldagem da liga dissimilar pode indicar a alta dureza encontrada na região central da solda.

Por fim, o menor valor de dureza foi encontrado na ZTMA do lado de retrocesso, o que pode sugerir uma maior probabilidade de ocorrência de fratura nessa região.

7. CONCLUSÕES

- ✓ O aço ferramenta de elevada dureza escolhido para a fabricação da ferramenta foi adequado, visto que o ferramental se comportou bem mesmo a altos esforços necessários para soldar as chapas de elevada espessura, tendo desgaste imperceptível.
- ✓ Outro ponto importante a se destacar do projeto da ferramenta foi o pino ajustável, permitindo alteração do parâmetro de penetração na junta mesmo após a ferramenta pronta, o que foi de suma importância para o estudo dos parâmetros.
- ✓ Sob aspecto de análise macroscópica a junta apresentou intensa formação de rebarba nas laterais e no centro do cordão de solda, devido ao aumento da temperatura gerada pelo processo associada a penetração da ferramenta.
- ✓ Através da técnica de microscopia ótica, foi evidenciada a falta de fusão na raiz da solda. Este problema foi solucionado aumentando o comprimento do pino durante a soldagem.
- ✓ A microscopia ótica também evidenciou a intensa variação microestrutural, caracterizando assim, as quatro regiões do cordão de solda: metal base, ZTA, ZTMA e cordão de solda.
- ✓ A ZTA não apresenta variação microestrutural pois esta região sofre mudanças de fase e formação de precipitados apenas pelo aporte térmico.
- ✓ A ZTMA apresentou mudança na orientação dos grãos do material proveniente da influência termomecânica do processo e por fim, a região do cordão de solda apresentou grãos recristalizados, equiaxiais, com alta densidade de deslocamento e partículas grosseiras dispersas dentro e nos contornos de grãos.
- ✓ O perfil de microdureza apresentou queda de dureza nas regiões de ZTA e ZTMA dos lados de avanço e retrocesso entretanto, mostrou um aumento brusco de dureza na região central de interface das ligas, indicando a possível formação de fases T_1 .

8. PROPOSTAS PARA FUTUROS TRABALHOS

Para dar continuidade a esta pesquisa propõe-se avaliar de forma minuciosa a microestrutura resultante no cordão de solda através das técnicas de Microscopia Eletrônica de Varredura e de Transmissão.

Também se faz necessária uma avaliação do comportamento mecânico da junta soldada executando ensaios de tração e de tenacidade.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCOA. **Alloy 7075 plate and sheet.** Disponível em: https://www.alcoa.com/mill_products/catalog/pdf/alloy7075techsheet.pdf. Acesso em: 18 de janeiro de 2016.

ALCOA. **Alloy 7475 plate and sheet.** Disponível em: https://www.alcoa.com/mill_products/catalog/pdf/alloy7475techplatesheet.pdf. Acesso em: 18 de janeiro de 2016.

ASM metals handbook. **Mechanical Testing and Evaluation.** Volume 8

ASM Handbook. (1990). Ohio: ASM International. v.2

ASM Handbook. (1991).Ohio: ASM International.v.4.

ASM SPECIALTY Handbook: **Aluminum and aluminum alloys in aluminum-lithium alloys.** (1993). Ohio: ASM International. p.121.

BERTONCELLO, J. C. B. **Avaliação da corrosão da junta dissimilar sobreposta das ligas AA7050-T76511 e AA2024-T3 soldadas por fricção linear com mistura.** Dissertação para obtenção do título em Mestre em Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Porto Alegre, 2014.

BIRBILIS N.; CAVANAUGH M. K.; BUCHHEIT R. G. **Electrochemical behavior and localized corrosion associated with Al₇Cu₂Fe particles in aluminum alloy 7075-T651.** Corrosion Science v. 48, p. 4202-4215, 2006.

BONAZZI, L. H. C. **Fatigue Behavior of Al-Li alloy AA 2050.** p.132. Dissertação de Mestrado em Ciências & Engenharia de Materiais da Universidade de São Paulo – Instituto de Física de São Carlos, Instituto de Química de São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos - SP, 2013.

BRIDE, S. R; MICHARELIS P; POSADA M. e DeLOACH J. **Comparison of Buckling Distortion Propensity for SAW, GMAW and FSW.** Welding Research Supplement, Supplement to the Welding Journal, Welding Journal, V 85, No 9 p.189s à 195s, September 2006.

CAI, B.; ZHENG, Z.Q.; HE, D.Q.; LI, S.C.; LI, H.P. **Friction stir weld of 2060 Al-Cu-Li alloy: microstructure and mechanical properties,** J. Alloys Compd. 649 (2015) 19 – 27.

CAPELARI, Tiago V.. **Avaliação da geometria da ferramenta e parâmetros do processo FSW na soldagem da liga de alumínio AA 5052**. 2006. Tese (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

CAVALIERE, P. et. al. (2009). **Effect of anisotropy on fatigue properties of 2198 Al-Li plates joined by friction stir welding**. Engineering Failure Analysis. pp 1856-1865.

CEDERQVIST, L.; REYNOLDS, A. P.. **Factors Affecting the Properties of Friction Stir Welded Aluminum Lap Joints**. Welding Journal: Welding Research Supplement, vol. 80, n°12, 2001, p. 281s - 287s.

CHEN H., Yan K., Lin, T., Chen S., Jiang C., Zhao, Y., 2006. “**The investigation of typical welding defects for 5456 aluminum alloy friction stir welds**”, Materials Science and Engineering A, Volume 433, Pages 64–69.

CHRISTNER B.; MCCOURY, J.; HIGGINS, S.: Proc. 4th Int. Symp. on '**Friction stir welding**', Park City, UT, USA, May 2003, TWI.

COLLIGAN, K. **Material flow behavior during friction stir welding of Aluminum**. Welding Journal: Welding Research Supplement, vol. 78, n°7, 1999, p. 229s - 237s.

DAWES, C. G; THOMAS, WAYNE M. **Friction Stir Process Welds Aluminum Alloys**. Welding journal, V 78, No 5, p: 41 – 43, May 1996.

F. De GEUSER, B. MALARD & A. DESCHAMPS (2014) **Microstructure mapping of a friction stir welded AA2050 Al–Li–Cu in the T8 state**. Philosophical Magazine, 94:13, 1451-1462.

FENDONI, A. (2009). **The Effect of post weld heat treatment on the corrosion behavior of a AA2050T34-FSW**. Thesis (MRes) - University of Birmingham, Birmingham. p. 4-13.

FULLER, C. B. et. al. (2010). **Evolution of microstructure and mechanical properties in naturally aged 7050 and 7075 Al friction stir welds**. MATERIALS Science and Engineering A. pp. 2233-2240.

FULLER, C. B. **Friction Stir Tool Materials and Designs**. In: Mishra R. S. Friction Stir Welding and Processing. 1° edição. ASM Internacional, 2007, 7 – 36.

GHARACHEH, M. A., KOKABI, A. H., DANESHI, G. H., SHALCHI, B., SARRAFI, R., 2006. “**The influence of the ratio of ‘rotational speed/traverse speed (w/u) on mechanical**

properties of AZ31 friction stir welds”, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Volume 46, Pages 1983–1987.

GIRISHA, H. N., SHARMA, K. V. **Effect of magnesium on strength and microstructure of aluminum, copper, magnesium alloys**. International Journal of Scientific Engineering and Research, 3 (2), 2012.

GOMES, M. R.; BRESCIANI FILHO, E. (1976). **Propriedades e usos de metais não-ferrosos**. 3.ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais.

GOMES, M.R., FILHO, E. B. **Propriedades e Usos de Metais Não-Ferrosos**. ABM (Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais), São Paulo, SP, 1987.

GUERRA, M. et. al.. **Flow patterns during friction stir welding**. Materials Characterization, 49 (2003) 95-101.

GUPTA, R.; STUDENT, M. T.; ENGINEERING, M. **Friction Stir Welding : A Review**. v. 2, n. 7, p. 23–31, 2013.

HAFLEY, R. A.; Domack, M. S.; Hales, S. J.; Shenoy, R. N. (2011). **Evaluation of aluminum alloy 2050-T84 microstructure and mechanical properties at ambiente and cryogenic temperatures**. Langley Research Center, Hampton Virginia.

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

HIRATA, T., OGURI T., HAGINO H., TANAKA T., CHUNG S. W., TAKIGAWA Y., HIGASHI K., 2007. **“Influence of friction stir welding parameters on grain size and formability in 5083 aluminum alloy”**, Materials Science and Engineering, Volume 456, Pages 344–349.

JOHNSON, RICHARD P.; THREADGILL, PHILIP L. **Progress in Friction Stir Welding of Aluminum and Steel for Marine Applications**. Paper presented at RINA Conference: Advanced Marine Materials: Technology and applications. October 2003.

JÚNIOR, A. R., 2003. **“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.

KAI, Shen. et. al., (2009). **TEM study on microstructure and properties of 7050 aluminum alloy during thermal exposure**. School of Materials Science and Technology, Naning University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 21006, China, 2009.

KHALED, T. (2005), “**An Outsider looks at friction stir welding**”. Federal Aviation Administration.

KIM, Y.G., FUJII, H., TSUMURA, T., KOMAZAKI, T., NAKATA, K., 2006. “**Three defect types in friction stir welding of aluminum die casting alloy**”, Materials Science and Engineering, Volume 415, Pages 250–254.

MACIEL, C. I. S. (2013). **Estudo da tenacidade e fadiga em meio assistido da liga de Al-Li de grau aeronáutico AA2050-T84. 208f.** Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil.

Mc KEOWN, D. **Welded Aerospace Structures Pass the Test**. Paper published as: “Brave new weld” in Aerospace Testing Technology International, Issue 1, July 2002.

MISHRA, R. S.; MAHONEY, M. W. **Friction Stir Welding and Processing**. p. 368, 2007.

MISHRA, R. S; MA, Z. Y. **Friction Stir Welding and Processing**. A review journal. Materials Science e Engineering, Volume 50, issues 1 – 2, p. 1 – 78 , 31 August 2005.

MORETO, J. A (2012). **Study behaviour of corrosion and corrosion fatigue in high strength Al and Al – Li alloys for aeronautic application**. São Carlos. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2012.

NAFSIN, N. et. al., (2013), **Effects of Copper and Magnesium on Microstructure and Hardness of Al-Cu-Mg Alloys**. Bangladesh University of Engineering and Technology, 2013.

PAIVA, G. A P. (2009). **Caracterização de junta soldada por atrito linear com mistura (fsw) da liga al-mg-si aa 6063**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

PASCOAL JUNIOR, F.A. **Análise microestrutural, tenacidade à fratura e vida em fadiga das ligas AA7050-T7451 e AA2050-T84 (Al-Li)**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2014.

PETERS, CHRISTOPHER N. D. **Making the link – Effective Joining Technology for Aluminum in the 21 st Century**. Aluminium Surface Science Technology (ASST). Proceedings of the 4th International Symposium, Beaune, 14 – 18 May 2006, p.79 – 83.

PRASAD, N. E et. al. (2014) **Aluminum-Lithium alloys: Processing, properties and applications**. Elsevier Inc.

RENCK, T. S., 2005. “**Estudo das Propriedades Mecânicas de Juntas Soldadas em Alta Velocidade pelo Processo de Fricção e Mistura Mecânica**”, Dissertação de Mestrado, PPGEM, UFRGS, Porto Alegre.

ROLDÓ, L., 2004. “**Caracterização Microestrutural e de Propriedades Mecânicas da liga de Alumínio AA6056 T4 e T6 soldada pelo Processo de Fricção e Mistura Mecânica**”, 116 p. Tese (Doutorado em Engenharia), PPGEM, UFRGS. Porto Alegre.

SAE Aerospace Material Specification 4050H: Aluminum Alloy, Plate 6.2Zn - 2.3Cu - 2.2Mg - 0.12Zr (7050-T7451) Solution Heat Treated, Stress Relieved, and Overaged, SAE Aerospace, Dec. 2003.

SAE Aerospace Material Specification 4413: Aluminum Alloy, Plate 3.5 Cu - 1.0Li - .40Mg - .35Mn - .45Ag - 0.12Zr (2050-T84) Solution Heat Treated, Stress Relieved, and Artificially Aged, SAE Aerospace, Oct. 2007.

SMITH, Christopher B.; HINRICHS, John F.; CRUSAN, Wade A. **Robotic friction stir welding: the state of the art**. In: Proceedings of the Fourth International Symposium of Friction Stir Welding. 2003. p. 14-16.

SOUZA, G. S. **Influência da geometria da ferramenta na soldagem da liga de alumínio 5052 pelo processo Friction Stir Welding**. 142 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica do Paraná. Curitiba, 2010.

SU, J.-Q.; NELSON, T.W.; MCNELLEY, T.R.; MISHRA, R.S. **Development of nanocrystalline structure in Cu during friction stir processing (FSP)**. Mater. Sci. Eng. A 528 (2011). 5458 - 5464.

SU, J.-Q.; NELSON, T.W.; MISHRA, R.S.; MAHONEY, M. **Microstructural investigation of friction stir welded 7050-T651 aluminium**. Acta Materialia, 51 (2003) 713-729.

THOMAS, WAYNE M; **Friction Stir Welding and Related Friction Process Characteristics**. Joints in aluminum – INALCO 1998. Papers presented at the 7th International Conference, Cambridge, 15 – 17 April 1998, p. 157 - 174.

THOMAS, WAYNE M; NICHOLAS, E. DAVID. **Emerging Friction Joining Technology for Stainless Steel and Aluminum Applications**. Presented at “Productivity beyond 2000:” IIW Asian Pacific Welding Congress, Auckland, New Zealand, 4 – 9 February 1996, incorporating the 58th NZIW Annual Conference and the WTIA 43rd National Welding

Congress, Volume 1, p. 283 - 304.

THOMAS, W.M; NICHOLAS, E.D. **Friction stir welding for the transportation industries**. Materials and Design, v.18, p.269-273, 1997.

THOMAS, W M; MINUS, I; SMITH, P T. **Friction Stir Welding of an Aluminum Alloy – Effects of Tool Geometry**. England: Rep. n 668, 1999.

THREADGILL, P L.; LEONARD, A. J.; SHERCLIFF, H. R.; WITHERS, P. J. **Friction stir welding of aluminium alloys**. International Materials Reviews, vol.54. no.2. March 2009. pp. 49-93.

THREADGILL, P L; NUNN, M E. **A Review of Friction Stir Welding: Part 1, Process Review**. England: TWI Rep. n 760, 2003.

TOTTEN, G.E.; MACKENZIE, D.S. (2003). **Handbook of physical metallurgy and process**. New York: CRC Press. v.1.

XIAO, D. H. et. al., (2002), **Effect of Cu content on the mechanical properties of an Al–Cu–Mg–Ag alloy**. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, PR China, 2002.

ZHAO, Y.; LIN, S.; QU, F. **The influence of pin geometry on bonding and mechanical properties in friction stir weld 2014 Al alloy**. Materials Letters, 59 (2005) 2948-2952.

Zhu, X. K., Chao Y. J., 2004. “**Numerical simulation of transient temperature and residual stresses in friction stir welding of 304L stainless steel**”, Journal of Materials Processing Technology, Volume 146, Pages 263–272.