

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

SOLDAGEM POR FSW DE LIGAS DE ALUMÍNIO ALCLAD AA2024-T3 E AA7075-T6

por

Artur Suárez Fioravanti

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Maio de 2008

SOLDAGEM POR FSW DE LIGAS DE ALUMÍNIO ALCLAD AA2024-T3 E AA7075-T6

por

Artur Suárez Fioravanti

Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. José Antônio Esmerio Mazzaferro

Aprovada por:

Prof. Dr. Arnaldo Rubén Gonzalez DEMEC/UFRGS

Prof. Dr. Ivan Guerra Machado PPGEM/UFRGS

Prof. Dr. Joyson Luiz Pacheco PROMEC/UFRGS

Prof. Dr. Flávio José Lorini

Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 23 de Maio de 2008.

Dedicatória

À minha esposa Cristiana e meu filho Francisco.

Agradecimentos

GPFAI Grupo de Projeto, Fabricação e Automação Industrial

VEM – Manutenção e Engenharia

Dorvo Ferragens e Máquinas Ltda

RESUMO

A soldagem das ligas de alumínio AA2024-T3 e AA7075-T6 sempre foi um obstáculo para indústria devido à alta suscetibilidade a trincas durante o processo de soldagem ao arco elétrico. Estas ligas são largamente utilizadas na indústria aeronáutica devido a sua alta resistência mecânica e baixo peso específico do alumínio, sendo que o método de união mais utilizado é a rebiteagem. Com o advento da soldagem por FSW, surge uma nova oportunidade de união destas ligas sendo que os estudos apresentados até o momento demonstram excelentes propriedades mecânicas da junta.

“*Friction Stir Welding*” – FSW é uma técnica de soldagem desenvolvida em 1991 pelo “*The Welding Institute*” (TWI) na Inglaterra. Esta solda tem a vantagem de ocorrer no estado sólido, que preserva as propriedades mecânicas das ligas, ao contrário dos métodos de soldagem convencionais que envolvem fusão e produzem, em grande parte, microestruturas com baixas propriedades mecânicas. No processo FSW uma ferramenta de alta resistência mecânica com um determinado perfil é rotacionada de forma a gerar atrito nas peças a serem soldadas. Este atrito gera calor suficiente para aumentar a ductilidade e misturar o material na junta, consolidando o mesmo, sem a ocorrência de fusão.

O objetivo deste trabalho é determinar um conjunto de parâmetros através do processo FSW, para soldagem de chapas das ligas Alclad AA2024-T3 e AA7075-T6 com 1,8 mm de espessura, utilizando uma fresadora universal de alta rigidez. Para isso foram desenvolvidas duas geometrias de ferramentas para os quais um conjunto de parâmetros resultasse em soldas livres de defeitos. Uma vez obtidas estas soldas, as mesmas foram testadas através da medição de microdureza, ensaios de dobramento e tração para verificação das propriedades mecânicas resultantes comparadas ao do metal base.

Observou-se que algumas juntas, dependendo dos parâmetros e da ferramenta utilizados, não demonstraram ductilidade adequada durante os ensaios de dobramento, embora não apresentassem defeitos na análise macrográfica. Da mesma forma, a resistência mecânica apresentada pelas mesmas atingiu no máximo 70% do metal base, demonstrando ser a técnica, uma boa alternativa a rebiteagem. Por fim, para liga AA2024-T3, pode-se obter um conjunto de parâmetros que resultasse em uma solda com as propriedades finais desejadas, ou seja, livre de defeitos, ductilidade adequada e boa resistência à tração.

ABSTRACT

“Friction stir welding of AA2024-T3 and AA7075-T6 clad aluminum alloys.”

The welding of AA2024-T3 and AA7075-T6 clad aluminum alloys was always an obstacle to the industry due to cracking susceptibility during arc welding process. These alloys are largely used in the aeronautical industry because of their high mechanical strength and low density, being riveting the most widely used method to join them. The advent of friction stir welding (FSW) presents itself as a new opportunity to join these alloys and the present research demonstrates excellent mechanical properties of the joint.

Friction stir welding is a welding technique that was developed in 1991 at The Welding Institute (TWI) in England. This welding method has the advantage to be a solid state process that preserves the mechanical properties of alloys, to the contrary of conventional fusion welding techniques that produce microstructures with low mechanical properties. In the FSW process a high strength tool with a given profile is rotated in order to generate friction in the parts to be welded. This friction generates enough heat to soften and stir the material, joining them without fusion.

The objective of this work is to determine a set of parameters using the FSW process to weld a 1,8 mm thick AA2024-T3 and AA7075-T6 aluminum clad sheet using a stiff milling machine. For this purpose, development of two tool geometries with a set of parameters to obtain defect-free welded joints was utilized. These welded joints were investigated using microhardness, bending and tension testing to verify the mechanical properties in comparison with the base metal.

It was noted that, dependent upon the parameters and tools used for welding, the joints did not show adequate ductility during the bending testing, even if the macrographic analysis demonstrate no defects. In the same way, the joint mechanical strength is 70% of base metal, showing that this technique is a good alternative for riveting method. Finally, for the AA2024-T3 aluminum alloy, it was obtained the desired properties for the joints, with no defects, good ductility and tension strength.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	OBJETIVOS E METODOLOGIA.....	3
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1.	Processo de Soldagem por “Friction Stir Welding” – FSW.....	4
3.1.1.	Vantagens e desvantagens do processo	5
3.1.2.	Aplicações	6
3.1.3.	Características Microestruturais	10
3.1.4.	Parâmetros do processo	11
3.1.5.	Equipamentos para Soldagem FSW	20
3.2.	Características da Série 2000	22
3.3.	Características da Série 7000	24
3.4.	Tratamentos térmicos das Ligas de Alumínio.....	25
3.4.1.	Processo de Solubilização das Ligas de Alumínio.....	25
3.4.2.	Processo de Precipitação ou Envelhecimento Artificial ou Natural	26
3.4.3.	Superenvelhecimento	28
4.	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	29
4.1	Materiais e Equipamentos	29
4.1.1	Materiais.....	29
4.1.2	Equipamentos	32
4.2	Soldagem FSW – Testes preliminares	33
4.2.1	Projeto do ferramental.....	34
4.3	Soldagem FSW – Testes com parâmetros fixos.....	36
4.4.	Soldagem FSW – Parâmetros Fixos.....	49
4.5	Retirada dos corpos de prova	50
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
5.1	Macrografia da Seção Transversal	53
5.2	Ensaio de Dobramento	54
5.2.1	Variação da Temperatura durante a Soldagem	55
5.3	Perfil de Dureza.....	58
5.4	Ensaio de Tração	62
6.	CONCLUSÕES.....	70
7.	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	72

8. BIBLIOGRAFIA.....	73
----------------------	----

LISTA DE SÍMBOLOS

σ_{esc}	Tensão de escoamento	[MPa]
$\sigma_{\text{máx}}$	Tensão máxima	[MPa]
ε	Alongamento	Adimensional

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Ferramenta de FSW típica.	4
Figura 3.2. Ilustração do processo de FSW.....	5
Figura 3.3. Seção da fuselagem do Eclipse 500 constituída por três estruturas integradas.	7
Figura 3.4. Painel integral direito da fuselagem do primeiro protótipo de Eclipse 500.....	7
Figura 3.5. Equipamento de FSW dos tanques de combustíveis do ônibus espacial.	8
Figura 3.6. Estampagem de um TWB de AA5182 unido por FSW.....	8
Figura 3.7. Painéis de piso fornecidos pela SAPA.....	9
Figura 3.8. Processo de união de perfis por FSW pela SAPA.	9
Figura 3.9. Painéis extrudados do A-Train sendo soldados.	9
Figura 3.10. Ilustração da montagem do A-train	10
Figura 3.11. Zonas formadas durante a FSW.....	10
Figura 3.12. Geometrias de junta onde o processo FSW pode ser utilizado.....	12
Figura 3.13. Exemplo dos diversos tipos de configurações de pinos.....	13
Figura 3.14. Geometria dos pinos e seções transversais resultantes da soldagem por FSW.	14
Figura 3.15. (a) Junta FSW Alclad 2524-T3 rompida em tração.....	15
Figura 3.16. Ferramentas com diferentes geometrias de ombro e os acabamentos	16
Figura 3.17. Diferentes geometrias de pinos.....	16
Figura 3.18. (a) Trinca contínua na superfície.	18
Figura 3.19. Efeito da força axial na formação da solda em ADC12 fundido (Al-Si-Cu).....	19
Figura 3.20. Diferentes seções transversais decorrentes dos parâmetros utilizados.	20
Figura 3.21. ESAB SuperStir™ instalada pela TWI no laboratório de FSW em Abington.	20
Figura 3.22. Equipamento de soldagem FSW desenvolvida pela Beijing FSW Technology.....	21
Figura 3.23. ISTIR™ Process Development System (PDS) desenvolvida pela MTS.	21
Figura 3.24. Powerstir 360 fabricado pela Crawford Swift..	21
Figura 3.25. Chapa de alumínio Alclad.....	23
Figura 3.26. Diagrama de equilíbrio parcial de uma liga da série 2XXX.....	25
Figura 3.27. Efeito da temperatura e tempo de envelhecimento no limite de escoamento.....	27
Figura 3.28. Diagrama indicando os três passos do tratamento térmico de envelhecimento.....	27
Figura 3.29. Ilustração dos estágios de formação do precipitado de equilíbrio θ	28
Figura 4.1. Vida em fadiga da de chapa AA2024-T3 com 2,3 mm de espessura.	30
Figura 4.2. Vida em fadiga da de chapa AA7075-T6 com 2,3 mm de espessura.	31
Figura 4.3. Aplicações das ligas AA2024-T3 e AA7075-T6 em um Boeing modelo 737-300.	32

Figura 4.4. Máquina fresadora universal Invicta.....	32
Figura 4.5. Rugosímetro Mitutoyo.....	33
Figura 4.6. Geometria cujas soldas resultantes não apresentaram defeitos aparentes.	35
Figura 4.7. Defeito de penetração	35
Figura 4.8. Soldas com excessiva rebarba o que evidencia que o pino está muito curto.....	35
Figura 4.9. Detalhes do projeto da ferramenta com ombro côncavo e pino de 1,7 mm	36
Figura 4.10. Soldagem utilizando a ferramenta da Figura 4.9 em chapa Alclad AA2024-T3.....	36
Figura 4.11. Variação da penetração do ombro quando o ângulo da ferramenta é alterado.	38
Figura 4.12. Medição da rugosidade média (Ra) da superfície superior do cordão de solda.	39
Figura 4.13. Empenamento apresentado pelas chapas após a soldagem por FSW.....	49
Figura 4.14. Desenho esquemático da retirada dos corpos de prova para análise.	51
Figura 4.15. (a) Corpo de prova de tração conforme E8M-98 (b) Corpo de prova de dobramento conforme E190-97.....	52
Figura 5.1. Seção transversal da solda utilizando a liga AA7075-T6.....	53
Figura 5.2. Seção transversal da solda utilizando a liga AA2024-T3.....	53
Figura 5.3. Seção transversal da solda utilizando a liga AA7075-T6 o lado de recuo.	53
Figura 5.4. Resultado dos ensaios de dobramento para a liga AA2024-T3.....	54
Figura 5.5. Resultado dos ensaios de dobramento para a liga AA7075-T6.....	55
Figura 5.6. Resultado dos ensaios de dobramento para a liga AA2024-T3 (lado de avanço)	55
Figura 5.7. Aquisição de temperatura próxima à ferramenta de FSW.....	56
Figura 5.8. Aquisição de temperatura ao longo do comprimento de 14 cm.	57
Figura 5.9. Resultado dos ensaios de dobramento para a liga AA 2024-T3.....	58
Figura 5.10. Resultado dos ensaios de dobramento para a liga AA7075-T6.....	58
Figura 5.11. Perfil de dureza da solda por FSW da liga AA2024-T3.....	59
Figura 5.12. Perfil de dureza da solda por FSW da liga AA7075-T6.....	59
Figura 5.13. Perfil de dureza da solda por FSW das ligas AA2024-T3 no lado de avanço.....	60
Figura 5.14. Perfil de dureza da solda por FSW da liga AA2024-T3.....	61
Figura 5.15. Perfil de dureza da solda por FSW da liga AA7075-T6.....	61
Figura 5.16. Corpos de prova após o ensaio de tração.....	63
Figura 5.17. Corpos de prova após o ensaio de tração.....	64
Figura 5.18. Corpos de prova após o ensaio de tração.....	65
Figura 5.19. Corpos de prova após o ensaio de tração.....	66
Figura 5.20. Corpos de prova após o ensaio de tração.....	67
Figura 5.21. Comparação entre os valores encontrados para tensão de ruptura	68

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1. Especificações das ligas em % peso.....	29
Tabela 4.2. Propriedades típicas de chapas das ligas Alclad AA2024-T3 e AA7075-T6.....	30
Tabela 4.3. Parâmetros utilizados.	37
Tabela 4.4. Tabela de ensaios e resultados preliminares para liga AA7075-T6.	40
Tabela 4.5. Tabela de ensaios e resultados preliminares para liga AA 2024-T3.	40
Tabela 4.6. Acabamento superficial das soldas por FSW da liga AA7075-T6.....	41
Tabela 4.7. Acabamento superficial das soldas por FSW da liga AA2024-T3.....	43
Tabela 4.8. Macrografias da seção transversal das soldas por FSW da liga AA7075-T6	45
Tabela 4.9. Macrografias da seção transversal das soldas por FSW da liga AA2024-T3	47
Tabela 4.10. Parâmetros utilizados	50
Tabela 5.1. Identificação dos corpos de prova para o ensaio de dobramento.	54
Tabela 5.2. Identificação dos corpos de prova para o ensaio de dobramento.	57
Tabela 5.3. Propriedades mecânicas do metal base da liga Alclad AA2024-T3	62
Tabela 5.4. Propriedades mecânicas do metal base da liga Alclad AA7075-T6	62
Tabela 5.5. Propriedades mecânicas da junta soldada por FSW da liga Alclad AA2024-T3.....	63
Tabela 5.6. Propriedades mecânicas da junta soldada por FSW da liga Alclad AA7075-T6.....	64
Tabela 5.7. Propriedades mecânicas da junta soldada por FSW da liga Alclad AA2024-T3.....	65
Tabela 5.8. Propriedades mecânicas da junta soldada por FSW da liga Alclad AA2024-T3.....	66
Tabela 5.9. Propriedades mecânicas da junta soldada por FSW da liga Alclad AA7075-T6.....	67
Tabela 5.10. Eficiências obtidas para juntas soldadas por FSW.....	69

1. INTRODUÇÃO

A dificuldade de obtenção de soldas com alta resistência mecânica, à fratura e fadiga nas ligas de alumínio, tais como as séries 2XXX e 7XXX, tem inibido o uso de juntas soldadas nas estruturas aeronáuticas. Estas ligas de alumínio são geralmente classificadas como não recomendadas para soldagem devido à problemas como trincas de solidificação e porosidade na zona de fusão. Da mesma forma, é bastante significativo a perda das propriedades mecânicas quando comparadas as do metal base.

A baixa soldabilidade das ligas de alumínio da série 2XXX é creditada a formação de inúmeras trincas no estágio final da solidificação dos cordões de solda, em razão da significativa diferença entre os coeficientes de dilatação térmica das regiões já solidificadas e o filme da fase líquida, com composição semelhante ao do eutético [Júnior, 2003]. Nas ligas da série 7XXX, os problemas vão desde a suscetibilidade de trincas de solidificação, fratura frágil e a formação de óxido de zinco durante a solda, que afeta a tensão superficial da poça de fusão e aumenta o risco de defeitos de fusão [Mathers, 2002].

A Soldagem por FSW – *Friction Stir Welding* foi inventada pela TWI (*The Welding Institute*) no Reino Unido em 1991. Trata-se de uma técnica de soldagem no estado sólido que foi inicialmente utilizada nas ligas de alumínio devido à dificuldade de soldagem destas ligas pelos processos de fusão convencionais. Inúmeros trabalhos têm demonstrado que esta técnica pode ser utilizada em ligas de alumínio, cobre, titânio, magnésio, zinco, aço e plástico entre outras. Entre as muitas aplicações destacam-se as indústrias marítimas, aeroespaciais, automotivas entre outras. Na indústria marítima se destaca a confecção de painéis para decks, laterais, paredes, pisos, casco, plataformas de pouso para helicópteros, etc. Na aeroespacial, pode-se citar a construção do Eclipse 500, onde partes das estruturas foram soldadas por FSW, a junção dos componentes do tanque de oxigênio dos foguetes da série Delta e dos tanques de combustíveis externos da “*Space Shuttle*”. Na indústria automotiva, a utilização materiais diferentes unidos por FSW na fabricação de carrocerias de automóveis tem se mostrado muito atraente.

Para realização deste processo de soldagem, é utilizada uma ferramenta rotativa não-consumível que é inserida na área de contato entre duas peças, cujo calor gerado pelo atrito promove a mistura mecânica dos materiais ainda no estado sólido, sem a ocorrência de fusão. As principais características deste método são as obtenções de soldas livres de defeitos e com boas propriedades mecânicas em diferentes ligas de alumínio de espessuras que vão de 1 a 35 mm. As juntas necessitam de pouca preparação e não são utilizados materiais de adição, como

geralmente ocorrem em outros processos de soldagens. Entre as desvantagens, destaca-se a presença do furo remanescente no final do cordão de solda (*keyhole*) e a necessidade de fixação ou suporte altamente rígido entre as partes.

O objetivo deste trabalho é a obtenção de soldas livres de defeitos utilizando ligas de alumínio Alclad AA2024-T3 e AA7075-T6, com posterior análise da resistência mecânica comparada ao do metal base. A motivação pela escolha destas ligas se deve ao fato de que as mesmas são amplamente utilizadas em estruturas aeronáuticas, cujas partes são unidas pelo processo de rebitagem. O processo de soldagem por FSW surge como um método alternativo e promissor para indústria aeronáutica, porém as informações disponíveis na literatura são insuficientes para padronização desta técnica. A indústria de uma forma geral necessita de alta confiabilidade, bons padrões e especificações para assegurar que seu desempenho, qualidade e repetitividade sejam atendidos. Para materiais e processos imaturos ou em desenvolvimento, a necessidade de adequada compreensão e definição das propriedades e de produção são particularmente críticos. Deve haver um suficiente entendimento das variabilidades e incertezas que um método pode oferecer. Desta forma, o estudo apresentado neste trabalho visa contribuir para o desenvolvimento desta técnica de soldagem e promover a utilização da mesma na indústria.

2. OBJETIVOS E METODOLOGIA

O objetivo deste trabalho é a obtenção de juntas soldadas pelo processo de “Friction Stir Welding” (FSW) de ligas de alumínio Alclad AA7075-T6 e AA2024-T3 isentas de defeitos e a análise da resistência mecânica comparada ao do metal base.

Para o desenvolvimento do trabalho, a seguinte metodologia será utilizada:

- Revisão bibliográfica das ligas da série 2XXX e 7XXX, suas limitações utilizando outros métodos de soldagem, a aplicação da soldagem por FSW, resultados obtidos pela literatura, etc.
- Aplicação dos conhecimentos obtidos da literatura para definição das variáveis do processo, desenvolvimento de ferramental, compreensão das limitações do método e influência dos parâmetros na qualidade da solda.
- Especificação de uma metodologia de soldagem para as ligas em estudo com base nos equipamentos utilizados.
- Avaliação qualitativa e quantitativa das juntas soldadas utilizando macrografias, avaliação de microdureza e ensaios de dobramento e tração.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Processo de Soldagem por “Friction Stir Welding” – FSW

O processo FSW é uma técnica de soldagem usada para soldas de topo e sobrepostas que podem ser realizadas em praticamente todos os tipos de perfis.

Este processo ocorre pela aplicação de uma ferramenta cilíndrica em rotação sobre a junta a ser soldada. A ferramenta é constituída de ombro (*shoulder*) e um pino como mostrado na Figura 3.1. A soldagem ocorre através do calor gerado pelo ombro e o pino inserido na junta que provocam a plastificação do material, possibilitando assim a mistura de ambos os lados da junta. O aquecimento localizado aumenta a ductilidade do material ao redor do pino e a combinação da rotação da ferramenta e o movimento de avanço da mesma movimentam o material da frente do pino para trás. Como resultado deste processo tem-se uma junta produzida no “estado sólido”. Devido às diversas formas geométricas que pode assumir a ferramenta, o movimento do material ao redor do pino pode ser bastante complexo.

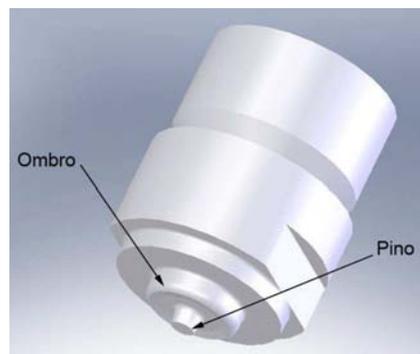


Figura 3.1. Ferramenta de FSW típica.

A Figura 3.2 ilustra o processo de FSW em uma junta de topo. Primeiramente tem-se a ferramenta na rotação desejada, logo após a ferramenta é inserida na junta até que o ombro entre em contato com a superfície das peças. Após a plastificação do material junto à ferramenta a mesma é transladada no sentido e alinhamento da junta. Um pouco antes do final da junta a ferramenta é recolhida deixando um furo do mesmo diâmetro do pino, também chamado de “furo remanescente”.

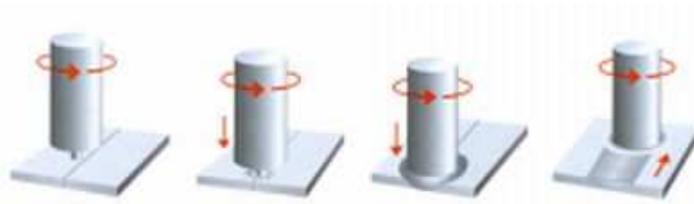


Figura 3.2. Ilustração do processo de FSW.

O processo de FSW é considerado um dos desenvolvimentos mais importantes na união dos metais a partir da década de 90, além de ser uma tecnologia que cumpre com os mais rigorosos requisitos ambientais devido à sua eficiência de energia, versatilidade e inexistência de resíduos.

3.1.1. Vantagens e desvantagens do processo

A soldagem por FSW apresenta algumas vantagens quando comparada aos métodos convencionais por fusão, tais como TIG, MIG/MAG e laser.

- i) a união ocorre sem que se atinja a temperatura de fusão do(s) material(is) da junta, isto é, no estado sólido. Isto leva a isenção de defeitos comuns aos processos de fusão e solidificação como trincas, porosidade, segregações, etc;
- ii) baixos índices de empenamento e distorção, devido ao baixo aporte térmico do processo;
- iii) permite unir qualquer tipo de liga de alumínio, com ligas similares ou dissimilares em diversas espessuras;
- iv) capacidade de soldagem de espessuras que vão de 50 mm, em passe único, até 100mm em duplo passe [TWI, 2007];
- v) não necessita de metal de adição ou proteção gasosa;
- vi) não gera respingos, resíduos, fumaça, radiação ultravioleta, etc;
- vii) pode ser executada por dispositivos ou robôs, o que torna o processo automatizável;
- viii) possibilita a junção em qualquer posição (plana, vertical e sobrecabeça);
- ix) processo de elevada robustez, reprodutibilidade e repetitividade [Mishra e Ma, 2005; Kaspar, 2005];
- x) É energeticamente eficiente, requer somente 2,5% da energia requerida na soldagem a laser [Mishra e Ma, 2005];

- xi) alta produtividade, capaz de efetuar junções até sessenta vezes mais rápida que o processo de rebite manual e seis vezes mais rápida que o similar processo automático [Christner, 2003];
- xii) capaz de produzir juntas com elevada eficiência mecânica (próximas a 100%) e com resistência a fadiga superior ao do metal base [Hitachi, 2007].

Embora o processo seja altamente recomendável devido às vantagens apresentadas, algumas limitações ou desvantagens são atribuídas ao processo:

- i) Necessidade de um sistema altamente rígido de fixação devido às forças envolvidas no processo (axial e transversal);
- ii) Presença de um furo no final da solda, porém existem pesquisas na área com alguns resultados satisfatórios;
- iii) Dificuldade de soldagem de materiais de alto ponto de fusão;

3.1.2. Aplicações

Atualmente existem inúmeras aplicações da FSW relatadas na literatura, sendo que grande parte dos estudos dirigidos a esta técnica estão concentrados na indústria automobilística, marítima e aeroespacial. A America's Combat Vehicle Support Center nos EUA, estão implementando o processo de FSW na fabricação de veículos de combate [SAE, 2005].

Na área aeroespacial deve-se salientar o pioneirismo da Eclipse Aviation, sendo a primeira empresa utilizar a soldagem por FSW em estruturas de aeronaves desde que recebeu a aprovação da Federal Aviation Administration (FAA) em 2002. As Figuras 3.3 e 3.4 demonstram as posições onde a soldagem por FSW foi utilizada.

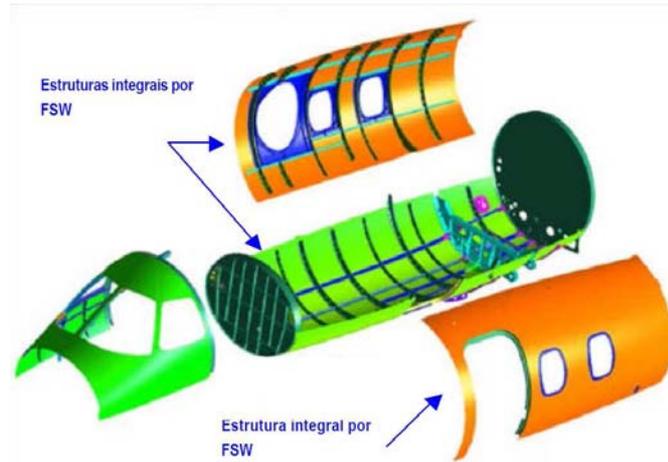


Figura 3.3. Seção da fuselagem do Eclipse 500 constituída por três estruturas integradas pelo processo de “Friction Stir Welding”, unidas entre si por rebites [Eclipse, 2007].

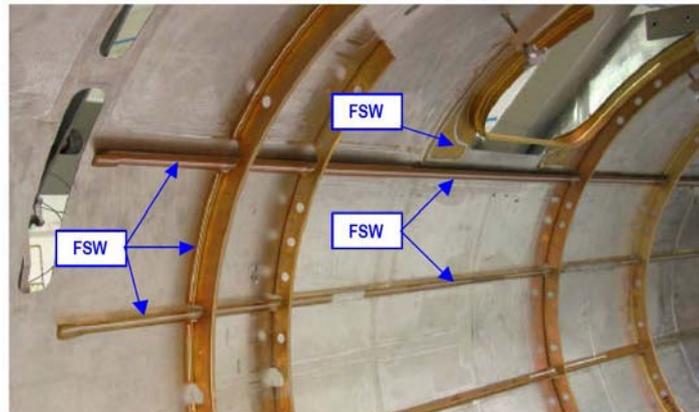


Figura 3.4. Painel integral direito da fuselagem do primeiro protótipo de Eclipse 500 unidas por “Friction Stir Welding – FSW” [Eclipse, 2007].

A NASA juntamente com a Lockheed-Martin vem trabalhando exaustivamente na utilização de FSW na soldagem dos tanques de combustível externos do Ônibus Espacial (Space Shuttle) como mostrado na Figura 3.5. O tanque utiliza a liga de Al-Li 2195, bastante conhecida pela sua alta resistência mecânica e baixa densidade comparado com outros metais.



Figura 3.5. Equipamento de FSW dos tanques de combustíveis do ônibus espacial [Júnior, 2003].

Na área automotiva se destaca o estudo da aplicação de FSW na fabricação de “Tailor Welded Blanks” (TWB) utilizando as ligas de alumínio, como mostrado na Figura 3.6 [Renck, 2005]. A técnica consiste na fabricação de componentes a partir de materiais diferentes unidos por solda. Os materiais podem variar em espessura, resistência mecânica, acabamento superficial e até mesmo composição química (com restrições).

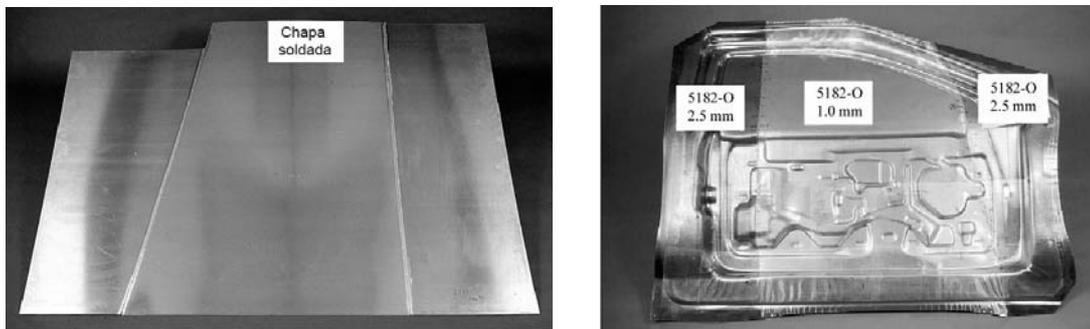


Figura 3.6. Estampagem de um TWB de AA5182 unido por FSW [Davies, 2004]

Em 2004 o SAPA Group na Suécia forneceu painéis a Kvaerner Masa Yards Inc para utilização no maior navio de cruzeiro do mundo, o Voyager. Estes painéis possuíam perfis soldados por FSW e mediam 34 metros quadrados (2,4 x 14,3 metros). As Figuras 3.7 e 3.8 mostram as aplicações desenvolvidas pela SAPA.



Figura 3.7. Painéis de piso fornecidos pela SAPA [SAPA, 2007].



Figura 3.8. Processo de união de perfis por FSW pela SAPA [SAPA, 2007].

Na área ferroviária destaca-se o projeto do A-train concebido pela Hitachi Rail Systems do Japão. O conceito do A-train baseia-se em uma montagem modular de vagões cujos painéis externos são extrudados e unidos por FSW conforme mostrado nas Figuras 3.9 e 3.10. As soldagens por FSW destes painéis causam pouca distorção da estrutura, possuem excelente acabamento e resistência mecânica.

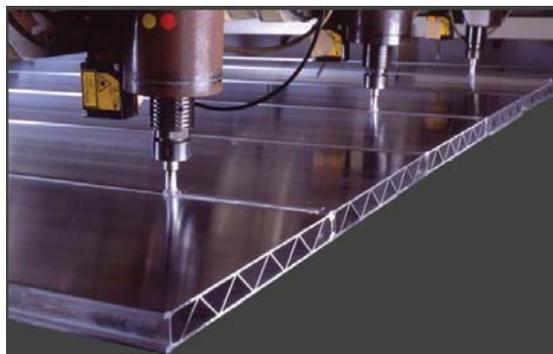


Figura 3.9. Painéis extrudados do A-Train sendo soldados [Hitachi, 2007].

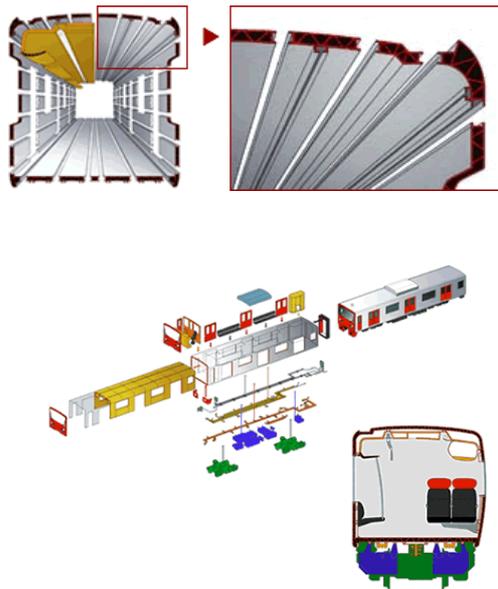


Figura 3.10. Ilustração da montagem do A-train [Hitachi, 2007]

3.1.3. Características Microestruturais

A soldagem por FSW resulta em três zonas distintas: zona termicamente afetada (ZTA), zona termomecânica afetada (ZTMA) e o centro da solda ou “*stir zone*” [Mishra e Ma, 2005], conforme mostrado na Figura 3.11. Estas zonas são formadas devido à rotação da ferramenta que causa intensa deformação plástica e a exposição à alta temperatura pelo material. Isto resulta em recristalização do material e o desenvolvimento de textura no centro da solda e dissolução de precipitados com crescimento de grãos no centro da solda e nas adjacências [Mishra e Ma, 2005].

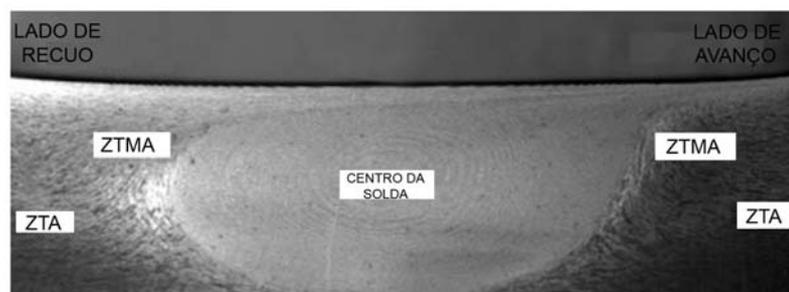


Figura 3.11. Zonas formadas durante a FSW: centro da solda ou “*stir zone*”, zona termomecânica afetada (ZTMA) e zona termicamente afetada (ZTA) [Mishra e Ma, 2005].

Centro da solda ou “stir zone”: esta zona é a área recristalizada da zona termomecânicamente afetada nas ligas de alumínio [Roldo, 2004], onde o material sofreu intensa deformação plástica e foi submetido ao calor gerado por fricção resultando em uma microestrutura de grãos refinados [Mishra e Ma, 2005].

Zona termomecânicamente afetada (ZTMA): Nesta região o material é plasticamente deformado pela ferramenta de soldagem, além disso, o calor do processo também exerce influência sobre o material [Roldo, 2004]. Na ZTMA, o calor gerado pela ferramenta ainda é superior à temperatura de recristalização do material, o que faz formar precipitados em solução sólida [Júnior, 2003].

Zona termicamente afetada (ZTA): Nesta zona o material experimenta um ciclo térmico que modifica a microestrutura e/ou propriedades mecânicas. Contudo, não há deformação plástica [Roldo, 2004]. Nas ligas de alumínio o crescimento dos grãos e o superenvelhecimento localizado, resultam em perda da resistência mecânica [Júnior, 2003; Roldo, 2004].

3.1.4. Parâmetros do processo

O processo de soldagem por FSW envolve os seguintes parâmetros: geometria da ferramenta, parâmetros de soldagem e o projeto da junta [Mishra e Ma, 2005].

- 1) A geometria da ferramenta pode ser 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.
- 2) 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.
- 3) 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 3.12. [Mishra e Ma, 2005].

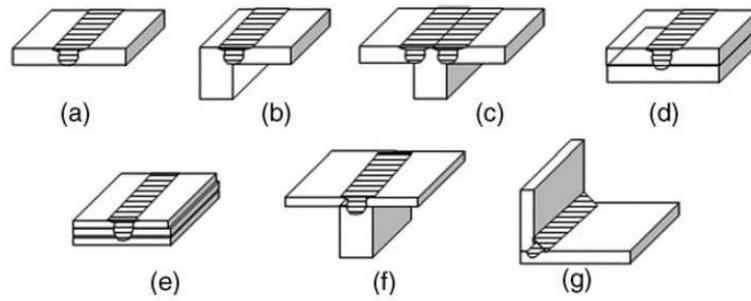


Figura 3.12. Geometrias de junta onde o processo FSW pode ser utilizado [Mishra e Ma, 2005]: (a) junta de topo, (b) junta de topo a 90°, (c) junta de topo em T tripartida, (d) junta sobreposta, (e) junta sobreposta múltipla, (f) junta de topo em T bipartida e (g) junta de topo em ângulo.

A influência de cada parâmetro se resume como segue:

a. Geometria da ferramenta: A geometria da ferramenta é um dos fatores de maior influência no desenvolvimento do processo [Mishra e Ma, 2005]. Uma ferramenta de FSW consiste em um ombro e um pino como mostrado esquematicamente na figura 3.13.

A ferramenta possui duas funções primárias: (a) aquecimento localizado e (b) escoamento do material. No estágio inicial do contato da ferramenta o aquecimento resulta primariamente da fricção entre a ferramenta e a junta sendo que parte do aquecimento é resultado da deformação do material. Levando-se em conta o aspecto do aquecimento, o tamanho relativo do pino e o diâmetro do ombro são importantes, sendo que outros parâmetros de projeto não são tão críticos. Além disso, o ombro proporciona o confinamento do volume aquecido do material. A segunda função da ferramenta é misturar e mover o material. A uniformidade da microestrutura e as propriedades juntamente com as cargas do processo são governadas pelo projeto da ferramenta [Mishra e Ma, 2005]. Nos dias atuais, existem disponíveis no mercado diversos tipos de ferramentas para o processo “*Friction Stir Welding*”, nas quais muitas delas foram e são desenvolvidas de acordo com tipo de junta e aplicação desejada (Figura 3.13) [Júnior, 2003].

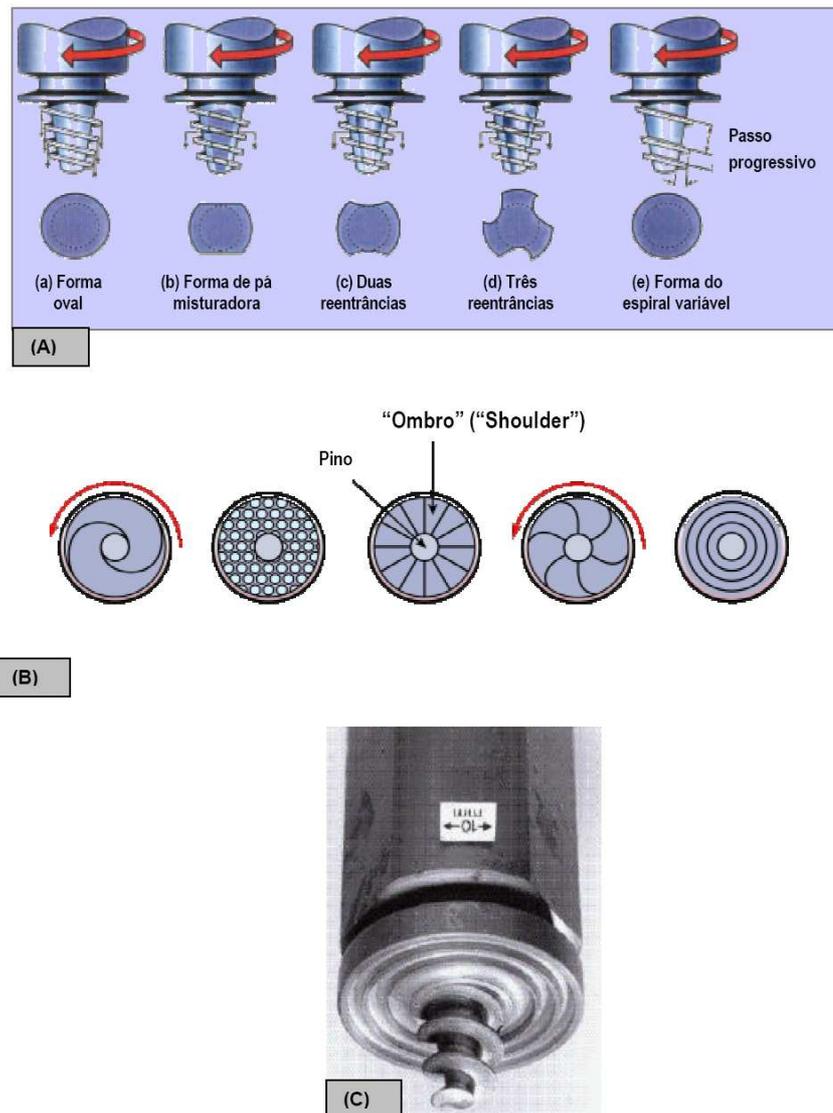


Figura 3.13. Exemplo dos diversos tipos de configurações de pinos (A) e “ombro” (B) de uma ferramenta do tipo Whorl™ utilizável na soldagem “Friction Stir Welding” das ligas da série 5XXX [Júnior, 2003].

Zhao et al., 2005, estudou a influência de quatro geometrias de pino nas propriedades mecânicas em uma FSW de uma liga de alumínio AA2014. Conforme mostrado na Figura 3.14, os pinos com rosca resultaram em soldas livre de defeitos sendo que nos ensaios de tração a ferramenta cônica com rosca apresentou os melhores resultados.

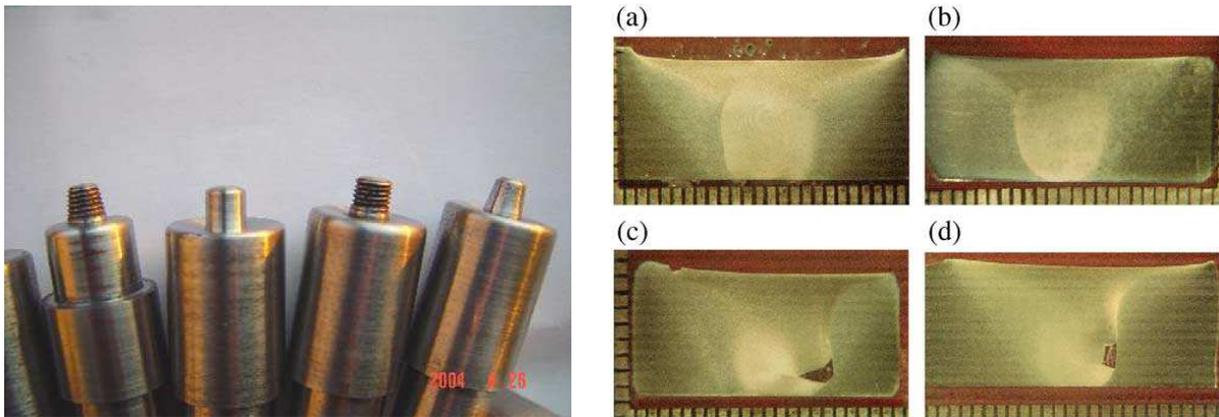


Figura 3.14. Geometria dos pinos e seções transversais resultantes da soldagem por FSW de uma liga de alumínio 2014. (a) soldagem com ferramenta cilíndrica com rosca, (b) soldagem com ferramenta cônica com rosca, (c) soldagem com ferramenta cilíndrica lisa, (c) soldagem com ferramenta cilíndrica lisa [Zhao et al., 2005].

Júnior, 2003, utilizando uma ferramenta com “ombro” côncavo e pino sem rosca alcançou propriedades mecânicas satisfatórias na soldagem de uma liga de alumínio Alclad 2524-T3. A utilização desta geometria tinha por objetivo reduzir ao mínimo o transporte do alumínio puro da superfície externa de “clad” para o interior da junta cujas conseqüências previstas, caso isto ocorresse, seriam de defeitos metalúrgicos, perda de propriedades mecânicas (baixa eficiência de junta) e degradação precoce da união por corrosão pela introdução de eletrólitos. Utilizando uma velocidade de rotação 1400 rpm e velocidade de avanço de 800 mm/min, foi obtida uma resistência à tração da junta de 57% em relação ao metal base e uma resistência fadiga comparável ao de uma junta rebitada utilizando rebites sólidos. Observações metalográficas das juntas FSW produzidas, antes e após os ensaios mecânicos, constataram que houve a condução do “clad” para o interior do metal de solda (região do “*nugget*” ou “*stir zone*”), com conseqüente redução nas propriedades mecânicas, como pode ser visto na Figura 3.15.

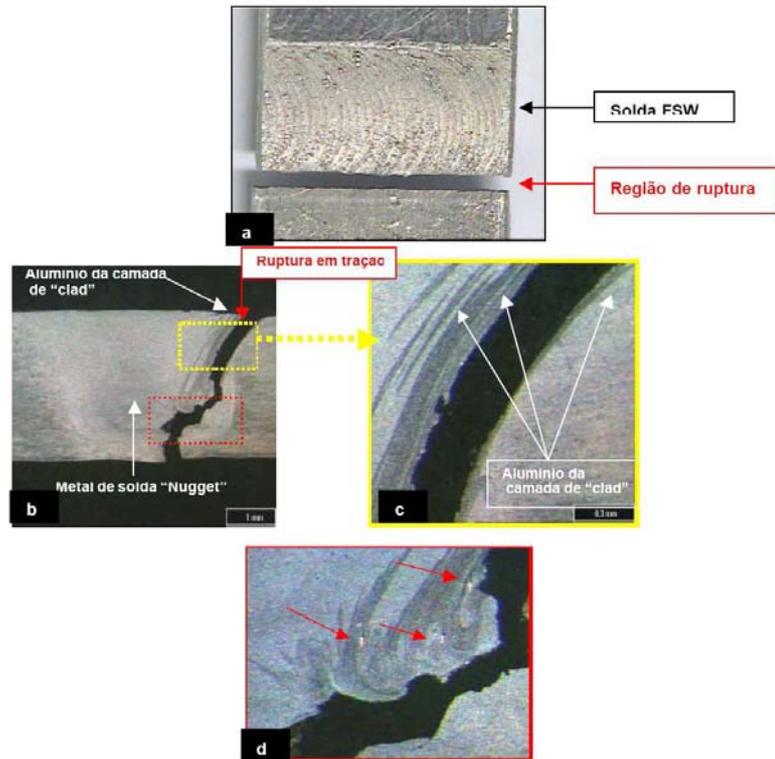


Figura 3.15. (a) Junta FSW Alclad 2524-T3 rompida em tração; (b) Seção transversal onde se nota o transporte do alumínio da camada de “clad” para o interior da junta; (c) Revela as várias camadas de alumínio puro que atuam como regiões preferenciais para a ruptura da junção; (d) Exibe as impressões de microdureza nas faixas de alumínio puro no interior da junta, que correspondem aos baixos valores presentes no perfil de microdureza da junta na região do metal de solda (“nugget”) [Júnior, 2003]. Reagente Keller.

Scialpi et al., 2007, estudando diferentes geometrias de ombro na FSW de uma liga de alumínio 6082 obteve o melhor acabamento superficial e resistência à tração da junta utilizando uma ferramenta de ombro côncavo (T_{FC}). A Figura 3.16 mostra as ferramentas e o acabamento superficial obtidos neste estudo.

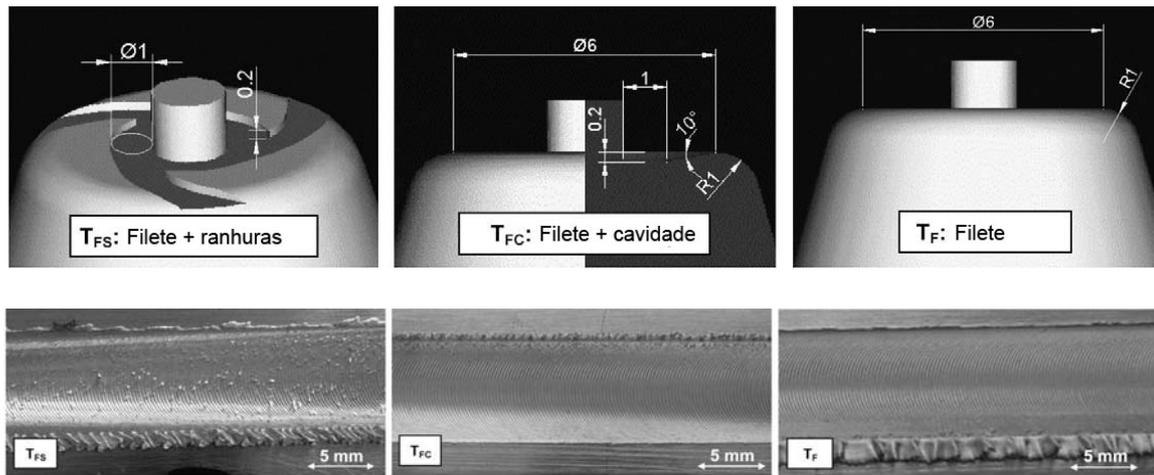


Figura 3.16. Ferramentas com diferentes geometrias de ombro e os acabamentos obtidos durante a FSW [Scialpi et al., 2007].

Elangovan e Balasubramanian, 2007a, estudaram o efeito da geometria do pino e o diâmetro do ombro nas propriedades mecânicas da junta por FSW de uma liga AA6061 com 6 mm de espessura. Utilizando 5 geometrias de ferramentas e 3 diâmetros de ombro, como mostrado na Figura 3.17, ele concluiu que a o pino quadrado com diâmetro de ombro de 18 mm apresentava as melhores propriedades mecânicas. Além disso, não foram verificados defeitos em nenhuma das soldas quando o ombro apresentava 18 mm de diâmetro.

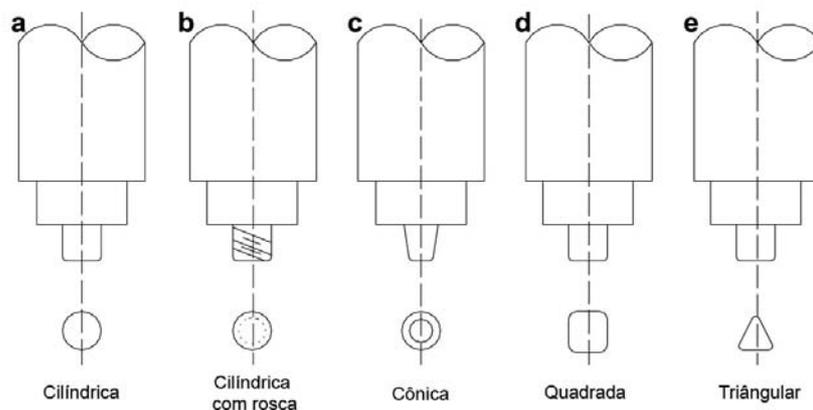


Figura 3.17. Diferentes geometrias de pinos [Elangovan e Balasubramanian., 2007a].

Em um outro estudo utilizando a liga AA2219, Elangovan e Balasubramanian, 2007b, empregando as mesmas geometrias de pino utilizadas na Figura 3.17, três velocidades de rotação distintas, e o diâmetro de ombro fixo igual a 18 mm, concluíram da mesma forma que o pino

quadrado apresentava as melhores propriedades mecânicas quando solda era efetuada com velocidade de rotação de 1600 rpm.

b. Velocidade de rotação: A velocidade de rotação esta intimamente ligada 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 atrito. A rotação da ferramenta resulta na agitação e mistura do material ao redor do pino [Mishra e Ma, 2005]. Deve ser observado que o acoplamento friccional da superfície da ferramenta com a junta governa o mecanismo de aquecimento. Desta forma, um aumento monotônico do aquecimento com o aumento da rotação da ferramenta não deve ser esperado, uma vez que o coeficiente de atrito da interface sofrerá alterações [Mishra e Ma, 2005]. Mishra e Ma, 2005, citando Kwon et al., comentam que em uma FSW de AA1050, o pico de temperatura na junta aumentou linearmente de 190 a 310°C com o aumento da rotação de 560 para 1840 rpm, a uma velocidade de avanço constante de 155 mm/min.

c. Velocidade de avanço: A velocidade de avanço ou de soldagem da ferramenta [mm/min] possui relação direta com o aporte de calor durante o processo. Baixas velocidades de avanço implicam em maior aporte de calor e temperaturas mais elevadas. A variação deste parâmetro implica consideravelmente nas propriedades mecânicas, microestrutura, no tamanho de grão, no tamanho e forma da “stir zone” como demonstrado nos trabalhos de Renck, 2005, Gharacheh et al., 2006 e Hirata et al., 2007.

d. Ângulo de inclinação da ferramenta: A inclinação da ferramenta exerce um fator importante na FSW, pois auxilia na movimentação do material da frente para trás do pino, e também na consolidação do material plastificado após a passagem do mesmo, devido a maior pressão existente nesta região [Capelari, 2006]. Chen et al., 2006, estudando o comportamento da liga AA5456 unida por FSW, relatou que se o ângulo de inclinação da ferramenta é muito pequeno ($\alpha=1^\circ$), a solda não se consolida causando um defeito superficial como mostrado na Figura 3.18 (a). Quando o ângulo se encontra no valor crítico de $1,5^\circ$ não há a formação de defeito superficial, porém na análise da seção transversal nota-se o aparecimento de um vazio na superfície da solda, no lado de avanço como mostrado na Figura 3.18 (b). Aumentando-se um pouco mais o ângulo ($\alpha = 3,5^\circ$), não há a formação de defeitos como mostrado na Figura 3.18 (c). Para o caso em que o ângulo for maior ou igual a $4,5^\circ$, a pressão relativa entre o ombro e a chapa

aumenta, 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 3.18 (d).

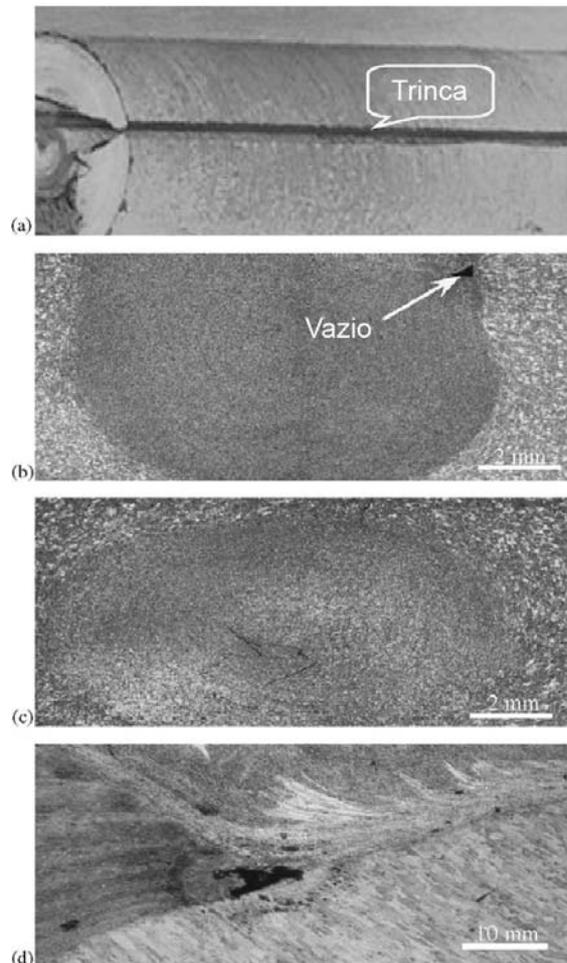
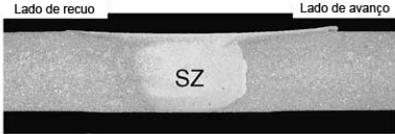
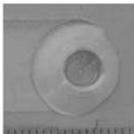
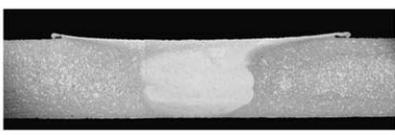
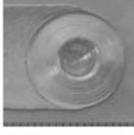
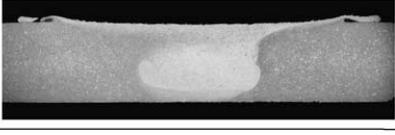
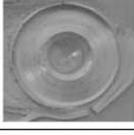
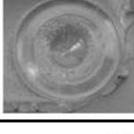


Figura 3.18. (a) Trinca contínua na superfície ($\alpha=1^\circ$), (b) Defeito tipo vazio ($\alpha=1,5^\circ$), (c) Sem defeitos aparentes ($\alpha=3,5^\circ$), (d) Defeito tipo túnel ($\alpha\geq 4,5^\circ$).

e. Penetração da ferramenta: A penetração da ferramenta é uma função do comprimento do pino e do ângulo de inclinação adotado, e define a pressão que é exercida sobre o material na parte posterior da ferramenta durante a soldagem. Quando o pino é excessivamente comprido, o ombro da ferramenta apresenta pouco contato com a chapa a ser soldada. Isto diminui a temperatura de soldagem e reduz a pressão na parte posterior do ombro sobre a chapa, resultando freqüentemente em soldas defeituosas. Isto se deve ao fato de que a fricção entre o ombro e a superfície da chapa ser a principal fonte de calor para a soldagem [Zhu e Chao, 2004]. A dimensão ideal do pino é aquela que 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].

f. Força Axial: A força axial tem uma influência considerável na geração de calor durante a soldagem e na formação de defeitos. Segundo Kim et al., 2006, para cada força axial, existe uma velocidade de rotação e de avanço apropriadas que resulta em uma solda livre de defeitos. Quanto maior a força axial, maior é o intervalo de condições próprias para uma junta FSW livre de defeitos. Por outro lado, uma força de axial alta resulta em uma maior quantidade de rebarba. As Figura 3.19 e Figura 3.20 ilustram os resultados obtidos por Kim et al., 2006.

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

1mm

5mm

Figura 3.19. Efeito da força axial na formação da solda em ADC12 fundido (Al-Si-Cu) [Kim et al., 2006].

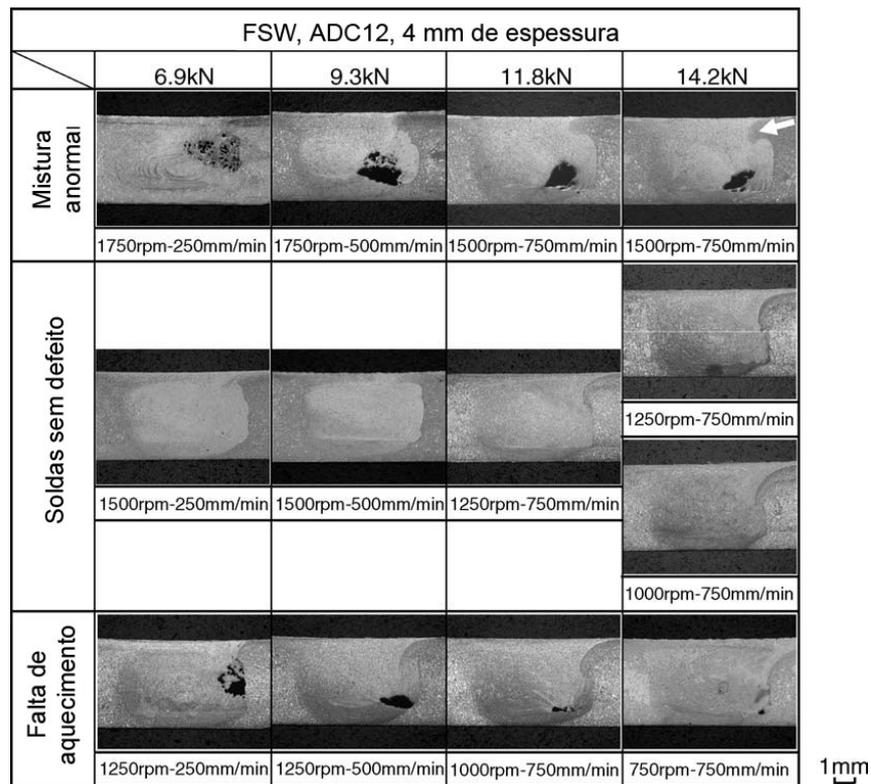


Figura 3.20. Diferentes seções transversais decorrentes dos parâmetros utilizados [Kim et al., 2006].

3.1.5. Equipamentos para Soldagem FSW

Atualmente, diversas empresas disponibilizam máquinas especialmente projetadas para a soldagem por FSW, que incluem instalações que proporcionam até 16 m de solda contínua. Estas empresas são licenciadas pela TWI no suprimento de máquinas onde destaca-se a ESAB AB (Figura 3.21), Beijing FSW Technology (Figura 3.22), MTS Systems Corporation (Figura 3.23) e Crawford Swift Limited (Figura 3.24).



Figura 3.21. ESAB SuperStirTM instalada pela TWI no laboratório de FSW em Abington, Inglaterra. Permite a soldagem de alumínio entre 1mm e 25mm de espessura, com uma força axial de até 60kN (6 ton) e velocidade máxima de 5000 RPM [Kim et al., 2006].



Figura 3.22. Equipamento de soldagem FSW desenvolvida pela Beijing FSW Technology [CFSWC, 2007].



Figura 3.23. ISTIR™ Process Development System (PDS) desenvolvida pela MTS. Com 5 graus de liberdade e controle de força permite a soldagem de materiais de 1 até 30 mm de espessura [MTS, 2007].



Figura 3.24. Powerstir 360 fabricada pela Crawford Swift. Controle numérico computadorizado de três eixos com 5 graus de liberdade produzida para suportar até 10 toneladas com a mínima distorção [Wyatt, 2007].

Em todos os exemplos apresentados, os equipamentos desenvolvidos para soldagem por FSW fazem uso de sistemas de controle de força aplicado. Quando se utilizam equipamentos robotizados, o braço manipulador não garante rigidez suficiente para se excluir o uso do controle de força. Segundo Cook et al., 2004, a força no início da soldagem pode ser de 3 a 5 vezes maior que no decorrer do processo. A força axial de reação à pressão formada pelo material plastificado na zona da solda pode variar de 1 a 15KN no alumínio. Por outro lado, segundo Cook et al., 2004, a adaptação de fresadoras que na maioria dos casos apresentam grande rigidez, não requer o monitoramento da força axial, já que a mesma se manterá constante ao longo da solda.

Conforme Zäh e Eireiner, 2005, os pré-requisitos para a obtenção de um cordão de solda com qualidade homogênea decorrem das condições constantes da soldagem. No processo por FSW usando-se fresadoras convencionais, todos os parâmetros aplicados são constantes até a profundidade em que foi baixada a ferramenta. Um dos problemas verificados, no entanto, é que durante o processo a tolerância das peças que estão sendo unidas, a deformação elástica da máquina e a dilatação térmica da ferramenta e das peças influenciam diretamente na penetração inicial aplicada.

Nos dias atuais, grande parte das fresadoras disponíveis no mercado apresenta controle numérico e de força axial sobre o eixo-árvore, permitindo a soldagem por FSW com certas vantagens sobre as máquinas dedicadas [Zäh e Eireiner, 2005]:

- amplas funções de medição e supervisão já integradas ao sistema de controle;
- freqüentemente a aquisição de fresadoras é mais econômica do que as máquinas específicas. Além disso, muitas empresas já dispõem de fresadoras;
- torna-se possível a preparação do local do cordão por fresamento e a eventual remoção do furo remanescente.

Podem ser citados inúmeros trabalhos desenvolvidos utilizando fresadoras convencionais adaptadas, muitas destas sem controle de força aplicada, como os de Colligan, 1999, Cederqvist e Reynolds, 2005, Cao e Kou, 2005, Cavaliere et al., 2006, Fratini, 2006, Capelari, 2006, Sinha et al., 2008 e Muñoz et al., 2008.

3.2. Características da Série 2000

O cobre é o principal elemento da série 2000, sendo que freqüentemente o magnésio aparece como elemento de adição secundário. Estas ligas requerem um tratamento de

solubilização para obtenção do maior grau de resistência mecânica, em muitos casos ultrapassando as propriedades mecânicas dos aços de baixo carbono. Algumas vezes é empregado o tratamento térmico de precipitação (conhecido como envelhecimento) para se obter propriedades de resistência mecânica ainda maiores. Este tratamento aumenta a tensão de escoamento do material, diminui o alongamento e apresenta pouco efeito sobre a resistência à tração [ASM Handbook V.2, 1990].

As ligas da série 2xxx não apresentam boa de resistência corrosão como a maioria das ligas de alumínio, e sob certas circunstâncias apresentam baixa resistência à corrosão intergranular. Sendo assim, estas ligas quando se encontram na forma de chapas recebem uma fina camada de alumínio puro ou de liga da série 6xxx de magnésio-silício, proporcionando uma proteção galvânica que aumenta a resistência à corrosão [ASM Handbook V.2, 1990].

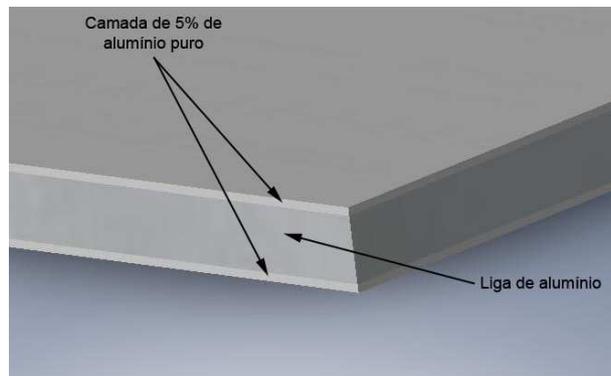


Figura 3.25. Chapa de alumínio Alclad

As ligas da série 2xxx são particularmente requeridas em partes e estruturas que requerem uma alta razão de resistência mecânica por peso e são usualmente utilizadas em rodados de caminhões e aeronaves, chapas de fuselagem e asa de aeronaves e partes estruturais que requerem boa resistência a temperaturas de até 150°C. Exceto para as ligas 2219, esta série apresentam baixa soldabilidade e superior usinabilidade [ASM Handbook V.2, 1990].

As primeiras ligas da série 2xxx apresentavam um teor de cobre entre 2-4%. Esta composição resultava em uma liga extremamente sensível a trincas de solidificação, Tanto que por muitos anos a liga foi considerada não-soldável. Aumentando-se o teor de cobre para 6% ou mais, houve uma melhora na soldabilidade da liga devido a grande quantidade de eutético disponível para preencher as trincas de solidificação a medida que elas se formavam [Mathers, 2002]. O limite de solubilidade sólida do cobre no alumínio é 5,8% à 548°C, sendo que na temperatura ambiente, o cobre está presente como uma solução sólida saturada com partículas endurecidas de CuAl_2 , na forma de precipitados finos ou grosseiros dentro dos grãos ou nos

contornos de grão [Mathers, 2002]. A liga 2024 possui entre 3,8-4,9% de cobre, 0,3-0,9% de manganês e 1,2-1,8% de magnésio sendo uma das ligas de alumínio de maior resistência mecânica, contudo apresenta forte suscetibilidade a trincas de solidificação devido a sua porcentagem de cobre.

O efeito da soldagem, nos quais ocorre fusão, em ligas endurecidas por envelhecimento é dissolver os precipitados, reduzindo em 50% a resistência à tração na condição T6. Existem casos, como a da liga 2219 ($AlCu_6$) em que parte da resistência perdida pode ser recuperada por envelhecimento artificial, porém com sensível redução da ductilidade.

3.3. Características da Série 7000

Nas ligas da série 7xxx o Zinco é o elemento de liga de maior porcentagem, variando de 1 a 8%, sendo que juntamente com uma pequena porcentagem de magnésio resulta em uma liga tratável termicamente e com alta resistência mecânica [ASM Handbook V.2, 1990]. A adição destes elementos de liga, no entanto reduzem a soldabilidade da liga devido ao aumento da suscetibilidade a trincas. Usualmente, outros elementos como cobre e cromo são adicionados em pequenas quantidades. Esta liga é largamente utilizada em estruturas de aeronaves, equipamentos móveis como trailers e trens e em partes altamente solicitadas mecanicamente [ASM Handbook V.2, 1990]. Em contrapartida, estas ligas de alta resistência exibem uma baixa resistência à corrosão sob tensão sendo algumas vezes utilizadas com tratamentos de superenvelhecimento de forma a combinar resistência mecânica, resistência à corrosão e a fratura [ASM Handbook V.2, 1990]. Em geral apresentam boa usinabilidade, forjabilidade e conformabilidade.

Com relação a soldabilidade, as ligas da série 7XXX podem ser divididas em dois grupos: o primeiro grupo, são as ligas de alta resistência contendo mais que 1% de cobre, normalmente utilizadas na indústria aeroespacial e unidas por métodos como rebitagem ou colagem [Mathers, 2002]. Fazem parte deste grupo as ligas 7022 ($AlZn5Mg3Cu$) e 7075 ($AlZn5.5MgCu1.6$), que são muito suscetíveis a trincas a quente. O segundo grupo, de média e baixa resistência, que foram desenvolvidas para serem soldadas, como as ligas 7017 ($AlZn5Mg2.5Mn0.7$), 7020 ($AlZn4.5Mg1$) e 7039 ($AlZn4Mg2.5Mn0.7$), sem adição de cobre [Mathers, 2002].

Um dos problemas peculiares da série 7XXX é que o zinco forma rapidamente um óxido durante a soldagem ao arco elétrico, afetando a tensão superficial da poça de fusão e aumentando o risco de defeitos de fusão como vazios [Mathers, 2002].

3.4. Tratamentos térmicos das Ligas de Alumínio

3.4.1. Processo de Solubilização das Ligas de Alumínio

O processo de solubilização é um tratamento térmico, cíclico, preliminar, que visa dissolver totalmente as fases microscópicas, simples ou intermediárias, presentes na matriz de uma liga, pelo aquecimento ao campo monofásico inerente. Logo após, pelo esfriamento rápido, mantemos o estado monofásico à temperatura ambiente, tornando-se a liga, às vezes, um pouco mais dura e mais deformável. A Figura 3.26 ilustra a relação de temperatura e solubilidade necessárias no processo de endurecimento por precipitação para um sistema de alumínio-cobre. A solubilidade de equilíbrio do cobre no alumínio aumenta de aproximadamente 2% a 480°C até o máximo 5,65% na temperatura eutética à 548°C. Para o caso das ligas de alumínio-cobre contendo entre 0,2 e 5,6% de Cu, são possíveis duas fases sólidas em equilíbrio. Em temperaturas acima da curva inferior da Figura 3.26 (solvus) o cobre é totalmente solúvel e quando a liga é aquecida a tal temperatura por um período suficiente de tempo para permitir a difusão, o cobre se encontrará completamente em solução sólida. Em temperaturas inferiores a linha solvus o estado de equilíbrio consiste em duas fases sólidas: solução sólida α e a solução intermetálica θ (Al_2Cu) [ASM Handbook V.4, 1991].

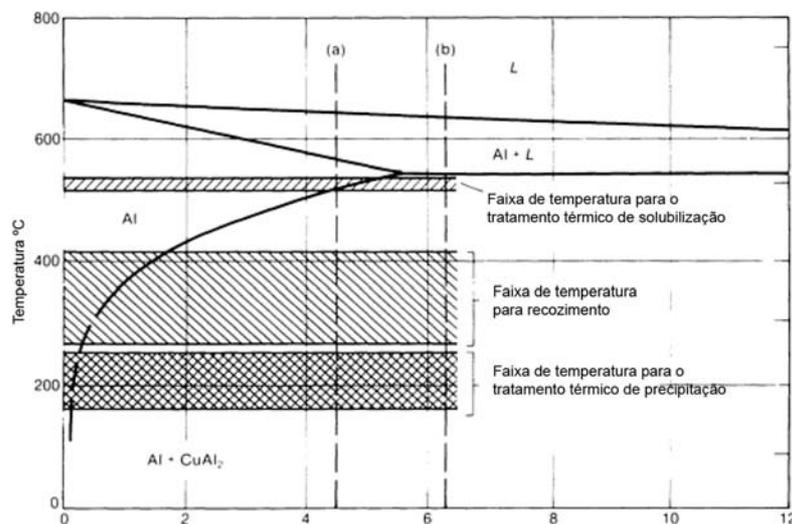


Figura 3.26. Diagrama de equilíbrio parcial de uma liga da série 2XXX com as respectivas faixas de tratamento térmicos [ASM Handbook V.4, 1991]

O propósito do tratamento de solubilização da maioria das ligas de alumínio, após os processos de laminação, conformação entre outros, é introduzir o máximo de lacunas e solutos de Cu, Mg, Si ou Zn em solução na matriz de alumínio [Roldo, 2004].

3.4.2. Processo de Precipitação ou Envelhecimento Artificial ou Natural

Consiste em uma etapa do tratamento térmico na qual finas partículas de segunda fase são homogeneamente formadas na matriz e nos contornos de grão. Este tratamento pode levar a incrementos consideráveis de até seis vezes nas propriedades mecânicas finais da liga AA7178 na condição T6, em relação ao estado recozido [Hitachi, 2007].

Quando a liga é convertida em uma solução sólida durante certo tempo acima da temperatura da linha solvus e então a temperatura cai a um patamar abaixo desta linha, a solução se torna supersaturada e a liga assume uma condição bifásica de equilíbrio onde a segunda fase tende a se formar por precipitação, como mostrado na Figura 3.27 [Askeland, 1998].

O aumento das propriedades mecânicas das ligas Al-Cu (série 2XXX) tem início após o resfriamento rápido a partir da solubilização, na qual há início da formação de segregados de solutos e núcleos de precipitados. Estes precipitados são conhecidos como as zonas de Guinier-Preston (GP) [Júnior, 2003]. A seqüência de formação destes agrupamentos é mostrada abaixo [ASM Handbook V.4, 1991] e na Figura 3.28 [Askeland, 1998]:

Solução Sólida Supersaturada SSS \rightarrow Zonas GP (GP1) \rightarrow θ'' (GP2) \rightarrow θ' \rightarrow θ (Al₂Cu)

Para as ligas Al-Zn (série 7XXX) a seqüência de formação é:

Solução Sólida Supersaturada SSS \rightarrow Zonas GP \rightarrow η' \rightarrow η (MgZn₂) ou T (Mg₃Zn₃Al₂)

O endurecimento da liga Al-Cu inicia-se com a formação da zona GP1 e atinge o seu valor máximo quando a concentração dos precipitados θ'' (GP2) também é máxima, embora alguma contribuição para o aumento da dureza possa ser creditada ao precipitado θ' , conforme mostrado nas Figura 3.27 e Figura 3.28. Com o transcorrer do tempo, ocorre um aumento do tamanho e número dos precipitados θ' e começa a ser percebido um decréscimo das propriedades mecânicas da liga endurecível por precipitação [Júnior, 2003]. Os precipitados θ' são, normalmente, maiores que os precipitados θ'' , tendo em geral comprimento de centésimos de

nanômetros. São classificados como partículas semi-coerentes, ou seja, o reticulado não é totalmente contínuo com a matriz [Roldo, 2004].

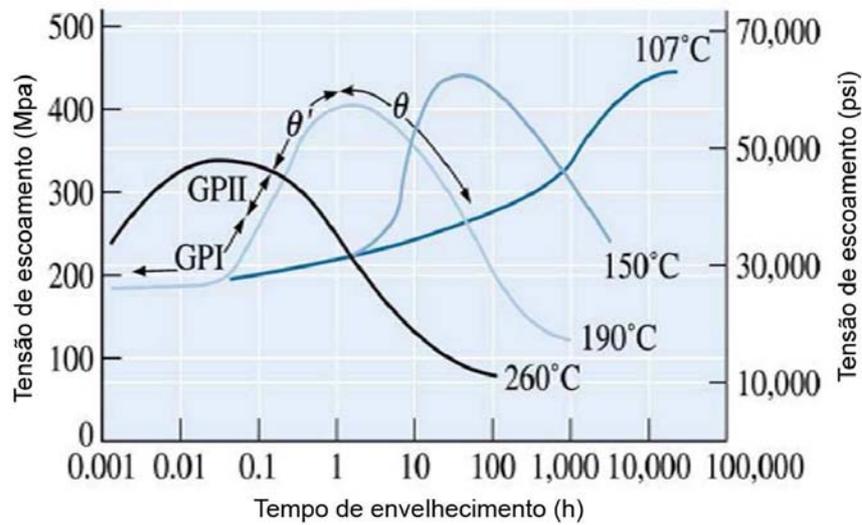


Figura 3.27. Efeito da temperatura e tempo de envelhecimento no limite de escoamento da liga Al-4%Cu. Temperaturas mais altas de envelhecimento produzem picos de resistências menores e são mais sensíveis ao tempo de envelhecimento [Askeland, 1998].

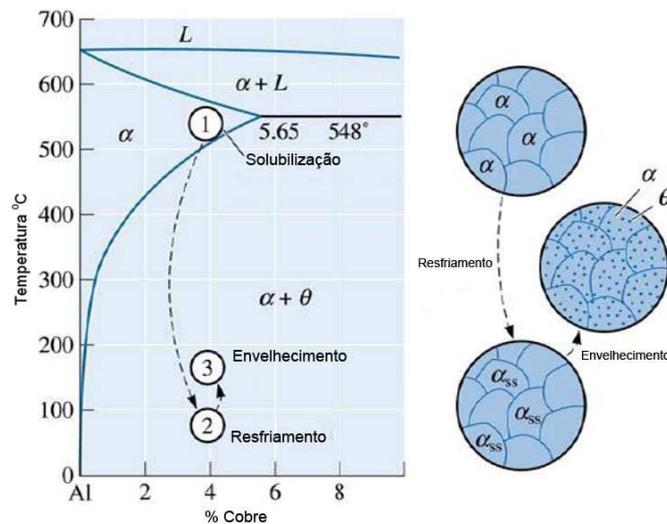


Figura 3.28. Diagrama indicando os três passos do tratamento térmico de envelhecimento ou endurecimento por precipitação, e as microestruturas produzidas em cada etapa [Askeland, 1998].

3.4.3. Superenvelhecimento

Com o crescimento dos precipitados, forma-se a fase estável ou de equilíbrio θ (Al_2Cu). Esta fase é incoerente com a matriz, havendo a formação de uma interface entre o precipitado e a matriz, aliviando totalmente as tensões, provocando perda significativa da dureza. Além disso, como os precipitados, incoerentes, estáveis e muito grandes, encontram-se muito afastados uns dos outros devido ao coalescimento, deixam um caminho livre para movimentação das discordâncias, o que também favorece a queda da resistência, típica do superenvelhecimento [Roldo, 2004] como mostrado na Figura 3.29.

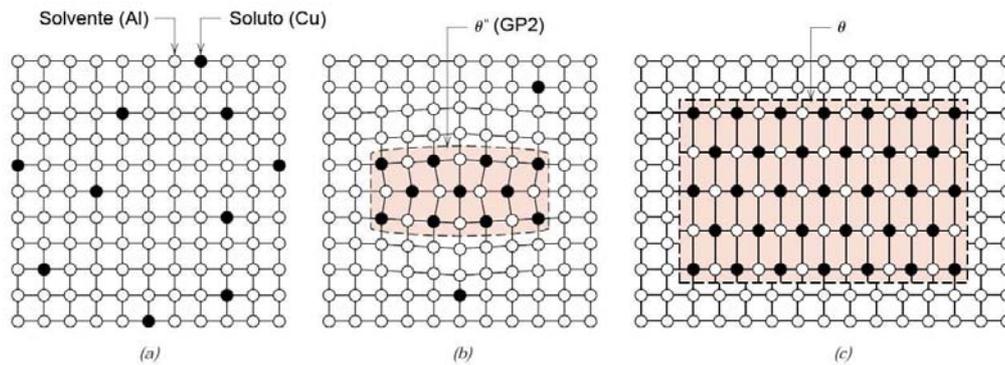


Figura 3.29. Ilustração dos estágios de formação do precipitado de equilíbrio θ . (a) Solução sólida supersaturada α (b) Precipitado de transição θ'' (c) Fase de equilíbrio θ dentro da matriz de fase α . [Callister, 2001]

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 Materiais e Equipamentos

A soldagem das chapas de alumínio pelo processo FSW foi realizada no Laboratório de Usinagem do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS. Este capítulo descreve as características dos materiais e equipamentos utilizados neste trabalho.

4.1.1 Materiais

Os materiais utilizados neste trabalho são duas ligas de alumínio distintas, na forma de chapas com 1,8 mm de espessura. Ambas as ligas são tratáveis termicamente e são consideradas de alta resistência mecânica e a fadiga. Suas especificações químicas estão apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Especificações das ligas em % peso [ASM Handbook V.2, 1990].

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Outros elementos especificados	Ti	Outros elementos não especificados	Al
2024	0,50	0,50	3,8- 4,9	0,30- 0,9	1,2- 1,8	0,10	0,25	(a)	0,15	0,15	remanescente
7075	0,40	0,50	1,2- 2,0	0,30	2,1- 2,9	0,18- 0,28	5,1- 6,1	(b)	0,20	0,15	remanescente

(a) A (Zr + Ti) limite máximo de 0,20% pode ser utilizado em produtos forjados e extrudados.

(b) A (Zr + Ti) limite máximo de 0,25% pode ser utilizado em produtos forjados e extrudados.

A chapa de AA2024 utilizada neste trabalho sofreu tratamento T3 que consiste em um tratamento de solubilização, trabalho a frio e envelhecimento natural. As principais propriedades deste material são a alta dureza e resistência à fluência a altas temperaturas. Porém, apresentam baixa resistência ao aparecimento de trincas devido à corrosão sob tensão no sentido perpendicular ao plano da chapa.

A chapa de AA7075 utilizada neste trabalho sofreu tratamento T6 que consiste em um tratamento de solubilização e envelhecimento artificial. A principal propriedade deste material é a alta resistência mecânica, em contrapartida, assim como a liga AA2024-T3, apresenta uma baixa resistência ao aparecimento de trincas devido a corrosão sob tensão no sentido perpendicular ao plano da chapa.

Tabela 4.2. Propriedades típicas de chapas das ligas Alclad AA2024-T3 e AA7075-T6 [ASM Handbook V.2, 1990].

Liga	Tensão de Ruptura [MPa]	Tensão de Escoamento [MPa]	Alongamento [%]	Dureza [HB]
2024-T3 Alclad	420	275	15	120
7075-T6 Alclad	538	469	8	150

Com relação à vida em fadiga a liga AA2024-T3 apresenta uma resistência maior quando comparada a liga AA7075-T6. Por este motivo nas aplicações aeronáuticas as ligas AA2024-T3 são utilizadas em partes que requerem alta vida em fadiga como as chapas da fuselagem.

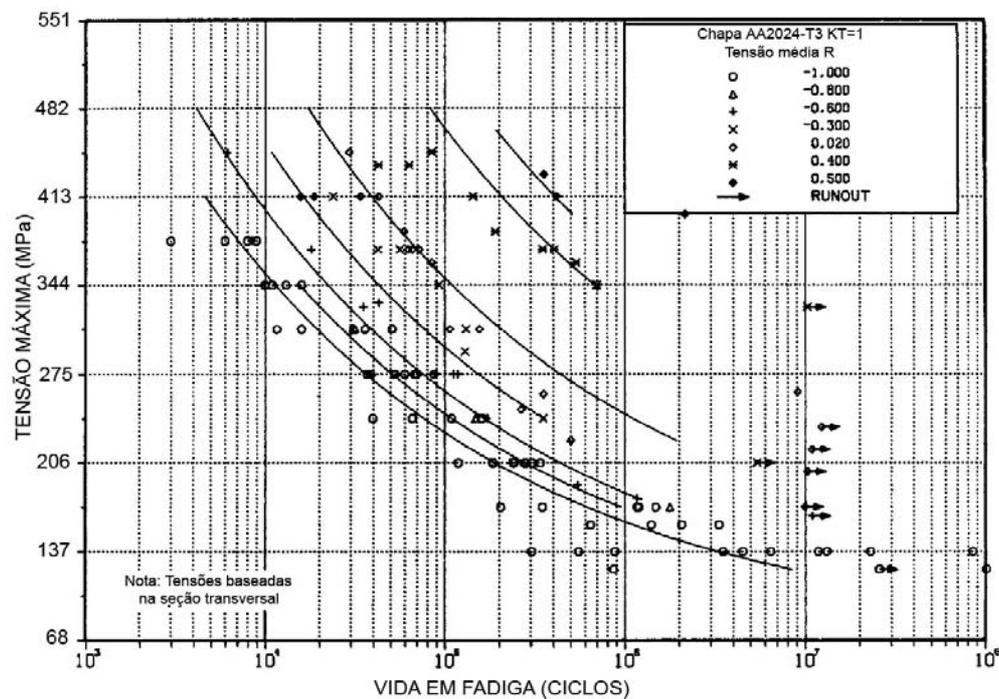


Figura 4.1. Vida em fadiga da de chapa AA2024-T3 com 2,3 mm de espessura [Rice et al., 2003].

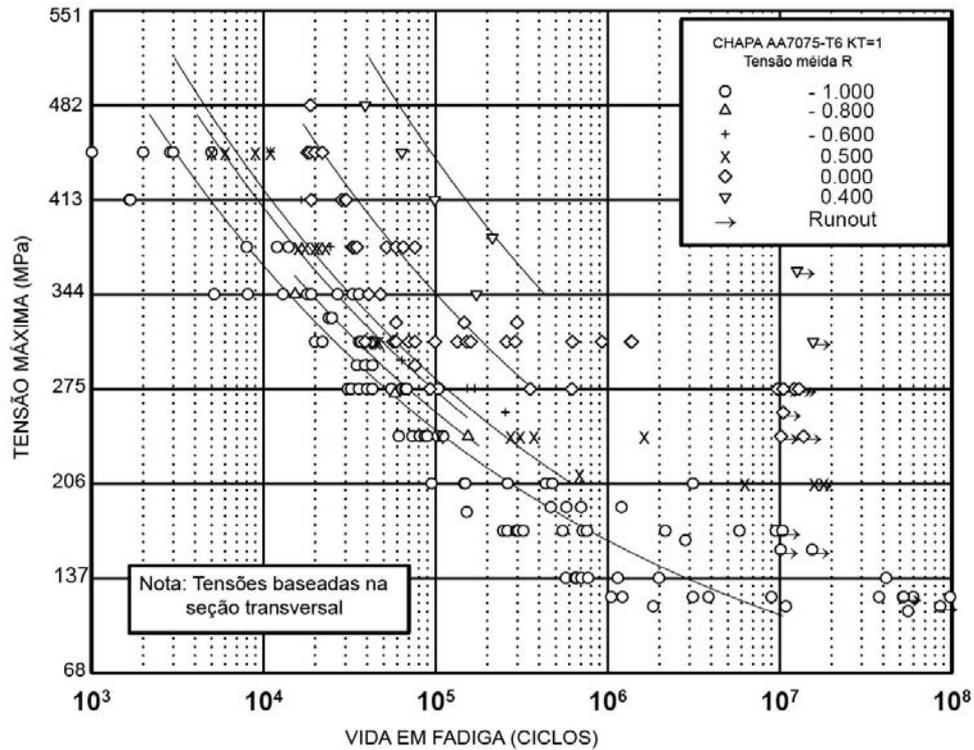


Figura 4.2. Vida em fadiga da de chapa AA7075-T6 com 2,3 mm de espessura [Rice et al., 2003].

Em relação à resistência à corrosão, as ligas AA2024 e AA7075 são consideradas de baixa resistência devido à porcentagem de cobre presente [Talbot, 1998]. Sendo assim a utilização destas ligas requer proteção superficial como camadas de alumínio puro (clad), anodização crômica, fosfatização e tintas. As formas de corrosão mais comuns nestas ligas são a intercrystalina, esfoliação e corrosão sob tensão.

Nas aplicações aeronáuticas a liga Alclad AA2024-T3 é utilizada na fabricação de painéis da fuselagem, na parte inferior da asa e em alguns reforçadores estruturais. Já a liga Alclad AA7075 é utilizada na fabricação de cavernas, reforçadores longitudinais (“stringers”) como mostrado na Figura 4.3, e na parte superior das asas.

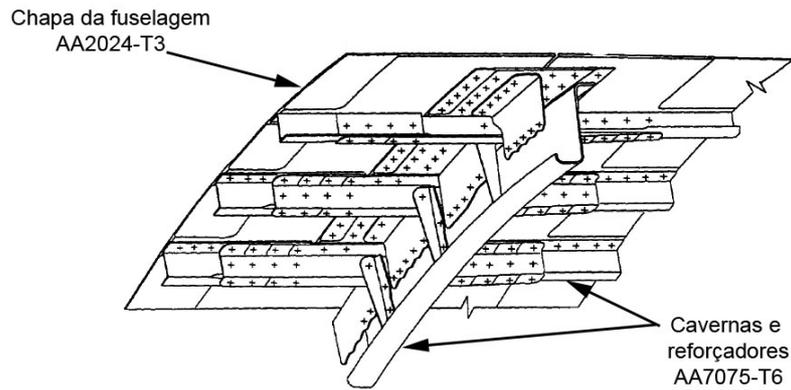


Figura 4.3. Aplicações das ligas AA2024-T3 e AA7075-T6 em um Boeing modelo 737-300.

4.1.2 Equipamentos

Para realização deste trabalho, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- a. Fresadora: para o processo de soldagem por FSW foi utilizada uma máquina fresadora universal da marca Invicta mostrada na Figura 4.4, modelo FU2, ano de fabricação 1961. A máquina possui um motor de 7,5 HP, cuja transmissão é feita por quatro correias flexíveis. A velocidade máxima de rotação no cabeçote vertical é de 1250 RPM e a velocidade de avanço máxima da mesa é 790 mm/min.



Figura 4.4. Máquina fresadora universal Invicta.

- b. Rugosímetro: A rugosidade média (R_a) da superfície da solda foi medida utilizando um rugosímetro portátil SurfTest SJ-201P da marca Mitutoyo, capacidade de medição de 350 μm e ponta de diamante.



Figura 4.5. Rugosímetro Mitutoyo.

- c. Microdurômetro: O perfil de dureza das chapas soldadas foi medido utilizando um microdurômetro da marca STRUERS, modelo Duramin 10.
- d. Macrografias: A análise macrográfica das soldas foi feita utilizando um microscópio óptico Olympus, modelo SZ40. As fotografias das macrografias foram feitas por uma câmera marca Olympus, modelo DP12.
- e. Ensaio de tração: Os ensaios de tração utilizaram a norma NBR ISO 6892/2002 e ASTM E 8M-2004, empregando uma máquina universal de ensaios EMIC, modelo DL30000, com certificado de calibração RBC 3149/2007 emitido pelo CERTI, válido até 07/2008. Os ensaios foram realizados em ambiente com temperatura e umidade controladas de 20,5°C e 57%.

4.2 Soldagem FSW – Testes preliminares

Para determinação dos parâmetros que serão utilizados para soldagem das chapas, foram realizados inúmeros testes preliminares. Primeiramente buscou-se compreender os fatores envolvidos no processo para se determinar como as soldas seriam realizadas. A primeira etapa do trabalho resumiu-se na observação dos seguintes fatores:

- a) Tamanho da rebarba.
- b) Presença de descontinuidade visível a olho nu e através da análise do corte da seção transversal por macrografias.
- c) Inspeção visual da linha de solda na raiz (penetração).

As conclusões reveladas pelos três fatores acima serviram como base para o projeto inicial do ferramental e dos parâmetros de soldagem. Inicialmente procurou-se adotar um projeto de ferramental e de parâmetros disponíveis na literatura, embora existam poucos trabalhos relacionados as ligas e espessura utilizadas. Além disso, a grande variabilidade encontrada na literatura para os parâmetros de soldagem influenciou negativamente para determinação dos mesmos. As tentativas de utilização de parâmetros utilizados em outros trabalhos muitas vezes resultaram em soldas que foram descartadas durante a inspeção visual.

Para se evitar um gasto excessivo de tempo com os ensaios preliminares foi adotado um planejamento de experimentos. Trata-se de uma metodologia apoiada fortemente em conceitos estatísticos, destinada a otimizar o planejamento, execução e análise de um experimento. O uso de Projeto de Experimentos permite que se estruture a seqüência de ensaios de forma a traduzir os objetivos pré-estabelecidos pelo pesquisador [Ribeiro e Caten, 2001].

O objetivo inicial desta análise consiste na determinação dos parâmetros de soldagem que resultem em uma solda livre de defeitos, ou com o menor defeito possível. Salientamos que o trabalho aqui apresentado não tem por meta identificar os parâmetros ótimos de soldagem das ligas Alclad AA2024-T3 e AA7075-T6 para as variáveis disponíveis no processo, uma vez que somente a inspeção visual para determinação de uma solda livre de defeitos não resultará necessariamente na solda com maior resistência mecânica. Soma-se a isso o fato de que o número de combinações disponíveis, para as variáveis do processo, ser bastante superior aos utilizados.

4.2.1 Projeto do ferramental

Para o projeto do ferramental que seria utilizado no projeto de experimentos, foi-se em busca de dados da literatura. Estudos demonstraram que a razão entre o diâmetro do ombro e a espessura da chapa deve ser igual a 3 [Deqing e Shuhua, 2004]. Utilizando uma ferramenta com estas características, foram testadas várias combinações de parâmetros, sendo que, em nenhum dos casos, pode-se obter soldas livres de defeitos durante a inspeção visual. A explicação para este fato se deve as limitações do equipamento adotado, em que a velocidade de rotação máxima é de 1250 rpm, o que não permite aumentar o aporte de calor utilizando-se apenas uma rotação mais alta. Nas etapas seguintes optou-se por aumentar o diâmetro do ombro e, por conseguinte, aumentar o aporte de calor através desta variável. Após uma nova série de testes, a geometria mostrada na Figura 4.6 produziram soldas sem defeitos aparentes pela inspeção visual. Estas

soldas foram então seccionadas no sentido transversal para análise macrográfica. Os resultados mostraram que havia defeitos de penetração nas soldas conforme a Figura 4.7.

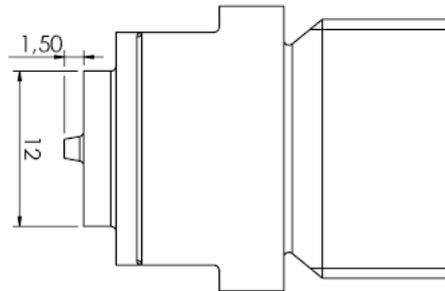
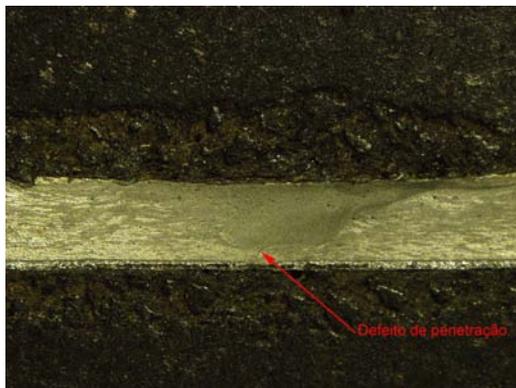
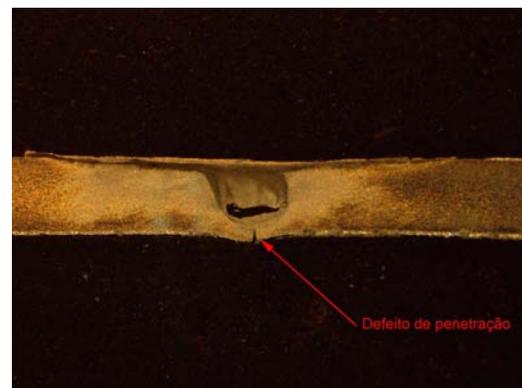


Figura 4.6. Geometria cujas soldas resultantes não apresentaram defeitos aparentes na inspeção visual. Pino com 1,5 mm e ombro com 12 mm de diâmetro. Ferramenta confeccionada em aço AISI H13 com 55 HRc de dureza.



(a)



(b)

Figura 4.7. Defeito de penetração. (a) AA2024-T3 Alclad, velocidade de rotação 1250 rpm e avanço 10mm/min (b) AA7075-T6, velocidade de rotação 1250 rpm e avanço de 10mm/min.

Além do defeito de penetração causado em algumas soldas, a quantidade de rebarba ao redor do ombro após a solda (também denominado como “flash”) era bastante considerável o que reduzia a qualidade da solda como mostrado na Figura 4.8.



Figura 4.8. Soldas com excessiva rebarba o que evidencia que o pino está muito curto.

Com o objetivo de reduzir a quantidade de rebarba gerada durante a soldagem, foi aumentado o comprimento do pino. Após alguns testes, verificou-se que o pino com 1,7 mm resultava em um solda com pouca rebarba, uma vez que a penetração do ombro ficava limitada ao contato do pino com a base. Além disso, baseado nos estudos de Scialpi et al., 2007, foi adicionado uma concavidade ao ombro como mostrado na Figura 4.9. Com base nas modificações impostas na ferramenta e utilizando uma velocidade de rotação de 1250 rpm com velocidade de avanço de 10 mm/min, foram obtidas soldas como mostrado na Figura 4.10.

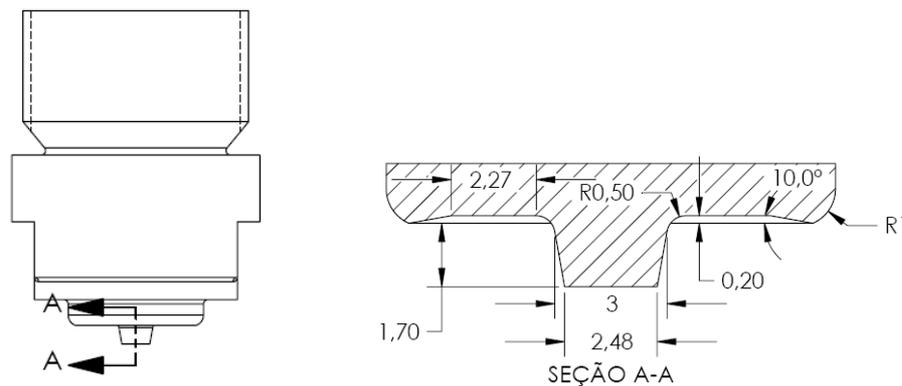


Figura 4.9. Detalhes do projeto da ferramenta com ombro côncavo e pino de 1,7 mm. O pino é apenas 0,1 mm mais curto que a espessura da chapa utilizada.



Figura 4.10. Soldagem utilizando a ferramenta da Figura 4.9 em chapa Alclad AA2024-T3.

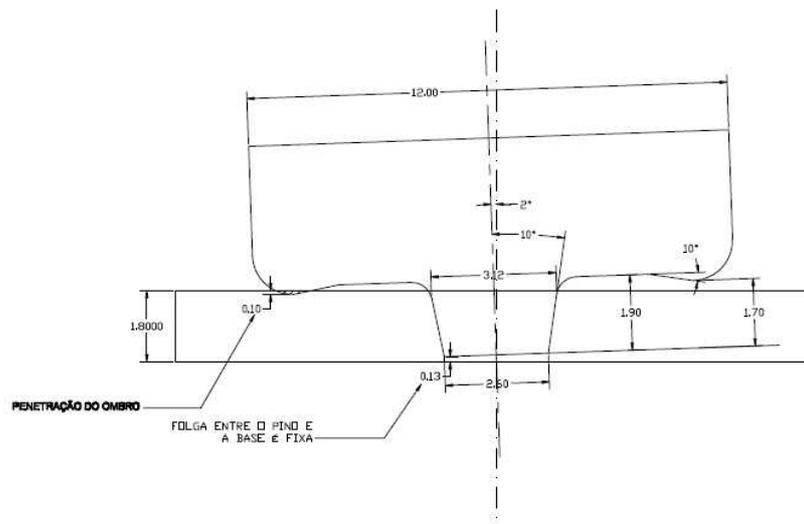
4.3 Soldagem FSW – Testes com parâmetros fixos

Com o projeto da ferramenta definido partiu-se para determinação dos parâmetros a serem utilizados durante as soldagens do pré-teste, baseado nas limitações dos equipamentos disponíveis. A Tabela 4.3 resume o projeto de experimentos utilizado.

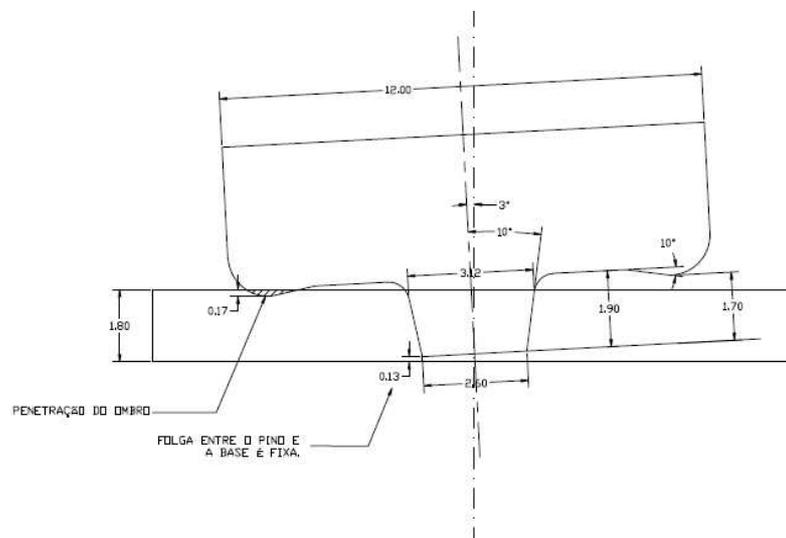
Tabela 4.3. Parâmetros utilizados.

1	Características de Qualidade	<ul style="list-style-type: none"> Solda livre de defeitos 			
2	Variáveis de resposta	Designação	Importância relativa		
		Tamanho da rebarba	menor é melhor		
		Presença de descontinuidade	menor é melhor		
		Penetração da solda	maior é melhor		
3	Parâmetros do processo	Designação	Intervalo de variação	Unidade	
		Rotação	10 a 1250	rpm	
		Avanço	10 a 750	mm/min	
		Penetração	0 a 1,8	mm	
		Ângulo de inclinação da ferramenta	0 a 4	graus	
		Diâmetro do ombro	1,8 a 25	mm	
		Comprimento do pino	0 a 1,8	mm	
		Força axial da ferramenta	desconhecido	kN	
4	Fatores Controláveis	<ul style="list-style-type: none"> Rotação Avanço Ângulo de inclinação da ferramenta Diâmetro do ombro Comprimento do pino 			
5	Definição dos níveis dos fatores controláveis	Fator	No. níveis	Níveis	Unidade
		Rotação	2	630 1250	rpm
		Avanço	2	10 56	mm/min
		Ângulo de inclinação	2	2 3	graus
		Diâmetro do ombro	2	12 16	mm
		Comprimento do pino	1	1,7	mm
6	Interações entre os fatores controláveis	<ul style="list-style-type: none"> Diâmetro do ombro x Penetração Ângulo de Inclinação x Penetração 			
7	Restrições experimentais	Ensaio sem repetição devido à baixa disponibilidade de matéria-prima.			
8	Modelo estatístico	Projeto fatorial com dois fatores			

A penetração da ferramenta não foi constante durante os testes, pois foi considerado como parâmetro fixo o recuo da ferramenta em 0,13 mm. Esta medida é a distância entre a ponta da ferramenta e a base, e teve o intuito de evitar a quebra do pino devido a eventuais vibrações da máquina. Porém este fator por si só não garante uma penetração constante do ombro sobre as peças, pois a variação da inclinação da ferramenta e do diâmetro do ombro altera a penetração como mostrado na Figura 4.11.



(a)



(b)

Figura 4.11. Variação da penetração do ombro quando o ângulo da ferramenta é alterado de 2° (a) para 3° (b).

As soldas foram realizadas utilizando chapas com dimensões de 250 x 80 mm. Primeiramente, as superfícies que ficam em contato foram fresadas para melhorar o acabamento

deixado pela guilhotina. Após a fresagem, foram efetuadas a limpeza das chapas com Metiletilcetona, removendo-se toda a gordura e detritos superficiais.

Utilizando os níveis de fatores controláveis descritos na Tabela 4.3 foram efetuadas 16 soldas com cada uma das ligas conforme mostrado nas Tabelas 4.4 e 4.5.

Após a soldagem, as amostras foram inspecionadas visualmente conforme AWS B1.10.86 sendo que os resultados preliminares são mostrados na penúltima coluna das Tabelas 4.4 e 4.5. As Tabelas 4.6 e 4.7 mostram o acabamento obtido na parte superior do cordão de solda juntamente com a rugosidade média (R_a) obtida a partir de três medidas feitas no início, meio e fim do cordão de solda (Figura 4.12). Pode-se observar que não foram obtidos valores de rugosidade dos cordões de solda que apresentavam acabamento superficial muito grosseiro, a fim de evitar a danificação do equipamento.



Figura 4.12. Medição da rugosidade média (R_a) da superfície superior do cordão de solda.

A segunda etapa da análise foi a verificação da integridade interna do cordão de solda. Para isso efetuou-se o corte transversal do cordão para visualização no microscópio. As Tabelas 4.8 e 4.9 mostram a resultados obtidos em função da variação dos parâmetros rotação, velocidade de avanço e ângulo de inclinação da ferramenta.

Tabela 4.4. Tabela de ensaios e resultados preliminares para liga AA7075-T6.

Rotação [RPM]	Velocidade de avanço [mm/min]	Ângulo da ferramenta [graus]	Penetração da ferramenta [mm]	Diâmetro do ombro [mm]	Amostra	Defeitos na inspeção visual [S/N]	Defeitos na macrografia [S/N]
630	10	3	0,27	16	1	N	N
1250	10	3	0,27	16	5	N	N
630	10	3	0,17	12	9	N	S
1250	10	3	0,17	12	6	N	N
630	56	3	0,27	16	2	N	S
1250	56	3	0,27	16	3	S	S
630	56	3	0,17	12	10	N	S
1250	56	3	0,17	12	7	S	S
630	10	2	0,17	16	14	S	S
1250	10	2	0,17	16	18	N	S
630	10	2	0,10	12	8	S	S
1250	10	2	0,10	12	11	N	N
630	56	2	0,17	16	15	S	S
1250	56	2	0,17	16	19	N	S
630	56	2	0,10	12	13	S	S
1250	56	2	0,10	12	12	S	S

Tabela 4.5. Tabela de ensaios e resultados preliminares para liga AA 2024-T3.

Rotação [RPM]	Velocidade de avanço [mm/min]	Ângulo da ferramenta [graus]	Penetração [mm]	Diâmetro do ombro [mm]	Amostra	Defeitos na inspeção visual [S/N]	Defeitos na macrografia [S/N]
630	10	2	0,10	12	13	N	S
1250	10	2	0,10	12	10	N	N
630	10	3	0,17	12	8	S	S
1250	10	3	0,17	12	7	N	N
630	56	2	0,10	12	12	S	S
1250	56	2	0,10	12	11	S	S
630	56	3	0,17	12	9	S	S
1250	56	3	0,17	12	6	S	S
630	10	2	0,17	16	14	S	S
1250	10	2	0,17	16	15	N	N
630	10	3	0,27	16	3	S	S
1250	10	3	0,27	16	1	N	N
630	56	2	0,27	16	16	S	S
1250	56	2	0,27	16	17	S	S
630	56	3	0,27	16	4	S	S
1250	56	3	0,27	16	5	S	S

Tabela 4.6. Acabamento superficial das soldas por FSW da liga AA7075-T6.

Diâmetro do ombro		Ângulo de inclinação da ferramenta			
		2°	3°	2°	3°
12 mm	16 mm	 Amostra 11. Ra: $3,62 \pm 0,59 \mu\text{m}$	 Amostra 06. Ra: $6,15 \pm 2,78 \mu\text{m}$	 Amostra 18. Ra: $2,06 \mu\text{m}^{(6)}$	 Amostra 05. Ra: $6,09 \pm 2,06 \mu\text{m}$
		 Amostra 12. Ra: $6,84 \pm 2,76 \mu\text{m}$	 Amostra 07. Ra: $5,95 \pm 0,81 \mu\text{m}$	 Amostra 19. Ra: $8,37 \pm 0,36 \mu\text{m}$	 Amostra 03. Ra: $10,19 \pm 3,01 \mu\text{m}$
Rotação		1250 rpm		1250 rpm	
Veloc. de avanço		10 mm/min		56 mm/min	

Tabela 4.6. Continuação

Diâmetro do ombro		Ângulo de inclinação da ferramenta			
		2°	3°	2°	3°
12 mm	630 rpm 10 mm/min	 Amostra 08	 Amostra 09	 Amostra 13	 Amostra 10
		 Amostra 14	 Amostra 01. Ra: 3,85 ± 2,38 µm	 Amostra 15	 Amostra 02
	630 rpm 56 mm/min				
16 mm					

Tabela 4.7. Acabamento superficial das soldas por FSW da liga AA2024-T3.

Diâmetro do ombro		Ângulo de inclinação da ferramenta			
		2°	3°	2°	3°
12 mm	 <p>Amostra 10. Ra: $2,38 \pm 0,07 \mu\text{m}$</p>	 <p>Amostra 07. Ra: $3,39 \pm 2,09 \mu\text{m}$</p>	 <p>Amostra 11. Ra: $1,92 \pm 0,29 \mu\text{m}$</p>	 <p>Amostra 06. Ra: $3,43 \pm 0,62 \mu\text{m}$</p>	
					1250 rpm 10 mm/min
16 mm	 <p>Amostra 15. Ra: $3,70 \pm 0,48 \mu\text{m}$</p>	 <p>Amostra 01. Ra: $7,45 \pm 2,40 \mu\text{m}$</p>	 <p>Amostra 17. Ra: $4,37 \pm 1,51 \mu\text{m}$</p>	 <p>Amostra 05. Ra: $4,06 \pm 1,32 \mu\text{m}$</p>	
					1250 rpm 10 mm/min

Tabela 4.7. Continuação

Diâmetro do ombro		Ângulo de inclinação da ferramenta			
		2°	3°	2°	3°
12 mm	630 rpm 10 mm/min	 Amostra 13	 Amostra 08	 Amostra 12. Ra: $5,02 \pm 2,16 \mu\text{m}$	 Amostra 09. Ra: $9,38 \pm 2,13 \mu\text{m}$
		 Amostra 14. Ra: $4,37 \pm 1,80 \mu\text{m}$	 Amostra 03. Ra: $5,62 \pm 3,77 \mu\text{m}$	 Amostra 16. Ra: $2,83 \pm 0,60 \mu\text{m}$	 Amostra 04. Ra: $4,36 \pm 1,08 \mu\text{m}$
	630 rpm 56 mm/min	 Amostra 14. Ra: $4,37 \pm 1,80 \mu\text{m}$	 Amostra 03. Ra: $5,62 \pm 3,77 \mu\text{m}$	 Amostra 16. Ra: $2,83 \pm 0,60 \mu\text{m}$	 Amostra 04. Ra: $4,36 \pm 1,08 \mu\text{m}$
		 Amostra 14. Ra: $4,37 \pm 1,80 \mu\text{m}$	 Amostra 03. Ra: $5,62 \pm 3,77 \mu\text{m}$	 Amostra 16. Ra: $2,83 \pm 0,60 \mu\text{m}$	 Amostra 04. Ra: $4,36 \pm 1,08 \mu\text{m}$
16 mm		 Amostra 14. Ra: $4,37 \pm 1,80 \mu\text{m}$	 Amostra 03. Ra: $5,62 \pm 3,77 \mu\text{m}$	 Amostra 16. Ra: $2,83 \pm 0,60 \mu\text{m}$	 Amostra 04. Ra: $4,36 \pm 1,08 \mu\text{m}$

Tabela 4.8. Macrografias da seção transversal das soldas por FSW da liga AA7075-T6. Ataque: Flick.

Diâmetro do ombro		Ângulo de inclinação da ferramenta			
		2°	3°	2°	3°
12 mm	16 mm				
		Amostra 11	Amostra 05	Amostra 19	Amostra 03
		1250 rpm 10 mm/min		1250 rpm 56 mm/min	
		Veloc. de avanço			

Tabela 4.8. Continuação

Diâmetro do ombro		Ângulo de inclinação da ferramenta					
		2°	3°	2°	3°		
Rotação Veloc. de avanço	630 rpm 10 mm/min	12 mm	 Amostra 08	 Amostra 09	16 mm	 Amostra 14	 Amostra 01
		630 rpm 56 mm/min	 Amostra 13	 Amostra 10	 Amostra 15	 Amostra 02	

Tabela 4.9. Macrografias da seção transversal das soldas por FSW da liga AA2024-T3. Ataque: Flick.

Diâmetro do ombro		Ângulo de inclinação da ferramenta			
		2°	3°	2°	3°
12 mm	16 mm	 Amostra 10	 Amostra 07	 Amostra 11	 Amostra 06
		1250 rpm 10 mm/min		1250 rpm 56 mm/min	
		Rotação		Veloc. de avanço	

Tabela 4.9. Continuação

Diâmetro do ombro		Ângulo de inclinação da ferramenta			
		2°	3°	2°	3°
12 mm	630 rpm 10 mm/min	 Amostra 13	 Amostra 08	 Amostra 12	 Amostra 09
		 Amostra 14	 Amostra 03	 Amostra 16	 Amostra 04
16 mm	630 rpm 56 mm/min	 Amostra 13	 Amostra 08	 Amostra 12	 Amostra 09
		 Amostra 14	 Amostra 03	 Amostra 16	 Amostra 04

Baseado nos resultados apresentados pelas tabelas acima, quatro soldas de cada uma das ligas apresentaram isenção de defeitos durante a inspeção visual e análise macrográfica conforme destacado nas Tabelas 4.8 e 4.9. Para liga AA7075-T6 as amostras isentas de defeitos são números 1, 5, 6 e 11 e para liga AA2024-T3 são 1, 7, 10 e 15.

Pode-se observar que as medidas de rugosidade média (Ra) demonstram que para liga AA7075-T6 os menores valores encontrados foram para soldas efetuadas com a maior velocidade de rotação da ferramenta (1250 rpm), sendo que para os casos onde a rotação utilizada foi de 630 rpm, foi possível fazer a medição em apenas uma solda. Para liga AA2024a diferença entre as rugosidades médias não demonstra nenhuma tendência acentuada em relação às rotações e avanços utilizados, porém nota-se uma concentração dos menores valores de rugosidade para a rotação de 1250 rpm.

Outro fator relevante observado após os ensaios, e pouco discutido na literatura, foi o grau de empenamento das chapas soldadas, conforme mostrado na Figura 4.13.

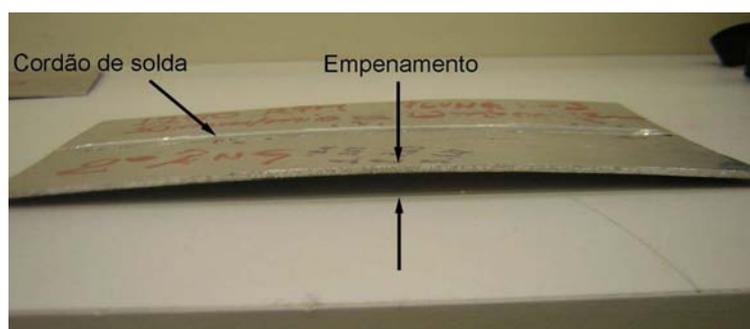


Figura 4.13. Empenamento apresentado pelas chapas após a soldagem por FSW.

Para as soldas efetuadas com a liga AA2024-T3 e velocidade de rotação de 1250 rpm, a medida do empenamento foi em média de 4,2 mm, e para velocidade rotação de 630 rpm de 3 mm. Para as soldas efetuadas com a liga AA7075-T6 e velocidade de rotação de 1250 rpm, a medida do empenamento foi em média de 6,3 mm, e para velocidade rotação de 630 rpm de 4,5 mm. Isto demonstra que o grau de empenamento está diretamente ligado ao aporte de calor gerado pela rotação de ferramenta.

4.4. Soldagem FSW – Parâmetros Fixos

Definidos os parâmetros capazes de produzir soldas livres de defeitos partiu-se para escolha daqueles nos quais serão efetuados os ensaios finais. A fim de obter resultados de soldas

utilizando parâmetros semelhantes para ambas as ligas, optou-se por reproduzir as seguintes amostras:

Tabela 4.10. Parâmetros utilizados

Liga	Amostra	Diâmetro do ombro [mm]	Rotação [RPM]	Velocidade de avanço [mm/min]	Ângulo da ferramenta [graus]	Penetração da ferramenta [mm]
AA7075-T6	06	12	1250	10	3	0,17
AA2024-T3	10	12	1250	10	2	0,10
AA2024-T3 /AA7075-T6	-	12	1250	10	3	0,17

Adicionalmente, foram efetuadas soldas unindo os dois materiais para efeitos comparativos, sendo que a liga AA2024-T3 foi posicionada no lado de avanço e a liga AA7075-T6 no lado de recuo conforme recomendado por Khodir e Shibayanagi, 2008. Os parâmetros utilizados foram aqueles que resultaram em soldas livres de defeitos para as duas ligas.

As dimensões das chapas utilizadas para soldagem foram de 250 x 85 mm. Todas as chapas foram fresadas para as dimensões finais proporcionando um ótimo acabamento superficial das bordas. As chapas foram soldadas em temperatura ambiente, sem pré ou pós-aquecimento do material. O seguinte procedimento padrão foi adotado para soldagem das chapas:

- Limpeza das chapas com Metiletilcetona
- Fixação das chapas no suporte de soldagem
- Alinhamento da junta com o deslocamento do pino da ferramenta
- Ajustagem da velocidade, rotação e ângulo da ferramenta
- Início da rotação da ferramenta
- Penetração da ferramenta
- Rotação da ferramenta sem avanço durante 30 segundos (dwell time)
- Deslocamento longitudinal da ferramenta em modo automático
- Parada do deslocamento longitudinal e retirada da ferramenta
- Remoção da chapa soldada.

4.5 Retirada dos corpos de prova

Efetuada a soldagem, foram retirados os corpos de prova para dobramento, tração e microdureza utilizando corte por eletroerosão a fio. Na Figura 4.14 é mostrado um desenho

esquemático do posicionamento dos corpos de prova e a correspondente identificação dos mesmos.

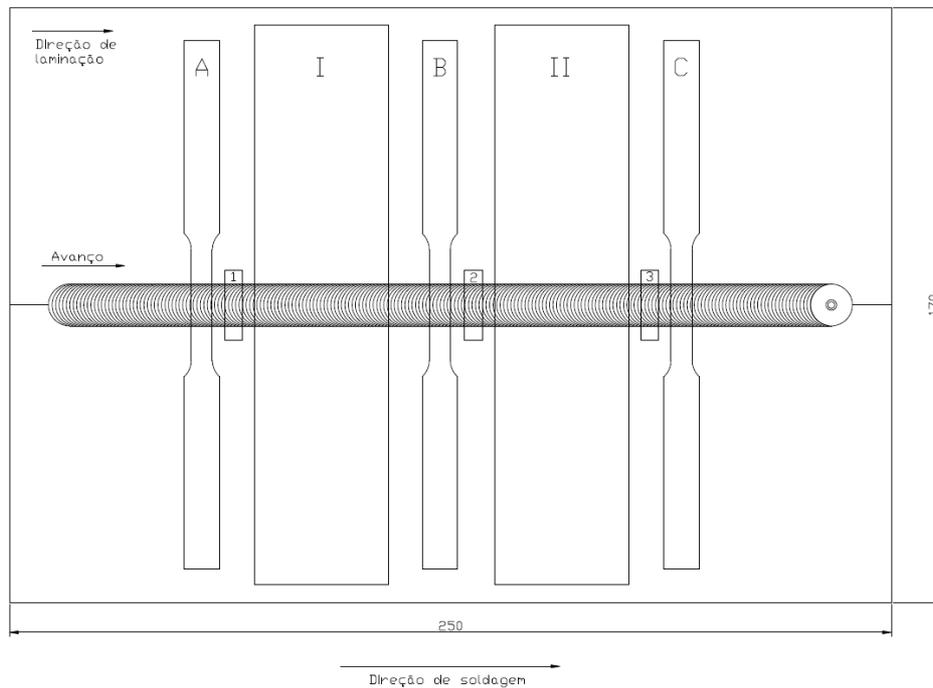
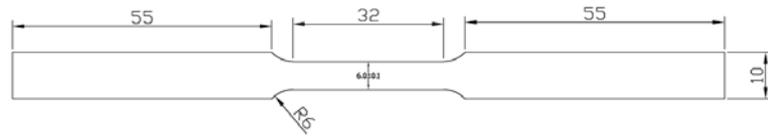


Figura 4.14. Desenho esquemático da retirada dos corpos de prova para análise.

Para cada solda foram retirados três corpos de prova para tração (A, B e C), dois para dobramento (I e II) e três para análise macrográfica e do perfil de microdureza (1, 2 e 3). Conforme a AWS D1.2/D1.2M:2003 os primeiros 30 mm iniciais de cada solda foram descartadas, o que satisfaz também a AWS B4.0-98 que requer um pouco menos, 20 mm.

Os corpos de prova de dobramento foram confeccionados conforme a norma ASTM E 190 – 97 e os de tração conforme E 8M – 98 para os corpos de prova de tamanho reduzido. As dimensões dos corpos de prova estão mostrados na Figura 4.15.



(a)



(b)

Figura 4.15. (a) Corpo de prova de tração conforme E8M-98 (b) Corpo de prova de dobramento conforme E190-97.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Macrografia da Seção Transversal

Utilizando as amostras 1, 2 e 3 removidas das três soldas conforme Figura 4.14, foram feitas macrografias da seção transversal para verificação de defeitos. Como as soldas utilizaram os parâmetros definidos nas Tabelas 4.8 e 4.9, para aquelas onde não foram observados defeitos, pode-se confirmar a boa repetitividade do processo através destas macrografias. Como podem ser vistos nas Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 não foram visualizados defeitos óbvios nas soldas.

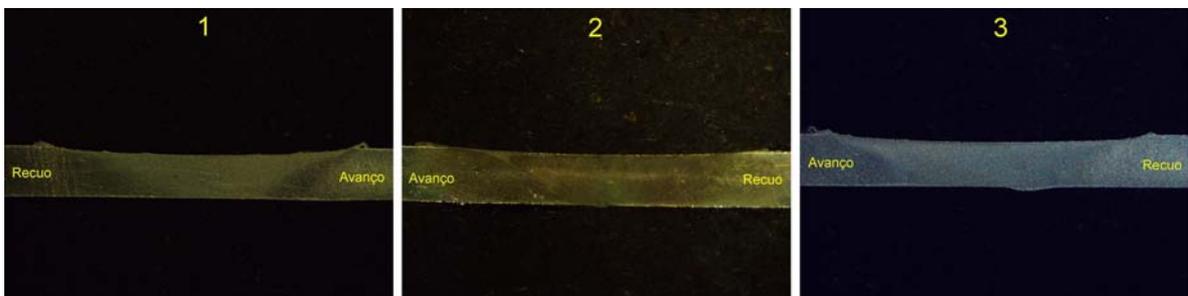


Figura 5.1. Seção transversal da solda utilizando a liga AA7075-T6.



Figura 5.2. Seção transversal da solda utilizando a liga AA2024-T3.

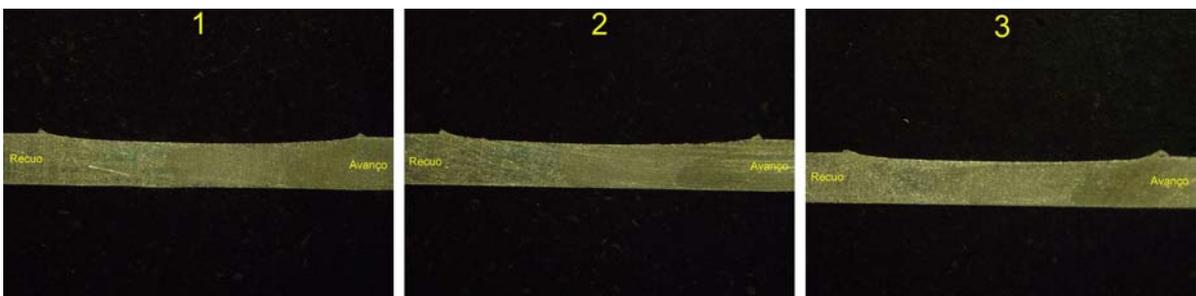


Figura 5.3. Seção transversal da solda utilizando a liga AA7075-T6 no lado de recuo e a liga AA2024-T3 no lado de avanço.

5.2 Ensaio de Dobramento

Para os ensaios de dobramento a escolha dos corpos de prova foi aleatória, não sendo observado se a amostra era proveniente do início ou do fim da solda. Sendo assim, a distribuição dos ensaios foi feita conforme mostrado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1. Identificação dos corpos de prova para o ensaio de dobramento.

Material	Nº da amostra	Dobramento de Face	Dobramento de Raiz
2024-T3	I	X	
	II		X
7075-T6	I		X
	II	X	
2024-T3/7075-T6	I	X	
	II		X

Os resultados dos ensaios de dobramento são mostrados nas Figuras 5.4, 5.5 e 5.6.

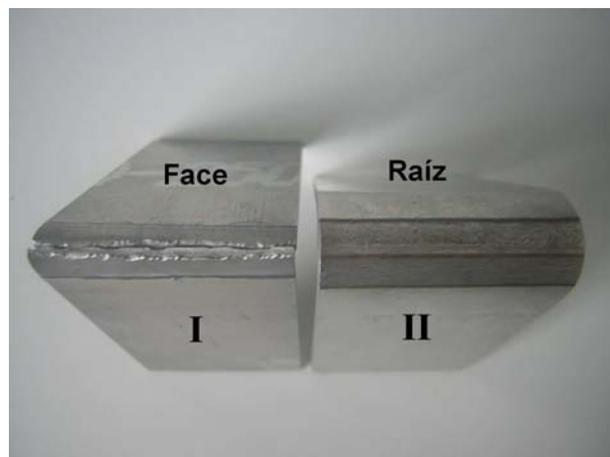


Figura 5.4. Resultado dos ensaios de dobramento para a liga AA2024-T3.

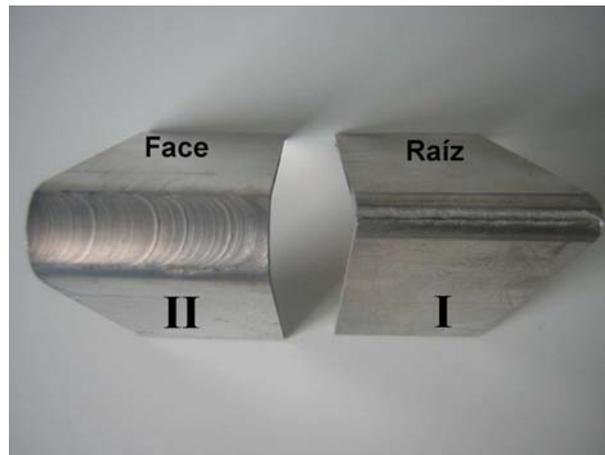


Figura 5.5. Resultado dos ensaios de dobramento para a liga AA7075-T6.

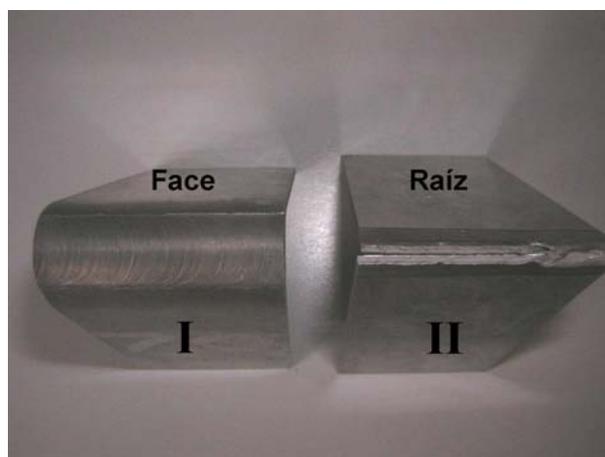


Figura 5.6. Resultado dos ensaios de dobramento para a liga AA2024-T3 (lado de avanço) e AA7075-T6 (lado de recuo).

Os resultados demonstraram que os corpos de prova retirados do início da solda das ligas Alclad AA2024-T3 e AA7075-T6 romperam completamente, exceto para a soldagem utilizando ambas as ligas onde o corpo de prova do final acabou rompendo. Isto evidencia que o início da solda apresenta a propriedade mecânica de ductilidade diferente do final da solda. Desta forma, torna-se necessário uma avaliação mais aprofundada de qual fator é responsável por esta diferença.

5.2.1 Variação da Temperatura durante a Soldagem

De forma a não comprometer os resultados apresentados pelos corpos de prova sem a verificação de uma hipótese do fator que estaria causando o rompimento dos corpos de prova do início do cordão de solda, optou-se por efetuar uma medição da temperatura ao longo da

soldagem. Utilizando-se um pirômetro fixado ao cabeçote da máquina e um sistema de aquisição de dados, foi monitorada a temperatura próxima a ferramenta de FSW, conforme mostrado na Figura 5.7.



Figura 5.7. Aquisição de temperatura próxima à ferramenta de FSW.

O sistema de aquisição de dados utilizou a seguinte combinação de parâmetros:

- Emissividade do Alumínio: 0,1 (alumínio polido)
- Taxa de aquisição: 10 Hz
- Tempo de aquisição: 30 minutos
- Inclinação do pirômetro em relação a superfície: 45°
- Obtenção de temperatura 4 cm a frente da ferramenta de FSW.

A temperatura obtida com o sistema mostrado acima apresenta algumas limitações sendo que a principal delas é a de que a emissividade varia com o ângulo e com a temperatura, de forma que o valor tomado como referência apresenta um erro considerável. Além disso, o valor de temperatura obtido não representa a temperatura do metal em contato com a ferramenta, mas sim próxima a ela. Apesar dessas limitações, para efeitos comparativos, a curva obtida evidenciou que havia uma grande variação de temperatura durante a soldagem conforme mostrado na Figura 5.8.

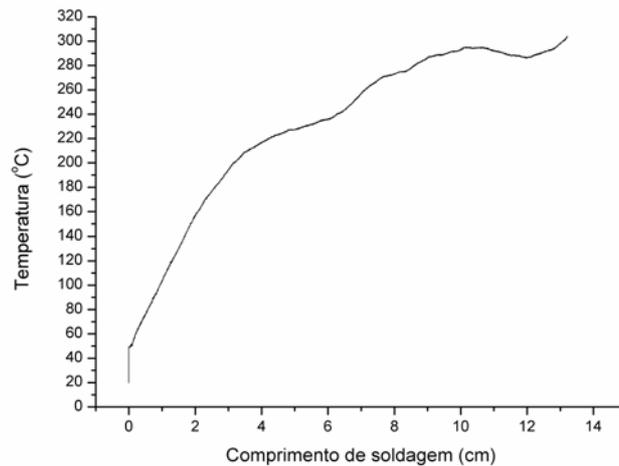


Figura 5.8. Aquisição de temperatura ao longo do comprimento de 14 cm durante a soldagem por FSW.

Com base nos resultados apresentados foi proposta uma nova seqüência de ensaios utilizando o ombro da ferramenta com 16 mm de diâmetro com o intuito de minimizar esta variação de temperatura, aumentando o calor gerado pelo ombro. Nesta segunda etapa, não foi efetuada a soldagem da liga AA7075-T6 com a AA2024-T3. Para seleção dos parâmetros de soldagem foram utilizados os parâmetros da amostra 1 da liga AA2024-T3 e da amostra 5 da liga AA7075-T6, mostrados nas Tabelas 4.8 e 4.9 respectivamente, por serem estas livres de defeitos.

Tabela 5.2. Identificação dos corpos de prova para o ensaio de dobramento das soldas utilizando ombro com 16 mm de diâmetro.

Material	Nº da amostra	Dobramento de Face	Dobramento de Raiz
2024-T3	I	X	
	II		X
7075-T6	I	X	
	II		X

Os resultados dos ensaios de dobramento são mostrados na Figura 5.9 e Figura 5.10 abaixo:

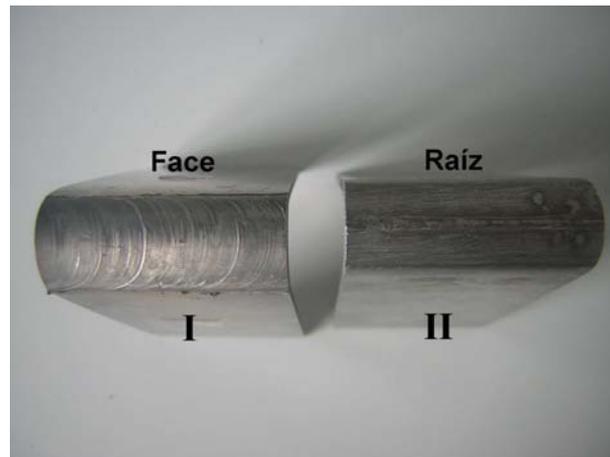


Figura 5.9. Resultado dos ensaios de dobramento para a liga AA 2024-T3.

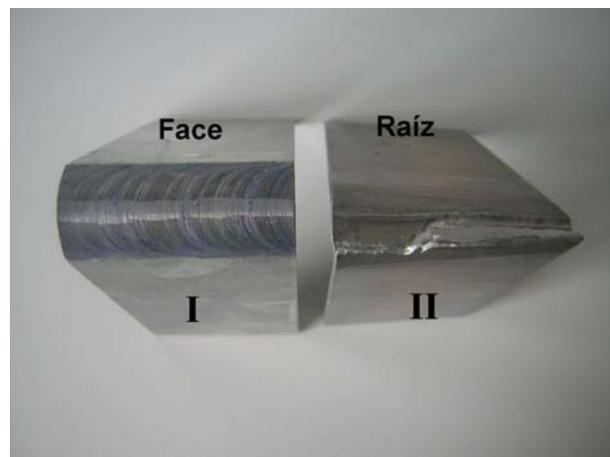


Figura 5.10. Resultado dos ensaios de dobramento para a liga AA7075-T6.

Pode-se observar que a hipótese se tornou válida para a liga AA2024-T3, porém não se mostrou determinante na soldagem da liga AA7075-T6, pois ocorreu novamente o rompimento da amostra no dobramento de raiz.

5.3 Perfil de Dureza

As Figura 5.11 à Figura 5.15 mostram os gráficos com os valores de microdureza encontrados na seção transversal das soldas produzidas com as duas ferramentas empregadas. Cada ponto representa a média do valor de microdureza em uma dada posição da seção transversal das amostras 1, 2 e 3 da Figura 4.14. Nos gráficos apresentados são mostrados os valores de microdureza medidos ao longo de 10 mm para cada lado a partir do centro do cordão de solda. Os valores positivos representam a distância medida no lado de recuo da ferramenta.

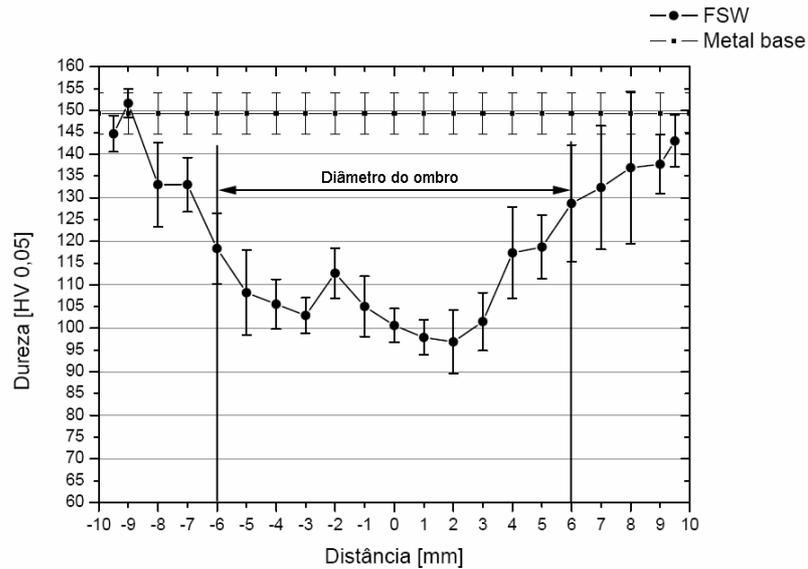


Figura 5.11. Perfil de dureza da solda por FSW da liga AA2024-T3 utilizando a ferramenta com 12mm de ombro, 1250 rpm e avanço de 10 mm/min. O lado de recuo está à direita do gráfico.

Para soldagem mostrada na Figura 5.11, percebe-se uma queda de aproximadamente 50HV próximo ao centro da solda quando comparado ao metal base. O menor valor médio de dureza encontrado foi de 96,9 HV e representa 65% do valor encontrado para o metal base. Observa-se que não há uma recuperação da dureza considerável na região próxima ao centro da solda o que está de acordo com o trabalho de Júnior, 2003, que efetuou soldas por FSW em ligas Alclad AA2524-T3 cujas propriedades são similares à liga AA2024-T3.

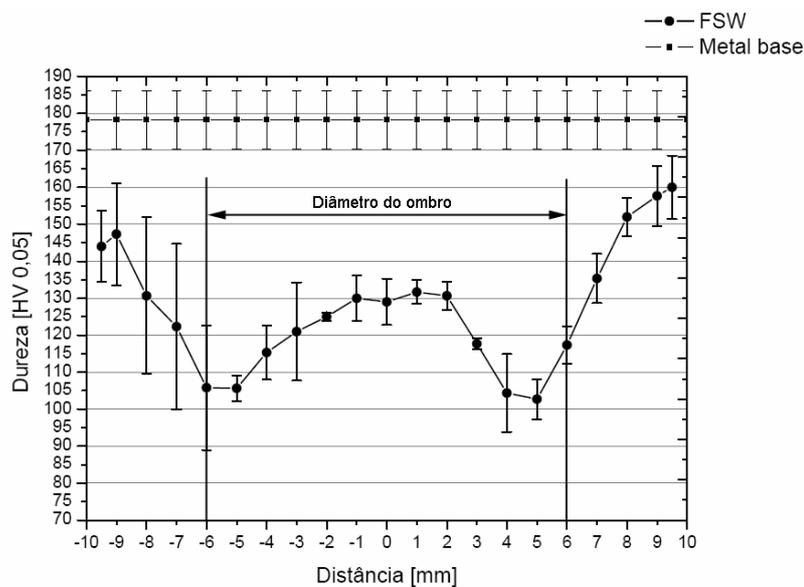


Figura 5.12. Perfil de dureza da solda por FSW da liga AA7075-T6 utilizando a ferramenta com 12 mm de ombro, 1250 rpm e avanço de 10 mm/min.

Para soldagem mostrada na Figura 5.12, percebe-se uma queda na dureza de aproximadamente 76 HV próxima à zona termicamente afetada quando comparada ao metal base. O menor valor médio de dureza encontrado foi de 102,7 HV e representa 57% do valor encontrado para o metal base. Observa-se que há recuperação da dureza na região próxima ao centro da solda, similar ao perfil de dureza verificado por Barcellona et al, 2006, que efetuou soldas por FSW utilizando a mesma liga de alumínio, porém sem a camada clad.

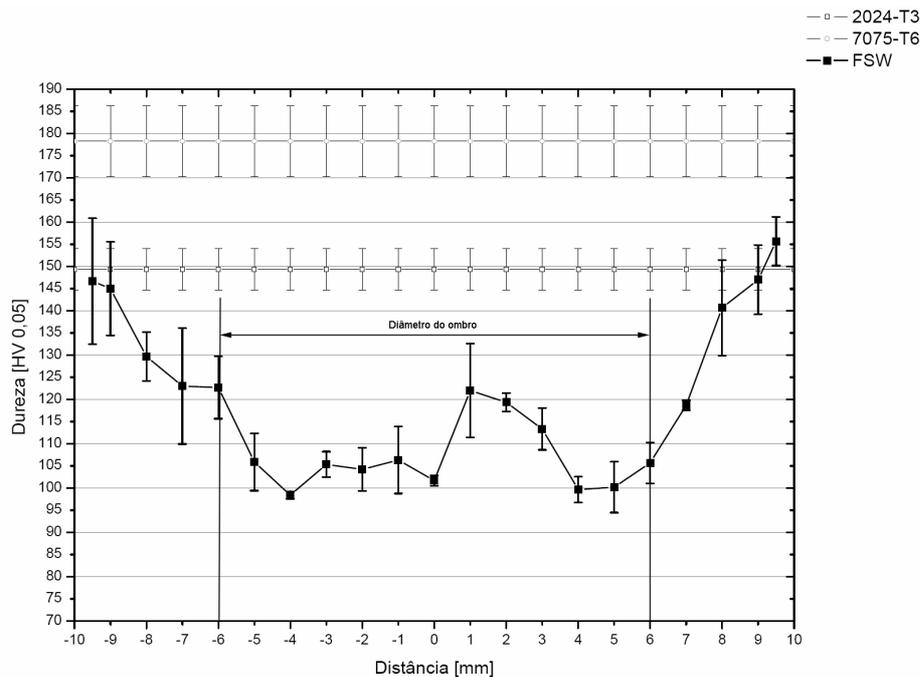


Figura 5.13. Perfil de dureza da solda por FSW das ligas AA2024-T3 no lado de avanço e AA7075-T6 no lado de recuo utilizando a ferramenta com 12 mm de ombro, 1250 rpm e avanço de 10 mm/min.

Para soldagem mostrada na Figura 5.13, percebe-se uma queda da dureza de aproximadamente 50 HV no lado de avanço e de 70HV no lado de recuo, próximo à zona termicamente afetada, quando comparada ao metal base. O menor valor médio de dureza encontrado foi de 98,4 HV no lado de recuo (AA7075-T6) e representa 55% do valor encontrado para o metal base. Nota-se que há uma pequena recuperação da dureza na região próxima ao centro da solda, similar ao reportado por Cavaliere et al., 2006, que efetuou soldas por FSW utilizando as mesmas ligas de alumínio, porém sem a camada clad.

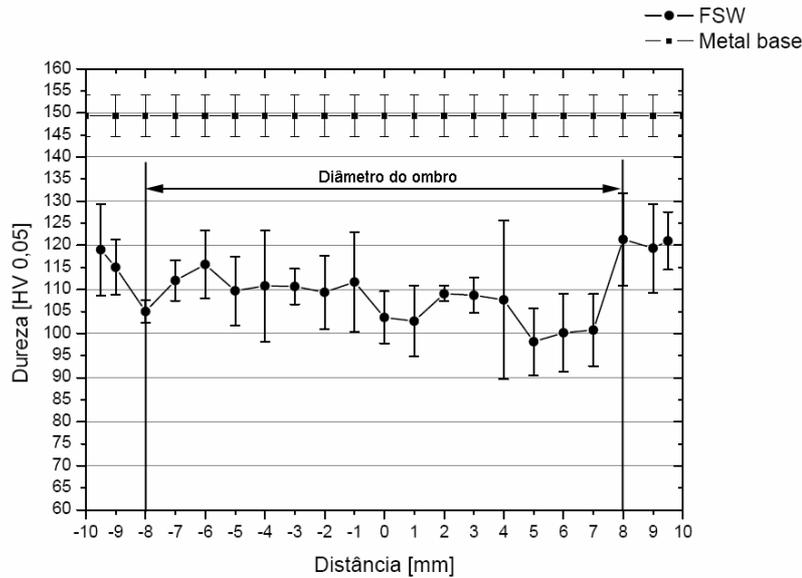


Figura 5.14. Perfil de dureza da solda por FSW da liga AA2024-T3 utilizando a ferramenta com 16 mm de ombro, 1250 rpm e avanço de 10 mm/min.

Para soldagem mostrada na Figura 5.14, percebe-se uma queda de aproximadamente 51 HV na zona termicamente afetada, quando comparada ao metal base. O menor valor médio de dureza encontrado foi de 98,1 HV, o que representa 65% do valor encontrado para o metal base. Observa-se que não há uma recuperação da dureza considerável na região próxima ao centro da solda, ou seja, demonstrando um comportamento similar ao da Figura 5.11. Nota-se também que não foi possível determinar a distância mínima onde a dureza alcança o valor do metal base. Isto se deve ao fato de que o tamanho da amostra é inferior ao da zona termicamente afetada.

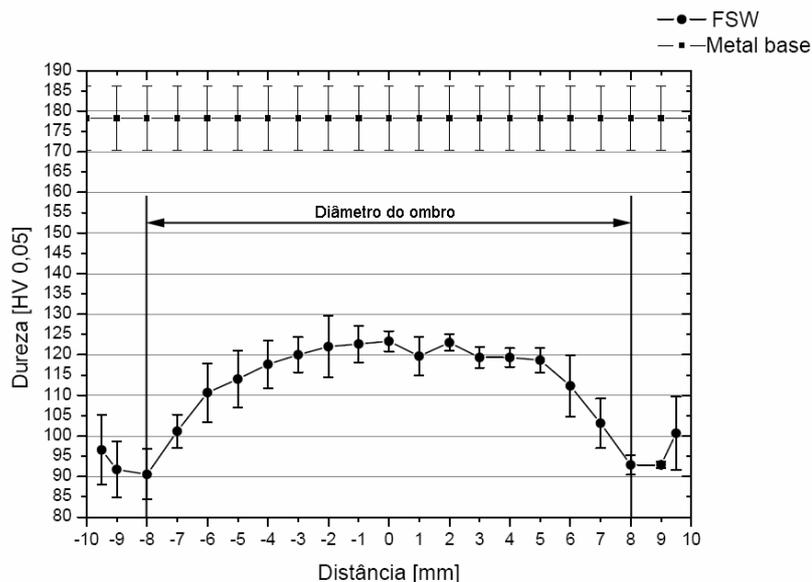


Figura 5.15. Perfil de dureza da solda por FSW da liga AA7075-T6 utilizando a ferramenta com 16 mm de ombro, 1250 rpm e avanço de 10 mm/min.

Para soldagem mostrada na Figura 5.15, percebe-se uma queda na dureza de aproximadamente 87 HV na zona termicamente afetada, quando comparada ao metal base. O menor valor médio de dureza encontrado foi de 90,5 HV e representa 50% do valor encontrado para o metal base. Observa-se que há uma recuperação considerável da dureza na região próxima ao centro da solda, ou seja, com um comportamento similar ao da Figura 5.12. Conclui-se também que, da mesma forma como na figura anterior, não foi possível determinar a dimensão total da zona termicamente afetada.

5.4 Ensaio de Tração

Com o objetivo de verificar a eficiência das juntas soldadas pelo processo FSW, foram executados ensaios de tração do metal base e das juntas soldadas. Para estes ensaios foi utilizada a norma ASTM E 8M-98 e os resultados obtidos para as ligas Alclad AA2024-T3 e AA7075-T6 são mostrados nas Tabelas 5.3 à 5.9. Nas Tabelas 5.3 e 5.4, Cp 1, Cp2 e Cp 3 correspondem a três corpos de prova do metal base. Já nas Tabelas 5.5 a 5.9, Cp 1, Cp2 e Cp 3 correspondem aos corpos de prova retirados do início, meio e fim do cordão de solda respectivamente. Os demais símbolos são: σ_{esc} (tensão de escoamento), $\sigma_{m\acute{a}x}$ (tensão máxima) e ϵ (alongamento). A eficiência da junta soldada foi calculada a partir dos valores encontrados para o metal base.

Tabela 5.3. Propriedades mecânicas do metal base da liga Alclad AA2024-T3

Propriedades Mecânicas	Alclad AA2024-T3			Média	Desvio Padrão	Valores especificados
	Cp 1	Cp 2	Cp 3			
σ_{esc} [MPa]	317	314	315	315,3	1,5	296,5
$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	464	462	463	462	1	441,3
ϵ [%]	22	22	20	21,3	1,2	15

Tabela 5.4. Propriedades mecânicas do metal base da liga Alclad AA7075-T6

Propriedades Mecânicas	Alclad AA7075-T6			Média	Desvio Padrão	Valores especificados
	Cp 1	Cp 2	Cp 3			
σ_{esc} [MPa]	488	487	494	489,7	3,8	482
$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	555	555	561	557	3,5	551
ϵ [%]	18	14	14	15,3	2,3	8

Os dados apresentados mostram-se de acordo com os valores especificados (última coluna) pela norma MMPDS [Rice et al., 2003], utilizada para materiais aeronáuticos.

A Tabela 5.5 mostra as propriedades mecânicas obtidas com a soldagem por FSW da liga Alclad AA2024-T3. Conforme salientado na tabela os resultados referentes ao corpo de prova proveniente da região intermediária da solda foram desconsiderados devido a grande diferença apresentada em relação aos demais corpos de prova, provavelmente devido a algum problema nas garras de fixação da máquina de ensaios. A eficiência obtida com os parâmetros descritos foi de 66% em relação à tensão máxima obtida para o metal base. O desvio padrão para a tensão máxima obtida mostra certa disparidade dos resultados, provavelmente decorrente de variações de descontinuidade ao longo da solda, ou ainda, da falta de introdução no cálculo de um resultado coerente para o corpo de prova 2.

Tabela 5.5. Propriedades mecânicas da junta soldada por FSW da liga Alclad AA2024-T3 utilizando a ferramenta com 12 mm de ombro, 1250 rpm e 10 mm/min de avanço.

Propriedades Mecânicas	FSW Alclad AA2024-T3			Média	Desvio Padrão	Eficiência [%]
	Cp 1	Cp 2	Cp 3			
σ_{esc} [MPa]	221	5 ^(*)	212	216,5	6,4	69
$\sigma_{máx}$ [MPa]	317	2 ^(*)	297	307	14,1	66
ϵ [%]	6	4 ^(*)	5	5,5	0,7	26

(*) Valores foram desconsiderados da análise.

A Figura 5.16 mostra a posição de ruptura dos corpos de prova durante o ensaio de tração. Percebe-se que a ruptura ocorre no lado de recuo da ferramenta, dentro da “stir zone”.

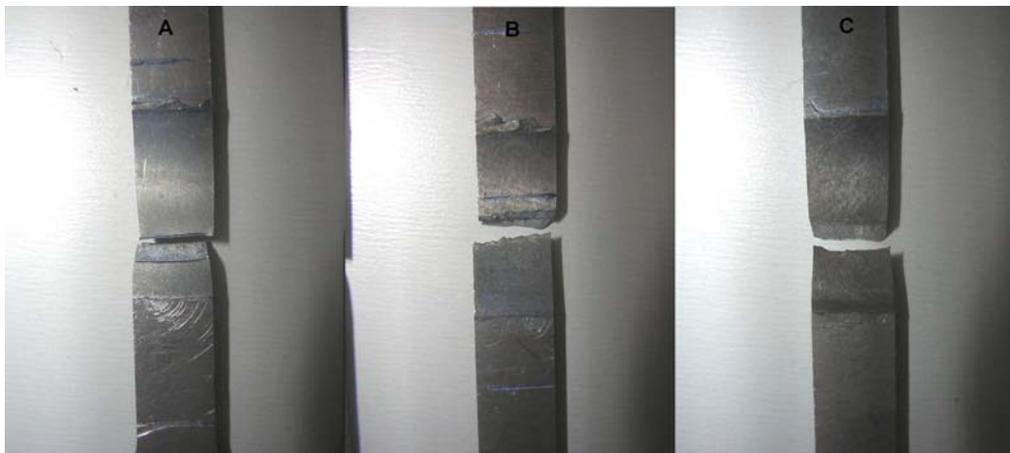


Figura 5.16. Corpos de prova após o ensaio de tração.

A Tabela 5.6 mostra as propriedades mecânicas obtidas com a soldagem por FSW da liga Alclad AA7075-T6. A eficiência obtida com os parâmetros descritos foi de 65% em relação à tensão máxima obtida para o metal base. Observa-se que o desvio padrão da tensão máxima é 8 MPa, o que mostra certa homogeneidade do cordão de solda.

Tabela 5.6. Propriedades mecânicas da junta soldada por FSW da liga Alclad AA7075-T6 utilizando a ferramenta com 12 mm de ombro, 1250 rpm e 10 mm/min de avanço.

FSW Alclad AA7075-T6						
Propriedades Mecânicas	Cp 1	Cp 2	Cp 3	Média	Desvio Padrão	Eficiência [%]
σ_{esc} [MPa]	253	259	253	255	3,5	52
$\sigma_{máx}$ [MPa]	354	370	361	361,7	8	65
ϵ [%]	5	6	6	5,7	0,6	37

A Figura 5.17 mostra a posição de ruptura dos corpos de prova durante o ensaio de tração. Percebe-se que a ruptura ocorre no lado de recuo da “*stir zone*” para o corpo de prova retirado do início do cordão de solda e no lado de avanço para os retirados do meio e do fim.

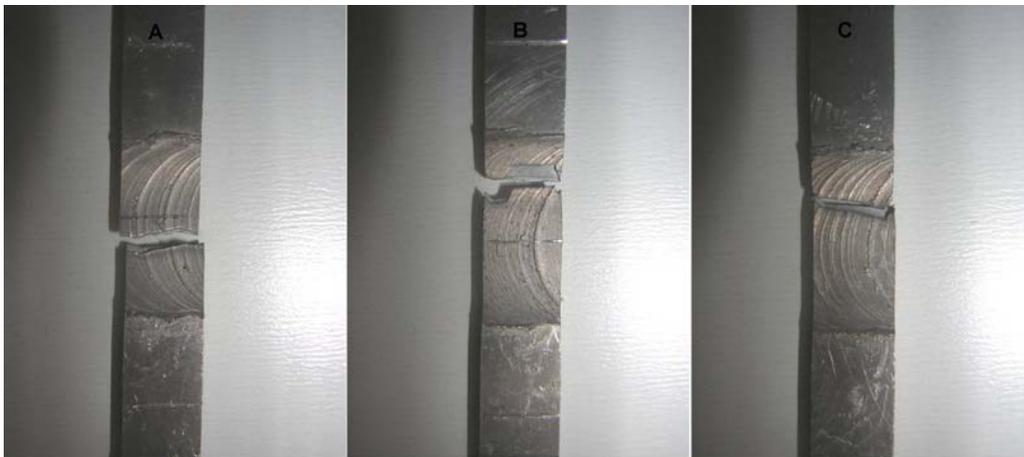


Figura 5.17. Corpos de prova após o ensaio de tração.

A Tabela 5.7 mostra as propriedades mecânicas obtidas com a soldagem por FSW das ligas dissimilares Alclad AA2024-T3 no lado de avanço e AA7075-T6 no lado de recuo. A eficiência obtida com os parâmetros descritos foi de 63% em relação à tensão máxima obtida para o metal base AA2024-T3, por ser este o material de menor resistência entre os utilizados na junta. Da mesma forma como na Tabela 5.5, os resultados apresentam certa disparidade, ocasionando uma elevação no valor do desvio padrão da tensão máxima para 16,9 MPa.

Tabela 5.7. Propriedades mecânicas da junta soldada por FSW da liga Alclad AA2024-T3 posicionada no lado de avanço e a liga Alclad AA7075-T6 no lado de recuo utilizando a ferramenta com 12 mm de ombro, 1250 rpm e 10 mm/min de avanço.

Propriedades Mecânicas	FSW Alclad AA2024-T3/7075-T6			Média	Desvio Padrão	Eficiência* [%]
	Cp 1	Cp 2	Cp 3			
σ_{esc} [MPa]	242	248	222	237,3	13,6	75
$\sigma_{máx}$ [MPa]	280	311	284	291,7	16,9	63
ϵ [%]	2	4	5	3,7	1,5	17

* Eficiência em relação aos valores do metal base AA2024-T3.

A Figura 5.18 mostra a posição de ruptura dos corpos de prova durante o ensaio de tração. Percebe-se que a ruptura ocorre aproximadamente no centro da “*stir zone*”, exceto para o corpo de prova retirado do fim do cordão de solda, que ocorre no lado de avanço.

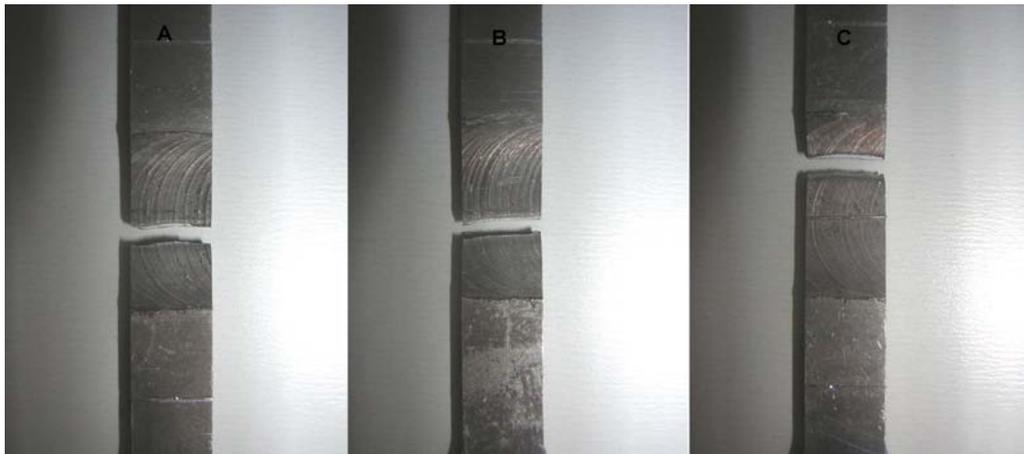


Figura 5.18. Corpos de prova após o ensaio de tração

A Tabela 5.8 mostra as propriedades mecânicas obtidas com a soldagem por FSW da liga Alclad AA2024-T3. A eficiência obtida com os parâmetros descritos foi de 70% em relação à tensão máxima obtida para o metal base. Esta solda foi a que obteve o melhor resultado comparado com as demais. Este resultado mostra-se coerente com o comportamento demonstrado pela junta no ensaio de dobramento, onde a mesma não apresentou rompimento. Observa-se também certa disparidade nos valores referentes à tensão máxima.

Tabela 5.8. Propriedades mecânicas da junta soldada por FSW da liga Alclad AA2024-T3 utilizando a ferramenta com 16 mm de ombro, 1250 rpm e 10 mm/min de avanço.

Propriedades Mecânicas	FSW Alclad AA2024-T3					
	Cp 1	Cp 2	Cp 3	Média	Desvio Padrão	Eficiência [%]
σ_{esc} [MPa]	227	222	215	221,3	6	70
$\sigma_{máx}$ [MPa]	345	313	316	324,7	17,7	70
ϵ [%]	6	4	8	6	2	28

A Figura 5.19 mostra a posição de ruptura dos corpos de prova durante o ensaio de tração. Percebe-se que a ruptura ocorre no lado de recuo da ferramenta, comum a “*stir zone*”, similar a Figura 5.16.

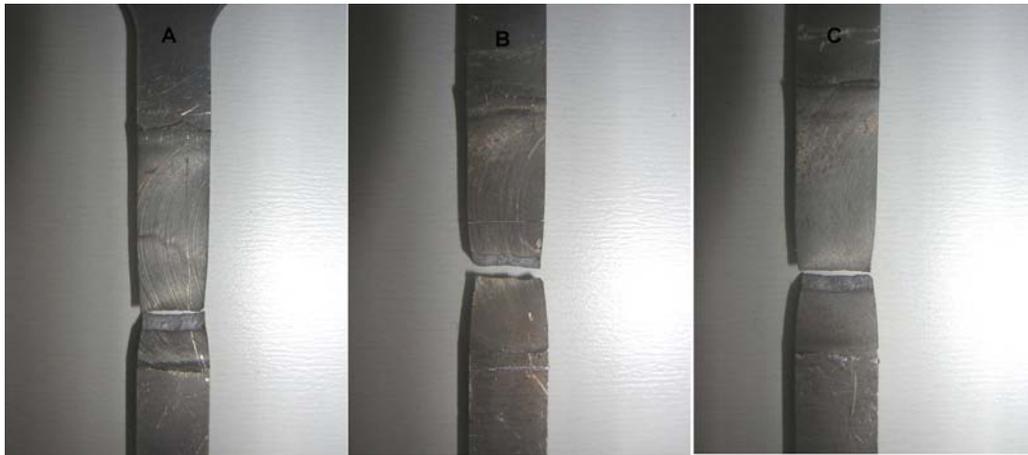


Figura 5.19. Corpos de prova após o ensaio de tração.

A Tabela 5.9 mostra as propriedades mecânicas obtidas com a soldagem por FSW da liga Alclad AA7075-T6. A eficiência obtida com os parâmetros descritos foi de 62% em relação à tensão máxima obtida para o metal base. O desvio padrão da tensão máxima foi de 36 MPa e do alongamento de 4,6%, superiores as outras soldas analisadas, provavelmente decorrente de variações de descontinuidade ao longo da solda.

Tabela 5.9. Propriedades mecânicas da junta soldada por FSW da liga Alclad AA7075-T6 utilizando a ferramenta com 16 mm de ombro, 1250 rpm e 10 mm/min de avanço.

Propriedades Mecânicas	FSW Alclad AA7075-T6					
	Cp 1	Cp 2	Cp 3	Média	Desvio Padrão	Eficiência [%]
σ_{esc} [MPa]	244	259	247	250	7,9	52
$\sigma_{máx}$ [MPa]	319	385	327	343,7	36	62
ϵ [%]	1	9	1	3,7	4,6	24

A Figura 5.20 mostra a posição de ruptura dos corpos de prova durante o ensaio de tração. Percebe-se que a ruptura ocorre aproximadamente no centro da “*stir zone*”, exceto para o corpo de prova retirado do meio do cordão de solda, que rompeu no lado de recuo, na interface da “*stir zone*”.

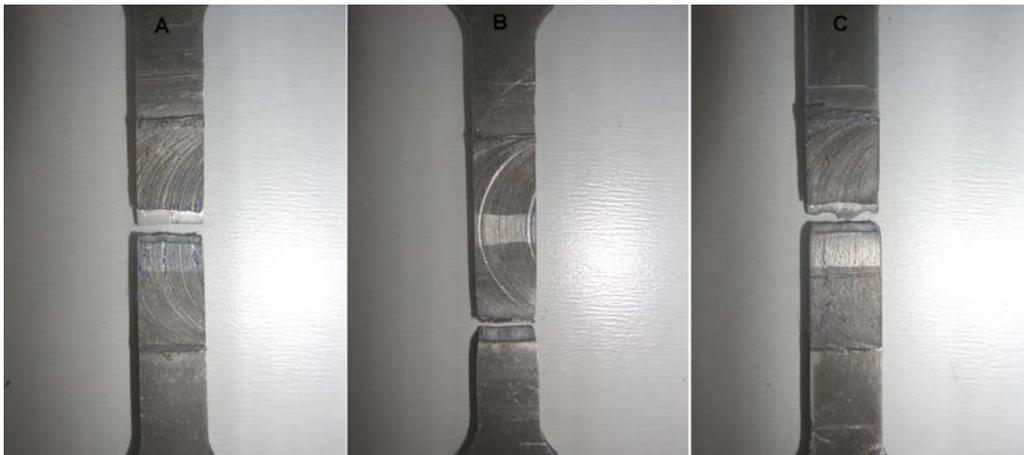


Figura 5.20. Corpos de prova após o ensaio de tração.

A Figura 5.21 reúne os resultados encontrados para as ligas Alclad AA2024-T3 e AA7075-T6 e suas respectivas soldagens por FSW.

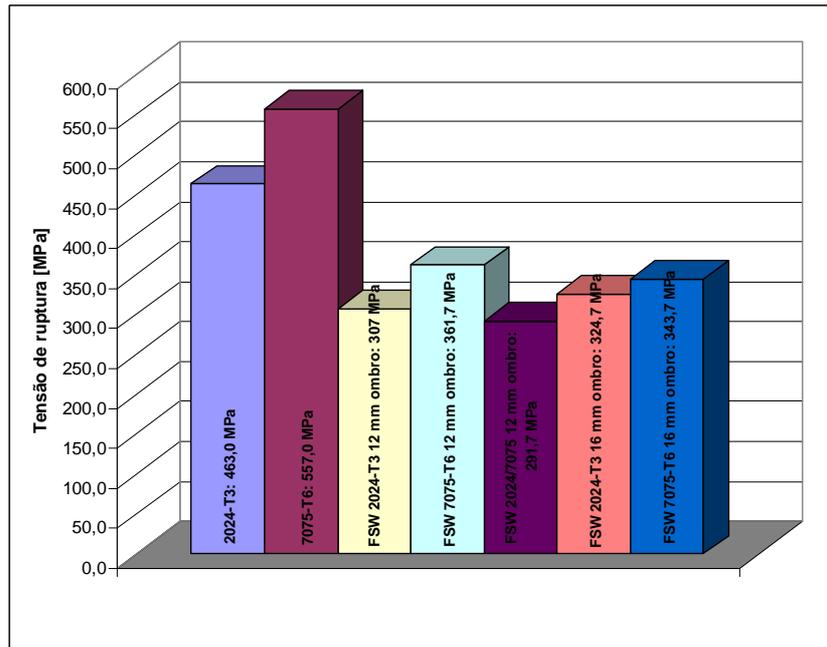


Figura 5.21. Comparação entre os valores encontrados para tensão de ruptura do metal base das ligas utilizadas e das soldas por FSW.

Conforme se observa a melhor eficiência obtida entre as juntas unidas por FSW foi a da liga Alclad AA2024-T3 utilizando uma ferramenta com ombro de 16 mm, velocidade de rotação da máquina de 1250 rpm e avanço de 10 mm/min. Este resultado mostra-se um pouco abaixo daqueles encontrados na literatura utilizando ligas de alumínio, porém superior aos valores apresentados por Júnior, 2003, que efetuou soldas pelo processo FSW utilizando chapas de 2,54 mm da liga Alclad AA2524-T3 por intermédio do robô Neos Tricept 805, especialmente adaptado para tal finalidade, nas dependências do Instituto de Pesquisa de Materiais da GKSS *Forshungszentrum* da Alemanha. Khaled, 2005, citando Talwar et al., 2000, descreve os resultados obtidos com a soldagem por FSW de chapas de 2 mm de espessura da liga Alclad AA7075-T6, onde foi demonstrada através de ensaios de tração, uma eficiência de 74%, e para tensão de escoamento e alongamento de, respectivamente, 69 e 14% comparados com o metal base. Os resultados são atribuídos à camada de clad que se introduziu no lado de avanço ao longo da solda, que gera uma região de baixa resistência mecânica, também descrita por Júnior, 2003. Infelizmente para efeito de comparação não foram encontradas outras publicações utilizando ligas de alumínio Alclad.

A Tabela 5.10 demonstra diversos resultados de eficiência da junta obtidos em ensaios de tração para ligas de alumínio. Observa-se que para as ligas não-tratáveis termicamente e para aquelas que não possuem camada de clad, os resultados se mostram superiores ou equivalentes quando comparados a este estudo.

Tabela 5.10. Eficiências obtidas para juntas soldadas por FSW para diferentes ligas de alumínio.

Referência	Material	Espessura [mm]	Eficiência da Junta [%]
Presente trabalho	Alclad AA2024-T3	1,8	70
Presente trabalho	Alclad AA7075-T6	1,8	65
Júnior, 2003	Alclad AA2524-T3	2,54	57
Capelari, 2006	AA5052-H34	6,35	95
Scialpi et al., 2007	AA6082-T6	2,0	77
Liu et al., 2005	AA2017-T351	3,0	82
Cavaliere et al., 2005	AA2024 (lado de avanço)/ AA7075-T6 (lado de recuo)	2,5	86
Moreira et al., 2007	AA6082-T6	3,0	70
	AA6061-T6		71
Ericsson e Sandström, 2003	AA6082-T6	4,0	77
Elangovan e Balasubramanian, 2007a	AA2219	6,0	60
Elangovan e Balasubramanian, 2007b	AA6061	6,0	66
Zhao et al., 2005	AA2014	8,0	43

6. CONCLUSÕES

Conforme demonstrado neste trabalho referente à soldagem por “*Friction Stir Welding*” – FSW das ligas Alclad AA2024-T3 e AA7075-T6, as seguintes conclusões podem ser feitas:

- Com base nos resultados apresentados, conclui-se que há um grande potencial existente na soldagem de ligas de alumínio por FSW dentro da indústria, igualmente como demonstrado pelas publicações feitas até agora sobre esse processo.
- A aplicação de uma metodologia utilizando o projeto de experimentos juntamente com uma ferramenta adequadamente projetada, permitiu a soldagem de ligas de alumínio Alclad AA2024-T3 e AA7075-T6 consideradas extremamente suscetíveis a trincas quando soldadas por métodos convencionais que envolvem fusão.
- Existem algumas limitações da técnica, principalmente no que diz respeito a camadas protetoras, como é o caso do alumínio puro (clad) sobre a superfície do material. Fica evidente a necessidade de estudos mais aprofundados de outras geometrias de ferramenta que não permitam a migração do clad para o interior da junta soldada, o que se torna extremamente difícil em face do conceito utilizando nesta técnica que envolve a mistura do material. Em vista disso, uma das soluções seria a remoção desta camada da área de contato com a ferramenta, o que não afetaria em nada a resistência da seção transversal devido à baixa resistência mecânica e da pequena espessura do alumínio puro.
- A variação da temperatura durante o processo de soldagem demonstra que o baixo aporte de calor do início do processo devido à condução de calor através da ferramenta, das chapas e da base de apoio podem influenciar nas propriedades mecânicas da solda retiradas do início do cordão de solda.
- O perfil de dureza feito na seção transversal das juntas unidas por FSW, que revela as propriedades mecânicas de acordo com as microestruturas formadas, apresenta um comportamento característico às similares avaliadas em outras publicações, principalmente para liga Alclad AA7075-T6. Para liga Alclad AA2024-T3 o comportamento mostra-se um pouco diferente, sem a recuperação da dureza na região central como era esperado.

- O ensaio de dobramento demonstrou que somente uma das juntas, utilizando a liga Alclad AA2024-T3, apresentou a ductilidade requerida para não romper durante este ensaio. As demais soldas foram rejeitadas, pois apresentaram trincas, e não poderiam ser utilizadas conforme a norma ASTM E 190-92.

- As eficiências obtidas para as juntas de topo foram de 62 a 70%, estando esses valores muito próximos aos verificados em outras publicações, principalmente dos trabalhos onde foram utilizados ligas Alclad. Também deve ser mencionado que a maior eficiência apresentada foi justamente pela junta que não rompeu durante o ensaio de dobramento, demonstrando certo comprometimento entre os resultados. Para as amostras ensaiadas as rupturas ocorreram na “stir zone”, exceto para amostra retirada do meio do cordão de solda da liga AA7075-T6 (Figura 5.20), onde a ruptura ocorreu próxima à interface das zonas termomecânicamente afetada e a termicamente afetada, localizada no final da marca deixada pelo ombro da ferramenta.

7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros pode-se ressaltar:

- A continuidade dos estudos aqui apresentados através de ensaios de fadiga, ensaios de tenacidade à fratura, análises metalográficas e os efeitos da variação de temperatura durante a soldagem para uma melhor compreensão das particularidades microestruturais de cada uma das zonas presentes na seção transversal da solda.

- Estudos utilizando as chapas com remoção local da camada de clad, comum ao ombro da ferramenta poderiam demonstrar um aumento da eficiência da junta, pois evitaria a mistura da camada de alumínio puro com o metal base. Porém neste caso, para maioria das aplicações, se torna necessário o recobrimento da superfície da solda com alguma camada protetora, para evitar a corrosão do metal base.

- Avaliação da resistência à corrosão das juntas de topo das ligas 2024-T3 e 7075-T6.

8. BIBLIOGRAFIA

Askeland, D. R., 1998. **“The Science and Engineering of Materials”**, Nelson Thornes Ltd. Cheltenham, UK.

ASM Handbook V.2: Properties and Selection - Nonferrous alloys and Special-Purpose materials, 10th ed., 1990, ASM International (Ed.), Metals Park, Ohio.

ASM Handbook V.4: Heat Treating, 10th ed., 1991, ASM International (Ed.), Metals Park, Ohio.

Barcellona, A., Buffa, G., Fratini, L., Palmeri, D., 2006. **“On microstructural phenomena occurring in friction stir welding of aluminium alloys”**, Journal of Materials Processing Technology, Volume 177, Pages 340–343.

Callister, W. D., 2001. **“Fundamentals of Materials Science and Engineering”**, 5th ed., John Wiley & Sons, Inc., New York.

Capelari, T. V., 2006. **“Avaliação do desempenho de ferramentas na soldagem de alumínio AA 5052 pelo processo FSW”**, Dissertação de Mestrado, DEMEC, UFRGS, Porto Alegre.

Cao, G., Kou, S., 2005. **“Friction Stir Welding of 2219 Aluminum: Behavior of Al₂Cu particles”**, Supplement to The Welding Journal, Volume 84, Pages 1s-8s.

Cavaliere, P., Campanile, G., Panella, F., Squillace, A., 2006. **“Effect of welding parameters on mechanical and microstructural properties of AA6056 joints produced by Friction Stir Welding”**, Journal of Materials Processing Technology, Volume 180, Pages 263–270.

Cederqvist, L., Reynolds, A. P., 2001. **“Factors Affecting the Properties of Friction Stir Welded Aluminum Lap Joints”**, The Welding Journal Research Supplement, December 2001, Volume 80, no. 12, Pages 281-s - 287-s.

CFSWC, 2007. “**Big Gantry Friction Stir Welder (LM Series)**”, China FSW Center, Beijing FSW Technology Co. Ltd. Disponível em: <<http://www.cfswt.com/tech.asp>>. Acesso em: 05 Novembro 2007.

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., 2003. “**Enabling technology for an aircraft alternative**”, Mechanical Engineering Design Magazine, The American Society of Mechanical Engineers. Disponível em: <<http://www.memagazine.org/medes03/coolweld/cwsidebar.html>>. Acesso em: 25 Setembro 2007.

Cook, G. E., Crawford, R., Clark, D. E., Strauss, A. M., 2004. “**Robotic friction stir welding**”, Industrial Robot: An International Journal, Volume 31, Number 1, Pages 55–63.

Colligan, K., 1999. “Material Flow Behavior during Friction Stir Welding of Aluminum”, Supplement to the Welding Journal, July 1999, Pages 229s-237s.

Davies, R. W. F., 2004. “**Friction-Stir-Joined Aluminum Sheet Materials for Heavy Vehicle Cab Structures**”, High Strength Weight Reduction Materials - FY 2004 Progress Report, Richmond. Disponível em: <http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/hswr_2004/fy04_hswr_4f.pdf> . Acesso em: 25 Outubro 2007.

Deqing, W., Shuhua, L., 2004. “**Study of friction stir welding of aluminum**”, Journal of Materials Science, Volume 39, Pages 1689 – 1693.

Dieter, G. E., 1988. “**Mechanical Metallurgy**”, MacGraw-Hill, London.

Eclipse, 2007. “**Eclipse 500**”, Disponível em: <http://www.eclipseaviation.com/eclipse_500/>. Acesso em: 20 Outubro 2007.

Elangovan, K., Balasubramanian, V., 2007a. “**Influences of tool pin profile and tool shoulder diameter on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy**”, Materials and Design, Volume 29, Pages 362-373.

Elangovan, K., Balasubramanian, V., 2007b. **“Influences of pin profile and rotational speed of the tool on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy”**, Materials Science and Engineering, Volume 459, Pages 7-18.

Ericsson, M., Sandström, R., 2003. **“Influence of welding speed on the fatigue of friction stir welds, and comparison with MIG and TIG”**, International Journal of Fatigue, Volume 25, Pages 1379–1387.

Fratini, L., Zuccarello, B., 2006. **“An analysis of through-thickness residual stresses in aluminium FSW butt joints”**, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Volume 46, Pages 611–619.

Gharacheh, M. A., Kokabi, A. H., Daneshi, G. H., Shalchi, B., Sarrafi, R., 2006. **“The influence of the ratio of ‘rotational speed/traverse speed (ω/v) on mechanical properties of AZ31 friction stir welds”**, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Volume 46, Pages 1983–1987.

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.

Hitachi, 2007. **“A-train (Advanced commuter & Express train)”**. Disponível em: <<http://www.hitachi-rail.com>>. Acesso em: 10 Outubro 2007.

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.

Kaspary, T. B., 2005. **“Preenchimento do furo remanescente em soldas por fricção com mistura mecânica de reparo em alumínio 6056-T4”**, Dissertação de Mestrado, PPGEM, UFRGS, Porto Alegre.

- Khaled, T., 2005. **“An Outsider Looks at Friction Stir Welding”**, Report #: ANM-112N-05-06, Federal Aviation Administration, Lakewood.
- Khodir, S. A., Shibayanagi T., 2008. **“Friction stir welding of dissimilar AA2024 and AA7075 aluminum alloys”**, Materials Science and Engineering: B., Volume 148, Pages 82-87.
- 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.
- Liu, H. J., Fujii H., Nogi, K., 2005. **“Friction stir welding characteristics of 2017-T351 aluminum alloy sheet”**, Journal of Materials Science, Volume 40, Pages 3297 – 3299.
- Mathers, G., 2002, **“The welding of aluminium and its alloys”**, CRC Press LLC, New York.
- Mishra, R. S., Ma, Z. Y., 2005. **“Friction stir welding and processing”**, Materials Science and Engineering, Volume 50, Pages 1-78.
- Moreira, P. M. G. P., Figueiredo, M. A. V., Castro, P. M. S. T., 2007. **“Fatigue behaviour of FSW and MIG weldments for two aluminium alloys”**, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Volume 48, Pages 169–177.
- MTS, 2007. **“FSW Process Experience at MTS”**, MTS Systems Corporation . Disponível em: <<http://www.mts.com/en/TechnologyShowcase/FSW/Process/index.asp>>. Acesso em: 05 Novembro 2007.
- Munõz, A. C., Ruckert, G., Huneau, B., Sauvage, X., Marya, S., 2008. **“Comparison of TIG welded and friction stir welded Al–4.5Mg–0.26Sc alloy”**, Journal of Materials Processing Technology, Volume 197, Pages 337–343.
- 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.

Ribeiro, J. L. D., Caten, C., 2001. **“Projeto de experimentos”**, Série Monográfica Qualidade, UFRGS, FEEng, Porto Alegre.

Rice, R. C., Jackson, J. L., Bakuckas, J., Thompson, S., 2003. **“Metallic Materials Properties Development and Standardization”**, U.S. Department of Transportation - Federal Aviation Administration, Scientific Report, Washington.

Roldo, 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, 2005, Friction Stir Welding (Aerospace) - Public Forum. Disponível em: <http://forums.sae.org/access/dispatch.cgi/stirweld_pf/docProfile/100006/d20040615141040>. Acesso em: 05 Junho de 2005.

SAPA, 2007. Friction Stir Welding (FSW). Disponível em: <<http://www.sapagroup.com/en/Company-sites/Sapa-Mass-Transportation/Technology/Friction-Stir-Welding/>>. Acesso em Novembro de 2007.

Scialpi, A., De Filippis, L.A.C., Cavaliere, P., 2007. **“Influence of shoulder geometry on microstructure and mechanical properties of friction stir welded 6082 aluminium alloy”**, Materials and Design, Volume 28. Pages 1124–1129.

Sinha, P., Muthukumaran, S., Mukherjee, S.K. 2008. **“Analysis of first mode of metal transfer in friction stir welded plates by image processing technique”**, Journal of Materials Processing Technology, Volume 197, Pages 17–21.

Talbot, D., Talbot, J., 1998. **“Corrosion science and technology”**, CRC Press, Boca Raton.

TWI, 2007. **“Friction Stir Welding – Equipment”**. Disponível em: <http://www.twi.co.uk/j32k/unprotected/band_1/fswequip.html>. Acesso em: 20 Setembro 2007.

Wyatt, 2007. **“POWERSTIR 315”**, Wyatt Machine Tools International. Disponível em: <http://www.wyattmachine.com/csfs_w_machines.pdf>. Acesso em: 05 Novembro 2007.

Zäh, M., Eireiner, D., 2005. **“Estudo propõe uso de uma fresadora na soldagem por agitação e fricção”**, Corte e Conformação de Metais nº 12, p.56-63.

Zhao, Y.; Lin, S.; Wu, L.; Qu, F., 2005. **“The influence of pin geometry on bonding and mechanical properties in friction stir weld 2014 Al alloy”**, Materials Letters, Volume 59, Pages 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.