

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
Departamento de Metalurgia

**CARACTERIZAÇÃO METALÚRGICA DE CHAPAS DA LIGA DE ALUMÍNIO
7050-T7451 SOLDADAS PELA TÉCNICA DE FRICTION STIR WELDING**

Giovanni Rocha dos Santos

Trabalho de Diplomação

Porto Alegre

2003

**CARACTERIZAÇÃO METALÚRGICA DE CHAPAS DA LIGA DE ALUMÍNIO
7050-T7451 SOLDADAS PELA TÉCNICA DE FRICTION STIR WELDING**

**Giovanni Rocha dos Santos
Matrícula 1445/97-6**

**Trabalho de Diplomação para obtenção
de diploma no curso de Engenharia
Metalúrgica.
Orientador: Prof. Afonso Reguly**

Porto Alegre

2003

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Telmo Roberto Strohaecker, coordenador do LAMEF, pelo incentivo e oportunidade de realização de estágio junto ao GKSS.

Ao Prof. Afonso Reguly pela orientação e sugestões.

Gostaria de agradecer ao Dr. Jorge Fernandez dos Santos, Cristoph Schilling e demais colegas do Fugietechnologie – GKSS, que me apoiaram durante o período de estágio e me incentivaram na realização deste trabalho.

Agradeço também à Carlos Kwietniewski, pelas correções e sugestões.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	III
ÍNDICE	IV
LISTA DE FIGURAS	VI
RESUMO	VIII
ABSTRACT	IX
1 INTRODUÇÃO	10
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 Alumínio e Suas Ligas	12
2.1.1 Classificação das ligas de alumínio	12
2.1.2 Mecanismos de endurecimento	14
2.1.3 Tratamento térmico para ligas da série 7000	18
2.1.4 Propriedade mecânicas das estruturas trabalhadas a frio	19
2.2 Processo de Friction Stir Welding	21
2.2.1 Ferramentas para <i>Friction Stir Welding</i>	22
2.2.2 Equipamento para soldagem	24
2.2.3 Vantagens	24
2.2.4 Desvantagens	25
2.2.5 Propriedades metalúrgicas	26
2.2.6 Forças aplicadas no processo	27
2.2.7 Defeitos em FSW	28
2.2.8 Aplicações	28
2.3 FSW aplicada a ligas de alumínio	29
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	31
3.1 Introdução	31
3.2 Material e Tratamento Tratamento térmico	31
3.3 Parâmetros do processo	32
3.4 Equipamento	33
3.5 Caracterização microestrutural	33
3.6 Teste de dobramento	33
3.7 Microdureza	34
4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	35
4.1 Inspeção Visual	35

4.2 Ensaio de dobramento	36
4.3 Microscopia Ótica	37
4.4 Microdureza	43
5 CONCLUSÕES	49
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** Desenho esquemático mostrando os 3 tipos de coerência existentes. Em A temos uma segunda fase completamente coerente com a matriz. Em B temos uma segunda fase semicoerente. E, em C, temos uma segunda fase incoerente com a matriz.⁹ 17
- Figura 2** Dureza em função do tempo de envelhecimento na temperatura de 130° C de um alumínio com 4% de cobre. 18
- Figura 3** Processo de soldagem por FSW. (a) União de duas placas de alumínio por FSW, (b) desenho esquemático do processo apresentando a geometria da ferramenta. 22
- Figura 4** Shoulder em (a) e pino em (b), elementos que formam a ferramenta usada na *Friction Stir Welding*. 23
- Figura 5** Desenho esquemático de alguns pinos com diferentes perfis.³ 23
- Figura 6** Configurações que podem ser construídas com FSW.⁴ 25
- Figura 7** Desenho esquemático indicando as diferentes regiões observadas uma seção transversal de uma chapa soldada por FSW. As letras na figura indicam as diferentes regiões, onde: a) Material base, b) ZTA, c) ZTMA, d) Nugget. 27
- Figura 8** Vista da superfície da chapa soldada pelo processo de Friction Stir Welding. 35
- Figura 9** Vista da superfície da chapa soldada pelo processo de Friction Stir Welding com velocidade de rotação de 650 rpm e velocidade de soldagem de 150 mm/min. 36
- Figura 10** Vista da superfície da chapa soldada pelo processo de Friction Stir Welding com velocidade de rotação de 800 rpm e velocidade de soldagem de 400 mm/min revelando um excesso de material expelido na lateral do cordão de solda. 36
- Figura 11** Macrografia de uma secção transversal das chapas soldadas com 650 rpm e 300 mm/min revelando a região onde houve falta de penetração do pino da ferramenta. Ataque: reagente Keller. 37
- Figura 12** Macrografia de uma secção transversal das chapas soldadas com 650 rpm e 250 mm/min. Ataque: reagente Keller. 38
- Figura 13** Macrografia de soldas defeituosas, em (a) um vazio e em (b) *kissing bond*. 38
- Figura 14** Macrografia de uma secção transversal das chapas soldadas com 800 rpm e 400 mm/min. Em A encontra-se o nugget, em B a zona termo-mecanicamente afetada, em C a zona termicamente afetada e em D, o material base. Ataque: reagente Keller. 39
- Figura 15** Micrografia da liga de alumínio AA7050-T7451 revelando uma microestrutura de grãos alongados devido ao processo de laminação. Ataque: reagente Keller. 39

Figura 16 Micrografia da região do nugget para uma amostra soldada com 800 rpm e 400 mm/mim. Ataque: reagente Keller.....	40
Figura 17 Micrografia mostrando a região de interface entre o nugget e a zona termomecanicamente afetada de uma amostra soldada com 800 rpm e 400 mm/min. Ataque: reagente Keller.....	41
Figura 18 Micrografia revelando a região do nugget para uma amostra retirada de uma chapa soldada com VR=800rpm e VS=400mm/min.	42
Figura 19 Micrografia revelando a região do nugget para uma amostra retirada de uma chapa soldada com VR=650rpm e VS=150mm/min.	42
Figura 20 Micrografia revelando a região do nugget para uma amostra retirada de uma chapa soldada com VR=500rpm e VS=50mm/min.	43
Figura 21 Perfil de microdureza mostrando as principais regiões encontradas em uma solda de topo por FSW.....	44
Figura 22 Perfil de microdureza de amostras soldadas com diferentes velocidades de soldagem.....	45
Figura 23 Perfil de microdureza de amostras soldadas com diferentes velocidades de soldagem.....	45
Figura 24 Perfil de microdureza de amostras soldadas com diferentes velocidades de rotação.	46
Figura 25 Perfil de microdureza de amostras originais e reparadas soldadas com velocidade de rotação de 550rpm e velocidade de soldagem de 150mm/min.	47
Figura 26 Perfil de microdureza de amostras originais e reparadas soldadas com velocidade de rotação de 650rpm e velocidade de soldagem de 150mm/min.	48

RESUMO

Estruturas fixas ou componentes podem, eventualmente, requerer algum tipo de reparo. Em alguns casos, a soldagem é uma solução economicamente viável. Dentre os diversos processos de soldagem, aparece o processo de *Friction Stir Welding* como uma alternativa interessante.

O objetivo deste trabalho é avaliar a possibilidade do uso da técnica de *Friction Stir Welding* para realização de reparos. Primeiramente, foi feita uma investigação de parâmetros para se produzir soldas originalmente livre de defeitos. Amostras foram caracterizadas quanto a microestrutura e microdureza, e também foram realizados testes de dobramento para se avaliar a ductilidade do cordão de solda. A partir disso, foram propositalmente produzidos cordões de solda com defeitos e em seguida esses cordões foram reparados. O reparo consiste da aplicação de um novo parâmetro de soldagem aplicado exatamente sobre a junta defeituosa.

Os resultados indicaram que o processo de *Friction Stir Welding* tem grande potencial para a produção de soldas de alta qualidade, pois o ciclo térmico e processos de deformação impostos na solda não afetaram significativamente as propriedades mecânicas.

ABSTRACT

Fixed structures or components may eventually require repairing. In some cases, welding is an economically attractive solution. Among several welding processes, Friction Stir Welding appears as an interesting alternative.

The aim of this work is to evaluate the possibility of using Friction Stir Welding for repairing. First, a matrix of welding parameters was set up in order to reach the optimised conditions, wich considered microstructure, microhardness and bending tests. Then, Friction Stir Welding joints containing deffects were produced, being later repaired using the optimised parameters.

The results have indicated that the Friction Stir Welding has a great potential in producing high quality joints since the thermal cycle and the plastic deformation imposed does not affect negatively the mecanic properties of the joints.

1 INTRODUÇÃO

A habilidade em unir materiais similares ou diferentes tem sido importante na criação de várias ferramentas, produtos ou estruturas. Em sua definição mais geral, a soldagem é o ato de unir partes de maneira a torná-las contínuas ou formar uma unidade. Quando aplicada à fabricação, a soldagem é o processo de ligar um componente ou um elemento estrutural a outro para formar um conjunto, onde o conjunto é submetido a alguma função ou uma combinação de funções que possa ser requerida.²

Um conjunto é a coleção de partes manufaturadas, unidas através da soldagem, para executar uma ou várias funções primárias. Essas funções primárias podem ser divididas em três categorias: estrutural, mecânica e elétrica. Em conjuntos com função estrutural, a função primária é suportar cargas estáticas ou dinâmicas, ou ambas. Exemplo são edifícios, pontes e aviões. Em conjuntos com função mecânica, a função primária, a qual freqüentemente se confunde com a estrutural, é permitir algum movimento ou uma série de movimentos através da interação entre os componentes. Tem-se como exemplos motores, atuadores e conjuntos de engrenagens. Sem dúvida, estes conjuntos tem a função de suportar cargas também, mas a função principal continua sendo permitir o movimento. Finalmente, conjuntos com função elétrica, devem criar, transmitir ou processar algum sinal eletromagnético desejado. Os exemplos mais importantes são os componentes microeletrônicos e placas de circuito impresso, também são incluídos geradores de força e transformadores.²

Existem basicamente três razões predominantes para se soldar materiais e formar um conjunto ou estrutura: a solda deve realizar uma função, ter uma eficiência estrutural e minimizar custos.

O custo de uma estrutura ou conjunto é fortemente afetado pelo tipo de material utilizado em sua fabricação e sua complexidade em ser fabricado. Se a estrutura ou conjunto está em uso, seu custo é também afetado pela facilidade de se conduzir uma manutenção ou reparo. Através da soldagem é possível construir estruturas com otimização de materiais reduzindo as perdas. Para construir economicamente peças grandes a partir de peças pequenas com uma boa eficiência utilizam-se materiais com formas adequadas para serem unidos, tais como placas que devem ser soldadas para formar peças mais complexas.²

A Indústria têm voltado sua atenção para uma técnica de soldagem chamada de *Friction Stir Welding* (FSW). Essa técnica não envolve fusão e fornece boa qualidade em

juntas de diversas geometrias, sendo que também pode ser aplicada em diversos tipos de materiais, incluindo alguns que são difíceis de serem soldados por processos convencionais.

A *Friction Stir Welding* foi inventada e patenteada pelo *The Welding Institute* (TWI), Cambridge, Reino Unido. Desde então, a indústria, laboratórios de pesquisa e universidades têm estudado esta técnica de soldagem para alumínio, aço, titânio e materiais compósitos. As pesquisas têm progredido rapidamente em diversas áreas. Os alvos principais das pesquisas desenvolvidas até agora são: a investigação de fenômenos críticos através do modelamento do processo, estudos de microestrutura, propriedades mecânicas das juntas soldadas e desgaste das ferramentas aplicadas ao processo.

A FSW tem amadurecido ao ponto de que resultados obtidos em pesquisas de laboratório estão auxiliando na aplicação da técnica para a indústria aeroespacial, automotiva, naval e extração de petróleo e gás.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ALUMÍNIO E SUAS LIGAS

O alumínio é o segundo elemento metálico mais abundante da Terra, e tornou-se um competidor econômico quando comparado com materiais ferrosos nas aplicações em engenharia desde o século XIX. Hoje sua produção anual é maior do que a soma das produções de todos os outros metais não-ferrosos.

O alumínio pode ser ligado a um grande número de elementos. As ligas frequentemente contêm mais do que uma segunda fase, as quais podem ser encontradas em diversas formas, tamanhos e distribuições. A liga binária Al-Zn foi uma das primeiras ligas de alumínio comercialmente desenvolvidas, sendo que eram usadas como depósitos para proteção contra a corrosão. Atualmente, o zinco, o magnésio e o cobre são ligados ao alumínio em ligas.⁷

Produtos em alumínio trabalhados mecanicamente são aqueles que foram submetidos à deformação plástica por processos de trabalho a quente ou a frio (laminação, extrusão, ou uma combinação deles). As mudanças microestruturais associadas ao trabalho mecânico e acompanhada de tratamentos térmicos, são usadas no controle de certas propriedades do produto acabado. Placas usadas para a fabricação de componentes para a indústria aeronáutica são exemplos típicos de produtos em alumínio trabalhados mecanicamente.⁸

2.1.1 Classificação das ligas de alumínio

Os produtos em alumínio trabalhados mecanicamente são identificados por um sistema de quatro dígitos, como mostrado na Tabela 1. A série *1000* é usada para designar as composições não ligadas de alumínio, as quais têm certos níveis de impureza.

As séries *2000* até *8000* são classificadas de acordo com o elemento de liga principal, com exceção da série *6000*, a qual tem proporções de magnésio e silício

predominantes para formar Mg_2Si . Uma descrição um pouco mais detalhada sobre cada série está dada abaixo.⁷

Tabela 1 Sistema de designação de ligas de alumínio trabalhadas.

Designação	Descrição	
<i>1000</i>	Alumínio > 99,0 %	
<i>2000</i>	Cobre	Elemento de liga em maior concentração
<i>3000</i>	Manganês	
<i>4000</i>	Silício	
<i>5000</i>	Magnésio	
<i>6000</i>	Magnésio e Silício	
<i>7000</i>	Zinco	
<i>8000</i>	Outros Elementos	

Série 1000 Alumínio com pureza maior que 99%. É bastante aplicada na indústria elétrica e química. Esta série se caracteriza por uma excelente resistência a corrosão, alta condutividade térmica e elétrica, baixa resistência mecânica e boa trabalhabilidade. Ferro e silício são as impurezas mais encontradas.

Série 2000 Cobre é o principal elemento de liga encontrado nesta série, e freqüentemente o magnésio como uma segunda adição. Estas ligas requerem tratamentos térmicos para que se possa otimizar as propriedades mecânicas. As ligas da série 2000 não tem uma resistência à corrosão tão boa quando comparadas com as demais ligas.

Série 3000 O manganês é o principal elemento de liga encontrado nesta série. Normalmente, esta série não é tratada termicamente, mas é cerca de 20% mais resistente do que as ligas da série 1000. São ligas de moderada resistência mecânica e são usadas em situações onde se precisa uma boa trabalhabilidade.

Série 4000 O silício é o principal elemento de liga encontrada nesta série, o qual pode ser encontrado em quantidades (acima de 12%) que levam ao abaixamento da faixa de temperatura em que uma determinada liga vai fundir sem causar fragilidade. Por esta

razão, ligas de alumínio da série 4000 são usadas como metal de adição para a soldagem de alumínio, onde se precisa de uma temperatura de fusão menor do que a do metal base.

Série 5000 O elemento de liga principal é o magnésio. Quando usado juntamente com o manganês, o resultado é uma liga endurecível por deformação de moderada a alta resistência mecânica. O magnésio tem o efeito endurecedor mais efetivo que o do manganês, cerca de 0,8%Mg é igual a 1,25%Mn. As ligas desta série possuem boas características quanto a soldagem e boa resistência a corrosão em atmosferas marinhas.

Série 6000 As ligas desta série contém silício e magnésio aproximadamente na mesma proporção, os quais são necessários para a formação de Mg_2Si . Embora não tão boa quanto às ligas da série 2000 e 7000, a série 6000 tem boa soldabilidade, usinabilidade e resistência à corrosão.

Série 7000 O zinco apresenta-se em quantidades de 1 a 8%, aparecendo como o principal elemento de liga, e quando associado a uma pequena quantidade de magnésio, resulta numa liga termicamente tratável de grande resistência. Frequentemente, outros elementos, tais como cobre e cromo, são também adicionados em pequenas quantidades.

Série 8000 Esta série compreende uma larga faixa de composições. Ligas contendo lítio (2,4-2,8%), por exemplo, têm sido desenvolvidas para uso na indústria aeronáutica e aeroespacial.

2.1.2 Mecanismos de endurecimento

Alumínio puro tem tensão de escoamento em torno de 10 MPa, deixando muito a desejar quanto as suas características de resistência mecânica para a aplicação em componentes na engenharia. O objetivo principal então, é produzir ligas de alumínio de maior resistência mecânica. O endurecimento das ligas de alumínio se consegue por solução sólida, por precipitação de partículas de segunda fase, por refinamento de grão ou por deformação mecânica a frio.⁹

Para as ligas de alumínio não-tratáveis termicamente, os mecanismos de endurecimento são:⁷

-solução sólida: o endurecimento é causado pela deformação do reticulado cristalino criada pelos átomos de soluto que dificultam o movimento de discordâncias. O endurecimento por solução sólida tende a aumentar com aumento da diferença entre os raios atômicos dos átomos de soluto e solvente. As principais ligas que são endurecíveis por solução sólida são as da série 5000, que contêm cerca de 0,5-0,6% em peso de magnésio.

-precipitação de uma segunda fase: a presença de partículas de segunda fase na matriz resultam em tensões internas localizadas que modificam as propriedades plásticas do material. Alguns elementos como Fe, Ni, Ti, Mn, e Cr, têm solubilidade limitada no alumínio sólido, sendo são responsáveis por este fenômeno. O endurecimento causado é função da forma e da distribuição dessas partículas, que são formadas nos contornos de grão e entre os braços dendríticos durante a solidificação.

-refinamento de grão: Manganês e cromo, quando adicionados às ligas de alumínio trabalhadas mecanicamente, produzem precipitados complexos que retardam o crescimento de grão, atuando no refinamento deste durante o processo de laminação.

-deformação mecânica: trefilação ou forjamento são processos usados para endurecer metais ou ligas que não respondem ao tratamento térmico. Isto é possível aumentando a densidade de discordâncias, as quais vão interagir umas com as outras, dificultando seu movimento na rede cristalina.¹⁰

Além dos mecanismos descritos acima, as ligas tratáveis termicamente também podem ser endurecidas por precipitação. O endurecimento por precipitação é um método muito versátil e pode ser aplicado em diversos materiais metálicos. O processo de precipitação se torna muito complexo, particularmente em ligas comerciais, que contêm mais do que um soluto que contribuem para o endurecimento por precipitação.

Se faz necessária uma fina precipitação de uma segunda fase insolúvel dispersa na matriz do material, a qual determinará o aumento de resistência do material. Esta precipitação irá depender do tempo e da temperatura empregada no processo.¹⁰

Este ganho na resistência do material tem como origem a interação de discordâncias com os precipitados, sendo que depende da dimensão, resistência e quantidade dos precipitados.

A principal condição para que haja o endurecimento, em uma liga, é que uma segunda fase seja solúvel em elevada temperatura, ficando assim em solução sólida. É necessário, também, que a solubilidade desta segunda fase diminua com a diminuição da temperatura, de forma que uma solução sólida supersaturada possa ser obtida. Para tanto, é necessário que se realize a solubilização do material através do aquecimento até o campo monofásico. Então, o material é mantido nesta temperatura até a obtenção de uma solução sólida homogênea. Logo após, através do rápido resfriamento, mantém-se o estado monofásico à temperatura ambiente. Como resultado, produz-se uma solução sólida supersaturada, metaestável à temperatura ambiente.¹⁹

Após este rápido resfriamento, realiza-se o tratamento térmico de envelhecimento. Neste tratamento, irá transcorrer uma série de precipitações de fases estáveis e metaestáveis.⁹

Estes precipitados produzidos durante o tratamento térmico podem apresentar diferentes relações cristalográficas entre eles mesmos e a matriz do material. Estas relações correspondem a uma certa coerência entre a estrutura cristalina do precipitado e a da matriz. Como existe uma diferença de diâmetro atômico entre os dois elementos, grandes deformações de coerência de natureza elástica serão introduzidas principalmente nas zonas próximas à interface entre o precipitado e a matriz. Estas deformações de coerência criam campos de tensões que oferecem resistência ao movimento das discordâncias, resultando em um aumento da resistência mecânica da liga.

Com isso existem três níveis de coerência: coerente, semicoerente e incoerente. Esta classificação é apresentada esquematicamente na Figura 1. Um precipitado semicoerente significa que só há uma parcial correspondência entre as redes cristalinas. E dizer que um precipitado é incoerente implica em uma não correspondência entre as redes do precipitado e da matriz.⁹

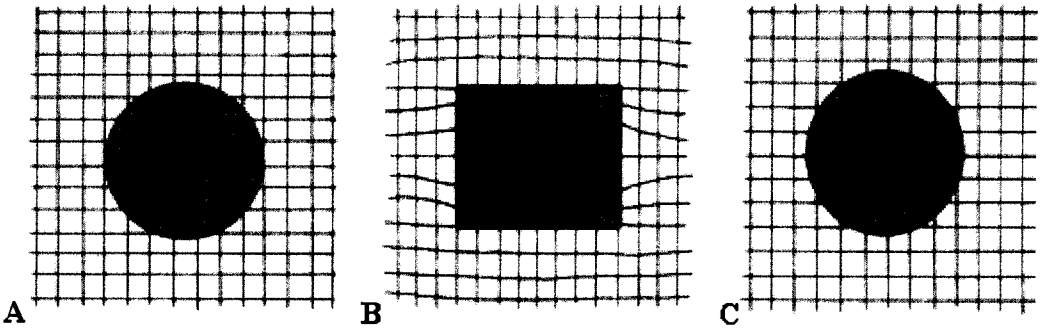


Figura 1 Desenho esquemático mostrando os 3 tipos de coerência existentes. Em A temos uma segunda fase completamente coerente com a matriz. Em B temos uma segunda fase semicoerente. E, em C, temos uma segunda fase incoerente com a matriz.⁹

No estágio inicial do envelhecimento irão aparecer zonas que são somente um agrupamento local de átomos do soluto justamente nos planos cristalográficos da matriz em questão. Estas zonas são estruturas de transição e são denominadas de zona de Guinier-Preston ou zona GP, em homenagem aos primeiros dois pesquisadores que as descreveram. A velocidade com que elas aparecem é inicialmente alta, mas com o passar do tempo diminui. Estas zonas surgem homoganeamente a partir da solução supersaturada, com uma fina distribuição por toda a matriz cristalina. O formato e a composição destas zonas variam de acordo com a composição química do material.⁹

A temperatura em que estas zonas GP são formadas compreende a faixa de 70 a 150°C, e a velocidade de formação destas dependem da temperatura e da velocidade em que o resfriamento é efetuado, pois isto determinará a quantidade de vacâncias que serão retidas na matriz.^{8,9}

Com o decorrer do envelhecimento, as zonas GP irão dar lugar a uma nova estrutura intermediária que promove um aumento de dureza do material que é denominada de GP(2) ou, no caso de uma liga de alumínio e cobre, θ'' . Esta estrutura tem como característica a tridimensionalidade, possuindo um tamanho superior as zonas GP.

Após esta estrutura, no caso de uma liga de alumínio e cobre, ocorre a formação de outra fase θ' , na forma de placas. Esta fase possui uma estrutura cristalina tetragonal e uma semicoerente com a matriz. No decorrer do envelhecimento, a fase θ' dá lugar à fase de equilíbrio θ . Como esta fase não possui nenhuma coerência com a matriz, a dureza sofre um decréscimo.

A continuação do envelhecimento após este estágio produz o crescimento das partículas e a conseqüente diminuição da dureza do material, que é caracterizado como superenvelhecimento.

O ponto máximo de dureza ou resistência mecânica corresponde a uma distribuição crítica de precipitados coerentes e semicoerentes, como pode ser observado na Figura 2. Como este processo envolve tempo e temperatura, para que fases com tais características sejam precipitadas, é necessário achar um ponto ótimo entre estas duas variáveis, e este ponto irá depender das características do material.⁹

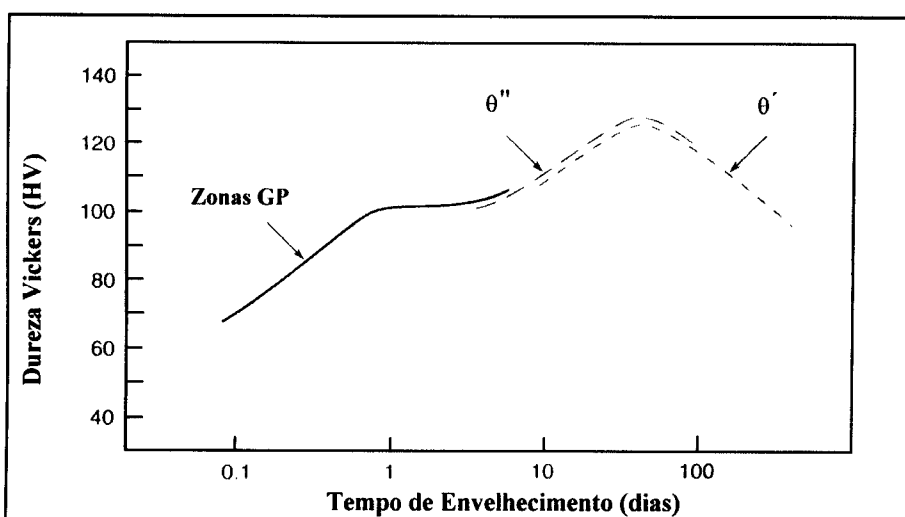


Figura 2 Dureza em função do tempo de envelhecimento na temperatura de 130° C de um alumínio com 4% de cobre.

2.1.3 Tratamento térmico para ligas da série 7000

As ligas de alta resistência mecânica da série 7000 possuem uma baixa resistência à corrosão sob tensão, sendo que são tratadas termicamente de forma a se obter a melhor combinação entre resistência mecânica, resistência à corrosão e tenacidade à fratura.⁸ As fases em equilíbrio com a matriz de alumínio são designadas como $MgZn_2$ (fase M), $Mg_3Zn_3Al_2$ (fase T), e Mg_5Al_3 (fase β). Nas ligas quaternárias Al-Cu-Mg-Zn, o zinco é o elemento adicionado em maior quantidade e o magnésio está freqüentemente em maiores quantidades do que o cobre, pois a fase β aparece somente quando a quantidade de

magnésio é consideravelmente maior do que a quantidade de zinco. Tais ligas são endurecidas primeiramente por magnésio em solução sólida.⁷

Para as ligas 7000, os tratamentos térmicos são normalmente usados para produzir uma alta densidade de finos precipitados (zonas de GP) ou precipitados que interagem fortemente com as discordâncias e, aumentando a tensão de escoamento para estas ligas.

Um tratamento térmico típico para estas ligas consiste em dissolver elementos de liga na matriz, seguido por um resfriamento rápido, a qual tem a função de reter uma grande quantidade de elementos dissolvidos numa solução sólida supersaturada. Nesta condição, pode ser dada à liga um tratamento térmico de envelhecimento para alcançar a dureza requerida, embora para algumas ligas, particularmente as da série 7000, significativo aumento nas propriedades ocorrem durante o período de envelhecimento natural (temperatura ambiente).

2.1.4 Propriedade mecânicas das estruturas trabalhadas a frio

Uma estrutura trabalhada a frio pode ser reconhecida, após um ataque químico, por seus grãos alinhados na direção de laminação. Tal estrutura apresenta uma anisotropia em relação à resistência mecânica. Este efeito pode ser avaliado através da determinação da tensão necessária para romper o material. A resistência é maior quando a tensão é aplicada na direção longitudinal à direção de laminação, e menor quando a tensão é aplicada perpendicular à direção de laminação.⁸

Felizmente, existem duas possibilidades para a eliminação de distorções severas impostas a rede cristalina, recozimento parcial (recuperação) ou por recozimento (recristalização).

Em temperaturas entre 100°C e 125°C, a mobilidade dos átomos aumenta ao ponto de aproximadamente metade das distorções na rede serem removidas (parcialmente recozido). Em temperaturas mais altas, a mobilidade dos átomos na estrutura se torna tão grande que os átomos se reorganizam novamente formando uma rede cristalina livre de

imperfeições (recristalização). A taxa de recristalização aumenta com o aumento da mobilidade dos átomos.¹¹

As propriedades mecânicas são alteradas significativamente com a recristalização. O limite de resistência à tração diminui a valores próximos aos encontrados para o material recozido e, ao mesmo tempo, a elongação aumenta correspondentemente.¹¹

A temperatura na qual a taxa de recristalização começa a ser influenciada é definida pelos seguintes fatores:¹¹

- Adição de elementos de liga: a temperatura de recristalização aumenta principalmente para o Cr, Fe, Mn, V ou Zr em solução ou como precipitados finamente dispersos;
- O quanto deformado está o material: aumentando o trabalho a frio, a temperatura de recristalização diminui;
- Tempo de recozimento.

2.1.4.1 Recuperação

Durante a recuperação, as propriedades físicas e mecânicas que sofreram modificações pelo encruamento tendem a retornar aos seus valores originais através de um rearranjo atômico e aniquilação de algumas discordâncias.⁹

2.1.4.2 Recuperação dinâmica

O efeito básico da recuperação a alta temperatura é a movimentação das discordâncias resultantes da deformação plástica, originando subgrãos. Em muitos casos, este processo pode realmente iniciar-se durante a deformação plástica, e quando isso ocorre, diz-se que o metal sofreu recuperação dinâmica. Em temperaturas mais elevadas, os efeitos da recuperação dinâmica naturalmente se tornam maiores, pois a mobilidade das discordâncias aumenta com a elevação da temperatura.⁹

2.1.4.4 Recristalização

Na recristalização, forma-se um conjunto totalmente novo de grãos. Os novos cristais nucleiam em pontos de alta energia de deformação do reticulado, tais como interseções de linha de escorregamento e nas regiões próximas aos contornos de grão. Se os núcleos se formam rapidamente e crescem devagar, muito cristais se formarão, antes de se tocarem mutuamente, quando o processo de recristalização se completa. Nesse caso, o tamanho de grão final será pequeno. Por outro lado, este será grande se a velocidade de nucleação for pequena com relação à velocidade de crescimento. Como a cinética de recristalização pode, muitas vezes, ser descrita em termos dessas duas velocidades, vários pesquisadores as têm modificado em condições isotérmicas, objetivando um melhor entendimento dos mecanismos de recristalização.⁹

2.2 PROCESSO DE FRICTION STIR WELDING

Materiais com baixo ponto de fusão, tais como Al(658°C) e Cu(1083°C), podem ser soldados por *Friction Stir Welding* (FSW). Este processo é muito confiável e não requer consumíveis ou gases de proteção, e o risco de porosidades ou trincas é muito baixo para um apropriado parâmetro de soldagem.³

A soldagem é realizada com uma ferramenta confeccionada em aço rápido, a qual tem um formato cilíndrico e é constituída basicamente por dois elementos: o pino e o ombro. A ferramenta gira a uma certa velocidade e é posicionada diretamente na linha de união dos materiais a serem soldados, os quais ficam presos firmemente (alternativamente, a peça também pode se mover em relação a ferramenta). O pino é introduzido até o momento em que o ombro entre em contato com as superfícies dos materiais, a partir deste ponto, a ferramenta é movimentada transversalmente na direção da linha de soldagem. A Figura 3 apresenta o processo de soldagem por FSW.

Um aquecimento localizado é produzido pela fricção entre o ombro e a superfície da peça de trabalho, e pela intensa deformação plástica devido a passagem da ferramenta.

A rotação do pino causa uma deformação termomecânica fazendo com que o material ao longo da linha de soldagem seja revolvido. Durante a soldagem, o material ao longo da junta é amolecido devido ao aquecimento, rotado na periferia da ferramenta e em seguida volta a endurecer atrás do pino. Para se produzir uma solda ideal e livre de defeitos, deve-se otimizar a velocidade de rotação da ferramenta, a velocidade de soldagem, a força aplicada pelo equipamento de soldagem contra a peça de trabalho e o perfil do pino.¹⁵

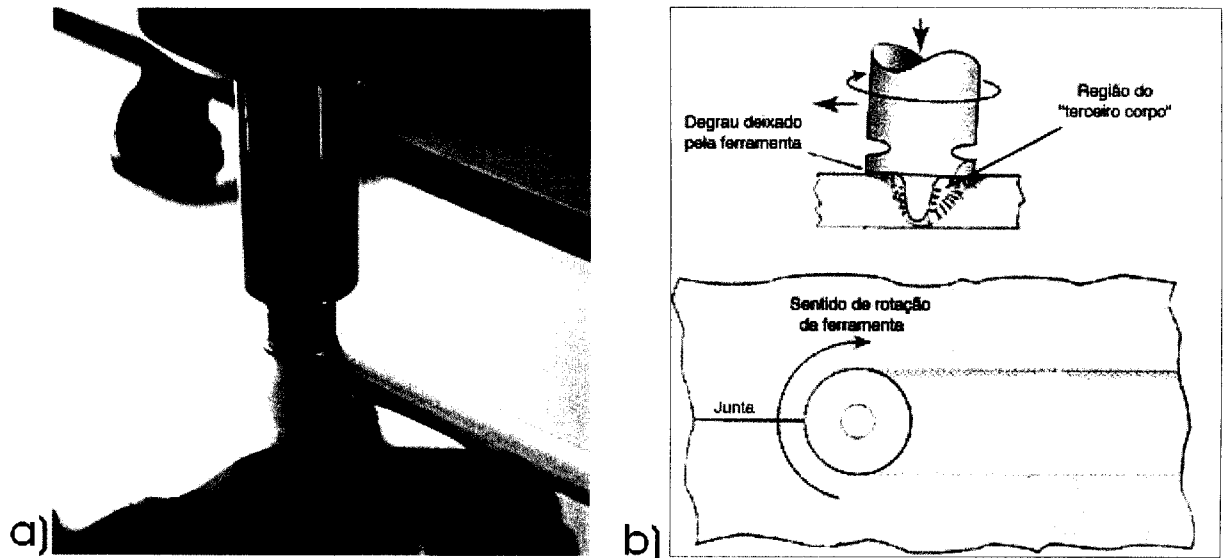


Figura 3 Processo de soldagem por FSW. (a) União de duas placas de alumínio por FSW, (b) desenho esquemático do processo apresentando a geometria da ferramenta.

2.2.1 Ferramentas para *Friction Stir Welding*

A ferramenta para a aplicação em *Friction Stir Welding* (Figuras 4 e 5) tem basicamente dois elementos: o ombro e o pino. O pino é uma sonda perfilada que possui diâmetros que variam de acordo com a sua aplicação e faz parte de um sistema que inclui ainda o ombro, o qual tem um diâmetro geralmente em torno de 12mm.

A função principal do pino é cortar o material plastificado a sua frente e forçar-lo a ser movido para cima e para baixo, e da frente do pino para trás.

O ombro é utilizado para aplicar uma força na superfície da peça de trabalho, conter o material plastificado e gerar aquecimento por atrito. Para uma seção pouco espessa de alumínio, quase todo o calor é suprido pelo ombro. Entretanto, quando a espessura do

material aumenta, mais calor deve ser suprido pelo pino. A tensão compressiva imposta pelo ombro na superfície de interesse impede a formação de poros na consolidação do metal.

O material para ser utilizado em uma ferramenta deve ter resistência mecânica e dureza adequada para que não venha a falhar durante a operação de soldagem. Para a soldagem de ligas de alumínio tem-se usado ferramentas de aço rápido com deposição de nitreto de titânio (TiN).⁴

A tecnologia em torno de toda a geometria da ferramenta (o pino, o perfil do pino e o ombro) tem sido relatada como sendo uma das principais variáveis do processo de FSW, e um grande número de diferentes ferramentas estão sendo estudadas.

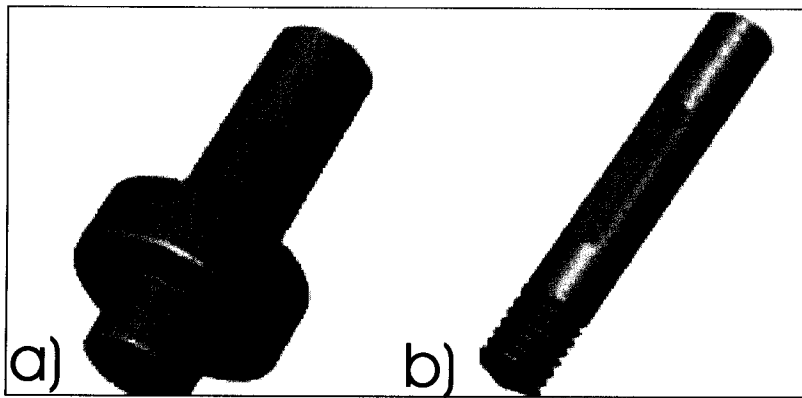


Figura 4 Shoulder em (a) e pino em (b), elementos que formam a ferramenta usada na *Friction Stir Welding*.

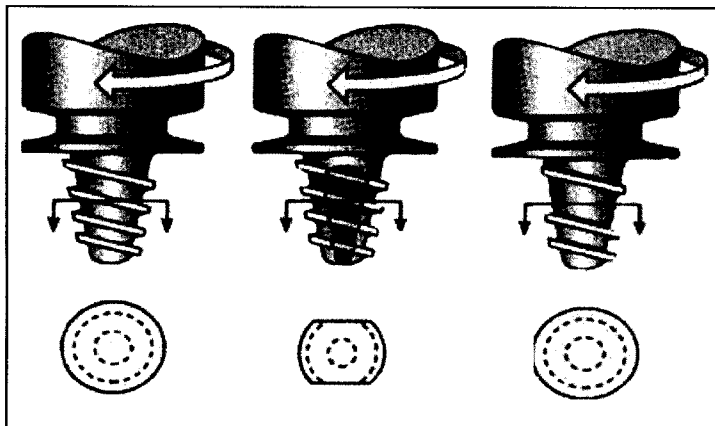


Figura 5 Desenho esquemático de alguns pinos com diferentes perfis.³

2.2.2 Equipamento para soldagem

A máquina de soldagem deve manter uma boa reprodutibilidade. A rigidez e a fixação da máquina são de extrema importância para o sucesso da soldagem. Está ainda sendo estudada uma maneira de soldar sem a formação de um buraco característico deixado pela ferramenta no final da linha de solda. Em muitos casos, esse buraco pode ser cortado, mas em outros, ele tem que ser fechado por outros processos.³

2.2.3 Vantagens

As vantagens da FSW estão baseadas no fato de que as temperaturas envolvidas durante o processo se localizam abaixo da temperatura de fusão dos materiais que são soldados. Com isso, a FSW pode ser utilizada para a união de vários tipos e combinações de materiais. Em superfícies planares é permitida a soldagem em diversas espessuras, sendo também possível unir materiais em diversas geometrias, como solda em topo, solda de seções em T, ou solda de materiais sobrepostos, como pode ser visto na Figura 6.

Um outro benefício significativo é que o processo possui poucos elementos a serem controlados. Em uma soldagem que envolva fusão, por exemplo, existem muitas variáveis que devem ser consideradas, tais como: fluxo de gás, mistura gasosa, tensão e corrente. Já para a FSW há somente três parâmetros facilmente controláveis: velocidade de rotação, velocidade de soldagem e força aplicada na superfície da peça de trabalho.

Pelo fato do processo de FSW não apresentar fusão, pode-se relacionar algumas vantagens em relação aos processos convencionais de soldagem. Algumas características observadas na soldagem de alumínio são:⁴

- Não apresenta problemas quanto a trincas e porosidades;
- Não necessita de proteção com gases;
- Não há formação de respingos;
- Processo de fácil automação, sem dependência de soldadores experientes;
- Pode-se operar em qualquer posição;

- Baixa distorção das peças de trabalho;
- Excelentes propriedades mecânicas, comprovadas por ensaios de fadiga, tensão e dobramento;
- Ferramenta não consumível: uma ferramenta pode ser usada por mais de 1000 metros de solda para a série 6000 de ligas de alumínio.

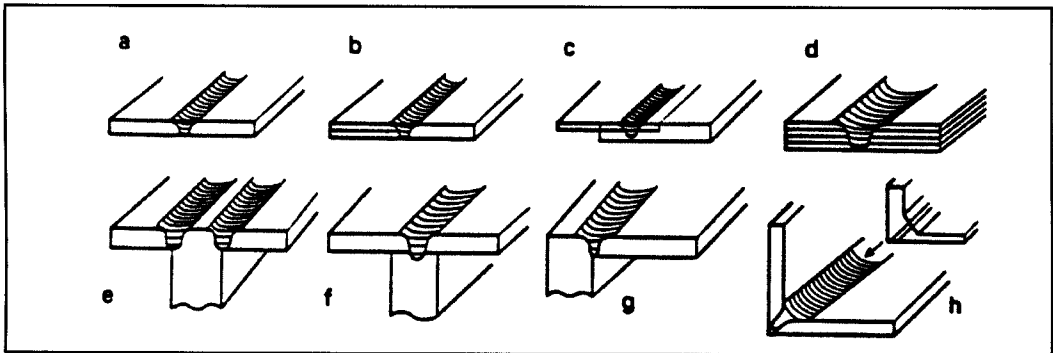


Figura 6 Configurações que podem ser construídas com FSW.⁴

2.2.4 Desvantagens

As limitações da FSW estão sendo reduzidas, como resultados de intensas pesquisas que estão sendo realizadas sobre o processo. Uma das principais limitações reside no fato da velocidade de soldagem de alguns materiais ser relativamente lenta quando comparada com outras técnicas.

Existe a necessidade de que a ferramenta de FSW seja estável, sendo capaz de suportar uma significativa força aplicada sobre ela durante sua inserção no material e também no momento em que ela é movimentada transversalmente ao sentido de união das chapas. Nos pontos de inserção e de retirada da ferramenta do material é produzida uma cavidade, que dependendo da aplicação final do componente, devem ser eliminada. Outra desvantagem é a necessidade de uma mesa de apoio resistente, pois é necessário que o material esteja muito bem suportado.⁴

2.2.5 Propriedades metalúrgicas

Existem dois lados diferentes na solda, em termos de calor fornecido pela ferramenta, o lado de avanço e o de retratamento. No lado de avanço observa-se a geração de mais calor friccional, devido as maiores taxas de cisalhamento oriundas da combinação das direções da velocidade rotacional com a translacional. No lado de retratamento a geração de calor é menor pois as direções das duas velocidades são opostas.²

Estudos aplicados a vários tipos de materiais demonstraram que existem três regiões primárias a serem consideradas em FSW, sendo que estas devem ser subdivididas para cada tipo de material.⁴ Mesmo ainda não existindo uma nomenclatura de uso universal, este trabalho relata as terminologias adotadas pela TWI. As regiões microestruturais encontradas na FSW são:

Material não afetado pelo calor ou Material Base

Este é o material que está distante da solda, o qual não foi deformado, e embora tenha sofrido um ciclo térmico pelo processo de soldagem, não foi afetado em termos de microestrutura ou propriedades mecânicas.⁶

Material afetado pelo calor, mas não mecanicamente deformado

Esta região é definida como Zona Térmicamente Afetada (ZTA). Nesta região, a qual claramente está próxima ao centro da solda, o material sofre um ciclo térmico que modifica a microestrutura e/ou propriedades mecânicas. Entretanto, não há deformação plástica nesta área.⁶

Material afetado pelo calor e mecanicamente deformado

Esta região é definida como Zona Termomecanicamente Afetada (ZTMA). Nesta região o material é plasticamente deformado pela ferramenta da FSW, e o calor gerado

pele processo vai também exercer alguma influência no material. No caso do alumínio, é possível ter uma significativa deformação plástica sem recristalização nesta região.⁵

Nugget

A área recristalizada na ZTMA em ligas de alumínio tem sido tradicionalmente chamada de nugget, embora este termo não seja científico.⁶

Um diagrama esquemático é mostrado na Figura 7, o qual identifica as diferentes regiões encontradas na soldagem de ligas de alumínio por *Friction Stir Welding*. Ainda tem sido sugerida que a área imediatamente abaixo do ombro (a qual claramente faz parte da ZTMA) deveria estar em uma diferente categoria, pois a estrutura do grão é freqüentemente diferente nesta região.

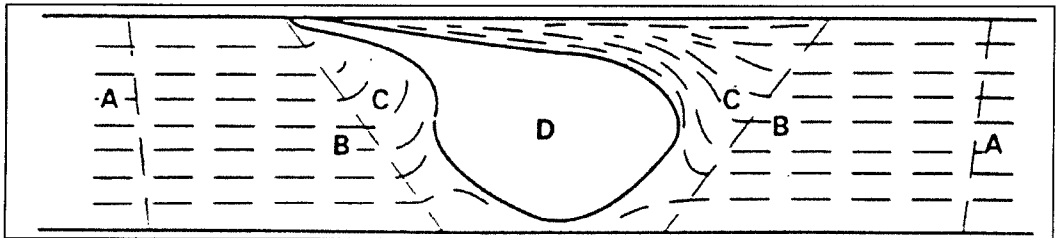


Figura 7 Desenho esquemático indicando as diferentes regiões observadas uma seção transversal de uma chapa soldada por FSW. As letras na figura indicam as diferentes regiões, onde: a) Material base, b) ZTA, c) ZTMA, d) Nugget.

2.2.6 Forças aplicadas no processo

Um dos principais parâmetros do processo de FSW são as forças aplicadas pela ferramenta contra a peça de trabalho, as quais afetam diretamente o calor fornecido para o material para plastificá-lo. As forças mais significativas são: para baixo e na direção longitudinal, e há também uma resultante devido a rotação da ferramenta. Para comprimir o material para a formação da solda, o ombro pré-aquece as superfícies que estão em contato. Para se chegar a condição de alta plasticidade, há um tempo e uma força de

contato mínimo entre a ferramenta e o material. Se esta condição não é alcançada para uma liga específica, pode-se gerar uma fragilização na linha de solda.

Se a pressão da ferramenta aplicada sobre a peça de trabalho gerar mais calor do que o necessário, o material ou partículas do material irão se fundir, afetando negativamente as propriedades mecânicas.

A pressão do ombro é função da velocidade de rotação e da velocidade de soldagem e deve ser suficiente para a formação da solda. Se a pressão do ombro é muito baixa, o calor insuficiente vai gerar defeitos na linha de soldagem, se, por outro lado, a pressão do ombro for muito alta, o ombro vai penetrar no material formando um degrau. Em última análise, pode também ocorrer uma distorção mecânica na solda.⁴

2.2.7 Defeitos em FSW

Experiências têm mostrado que o uso incorreto de procedimentos ou projeto inadequado de ferramentas podem levar a dois tipos diferentes de defeitos na solda. O mais comum é a formação de vazios na linha central da solda ou bem próximo a ela, o qual ocorre abaixo da superfície ou em uma região mais superficial. Esses defeitos são facilmente detectados por inspeção visual ou por raios X.⁵

Um segundo tipo de defeito foi chamado de *kissing bond*, o qual é uma região onde o material está fracamente ligado, sendo formado abaixo do pino. Esse tipo de defeito é de difícil detecção por ensaios não destrutivos. Esses defeitos são conhecidos por reduzir as propriedades mecânicas, especialmente o desempenho em fadiga.⁵

2.2.8 Aplicações

A partir da introdução do processo de FSW, vários setores da indústria podem ser beneficiados com o desenvolvimento comercial desta técnica. Em muitas áreas, o alumínio

não podia ser utilizado devido à problemas relacionados às propriedades da solda. Entretanto com o desenvolvimento do processo de FSW, muitas restrições quanto à aplicação deste processo estão sendo superadas.

A indústria naval foi o primeiro setor que adotou o processo para aplicações comerciais, onde o processo de FSW vem sendo vastamente utilizado na construção de seções de navios, carcaças, estruturas, plataformas para helicópteros, etc.

Atualmente, a indústria aeroespacial tem usado a FSW como processo de soldagem para algumas estruturas de aviões civis e militares. A aplicação da FSW oferece vantagens quando comparado aos processos de rebiteagem e usinagem, pois reduz os custos de manufatura e peso das estruturas. Tanques de combustível fabricados em ligas de alumínio, os quais são utilizados em veículos espaciais, são um exemplo de aplicação. O processo de FSW ainda pode ser utilizado para as asas e fuselagem ou para eventuais reparos.⁷⁻¹⁸

Na indústria automobilística e a seus fornecedores de componentes mecânicos o processo de FSW tem sido aplicado experimentalmente. Aplicações potenciais são:

- Motor e chassis;
- Rodas;
- Chapas de diferentes espessuras;
- Carrocerias de caminhões;
- Tanques de combustível.

2.3 FSW APLICADA A LIGAS DE ALUMÍNIO

Soldagem por fusão de ligas de alumínio de alta resistência são mais difíceis pela forte tendência da formação de trincas na zona soldada ou imediatamente próximo a ela. Quando são soldadas, frequentemente as propriedades mecânicas e a resistência a corrosão sob tensão são muito pobres e, embora, ainda que a maior parte da resistência mecânica possa ser recuperada através da aplicação de um retratamento térmico, uma baixa alongação persiste.

Desenvolvida a partir da soldagem por fricção, a técnica de *Friction Stir Welding* é capaz de soldar materiais sem ou com pequena distorção, boa resistência mecânica e boa resistência à fadiga. Juntas de topo em ligas de alumínio têm sido soldadas com um único passe para espessuras de 1,2 até 50mm. Placas com espessuras acima de 100mm podem ser soldadas usando-se dois passes, um em cada lado da chapa.⁵

A ação da ferramenta na FSW produz uma solda com uma microestrutura mais refinada em relação ao material base. As propriedades da solda em materiais trabalhados a frio e/ou tratados termicamente podem ser aumentadas através do controle do ciclo térmico, principalmente se forem reduzidos os efeitos de recozimento e superenvelhecimento na zona termo-mecanicamente afetada. Para se melhorar ainda mais as propriedades, um tratamento térmico posterior ao final do processo de soldagem pode ser uma boa prática.⁶

As ligas de alta resistência mecânica, endurecíveis por precipitação são largamente utilizadas na construção de estruturas primárias de aviões comerciais e militares. Um exemplo é a série 7000. Estruturas produzidas com esta série utilizam rebites e grampos que aumentam os custos de fabricação e peso das estruturas¹².

A *Friction Stir Welding* pode ser aplicada nesses casos e a qualidade da solda é notável. A repetibilidade na qualidade de soldas em estado sólido pode levar à criação de novos produtos, os quais antes não podiam ser fabricados a processos de soldagem convencionais.⁵

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 INTRODUÇÃO

A experiência adquirida em trabalhos anteriores para estabelecer os parâmetros básicos de soldagem e os resultados de testes com amostras estimularam o desenvolvimento do presente trabalho. Um aperfeiçoamento contínuo do processo de soldagem por *Friction Stir Welding* se torna primordial para que se alcance uma qualidade satisfatória em peças soldadas em diversas geometrias.

Neste trabalho, estudou-se a qualidade dos cordões de solda obtidos com diferentes parâmetros de soldagem através de inspeção visual (aspecto superficial), análise microestrutural, microdureza e testes de dobramento. Estas técnicas são largamente utilizadas como uma primeira investigação com a finalidade de se ter uma resposta imediata quanto à qualidade da solda. Em seguida, escolhidos os parâmetros mais adequados, pode-se passar a ensaios mais elaborados como ensaio de tração e fadiga.

3.2 MATERIAL E TRATAMENTO TRATAMENTO TÉRMICO

Neste estudo foram produzidas soldas de topo utilizando o processo de *Friction Stir Welding* em chapas da liga de alumínio 7050-T7451. As chapas possuíam uma geometria retangular de 300 x 200 e uma espessura de 4mm.

A liga utilizada foi solubilizada e envelhecida com o objetivo de aumentar a resistência mecânica e a resistência à corrosão. A composição química da liga de alumínio utilizada neste trabalho está descrita na Tabela 2.

Tabela 2 Composição química da liga de alumínio 7050.

Elemento	Cu	Mg	Mn _{max.}	Si _{max.}	Fe _{max.}	Cr _{max.}	Zn	Al
% em peso	2,0-2,6	1,9-2,6	0,1	0,12	0,15	0,04	5,7-6,7	bal.

3.3 PARÂMETROS DO PROCESSO

Após a limpeza com desengraxante da superfície das chapas, todas as soldas foram realizadas perpendicularmente à direção de laminação. Variaram-se parâmetros como velocidade de rotação, velocidade de soldagem e comprimento do pino da ferramenta com o objetivo de se produzir três diferentes condições de soldagem: soldas originais, soldas defeituosas e soldas reparadas. Na Tabela 3 estão melhor detalhados todos os parâmetros utilizados para a produção das juntas.

Diferentes parâmetros de processo e geometrias de ferramentas foram investigados para produzir soldas livres de defeitos e com propriedades mecânicas satisfatórias. Utilizando ferramentas inapropriadas também foram produzidas, propositalmente, soldas com defeitos. O objetivo aqui foi tentar reproduzir problemas de soldagem mais comumente reportados na literatura, tais como, vazios e falta de penetração do pino. Em seguida, as soldas que apresentaram defeitos sofreram um segundo passe de soldagem, utilizando-se novas geometrias de ferramenta e novas velocidades de soldagem. O segundo passe foi aplicado no cordão de solda defeituoso na tentativa de se eliminar os defeitos produzidos anteriormente.

Tabela 3 Parâmetros de soldagem

Código	Tipo	Velocidade de rotação (RPM)	Velocidade de soldagem (mm/min)	Espessura da chapa (mm)	Comprimento do cordão de solda
80-40	Original	800	400	4	130
80-25	Original	800	250	4	130
65-30	Original	650	300	4	130
65-25	Original	650	250	4	130
65-15	Original	650	150	4	100
50-15	Original	500	150	4	120
50-5	Original	500	50	4	120
D65-20	Defeituosa	650	200	4	200
D65-20	Defeituosa	650	200	4	270
R65-15	Reparada	650	150	4	120
R50-15	Reparada	500	150	4	120

3.4 EQUIPAMENTO

Todas as soldas foram produzidas com a máquina *NEOS Tricept 805*. Este equipamento tem um controle CNC *Siemens (Sinumerik 804D)* e opera com seis graus de liberdade juntamente com o controlador de força *Comau C3G* capaz de aplicar forças de até 15 kN na direção vertical e 10 kN na direção horizontal. O robô também é equipado com um sistema de medição de força com capacidade de medir cargas de até 20 kN em ciclos de 60 Hz. Devido a sua acuracidade, alta velocidade e rigidez, este sistema é predominantemente empregado no campo da soldagem automatizada. A força e rigidez dada pelo equipamento permitem soldagem de chapas de ligas de alumínio de alta resistência com espessuras de até 10 mm.

3.5 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

As chapas foram cortadas para utilizar-se como superfície de análise uma secção transversal ao cordão de solda. As amostras foram preparadas através de procedimentos convencionais de lixamento e polimento, e atacadas quimicamente com reagente Keller. Em seguida as amostras foram levadas ao microscópio ótico para a identificação da região do nugget, da zona termo-mecanicamente afetada (ZTMA), da zona afetada pelo calor (ZTA) e do próprio metal base. E para o caso das soldas defeituosas, também foram identificados os tipos de defeitos.

3.6 TESTE DE DOBRAMENTO

O ensaio de dobramento a três pontos é usado, rotineiramente, no estabelecimento dos melhores parâmetros de soldagem. O ensaio se baseia na norma ASTM E 190-92. No caso da FSW, o ensaio é utilizado qualitativamente e o objetivo é estimar a ductilidade da junta.

As amostras utilizadas no teste de dobramento foram retiradas das chapas soldadas, tendo dimensões de 20mm de largura, 70mm de comprimento e 4mm de espessura. Foi examinada a olho nu a zona tracionada dos corpos de prova, sendo que utilizou-se como critério de avaliação da qualidade das soldas o aparecimento de trincas superficiais. Quando o material trincava, cessava-se a aplicação da força e media-se o ângulo de dobramento. As regiões ensaiadas da solda foram a raiz e o topo.

3.7 MICRODUREZA

O ensaio de microdureza aplicado em amostras soldadas tem como objetivo construir um perfil de microdureza ao longo de uma secção transversal. Para ligas de alumínio, soldadas por *Friction Stir Welding*, é possível avaliar qualitativamente as propriedades mecânicas da região do nugget, da zona termomecanicamente afetada e da zona termicamente afetada através da distribuição de dureza ao longo da junta soldada.

O microdurômetro *HMV200 Shimadzu-Struers*, disponível no GKSS, permite a realização de microdureza Knoop e Vickers para cargas que variam de 10 gf até 1000 gf, que são escolhidas de acordo com o tipo de material que será ensaiado. Com o auxílio de um computador tipo PC e um software foi possível ajustar a carga e o local de cada indentação. As medições das diagonais das indentações foram feitas manualmente.

Tomou-se como superfície de análise da amostra uma secção transversal a linha de soldagem. A superfície da amostra tinha acabamento polido e estava sempre posicionada perpendicularmente ao indentador. Foi utilizado o penetrador Vickers e uma carga de 200 gf. A carga foi aplicada levemente na superfície plana da amostra e mantida durante 10 segundos. As indentações foram realizadas a 2mm da base das chapas e distavam 0,5mm entre si, completando um total de 80 pontos para cada corpo de prova.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 INSPEÇÃO VISUAL

A inspeção visual é geralmente o primeiro passo para se examinar a qualidade de uma solda e é considerado um processo simples e barato. Uma inspeção visual eficiente, após a soldagem, pode detectar prematuramente os eventuais defeitos, de forma que uma ação corretiva possa ser tomada, minimizando um futuro reparo em uma estrutura. A investigação consiste na procura de defeitos tais como poros, trincas, excesso de material expelido pelo processo, ou má formação do cordão-de-solda.

O cordão de solda apresentado na Figura 8 é resultado da soldagem com o parâmetro usado para produzir a solda defeituosa, onde nota-se a presença de porosidades na superfície. Todos os demais parâmetros apresentaram um cordão de solda livre de porosidades ou trincas superficiais, como pode ser visto na Figura 9, que é uma fotografia da solda realizada com uma velocidade de rotação de 500rpm e velocidade de soldagem de 150mm/min.

Percebeu-se um aumento da quantidade de rebarbas nas laterais dos cordões de solda para todos os parâmetros que envolveram velocidades de rotação de 800rpm (Figura 10), o que deve ser evitado, já que leva a uma considerável perda de material e afeta negativamente o acabamento superficial. Este efeito não foi observado quando utiliza-se velocidades de rotação de 500 e 650rpm.

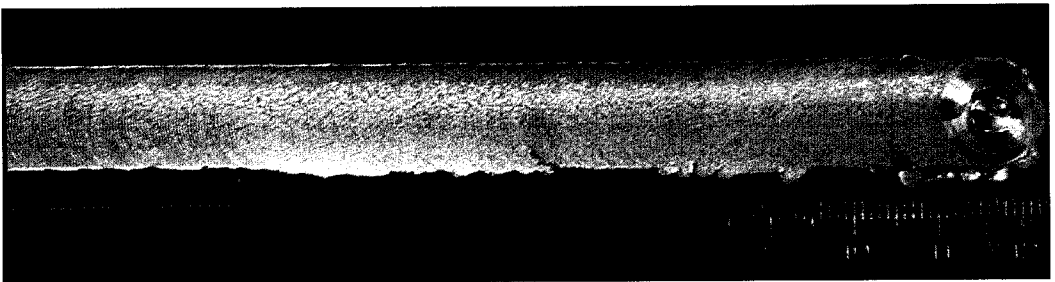


Figura 8 Vista da superfície da chapa soldada pelo processo de *Friction Stir Welding*.

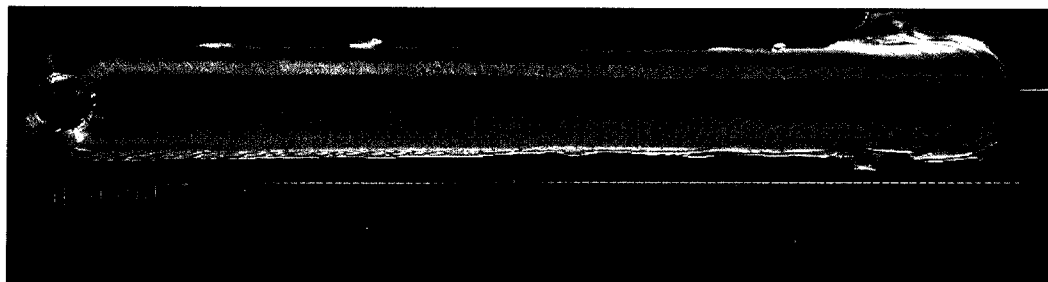


Figura 9 Vista da superfície da chapa soldada pelo processo de *Friction Stir Welding* com velocidade de rotação de 650 rpm e velocidade de soldagem de 150 mm/min.

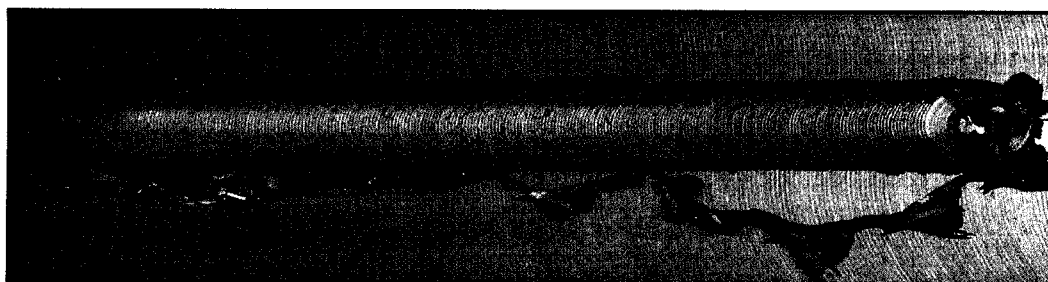


Figura 10 Vista da superfície da chapa soldada pelo processo de *Friction Stir Welding* com velocidade de rotação de 800 rpm e velocidade de soldagem de 400 mm/min revelando um excesso de material expelido na lateral do cordão de solda.

4.2 ENSAIO DE DOBRAMENTO

Após a inspeção visual, utilizou-se o teste de dobramento como uma segunda avaliação da qualidade das soldas. Foram submetidos ao teste dois corpos de prova de cada junta soldada, um corpo de prova para o teste de dobramento aplicado a raiz e outro aplicado ao topo do cordão de solda.

Quando o teste foi realizado ao topo, atingiram-se ângulos de dobramento sempre acima de 100° para todas os corpos de prova, exceto para aqueles retirados das soldas defeituosas.

Considerando o teste de dobramento aplicado à raiz da solda de todas as amostras originais e reparadas, pode-se observar ângulos de dobramento acima de 100°, para as soldas produzidas com velocidades de rotação de 800 e 650 rpm, indicando que há uma melhora na ductilidade da junta.

Os melhores resultados para os testes de dobramento foram observados para as amostras 80-40, 65-25 e 50-15, onde se atingiu ângulos de dobramento de 152°. Já para as soldas reparadas R65-15 e R50-15 mediram-se ângulos de dobramento de 155° e 152° respectivamente.

4.3 MICROSCOPIA ÓTICA

Todas as amostras foram observadas em microscópio ótico após a preparação metalográfica, sendo que numa primeira investigação encontraram-se alguns defeitos.

A importância da investigação macrográfica da seção transversal da solda é devido a possível presença de defeitos internos, não detectáveis via exame visual. A presença de defeitos indica que não houve transporte efetivo de material ou adotaram-se parâmetros de processo incorretos. Uma solda para ser considerada não defectiva deve exibir um metal de solda sem poros ou trincas. A transição entre o metal-de-solda e a ZTMA não deve ser brusca e a base da solda deve estar bem ligada¹⁷. As Figuras 11 e 12 mostram exemplos de soldas defeituosas e perfeitas respectivamente.

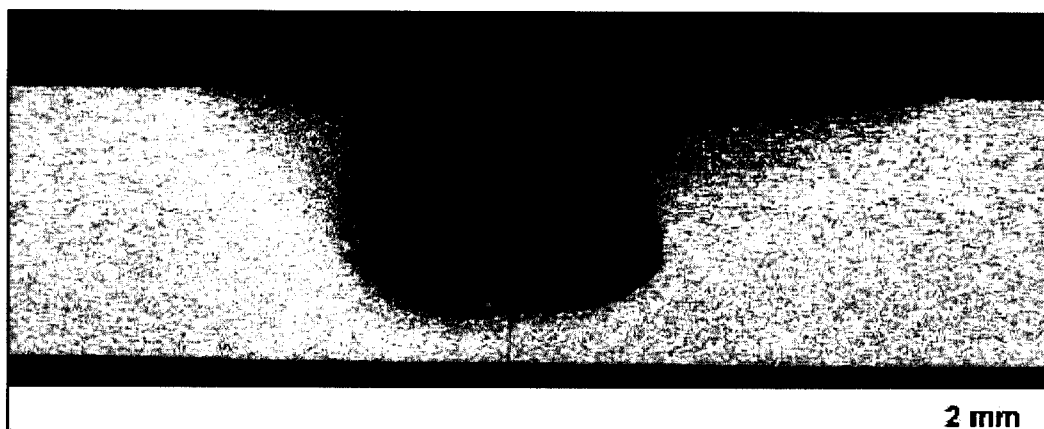


Figura 11 Macrografia de uma seção transversal das chapas soldadas com 650 rpm e 300 mm/min revelando a região onde houve falta de penetração do pino da ferramenta. Ataque: reagente Keller.

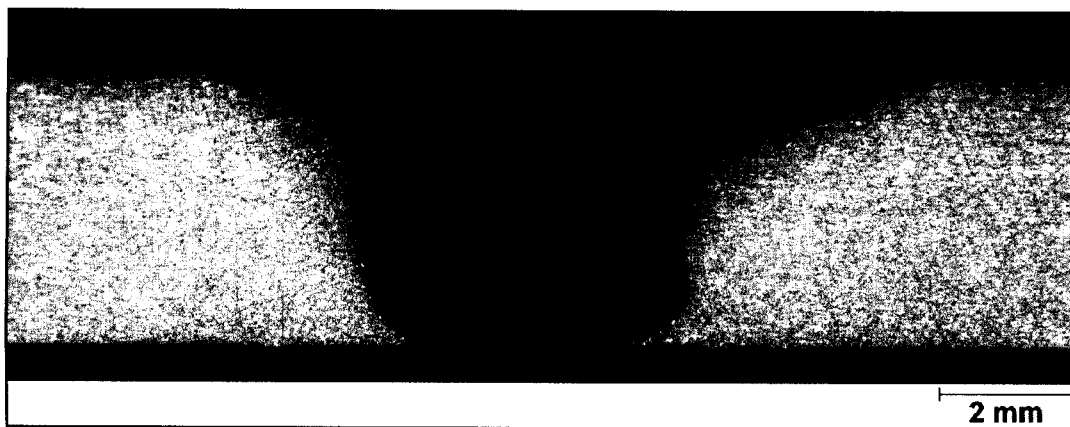


Figura 12 Macrografia de uma secção transversal das chapas soldadas com 650 rpm e 250 mm/min. Ataque: reagente Keller.

Os principais fatores que geram uma baixa qualidade num cordão de solda de uma junta de topo, para o caso da *Friction Stir Welding*, são vazios e falta de união dos metais na raiz (Figura 13). Esses tipos de defeitos são facilmente detectados em macrografias de secções transversais da junta soldada.

O defeito de *kissing bond* (falta de união do metal de solda na raiz), por exemplo, reduz a capacidade de resistência à carga estática, podendo afetar também as propriedades de fadiga e tenacidade à fratura. As "*kissing bonds*" provêm geralmente da presença da camada de óxido, os quais prejudicam o contato entre as superfícies. No caso da FSW, esses defeitos vêm do insuficiente arraste de material devido ao escorregamento do material contra o pino, ao invés de haver fricção.¹⁵ Um pino com perfil inadequado, ou com comprimento menor do que a espessura das peças que estão sendo soldadas contribui para o aparecimento desses defeitos.

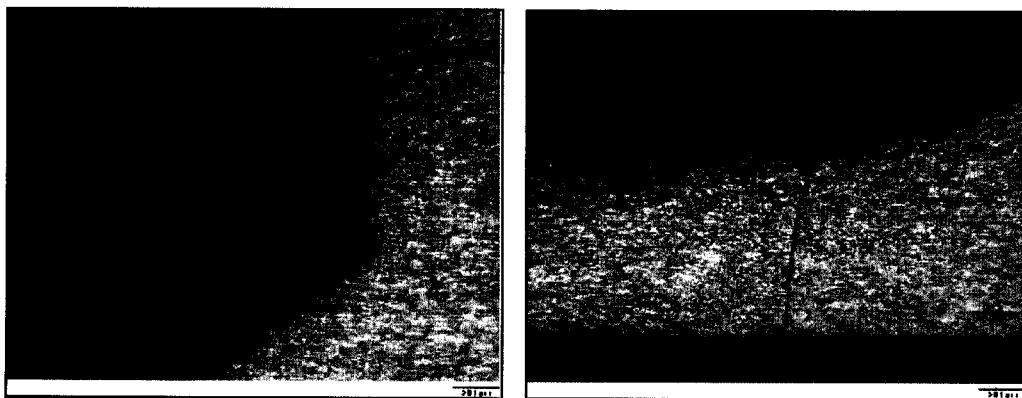


Figura 13 Macrografia de soldas defeituosas, em (a) um vazio e em (b) *kissing bond*.

O processo de *Friction Stir Welding* pode ser considerado um processo de trabalho a quente, no qual uma grande quantidade de deformação é imposta pela ação da ferramenta (forças aplicadas, rotação do pino e do *shoulder*). Com essa deformação são criados o *nugget*, a zona termo-mecanicamente afetada (ZTMA) e a zona termicamente afetada (ZTA).

A Figura 14 mostra uma macrografia típica de uma secção transversal de uma chapa soldada por FSW. Na micrografia da Figura 15, observa-se que o material base é constituído por grãos alongados devido ao processo de laminação, juntamente com uma distribuição de precipitados de $MgZn_2$ e dispersóides do tipo Al_3Zr .¹³

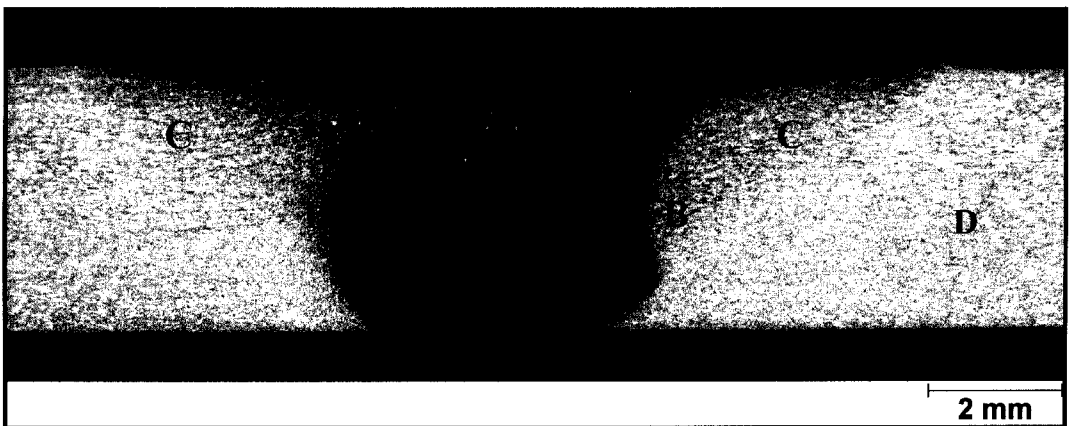


Figura 14 Macrografia de uma secção transversal das chapas soldadas com 800 rpm e 400 mm/min. Em A encontra-se o *nugget*, em B a zona termo-mecanicamente afetada, em C a zona termicamente afetada e em D, o material base. Ataque: reagente Keller.

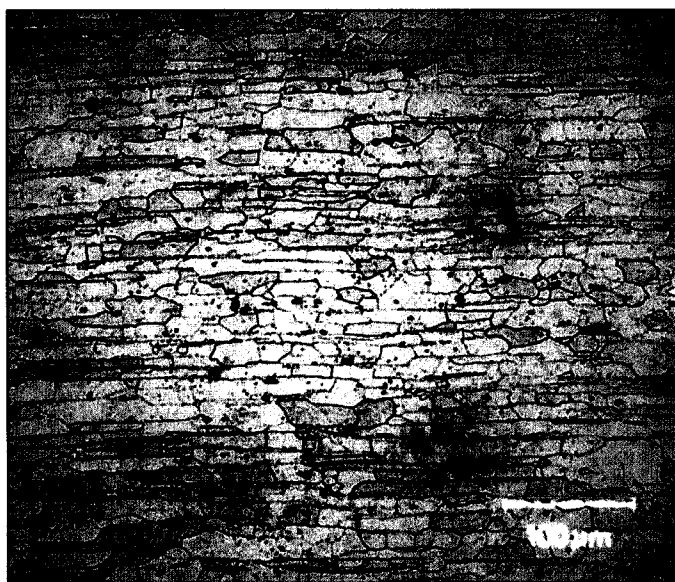


Figura 15 Micrografia da liga de alumínio AA7050-T7451 revelando uma microestrutura de grãos alongados devido ao processo de laminação. Ataque: reagente Keller.

As macrografias de seções transversais das juntas soldadas revelam um *nugget* com diâmetros que variam de 4,0 a 5,5 mm para todos os parâmetros de soldagem utilizados neste trabalho. Normalmente, o diâmetro do *nugget* é diretamente proporcional ao diâmetro do pino utilizado na ferramenta para a soldagem. O *nugget* contém grãos equiaxiais muito finos e recristalizados dinamicamente, tipicamente de 2 a 5 μm de diâmetro (Figura 16); em contraste com o material base e a zona termo-mecanicamente afetada.¹³ A formação desses grãos de pequeno diâmetro é devido as temperaturas geradas e a intensa deformação cisalhante imposta pela ferramenta. O movimento de rotação da ferramenta quebra as partículas maiores, enquanto que as temperaturas atingidas durante a soldagem contribuem de forma a dissolver alguns precipitados.¹³

Na zona termo-mecanicamente afetada, o material também é submetido a uma significativa deformação mecânica, como pode ser visto na Figura 17. Neste caso, existe uma reorientação dos grãos, os quais foram rotados em aproximadamente 90°.

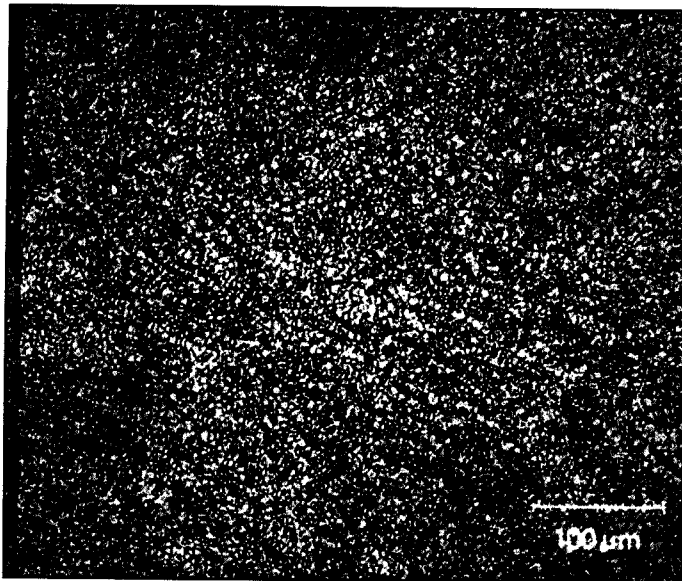


Figura 16 Micrografia da região do nugget para uma amostra soldada com 800 rpm e 400 mm/mim. Ataques: reagente Keller

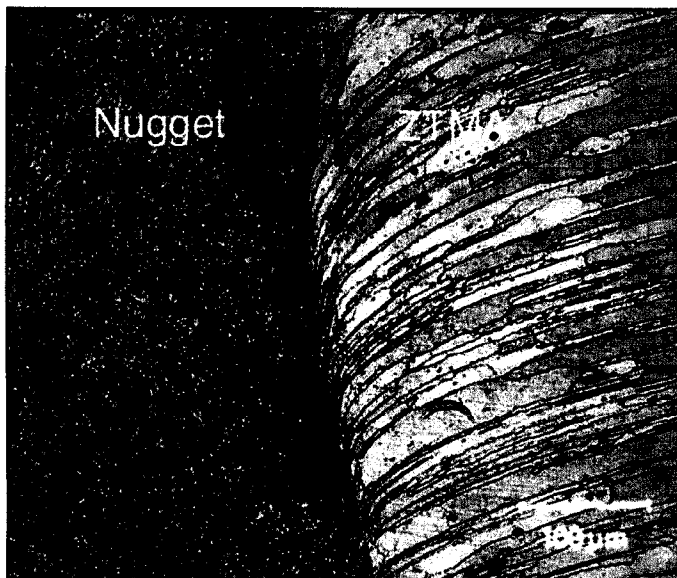


Figura 17 Micrografia mostrando a região de interface entre o nugget e a zona termomecânica afetada de uma amostra soldada com 800 rpm e 400 mm/min. Ataque: reagente Keller.

Na ZTA, as propriedades mecânicas são afetadas pelo calor. Este fato se confirma nos perfis de microdureza para todos os parâmetros de soldagem estudados neste trabalho, onde verificou-se uma queda dos valores de dureza para regiões próximas ao centro da solda. Segundo Threadill¹, ocorrem mudanças em nível microscópico. Precipitados formados durante o envelhecimento são dissolvidos em solução sólida e a densidade de discordâncias é reduzida.

Experiências têm mostrado que velocidades de soldagem excessivas, particularmente a baixas velocidades de rotação, geram insuficiente calor por unidade de comprimento na solda, levando a uma qualidade insatisfatória.⁵ Quando a razão velocidade de rotação/velocidade de soldagem é grande, mais calor é imposto pela ferramenta durante a soldagem, quando se mantém constantes a força aplicada pela ferramenta e a geometria do pino e do ombro.⁵

Como pode ser observado nas Figuras de 18 a 20, há uma tendência de diminuição do tamanho de grão no centro do *nugget*, quando se solda com velocidades de rotação e velocidades de soldagem menores, o que é vantajoso sob o ponto de vista de tenacidade. Essa redução no tamanho de grão acontece devido a maior taxa de deformação e maior imposição de calor por unidade de comprimento do cordão de solda. Os parâmetros utilizados levam o material a uma condição tal que o fenômeno de recristalização dinâmica atua mais vezes no mesmo volume de material gerando sucessivamente grãos mais finos.

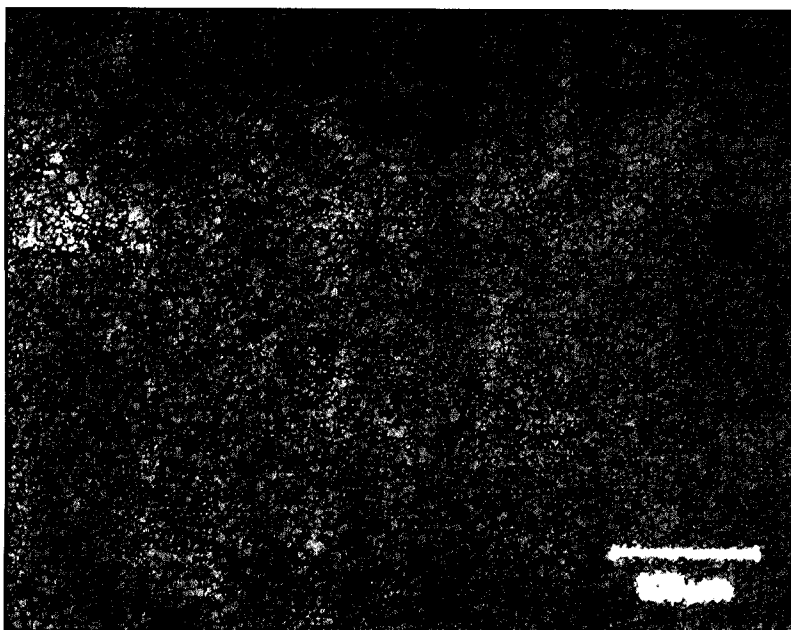


Figura 18 Micrografia revelando a região do nugget para uma amostra retirada de uma chapa soldada com VR=800rpm e VS=400mm/min.

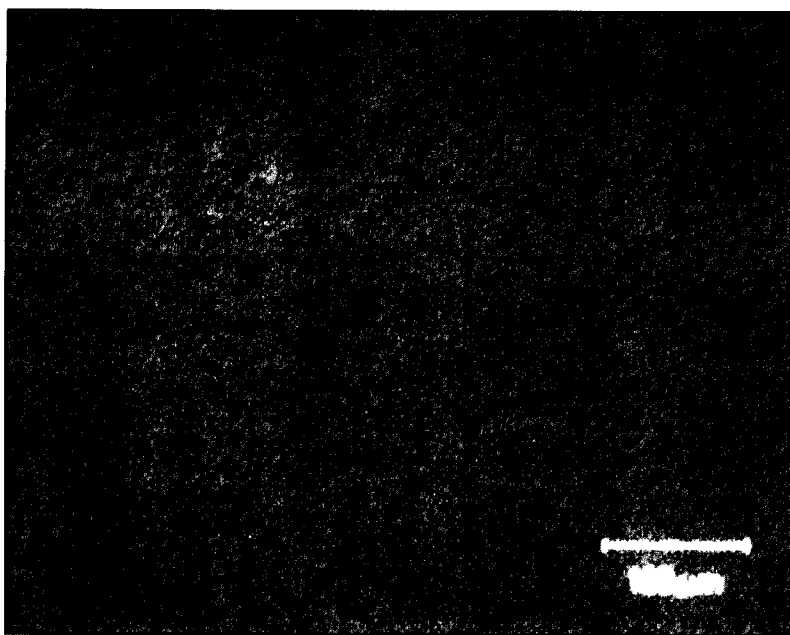


Figura 19 Micrografia revelando a região do nugget para uma amostra retirada de uma chapa soldada com VR=650rpm e VS=150mm/min.

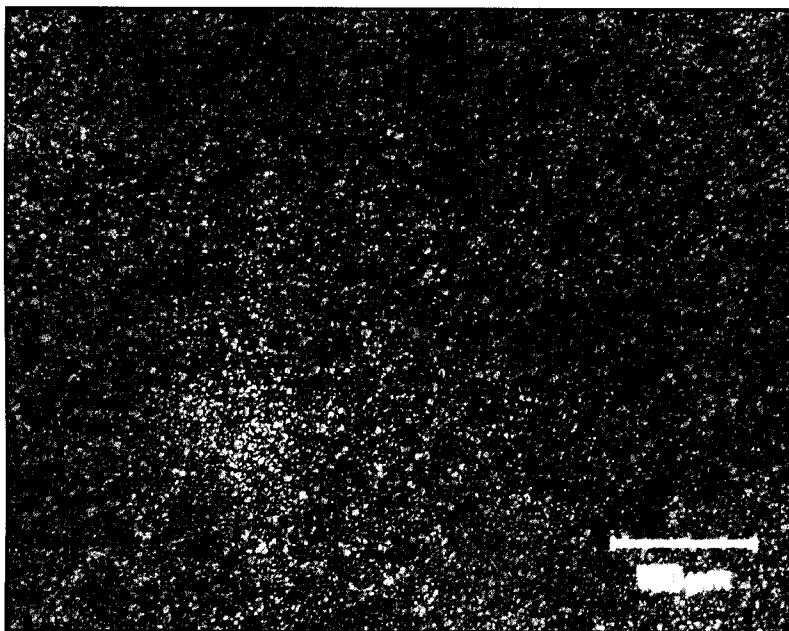


Figura 20 Micrografia revelando a região do nugget para uma amostra retirada de uma chapa soldada com VR=500rpm e VS=50mm/min.

4.4 MICRODUREZA

Com os perfis de microdureza realizados ao longo das seções transversais das amostras, percebe-se claramente uma variação nos valores de dureza, desde o material base até o centro da solda. A zona termicamente afetada tem seu início caracterizado por uma queda brusca nos valores de microdureza, o que ocorre devido ao crescimento de precipitados que são cerca de cinco vezes maior do que no metal base¹⁶. Logo em seguida, forma-se a zona termomecanicamente afetada, onde se observa um aumento de microdureza até um máximo valor local, que representa o início do *nugget*. A identificação das regiões nos cordões de solda obtidos por FSW usualmente é feita de acordo com a figura 21.

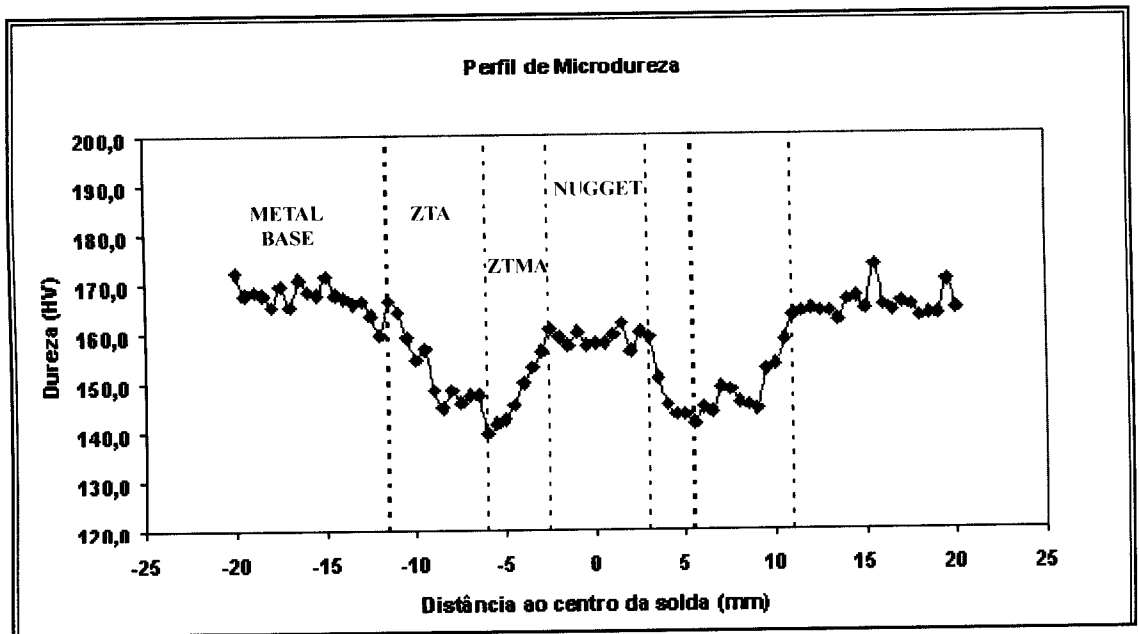


Figura 21 Perfil de microdureza mostrando as principais regiões encontradas em uma solda de topo por FSW.

A ZTA foi a região em que se mediu a menor microdureza para todos os casos estudados. Confirma-se aqui o fato de que o ciclo térmico, ao qual o material é submetido durante a soldagem, claramente afeta suas propriedades mecânicas.

A microdureza mínima localizada na ZTMA é devido aos fenômenos de superenvelhecimento/recozimento quando as temperaturas desenvolvidas são suficientemente altas para favorecer o crescimento de precipitados.⁴ Para zona termomecânica afetada, os valores de microdureza tendem a aumentar quando se vai em direção ao centro da solda. A ZTMA na grande maioria dos casos é mais larga no lado de avanço em comparação com o lado de retratamento, pois a geração de calor é mais intensa devido ao somatório das direções da velocidade rotacional com a translacional.

Já para o *nugget* os valores de microdureza se mantiveram constantes quando se solda com as mesmas velocidades de rotação, alterando apenas velocidades de soldagem, como pode ser visto nas Figuras 22 e 23. Porém, observou-se que quanto mais alta a velocidade de rotação durante a soldagem, maiores são os valores de dureza encontrados no *nugget* para uma mesma velocidade de soldagem. A dureza nessa região é uma

combinação de grãos finos e do envelhecimento natural.. Análises utilizando a técnica de microscopia eletrônica de transmissão mostram que o processo de FSW também é capaz de redissolver alguns precipitados na região do *nugget*.¹⁶

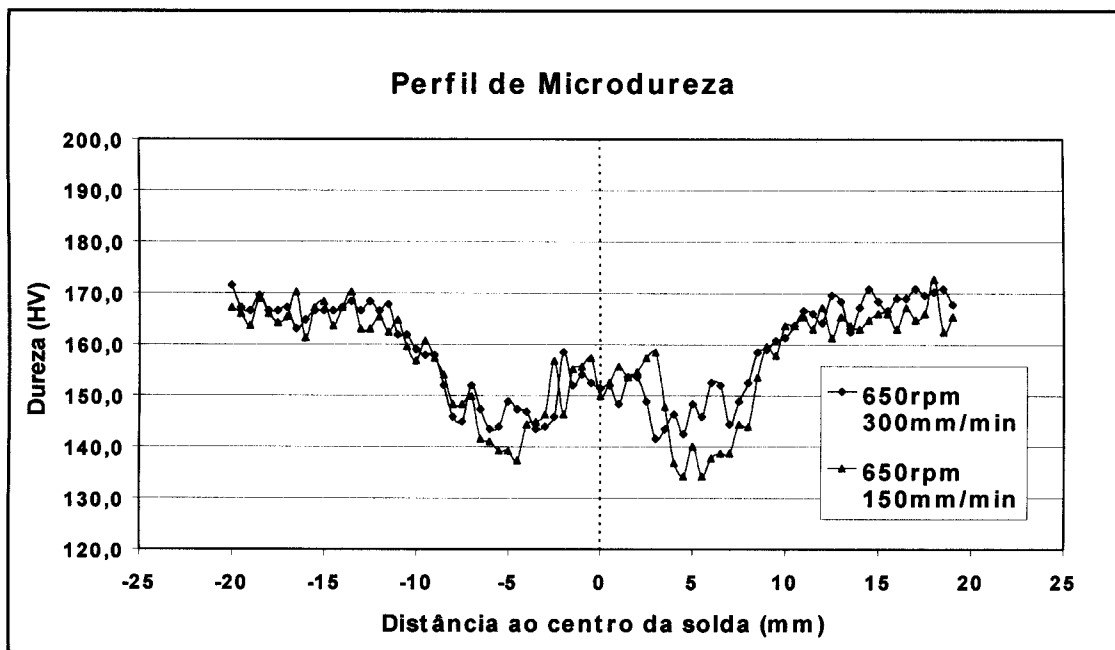


Figura 22 Perfil de microdureza de amostras soldadas com diferentes velocidades de soldagem.

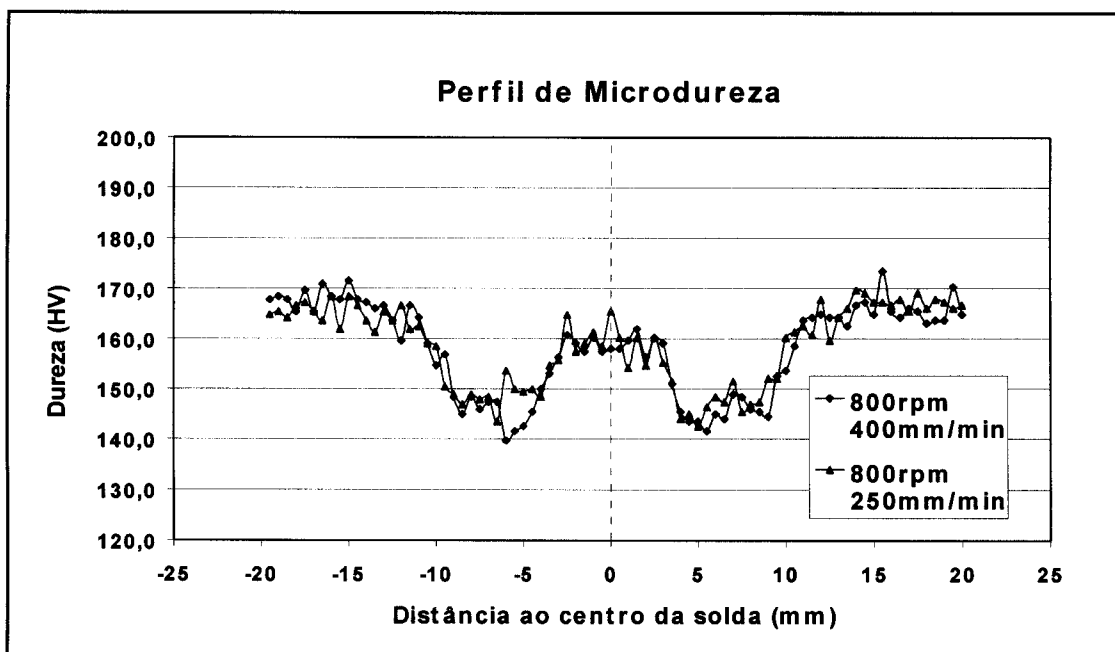


Figura 23 Perfil de microdureza de amostras soldadas com diferentes velocidades de soldagem.

A Figura 24 mostra os valores de microdureza Vickers contra a distância ao centro da solda para amostras soldadas com diferentes velocidades de rotação e mesma velocidade de soldagem. Nesta figura, percebe-se um pequeno aumento dos valores médios de microdureza na região do *nugget* quando se passa de 500rpm para 650rpm de velocidade de rotação. A solda com parâmetro VR=500rpm e VS=150mm/min recebeu menor quantidade de calor gerado pela ferramenta, de modo que as condições de recuperação e superenvelhecimento levam à uma transição menos acentuada nos valores de dureza na região central da solda, o que pode resultar, eventualmente, em uma melhora sob o ponto de vista mecânico, pois a ZTA e a ZTMA diminuiriam a tendência de atuar como concentradores de tensão. No ensaio de dobramento, a amostra 50-15 obteve um ângulo de dobramento de 152°, enquanto que a amostra 65-15 atingiu-se um ângulo de dobramento de 35°. Isso é um indicativo que deve-se usar altas velocidades de rotação na soldagem, mas é importante ressaltar que existem muitos parâmetro no processo de *Friction Stir Welding*, e que eles não devem ser considerados individualmente para se produzir uma solda com qualidade satisfatória.

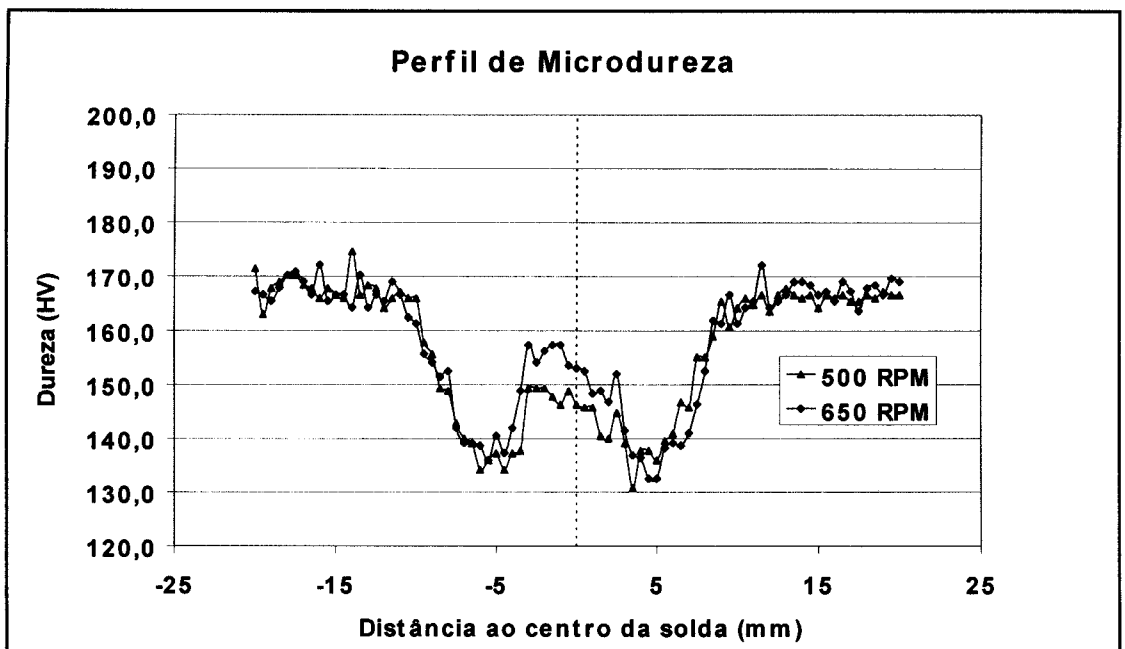


Figura 24 Perfil de microdureza de amostras soldadas com diferentes velocidades de rotação.

A análise das soldas reparadas indicaram que o ciclo térmico e a deformação adicional impostas pela soldagem extra não modificaram a macroestrutura em relação a uma solda original. Quando se observa a ZAC, a ZTMA e o *nugget* não é possível identificar uma diferença significativa na microestrutura de amostras originais e reparadas e também não há uma alteração na largura das regiões. Os resultados de microdureza confirmam esta observação como pode ser visto nas Figuras 25 e 26.

Nos perfis de microdureza das Figuras 25 e 26, não se observa uma diferença significativa nos valores de microdureza entre amostras reparadas e originais que possuem os mesmos parâmetros de soldagem. As propriedades mecânicas não são significativamente modificadas com a introdução de um novo ciclo térmico aplicado a uma solda defeituosa.

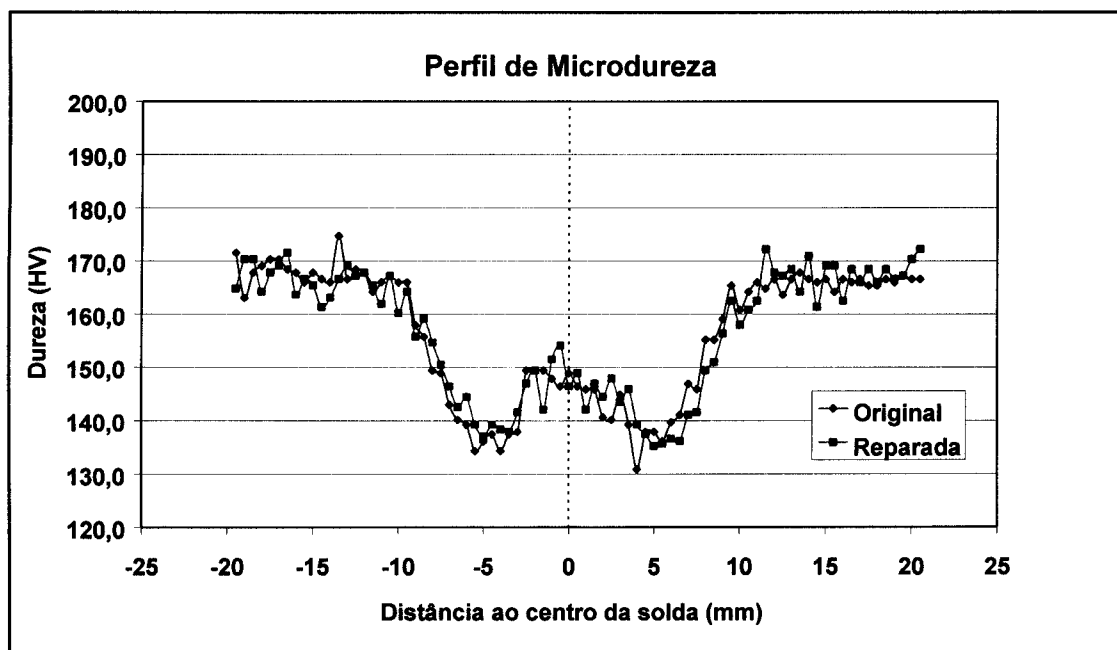


Figura 25 Perfil de microdureza de amostras originais e reparadas soldadas com velocidade de rotação de 550rpm e velocidade de soldagem de 150mm/min.

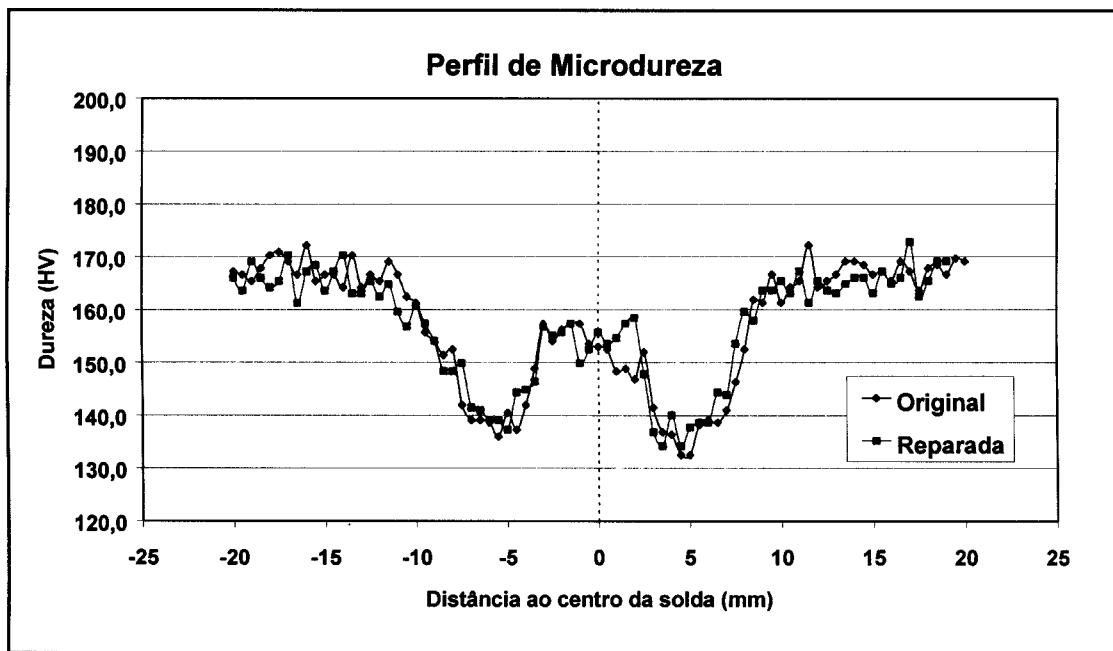


Figura 26 Perfil de microdureza de amostras originais e reparadas soldadas com velocidade de rotação de 650rpm e velocidade de soldagem de 150mm/min.

5 CONCLUSÕES

Os resultados indicaram que é viável a aplicação do processo de *Friction Stir Welding* para se efetuar, com qualidade, a união de chapas de alumínio da liga 7050-T7451.

As análises macrográficas e micrográficas revelaram a presença de imperfeições, tais como vazios e *Kissing bond*, nas amostras consideradas defeituosas, estes defeitos, claramente, comprometeram a qualidade do cordão de solda, como pôde ser observado nos testes de dobramento.

Verificou-se também que existem três regiões bem definidas na região central da solda, onde as propriedades mecânicas variam em função dos parâmetros de soldagem utilizados.

Para a produção de soldas originais, a diminuição da velocidade de soldagem acompanhada da diminuição da velocidade de rotação, produziram as soldas de melhor qualidade segundo os critérios de análise adotados, isto é, aparecimento de defeitos, teste de dobramento e perfil de microdureza.

O teste de dobramento se mostrou um método rápido e bastante eficiente no que se refere a uma primeira avaliação da ductilidade da junta obtida, sendo os melhores resultados obtidos para chapas soldadas preferencialmente com os parâmetros 80-40, 65-25 e 50-15.

As análises das juntas reparadas indicaram que o ciclo térmico e a deformação adicional imposta pela soldagem resultaram numa macroestrutura bastante similar àquela observada nas soldas originais. Os resultados dos perfis de microdureza confirmam esta observação, pois as soldas reparadas não apresentaram perda de dureza em comparação às soldas originais para as diferentes zonas características da FSW. Soldas reparadas foram realizadas com sucesso mostrando o potencial da técnica para a aplicação em estruturas que eventualmente necessitem de reparos.

Os testes realizados nesta investigação foram eficientes como uma primeira avaliação da qualidade dos cordões de soldas produzidos. Estes testes, eventualmente, podem ser utilizados em estudos mais aprofundados que incluiriam a área de mecânica da

fratura, fadiga e corrosão. Finalmente, com a completa caracterização metalúrgica e mecânica, o processo de *Friction Stir Welding* poderá ser utilizado para fabricação de componentes e estruturas reais.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Aumentar a matriz de experimentos, estudando principalmente parâmetros de processo que envolvam velocidades de soldagem mais altas.

Procurar aplicar parâmetros de soldagem na tentativa de minimizar as quedas de dureza na zona termomecanicamente afetada e na zona afetada pelo calor.

Aplicar tratamentos térmicos pós-soldagem.

Realizar estudos relacionados a mecânica da fratura e fadiga para chapas soldadas com diferentes parâmetros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) **THREADGILL, P.: Friction stir welds in aluminium alloys - preliminary microstructural assessment.** Edited by. Bulletin: TWI; 1997:
- (2) **MESSLER, R. W. Jr., Joining of advanced materials.**
- (3) **KIMPSTRÖM, KARL-ERIK., PEKKARI, BERTIL. Friction Stir Welding goes commercial.** Welding Journal (1997) 55-57.
- (4) **Friction Stir-Where we are, and where we are going.** Bulletin TWI (Junho-1998).
- (5) **THREADGILL, P. L., Friction Stir Welding-The state of the art-TWI (Maio-1997).** TWI Research Report
- (6) **STHEPHAN, K., NICHOLAS, D., Friction Stir Welding at TWI.** Página eletrônica: http://www.twi.co.uk/j32k/unprotected/band_1/fswintro.html
- (7) **HATCH, J. E., Aluminium: Properties and Physical Metallurgy.** American Society for Metals, Metals Park, Ohio. May 1984.
- (8) **ASM Handbook-Properties and Selection: Non Ferrous Alloys and Special-Porppouse Materials, 1990.**
- (9) **REED HILL, R. E. and ABBASCHIAN, R., Physical Metallurgy Principles, 3rd edition, 1994.**
- (10) **MEYERS, M. A., CHAWLA, K.K., Mechanical Behaviour of Materials** Practice Hall, 1999.
- (11) **ATTENPOHL, D. G., Aluminium: Techology, aplications and enviroment.**

- (12) PAO, P. S., GILL, S. J., FENG, C. R. SANKARAN, K. K., **Corrosion-fatigue crack growth in friction stir welded Al 7050**. Scripta Materialia, (maio 2001) 605-612.
- (13) MANDOLFO, L. F., **Aluminium Alloys: Structure and Properties**. Butterworths, 1976. The University of Liverpool.
- (14) SEETHARAMAN, V., JATA, K. V., SEMIATIN, S. L., **Plastic flow and microstructure development during high temperature deformation of a friction stir welded 7050 aluminium alloy**. Air Force Research Laboratory – Wright-Patterson Air Force Base, OH 45433-7817.
- (15) OOSTERKAMP, L. D., L.O., NORDEIDE A.: **Parallel between the "kissing bond" phenomenon in friction stir welds an extrusion welds of commercial aluminium alloys**. In 3rd International Symposium on FSW 27th-28th Sepember; Kobe, Japan: 2001:1-12. **Proceedings**.
- (16) JATA, K. V., SANKARAN, K. K., RUSCHAU, J. J., **Friction Stir Welding Effects on Microstructure and Fatigue of Aluminium Alloy 7050-T7451**. Metallurgical and Materials Transactions A. Volume 31A, September 2000.
- (17) AMANCIO FILHO, S. de T., **Soldagem por fricção de junta dissimilar em ligas de alumínio AA 2024 e AA 6056: microestrutura e propriedades**. São Carlos 2002, Dissertação de Mestrado-UFSCar.
- (18) BRINKMANN, S., STROMBECK, A. V., SCHILLING, C., dos SANTOS, J. F., LOHWASSER, D., KOÇAK, M., **Mechanical and Toughness Properties of Robotic-FSW Repair Welds in 6061-T6 Aluminium Alloys**. GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH-Geesthacht-2000. Trabalho apresentado no 2nd International Simposyum on Friction Stir Welding-Proceedings. June 28-26, 2000, Gothenburg, Sweden.
- (19) CHLUDZINSKI, M., **Avaliação Metalúrgica da Liga de Alumínio AA6056 Soldada por Friction Stir Welding nas condições T4 e T6**. Porto Alegre 2002, Trabalho de Diplomação-Departamento de Metalurgia-UFRGS.