

# Caracterização Microestrutural e Comportamento Mecânico das Ligas de Alumínio AA2139 T3 e T8 Soldadas por Fricção Rotativa com Mistura

## (Microstructural Characterization and Mechanical Behavior of an AA2139 T3 and T8 Aluminum Alloy joined by Friction Stir Welding (FSW))

Vinicius Toledo Saccon<sup>1</sup>, Bruno Serafim Parra<sup>1</sup>, Cesar Weis Olea<sup>2</sup>, Jorge Fernandes dos Santos<sup>3</sup>, Nelson Guedes de Alcântara<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia de Materiais, São Carlos, São Paulo, Brasil, email: [vinicius.saccon@yahoo.com.br](mailto:vinicius.saccon@yahoo.com.br), [brunoparra@gmail.com](mailto:brunoparra@gmail.com), [nelsong@ufscar.br](mailto:nelsong@ufscar.br)

<sup>2</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Metalurgia, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil email: [cweis@demet.ufrgs.br](mailto:cweis@demet.ufrgs.br)

<sup>3</sup>GKSS Forschungszentrum, Department Solid State Joining Processes, Geesthacht, Alemanha email: [jorge.dos.santos@gkss.de](mailto:jorge.dos.santos@gkss.de)

### Resumo

Este trabalho visou analisar a caracterização microestrutural e o comportamento mecânico das ligas de alumínio AA2139 T3 e T8 quando são soldadas pelo processo Soldagem por Fricção Rotativa com Mistura, o qual é realizado na fase sólida. A análise microestrutural foi realizada utilizando microscopia óptica e eletrônica de varredura, e o comportamento mecânico foi avaliado através de medidas de microdureza e ensaio de tração convencional complementado pelo sistema ARAMIS. As ligas foram soldadas nos mesmos parâmetros de soldagem e com a mesma ferramenta, a fim de avaliar a qualidade da junta soldada para as duas condições de tratamento térmico, T3 e T8. Os resultados obtidos mostraram soldas resistentes para ambos os tratamentos térmicos, porém com melhores propriedades mecânicas para a liga AA2139 T3.

**Palavras-chave:** Soldagem por Fricção Rotativa com Mistura; Alumínio; Ligas Aeronáuticas e Aeroespaciais.

**Abstract:** This work aimed to study the microstructural characterization and mechanical behavior of AA2139 T3 and T8 aluminum alloys joined by FSW - Friction Stir Welding. The microstructural analysis has been done using optical microscope and scanning electron microscopy, and the mechanical analysis were evaluate through microhardness testing and conventional tensile test using the ARAMIS system. Each alloy were welded using the same welding parameters and the same tool in order to evaluate the joint quality for both heat treatment used for this work, T3 and T8. The result showed sounds joints for both heat treatments, although with better mechanical properties for the alloy AA2139 T3.

**Key-words:** Friction Stir Welding; Aluminum; Aeronautic and Aircraft Alloys.

### 1. Introdução

Devido as suas características intrínsecas, como seu baixo peso específico, boa resistência a corrosão e alta condutibilidade elétrica e térmica, o alumínio vem sendo cada vez mais utilizado pelas indústrias automotivas e aeronáuticas. Ainda, questões ambientais devem ser consideradas da produção de ligas mais leves, econômicas, já que devem gerar menor quantidade de poluentes para a atmosfera e diminuir o consumo energético [1].

Fiovaranti e Junior [2, 3] relatam a dificuldade de obtenção de juntas soldadas de qualidade por processos de soldagem por fusão quando se utiliza ligas de alumínio tais como 2XXX em aplicações estruturais. A dificuldade é causada pela diferença entre os coeficientes de dilatação térmica das regiões

já solidificadas e o filme da fase líquida, com composição semelhante ao do eutético, fator este que causa às ligas 2XXX inúmeras trincas no estágio final da solidificação dos cordões de solda. Da mesma forma, é bastante significativa a perda de propriedades mecânicas da junta soldada quando comparada ao metal de base.

Devido à grande dificuldade em se unir essas ligas, em 1990, o The Welding Institute (TWI) - Inglaterra desenvolveu a Soldagem por Fricção Rotativa com Mistura, e em 1991 a patenteia. Desde a sua invenção, esse processo de soldagem tem obtido uma atenção mundial. Este processo de soldagem é baseado na deformação plástica através de uma ferramenta rotativa não consumível em que o material não chega a atingir a temperatura de fusão. Essa característica atribui ao processo grande vantagem em relação aos processos convencionais envolvendo fusão, eliminando os defeitos provenientes da solidificação [4].

Ligas consideradas de extrema dificuldade de serem soldadas, como as ligas de alumínio da série 2XXX, estão tendo sucesso expressivo com esse processo de soldagem. Conforme Genicolo

---

(Recebido em 20/01/2010; Texto final em 09/11/2010).  
Artigo originalmente publicado no CONSOLDA 2009,  
Piracicaba, SP, Outubro de 2009.

[5], quando ligas de alumínio utilizadas atualmente na fuselagem aeronáutica são soldadas pelo processo de Soldagem por Fricção Rotativa com Mistura tem-se ganhos potenciais em relação ao comportamento mecânico, resistência a fadiga, e produtividade quando comparados com o processo atual de união de placas, a rebiteagem. De acordo com Olea [6], o processo economiza cerca de 1kg/m em relação ao processo de rebiteagem, diminuindo significativamente o peso de aeronaves.

Comparando com os processos de soldagem convencionais envolvendo fusão, Strombeck [7] verificou que a Soldagem por Fricção Rotativa com Mistura causa menos distorção, as alterações de propriedades mecânicas e metalúrgicas são minimizadas e as tensões residuais associadas são reduzidas. Muitos estudos vêm ampliando o conhecimento e aperfeiçoando este processo de soldagem e o alumínio e suas ligas tem sido o principal alvo para isso [2-8]. Este processo de soldagem também pode ser utilizado em outros materiais como, por exemplo, o cobre, chumbo, titânio e magnésio. Até mesmo tentativas em aço mostraram um sucesso considerável, assim como, soldagens dissimilares, tais como, magnésio fundido e ligas de alumínio extrudadas [8].

O processo consiste na soldagem na fase sólida, ou seja, não envolve fusão do material a ser soldado, no qual uma ferramenta rotativa, não consumível promove calor localizado devido ao atrito com o material a ser soldado. Isto resulta em plastificação localizada, atingindo na junta temperatura inferior a temperatura de fusão do material. A alta deformação plástica gerada pela ferramenta rotativa durante o processo de soldagem e a fricção entre a ferramenta e o material são as duas principais fontes de geração de calor no processo de soldagem, sendo a segunda a mais efetiva. As distribuições de temperatura ao longo das zonas de soldagem controlam diretamente a microestrutura das soldas, como tamanho de grão, característica do contorno de grão, coalescimento e dissolução dos precipitados resultando como consequência mudança das propriedades mecânicas das juntas soldadas [6].

A rotação e a translação da ferramenta promovem o transporte do material do lado de avanço para o lado de retrocesso e por fim a força axial consolida o material na região a qual quer ser soldada. As boas propriedades mecânicas e a baixa distorção são atribuídas ao baixo aporte térmico e a ausência de fusão [6]. A Figura 1 ilustra esquematicamente o processo.

O presente estudo utilizou ligas de alumínio da série 2XXX compostas por Al-Cu-Mg-Ag já que ligas desta série são consideradas um dos materiais candidatos para a construção de fuselagem da segunda geração de aviões civis supersônicos e aplicação estrutural aeroespacial [9].

A adição de Ag nas ligas de Al-Cu-Mg promove melhorias nas propriedades mecânicas que é atribuído a formação de um precipitado,  $\Omega$ , coerente com a matriz de alumínio no plano  $\{111\}$ , o qual precipita homogeneamente na matriz de Al [9,10]. O aumento do teor de Cu na liga Al-Cu-Mg-Ag também pode melhorar o endurecimento a precipitação e a resistência a tração. As fases  $\Omega$  e  $\theta'$  são principais precipitados endurecedores nessa liga. Com o aumento de Cu, o número e a estabilidade da fase  $\Omega$  são aumentados e seu tamanho diminuído. Quando a quantidade de Cu está acima da solubilidade no Al, a precipitação da

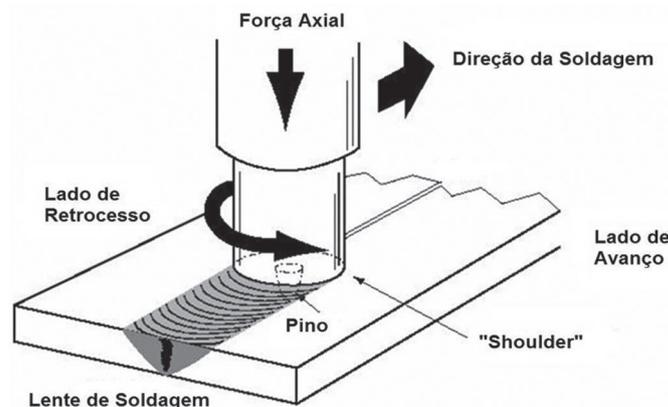


Figura 1. Esquemática do processo de Soldagem por Fricção Rotativa com Mistura [6].

segunda fase  $\theta'$  contribui igualmente para o efeito endurecedor [9]. Além disso, de acordo com Cho [10], adições de Ag de apenas 0,1 em porcentagem estimulam o aumento de resistência mecânica em uma ampla gama de ligas AL-Cu-Mg endurecidas artificialmente.

A liga específica utilizada neste trabalho foi a AA2139 que possui em sua composição Cu e Ag. De acordo com Vural [12], a liga AA2139 surgiu como resultado de quatro décadas de pesquisas sobre o efeito da adição de elementos de liga na precipitação de ligas de alumínio. Vural [12] ainda relata que a liga AA2139-T8 possui melhor desempenho balístico do que a 2519-T87, que é a liga atualmente utilizada para os modernos veículos blindados. Além disso, os valores de tenacidade das ligas AA2139-T8 são superiores aos das ligas 2324-T39 e 7475-T7351, que são as ligas comumente usadas para aplicações de elevada sollicitações, tais como placas de asa de aviões. As ligas AA2139 têm mostrado propriedades mecânicas atraentes para temperatura até 250 °C, e são superiores as ligas de alumínio convencionais 2124, 2219 e 2618 [9].

Este estudo objetiva o melhor entendimento de soldas realizadas por Soldagem por Fricção Rotativa com Mistura para a liga de alumínio AA2139, relacionando a microestrutura com as propriedades mecânicas obtidas em diferentes tratamentos térmicos.

## 2. Matérias e Métodos

As ligas de alumínio utilizadas foram submetidas a dois tratamentos térmicos diferentes T3 e T8 e a composição química comparada aos limites estipulados pela Aluminum Association [13] pode ser visualizada na Tabela 1. As chapas originalmente tinham 3,87mm de espessura e foram fresadas para 3,5mm, devido às especificações do projeto.

As soldas por Soldagem por Fricção Rotativa com Mistura foram produzidas no instituto alemão GKSS, através do robô Neos Tricept TR 805, capaz de mover-se em cinco eixos centrais, controlado por um sistema CNC. O equipamento foi projetado para aplicações de alta flexibilidade e elevado grau de rigidez, características desejáveis para o desenvolvimento da Soldagem por Fricção Rotativa com Mistura. Ainda, a força

Tabela 1. Composição química da liga dados em % de peso

Elementos Químicos	Cu	Mg	Ag	Mn	Si	Fe	Cr	Zn	Ti	V	Al
AA2139 *	5,34	0,483	0,467	0,375	0,044	0,136	0,0056	0,016	0,045	0,0034	Balanço
AA2139**	4,5– 5,5	0,20 – 0,80	0,15 – 0,60	0,20 – 0,60	0,10 máx	0,15 máx	0,05 máx	0,25 máx	0,15 máx	0,05 máx	Balanço

\* Composição química da liga, certificada pelo Centro de Caracterização de Materiais – CCDM através de espectrômetro de emissão óptica por centelhamento.

\*\* Limites de composição dados pela Aluminium Association [13].

axial e a velocidade de rotação da ferramenta foram controladas por um sistema integrado, desenvolvido no próprio instituto. A ferramenta usada para a realização de todas as soldas foi um pino de três planos de cinco milímetros e rebaixo rosqueado de quinze milímetros. O material do pino utilizado para a realização das soldas foi de aço e do rebaixo foi de titânio. A Tabela 2 mostra que os parâmetros de soldagem utilizados para as ligas AA2139 T3 e T8 foram os mesmos.

Tabela 2. Parâmetros de processo utilizados nas ligas AA2139 T3 e T8.

Liga	Velocidade de soldagem (mm/min)	Velocidade de rotação (rpm)	Força axial (kN)	Ângulo de inclinação (°)
AA2139 T3	250	600	9.5-9.5	0.5
AA2139 T8	250	600	9.5-9.5	0.5

Para a preparação metalográfica das amostras foi utilizado um método padrão com o intuito de analisar a macro e microestrutura da liga AA2139 soldada por Soldagem por Fricção Rotativa com Mistura. Inicialmente, foi utilizado lixas de carbetto de silício - SiC de granulometria de 80, 240, 320, 600, 800, 1000 e 1200 em uma rotação de 300 rpm durante 2 minutos em cada lixa e depois, as amostras foram submetidas a um processo de polimento com suspensão de diamante de 3µm, e 0,5 µm (OPS) a uma rotação de 150 rpm durante 4 minutos. O ataque químico foi realizado a frio com o reagente Kroll (96 ml de água, 6 ml de ácido nítrico e 2 ml de HF) durante 8-10 segundos com objetivo de revelar os contornos de grão e as partículas e precipitados contidos na liga.

A caracterização macro/microestrutural foi direcionada para a avaliação das transformações metalúrgicas das juntas soldadas, e para tanto utilizou-se microscópio de luz e microscópio eletrônico de varredura (MEV). Foram avaliados o perfil, o tamanho e geometria das zonas deformadas plasticamente pelo processo de soldagem, a forma e dispersão dos precipitados bem como as microestruturas das juntas soldadas.

A fim de analisar o desempenho mecânico das ligas AA2139 T3 e T8 soldadas foram realizadas medidas de microdureza Vickers e ensaio de tração segundo a norma européia BS EM 10002-1.

### 3. Resultados e Discussão

Ligas de alumínio soldadas por Soldagem por Fricção Rotativa com Mistura apresentam uma grande diferença microestrutural

entre a região soldada e o metal de base. De acordo com Dieter [14], o alumínio apresenta alta energia de falha de empilhamento e devido a isso existe uma grande dificuldade em ocorrer à recristalização neste material, no entanto durante o processo de soldagem, o ciclo térmico e a alta deformação provida da ferramenta resultam em recristalização completa do alumínio na região soldada, acarretando boas características metalúrgicas e mecânicas nesta região.

Em ambos os tratamentos térmicos T3 e T8 as juntas soldadas não apresentaram nenhum tipo de defeito visual. A Figura 2 mostra as macrografias das ligas AA2139 T3 e T8. O formato e o tamanho das regiões soldadas indicaram grandes similaridades, isso devido ao aporte térmico que foi o mesmo para ambas as ligas.

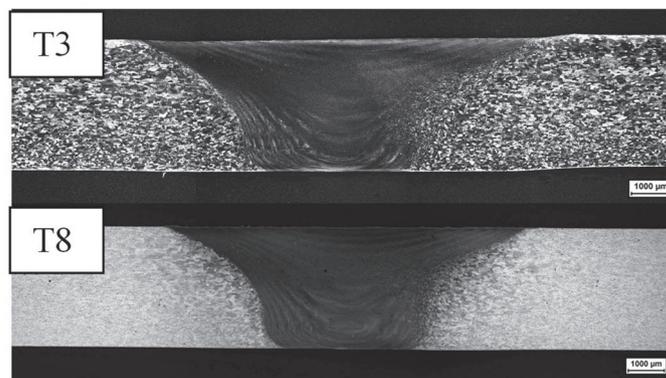


Figura 2. Macroestruturas das ligas AA2139 T3 e T8, não apresentando defeitos visuais.

Com referência as micrografias, as mesmas podem ser observadas na Figura 3, em que exibe à grande diferença microestrutural da liga de alumínio AA2139 soldada, evidenciando o metal de base, as zonas termicamente afetada – ZTA e termomecanicamente afetada - ZTMA e a lente de soldagem. Vale ressaltar que todas as micrografias estão na mesma magnitude, o qual ratifica a significativa diferença microestrutural.

A ZTA é a região que sofre efeito do calor gerado durante a soldagem, e pode resultar na instabilidade do precipitado, assim como crescimento de grão. Os precipitados geralmente coalescem e assim a dureza pode mostrar uma significativa deterioração quando comparada com o metal de base. Já na região adjacente a lente de soldagem, ZTMA, é percebida deformação plástica associado com a o calor gerado pelo processo, resultando em recristalização parcial e recuperação dos grãos. Além disso, os

grãos são rotacionados cerca de 90° em relação ao metal de base. Essas informações são confirmadas nos trabalhos de Pinelli e Carletti [15, 16].

A lente de soldagem compreende aproximadamente a região de penetração do pino na junta. Esta região é totalmente recristalizada, apresentando uma microestrutura muito fina e de grãos refinados com contorno de grão de alto ângulo. Na lente de soldagem ocorre a dissolução e coalescimento dos precipitados endurecedores, o que pode diminuir localmente as propriedades mecânicas. O mesmo resultado pode ser visto nos trabalhos de

Kim e Carletti [16,17]. As microestruturas das ligas AA2139 T3 e T8 apresentaram características metalúrgicas similares, e devido a isso na Figura 3 foi apresentado à região soldada apenas para a liga AA2139 T8.

Microscopia eletrônica de varredura (MEV) através da técnica de Elétron Secundário Retroespalhado (BSE – “Backscatering Secondary Electron”) e espectrografia de energia dispersiva de raios-X (EDS) foram usadas para caracterizar a microestrutura em detalhes e para identificar partículas de segunda fase. Na Figura 4 mostra as partículas  $Al_2Cu$ ,  $\Omega$  e  $\theta$ , homogeneamente

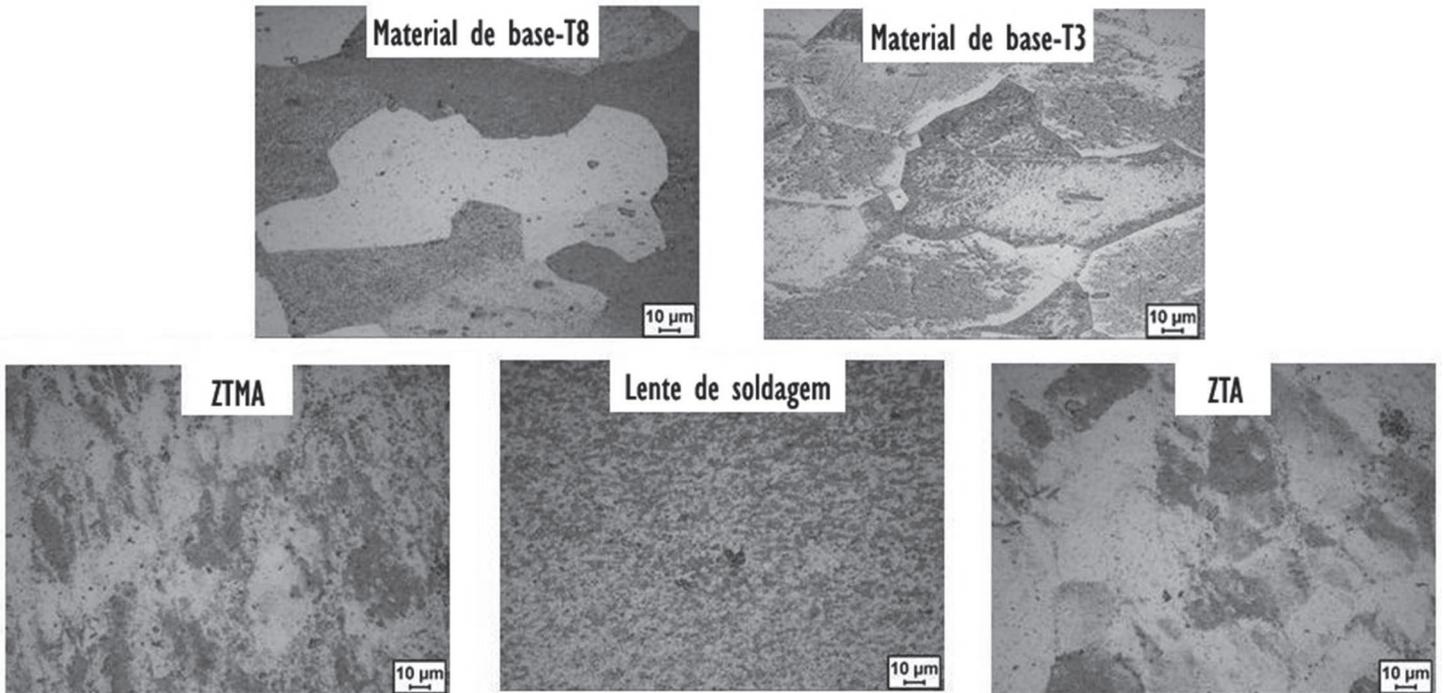


Figura 3. Microestruturas do metal de base T3, T8 e das diferentes zonas microestruturais.

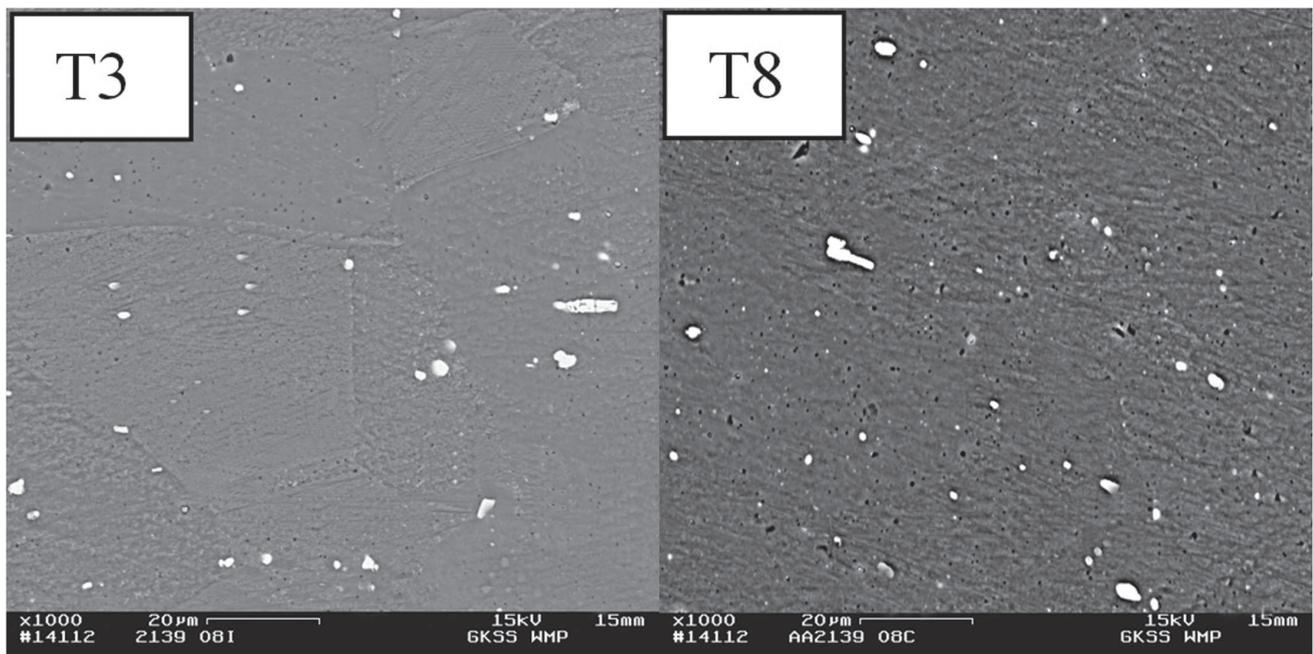


Figura 4. Microestruturas do material de base, T3 e T8.

distribuída pela matriz de alumínio, tanto em T3 quanto em T8. Para podermos identificar os precipitados é necessária uma análise via microscopia eletrônica de transmissão, pois a única diferença entre esses precipitados é o seu parâmetro de rede e em que plano de escorregamento eles precipitam. Nota-se também em ambos os tratamentos térmicos que a dispersão é praticamente homogênea.

Na Figura 5, observam-se as microestruturas da lente de soldagem das ligas AA2139 T3 e T8, nota-se que ocorre o coalescimento de precipitados assim como a dissolução dos mesmos, concordando com as análises em microscopia óptica. Observa-se também o refinamento dos grãos em comparação com o metal de base. Observando as micrografias com mais atenção é possível ver que o tamanho dos grãos para a condição T8 é maior do que para a condição T3. Isso acarreta a liga um decréscimo de algumas propriedades mecânicas como, por exemplo, dureza e resistência mecânica.

A fim de avaliar as propriedades mecânicas da liga e compará-las com as análises microestruturais, foi realizado o ensaio de tração convencional utilizando de um sistema de análise chamado ARAMIS. Essa técnica é um sistema ótico de análise de deformação 3D e pode-se dizer que é ideal para medir, com alta resolução, bem como com uma elevada precisão, deformação tridimensionais de tensão em componentes reais, para amostras sendo estaticamente ou dinamicamente carregadas. Esse sistema detecta as regiões que sofrem maior índice de

deformação e transforma isso e um perfil de deformação que pode ser visualizado através de gráficos e por um perfil de cores onde as mais “vivas” significam maior deformação. Os valores de tensão de escoamento, tensão máxima, tensão de ruptura e alongamento podem ser visualizados na Tabela 3 tanto para o metal de base, quanto para as juntas soldadas para ambos os tratamentos térmicos. Vale ressaltar que todos os corpos de prova foram retirados em corte transversal em relação à direção de soldagem.

O ensaio de tração no metal de base demonstrou resistência mecânica superior e ductilidade inferior para a liga AA2139 T8 do que para a T3, isso porque o tratamento térmico T8, utiliza de envelhecimento artificial, o qual submete a liga a uma dispersão e tamanho mais uniforme dos precipitados tornando a liga mais resistente, porém mais macia.

Nas ligas soldadas, ambas apresentaram uma queda expressiva nas propriedades mecânicas em relação ao metal de base. A liga AA2139 T8 soldada apresentou uma queda mais expressiva das propriedades mecânica, chegando a perder mais de 50% de sua ductilidade, e 36% de sua tensão de escoamento. O decaimento elevado da resistência mecânica é devido à dissolução e coalescimento dos precipitados na região soldada. Já a queda de ductilidade é pelo fato das zonas termicamente afetadas e termomecânicamente afetadas apresentarem pontos concentradores de tensão que facilitaram a propagação de trincas.

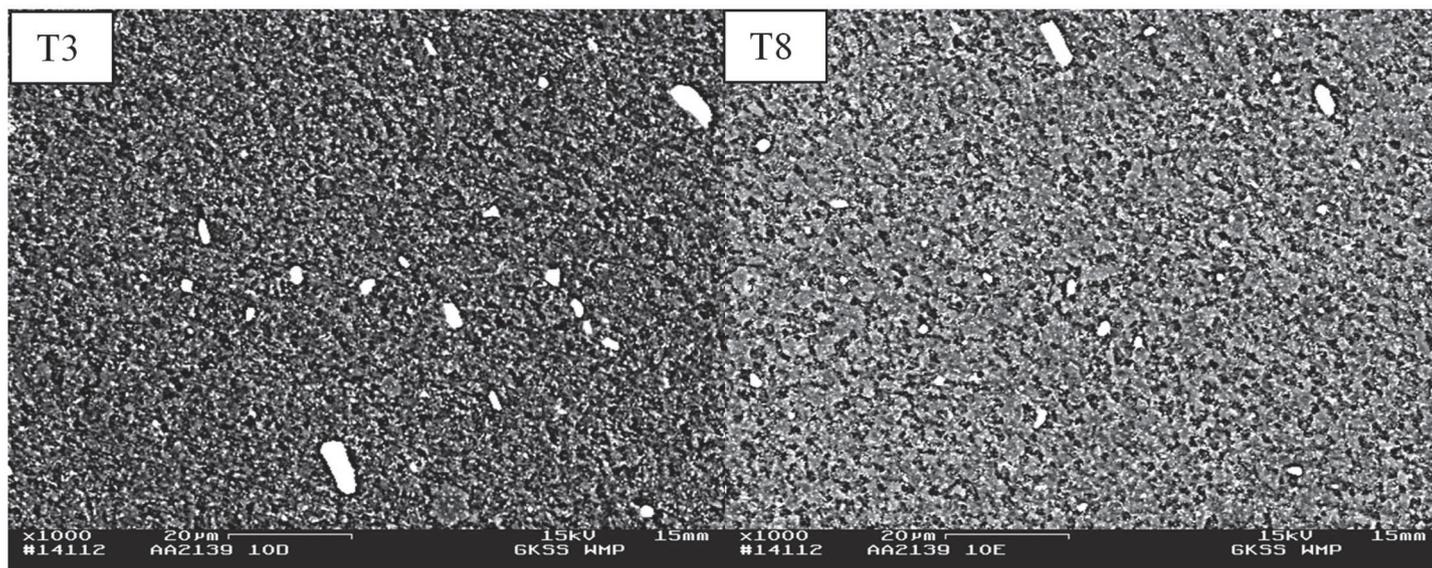


Figura 5. Microestruturas da lente de soldagem, T3 e T8.

Tabela 3. Resultado do ensaio de tração para as ligas AA2139 T3 e T8 e para as mesmas ligas soldadas.

Liga	Tensão de Escoamento (MPa)	Tensão Máxima (MPa)	Tensão de Ruptura (MPa)	Alongamento (%)
AA2139 T3	348	441	407	23,4
AA2139 T3 – Soldada	275	374	387	13,9
AA2139 T8	450	484,5	401	14,5
AA2139 T8 – Soldada	287,5	400	394	6,7

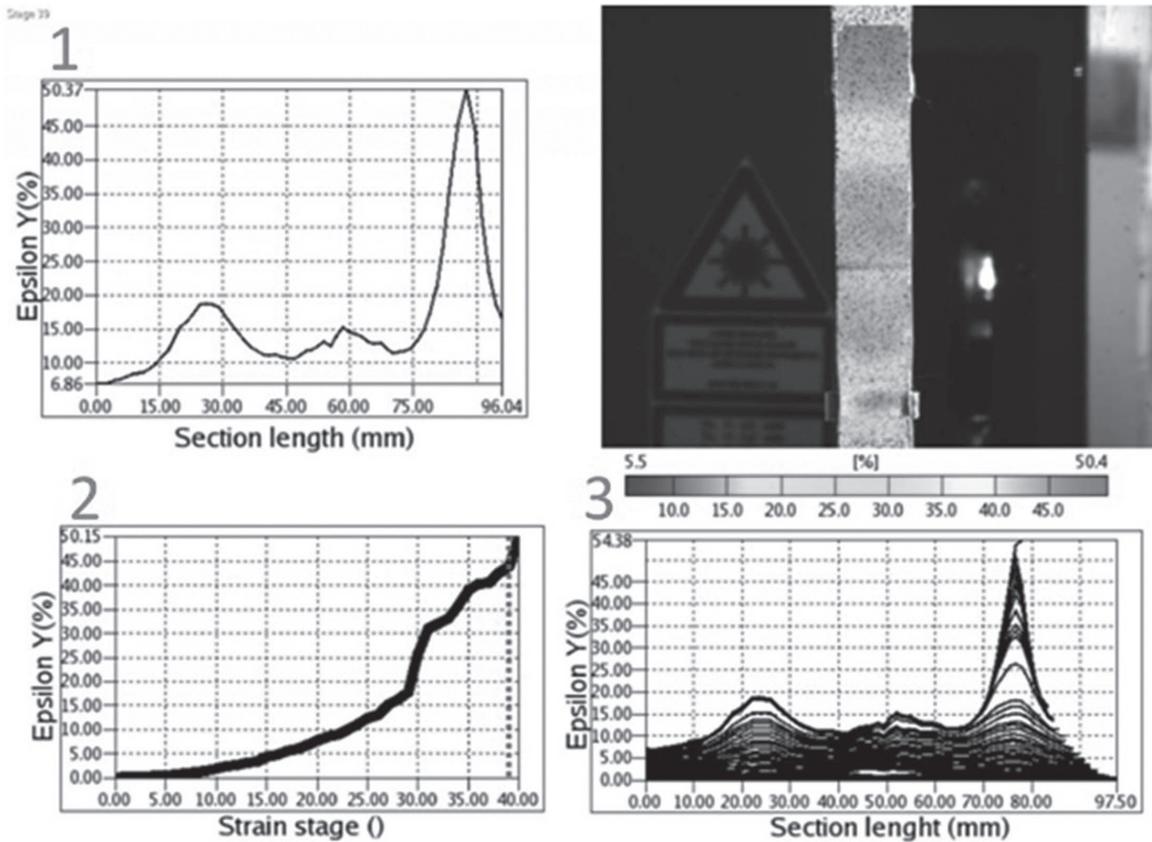


Figura 6. Análise ARAMIS, segundos antes de fraturar o corpo de prova – AA2139 T3.

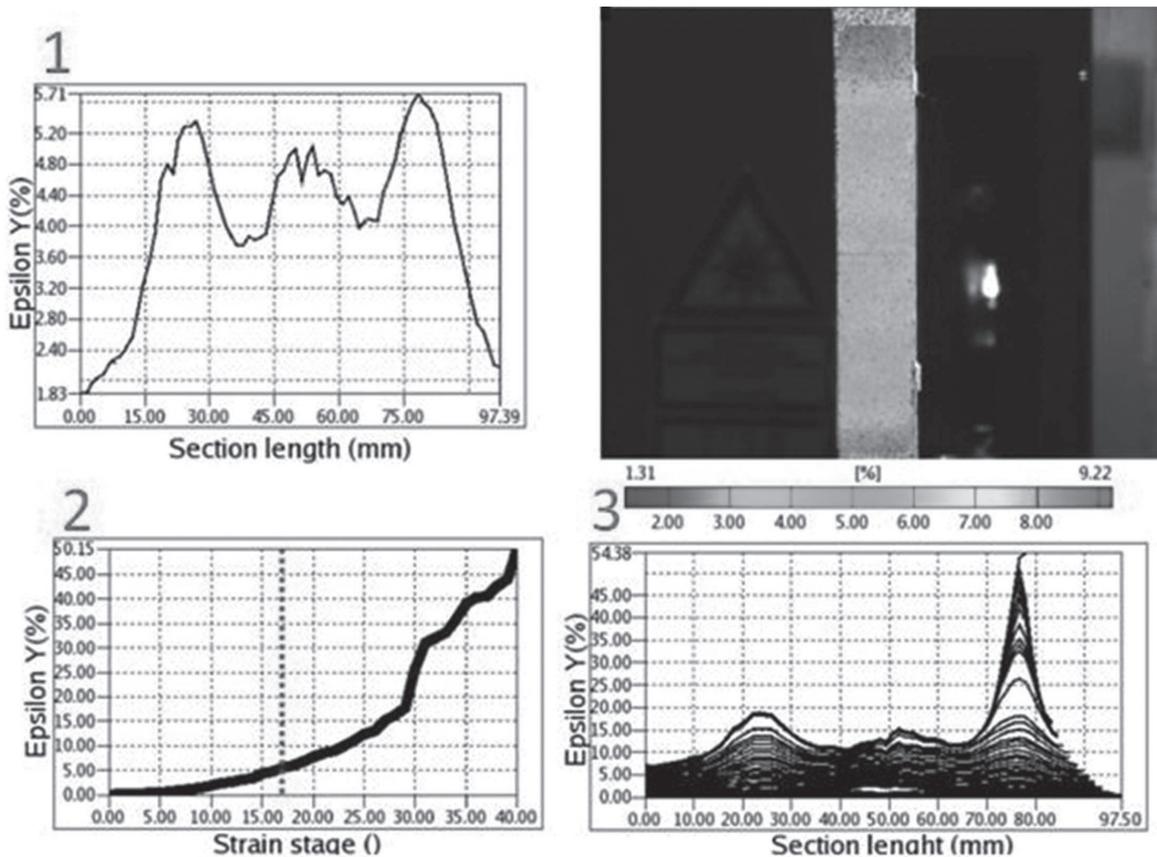


Figura 7. Análise ARAMIS, segundos antes do corpo de prova começar o empescoamento - AA2139 T3.

Através do sistema ARAMIS buscou-se compreender como é distribuída a deformação do material ao longo da amostra de tração. A Figura 6 exibe três gráficos e uma foto de análise óptica de deformação, segundos antes de a amostra fraturar, relativo à liga soldada AA2139 T3. Nesse caso, a primeira Figura 6.1, verifica-se três picos de deformação, porém o maior de todos simula a região onde ocorreu a fratura, esse gráfico varia por indicar a deformação local ao longo da amostra. A segunda Figura 6.2 demonstra a deformação local de um ponto perto da região da fratura. A última Figura 6.3 apresenta a mesma informação do primeiro, mas nesse o gráfico é estático e mostra todos os estágios de deformação ocorridos no corpo de prova ao longo de todo o teste de tração.

Para a liga AA2139 T3 pode-se mostrar outra análise do ARAMIS, mas nesse caso segundos antes do empescoçamento. A Figura 7 apresenta os mesmos gráficos da Figura 6, mas nesse caso, no Figura 7.1 pode ser visto três picos de deformação. Isso significa que o material tem três pontos onde pode ocorrer a fratura quando esse material é tracionado. Usualmente, esse material fratura na região de maior pico, que no caso não seria a região central (região soldada) e sim na parte inferior da amostra, ou seja, no metal de base. Esses pontos podem ser identificados na Figura 7.

A boa qualidade da junta soldada da liga AA2139 T3 foi comprovada pelo ensaio de tração em que o corpo de prova fraturou no metal de base e demonstrou boas propriedades mecânicas mesmo após soldada. Foram utilizados 4 corpos de prova como espaço amostral dos ensaios de tração, e para o

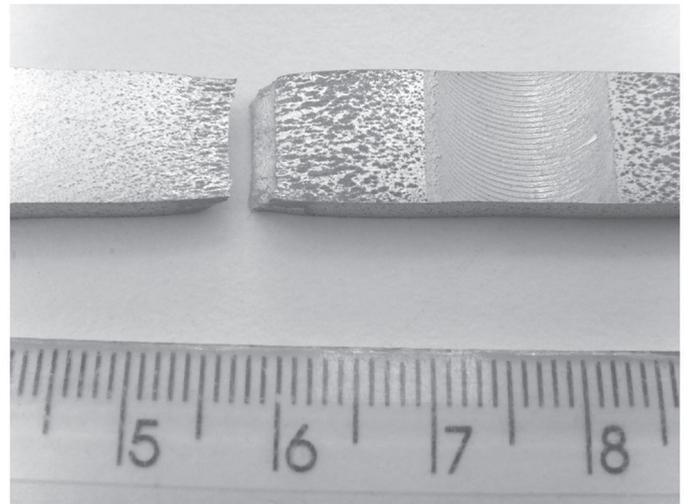


Figura 8. Local da fratura dos corpos de prova de tração da liga AA2139 T3.

tratamento térmico T3 todos corpos de provas demonstraram o mesmo local de fratura, a qual pode ser visualizada na Figura 8.

Para a amostra AA2139 T8, os resultados do ARAMIS apresentaram características diferentes, mostrando duas regiões com maiores indícios de concentradores de tensões, ZTMA e na no meio da lente de soldagem. No entanto, para esse caso, a lente de soldagem se mostrou o lugar mais vulnerável e foi onde ocorreu a fratura. Na Figura 9, tem-se os gráficos típicos do sistema ARAMIS e o perfil de deformação.

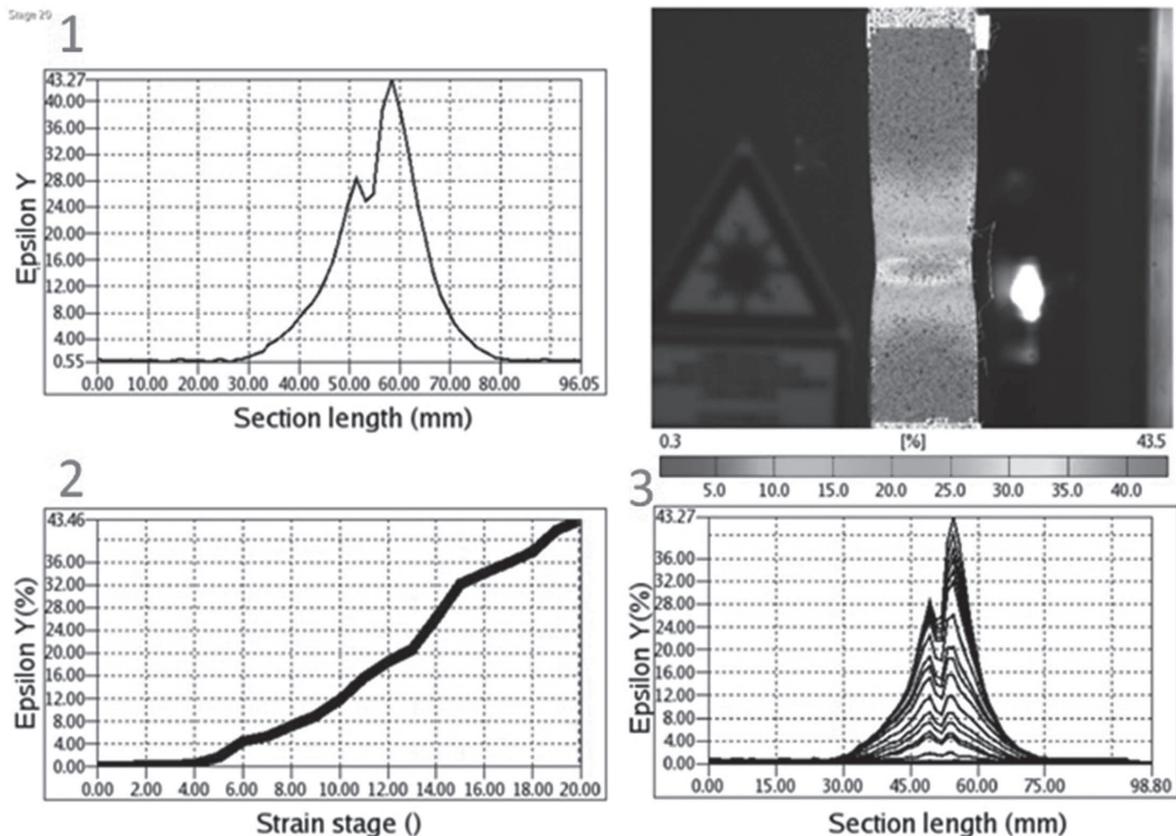


Figura 9. Análise ARAMIS, segundos antes da fratura do corpo de prova - AA2139 T8.

Com a finalidade de mapear o comportamento mecânico ao longo da junta soldada, foi realizado o ensaio de microdureza. Foram realizados três perfis de microdureza ao longo da espessura para cada amostra. Os ensaios de microdureza no metal de base resultaram em valores de aproximadamente 123  $Hv_{0,2}$  para a liga de alumínio AA2139 T3 e 152  $Hv_{0,2}$  para a T8. Devido aos ciclos térmicos e a alta deformação provida da ferramenta, a microdureza sofre um decaída na região soldada em ambos os tratamentos térmicos, isso porque a dissolução dos precipitados afeta diretamente as propriedades mecânicas da liga.

Na Figura 10, são exibidos os perfis de microdureza para a liga AA2139 para os dois tratamentos térmicos realizados. Nota-se que para a amostra da liga AA2139 T3, o resultado foi diferente do que para o T8, já que mesmo no metal de base, a microdureza apresentou algumas variações, provavelmente devido a heterogeneidades da microestrutura. No entanto para a liga T3, é claramente percebido que nas zonas termicamente afetada e termomecanicamente afetada não ocorreu decréscimo

das propriedades mecânicas, pelo contrário, nota-se um leve aumento da mesma nessas regiões. Esse aumento de resistência mecânica mostra que os precipitados endurecedores não foram dissolvidos nem coalescidos durante o processo de soldagem na ZTA e ZTMA, dando a idéia de que os mesmos sofreram reprecipitação, melhorando suas propriedades mecânicas. Nota-se também que na região soldada, há um declínio da microdureza obtida no metal de base, esse decaimento não é tão acentuado representando uma perda de menos de 10% da dureza.

Para a liga AA2139 T8, o decaimento foi mais homogêneo, apresentando um declínio gradual das propriedades mecânicas desde o metal de base passando pelas regiões ZTA e ZTMA e chegando a lente de soldagem, que é a região com menor microdureza. Nesse caso vemos que a deterioração da dureza em relação ao material de base foi mais acentuada, apresentando um declínio de um pouco menos de 30% da microdureza obtida no metal de base. Evidenciando que a dissolução dos precipitados para esse tratamento térmico foi mais intensa.

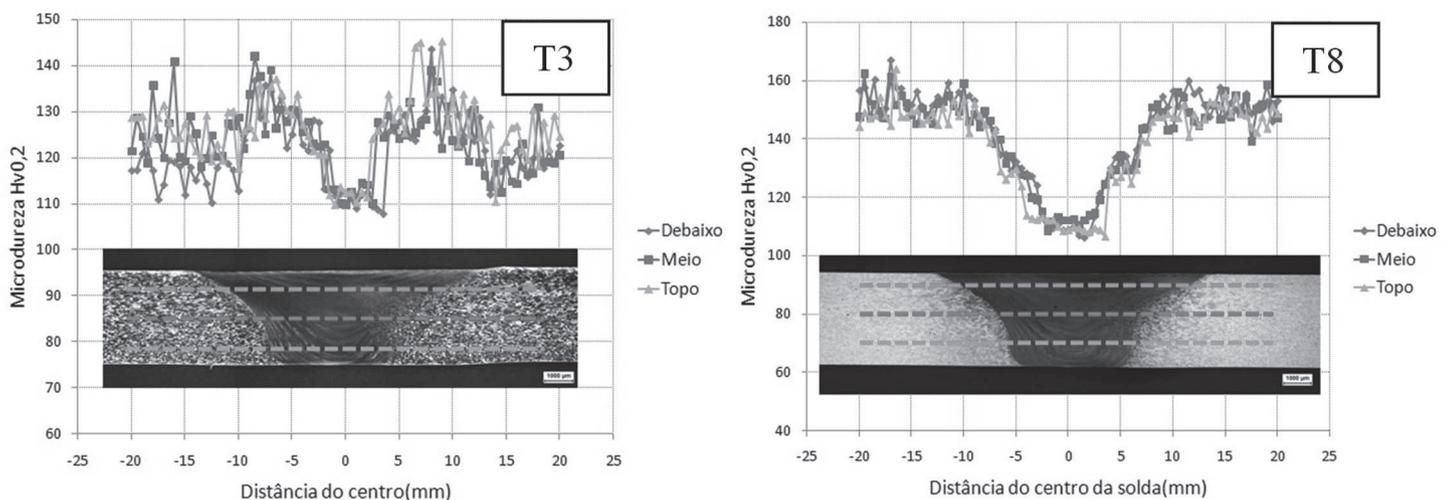


Figura 10. Perfis de microdureza para as ligas AA2139 T3 e T8.

#### 4. Conclusões

As ligas de alumínio AA2139 T3 e T8 apresentaram através de análise via MEV partículas ( $Al_2Cu$ ) de  $\Omega$  e  $\theta$  dispersas homogeneamente pela matriz de alumínio. Notou-se também que mesmo utilizando os mesmo parâmetros de soldagem para a mesma liga, porém com tratamento térmicos diferentes obtomos resultados adversos. A liga submetida ao tratamento T8 apresentou boa qualidade de solda, contudo para o tratamento T3 a solda suportou melhor os ciclos térmicos e as altas deformações provenientes da ferramenta. Isso se deve a forma, tamanho e dispersão dos precipitados e ao tamanho de grão na lente de soldagem em cada tratamento térmico utilizado.

A liga AA2139 T3 apresentou excelentes resultados metalúrgicos e mecânicos, particularmente no ensaio de tração em que todos os corpos de prova fraturam no metal de base e não na região soldada. Adicionado a isso o estudo dos resultados do ARAMIS mostrou três diferentes picos de deformação onde o

material teria maior possibilidade de fratura, sendo um deles no meio da junta. De qualquer maneira, o maior pico foi no material de base o que caracteriza um bom desempenho da solda. Já no ensaio de microdureza foi constatado que as zonas ZTMA e ZTA apresentaram um leve aumento de microdureza, e na região soldada ocorreu uma deterioração de baixa magnitude, menos de 10% em relação ao metal de base. Esses valores comprovam a qualidade da liga soldada, já que o declínio foi baixo na região soldada.

No entanto, a liga AA2139 T8 mostrou degradação das propriedades mecânicas quando este é comparado com o metal de base, tanto no ensaio de tração, quanto no de microdureza, em alguns aspectos como tensão de escoamento e dureza na região soldada apresentaram decaimentos considerados elevados, resultando em uma qualidade de solda inferior ao tratamento T3. A causa desse declínio é os ciclos térmicos envolvidos no processo junto à deformação provida da ferramenta.

## 5. Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a instituição CAPES pelo apoio financeiro e ao instituto de pesquisa GKSS, ao Departamento de Materiais da UFSCar e ao CCDM pelo suporte nos experimentos realizados.

## 6. Referências Bibliográficas

- [1] Associação Brasileira de Alumínio. Disponível em <<http://www.abal.org.br/industria/historia.asp>>. Acesso em: 8 abril de 2009.
- [2] FIORAVANTI, A. S. Soldagem por FSW de ligas de alumínio ALCLAD AA2024-T3 e AA7075-T6. 2008. 93 p. Dissertação de Mestrado - Processos de fabricação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- [3] JÚNIOR, A. R.. Estrutura integral por Soldagem por Atrito “Friction Stir Welding – FSW – Requisitos básicos para o projeto estrutural, 2003. Dissertação de Mestrado - Mecânica dos Sólidos e Estruturas, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2003.
- [4] THE WELDING INSTITUTE (TWI) – Materials Joining Technology Home Page, Disponível em: <[www.twi.co.uk](http://www.twi.co.uk)>. Acesso em: 14, 15 e 16 de março de 2009.
- [5] GENICOLO, M.A.C. Estudo de viabilidade para implementação de uniões soldadas pelo método Friction Stir Welding em estruturas aeronáuticas. 2007 62p – Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007
- [6] OLEA C.A. W. Influence of energy input in friction stir welding on structure evolution and mechanical behavior of precipitation-hardening in aluminum alloys (AA2024-T351, AA6013-T6 and Al-Mg-Sc). 2008. 149 p. Tese de Doutorado – Institute of Materials Research, Ruhr – Universität Bochum, Bochum – Alemanha, 2008.
- [7] STROMBECK, A. et al. Fracture Toughness Behaviour of FSW Joints in Aluminium Alloys. IN: 1ST INTERNACIONAL SYMPOSIUM ON FRICTION STIR WELDING. 1., 1999, Thousands Oaks, CA, Junho 1999.
- [8] KALEE, S.; MISTRY, A. Friction Stir Welding in automotive body in white production. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FRICTION STIR WELDING, 1., 1999, California, Proceedings... Thousand Oaks, 1999, p. 1-12.
- [9] RINGER S.P.; SAKURAI T.; POLMEAR I.J. Origins of Hardening in Aged Al-Cu-Mg-(Ag) Alloys. Oxford. vol. 45, no9, p. 3731-3744 (43 ref.) Dezembro/1996.
- [10] CHO, A. Development and processing Improvement of Aerospace Aluminum Alloys. Hampton, Virginia. Naticional Aeronautics and Space Administration (NASA). Estudo de Ligas Aeroespaciais. Dezembro 2007.
- [11] LUMLEY R.N.; POLMEAR I.J. The effect of long term creep exposure on the microstructure and properties of an underaged Al-Cu-Mg-Ag alloy. Disponível em: <[www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)>. Acesso em: Setembro/2008.
- [12] M. VURAL, J. CARO, Experimental analysis and constitutive modeling for the newly developed 2139-T8 alloy, Materials Science and Engineering A 520 (2009) 56–65;
- [13] THE ALUMINUM ASSOCIATION – Teal Sheets 2009 - Disponível em: <<http://www.aluminum.org/>>. Acesso em: agosto 2009.
- [14] DIETER, G. E., Metalurgia Mecânica, Guanabara Dois, 1981.
- [15] PINELLI, J.A. Avaliação microestrutural da liga Al 380 soldada pelo processo Friction Stir Welding - FSW. São Carlos. UFSCar/DEMa, 2006. 39 p.
- [16] CARLETTI C.B. Propriedades mecânicas de juntas sobrepostas da liga Al 6061 soldadas por FSSW. 2002. p. 83. Tese de Mestrado – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2002.
- [17] KIM, Y.G; FUJII, H.; TSUMURA, T.; KOMAZAKI, T.; NAKATA, K. Three defects types in friction stir welding of aluminum die casting alloy. Materials Science and Engineering: A, v. 415, n.1-2, 15 Janeiro 2006, p. 250-254. Nov. 2005. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: out. 2008.