

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE JUNTAS SOBREPOSTAS
NA LIGA AI 6181-T4 SOLDADAS POR FRICÇÃO POR PONTO**

Bruno Serafim Parra

São Carlos
2011

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE JUNTAS SOBREPOSTAS
NA LIGA AI 6181-T4 SOLDADAS POR FRICÇÃO POR PONTO**

Bruno Serafim Parra

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Ciência e Engenharia
de Materiais como requisito parcial à
obtenção do título de MESTRE EM
CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

Orientador: Dr. Nelson Guedes de Alcântara

Agência Financiadora: CAPES

São Carlos

2011

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

P259ap

Parra, Bruno Serafim.

Análise das propriedades mecânicas de juntas sobrepostas na liga Al 6181-T4 soldadas por fricção por ponto / Bruno Serafim Parra. -- São Carlos : UFSCar, 2013. 48 p.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2011.

1. Soldagem. 2. Alumínio. 3. Processos de soldagem. I. Título.

CDD: 671.52 (20^a)

DEDICATÓRIA

Ao amigo e irmão para todas as horas, André Eduardo Loureiro Tozim, que partiu antes da hora, nos deixando dor e saudade. A meus pais e irmãos, por tantas alegrias proporcionadas.

VITAE DO CANDIDATO

Engenheiro de Materiais pela UFSCar (2008).

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
DE

BRUNO SERAFIM PARRA

APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS, DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO
CARLOS, E, 21 DE Março DE 2011.

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Nelson Guedes de Alcântara

Orientador



Prof. Dr. Claudemiro Bolfarini

UFSCar – DEMa



Dr. Celso Ribeiro

LEMM – Laboratório de Ensaios Mecânicos e Metalográficos

APROVADO / HOMOLOGADO / REFERENDADO PELA CPG-CEM EM SUA REUNIÃO
Nº <u>535/12</u> DE <u>25/09/2012</u>
_____ SECRETARIA DO PPG-CEM

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr Nelson Guedes de Alcântara, pela orientação e pelas oportunidades;

A Universidade de São Carlos e todos seus recursos, científicos, naturais, esportivos, que a torna especial e memorável para toda a vida;

Aos colegas do Laboratório de Soldagem, em especial aos amigos Diego Lima, Camilo Carletti, Eduardo Marconato, Vinícius Saccon;

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, de excelente qualidade em ensino e pesquisa;

Ao instituto GKSS, pelos recursos utilizados e grande experiência de vida. Aos amigos de alojamento e de laboratório, em especial Tonilson Rosendo e Jorge dos Santos, pela atenção, orientação e conhecimento.

Aos amigos da república Pastelaria do Ganso: Ivan, Seven, Itu, Tatu, China, Paçoca, Ganso, Neto, Bigas, Glayton e Pacu; meu lar por 6 anos.

Aos meus pais, Rosa e Toninho, que além de permitir que essa jornada fosse traçada, esteve sempre presente em todos os momentos. A meus irmãos Gustavo e Rogério, pra sempre as melhores companhias. A Daniela, pelo amor e apoio.

A empresa Usiminas, pelo emprego e pela oportunidade de trabalhar e prosseguir com o projeto de mestrado.

A CAPES, pela concessão da bolsa de estudo.

RESUMO

As ligas de alumínio, amplamente utilizadas pela indústria aeronáutica, têm cada vez maior espaço também no setor automobilístico, e visa dentre outros fatores: a diminuição do consumo de combustível pela consequente redução de peso, a redução de custos de produção e também a crescente preocupação com o meio ambiente. É importante ressaltar que componentes produzidos com ligas leves podem precisar, durante o processamento, ser unidos pontualmente a outros componentes dentro da linha produtiva. Na indústria aeronáutica essa união é feita essencialmente por rebiteamento enquanto na indústria automotiva o método Soldagem por Resistência por Ponto (SRP) é geralmente empregado. Entretanto esses processos apresentam problemas como defeitos metalúrgicos bem como difícil soldabilidade para algumas ligas leves. Dentro deste contexto foi desenvolvido recentemente no Centro de Pesquisa alemão GKSS o processo de união pontual Soldagem por Fricção por Ponto - SFP. Este processo está mostrando grande potencial de aplicação frente aos já estabelecidos SRP (automotivo) e rebiteamento (aeronáutico). Neste trabalho estudou-se a aplicabilidade deste novo processo para a produção de juntas sobrepostas da liga de alumínio 6181-T4, liga já utilizada na indústria automobilística. As amostras foram soldadas com diferentes tempos de soldagem e velocidades rotacionais da ferramenta, então foram submetidas a ensaios mecânicos de tração e de fadiga, além de medições de microdureza para investigação do desempenho mecânico da junta soldada. Análises microestruturais utilizando luz polarizada, microscopia ótica e eletrônica foram utilizadas para observar o efeito dos parâmetros de soldagem na formação de eventuais defeitos e na qualidade microestrutural da junta soldada. Foi realizado um estudo de análise de falha visando o entendimento dos mecanismos de fratura, correlacionando-os com os parâmetros de processo. Os resultados encontrados levam a juntas soldadas de alta resistência mecânica e boa repetibilidade, com melhores resultados associados com baixo tempo de soldagem e alta velocidade rotacional da ferramenta.

ABSTRACT

**MECHANICAL PROPERTIES ANALYSIS FROM OVERLAP JOINT
IN A 6181-T4 ALUMINUM WELDED BY FRICTION SPOT**

Lightweight alloys, originally developed for aeronautic applications, have also shown increasing use in the automotive sector, aiming fuel consumption and reduction of production costs. In addition to this there is the increasing environmental concern that makes lightweight alloys even more attractive, due to recycling capabilities. It is important notice that parts produced with lightweight alloys may need, at some point of the production process, be joined to others parts. In the aeronautic industry the joining is made primarily by riveting while in the automotive industry RSW - Resistance Spot Welding is usually employed. These processes present some problems such as those related to metallurgical defects and the low weldability for some lightweight alloys. Within this context the FSpW - Friction Spot Welding, that is a solid state joining process, was developed at GKSS Research Centre in Germany. This process has shown great potential for applications where the already established RSW (automotive) and riveting (aircraft), present some disadvantages. In this work the applicability of this new process for the production of overlapping joints of the alloy 6181-T4, which is already used in the automotive industry, was studied. Joints were produced with different welding parameters (welding time and rotational speed) and will be submitted to mechanical characterization, by means of microhardness measurements and mechanical tests for assessment of the performance of the welds. Microstructural characterizations will be performed using optical and electron microscopy to determine the effect of the welding parameters on the final microstructure of the welds, as well as eventual defects. It will be also done a study of failure analysis, aiming the understanding of the mechanisms of fracture, correlating them with the process parameters. Sound joints with high mechanical strength and good repeatability were obtained, with better results associated to low welding time and high toll rotational speed.

PUBLICAÇÕES

1. PARRA, Bruno S., SACCON, Vinícius T., ROSENDO, Tonilson, DOS SANTOS, Jorge F., ALCÂNTARA, Nelson G. - *Desenvolvimento do Processo de Soldagem por Fricção por Ponto para a Liga de Alumínio 6181-T4* - XXXV ConSolda – Associação Brasileira de Soldagem – Piracicaba – 29 de Outubro de 2009;
2. PARRA, Bruno S., SACCON, Vinícius T., ROSENDO, Tonilson, DOS SANTOS, Jorge F., ALCÂNTARA, Nelson G. - *An Investigation on Friction Spot Welding in AA 6181-T4 Alloy* – 65º Congresso Anual da ABM – Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração – 30 de Julho de 2010.
3. ROSENDO, Tonilson, PARRA, Bruno S., TIER, Marco, Silva, DA SILVA, A.A.M, DOS SANTOS, Jorge F., STROHAECKER, Telmo R. e ALCÂNTARA, Nelson G., *Mechanical and Microstructural Investigation of Friction Spot Welded AA6181-T4 Aluminium Alloy* - Materials & Design Volume 32, Issue 3, March 2011, Pages 1094-1100
4. PARRA, Bruno. S., SACCON, Vinícius T, ROSENDO, Tonilson., ALCÂNTARA, Nelson G., DOS SANTOS, Jorge F. *Soldagem de Juntas Sobrepostas da Liga Al 6181-T4 por Friction Spot Welding - FSpW*. XVI Congresso de Iniciação Científica da UFSCar, São Carlos, Outubro de 2008.
5. PARRA, Bruno. S., SACCON, Vinícius T, ROSENDO, Tonilson., ALCÂNTARA, Nelson G., DOS SANTOS, Jorge F. - *An Investigation on Friction Spot Welding in AA 6181-T4 Alloy* – Tecnologia em Metalurgia e Materiais Volume 8, Julho a Setembro – 2011, páginas 1-7.

SUMÁRIO

BANCA EXAMINADORA:.....	i
AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO.....	v
ABSTRACT	vii
PUBLICAÇÕES.....	ix
SUMÁRIO.....	xi
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	xvii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.2.1 Características gerais	6
3.2.2 Composição química.....	6
3.2.3 Propriedades e aplicações da liga de alumínio 6181-T4	7
3.4.1 Informações gerais	10
3.4.2 Aplicações.....	11
3.4.2.1 Indústria automotiva.....	11
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	13
4.4.1 Preparação e ataque das amostras.....	18
4.4.2 Microscopia óptica e estereoscopia.....	18
4.4.3 Medição e análise de tamanho de grãos	19
4.4.4 Microscopia Eletrônica	20
4.5.1 Ensaio de Cisalhamento por Tração	20
4.5.2 Ensaio de fadiga	21
4.5.3 Microdureza	23
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	25
5.2.1 Modos de fratura em testes de ensaio de cisalhamento por tração.....	28
5 CONCLUSÕES	41
6 INVESTIGAÇÕES FUTURAS	43
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química da liga de alumínio 6181-T4 (% em peso) [9] .	7
Tabela 2 - Parâmetros de processo para profundidade de penetração da camisa de 1,75 mm.	16
Tabela 3 - Níveis de cargas e tensões utilizadas no ensaio de fadiga para as condições soldadas.	22
Tabela 4 – Parâmetros das amostras apresentadas na Figura 5.1.	25
Tabela 5 - Tensão para cada amostra no teste de fadiga	33
Tabela 6 - Resultados da medição de tamanho de grãos	35

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1 Consumo de alumínio no setor de transportes [1].....	1
Figura 3. 1 – Distribuição em porcentagem de materiais usados para construção de um automóvel norte-americano [6].	5
Figura 3. 2 – Processo de SFW e suas etapas.	9
Figura 4. 1 – Fluxograma de atividades.	13
Figura 4. 2 – Equipamento para Soldagem por Ficção por Ponto [9].....	14
Figura 4. 3 – Ferramenta e componentes.	15
Figura 4. 4 – Representação esquemática do processo SFP com penetração da camisa: (1) amostras presas e rotação da ferramenta, (2) camisa penetra nas placas, (3) ferramenta retorna e (4) ferramenta é retirada.	16
Figura 4. 5 – Microestrutura da liga Al 6181 em diferentes direções.....	17
Figura 4. 6 – Características da junta (presentes em todas as amostras).	18
Figura 4. 7 - Amostra com linhas para a medição de tamanho de grão.	20
Figura 4. 8 - Esquema de amostra submetida ao ensaio de cisalhamento por tração.	21
Figura 4. 9 - Amostra durante teste de fadiga.	22
Figura 4. 10 - Perfil de microdureza e marcação das endentações.	24
Figura 5. 1 – Macrografias das amostras (a) 36; (b) 34; (c) 42; (d) 40.	26
Figura 5. 2 - Resultados do ensaio de cisalhamento por tração.....	27
Figura 5. 3 – Seção transversal de amostras apresentando melhores performances mecânicas sob ensaio de cisalhamento por tração.	27
Figura 5.4 – Desenho esquemático mostrando a região de concentração de tensão em uma pequena secção da chapa inferior após a separação da linha de união. Desenho fora de proporções para melhor entendimento.....	28
Figura 5. 5 - Trinca circunferencial nucleia na região tensionada e propaga em torno da junta soldada.....	29
Figura 5.6 - Modo de fratura “através da solda com trinca circunferencial”.....	30
Figura 5.7 - Modo de fratura com extração do nugget.	30
Figura 5. 8 - Modo de fratura de extração do nugget com rasgamento.....	31
Figura 5. 9 – Variações do modo de extração do nugget pela parte anterior...	31
Figura 5.10 - Comparação mecânica entre SRP e SFP.....	32
Figura 5.11 - Curva de Woehler e limite de resistência a fadiga.	33
Figura 5.12 - Perfil de microdureza na liga Al 6181-T4.	34
Figura 5.13 – Comportamento dos grãos após união por SFP.	35

Figura 5.14 - Região da lente de soldagem, com destaque para a característica marca de deformação (1).	36
Figura 5.15 - EDS da marca de deformação.	37
Figura 5.16 - MEV da Lente de Soldagem (2) e da Zona Termomecanicamente afetada (3).	38
Figura 5.17 - MEV dos grãos na Lente de Soldagem.....	39
Figura 5. 18 - Zona Termicamente Afetada e seus grãos.	39
Figura 5.19 - Microscopia Eletrônica de Varredura do Material de Base.	40

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ABAL - Associação Brasileira do Alumínio
ABM – Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração
ASTM – American Society for Testing and Materials
CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
DIN - Deutsches Institut für Normung (Instituto alemão de Normalização)
DOE – Design of Experiments
EDS – Energy Dispersive Spectroscopy
EUA – Estados Unidos da América
EN – European Normalization
F_{máx} – Carga máxima
F_{med} – Carga média
F_{min} – Carga mínima
FSpW - Friction Spot Welding
FSW – Friction Stir Welding
GKSS - Gesellschaft für Kernenergie in Schiffbau und Schifffahrt (Sociedade para utilização de energia nuclear na construção e uso de navios Ltda.)
HSS – High Strength Steel
HV – Hardness Vickers
IAI - International Aluminium Institute
ISO – International Organization for Standardization
LCE – Laboratório de Caracterização Estrutural
MB - Metal de Base
MEV - microscópio eletrônico de varredura
MIG – Metal Inert Gas
MPa – Mega Pascal
RSW - Resistance Spot Welding
SAE - Society of Automotive Engineers
SFP - Soldagem por Fricção por Ponto
SFW - Spot Friction Welding
S_{máx} – Tensão máxima
S_{mean} – Tensão média

S-N – Carga - número de ciclos em ensaios de fadiga

SRP - Soldagem por Resistência por Ponto

TC – Trinca circunferencial

TWI – The Welding Institute

UFSCar – Universidade Federal de São Carlos

ZTA – Zona Termicamente Afetada

ZTMA - Zona Termomecanicamente Afetada

1 INTRODUÇÃO

As indústrias do setor de transportes, em especial a aeronáutica e automobilística, tem investido em novos materiais e em novas tecnologias de processamento, visando buscar maior produtividade e qualidade, e obtendo conseqüentemente economia na fase de processamento. Tornou-se então inevitável a utilização de novas ligas metálicas, em especial as de alumínio e magnésio, devido principalmente às suas boas propriedades mecânicas e baixo peso [1].

Dados recentes indicam que a média de uso de alumínio é de 145 kg/veículo nos EUA (aproximadamente, 8% do peso); 138 kg/veículo na Europa; e apenas 45 kg/veículo no Brasil. Peças importantes do veículo podem ser feitas em alumínio, como por exemplo, o bloco do motor. No Brasil, é feito, majoritariamente, de ferro fundido e pesa 36 kg em média. No exterior, é feito de alumínio é pesa 16 kg [2].

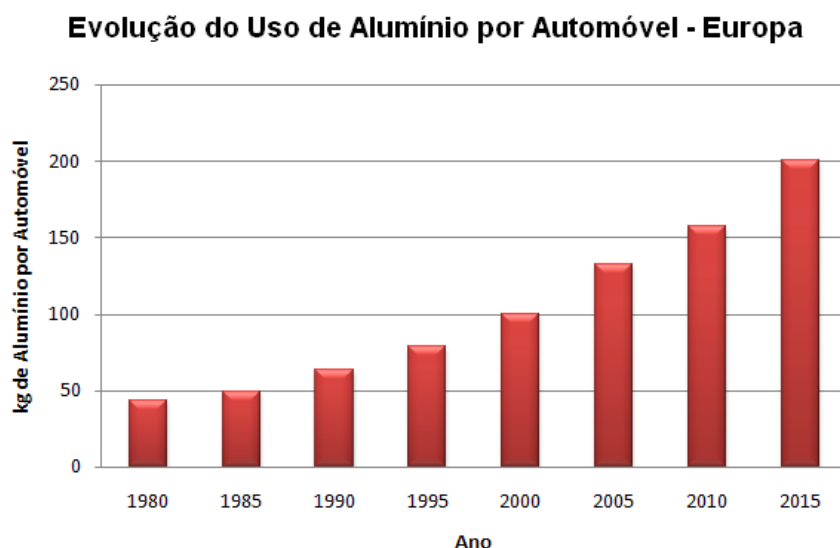


Figura 1. 1 Consumo de alumínio no setor de transportes [1].

Segundo dados do *International Aluminium Institute (IAI)*, cada quilograma de alumínio aplicado em substituição a um material pesado pode evitar a emissão de até 20 kg de CO₂ durante a vida útil de um automóvel; 28 kg de CO₂ no caso de caminhões e de 40 a 45 kg de CO₂ nos ônibus. Considerando que a frota mundial de veículos encontra-se em permanente

crescimento, usar alumínio é indispensável para a sustentabilidade no transporte. [2]

Com o aumento da utilização das ligas de alumínio, surge a necessidade do desenvolvimento de processos de soldagem, uma vez que, devido às características inerentes ao próprio material, há certa limitação na utilização dos processos convencionais que envolvem fusão do metal. De modo a superar as dificuldades encontradas quando processos convencionais são utilizados, devido principalmente a camada de óxido de alumínio de alto ponto de fusão formada na superfície do material e a geração de porosidade, novos processos de soldagem tem sido desenvolvidos.

Visando ampliar o número de aplicações para o alumínio e suas ligas, foi desenvolvido um processo de soldagem no estado sólido denominado *Friction Stir Welding (FSW)*. Este processo apresenta um grande potencial de aplicação para a indústria aeronáutica e automobilística, porque proporciona a obtenção de soldas de boa qualidade com baixo índice de defeitos, associado com propriedades mecânicas iguais ou geralmente superiores do que as obtidas pelos processos convencionais de soldagem por fusão [3].

Porém, um cordão de solda, ou seja, uma solda continua nem sempre é necessária para cumprir com os requisitos do produto. Técnicas de soldagem pontual são processos alternativos em tais aplicações onde uma resistência menor é requerida, o material é fino e as partes possuem muitos contornos [4]. Após a evolução de alguns processos pontuais (tanto mecânicos quanto de soldagem) de união de metais, o instituto de pesquisa alemão GKSS criou a Soldagem por Fricção por Ponto – SFP, a fim de obter melhores resultados de soldagem quando comparado com processos de união convencionais. Com uma ferramenta contendo três componentes (anel de retenção, camisa e pino), este processo tem como grandes vantagens a agilidade, a aplicabilidade (incluindo para ligas dissimilares) e a boa qualidade das soldas.

2 OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivos:

- avaliar a aplicabilidade do novo processo de SFP em junta sobreposta de alumínio 6181-T4;
- realizar o estudo do efeito dos parâmetros de soldagem nas zonas de junta soldada, com observação das características e dos defeitos de soldagem, dos modos e mecanismos de fratura, e do desempenho da junta quando submetida a ensaios cíclicos e monotônicos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Alumínio e o Setor Automotivo

O aço representa um elevado percentual do peso do veículo, porém, nas últimas décadas, tem perdido espaço na composição dos automóveis, conforme apresentado na Figura 3.1. Dentre os materiais que estão substituindo os aços destacam-se os materiais poliméricos, utilizados devido aos ganhos relativos à sua processabilidade, alta produtividade, baixa densidade e alta liberdade para design de peças, e o alumínio devido a sua baixa densidade aliado com o desenvolvimento de sua processabilidade, quando se consegue manufaturar com relativo sucesso, blocos de motor e cabeçotes, além de transmissões e painéis de porta, itens esses que representam um elevado percentual de peso do automóvel [5].

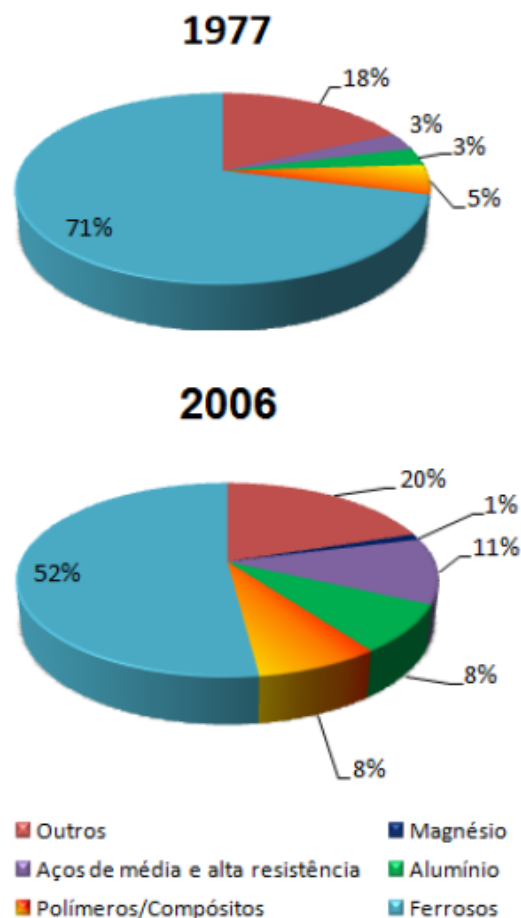


Figura 3. 1 – Distribuição em porcentagem de materiais usados para construção de um automóvel norte-americano [6].

Na figura 3.1, nota-se um aumento significativo de 3 para 8% na utilização do alumínio na construção do carro americano, gerando um aumento aproximado de 400.000 toneladas de alumínio consumido em um ano de produção [7].

3.2 Liga de alumínio 6181-T4

As ligas termicamente tratadas são geralmente usadas em diferentes partes do corpo exterior de automóveis. O aumento do uso dessas ligas é devido às propriedades pós-tratamento e a alta qualidade superficial após conformação. A liga de alumínio 6181-T4 possui alta trabalhabilidade e resistência à corrosão.

Sheikni et. al. [8], avaliou as propriedades mecânicas do metal de base nessa liga em ensaios uniaxiais de tensão. De acordo com seus resultados, o limite de resistência a tração da liga está entre 239 e 270 MPa, com um desvio padrão de 17 MPa. O alongamento total é de 23-30% com desvio padrão de 4%.

3.2.1 Características gerais

A liga de alumínio 6181-T4 é uma liga endurecida através de envelhecimento natural. Esse tratamento térmico consiste na solução dos precipitados na liga, em alta temperatura, seguido de resfriamento em temperatura ambiente e armazenamento. Os principais elementos de liga são Silício e Magnésio. A série 6xxx tem vasta utilização em extrusões.

3.2.2 Composição química

As ligas de alumínio da série 6XXX têm como principais elementos de liga o Magnésio e o Silício. Estes elementos de liga são responsáveis pelo endurecimento da liga, precipitando na matriz na forma de Mg_2Si . A composição dessa liga é mostrada na tabela 1 [9].

Tabela 1 - Composição química da liga de alumínio 6181-T4 (% em peso) [9]

Elemento	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Al
Al 6181-T4	0.8 5	0.2 5	0.0 6	0.0 9	0.7 4	0.01 3	0.002 6	0.01 2	0.02 3	Balanço

3.2.3 Propriedades e aplicações da liga de alumínio 6181-T4

Essa liga de alumínio 6181-T4 tem aplicação na indústria automotiva devido ao seu desempenho resultante do tratamento térmico e à sua fácil reciclagem [9].

Devido a sua soldabilidade no estado sólido, utilizando soldagem por ponto, têm-se uma variedade de aplicações como na carroceria de automóveis. Outras vantagens relacionadas à soldagem por ponto são: é econômica, apresenta boa repetibilidade, qualidade e tolerância a contaminação [10].

3.3 Evolução dos Processos de União por Fricção

Friction Stir welding (FSW) é um processo de soldagem no estado sólido, ou seja, a fusão do material não ocorre durante a união, que foi desenvolvido e patentado pelo TWI em 1991 [11] e tem sido utilizado em diferentes aplicações em todo o mundo [12]. FSW baseia-se essencialmente em aquecimento por fricção e deformação plástica das peças pela interação das superfícies a serem unidas com a ferramenta rotacional não consumível. Este processo oferece algumas vantagens sobre as técnicas de soldagem que envolvem fusão, já que não necessita de tratamento térmico pós-soldagem, apresenta alta resistência à fadiga e a habilidade de união de ligas dissimilares. Boa parte dessas vantagens pode ser atribuída ao nível reduzido de calor inserido, que tem influência significativa na distorção das peças. Além disso, a ausência de fusão minimiza porosidade e trincas a quente, problemas que ocorrem em soldagem por fusão de alumínio. Desvantagens do processo de

FSW que podem ser mencionadas são baixa velocidade de soldagem, o buraco deixado na remoção da ferramenta, escorregamento das peças e demanda de forças para fixação das peças [12].

A quantidade de componentes e materiais que o processo de FSW pode ser utilizado se expande continuamente e o processo se tornou uma tecnologia industrial significativa. Porém, um cordão de solda, ou seja, uma solda contínua nem sempre é necessária para cumprir com os requisitos do produto. Técnicas de soldagem pontual são processos alternativos em tais aplicações onde uma resistência menor é requerida, o material é fino e as partes possuem muitos contornos.

Técnicas pontuais de soldagem são métodos de união no estado sólido derivados do FSW que produzem conexões em pontos sem fusão de material. Normalmente a maioria das uniões pontuais para componentes estruturais nas indústrias automotiva e aeronáutica são realizados através de dispositivos de fixação mecânica (como rebitagem) ou por técnicas convencionais de soldagem por fusão (principalmente SRP) bem como outros processos de solda-aglutinante [13-15]. A fixação mecânica sofre de aumento de peso, dificuldade de automação, necessidade de vedação e problemas de corrosão. SRP e solda pontual a laser, outro processo convencional de união pontual, têm problemas especialmente ao se soldar ligas de alumínio de alta resistência, devido à camada de óxido e hidrogênio dissolvido (necessitando-se de uma limpeza química, com problemas ambientais relacionados e podendo limitar as aplicações a pequenas estruturas). Outra importante desvantagem ao se soldar ligas de alumínio é que no processo elétrico de SRP, os custos operacionais são maiores devido à alta energia elétrica necessária e condutividade térmica, levando à maior consumo de energia, sendo necessário um sistema elétrico de maior capacidade e infraestrutura associada [16-18]. Ainda, há a redução na vida do eletrodo, que transforma a queda de qualidade superficial da junta soldada em uma perda de resistência mecânica [19]. Assim, as técnicas pontuais por fricção são potenciais para substituição dos processos de união por fixação e por soldagem pontual por fusão.

3.4 Soldagem por Fricção por Ponto – SFP

Como descrito acima, as ligas leves de alumínio e magnésio tem sido cada vez mais utilizadas pela indústria automotiva. Muitos componentes produzidos a partir dessas ligas, por estampagem, fundição, extrusão e forjamento, requisitam união durante o processo de fabricação. O processo de SRP é a técnica mais utilizada para união de chapas metálicas por pontos.

As principais vantagens do processo de soldagem SRP são o relativo baixo custo e facilidade de manutenção, quando comparada com outros processos de soldagem por fusão. Entretanto, SRP de chapas de alumínio tem alguns desafios, como baixo tempo de vida do eletrodo e baixa qualidade das juntas soldadas de alumínio, conforme mostrado por Thornton et. al. [20] e Gean et. al. [21]. Novas tecnologias de soldagem foram desenvolvidas para suprir essas deficiências nos processos até então convencionais. Pesquisadores da Mazda Corporation e Kawasaki Heavy Industry [21, 23] patentearam o processo intitulado *Spot Friction Welding* - SFW. Nesse processo, as propriedades mecânicas da solda são semelhantes às do metal de base e a energia imposta é relativamente baixa. Conseqüentemente, as zonas afetadas termicamente e as tensões residuais associadas são menores. [24] A figura 3.2 mostra de maneira resumida o processo de SFW e suas etapas.

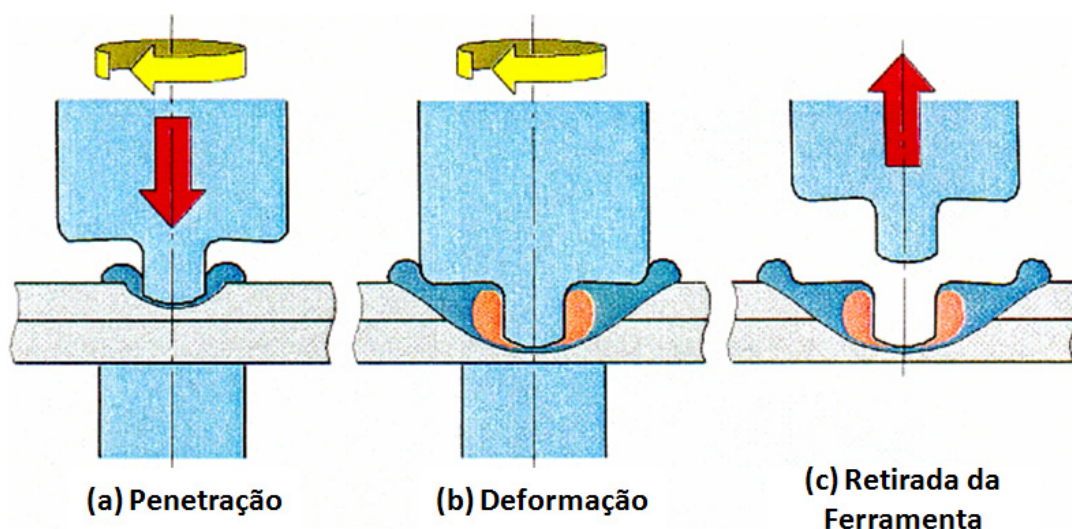


Figura 3. 2 – Processo de SFW e suas etapas.

O instituto de pesquisa alemão GKSS adaptou e aperfeiçoou o processo SFW, criando a Soldagem por Fricção por Ponto – SFP (*Friction Spot Welding*

- FSpW), a fim de obter melhores resultados de soldagem quando comparado com processos de união por rebite, SRP e SFW.

3.4.1 Informações gerais

Esse processo de soldagem SFP tem o potencial de encontrar aplicações na indústria automotiva substituindo SRP e na indústria aeronáutica como substituto de rebites [25], uma vez que a maioria das uniões por ponto em componentes estruturais é feita até então por processos mecânicos (rebites) e também de soldagem convencional - SRP, solda pontual a laser, entre outros [26]. Porém, problemas como excesso de peso, dificuldade de automação, necessidade de selantes e corrosão são encontrados. Processos que envolvam fusão têm problemas associados ao derretimento do material e a baixa soldabilidade apresentada por algumas ligas leves [27, 28]. Esses processos também exigem uma limpeza química da superfície, gerando problemas ambientais, dificultando as aplicações em algumas estruturas. Outra desvantagem é o fato de o alumínio tem alta condutividade elétrica e térmica, necessitando de muita energia, e conseqüentemente de muito capital e infraestrutura [29]. Além disso, há uma redução da vida útil do eletrodo, diminuindo a qualidade superficial da solda [29, 30].

Nesse contexto, o processo SFP é uma alternativa para superar esses obstáculos, sendo um potencial na substituição dos processos considerados tradicionais nas indústrias acima citadas. Essa substituição deve ocorrer de maneira gradual, primeiramente em itens não-estruturais dos produtos para posteriormente ser aplicada em itens de maior solicitação mecânica. A aparência no final da solda por SFP assemelha-se às de SRP [31, 32], isto é, a superfície da junta resultante é lisa e livre de defeitos. A aplicabilidade deste processo é extremamente alta e torna-se competitiva de técnicas que envolvam fusão. Além disso, a ausência de furos após a solda caracteriza a SFP como um processo praticamente livre de defeitos com elevada resistência mecânica.

Uma vez que os parâmetros de processo – tempo de soldagem e velocidade de rotação da ferramenta - e a configuração da ferramenta são corretamente empregados, boas soldas podem ser obtidas com bom

comportamento mecânico e repetibilidade de processo. O processo não agride o meio ambiente, por ser no estado sólido, não necessita de metal de adição (a solda é realizada apenas com o metal base da liga), e sem nenhum rejeito produzido. Finalmente, as características do processo o fazem totalmente aplicável, ao menos em teoria, a qualquer liga que apresente algum nível de deformação plástica. Ligas com baixa soldabilidade ou dissimilares, como aço e alumínio podem ser unidas pelo processo desenvolvido.

Além das vantagens anteriormente apresentadas a soldagem por fricção por ponto possui baixo consumo de energia elétrica, número reduzido de etapas, ausência de processos pós-solda, rapidez do processo, possibilidade de unir ligas dissimilares, fácil automação e baixo custo. [33-41].

3.4.2 Aplicações

Na indústria automotiva o processo pode ser capaz de superar problemas enfrentados pelos processos de SRP e soldagem por ponto a laser. Na indústria aeronáutica mais melhorias são necessárias até que o processo atinja um nível de resistência e confiabilidade comparado principalmente com a rebitagem [42].

3.4.2.1 Indústria automotiva

Uma das maneiras mais eficientes de suprir a demanda por eficiência energética para automóveis é através da redução de peso do veículo, que gera menor consumo de combustível e emissão de gases poluentes, melhorando segurança, performance e confiabilidade. Por essa razão a quantidade de ligas leves utilizadas em automóveis está crescendo continuamente, como mostra a figura 3.1.

As desvantagens do processo de SRP em alumínio, que foram descritas anteriormente, levam a soldas mecanicamente pobres e geram ao processo vários desafios tecnológicos. Por outro lado os processos de união no estado sólido oferecem benefícios metalúrgicos como resistência da junta soldada com valor próximo ao do metal de base, pequena ZTA e baixa tensão residual (devido à baixa inserção de energia).

As soldas por fusão são também suscetíveis a trincas por solidificação e trincas por segregação na ZTA. Por isso, o processo de SFP oferece uma excelente alternativa para peças e para a estrutura automotiva para superar os problemas dos processos de soldagem por fusão.

A única energia consumida nos processos de união no estado sólido pontuais é a energia necessária para rotacionar e a ferramenta e aplicar a força para que esta crie calor de fricção. Como o processo elimina a grande quantidade de ar de resfriamento e comprimido para a convencional SRP, o consumo de energia reduzido foi em aproximadamente 99% para união de peças de aço. Uma redução de 40% em investimento de equipamentos foi atingida comparando-se com o processo de SRP, tanto para aço como para alumínio [16], demonstrando alta viabilidade do processo.

Os processos de união por fricção tem vantagens potenciais distintas em ligas leves e ligas de aços de alta resistência (HSS) sobre os processos como MIG e Laser, como maior velocidade, melhor performance, menor custo e equipamentos menos robustos, desempenhando de maneira melhor do que técnicas de união mecânica. Processos de união a base de fricção tendem a ter custos operacionais muito menores devido à maior eficiência energética e à ausência da necessidade de metal de adição. Podem ser tipicamente utilizadas em aplicações de menor solicitação mecânica, às partes a serem unidas com grande número de contornos e a materiais finos. Adicionalmente, esses processos exigem equipamentos com menor infraestrutura, não havendo necessidade de sistema de águas, ar comprimido, nem mesmo transformadores elétricos complexos [42].

De maneira geral, a soldagem por fricção por ponto foi criado para unir partes metálicas, através de pontos de solda. As indústrias automotiva e aeronáutica são o foco principal, na tentativa de melhorar as propriedades mecânicas e diminuir o peso do produto final. As primeiras soldas foram feitas apenas em ligas de alumínio, um elemento leve com boas propriedades mecânicas responsável por diminuição de peso em ambos os setores industriais. [9]

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Fluxograma de Atividades

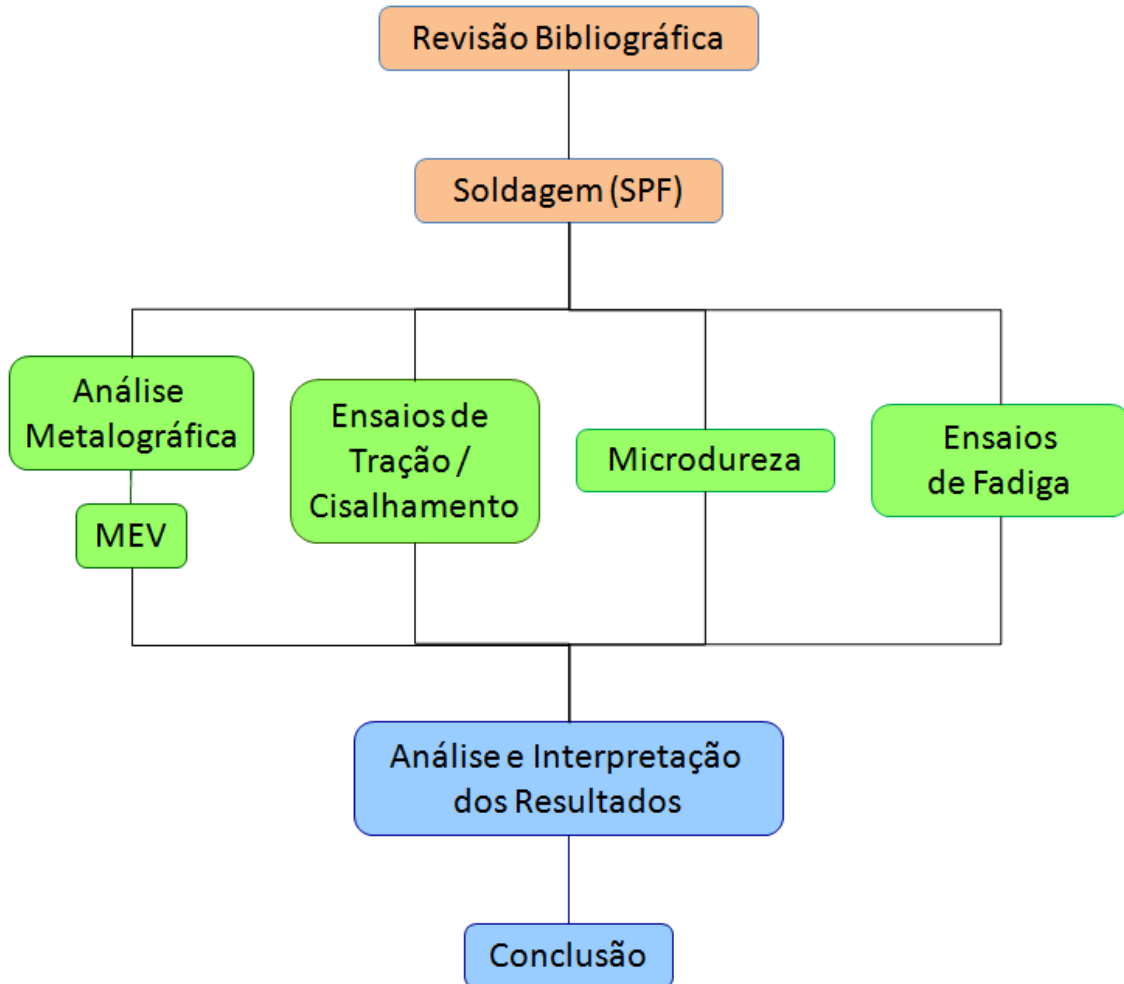


Figura 4. 1 – Fluxograma de atividades.

4.2 Equipamento

Para a união das juntas, utilizou-se um protótipo que fora desenvolvido pelo instituto de pesquisa alemão GKSS, como mostra a figura 4.2. Este possui força axial máxima de 7,5 kN e 3000 rpm como velocidade máxima de rotação. As dimensões e características da ferramenta são: anel de retenção – 18 mm de diâmetro, camisa – 9 mm de diâmetro (com rosca) e pino – 5,2 mm (com ranhuras). Pino e camisa podem atuar com velocidades e sentidos de rotação independentes.

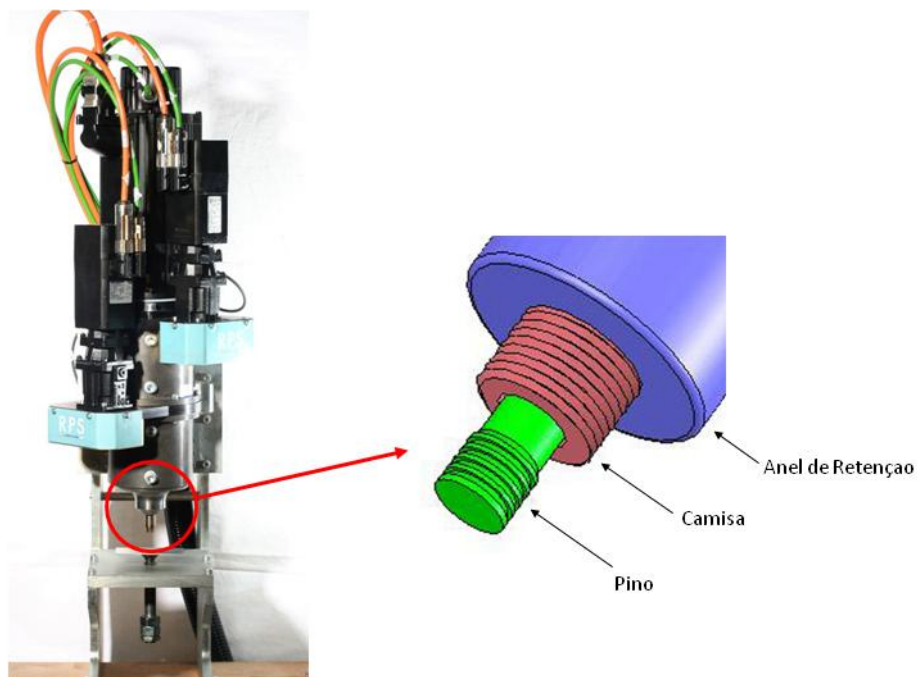


Figura 4. 2 – Equipamento para Soldagem por Fricção por Ponto [9].

A ferramenta de solda é composta de três partes: Anel de Retenção, Camisa e Pino (Figura 4.3). Cada uma dessas partes move-se de maneira independente em relação às outras.

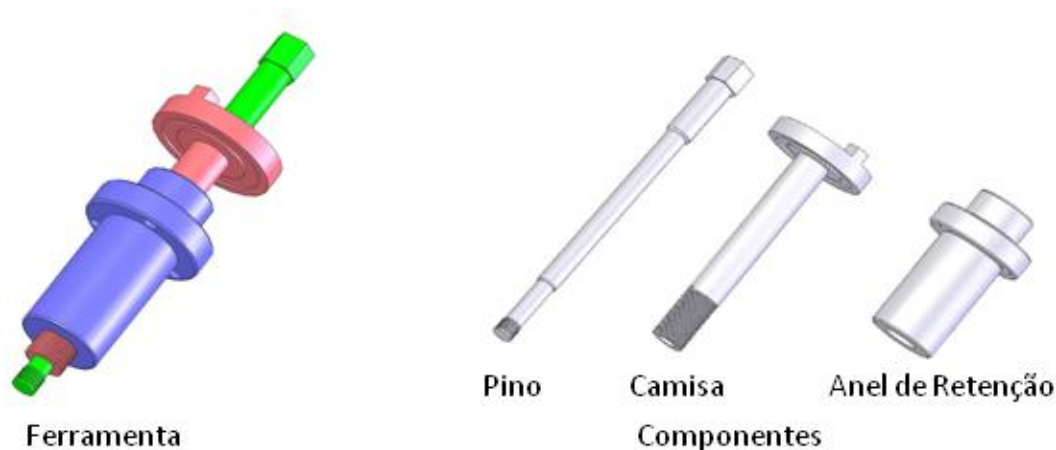


Figura 4. 3 – Ferramenta e componentes.

O anel de retenção tem duas funções: a) manter as chapas presas durante o processo e b) servir de barreira para o material plastificado de escapar na forma de flash. Pino e camisa são conectados a um motor responsável pela velocidade rotacional, e os atuadores independentes responsáveis pela disposição axial deles. São responsáveis pela deformação plástica do material e acomodação do metal deformado durante o processo.

4.3 O processo

Inicialmente, as duas chapas a serem soldadas são posicionadas uma sobre a outra e presas de maneira que as ocasionais deformações sejam restritas. A partir deste ponto o processo então pode ser dividido em quatro estágios, como descreve o próximo parágrafo e ilustra a Figura 4.4.

No primeiro estágio, as chapas são seguras pelo anel de retenção contra a mesa de apoio, enquanto pino e camisa começam a rotacionar gerando calor por fricção na superfície da chapa superior. No estágio 2 a camisa penetra nas chapas, enquanto o pino se move para cima, criando uma cavidade cilíndrica que acomoda o material plasticizado deslocado pela camisa. Após atingir uma pré-determinada profundidade de penetração, o estágio 3 se inicia, neste ponto pino e camisa retornam para a superfície da chapa superior. Enquanto retorna, o pino carrega material que estava na cavidade, preenchendo o espaço deixado pela camisa. O quarto estágio é marcado pela retirada de toda a ferramenta das chapas e o resultado é uma superfície lisa sem nenhuma perda

de material. O tempo de processo completo (contemplando os quatro estágios) é configurável, neste trabalho variou de 2,0 a 3,4 segundos.

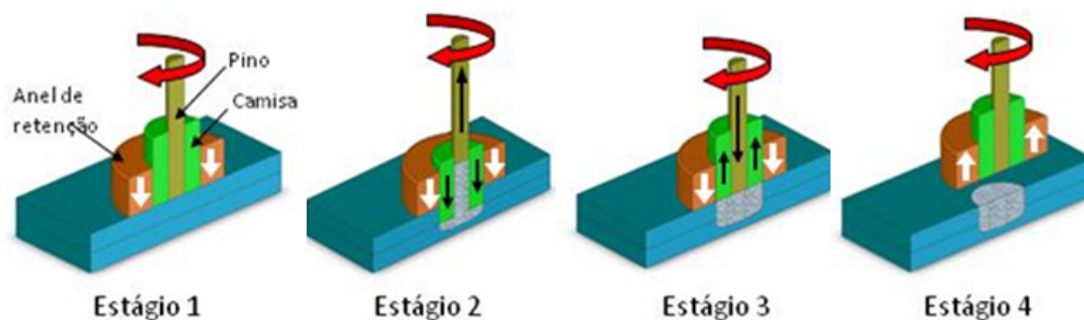


Figura 4. 4 – Representação esquemática do processo SFP com penetração da camisa: (1) amostras presas e rotação da ferramenta, (2) camisa penetra nas placas, (3) ferramenta retorna e (4) ferramenta é retirada.

Chapas de 1,7 mm de espessuras foram unidas com os parâmetros de soldagem tempo de soldagem e velocidade rotacional, indicados na tabela que segue. A matriz de parâmetros foi construída baseada em trabalho preliminar, onde se descobriu a profundidade de penetração de 1,75 mm com os melhores resultados, utilizando esta ferramenta [9].

Tabela 2 - Parâmetros de processo para profundidade de penetração da camisa de 1,75 mm.

Tempo total de soldagem [s]	2,0			2,2			2,6			3,0			3,4		
Velocidade Rotacional [x1000 rpm]	2,9	2,4	1,9	2,9	2,4	1,9	2,9	2,4	1,9	2,9	2,4	1,9	2,9	2,4	1,9
Condição	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Para cada condição, quatro amostras foram produzidas, com as dimensões de 230 x 60 com 46 mm de sobreposição das chapas, de acordo com a norma DIN EN ISO 14273 [43]. Três amostras foram submetidas ao ensaio de cisalhamento por tração em busca da avaliação da resistência mecânica para cada condição de soldagem e a quarta amostra foi cortada transversalmente à solda para caracterização metalográfica e avaliação de

microdureza. As amostras direcionadas a ensaio de fadiga foram confeccionadas especialmente para estes ensaios.

4.4 Caracterização microestrutural

A microestrutura foi analisada e caracterizada em MO, após preparação das amostras, a fim de identificar as zonas de solda, suas dimensões na amostra, os tamanhos de grãos e o resultado da deformação plástica causada no processo. As amostras que foram separadas para análise em microscópio eletrônico foram apenas preparadas, e não atacadas.

A figura 4.5 ilustra visões de topo, transversal e longitudinal de uma amostra da liga estudada.

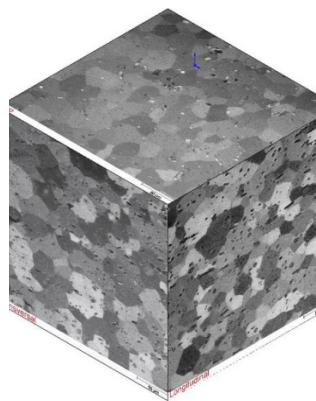


Figura 4. 5 – Microestrutura da liga Al 6181 em diferentes direções.

A análise das juntas soldadas, como pode ser visto na Figura 4.6, revela alguns padrões geométricos comum a todas as juntas, que foram denominados como elementos dessas juntas: pico, linha de união e marca de deformação. A linha de união é uma região de transição aonde a união entre a chapa superior e inferior não é tão efetiva. Aparece como uma linha pequena e geralmente assimétrica na imagem do corte transversal, quando atacado com solução Kroll e vista em microscópio óptico. A marca de deformação é uma região de boa adesão entre as chapas, com alta resistência, como será evidenciado posteriormente. Sua forma em seus limites laterais é resultante do fluxo de material, especialmente no terceiro estágio do processo, quando o pino pressiona o material plastificado (deslocado no segundo estágio) de volta à posição original. O pico é causado pela deformação plástica na chapa inferior,

e suas dimensões finais são controladas pela quantidade de energia absorvida. Sua forma é em V invertido, como mostra a figura a seguir.

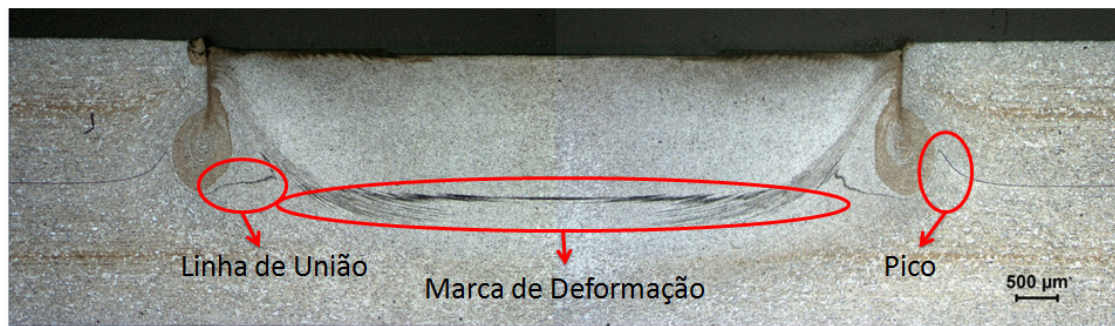


Figura 4. 6 – Características da junta (presentes em todas as amostras).

4.4.1 Preparação e ataque das amostras

As amostras separadas para análise microestrutural foram cortadas, embutidas, lixadas em 5 lixas diferentes (120, 320, 600, 1200 e 2500) por 1 minuto em cada lixa, e posteriormente polidas em dois panos de polimento diferentes (3μm e OPS). As amostras foram lixadas e polidas em uma máquina Phoenix 4000 da Buehler. Após tal preparação, as amostras foram atacadas com reagente Flick por 30 segundos e com ataque eletrolítico Barker por 120 segundos, com a intenção de revelar os grãos (contornos e tamanho).

4.4.2 Microscopia óptica e estereoscopia

A identificação dos defeitos e características da solda (entre eles falta de mistura, falta de preenchimento, pico e linha de União, que serão explicados nos resultados) foi feita em microscópio óptico, em aumentos de 16x, 50x, 100x e 200x, tornando-se possível ver detalhes da magnitude de 5 nm. As características Pico e Linha de União estão presentes em todas as amostras unidas pelo processo, assim como a marca de deformação, por esta razão não são considerados defeitos. Seus efeitos nos testes de solicitação mecânica serão discutidos posteriormente neste trabalho. Com luz polarizada foi possível determinar a diferença de tamanho de grãos em cada zona de solda, e que

essa diferença não é tão significativa como em outras ligas de alumínio (2024-T3 e 7075-T6, por exemplo). Porém, essa pequena diferença pode ser uma das explicações para o aumento dos valores de dureza na lente de soldagem. O estudo dos precipitados no microscópio eletrônico de transmissão dará conclusões sobre o efeito dos precipitados na solda, uma vez que esse é o principal mecanismo de endurecimento dessa liga.

Um estereoscópio foi utilizado para obter imagens das amostras após os testes mecânicos, com baixos aumentos. Essas imagens auxiliaram no estudo dos modos de fratura e de propagação de trincas.

4.4.3 Medição e análise de tamanho de grãos

A medição do tamanho de grãos foi realizada com o software de análise de imagens “a4i MatIA”, de acordo com a norma ASTM E 112-96, 2000 [44]. Foram feitas análise horizontal e vertical, como mostra a Figura 4.7. Na imagem adquirida em microscópio óptico com luz polarizada, o software gerou 5 linhas, e cada contorno de grão que é cortado por essa linha foi marcado. Após isso, o mesmo foi feito na direção vertical.

O software finalmente calcula o tamanho de grão, a área média, o menor e maior valor, a anisotropia entre as medias vertical e horizontal e o número de grãos por área. Duas amostras, nas condições 9 e 14 foram medidas em diferentes regiões de solda.

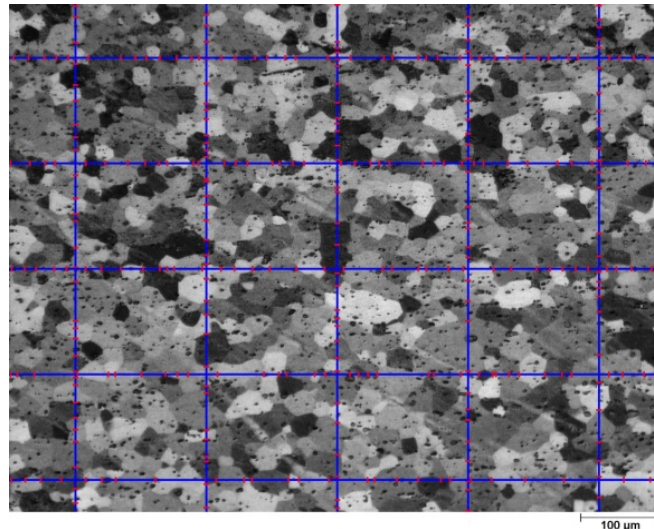


Figura 4. 7 - Amostra com linhas para a medição de tamanho de grão.

4.4.4 Microscopia Eletrônica

Foram realizadas imagens das Zonas de Soldagem – Lente de Soldagem, Zona Termomecanicamente Afetada (ZTMA), Zona Termicamente Afetada (ZTA) e Metal de Base (MB) de uma amostra, em microscópio eletrônico de varredura (MEV) no Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE) do Departamento de Engenharia de Materiais da UFSCar. Para isso, a amostra foi preparada e atacada eletroliticamente (solução HF 4%).

4.5 Caracterização mecânica

As amostras foram então submetidas ao ensaio de cisalhamento por tração, ensaio de fadiga e medições de microdureza. Esses testes, além de fornecer dados numéricos, tornaram possível a avaliação dos modos de fratura, com o auxílio de microscopia óptica, eletrônica e estereoscópio.

4.5.1 Ensaio de Cisalhamento por Tração

Os testes foram conduzidos na máquina Schenck Trebel RM 100 com um controlador da Zwick, com corpo de prova na configuração mostrada pela Figura 4.8. Todas as condições foram testadas 3 vezes, com mesma

velocidade constante de 1 mm/s, para a construção de um gráfico que comparasse a resistência dos corpos de prova e a repetibilidade das soldas, em termos de resistência mecânica.

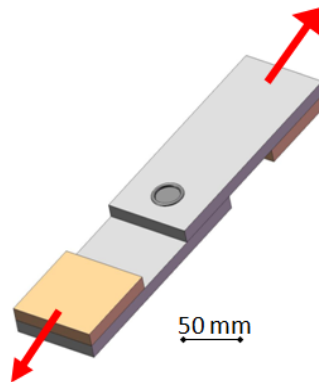


Figura 4. 8 - Esquema de amostra submetida ao ensaio de cisalhamento por tração.

4.5.2 Ensaio de fadiga

Este tipo de ensaio mecânico fornece dados quantitativos relativos às características de um material ou componente quando submetido a tensões cíclicas por longos períodos.

Neste trabalho os ensaios de fadiga foram realizados com aplicação de carregamento senoidal, com amplitude de tensão em níveis variando entre 9,8 a 58,0 MPa para as amostras soldadas. A relação entre a carga máxima e a carga mínima em cada ensaio foi fixada segundo as equações a seguir:

$$S_{max} = (2 + 1,2) \times S_{mean} \quad (4.1)$$

$$S_{min} = 0,2 \times S_{mean} \quad (4.2)$$

A resistência a fadiga de um material é expressa por curvas S-N de fadiga, que mostram com quantos ciclos uma amostra se fratura, quando submetida a diferentes níveis de carga. A curva de fadiga, ou curva de

Woehler, é obtida através de testes. Um grande número de amostras é necessário, uma vez a dispersão de uma amostra para outra é grande.

A frequência de 20 Hz foi aplicada para todas as amostras avaliadas, assim como para o metal de base, permitindo assim a construção e comparação das curvas S-N entre todas as condições investigadas.

Os testes ocorreram em uma máquina Schenck Trebel RM 50, com ajustes de frequência, carga média e amplitude disponíveis (Fig. 4.9).



Figura 4. 9 - Amostra durante teste de fadiga.

Após os testes mecânicos, as amostras foram fotografadas no estereoscópio, e parte delas foi preparada e analisada em microscópio óptico. Algumas ainda foram separadas para análise em microscópio eletrônico, para uma investigação mais detalhada da microestrutura.

O ensaio foi conduzido aplicando cargas cíclicas trativas nos corpos de prova até a ruptura dos mesmos. Os resultados obtidos foram usados para a construção da curva S-N, de modo a se avaliar a influência dos defeitos presentes nas soldas.

Para a determinação dos níveis de carga foram utilizados os resultados de limite de resistência determinados do ensaio de tração e os valores de largura e espessura nominal da seção transversal do corpo de prova. A tabela 3 apresenta os níveis de cargas adotados para a realização do ensaio para as condições soldadas.

Tabela 3 - Níveis de cargas e tensões utilizadas no ensaio de fadiga para as condições soldadas.

Amostra	Fmax[kN]	Fmin[kN]	Fmed[kN]	Smax[MPa]	Smin[MPa]	Smed[MPa]
1	3	0,6	1,8	98,04	19,6	58,8

2	3	0,6	1,8	98,04	19,6	58,8
3	3	0,6	1,8	98,04	19,6	58,8
13	2,33	0,466	1,4	76,14	15,2	45,8
14	2,33	0,466	1,4	76,14	15,2	45,8
4	1,8	0,2	1	58,82	6,5	32,7
5	1,8	0,2	1	58,82	6,5	32,7
6	1,8	0,2	1	58,82	6,5	32,7
18	1,66	0,2	1	54,25	6,5	32,7
15	1,166	0,233	0,7	38,10	7,6	22,9
16	1,166	0,233	0,7	38,10	7,6	22,9
17	1,166	0,233	0,7	38,10	7,6	22,9
7	0,83	0,1	0,5	27,12	3,3	16,3
8	0,83	0,1	0,5	27,12	3,3	16,3
10	0,5	0,1	0,3	16,34	3,3	9,8
19	0,5	0,1	0,3	16,34	3,3	9,8

4.5.3 Microdureza

As medidas de microdureza foram determinadas na seção transversal ao cordão de solda, utilizando os mesmos corpos de prova utilizados na análise metalográfica. Este ensaio visa avaliar as alterações metalúrgicas ocorridas entre o metal de base e a lente de soldagem formada, através de diferentes medidas ao longo da junta soldada.

A máquina de endentações Zwick 3212 foi utilizada para realizar as medições de microdureza e obter os resultados, em HV_{0,5}. As medições foram feitas de modo a alcançar todas as zonas de solda, até chegar ao metal de base. A distância entre duas endentações foi de 0,5 mm por 15 segundos cada e mediu-se uma área de 20 mm de cada lado do centro da solda. O objetivo foi analisar a diferença de valores entre cada zona, correlacionar com os resultados mecânicos e com as propriedades do material. A figura 4.10 mostra uma amostra e a marcação da linha de medida das endentações.

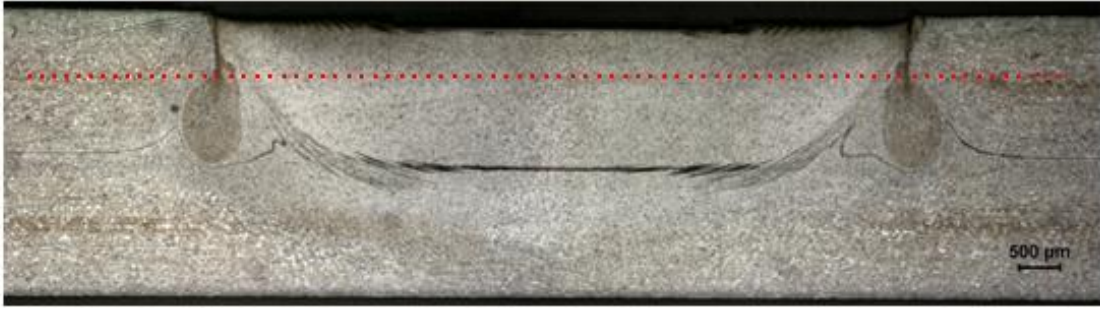


Figura 4. 10 - Perfil de microdureza e marcação das endentações.

Além de avaliar as alterações metalúrgicas ocorridas entre o metal de base e a lente de soldagem quando alterados os parâmetros de soldagem, o perfil de microdureza da junta soldada fornece um bom método para medir a largura da ZTA e avaliar os diferentes ciclos térmicos a diferentes distâncias do centro da lente de soldagem.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apresentam-se nesta seção os resultados e discussões dos ensaios das soldas realizadas em juntas sobrepostas, visando avaliar a aplicabilidade do processo de SFP na liga de alumínio 6181-T4.

5.1 Amostras Soldadas

A figura 5.1 mostra macrografias das secções transversais das amostras 36 (a), 34 (b), 42 (c) e 40 (d). Estas amostras foram selecionadas de acordo com os parâmetros de soldagem utilizados em cada uma, sendo o critério mostrado na tabela a seguir:

Tabela 4 – Parâmetros das amostras apresentadas na Figura 5.1.

Tempo total de soldagem [s]	2,2		3,0	
Velocidade Rotacional [x1000 rpm]	2,9	1,9	2,9	1,9
Condição	4	6	10	12
Amostra	34 – (b)	36 – (a)	40 – (d)	42 – (c)

Em (a), a união foi feita em baixo tempo de soldagem (2,2 segundos) e em baixa velocidade (1900 rpm), e o que pode ser visto é a presença de defeitos de falta de preenchimento no diâmetro do nugget, além do elemento pico muito pequeno, demonstrando uma deformação plástica ineficiente para se obter uma união resistente. Em (b), o tempo de soldagem também foi baixo, porém a velocidade rotacional foi alta (2900 rpm), e o resultado apresenta ainda o defeito de falta de preenchimento, agora com um pico mais expressivo, o que significa em uma deformação plástica mais intensa e uma resistência da união maior. No caso (c), foi utilizado tempo de soldagem alto (3,0 segundos) e velocidade de rotação das ferramentas camisa e pino baixas (1900 rpm), resultando em uma união de qualidade, sem defeitos e com os elementos pico, linha de união e marca de deformação sem anormalidades. O último caso (d) apresenta uma solda feita em alto tempo de soldagem e alta velocidade rotacional, e a junta não apresenta defeitos, e também apresenta os elementos

(pico, linha de união e marca de deformação) suaves, ou seja, sem regiões de contorno pontuais, que poderiam ser pontos nucleadores de trinca, quando em solicitação mecânica. A análise dos resultados dos ensaios de tração por cisalhamento das juntas que segue abaixo reafirma as conclusões das macrografias. A análise das zonas de soldagem para cada condição também foi feita e será discutida na seção seguinte.

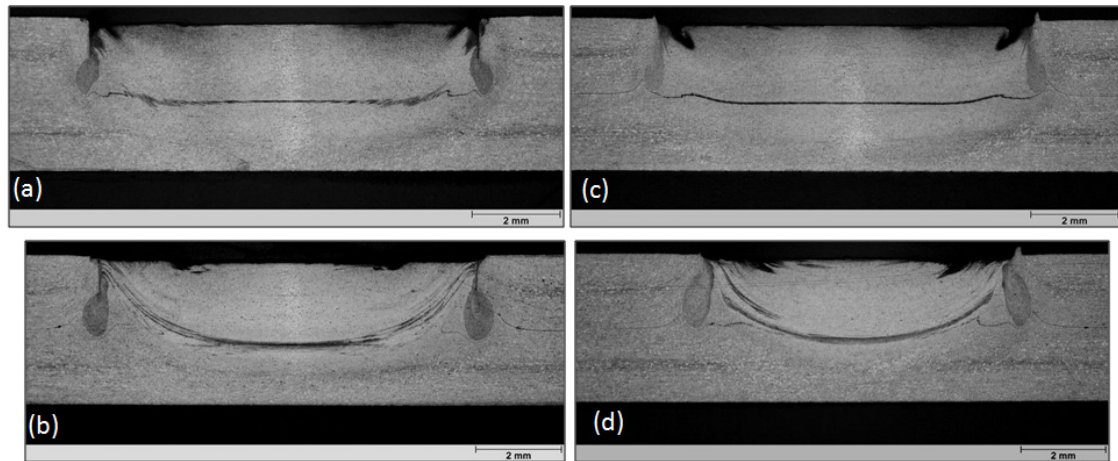


Figura 5. 1 – Macrografias das amostras (a) 36; (b) 34; (c) 42; (d) 40.

5.2 ensaio de cisalhamento por tração

Para cada uma das 15 condições de solda foram testadas 3 amostras nos ensaios de cisalhamento por tração. Através destes ensaios foi evidenciado que alguns parâmetros são capazes de produzir juntas de alta resistência mecânica, enquanto para outros o contrário é fato. A reprodutibilidade também é apresentada apenas algumas condições de solda. A figura 5.2 apresenta os valores obtidos no ensaio de cisalhamento por tração para todas as amostras testadas.

Os melhores resultados foram encontrados para o tempo de solda entre 2,6 e 3,0 segundos (condições 7 a 12), com valores de tensão resultante na ordem de 200 MPa. Entre esses melhores resultados, as condições 10 e 12 tiveram os menores desvios-padrão nos valores de resistência.

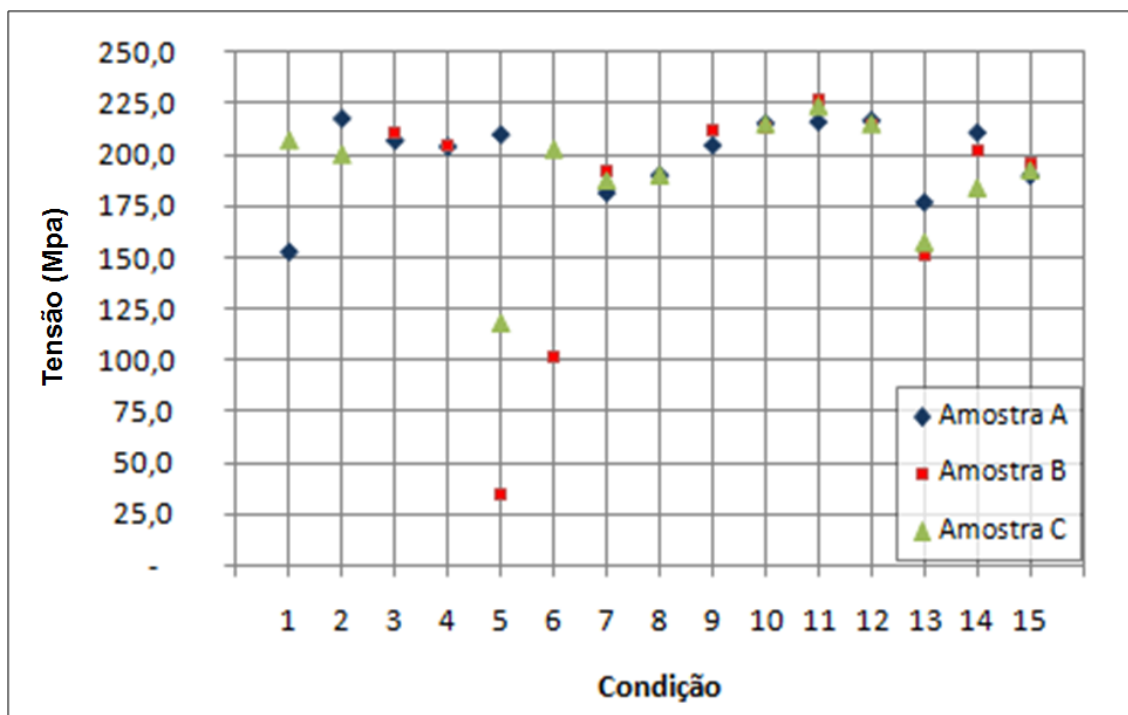


Figura 5. 2 - Resultados do ensaio de cisalhamento por tração.

A secção transversal das juntas revelou que soldas de qualidade (condições 10, 11 e 12) não apresentaram nenhum defeito. Uma investigação mais profunda mostrou também uma boa mistura de material entre a Lente de Soldagem e a ZTMA. A influência da velocidade rotacional também foi visualizada nestes resultados. Aparentemente a velocidade de 1900 rpm gerou interfaces mais lisas (condição 12) enquanto velocidades maiores aumentaram o tamanho da linha de união, como mostra a figura 5.3.

Microdureza média:

- Marca de Deformação: 97.1 HV_{0,5}
- Lente de Soldagem: 93.4 HV_{0,5}
- Material de base: 78 HV_{0,5}

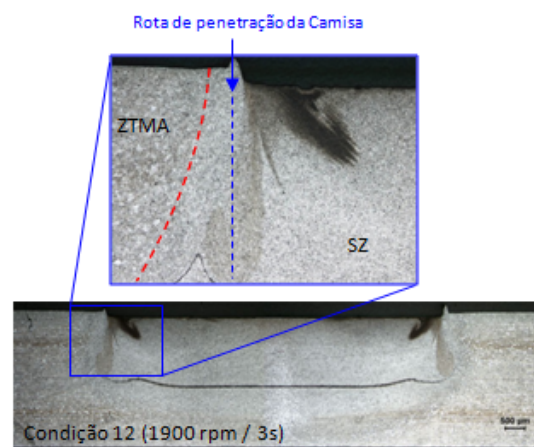
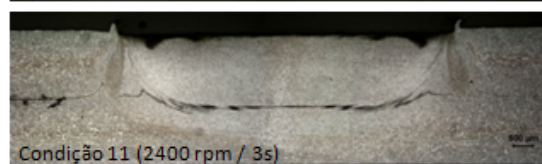
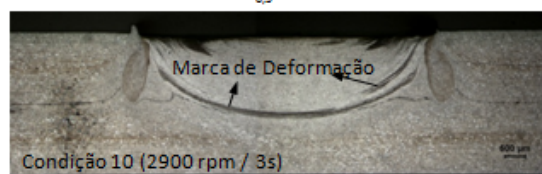


Figura 5. 3 – Seção transversal de amostras apresentando melhores performances mecânicas sob ensaio de cisalhamento por tração.

5.2.1 Modos de fratura em testes de ensaio de cisalhamento por tração

A análise da superfície de fratura de amostras rompidas após ensaio de cisalhamento por tração revelou quatro diferentes modos de fratura. São eles: Através da solda com trinca circumferencial, com extração do nugget, nugget extraído com rasgamento e nugget extraído pela parte anterior, este último com três variações. Em todos estes modos foi associado um mecanismo básico de início do processo de fratura. Nesse mecanismo de fratura a Linha de União teve grande importância, agindo como um nucleador de trincas, como mostra a Figura 5.4.

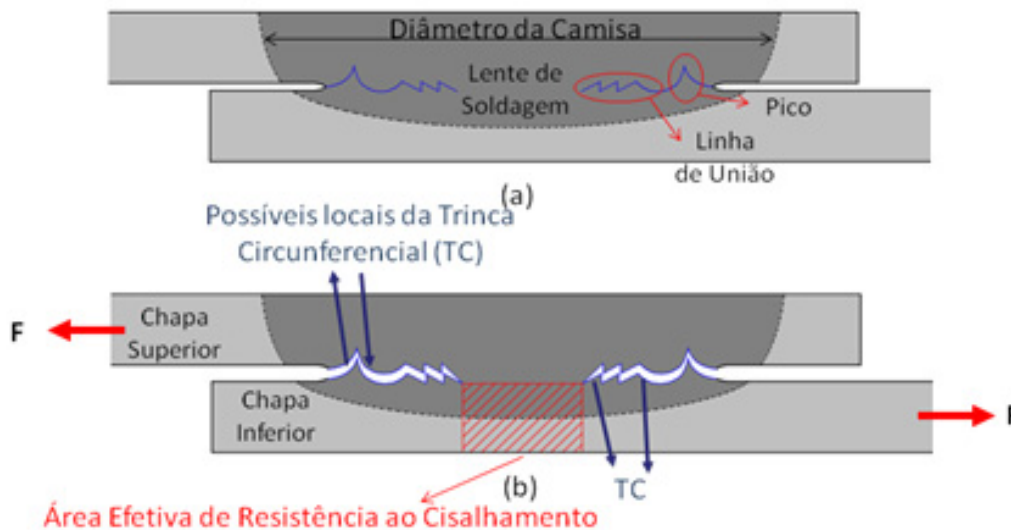


Figura 5.4 – Desenho esquemático mostrando a região de concentração de tensão em uma pequena seção da chapa inferior após a separação da linha de união. Desenho fora de proporções para melhor entendimento.

Quando a amostra é solicitada durante o ensaio a Linha de União tende a separar, como mostra o desenho esquemático da Figura 5.4. Essa solicitação aumenta o tamanho da Linha de União e simultaneamente leva a separação progressiva das partes em torno da junta soldada. Quando a Linha de União se desprende totalmente a carga passa a se concentrar em uma região menor, como ilustrado na Figura 5.4b. Nessa região, intitulada de região efetiva de resistência ao cisalhamento, o material da chapa superior é completamente pressionado pela região da lente de soldagem, que apresenta maior resistência mecânica, como foi evidenciado pelo perfil de microdureza (ver Figura 5.12).

Por outro lado o material na chapa inferior faz pressão na lente de soldagem, ZTMA e dependendo da condição de soldagem também na ZTA.

Trincas circunferenciais podem nuclear na chapa superior, na chapa inferior ou em ambas as chapas, como indicado na Figura 5.4b. Os pontos de nucleação de trincas nas chapas superiores são na ponta do Pico ou em defeitos de soldagem de falta de mistura. Nas chapas inferiores os pontos de nucleação de trincas são na interface entre a linha de união e a marca de deformação ou através da propagação da extremidade da linha de união.

A razão para a nucleação destas trincas circunferenciais é a distribuição de tensões em torno da junta, como mostra a Figura 5.5. A carga de tração cria uma região tensionada, uma região de cisalhamento e uma região comprimida em torno da junta. A trinca circunferencial nucleia na região tensionada, e irá propagar em torno da junta até a região de cisalhamento.

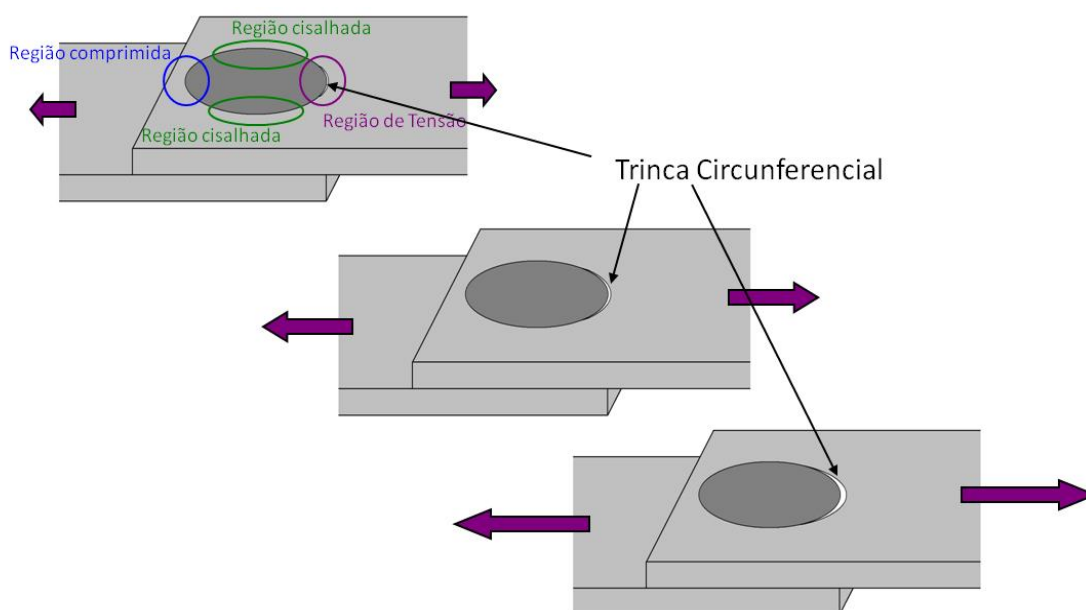


Figura 5. 5 - Trinca circunferencial nucleia na região tensionada e propaga em torno da junta soldada.

Os quatro modos de fratura podem ser explicados e detalhados a partir dos testes e análises realizados, como segue-se:

- Através da solda com trinca circunferencial

Neste primeiro modo a lente de soldagem se separa e cada chapa (superior e inferior) fica com metade do nugget. A trinca circunferencial separa

parte da lente de soldagem na marca da camisa das chapas. A lente de soldagem não é arrancada fora devido à pequena área de resistência efetiva em algumas amostras.

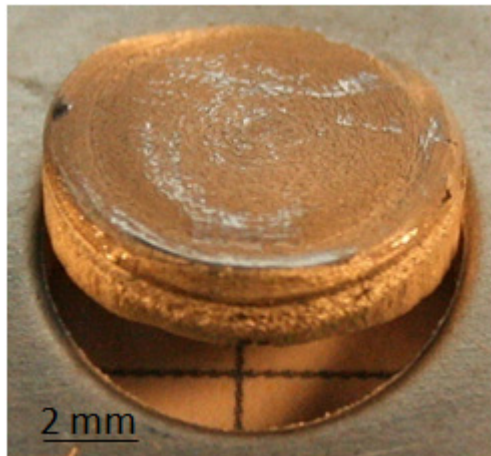


Figura 5.6 - Modo de fratura “através da solda com trinca circunferencial”.

- Com extração do nugget

Neste modo de fratura a trinca circunferencial se inicia na região tensionada (figura 5.5) e cresce sem a separação da linha de união. Com uma boa adesão entre as chapas superior e inferior (quando a linha de união e a marca de deformação são consideradas de qualidade), a nucleação da trinca circunferencial na chapa inferior é dificultada, mantendo o nugget na chapa superior. A trinca se inicia e se propaga no pico até que a fratura se complete como mostrado na Figura 5.7.

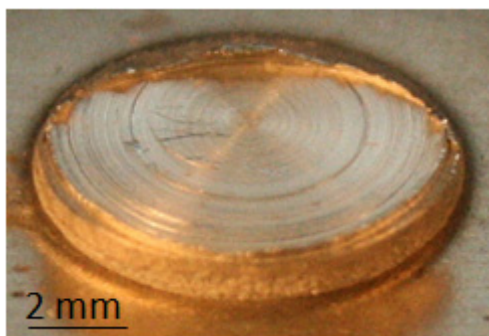


Figura 5.7 - Modo de fratura com extração do nugget.

- Extração do nugget com rasgamento

Neste modo, a fratura se inicia na linha de união, e se direciona para o pico, propagando até a superfície. A área de resistência efetiva impede a separação total da lente de soldagem, e a fratura ocorre na marca da camisa.

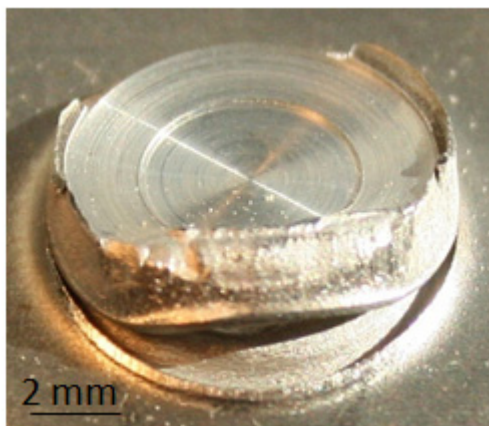


Figura 5. 8 - Modo de fratura de extração do nugget com rasgamento.

- Extração do nugget pela parte anterior

De acordo com a posição da lente de soldagem, este modo pode ser dividido em três variantes. Não há outra diferença senão a posição do nugget após a fratura. A trinca nucleia-se na linha de união, e propaga-se até o pico, ou então para a região de falta de mistura, quando presente. A trinca termina na marca da camisa, com possível deformação plástica do material.

- Nugget na chapa superior
- Nugget na chapa inferior
- Nugget fora

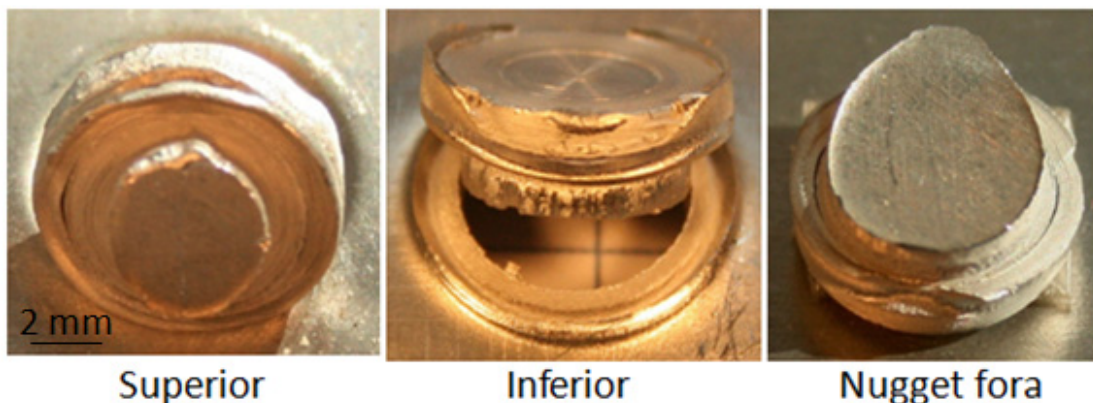


Figura 5. 9 – Variações do modo de extração do nugget pela parte anterior.

Quanto à resistência das soldas nos ensaios de cisalhamento, seguindo a norma SAE-AMS-W6858 – RSW mínimo de resistência por solda (2000), uma amostra de SRP com 1,7 mm de diâmetro deve apresentar uma carga de 3,0 kN. Testes realizados com SFP na liga 6181-T4 com as mesmas

dimensões mostraram uma resistência de 7,5 kN por ponto de solda, como demonstra a Fig. 5.10.

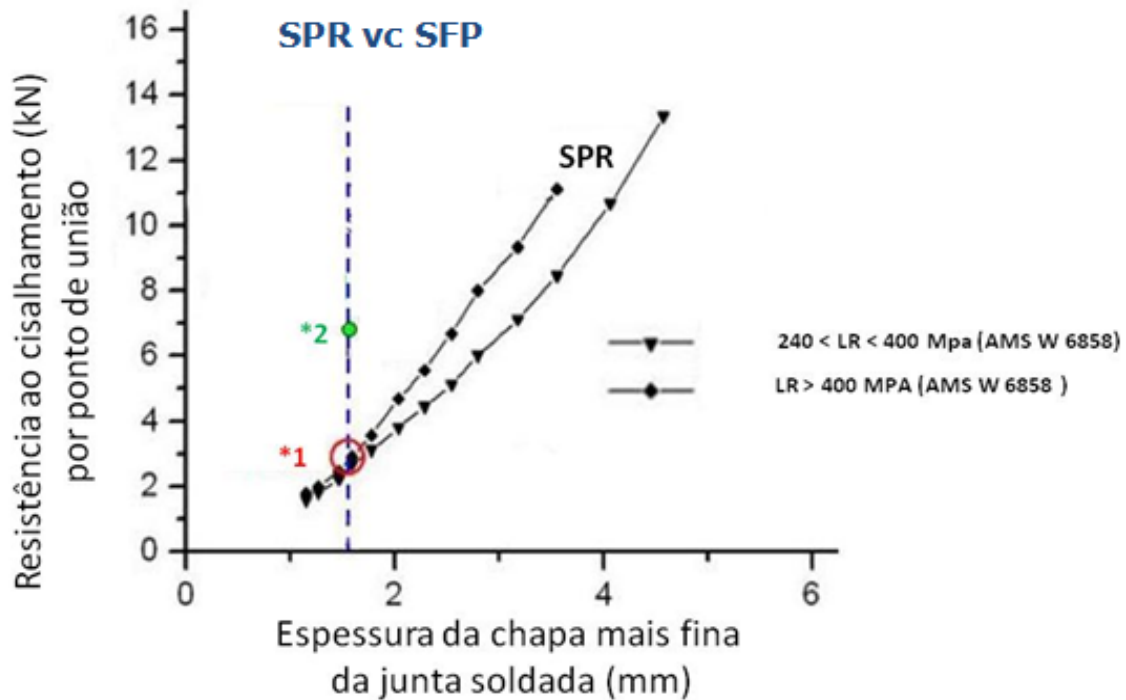


Figura 5.10 - Comparação mecânica entre SRP e SFP.

onde:

*1: Valor de resistência ao cisalhamento para chapas de 1,7 mm pelo processo SRP.

*2: Valor de resistência ao cisalhamento alcançado para chapas de 1,7 mm pelo processo SFP.

5.3 Ensaio de Fadiga

Para gerar uma curva S-N, foram aplicadas diferentes cargas em ensaios cíclicos. A tabela 5 mostra as tensões (em MPa) utilizadas nos testes de fadiga e o número de ciclos que levaram a fratura. A freqüência em todos os testes foi de 20 Hz. Para cálculo da tensão em cada ensaio, com base na carga (em kN) fornecida pelo ensaio, utilizou-se a área da secção transversal das amostras testadas, com diâmetro da camisa (9 mm) pela espessura das duas chapas (3,4 mm), resultando em uma área de 30,6 mm².

A Figura 5.11 é a curva de Woehler consequente dos ensaios realizados, e também uma imagem de fratura típica para baixos, médios e altos ciclos de fadiga.

Tabela 5 - Tensão para cada amostra no teste de fadiga

Amostra	Smax [MPa]	Smin [MPa]	Smed [MPa]	Ciclos
Al 6181 – 1	98,04	19,6	58,8	8.800
Al 6181 – 2	98,04	19,6	58,8	48.400
Al 6181 – 3	98,04	19,6	58,8	27.900
Al 6181 – 13	76,14	15,2	45,8	3.000.000
Al 6181 – 14	76,14	15,2	45,8	380.900
Al 6181 – 4	58,82	6,5	32,7	356.000
Al 6181 – 5	58,82	6,5	32,7	667.600
Al 6181 – 6	58,82	6,5	32,7	365.100
Al 6181 – 18	54,25	6,5	32,7	855.600
Al 6181 – 15	38,10	7,6	22,9	2.437.900
Al 6181 – 16	38,10	7,6	22,9	1.926.200
Al 6181 – 17	38,10	7,6	22,9	2.387.300
Al 6181 – 7	27,12	3,3	16,3	5.145.300
Al 6181 – 8	27,12	3,3	16,3	8.425.200
Al 6181 – 10	16,34	3,3	9,8	54.148.800*
Al 6181 – 19	16,34	3,3	9,8	36.417.300*

*amostra não rompeu.

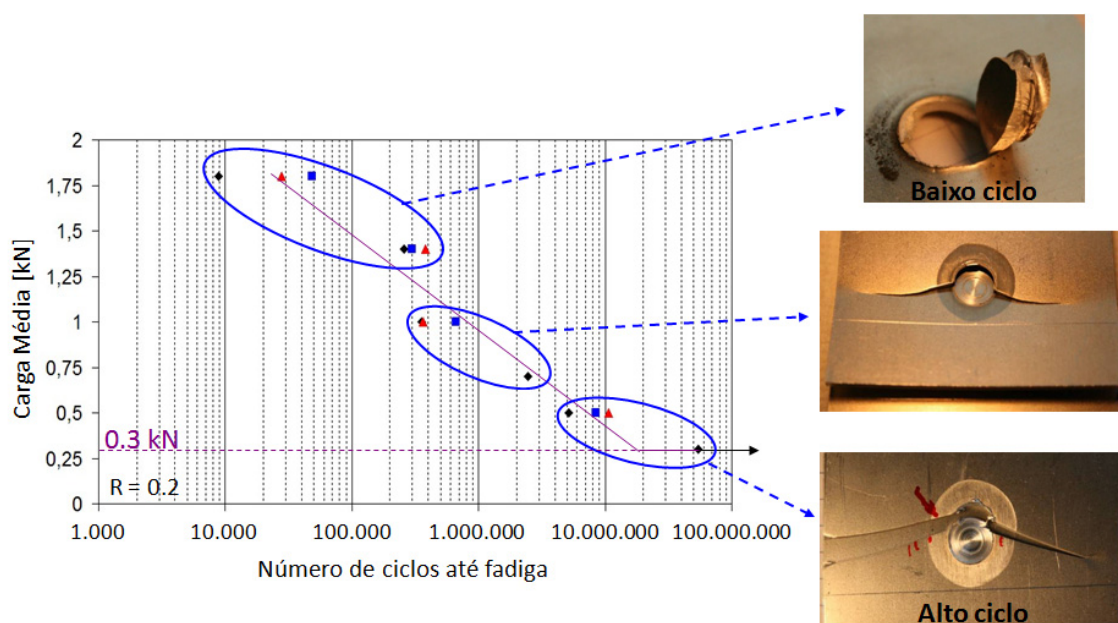


Figura 5.11 - Curva de Woehler e limite de resistência a fadiga.

A curva mostra o comportamento da solda, e também o limite de resistência a fadiga, que é a carga que não gera trincas no metal após um número máximo de ciclos. Após $5,4 \cdot 10^7$ ciclos, adotou-se a condição de limite de resistência à fadiga, e o ensaio foi interrompido. Essa decisão foi tomada devido ao alto tempo que o ensaio tomou, comprometendo a disponibilidade da máquina. Na mesma figura nota-se que para maiores cargas, as amostras apresentam maior a deformação plástica na fratura, e menor número de ciclos até a falha. No caso das amostras que fraturaram em alto ciclo de fadiga, a trinca circunferencial se propaga até metade do nugget, onde passa a se propagar lateralmente até romper a amostra toda. Isso acontece, pois a carga não é suficiente para deformar a região efetiva de cisalhamento.

5.4 Microdureza

As medições de microdureza demonstraram um perfil padrão para todas as amostras, com diferentes patamares de valores, que variam de acordo com os parâmetros de soldagem. O metal de base possui valores em torno de 80 $HV_{0,5}$, na ZTA há um pequeno decréscimo até a ZTMA, onde ocorre uma recuperação da microdureza que finalmente aumenta até a lente de soldagem. Dentro da lente de soldagem, é possível ver dois picos de microdureza, provavelmente devido à alta deformação nessas regiões, que leva ao refino de precipitados. Um perfil de dureza de uma amostra considerada boa segue na Figura 5.12.

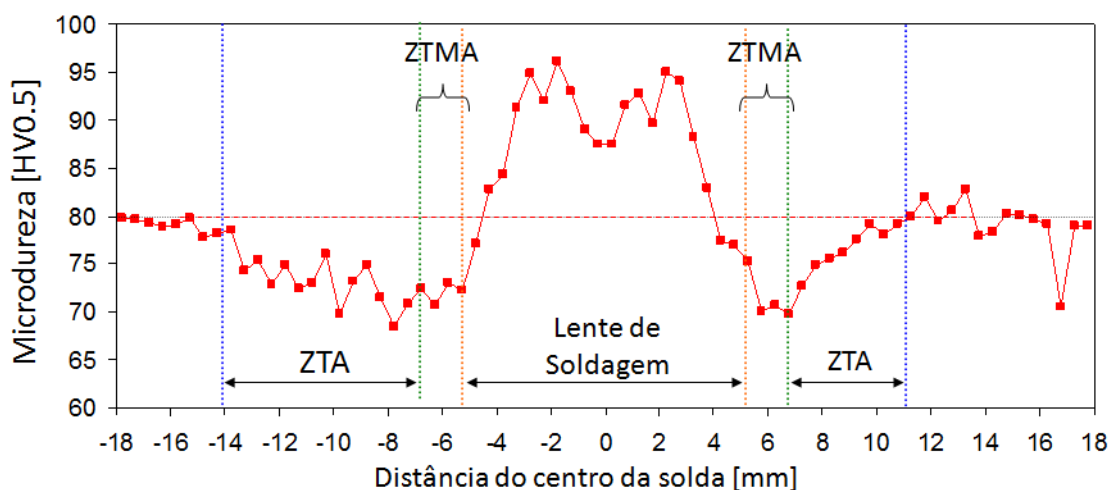


Figura 5.12 - Perfil de microdureza na liga Al 6181-T4.

5.5 Medição de Tamanho de Grãos

O movimento da ferramenta durante o processo de união, penetrando nas chapas sobrepostas, causa deformação plástica e gera calor nas peças. Esses fatores irão determinar o tamanho dos grãos após a união. A Tabela 6 mostra o tamanho médio dos grãos encontrados para cada zona de soldagem, e a figura 5.13 ilustra cada região e o comportamento dos grãos.

A variação dos valores entre as amostras é devido à diferença de calor inserido em cada uma das amostras, que tiveram diferentes parâmetros de soldagem. No MB, os grãos são equiaxiais e maiores em comparação com as outras regiões. A ZTA apresenta tamanho de grão semelhante ao MB, mas na ZTMA os grãos são menores e mais alongados. Na lente de soldagem, os grãos são menores que nas outras zonas, de forma equiaxial, e as regiões aonde a deformação plástica foi mais intensa (região de penetração da camisa), apresentaram os menores grãos encontrados.

Tabela 6 - Resultados da medição de tamanho de grãos

Região	ASTM	Comprimento (μm)	Área (μm^2)	Grãos por área (mm^{-2})
MB	7,4	25	904	1106
ZTMA	8,3	18	483	2072
Lente de Soldagem	9,0	14	302	3315



Figura 5.13 – Comportamento dos grãos após união por SFP.

5.6 Microscopia Eletrônica

Foi realizada microscopia eletrônica nas amostras, em diferentes regiões da junta soldada, e também no material de base, com diferentes aumentos para cada região.

A Figura 5.14 mostra a marca de deformação, característica presente em todas as amostras. Inicialmente levantou-se a hipótese da característica ser um vazio entre as amostras, ou até uma camada de óxido presente na superfície de cada chapa soldada. Através do detalhamento da imagem, é possível evidenciar que a marca de deformação faz parte da amostra e não é contínua, eliminando a hipótese de ser um vazio presente nas juntas soldadas.

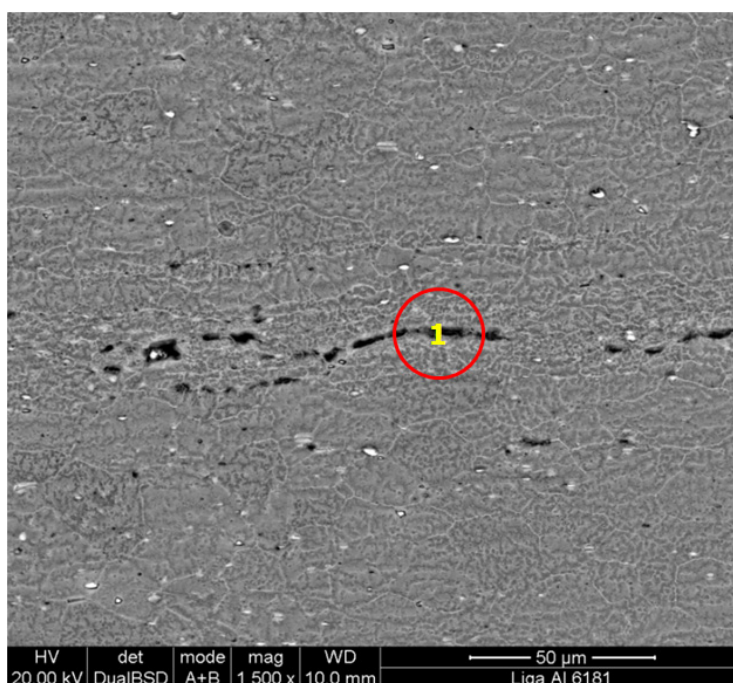


Figura 5.14 - Região da lente de soldagem, com destaque para a característica marca de deformação (1).

Para se ter certeza da composição da marca de deformação, foi realizada a análise em EDS desta região, evidenciando a composição química da mesma. O resultado foi uma composição semelhante à composição química do material de base, eliminando a suspeita da presença de óxido de alumínio na região. Esta característica então se afirma como resultante do fluxo de material deformado, especialmente no terceiro estágio do processo, quando o pino pressiona o material plastificado (deslocado no segundo estágio) de volta à posição original.

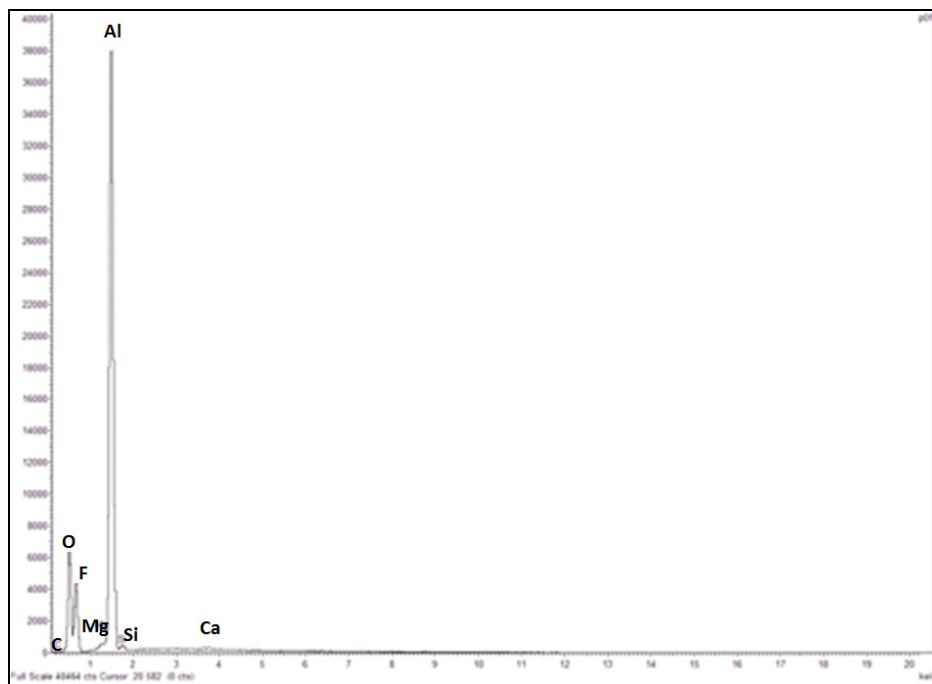


Figura 5.15 - EDS da marca de deformação.

As diferenças entre as dimensões dos grãos e a maneira como estão distribuídos em cada zona de soldagem também foram registrados em MEV, como pode ser visto na figura 5.16, que mostra a região 2, representando a lente de soldagem, e a região 3, representando a zona termomecanicamente afetada. A ZTA só havia sido evidenciada pelo ensaio de microdureza, quando apresentou leve queda de valores em relação ao MB. Na figura 5.16 é possível notar a presença destes grãos equiaxiais, antes da intersecção com os grãos alongados da ZTMA e finalmente dos grãos refinados da lente de soldagem.

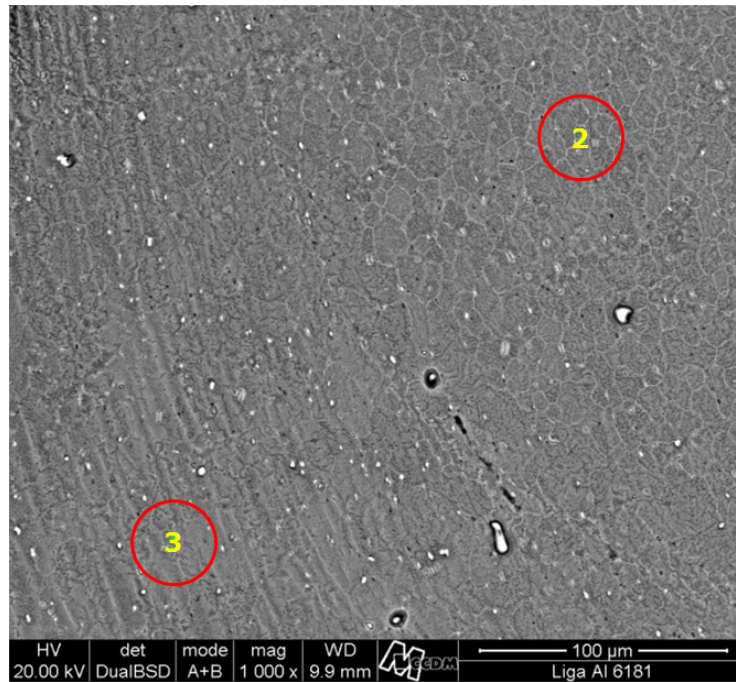


Figura 5.16 - MEV da Lente de Soldagem (2) e da Zona Termomecanicamente afetada (3).

Em escala maior, ainda em microscopia eletrônica de varredura, a lente de soldagem pode ser vista com destaque para o formato equiaxial dos grãos. Esta geometria levanta a questão sobre a possível recristalização dos grãos, decorrente da energia fornecida pela temperatura e deformação do material no processo.

O alumínio é um metal com alta energia de falha de empilhamento, isto significa que mecanismos de recuperação como escalagem de discordâncias são facilmente ativados, o que caracteriza a recuperação dinâmica e favorecendo o surgimento de sub-grãos. Em ligas de alumínio o comportamento pode diferir do elemento puro, devido à presença dos elementos de liga, que dificultam a escalagem de discordâncias e consequentemente a recuperação do metal.

Devido às altas taxas de deformação impostas pelo processo de soldagem e as temperaturas envolvidas, pode haver recristalização dinâmica, com refinamento dos grãos.

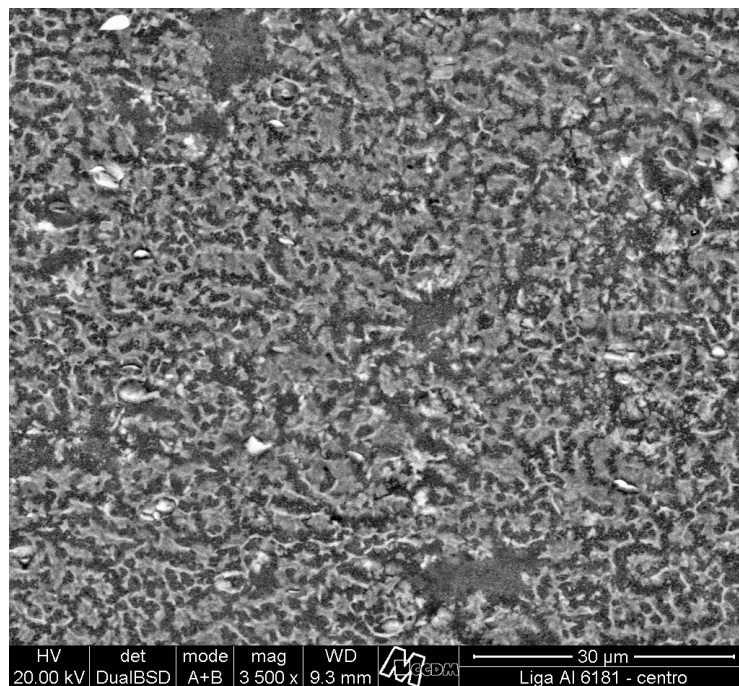


Figura 5.17 - MEV dos grãos na Lente de Soldagem.

A ZTA foi evidenciada apenas após os ensaios de microdureza, com progressiva diminuição de valores até encontrar a ZTMA, pois até então sua presença era questionada. Na figura 5.18 é possível observar que há leve crescimento de grão nessa região, evidenciado apenas em parte das amostras, devido ao calor que a região é submetida no processo de união.

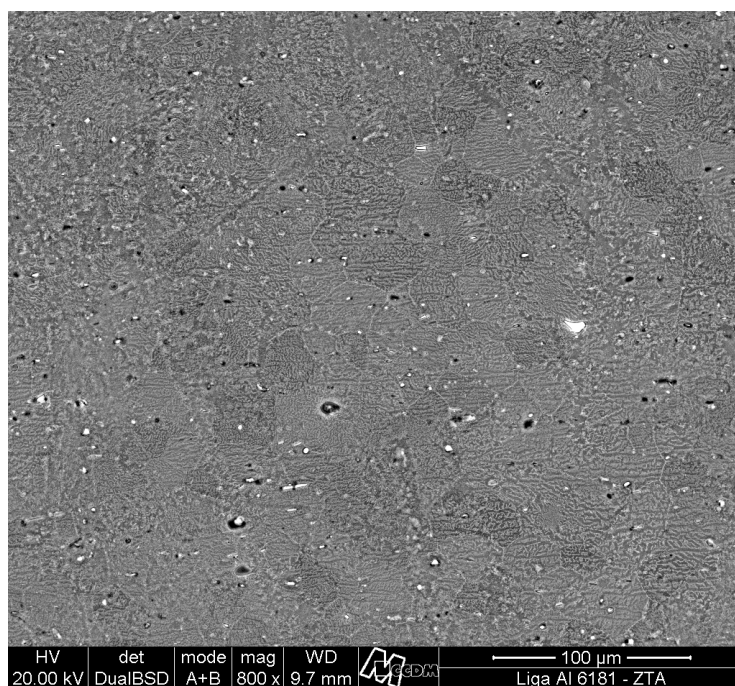


Figura 5. 18 - Zona Termicamente Afetada e seus grãos.

Imagens do MB também foram registradas, para comparação com as outras regiões de soldagem. Na figura abaixo, é possível observar os grãos dessa zona e suas diferentes orientações. Nota-se também a diferença entre essa região e a ZTA, devido à influência do calor do processo de soldagem.

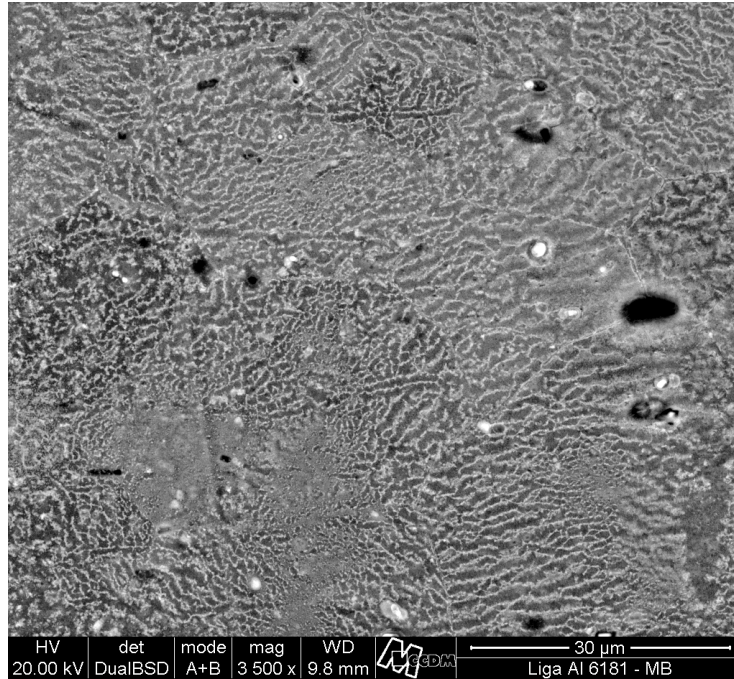


Figura 5.19 - Microscopia Eletrônica de Varredura do Material de Base.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou a aplicabilidade do novo processo de SFP em junta sobreposta de alumínio 6181-T4, através do estudo do efeito dos parâmetros de soldagem nas zonas de junta soldada, com observação das características e dos defeitos de soldagem, dos modos e mecanismos de fratura, e do desempenho da junta quando submetida a ensaios cíclicos e monotônicos.

Sobre os parâmetros de processo, soldas de qualidade estão associadas com alto tempo de soldagem e baixa velocidade rotacional, com um tempo ótimo de 3,0 segundos e velocidade de 1900 rpm. Condições fora das acima descritas estão associadas com perda de resistência mecânica da junta e defeitos de soldagem.

Nos ensaios monotônicos, as juntas soldadas mostraram valores de resistência ao cisalhamento superiores ao processo convencional de Soldagem por Resistência por Ponto, que é o processo mais utilizado no setor automotivo. Foram encontrados quatro diferentes modos de fratura nos ensaios estáticos, e todos podem ser associados às características e aos defeitos encontrados nas juntas.

Nos ensaios de fadiga, testes com baixo número de ciclos (em altas cargas) levam a deformação plástica (modo de falha com nugget extraído), enquanto testes com alto número de ciclos (baixa carga) levam a uma fratura sem deformação plástica, com trinca circunferencial em torno da lente de soldagem e posterior trinca no material de base, e testes com número de ciclos e carga intermediários, levam a uma fratura mista entre os dois acima descritos. Após 54 milhões de ciclos sem trincas, foi encontrado o limite de resistência a fadiga, com 9,8 MPa de tensão média de fadiga.

Assim sendo, as soldas a partir do novo processo de soldagem por fricção SFP da liga Al6181-T4 foram realizadas com sucesso. As juntas sobrepostas foram testadas criteriosamente, e a análise dos resultados permite afirmar a repetibilidade e conseqüentemente aplicabilidade do processo. A resistência mecânica das juntas atinge as especificações ao se comparar com o processo convencional, e as variáveis do processo foram mapeadas e controladas.

6 INVESTIGAÇÕES FUTURAS

Para uma investigação completa do processo de Soldagem por Fricção por Ponto, mostra-se necessário:

- a análise da geometria da ferramenta no processo, relacionando esta variável na concentração de tensão das juntas;
- a análise em microscópio eletrônico de transmissão, a fim de analisar mais detalhadamente a influência dos precipitados na microestrutura e correlacionar com os resultados dos ensaios de microdureza;
- o mapeamento e a análise das temperaturas da lente de soldagem durante o processo; e
- o uso de espessuras variadas de chapas a serem soldadas.

Para tais investigações, sugere-se o uso de ferramentas estatísticas, para que se evite retrabalho ou o acúmulo de variáveis e amostras.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ABAL - Associação Brasileira do Alumínio. Boletim eletrônico. 12ª Edição. Disponível em: www.abal.org.br. Acessado em: março 2011.

[2] Relatório de Sustentabilidade Indústria Brasileira do Alumínio – 2010 ABAL – pg 19-20.

[3] MATSUMOTO, K.; SASABE, S. Lap joints of aluminium alloys by friction stir welding. Kobe Steel Ltda. Aluminium and Copper Company. Japan.2004.

[4] VARIS J.: Economics of Clinched Joint Compared to Riveted Joint and Example of Applying Calculations to a Volume Product. Journal of Materials Science and Technology 172 (2006) p130-138.

[5] AUTOMOTIVE BUSINESS. Disputa entre aço e alumínio: A reação do aço leve no automóvel. Automotive Business, São Paulo, v. 1, n. 3, p. 66-70, Maio 2010

[6] MUNHOZ JR, D.; GREGOLIN, J. A. R.; et al. Automotive Materials: current status, technology trends and challenges. p.1-13 Society of Automotive Engineers, 2007.

[7] International Organization of Motor Vehicles Manufactures: World Motor Vehicle Production by Country. Disponível em: <http://oica.net/category/production-statistics/>. Acessado em: Outubro de 2010.

[8] SHEIKHI S. and DOS SANTOS J. F. Effect of process parameter on mechanical properties of friction stir welded tailored blanks from aluminum alloy 6181-T4, Science and Technology of Welding and Joining, Vol.12, pp.370s. pp.375s, 2007

[9] ROSENDO T., TIER M., MAZZAFERRO J., RAMOS F., ISAKOVIC J., BEYER M., DOS SANTOS J., STROHAECKER, T. Investigation of Friction Spot Welding of AA6181-T4 Alloy, Article in Author's Possession, 2008

[10] ADDISON, A.C., ROBELOU, A. J. Friction Spot Welding: Principal parameters and their effects, TWI Ltd, Granta Park, Great Abington, Cambridgeshire, CBI 6AL. UK

[11] THOMAS W.M., NICHOLAS E.D., NEEDHAM J.D., MURCH M.G., TEMPLESMITH P., DAWS C.J. GB Patent Application 9125978.8 Dec. 1991; US Patent Application 5460317 Oct. 1995.

[12] MISHRA R.S., MA Z.Y., Friction Stir Welding and Processing, Materials Science and Engineering R 50 (2005) p 1- 78.

[13] HAN L., YOUNG K.W., CHRYSANTOU A., O'SULLIVAN J.M.: The Effect of Pre-Straining on the Mechanical Behaviour of SPR Aluminium Alloy Sheets. Materials and Design 27 (2006) p 1108-1113.

[14] YANG Y.S., LEE S.H.: A Study on the Joining Strength of Laser Spot Welding for Automotive Applications. Journal of Materials Science and Technology 94 (1999) p 151-156.

[15] ZHOU Y., FUKOMOTO S., PENG J., Ji C., BROWN L.: Experimental Simulation of Surface Pitting of Degraded Electrodes in RSW of Aluminium Alloys. Materials Science and Technology 20 (2004) p 1226-1232.

[16] HANCOCK R., Friction Welding of Aluminum Cuts Energy costs by 99%, Welding Journal 83(2) (2004) p 40.

[17] Mazda media release. Mazda Develops World's First Aluminum Joining Technology Using Friction Heat. February 27, 2003.

[18] Mazda media release. Mazda Develops World's First Steel and Aluminum Joining Technology Using Friction heat. June 2, 2005.

[19] ZHOU Y., FUKOMOTO S., PENG J., Ji C., BROWN L.: Experimental Simulation of Surface Pitting of Degraded Electrodes in RSW of Aluminium Alloys. Materials Science and Technology 20 (2004) p1226-1232.

[20] THORNTON, P., KRAUSE, A. and DAVIS, R. Aluminum Spot Weld, Welding journal, Vol. 75, pp. 101s-108s., 1996

[21] GEAN, A., WESTGATE, S. A., KUCZA, J. C. and EHRSTORM, J. C. Static and Fatigue Behavior of Spot Welded 5182-0 Aluminum Alloy Sheet, Welding Journal, Vol. 78, pp. 80s-86s., 1999

[22] SAKANO, MURAKAMI, R., YAHASHITA, K., HYOE, T., FUJIMOTO, M., INUZUKA, M., NAKAO, Y. and KASHIKI, H. Development of Spot FSW Robot System for Automobile Body Member, Proceedings of the 3rd International Symposium of Friction Stir Welding, Kobe, Japan, 2001

[23] IWASHITA, T. Method and apparatus for joining, US Patent 6601751 B2, august, 5, 2003.

[24] LIN, P. C., LIN, S. H. and PAN, J. Microstructure and Failure Mechanisms of Spot Friction Welds in Lap-Shear Specimens of Aluminum 6111-T4 Sheets, 2004-01-1330

[25] KALAGARA S., MUCI-KUCHLER, K.H. Numerical Simulation of a Refill Friction Stir Spot Welding Process, Friction Stir Welding and Processing IV, The Minerals, Metals & Materials Society, 2007

[26] PAN, T., ZHU, W., SCHWARZ, W., Spot Friction Welding for aluminum sheets. Proceedings of the 2005 International Automotive Body Congress. Vol 2, pp 95-99, Ann Arbor, Michigan, September 20-21, 2005.

[27] PAN, T. et. al. A Feasibility Study on Spot Friction Welding of Magnesium Alloy AZ31. Proceedings of the 63rd Annual World Magnesium Conference, Beijing, China, May 21-24, 2006

[28] SAKANO, R. et. al. Development of Spot FSW Robot System for Automobile Body Members. 3rd International Friction Stir Welding Symposium, Port Island, Kobe, Japan, September 27-28, 2001.

[29] OKAMOTO, K., HUNT, F., HIRANO, S. Development of Friction Stir Welding Technique and Machine for Aluminum Sheet Metal Assembly. SAE International 2005.

[30] SCHILLING, C., DOS SANTOS, J.F. Verfahren und Vorrichtung zum Verbinden von wenigstens zwei aneinanderliegenden Werkstücken nach der Methode des Reibschweissens. Patent Application Amtl. Az. 199 55737.3 (1999).

[31] SCHILLING, C., DOS SANTOS, J.F. Method and Device for Linking at Least Two Adjoining Work Pieces by Friction Welding. International Patent Publication WO/2001/036144. 25th May 2005.

[32] ROSENDO, T. et. Al. Friction spot welding of AA2024 T3 aluminum alloy a feasibility study, Euromat 2007, Nuremberg, 10th – 13th September 2007.

[33] SILVA, A. et. al. Friction based spot welding processes – Literature Review, Welding and Material Testing, ISSN 1453-0392, 2007.

[34] DA SILVA, A.A.M., TIER, M.A.D., ROSENDO, T., RAMOS, F.D., BEYER, M., STROHAECKER, T.R., DOS SANTOS, J.F.. Preliminary Investigations on Microstructural Features and Mechanical Performance of Friction Spot Welding of Aluminum Alloys. IIW International Seminar on Friction based Spot Welding Processes. March 29-30 2007, Geesthacht, Germany.

[35] ARBEGAST, W.J. et. al. An Investigation of Friction Spot Welding of Thin Aluminum Sheets. In: Proceedings of the 15th AEROMAT Advanced Aerospace Materials and Processes Conference and Exposition, June 7-10 2004, Seattle, USA.

[36] SCHILLING, C., STROMBECK, A. V., DOS SANTOS, J.F. Friction Spot Welding – New Joining Process for Spot Connections. GKSS Internal Report, 2001.

[37] ALLEN, C.D. Static and Strength of Refill Friction Spot Welds. In: Proceedings of the 16th AEROMAT Advanced Aerospace Materials and Processes Conference and Exposition, June 6-9 2005, Orlando, USA.

[38] ALLEN, C.D., ARBEGAST, W.J. Evaluation of Friction Spot Welds in Aluminum Alloys. SAE Technical Paper 2005-01-1252, Warrendale, USA. SAE International.

[39] ARBEGAST, W. J. Refill Friction Stir Spot Welding of Aluminum Alloys. IIW International Seminar on Friction based Spot Welding Processes. March 29-30 2007, Geesthacht, Germany.

[40] PATNAIK, K. Koch, ARBEGAST, W., ALLEN, C. Static Properties of Refill Friction Spot Welded Skin Stiffened Compression Panels. SAE Technical Paper 2006-01-0967, Warrendale, USA. SAE International.

[41] ITAPU, S.K., MUCI-KUCHLER, K.H. Visualization of Material Flow in the Refill Friction Stir Spot Welding Process. SAE Technical Paper 2006-01-1206, Warrendale, USA. SAE International.

[42] DA SILVA, A.A.M. et al. Friction Spot and Friction Stir Spot Welding Processes – A Literature Review. In The Bulletin of National R&D Institute for Welding and Material Testing. 2007. Timișoara: ISIM. p. 36-44.

[43] DIN EN ISO 14273:2002-03. *Specimens Dimensions and Procedure for Shear Testing Resistance Spot, Seam and Embossed Projection Welds.*

[44] ASTM E 112-96, 2000, *Standard Test Method for Determining Average Grain Size*, Annual Book of ASTM Standards Vol 03.03, pp. 240-263.