

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGE3M

ANÁLISE MICROESTRUTURAL E AVALIAÇÃO MECÂNICA DE
JUNTAS SOLDADAS POR FRICÇÃO E MISTURA MECÂNICA (FSW) DA
LIGA DE ALUMÍNIO 5182-O

Diego Tolotti de Almeida

Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre
2015

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia - PPGE3M

Diego Tolotti De Almeida

ANÁLISE MICROESTRUTURAL E AVALIAÇÃO MECÂNICA DE
JUNTAS SOLDADAS POR FRICÇÃO E MISTURA MECÂNICA (FSW) DA
LIGA DE ALUMÍNIO 5182-O

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, modalidade acadêmica.

Orientador: Prof. Dr. Thomas G. R. Clarke

Co-orientador: Prof. Dr. João Henrique Corrêa de Souza

Porto Alegre

2015

DIEGO TOLOTTI DE ALMEIDA

**ANÁLISE MICROESTRUTURAL E AVALIAÇÃO MECÂNICA DE
JUNTAS SOLDADAS POR FRICÇÃO E MISTURA MECÂNICA (FSW) DA
LIGA DE ALUMÍNIO 5182-O**

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Ciência e Tecnologia dos Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Thomas G. R. Clarke, Dr. Eng - Orientador

João Henrique Correa de Souza, Dr. Eng. – Co-orientador

Banca Examinadora:

Dr. Telmo Roberto Strohaecker, PPGE3M/UFRGS

Dr. Afonso Reguly, PPGE3M/UFRGS

Dr. Jorge Fernandez dos Santos – HZG (Geesthacht – Alemanha)

Prof. Dr. Carlos P. Bergmann

Coordenador do PPGE3M

AGRADECIMENTOS

Sou muito grato, primeiramente, à empresa Bruning Tecnometal LTDA por conceder-me a oportunidade de realizar este trabalho;

À toda minha família e amigos, pela paciência, apoio e compreensão em todos os momentos;

À empresa Novelis por possibilitar a realização dos ensaios metalográficos, em especial ao Felipe Pereira;

Ao meu orientador, Prof. Dr. Thomas Clarke, pela oportunidade concedida de poder fazer este trabalho e importante participação;

Ao meu co-orientador, Prof. Dr. João Henrique Corrêa de Souza, pelo apoio e orientação para realização deste trabalho.

Aos colegas da programação de Usinagem da Bruning, Alcione Zamberlan, Jorge Prado e Itamar Pautz, pelas contribuições e companheirismo.

Aos amigos e colegas de trabalho Jonathan Drunn e Augusto César dos Santos pelo auxílio fundamental na confecção dos corpos de prova, pelo companheirismo e momentos de alegria.

MUITO OBRIGADO!

DEDICATÓRIA

A minha família, especialmente aos meus amados pais, Jorge Osmar e Maria Solange, pelo amor, dedicação e constante apoio para seguir em busca de meus objetivos.

Amo vocês!

RESUMO

A procura cada vez mais intensa por redução de peso e conseqüente diminuição do consumo de combustível dos veículos automotores e aeronaves, tem proporcionado um crescimento constante na utilização do alumínio e suas ligas nos diversos setores da indústria de manufatura. No entanto, a dificuldade de união em juntas de alumínio que atendam requisitos de alta resistência à fratura e à fadiga, tem intensificado as pesquisas por novas tecnologias em seu processo de soldagem. Neste contexto, o processo de soldagem denominado *Friction Stir Welding* (FSW), vem ganhando espaço nas pesquisas e também na indústria. Neste processo, uma ferramenta não consumível é projetada especialmente para ser introduzida nas juntas das chapas a serem soldadas, gerando calor e misturando mecanicamente o material da junta, consolidando a solda. Este trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos dos parâmetros de soldagem FSW, na consolidação das propriedades mecânicas das soldas produzidas, na microestrutura, além de buscar a otimização do processo para a liga em estudo. Para tanto, a geometria da ferramenta foi projetada, fabricada e testada, de forma a definir os parâmetros ideais para obtenção de juntas soldadas sem defeitos. Uma máquina fresadora CNC foi utilizada para a execução dos testes. As soldas foram produzidas em chapas de alumínio da liga Al 5182-O com espessura de 3,25mm, com velocidade rotacional da ferramenta mantida constante em 500 rpm e velocidades de soldagem de 50, 100, 150, 200 e 250 mm/min. A ferramenta foi inclinada em um ângulo de 1°, todas as soldas foram realizadas com sentido horário de rotação, após a realização dos testes as juntas soldadas foram submetidas a uma série de ensaios destrutivos e não destrutivos caracterizando cada teste realizado. Juntas de topo com penetração completa e livre de defeitos foram produzidas com velocidades de soldagem de 100, 150, 200 e 250 mm/min, enquanto com a velocidade de soldagem de 50 mm/min resultou em defeito do tipo vazio na zona da mistura no lado do avanço, defeito este caracterizado através de inspeção por microtomografia, o que fez com que as soldas produzidas com esta velocidade de soldagem rompessem na junta soldada. Em todas as velocidades de soldagem a caracterização através de microscopia óptica na seção transversal das soldas revelou um refino microestrutural, obtido pelo fenômeno de recristalização dinâmica, que resultou em um aumento nos valores de dureza na zona da mistura. Os resultados obtidos demonstram que soldas de boa qualidade podem ser produzidas com este processo. Além disso, foi estabelecida uma correlação entre a história térmica

associada ao processo de FSW, a microestrutura produzida e o desempenho mecânico das juntas soldadas.

Palavras chaves: Parâmetros de solda, soldagem por fricção (FSW), soldagem no estado sólido, aporte térmico, liga Al 5182-O.

ABSTRACT

The increasingly intense demand for weight reduction and consequent reduction of the fuel consumption of motor vehicles and aircraft, has provided a steady growth in the use of aluminum and its alloys in various sectors of the manufacturing industry, but the difficulty in joining together aluminum that meet high fracture resistance and fatigue, has intensified the research for new technologies in the process of welding. In this context, the welding process called Friction Stir Welding (FSW) has been gaining ground in research and also in industry. In this process, non-consumable tool is specially designed to be inserted in the joints of the plates to be welded, generating heat and mechanically mixing the gasket material, consolidating the weld. This study aimed to evaluate the effects of welding parameters FSW, the consolidation of the mechanical properties of the welds produced, microstructure, and seek to optimize the process for the alloy under study. For this, the geometry of the tool is designed, manufactured and tested in order to define the optimal parameters for obtaining welded joints without defects. A milling machine CNC was used for the tests. The welds were produced in sheets of aluminum alloy Al 5182-O with a thickness of 3,25mm with rotational speed of the tool maintained constant at 500 rpm and welding speeds of 50, 100, 150, 200 and 250 mm / min, the tool was tilted at an angle of 1° , all welds were performed with clockwise direction of rotation, after the tests the welded joints were subjected to a series of destructive testing and nondestructive characterizing each test performed. Butt welding with full penetration and free defects were produced with welding speeds of 100, 150, 200 and 250 mm / min, while with the welding speed 50 mm / min resulted in failure of the void type in the zone of the mixture side of the advance, this defect characterized by inspection by microtomography, which has meant that the welds produced with this welding speed would break the joint weld. In all welding speeds characterization by optical microscopy in cross section of welds revealed a microstructure refining, obtained by dynamic recrystallization phenomenon, for which resulted in an increase in the hardness values in the mixing zone. The results demonstrate that good quality welds can be produced with this process. Moreover, a correlation between the thermal history associated with the process produced the microstructure and mechanical performance of welded joints was established.

Keywords: Parameters for welding, friction stir welding (FSW), welding a solid, heat input, alloy Al 5182-O.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	16
1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
1.1. ALUMÍNIO E SUAS LIGAS: PROPRIEDADES E APLICAÇÕES	19
1.1.1. DESIGNAÇÃO E NOMENCLATURA DAS LIGAS DE ALUMÍNIO	21
1.1.2. SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO DE TÊMPERAS	23
1.1.3. LIGAS DE ALUMÍNIO-MAGNÉSIO	26
1.2. PROPRIEDADE QUE INFLUENCIAM NA SOLDAGEM DO ALUMÍNIO E SUAS LIGAS.	27
1.2.1. SOLDABILIDADE DAS LIGAS DE ALUMÍNIO	29
1.2.2. SOLDABILIDADE DAS LIGAS DE ALUMÍNIO DA SÉRIE 5XXX	31
1.3. SOLDAGEM POR FRICÇÃO E MISTURA MECÂNICA – FRICTION STIR WELDING	32
1.3.1. FUNDAMENTOS DO PROCESSO FSW	34
1.3.2. CARACTERÍSTICAS MICROESTRUTURAIS DO PROCESSO DE SOLDA FSW	38
1.3.3. VARIÁVEIS DO PROCESSO FSW	40
1.3.4. GEOMETRIA DA FERRAMENTA	41
1.3.5. APORTE TÉRMICO NA SOLDAGEM POR FSW	45
1.3.6. CONFIGURAÇÃO DAS JUNTAS PARA O PROCESSO DE FSW	46
1.3.7. PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS JUNTAS PROCESSADAS POR FSW.....	48
1.3.8. FLUXO DE MATERIAL E ASSIMETRIAS DO PROCESSO	51
1.3.9. EQUIPAMENTOS PARA SOLDAGEM FSW	52
1.3.10. DEFEITOS NA SOLDAGEM POR FSW.....	56
1.4. VANTAGENS E DESVANTAGENS DO PROCESSO FSW	59
1.5. APLICAÇÕES DO PROCESSO DE FSW.....	60
2. OBJETIVOS E METODOLOGIA	63
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	64
3.1. MATERIAIS	65
3.1.1. METAL BASE	65
3.1.2. PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA SOLDAGEM FSW	66
3.1.3. FERRAMENTA DE SOLDAGEM FSW.....	67

3.2.	EQUIPAMENTOS	69
3.2.1.	MÁQUINA ADAPTADA PARA SOLDAGEM FSW	69
3.2.2.	BASE DE SOLDAGEM FSW	70
3.3.	PARÂMETROS EXPERIMENTAIS	71
3.3.1.	INFORMAÇÕES BÁSICAS	71
3.4.	MÉTODOS DE DESENVOLVIMENTO DOS EXPERIMENTOS	72
3.5.	MODOS DE AVALIAÇÃO DAS SOLDAGENS	72
3.5.1.	PLANO DE CORTE DAS AMOSTRAS	73
3.5.2.	CARACTERIZAÇÃO MACROESTRUTURAL	74
3.5.3.	CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL.....	74
3.5.4.	ENSAIO DE MICROTOMOGRAFIA DE RAIOS X.....	75
3.5.5.	AVALIAÇÃO DE MICRODUREZA	76
3.5.6.	ENSAIO DE TRAÇÃO	77
3.5.7.	ENSAIO DE DOBRAMENTO.....	78
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	80
4.1.	CARACTERIZAÇÃO DO METAL BASE.....	80
4.2.	SOLDAGEM PROCESSO FSW	81
4.2.1.	TESTES PRELIMINARES – PARÂMETROS E DOMÍNIO DE SOLDAGEM	81
4.3.	PARÂMETROS FIXOS PARA SOLDAGEM FSW.....	82
4.3.1.	APORTE TÉRMICO.....	82
4.3.2.	INSPEÇÃO VISUAL DAS SOLDAS FSW	85
4.3.3.	DETECÇÃO DE DEFEITOS E CARACTERIZAÇÃO DA SOLDA.....	87
4.3.4.	MICROGRAFIA.....	89
4.3.5.	ENSAIO DE MICROTOMOGRAFIA DE RAIOS X.....	94
4.3.6.	PERFIL DE MICRODUREZA VICKERS.....	96
4.3.7.	ENSAIO DE TRAÇÃO	98
4.3.8.	ENSAIO DE DOBRAMENTO.....	102
	CONCLUSÕES.....	104
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	106
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	107
	ANEXO I – TABELA RESULTADOS TESTES PRELIMINARES.....	116

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Conteúdo de alumínio nos veículos – porcentagem por peso	16
Figura 2 – Aplicação do alumínio na nova Ford F-150, modelo 2016.....	17
Figura 3 – Participação dos Principais Segmentos Consumidores no Brasil em 2013	19
Figura 4 – Fluxograma de Produção do Alumínio	20
Figura 5 – Diagrama de fases Al-Mg	26
Figura 6 – Solubilidade do Hidrogênio no Alumínio.....	28
Figura 7 – Soldabilidade das várias ligas de alumínio	30
Figura 8 – Desenho Sistemático do Processo de Soldagem FSW – “Friction Stir Welding” ..	33
Figura 9 – Etapas do Processo de Soldagem FSW, onde: 01 – aproximação e imersão da ferramenta, 02 – tempo de permanência para aquecimento, 03 – soldagem, 04 – retirada da ferramenta e fim da junta.	35
Figura 10 – Diagrama esquemático da microestrutura das soldagens FSW em alumínio	38
Figura 11 – Esquema da evolução microestrutural nas diferentes zonas processadas por FSW.	39
Figura 12 – Desenho esquemático da vista lateral da ferramenta e do material durante o processo de soldagem por FSW	41
Figura 13 – Exemplificação das ferramentas, ombro e pino em detalhes.	42
Figura 14 – Imagem das ferramentas Whorl™ e MX Triflute™ desenvolvidas no TWI.....	43
Figura 15 – Configuração de juntas para o processo de FSW: (a) junta topo, (b) topo em L, (c) topo em T, (d) duplo topo para chapas de grande espessura, (e) Circunferencial de topo em tubos, (f) sobreposição em T, (g) múltipla sobreposição, (h) sobreposição em T e (i) junta filete	47
Figura 16 – Perfil de dureza da junta soldada por FSW – Liga Al 5052.....	49
Figura 17 – Fotografia da superfície de uma solda FSW que dá indicações da assimetria do processo	51
Figura 18 – Imagem da tomografia computadorizada do fluxo de material na soldagem FSW	52
Figura 19 – Equipamento de FSW no conceito de pórtico.....	53
Figura 20 – Equipamento de FSW com viga principal na posição vertical.	54
Figura 21 – Equipamento de FSW tipo robô.....	54
Figura 22 – Equipamento de FSW com 5 graus de liberdade.	55
Figura 23 – Defeitos do tipo vazio, totalmente interno	57
Figura 24 – Defeitos do tipo vazio, aparente a superfície da solda.....	57
Figura 25 – Defeitos de raiz, remanescente da linha de interface das peças na base da solda.	58
Figura 26 – Defeito de superfície, excesso de rebarbas principalmente no lado do recuo.....	59
Figura 27 – Comparação entre o sub-conjunto do Honda Accord 2008 e Accord 2013, este último utilizando o processo de FSW.	61
Figura 28 – Painéis fornecidos pela SAPA, detalhes do processo de união por FSW.....	61
Figura 29 – Painel integral da fuselagem da aeronave Eclipse 500.	62
Figura 30 – Equipamento de FSW utilizado nos tanques de combustíveis do ônibus espacial.	62
Figura 31 – Fluxograma das etapas envolvidas no procedimento experimental.....	64
Figura 32 – Corpo de prova utilizado no processo FSW.....	67
Figura 33 – Ferramenta para soldagem FSW e detalhes do ombro e pino.....	67
Figura 34 – Desenho esquemático da ferramenta para processo de FSW.....	68

Figura 35 – Máquina Multitarefa INT_J200, utilizada para usinagem das ferramentas.	68
Figura 36 – Máquina fresadora CNC Integrex e1060V.	69
Figura 37 – Dispositivo montado na mesa da máquina Integrex e1060V.	71
Figura 38 – Representação esquemática do posicionamento dos corpos de prova na chapa base	73
Figura 39 – Representação esquemática da seção transversal das amostras utilizadas para análises microestruturais.	74
Figura 40 – Microtomógrafo, utilizado para realização dos ensaios de microtomografia de Raios X.	75
Figura 41 – Representação esquemática da seção transversal das amostras utilizadas para análises de microdureza.	76
Figura 42 – Microdurômetro Emcotest DuraScan, utilizado para realização dos perfis de dureza.	76
Figura 43 – Dimensão dos corpos de prova soldados para ensaio de tração.	77
Figura 44 – Dimensão dos corpos de prova material base para ensaio de tração.	77
Figura 45 – Máquina universal de ensaios, utilizada para ensaio de tração.	78
Figura 46 – Detalhe da configuração do ensaio de dobramento de raiz.	79
Figura 47 – Influência da relação T/v no valor resultante do aporte térmico.	84
Figura 48 – Vista de topo de trechos centrais das soldas	85
Figura 49 – Vista de topo – Largura da junta soldada.	86
Figura 50 – Macrografias da seção transversal das juntas soldadas com diferentes velocidades de soldagem.	87
Figura 51 – Micrografia do metal de base.	89
Figura 52 – Micrografias da junta solda obtida com diferentes velocidades de avanço, sendo destacada a ZM e a transição entre a ZM-ZTMA no lado do avanço e recuo.	90
Figura 53 – Micrografias da junta solda obtida com 50mm/min, onde: a) ZM, b) transição entre a ZM-ZTMA (LR), c) transição entre ZM-ZTMA (LA).	90
Figura 54 – Micrografias da junta solda obtida com 100mm/min, onde: a) ZM, b) transição entre a ZM-ZTMA (LR), c) transição entre ZM-ZTMA (LA).	91
Figura 55 – Micrografias da junta solda obtida com 150mm/min, onde: a) ZM, b) transição entre a ZM-ZTMA (LR), c) transição entre ZM-ZTMA (LA).	92
Figura 56 – Micrografias da junta solda obtida com 200mm/min, onde: a) ZM, b) transição entre a ZM-ZTMA (LR), c) transição entre ZM-ZTMA (LA).	92
Figura 57 – Micrografias da junta solda obtida com 250mm/min, onde: a) ZM, b) transição entre a ZM-ZTMA (LR), c) transição entre ZM-ZTMA (LA).	93
Figura 58 – Microtomografia da amostra com velocidade de soldagem de 50mm/min.	94
Figura 59 – Microtomografia da amostra com velocidade de soldagem entre 100 e 250mm/min.	95
Figura 60 – Perfil de microdureza Vickers em amostras produzidas com velocidades de soldagem entre 50 e 250 mm/min.	97
Figura 61 – Imagens do ensaio de tração do material de base e juntas soldadas com diferentes velocidades de soldagem.	100
Figura 62 – Dobramento de face em amostras produzidas pelo processo de FSW.	102
Figura 63 – Dobramento de raiz em amostras produzidas pelo processo de FSW.	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais elementos de liga das séries de alumínio.....	21
Tabela 2 – Designação do tratamento térmico para as ligas de alumínio	24
Tabela 3 – Designação do tratamento térmico H (endurecido por deformação).....	24
Tabela 4 – Designação do tratamento térmico T (solubilização)	25
Tabela 5 – Benefícios da Soldagem por Fricção	34
Tabela 6 – Condições de soldagem em função da velocidade de avanço e velocidade de rotação.....	46
Tabela 7 – Propriedades mecânicas de amostras de alumínio soldadas por FSW	50
Tabela 8 – Vantagens e Desvantagens do Processo por FSW.....	60
Tabela 9 – Composição química e propriedades mecânicas da liga Al 5182-O	66
Tabela 10 – Parâmetros utilizados no processo de soldagem por FSW.....	72
Tabela 11 – Resultados dos ensaios mecânicos da liga Al 5182-O	80
Tabela 12 – Resultados da composição química da liga Al 5182-O.....	81
Tabela 13 – Média dos parâmetros de soldagem aplicados no processo FSW da liga de alumínio 5182-O, com seus respectivos torques e aportes térmicos resultantes.	83
Tabela 14 – Ensaio de Tração – Média, desvios padrões das juntas soldadas	99
Tabela 15 – Resultados da eficiência da junta soldada no ensaio de tração.....	99
Tabela 16 – Ângulos de dobramento das amostras para cada velocidade de soldagem.....	103

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA	– Aluminium Association
ASME	– American Society of Mechanical Engineers
ASTM	– ASTM International, originalmente conhecida como American Society for Testing and Materials
ABNT	– Associação Brasileira de Normas Técnicas
FSW	– Friction Stir Welding
GMAW	– Gas Metal Arc Welding
HV	– Hardness Vickers (Dureza Vickers)
ISO	– International Organization for Standardization
LA	– Lado do avanço
LR	– Lado do retrocesso
MB	– Material de Base
MIG	– Metal Inert Gas
mm	– milímetros
MPa	– Megapascal ou 10^6 Pascal
NBR	– Norma Brasileira
PCBN	– Polycrystalline Cubic Boron Nitride
Pv	– Pressão de vapor
rpm	– rotações por minuto
T	– Torque
TIG	– Tungsten Inert Gas
TWI	– The Welding Institute (Instituto de Soldagem, Inglaterra)
v	– velocidade de soldagem
ω	– Velocidade rotacional da ferramenta
ZAC	– Zona Afetada pelo Calor
ZTA	– Zona Termicamente Afetada
ZTMA	– Zona Termo-Mecanicamente Afetada

INTRODUÇÃO

A utilização do alumínio e suas ligas têm crescido constantemente nos diversos setores da indústria de manufatura, devido às características apresentadas por este metal. Desta forma, o baixo peso específico, aliado à alta resistência mecânica de algumas ligas, faz com que o alumínio seja a primeira escolha em termos de material para atender às exigências de determinadas aplicações.

Uma pesquisa recente apresenta que a indústria mundial de automóveis vem utilizando cada vez mais o alumínio em seus veículos, e estima-se que em 2020 a previsão da utilização do alumínio nos veículos seja de 170,6kg por veículos, o que representa mais de 10% do peso do veículo, conforme pode ser visualizado na Figura 1.

Figura 1 – Conteúdo de alumínio nos veículos – porcentagem por peso



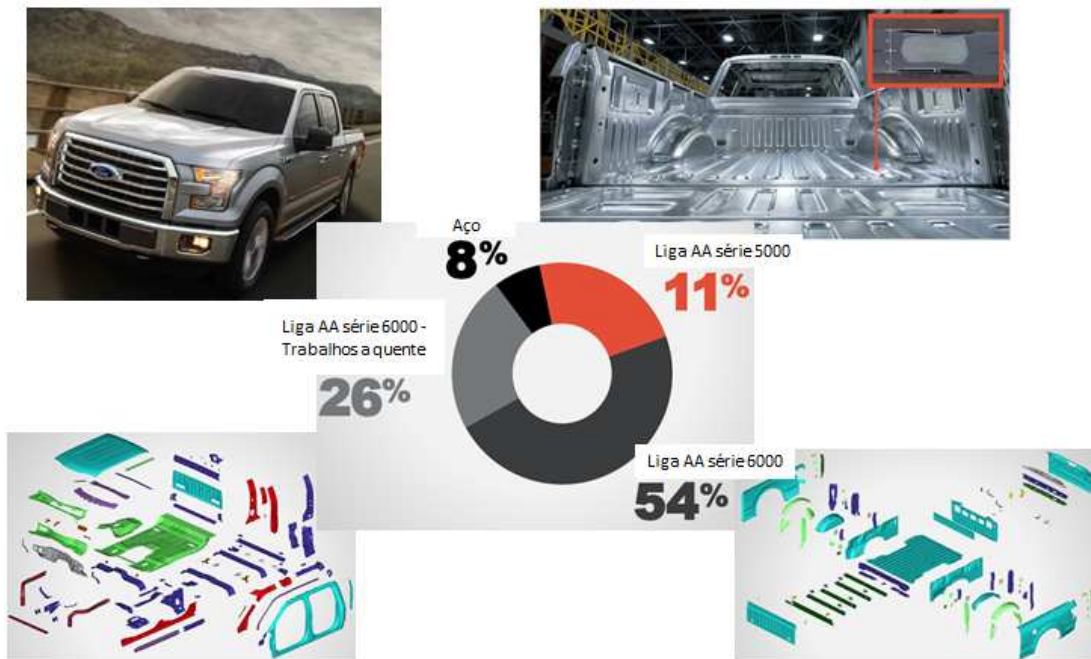
Fonte: Adaptado de Filleti, A., 2010

Com relação à autonomia, a substituição de componentes de aço por componentes de alumínio e aços de alta resistência (HSS e AHSS) é uma tendência que pode ser observada nos veículos automotores hoje em dia, podemos citar: motores com blocos de alumínio, parte da carroceria, radiadores, rodas e protótipos de escapamentos. Deve-se considerar, também o fato desse material ser altamente (90%) reciclável (ABAL, 2015).

Segundo Marconato (2009), dois milhões de toneladas de componentes de alumínio foram usados nos carros que entraram em circulação na Europa no ano de 2005. Com isso, a economia de peso atingida permitirá uma economia anual de combustível de um bilhão de litros e evitará a emissão de cerca de 40 milhões de toneladas de CO₂ durante a vida útil dos veículos.

Foi neste contexto que em um dos maiores eventos internacionais de veículos, o Euro Car Body, realizado em outubro de 2015, na cidade de Bad Nauheim – Alemanha, foi apresentada a nova Ford F-150, modelo 2016. Veículo de transporte de cargas para trabalhos pesados mais vendido nos Estados Unidos, que utiliza 92% de alumínio. Detalhes da aplicação do alumínio da F-150 podem ser visualizados na Figura 2.

Figura 2 – Aplicação do alumínio na nova Ford F-150, modelo 2016



Fonte: Adaptado de Euro Car Body, 2015

Com o aumento da utilização das ligas de alumínio na indústria automotiva, surge a necessidade do desenvolvimento de processos de soldagem, uma vez que, devido às características inerentes do próprio material, há certas limitações na utilização dos processos convencionais de soldagem, que envolvem fusão do metal, como por exemplo, o processo MIG e TIG. Neste sentido a soldagem por fricção e mistura mecânica (FSW – Friction Stir Welding), tem seu uso intensificado, por se tratar de um processo de soldagem em estado sólido. Esta técnica de soldagem é eficientemente energética e favorável ao meio ambiente, pois não gera gases nocivos, como os processos convencionais de soldagem (MISHRA *et al.*, 2005). Outro grande aspecto importante da soldagem FSW é que para sua realização não é necessário nenhum material de adição, conseqüentemente toda a liga de alumínio pode ser unida sem a preocupação com a compatibilidade de sua composição, que é uma grande preocupação com a solda por fusão (MISHRA *et al.*, 2005).

Embora a técnica tenha merecido destaque, sendo considerado um dos mais importantes desenvolvimentos de junção de metais dos últimos anos, sendo objeto de estudo em diversos centros de pesquisas tecnológicas e universidades no exterior, poucos estudos nas universidades brasileiras tem se proposto a investigar o mesmo. Um dos motivos para isto certamente reside na necessidade de um alto investimento para a obtenção dos equipamentos específicos para soldagem FSW.

Diante do exposto, esse trabalho teve como objetivo fornecer informações técnicas e resultados referentes ao comportamento mecânico e metalúrgico sobre a aplicação do processo de soldagem por fricção FSW, para a liga de alumínio 5182-O com 3,25mm de espessura. Essa liga da série 5xxx possui como principal elemento o magnésio, sendo considerada de boa soldabilidade e com destacada resistência à corrosão (principalmente em atmosfera salina), esta série encontra aplicação em diferentes setores. A gama de produtos varia desde navios e embarcações, tanques criogênicos e latas, até estruturas automotivas (ABNT NBR 6835, 2006).

Desta forma, foram produzidas juntas soldadas de topo, mantendo a velocidade rotacional constante e variando a velocidade de avanço, obtendo assim, diferentes aportes térmicos e conseqüentemente diferentes propriedades mecânicas e metalúrgicas. Com isso, existe um grande interesse no desenvolvimento do processo, na análise das modificações microestruturais e das propriedades mecânicas do material após a soldagem por fricção.

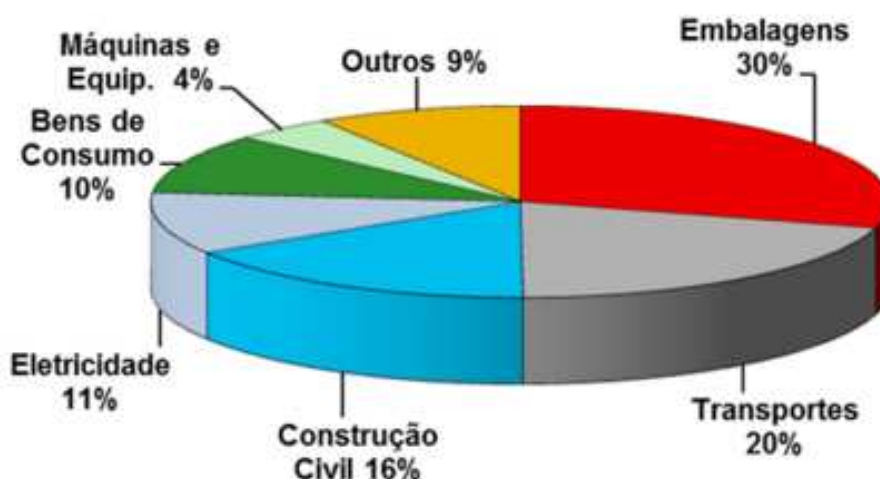
1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1. Alumínio e suas Ligas: Propriedades e Aplicações

Apesar de ser o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre, atrás somente do oxigênio e o silício, constituindo 7,3% da sua massa, o alumínio é o metal mais recente usado em escala industrial (ABAL, 2015). Devido a suas propriedades, como excelente resistência à corrosão, baixa densidade, elevada condutividade térmica e elétrica, além da facilidade de processamento através de diversos métodos de fabricação fazem com que ele ocupe posição de destaque na indústria automotiva, aeroespacial, em uso estrutural e também de decoração.

Na indústria automotiva o alumínio está sendo cada vez mais procurado, devido à resistência mecânica de algumas ligas de alumínio, em certos casos superiores à de alguns aços com baixo teor de Carbono, aliada à excelente resistência à corrosão e boa durabilidade devido à camada de óxidos que forma, além de um peso específico de $2,7\text{g/cm}^3$ (equivalente à 1/3 do peso específico do aço), fazem com que estas ligas apresentem-se como uma alternativa na substituição de componentes ou partes estruturais, visando a redução de peso e o consequente aumento de carga útil nos veículos automotores e de carga. Tais características tornam as ligas de alumínio um material atraente aos mais diversos segmentos industriais, com destaque ao setor de transporte, mundialmente o maior consumidor dentre os demais (DAVIS, 1990). No Brasil, o setor de embalagens lidera o consumo, e em segundo lugar vem a indústria automotiva com o setor de transportes, detalhes podem ser visto na 3.

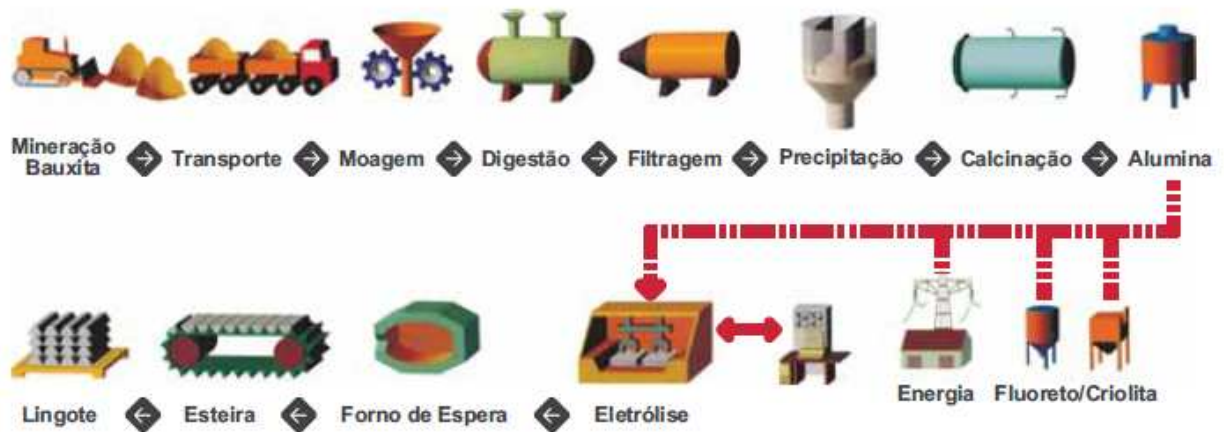
Figura 3 – Participação dos Principais Segmentos Consumidores no Brasil em 2013



Fonte: Associação Brasileira do Alumínio (ABAL, 2015)

O processo de obtenção do alumínio é baseado no processo chamado *Hall-Heroult*. Neste processo, a alumina (Al_2O_3) refinada da Bauxita é dissolvida em um banho de criolita e sais de fluoreto. Eletrodos de carbono são utilizados para aplicar elevada corrente elétrica, provocando a dissociação da alumina, de modo que o alumínio deposita-se no cátodo, de onde é periodicamente removido para posterior processamento e fabricação de lingotes. Os elementos químicos Ferro e Silício, são as principais impurezas deste processo, embora Gálio, Titânio e Vanádio também sejam encontrados, porém em menores quantidades. Na Figura 4, podemos ver um fluxograma da produção do alumínio (CAPELARI, 2006).

Figura 4 – Fluxograma de Produção do Alumínio



Fonte: Associação Brasileira do Alumínio (ABAL, 2015)

A produção do alumínio divide-se na obtenção do alumínio primário e secundário. Onde o alumínio primário é aquele obtido através do processo de redução da alumina, e caracteriza-se pelo elevado consumo de energia elétrica. O alumínio secundário por sua vez, é aquele obtido através do reprocessamento de sucata, em grande parte proveniente da reciclagem, e de sobras de processos de transformação. A produção do alumínio secundário tem crescido em importância, devido às questões ambientais e ao baixo custo de reprocessamento. Apenas 5% da energia elétrica que é consumida na obtenção do alumínio primário é necessária na sua reciclagem (ABAL, 2015).

Com posição de destaque entre os produtores mundiais de alumínio, o Brasil atualmente é o sexto maior produtor de alumínio primário, e possui a terceira maior reserva de bauxita do mundo (ABAL, 2015). As maiores jazidas brasileiras encontram-se em Minas Gerais e no Pará.

1.1.1. Designação e Nomenclatura das Ligas de Alumínio

A nomenclatura utilizada para identificar as diversas ligas de alumínio, bem como seus tratamentos térmicos e mecânicos, segue o aprovado por sistemas internacionais propostos por algumas associações como a *Aluminum Association (AA)*, *International Organization for Standardization (ISO)* e Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Neste trabalho adotou-se a nomenclatura proposta pela ABNT NBR 6834 – 2006.

Através da norma ABNT NBR 6834: 2006 as ligas de alumínio podem, segundo sua composição, ser divididas em duas categorias, cada qual com seu próprio sistema de classificação: composições para fundição e composições para trabalho mecânico. No âmbito deste trabalho serão citadas apenas as ligas para trabalho mecânico. As composições para trabalho mecânico, são classificadas em séries de quatro dígitos, de acordo com o principal elemento químico adicionado, conforme ilustra a Tabela 1.

O significado dos 4 dígitos que designam as ligas de alumínio difere-se entre a série 1xxx e demais séries. Por exemplo: na série 1xxx, o segundo algarismo, se igual a zero, indica que as impurezas presentes são as naturais do processo de fabricação. Se diferente de zero, indica que há controle especial na concentração de determinada impureza. O terceiro e quarto dígitos indicam o percentual de alumínio, além dos 99% existentes. No caso de um alumínio 1045, o percentual de alumínio presente será 99,45%, sendo o restante, impurezas naturais do processo (ABNT NBR 6834, 2006).

Tabela 1 – Principais elementos de liga das séries de alumínio

Série	Principal Elemento de Liga
1xxx	Alumínio - Al \geq 99%
2xxx	Cobre - Cu
3xxx	Manganês - Mn
4xxx	Silício - Si
5xxx	Magnésio - Mg
6xxx	Magnésio / Silício (Mg/Si)
7xxx	Zinco - Zn
8xxx	Outros Elementos

Fonte: Adaptada da Norma ABNT NBR 6834, 2006

A partir das séries de 2xxx a 8xxx, o primeiro dos dígitos indica a série a qual a liga pertence e, por conseguinte o principal elemento de adição. O segundo dígito irá indicar se a composição da liga é igual à liga desenvolvida originalmente (se igual à zero) ou se a liga original sofreu alteração na sua composição química (algarismos de 1 a 9), o que denota uma

modificação da liga base. O terceiro e quarto dígitos apenas diferenciam as ligas dentro de uma mesma série, ou seja, formam um número arbitrário que identifica uma liga específica da série (DAVIS, 1993).

É ainda possível dentre as séries, fazer-se uma subdivisão quanto ao mecanismo de endurecimento aos quais as ligas respondem e que promovem o aumento da dureza e da resistência mecânica. Sendo assim, as ligas das séries 2xxx, 6xxx e 7xxx são classificadas como tratáveis termicamente, enquanto as ligas das séries 3xxx, 4xxx e 5xxx são denominadas de endurecíveis por deformação. A seguir descreve-se as características gerais de cada uma das séries de ligas de alumínio conformadas, bem como suas mais frequentes áreas de aplicação (DAVES, 1993).

Série 1xxx: Com teor de pureza igual ou superior a 99%, encontra aplicação principalmente nas áreas elétricas e química. Possui excelente resistência à corrosão, elevadas condutividade térmica e elétrica, elevada ductilidade e baixa resistência mecânica. Respondem moderadamente a processos de endurecimento por deformação devido ao alto teor de pureza.

Série 2xxx: Tendo o Cobre como principal elemento de liga, as propriedades mecânicas desta série podem ser superiores às de alguns aços com baixo teor de Carbono. São largamente utilizadas em aplicações estruturais. Possui boa usinabilidade, baixa soldabilidade e baixa resistência a corrosão. Normalmente as características à corrosão são melhoradas por meio de recobrimento com alumínio de alta pureza ou por ligas da série 6xxx.

Série 3xxx: As ligas desta série são de moderada resistência mecânica, encontrando aplicações nos mais diversos segmentos, desde utensílios domésticos, trocadores de calor e placas de trânsito até latas de bebidas. O principal elemento de liga é o Manganês, embora apresente solubilidade máxima de apenas 1,5%. A máxima resistência mecânica é obtida por meio de trabalho mecânico.

Série 4xxx: O principal elemento de liga desta série é o Silício, em teores de até 12%. Sua função é baixar a temperatura de fusão destas ligas sem que ocorra fragilização. Por fundir-se em temperaturas mais baixas que as demais séries, estas ligas são utilizadas principalmente como arames de solda e ligas de brasagem.

Série 5xxx: O Magnésio, principal elemento de liga desta série, em combinação com o Manganês resulta em ligas de média-alta resistência mecânica. De boa soldabilidade e com destacada resistência à corrosão (principalmente em atmosfera salina), esta série encontra aplicação em diferentes setores. A gama de produtos varia desde navios e embarcações, tanques criogênicos e latas, até estruturas automotivas.

Série 6xxx: Nesta série Magnésio e Silício são adicionados em proporções suficientes para formação de Silicato de Magnésio (Mg_2Si). As ligas desta série possuem elevadas resistências à corrosão, boa conformabilidade boa soldabilidade e são de fácil usinagem. São utilizadas para uso arquitetônico, quadros de bicicletas e também estruturas soldadas.

Série 7xxx: Em teores de 1 a 8%, o Zinco é o principal elemento de liga, embora Magnésio, Cobre, Cromo e Zircônio também podem estar presentes em menores quantidades. O Zinco combinado ao Magnésio confere às ligas desta série altíssima resistência mecânica, o que as torna muito utilizadas em aplicações estruturais, principalmente pela indústria aeronáutica.

Série 8xxx: Liga que possui o lítio como principal elemento de liga. A adição de lítio tem a finalidade de aumentar a rigidez e a resistência onde baixa massa de componentes seja requerida.

1.1.2. Sistema de Classificação de Têmperas

Além do sistema de classificação por séries, um sistema adicional é utilizado para especificar a sequência de tratamentos térmicos ou mecânicos ao qual determinada liga de alumínio foi submetida durante seu processo produtivo. A esta condição final baseada na sequência de tratamentos termomecânicos dá-se o nome de têmpera, ou seja, é o estado que adquire o material pela ação das deformações plásticas a frio ou a quente, por tratamentos térmicos ou pela combinação de ambos, que dão aos produtos estruturas e propriedades características, diferentemente ao realizado na têmpera de aço carbono (ALMEIDA, D.T, 2013).

A classificação das têmperas é feita através de uma letra maiúscula seguida de dois ou três dígitos (ABNT NBR 6835, 2006), da mesma forma que para a classificação das ligas de alumínio, a mesma é feita através de sistemas internacionais propostos por algumas associações, conforme descrito no subitem 1.1.1. Esta sequência é separada do nome da liga por um hífen, onde cada letra maiúscula descreve o tratamento ou sequência de tratamentos para obter certos níveis de propriedades. Neste trabalho será apresentada a nomenclatura proposta pela ABNT NBR 6835-2000. Na Tabela 2 é apresentada a sequência da nomenclatura, bem como o significado da classificação das têmperas.

Tabela 2 – Designação do tratamento térmico para as ligas de alumínio

Nomenclatura	Significado da Classificação
F	Como fabricado
O	Recozido
H	Endurecido por deformação
W	Solubilização
T	Tratável Termicamente

Fonte: Adaptada da Norma ABNT NBR 6835, 2000.

Também conforme norma ABNT NBR 6835:2000, a designação do tratamento térmico para as ligas de alumínio, especifica a aplicação para tal, onde:

F = (como fabricado), aplica-se a produtos fabricados por deformação à frio, à quente ou fundição onde nenhum controle especial foi empregado sobre as condições térmicas ou endurecimento pelas deformações ocorridas.

O = Recozido. Aplica-se a produtos que passaram por recozimento a fim de obter-se redução da resistência mecânica e a produtos fundidos para aumentar a ductilidade e estabilidade dimensional.

H = Endurecido por deformação (aplicável apenas às ligas para trabalho mecânico). Indica que o produto teve sua resistência mecânica aumentada através de encruamento, com ou sem tratamento térmico posterior, este por sua vez produz uma redução na resistência. Um ou dois dígitos sempre acompanham a letra H, os quais indicam a realização ou não de alívio de tensões e o percentual de redução sofrido, respectivamente. É utilizado para as ligas não tratáveis termicamente, ou seja, cujo aumento da resistência mecânica é obtido apenas através de deformação a frio. A Tabela 3 apresenta os processos para obtenção do tratamento térmico, designado como endurecido por deformação.

Tabela 3 – Designação do tratamento térmico H (endurecido por deformação)

Nomenclatura	Significado da Classificação
H1	Somente Encruado
H2	Encruado e recozido parcialmente
H3	Encruado e estabilizado
H4	Encruado e pintado ou envernizado

Fonte: Adaptada da Norma ABNT NBR 6835, 2000.

A diminuição da espessura na deformação a frio, está relacionado com o segundo dígito. Por exemplo, um tratamento em que o segundo dígito seja H18, corresponde à tensão de cedência obtida com uma diminuição de 75% da seção transversal e corresponde também ao material completamente endurecido. No caso do tratamento H12 corresponde a um quarto desse valor de tensão assim H14 e H16 correspondem a metade e três quartos desse valor, respectivamente.

No caso do tratamento térmico de solubilização (W). Esta têmpera é aplicável às ligas cuja resistência espontaneamente modifica-se em temperatura ambiente durante um período de meses ou mesmo anos após tratamento térmico de solubilização. Isto só é válido quando especificar o período de duração do envelhecimento natural (exemplo: W ½ h).

Por fim, o tratamento térmico de solubilização (T). Aplicável às ligas cuja resistência estabiliza-se em um período de até algumas semanas após a realização de tratamento térmico de solubilização. A letra T geralmente é seguida por um ou dois dígitos, que especificam a sequência de tratamentos termomecânicos realizados, conforme pode ser visualizado na Tabela 4.

Tabela 4 – Designação do tratamento térmico T (solubilização)

Nomenclatura	Significado da Classificação
T1	Solubilização parcial e envelhecimento natural
T2	Arrefecimento e recozimento
T3	Solubilização e trabalho a frio
T4	Solubilização e envelhecimento natural
T5	Envelhecimento artificial
T6	Solubilização e envelhecimento artificial
T7	Solubilização e estabilização
T8	Solubilização, encruamento e envelhecimento artificial
T9	Solubilização, envelhecimento artificial e encruamento
T10	Arrefecimento, encruamento e envelhecimento artificial

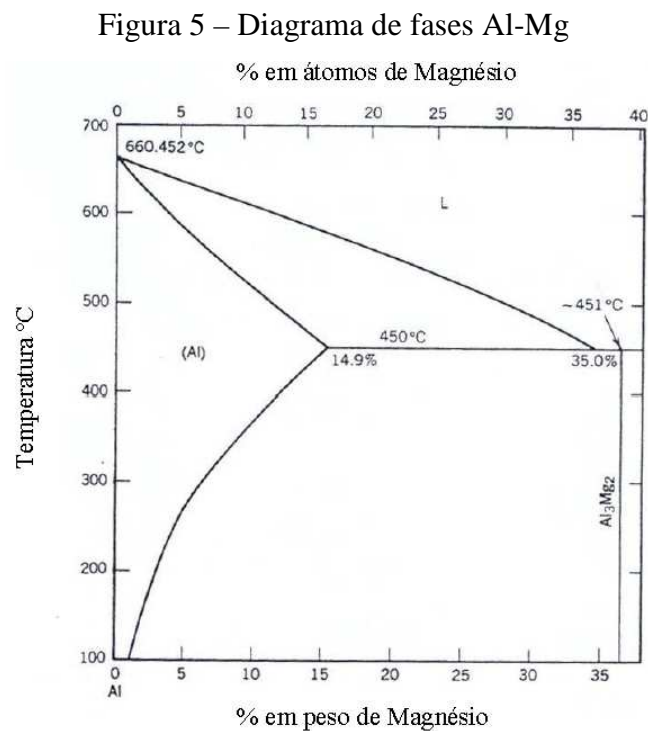
Fonte: Adaptada da Norma ABNT NBR 6835, 2000.

Na solubilização se as propriedades estabilizam-se em temperatura ambiente, diz-se que a liga é envelhecida naturalmente. Caso o material seja submetido à temperatura, diz-se envelhecido artificialmente.

1.1.3. Ligas de Alumínio-Magnésio

Como mencionado anteriormente, as ligas de alumínio exibem uma ótima combinação de resistência mecânica, resistência à fadiga, conformabilidade e resistência à corrosão. Tais características são muito desejáveis pela indústria automotiva. Atualmente, as ligas de alumínio-magnésio (Al-Mg) da série 5xxx têm sido usadas pelas indústrias automotivas devido a excelente resistência específica, resistência à corrosão e soldabilidade (FULLER *et al.*, 2002; TOROS *et al.*, 2008).

Quando o alumínio é ligado com magnésio, o magnésio forma um complexo sistema com o alumínio. Existe um eutético, líquido \rightarrow Al + Mg_5Al_8 , de 14,9 – 35% em peso de magnésio. O teor de magnésio decresce linearmente em relação ao Al por aproximadamente 0,5% a cada 1% em peso de magnésio em solução sólida (MONDOLFO, 1976). A Figura 5 apresenta o diagrama de fase Al-Mg.



Fonte: DAVIS, 2003

Ligas comerciais da série 5xxx possuem teores de magnésio entre 0,5 a 6% em massa. Quando a conformabilidade e o acabamento superficial são características críticas, ligas com baixo teor de magnésio são usadas, devido as suas elevadas taxas de encruamento. Caso contrário, em aplicações estruturais onde a resistência mecânica, resistência à fadiga e a

fratura, e soldabilidade, ligas com maiores teores de magnésio são usadas (TOTTEN, *et al.*, 2003).

1.2. Propriedade que influenciam na soldagem do alumínio e suas ligas

Almeida (2013) *apud* EAA (2015) menciona que a aplicação das ligas de alumínio torna-se restrita quando os processos de união disponíveis não atendem às necessidades de cada aplicação. Isto é particularmente importante na soldagem devido à sensibilidade que as propriedades de resistência mecânica das ligas endurecidas por envelhecimento ou deformação apresentam ao calor gerado nos processos ao arco elétrico.

Um dos processos de fabricação que possui maior importância na expansão do uso das ligas de alumínio para os diversos segmentos industriais é a soldagem. Contudo, estes processos devem produzir juntas soldadas com resistência similar à do metal base, apresentar bom aspecto visual, bom desempenho à vida em fadiga e resistência à corrosão. Para atender a essa gama de exigências, um dos processos de maior importância atualmente são os que utilizam gás inerte para proteção da poça de fusão, como os processos TIG e MIG (DAVIS, 2002).

O processo de soldagem denominado TIG (*Tungsten Inert Gas*) foi desenvolvido antes que o processo MIG (*Metal Inert Gas*) e durante certo período foi utilizado para todas as espessuras de metal e tipos de juntas (SAUNDERS, 1989). Quando deseja-se a soldagem de espessura de alumínio de até 6,30mm de espessura e na execução de passes de raiz em aplicações onde elevada qualidade seja indispensável, recomenda-se o uso do processo TIG. Por sua vez, quando se deseja altas velocidades de soldagem que implicam em aumento da produtividade, faz-se o uso do processo de soldagem MIG.

Dentre as propriedades das ligas de alumínio de maior influência nos processos de soldagem, de acordo com diversos autores (DAVIS, 1990; SAUNDERS, 1989; PRAVEEN *et al.*, 2005), podemos destacar as seguintes:

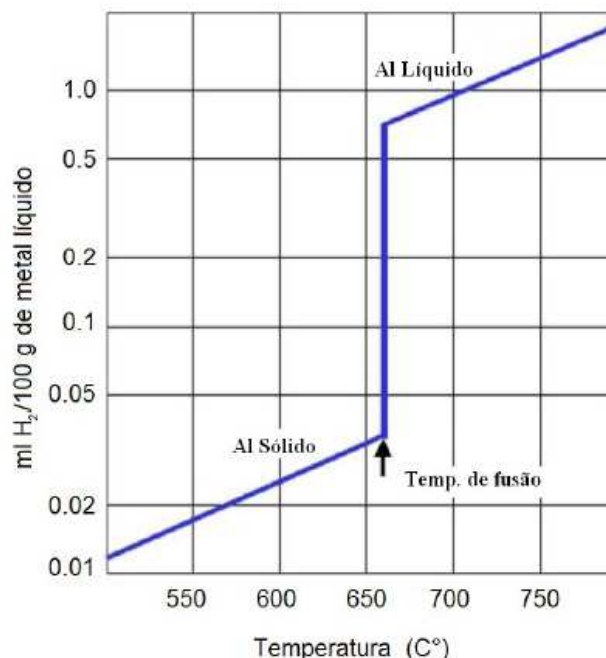
- Formação de camada de óxido;
- Solubilidade do hidrogênio;
- Características térmicas;
- Características elétricas;

Formação de Camada de Óxido: A formação da camada de óxido (Al_2O_3), ocorre devido à alta afinidade química entre o alumínio e o oxigênio. Esta camada constitui uma proteção natural à corrosão que, entretanto, é facilmente removida por processos de soldagem

ao arco elétrico. O elevado ponto de fusão deste óxido (2050°C) que é cerca de 3 vezes maior que a temperatura de fusão do alumínio puro (660°C), aliado a uma camada excessivamente espessa, porém poderá impedir a abertura do arco elétrico ou resultar em falta de fusão. Para eliminar este problema, recomenda-se a redução da espessura desta camada por meios químicos ou mecânicos, como escovamento e/ou usinagem, tanto das superfícies a serem unidas, quanto da região de contato do metal com o cabo terra. Os fatores que podem estar associados ao aumento desta camada podem ser os processos prévios de anodização, tratamento térmico ou mesmo a condições de estocagem do material em ambientes úmidos, onde este filme de óxido, particularmente à medida que se torna mais espesso, absorve umidade do ar (DAVIS, 2002).

Solubilidade do hidrogênio: A solubilidade quase nula do hidrogênio em alumínio sólido é a principal causa de porosidade na soldagem das ligas de alumínio (DAVIS, 2002), sendo a umidade uma fonte de hidrogênio proveniente da água. Entretanto, em temperaturas elevadas como a poça de fusão, grandes quantidades de hidrogênio podem ser absorvidas, como indica a Figura 6.

Figura 6 – Solubilidade do Hidrogênio no Alumínio



Fonte: PRAVEEN E YARLAGDDA, 2005

À medida que o alumínio se solidifica, a solubilidade do hidrogênio na poça de fusão decai rapidamente. O hidrogênio que excede o limite de solubilidade forma então bolhas de

gás caso não consiga sair da poça em solidificação. Segundo Paveen e Yarlalagadda (2005), este é um dos principais problemas na soldagem do alumínio, pois reduz a resistência à fadiga e à tração da junta soldada. Frequentemente, as principais fontes de hidrogênio na soldagem podem ser proveniente de umidade nas superfícies a serem soldadas ou no metal de adição, condensação no interior de tochas refrigeradas à água, metal de adição sujo com óleo lubrificante ou ainda impureza do gás de proteção.

Características Térmicas: O alumínio possui uma elevada condutividade térmica, e baixa temperatura de fusão quando comparado aos metais ferrosos, porém um maior aporte de calor é necessário para compensar as perdas devido a estas condições. Em processos com altas taxas de velocidade de soldagem, como é o caso do processo MIG, a elevada condutividade térmica e a baixa temperatura de fusão, tornam sensíveis às variações no aporte de calor, podendo ocasionar variações na fusão e na penetração da solda. Além disto, problemas de distorção, resultado da alta contração na solidificação (6% por volume), e o alto coeficiente de expansão térmica (2 vezes maior que nos aços), deverão ser controlados através da sequência de passes e da correta fixação das peças (PRAVEEN E YARLAGDDA, 2005).

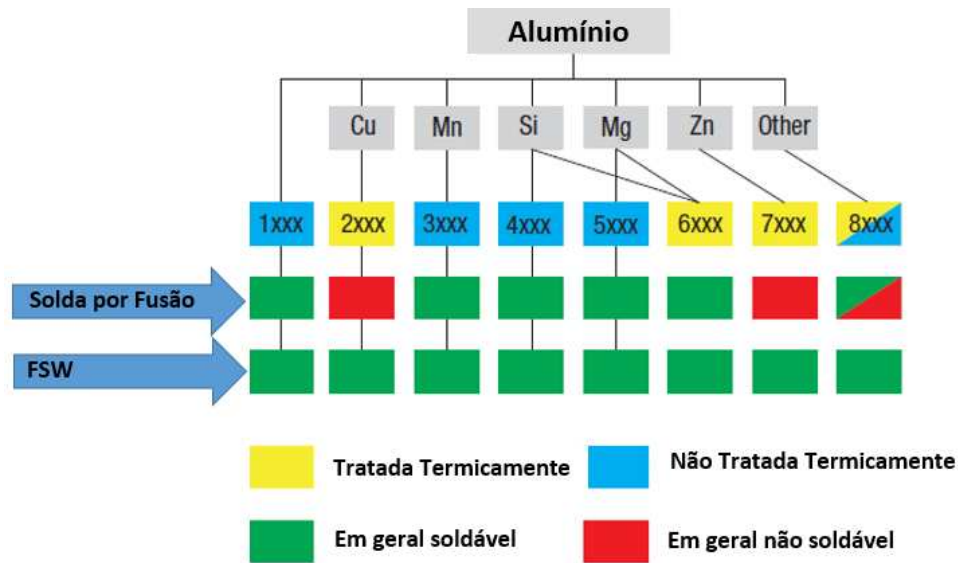
Características Elétricas: As características elétricas do alumínio possuem maior influência na soldagem por resistência elétrica, quando comparadas com a soldagem com arco elétrico. Pelo fato, de que neste processo o calor gerado depende da resistência imposta pelo material ao fluxo de corrente elétrica. Com isso, correntes mais elevadas deverão ser utilizadas para produzir-se o mesmo aquecimento obtido na soldagem de aços, devido à alta condutividade elétrica do alumínio. Outro aspecto é a fixação do cabo terra, que pode ser feita em qualquer ponto da peça, quando se faz uso do processo com arco elétrico. Pelo fato do alumínio ser não magnético, problemas de sopro elétrico são minimizados (PRAVEEN E YARLAGDDA, 2005).

1.2.1. Soldabilidade das Ligas de Alumínio

Segundo Olson (1977) a soldabilidade pode ser definida como a capacidade de um material ser soldado sob condições de fabricação impostas por uma estrutura projetada que atenda aos requisitos específicos de desempenho satisfatório da sua função de serviço.

Conforme mencionado no item 1.2, o alumínio possui determinadas propriedades que fazem com que a sua soldagem seja diferente da soldagem dos demais materiais, como por exemplo o aço. A Figura 7 apresenta um mapa da soldabilidade das várias ligas de alumínio.

Figura 7 – Soldabilidade das várias ligas de alumínio



Fonte: Adaptado de The Welding Institute, 2015.

Na Figura 7 obtemos uma classificação geral quanto à soldabilidade das ligas de alumínio, onde a solda por fusão neste caso é caracterizada pelos processos TIG e MIG.

Segundo Olson (1977) as ligas que apresentam melhor soldabilidade, ou seja, são mais fáceis de serem soldadas por processos convencionais de soldagem (solda por fusão), são aquelas pertencentes às séries 1xxx, 3xxx, 5xxx e 6xxx. Em seguida, vêm as séries 4xxx e 2xxx que podem ser soldadas, mas requerem técnicas especiais e apresentam perda de ductilidade. Por fim, as ligas de alta resistência mecânica da série 7xxx são classificadas como não recomendadas para soldagem pelos processos convencionais. A esta última, entretanto, deve-se destacar as ligas 7005 e 7039 que foram especialmente desenvolvidas com o intuito de melhorar a soldabilidade.

Por outro lado, podemos observar que diferentemente dos processos convencionais de soldagem, a solda por fricção e mistura mecânica (*Friction Stir Welding* – FSW) é considerada em geral soldável para todas as ligas de alumínio. Isto advém, pelo fato da soldagem por fricção ser uma técnica de soldagem no estado sólido, o que faz com que os problemas encontrados na soldagem por fusão, como por exemplo, distorções significativas dos componentes a serem soldados que podem dar origem a fissurações devido às tensões envolvidas durante a solidificação da solda devido ao excessivo aporte térmico envolvido nos processos de soldagem por fusão, atuem de forma menos intensa no processo de soldagem por fricção (TWI, 2015).

1.2.2. Soldabilidade das Ligas de Alumínio da Série 5xxx

A liga de alumínio 5182 é considerada de boa soldabilidade pelos processos de soldagem baseados em arco elétrico com proteção gasoso (GMAW), assim como por meio de ponto por resistência elétrica, só apresentando maiores dificuldades no processo de união através de brasagem e solda-brasagem (ALCAN, 2001).

O magnésio atuando como segundo elemento mais presente nas ligas binárias Al-Mg, impõem algumas restrições quanto a soldagem destas ligas, através de processos que envolvam fusão dos materiais. Essas restrições são susceptíveis ao aparecimento de trinca a quente, também chamadas de *hot cracking*, para união das ligas com teores de magnésio entre 0,5% e 3% em peso (ASM v6, 1995).

O magnésio puro, como metal, possui características físico-químicas como, ponto de fusão de 649°C, ebulição de 1107°C e pressão de vapor (Pv) de 361Pa, uma das maiores entre os metais junto com o elemento químico zinco, que possui Pv de 19,2Pa (KOU,1987; GILBREATH, 1965). Visto que a pressão de vapor é uma propriedade coligativa da solução, a qual representa a pressão na qual um líquido está em equilíbrio com seu vapor a determinada temperatura, indicando assim uma tendência de um líquido em entrar na fase vapor. Desta forma, quanto maior a Pv de um elemento, mais volátil ele será, e mais baixo é seu ponto de ebulição (POLITI, 1994).

O alumínio possui características físico-químicas como, Pv de 2,41E-6Pa, ponto de fusão de 660°C e ponto de ebulição de 2450°C, que comparado ao elemento de liga magnésio, verifica-se a ocorrência de perda significativa do elemento principal da liga, o qual se não for repostado durante a soldagem, será um dos fatores que contribuirá para a ocorrência de trinca a quente nos processos de soldagem por fusão (KOU, 1987; GILBREATH, 1965).

Nos processos de maior concentração de energia, como é o caso da soldagem a laser, este inconveniente físico-químico também é verificado. Conforme descrito por Gilbreath (1965) o ensaio realizado para determinar a pressão de vapor do magnésio é realizado sob vácuo, onde para valores de pressão muito pequenos, pode ocorrer até a sublimação do magnésio, desta forma, o problema pode ser agravado se a soldagem for realizada sob condição de vácuo.

Sendo assim, para minimizar os problemas de soldagem de ligas de Al-Mg no qual haverá o processo de fusão dos materiais envolvidos, o metal de adição a ser utilizado de preferência deve ter elevado teor de magnésio, e necessariamente ser do mesmo grupo de ligas. Já para o processo de uma união dissimilar, como por exemplo, de uma liga 5XXX com

1XXX, ocorrerá falta de magnésio e por consequência problemas de trincas, devido a diluição mútua entre as ligas (ASM v6, 1995).

1.3. Soldagem por Fricção e Mistura Mecânica – Friction Stir Welding

Atualmente a grande maioria dos processos utilizados nas indústrias envolvem algum tipo de alteração na microestrutura do metal de base, devido ao grande aporte térmico e ao metal de adição presentes nos processos convencionais de soldagem por fusão. Sendo que na grande maioria dos casos esta alteração é indesejável, trazendo como consequência uma perda na qualidade das propriedades do material original.

Mishra *et al.* (2005) menciona que a dificuldade de fazer soldas de alta resistência à fadiga e à fratura nas ligas de alumínio aeroespaciais e automobilística tais como a série altamente ligada de alumínio 2XXX e 7XXX, tem inibido por muito tempo o uso da soldagem para estruturas aeroespaciais e automobilísticas. Estas ligas de alumínio são geralmente classificadas como não-soldáveis pelos processos convencionais de soldagem por fusão, devido à microestrutura pobre de solidificação e porosidade na zona de fusão. Também, a perda em propriedades mecânicas em relação à matéria-prima é muito significativa. Desta forma, estes fatores fazem a junta destas ligas por processos convencionais de soldagem desinteressante.

Diante da dificuldade exposta para união destas ligas por processos convencionais de soldagem por fusão, promoveu a busca por métodos que impunham um menor nível de deterioração, ou equivalente, uma maior eficiência da junta soldada, impulsionando assim, diversas pesquisas no meio acadêmico e empresarial.

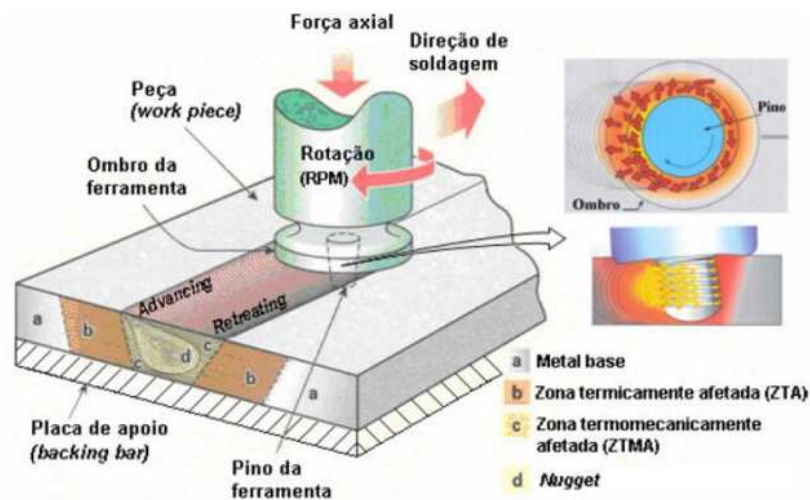
Neste contexto que a Soldagem por Fricção e Mistura Mecânica (FSW) foi desenvolvida e patenteada no Instituto de Soldagem do Reino Unido (TWI) em 1991 como uma técnica de junta no estado sólido, e foi aplicada inicialmente às ligas de alumínio (THOMAS *et al.*, 1991).

De acordo com Dixon (1994), podemos caracterizar os processos de soldagem no estado sólido como aqueles nos quais é produzida a união dos materiais, com uma temperatura menor que a temperatura de fusão do próprio material, sem a inclusão de metal de adição. Assim, esses processos envolvem a difusão e deformação dos materiais para produzir uma união estável e de alta qualidade.

O conceito básico do processo de FSW é notavelmente simples. Pois trata-se de um processo de soldagem linear que através do calor gerado por uma ferramenta de giro não-consumível com um pino e um ombro especialmente projetados é inserida nas juntas de topos

das chapas ou das placas a serem soldadas, provocando a plastificação do material possibilitando assim a mistura de ambos os lados da junta, conforme pode ser visualizado na Figura 8.

Figura 8 – Desenho Sistemático do Processo de Soldagem FSW – “Friction Stir Welding”



Fonte: CRUZ E NETO, 2009

Devido a sua eficiência energética favorável ao meio ambiente e versatilidade, o processo de soldagem por fricção linear – FSW é considerado o mais significativo desenvolvimento na junção de metais dos últimos anos (MISHRA *et al.*, 2005).

Comparando com os processos convencionais de soldagem, o processo FSW consome consideravelmente menos energia, necessita apenas 2,5% da energia consumida pelo processo de soldagem a laser (MISHRA *et al.*, 2005). Em sua grande maioria, para soldagem das ligas de alumínio, nenhum gás ou fluido de proteção é usado, fazendo desse modo um processo a favor do meio ambiente. A junta não envolve nenhum uso de metal de adição, conseqüentemente toda a liga de alumínio pode ser soldada sem preocupação para a compatibilidade da composição, que é uma preocupação na solda por fusão. Quando desejáveis, as ligas de alumínio e os compostos dissimilares podem ser juntados com facilidade. Em contraste com a soldagem por fricção tradicional, que é executada geralmente nas peças assimétricas pequenas que podem ser giradas e empurradas entre si para formar uma junção, a soldagem de mistura por atrito pode ser aplicada aos vários tipos de junções como junções de extremidade, junções de superposição, junções de extremidade em T e junções de enchimento (MISHRA *et al.*, 2005). Os benefícios chave da FSW são resumidos na Tabela 5.

Tabela 5 – Benefícios da Soldagem por Fricção

Benefícios da Soldagem por Mistura e Atrito (FSW)		
Benefícios Metalúrgicos	Benefícios Ambientais	Benefícios Energéticos
Processo no estado sólido	Não requer gás de proteção	Melhora o uso de materiais (juntas de diferentes espessuras) permite redução de peso
Baixa distorção da peça a soldar	Não requer acabamento na superfície	Necessita apenas 2,5% da energia consumida pelo processo de solda laser
Boa estabilidade dimensional e repetibilidade	Elimina perda com esmerilhamento	Diminui o consumo de combustíveis, tornando as aeronaves, carro e navios mais leves
Sem perda de elementos de liga	Elimina solventes requeridos no desengraxe	
Excelentes propriedades metalúrgicas na região da junta	Economia de materiais consumíveis como panos de limpeza, arame e outros gases	
Microestrutura fina		
Ausência de fissuras		

Fonte: Adaptada de MISHRA, C. R., *et al.*, 2005

1.3.1. Fundamentos do Processo FSW

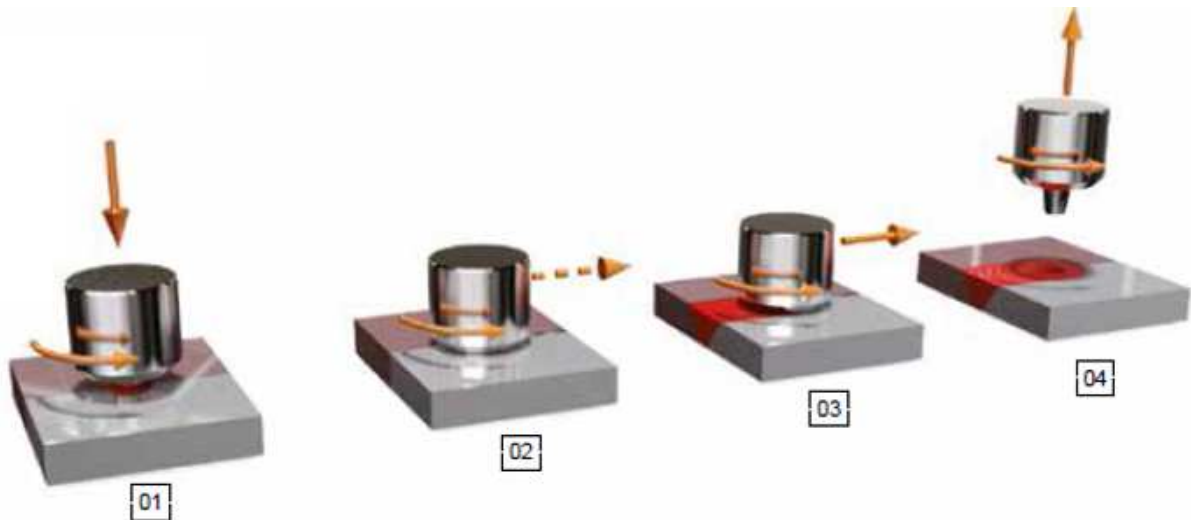
A soldagem por fricção é um processo bastante antigo em que o calor para a união das peças é gerado pela conversão direta de energia mecânica em energia térmica na interface de contato sem a utilização de nenhuma outra fonte de calor ou outro tipo de energia. Normalmente uma peça fica estacionária enquanto a outra é dotada de movimento (ALMEIDA, 2013).

Conforme mencionado anteriormente, o processo de soldagem por fricção é considerado um processo de soldagem no estado sólido, uma vez que a temperatura de fusão dos materiais a serem soldados não é atingida. O material é plastificado na interface das peças e a união ocorre por difusão do material devido ao intenso trabalho mecânico e pelas condições de contato íntimo entre as peças. Assim, o processo FSW pode ser caracterizado como uma variação do processo de soldagem por fricção tradicional, e sem dúvida, um dos mais significativos desenvolvimentos da tecnologia de soldagem nos últimos anos (HILLER, 2007).

O processo de soldagem FSW possui um conceito relativamente simples. Sendo que para realização do processo, ao contrário do que se observa na soldagem por fricção tradicional, onde uma peça fica estacionária e a outra gira, no processo de FSW, as duas peças

a serem unidas permanecem estacionárias, e um terceiro elemento, neste caso, a ferramenta de soldagem, realiza a solda. O procedimento seguido no processo de FSW é apresentado na Figura 9.

Figura 9 – Etapas do Processo de Soldagem FSW, onde: 01 – aproximação e imersão da ferramenta, 02 – tempo de permanência para aquecimento, 03 – soldagem, 04 – retirada da ferramenta e fim da junta.



Fonte: Adaptada de KUKA System, 2015

Conforme visto na Figura 9, o processo de FSW consiste basicamente de quatro fases: a fase de imersão da ferramenta em rotação, na qual a solda é iniciada, a fase do tempo de permanência para aquecimento (*dwell time*) no local de imersão com a finalidade de que a ferramenta e as peças de trabalho atinjam temperaturas suficientes para concretizar a soldagem, a fase de soldagem, em que a solda é consolidada, e a fase final onde a ferramenta é afastada das peças de trabalho. Conforme a ferramenta é inserida dentro da junta, o calor gerado é conduzido pelo material e pela barra ou chapa de apoio (*backing bar* ou *backing plate*) KOZMINSKI, 2015).

Hiller (2007) e Almeida (2013) demonstraram que as máquinas utilizadas neste processo se assemelham a máquinas fresadoras adaptadas. Na verdade, algumas são realmente para este fim já que possibilitam o controle dos principais parâmetros e movimento inerentes ao processo.

A qualidade do processo é garantida pelo controle da especificação do material e da geometria das peças, além da correta seleção dos parâmetros de soldagem (HILLER, 2007).

Há uma série de importantes variáveis com respeito ao material de base e aos parâmetros do processo que podem afetar a qualidade das soldagens FSW, conforme demonstradas pelos estudos de Threadgill e Nunn (2003). Entre elas podemos listar as principais como sendo:

- Projeto da ferramenta;
- Velocidade de rotação da ferramenta;
- Velocidade de translação da ferramenta;
- Aporte de calor;
- Penetração do ombro da ferramenta;
- Ângulos de inclinação;
- Tempo de espera (aquecimento);
- Afastamento das peças a soldar;
- Peças com espessuras diferentes;
- Variação da espessura das peças;

Sendo assim, para a obtenção de uma solda de boa qualidade, estes parâmetros devem ser determinados e combinados individualmente para cada liga, espessura do material, formato da ferramenta com respectivas dimensões e tipo de equipamento utilizado.

Para Threadgill *et al.* (2003), o processo FSW foi desenvolvido e está em fase de desenvolvimento para uma ampla gama de materiais. É notório, que em termos de aplicações industriais consolidadas, a soldagem das ligas de alumínio é a principal aplicação do processo FSW, visto que desde a consolidação do processo ele foi aplicado inicialmente as ligas de alumínio. Porém, alguns dos materiais nos quais algumas experiências de soldagem com resultados promissores foram realizadas são o magnésio, cobre, titânio, aço, chumbo, zinco, alguns termoplásticos e aços inoxidáveis dúplex.

A espessura do material de base é apenas um dos aspectos operacionais que podem influenciar na realização do processo e na qualidade do processo de soldagem por FSW. Se tivermos uma variação excessiva na espessura das chapas a serem soldadas, será difícil obter soldas de qualidade e confiabilidade. Se a variação for muito maior que a nominal acarretará na formação de muita rebarba e/ou aumento no risco da formação de falhas na raiz da solda devido ao afastamento da ponta do pino. Já para espessura muito menor que a nominal, pode ocorrer perda de pressão sob o ombro da ferramenta e/ou contato do pino com o suporte. Normalmente, se admite uma tolerância de $\pm 0,1$ a $\pm 0,2$ para peças com espessuras da ordem

de 6,0 mm, embora se tenha conhecimento de soldagens realizadas com tolerâncias variando na ordem de $\pm 0,4$ mm (THREADGILL *et al.*, 2003).

Podemos considerar o processo como sendo razoavelmente tolerante em relação à necessidade de limpeza das peças, apesar de ser muito difícil quantificar os níveis máximos aceitáveis. Porém, este aspecto pode ser um fator de influência para garantir a qualidade da junta soldada, se a soldagem for submetida a tratamentos térmicos posteriores, evitando assim, o ingresso de materiais que podem se gaseificar ou decompor durante o tratamento levando a formação de defeitos. Quando se deseja evitar o ingresso de contaminantes na raiz da solda, a limpeza da ferramenta pode ser importante, porém a experiência tem mostrado que não há vantagens na remoção desta camada entre as soldagens (THREADGILL *et al.*, 2003).

A soldagem FSW não utiliza materiais de adição, de forma que qualquer afastamento das peças leva a uma redução da espessura na área de soldagem. Em situações extremas, pode levar a formação de defeitos ou ao excessivo afinamento da região soldada. Dawes *apud* Threadgill (1999) recomenda que a distância máxima entre as peças não seja maior que 10% da espessura (dados gerados para peças de 6,0 mm). Entretanto, Christner e Sylva *apud* Leonard (1996) demonstraram que soldagens com distâncias de até 36% da espessura podem ser toleradas em alguns casos.

Outro aspecto de extrema importância é a boa fixação das peças a serem soldadas, de forma a impedir o movimento das peças durante a soldagem, visto que as forças aplicadas ao processo são elevadas. À medida que a ferramenta é empurrada ao longo da linha de soldagem há uma forte tendência de separação das peças, e uma tendência de elevação no caso de placas finas. A fixação correta das peças acarreta numa menor distorção pós-soldagem, muito menores do que nos processos por fusão (THREADGILL, 2003).

Conforme Threadgill (2003), sistemas de fixação pneumáticos, hidráulicos e a vácuo provaram ser eficientes, para evitar a movimentação e distorção das peças a serem soldadas. Quando se faz a soldagem de materiais com menores espessuras, é necessário que as peças a soldar sejam rigidamente fixadas sob altas forças, para garantir que a linha de soldagem não seja deslocada da posição inicial. Quanto à soldagem de materiais mais espessos, a força aplicada pela ferramenta e espessura do material normalmente são suficientes para evitar qualquer tipo de movimentação e distorção, desta forma, a força de fixação necessária apenas deve ser suficiente para garantir o posicionamento das peças (THREADGILL, 2003).

Para minimizar o desgaste da ferramenta e possibilitar o uso de máquinas menos potentes, por exemplo, quando se soldam materiais espessos, duros ou com alto ponto de fusão, um furo pode ser usinado, tendo como função facilitar a penetração da ferramenta no

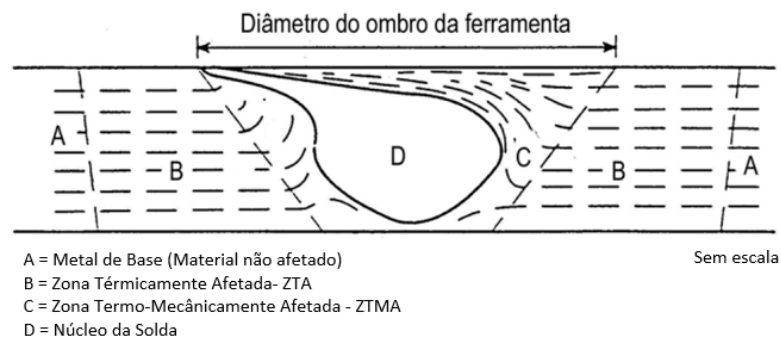
início da operação de soldagem. Visto que, o estágio de penetração inicial gera um elevado torque reativo que não está presente durante o restante do processo de soldagem. Outra função deste furo pode ser a redução da força vertical de soldagem (THREADGILL, 2003).

1.3.2. Características Microestruturais do Processo de Solda FSW

A microestrutura das juntas soldadas pelo processo de FSW tem sido alvo de diversos estudos, pois possuem grandes diferenças em relação às obtidas pelos processos de soldagem por fusão e são geralmente divididas em quatro zonas visualmente distintas.

Threadgill (1999) sugeriu um dos primeiros modelos para a morfologia da região afetada pelo processo de soldagem FSW, o mesmo pode ser visualizado na Figura 10 (idealizado para soldagem FSW de ligas de alumínio e adotado pelo TWI – “*The Welding Institute*”).

Figura 10 – Diagrama esquemático da microestrutura das soldagens FSW em alumínio



Fonte: Adaptado de THREADGILL, 1999

Zona A – Corresponde pelo metal de base, é a região mais afastada da solda, representa o material não afetado pelo processo de soldagem (THREADGILL, 1999).

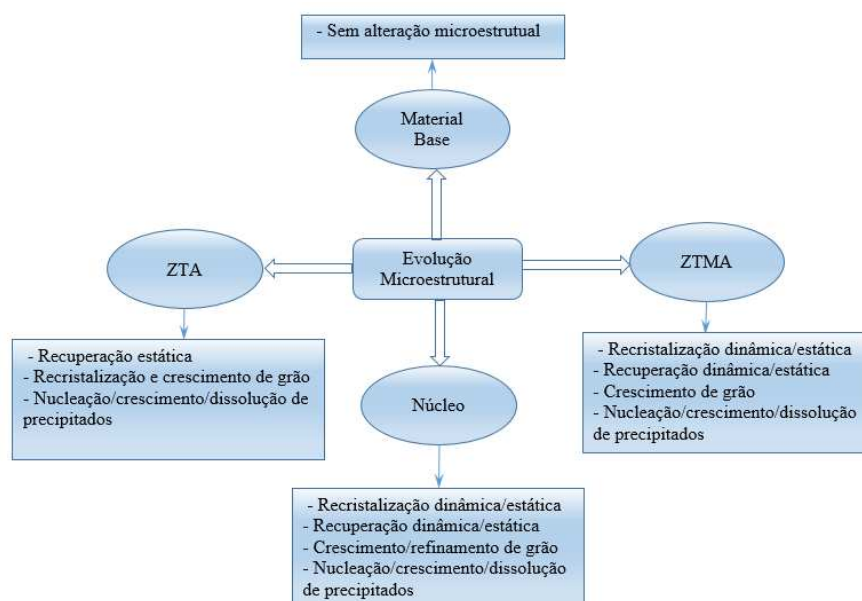
Zona B – É descrita como a ZTA (Zona Termicamente Afetada), região afetada pelo ciclo térmico durante a soldagem, fazendo com que as propriedades mecânicas e microestruturais sejam alteradas, porém sem deformação plástica residual. Nesta região a dureza de ligas envelhecidas ou endurecidas tipicamente apresentará um decréscimo rapidamente conforme se aproxima do centro da solda. Embora não haja mudança óbvia na microestrutura das ligas de alumínio, existem mudanças a níveis microscópios. Os precipitados envelhecidos ou super-envelhecidos possivelmente passam parcialmente à solução sólida (THREADGILL, 1999).

Zona C – Corresponde a ZTMA (Zona Termo -Mecanicamente Afetada) e os efeitos do ciclo térmico são mais severos, uma vez que as temperaturas atingidas durante a soldagem são mais elevadas e é provável que estas sejam suficientes para dissolver a maior parte dos precipitados. A deformação plástica que acontece nesta região faz com que ocorra uma orientação das estruturas laminadas do metal base, nas quais os grãos alongados podem ser reorientados em até 90°. Embora alguns grãos equiaxiais sejam formados nas regiões mais quentes, há pouca evidência de recristalização (THREADGILL, 1999).

Zona D – É a região central da solda, ou núcleo, localizada dentro da ZTMA na qual o material é dinamicamente recristalizado durante a operação de soldagem. A fronteira entre o núcleo e o resto da ZTMA é, em geral, razoavelmente identificável (quando se utiliza grandes ampliações a identificação pode ser mais difícil). A microestrutura do núcleo sempre consiste de grãos equiaxiais muito finos, tipicamente da ordem de 2 a 5 microns de diâmetro. A temperatura atingida nesta região para o alumínio é tal que qualquer precipitado é dissolvido, e em ligas que contêm grandes partículas de inclusões intermetálicas, estas são quebradas e finamente dissolvidas devido à intensa deformação cisalhante. No resfriamento alguns precipitados irão nuclear e crescer, levando ao aumento de dureza. Contudo, o equilíbrio não é atingido devido às taxas de resfriamento, e em algumas ligas pode ocorrer envelhecimento natural. Precipitações futuras podem ser induzidas por tratamentos de envelhecimento a baixas temperaturas (THREADGILL, 1999).

Uma visão geral da evolução microestrutural pode ser visualizada na Figura 11.

Figura 11 – Esquema da evolução microestrutural nas diferentes zonas processadas por FSW.



Fonte: Adaptada de MISHRA, C. R., KUMAR, N., (2014)

Threadgill (1999) e Krishnan (2002) mencionam que existe um fenômeno chamado de “*onion rings*” no núcleo da solda, que é uma série de elipsoides concêntricos observados dentro do núcleo. Às vezes estes anéis correspondem a mudanças no tamanho dos grãos do material, porém eles podem não ser vistos a grandes ampliações. A variação dos parâmetros como velocidades de avanço e de rotação da ferramenta, assim como a sua geometria, faz acreditar que esteja ligada a formação dos “*onion rings*”.

1.3.3. Variáveis do Processo FSW

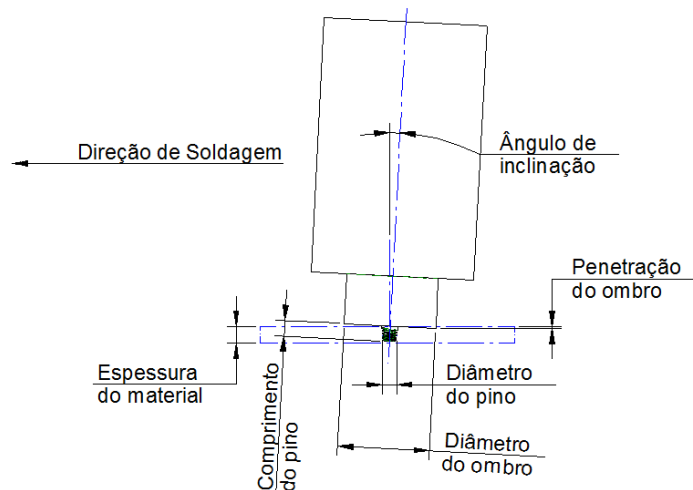
A relação de rotação da ferramenta no sentido horário ou anti-horário e a velocidade transversal da ferramenta ao longo da linha de junção são consideradas como parâmetros fundamentais para consolidação das soldas por FSW. A agitação e a mistura do material em torno do pino de giro são realizadas pela rotação da ferramenta já a movimentação do material agitado da parte dianteira para a parte traseira do pino e a finalização do processo de soldagem é feita pela translação da ferramenta. A agitação da mistura mais intensa do material é conduzida pelas elevadas taxas da rotação da ferramenta, que geram uma elevada temperatura devido ao aquecimento da fricção. Contudo, deve-se notar que o acoplamento da superfície da ferramenta de fricção com o objeto a soldar irá comandar o aquecimento. Assim, um aumento uniforme no aquecimento com taxa crescente da rotação da ferramenta não é esperado, porque o coeficiente da fricção na relação mudará com taxa crescente da rotação da ferramenta (MISHRA *et al.*, 2005).

Não menos importante, o ângulo de inclinação do eixo ou da ferramenta, no que diz respeito à superfície das peças a solda, exerce um fator de extrema importância. Sendo que, para uma inclinação apropriada do eixo para o sentido de arrasto assegura-se de que o ombro da ferramenta assegure o material agitado pelo pino rosqueado e o pino faz o movimento eficientemente do material da parte dianteira à parte traseira (MISHRA *et al.*, 2005).

Outra variável do processo importante a ser considerada é a profundidade da inserção do pino no objeto a soldar (igualmente chamado de profundidade do alvo). A profundidade da inserção do pino é associada com a altura do pino. De maneira que se sua escolha não for adequada ela se torna uma fonte geradora de defeitos, quando a profundidade da inserção é demasiadamente rasa, o ombro da ferramenta não tem contato à superfície original do objeto a soldar. Tendo como resultado um movimento do material agitado da parte dianteira para a parte traseira do pino ineficiente. Assim, haverá geração de soldas com sulco interno no canal da junta ou da superfície. De maneira contrária, quando a profundidade da inserção é

demasiadamente grande, o ombro da ferramenta mergulha no objeto a soldar causando rebarba excessiva, produzindo assim uma solda significativamente côncava. A Figura 12 apresenta os detalhes das variáveis do processo.

Figura 12 – Desenho esquemático da vista lateral da ferramenta e do material durante o processo de soldagem por FSW



Fonte: Adaptado de KOZMINSKI, 2015

Quando é realizada a soldagem de materiais com ponto de fusão alto como do aço e o titânio ou a alta condutividade do cobre, o calor produzido pela fricção e a agitação podem não ser suficientes para amaciar e plastificar o material em torno da ferramenta de giro. Desta forma, pré-aquecer ou refrigerar podem ser importantes para o processo. Assim, permite uma junção livre de defeitos. Para materiais com ponto de fusão alto, pré-aquecer ou ter uma fonte de calor externa adicional podem ajudar o fluxo do material. Por outro lado, os materiais com ponto mais baixo de temperatura de fusão tal como o alumínio e o magnésio, refrigerar pode ser usado para reduzir o crescimento extensivo de grãos recristalizados e a dissolução de precipitantes em volta da zona agitada (MISHRA *et al.*, 2005).

1.3.4. Geometria da Ferramenta

Para Mishra *et al.* (2005), o aspecto de maior influência no desenvolvimento do processo de soldagem FSW é a geometria da ferramenta. Pois ela possui um papel crítico no fluxo do material e governa por sua vez a taxa transversal em que o processo de FSW pode ser conduzido. A figura 13 apresenta o desenho esquemático de uma ferramenta de soldagem por FSW.

Figura 13 – Exemplificação das ferramentas, ombro e pino em detalhes.



Fonte: Adaptado de GENICOLO, 2007

Como podemos ver na Figura 13, a ferramenta possui uma geometria básica com aspecto de um cilindro escalonado, e é composta por duas partes principais, um pino e um ombro, que possuem as seguintes funções:

Ombro - parte que entra em contato íntimo com a superfície das peças a serem unidas, por meio da ação de uma força de contato, responsável pela geração de calor através de atrito, que plastifica o material das peças. Além disso, atua no sentido de impedir a expulsão do material plastificado da região da solda, impedindo a formação de defeitos conhecidos como vazios (THOMAS *et al.*, 1999). Na prática sua dimensão situa-se na faixa de 6 a 50mm, dependendo da espessura e material a ser soldado.

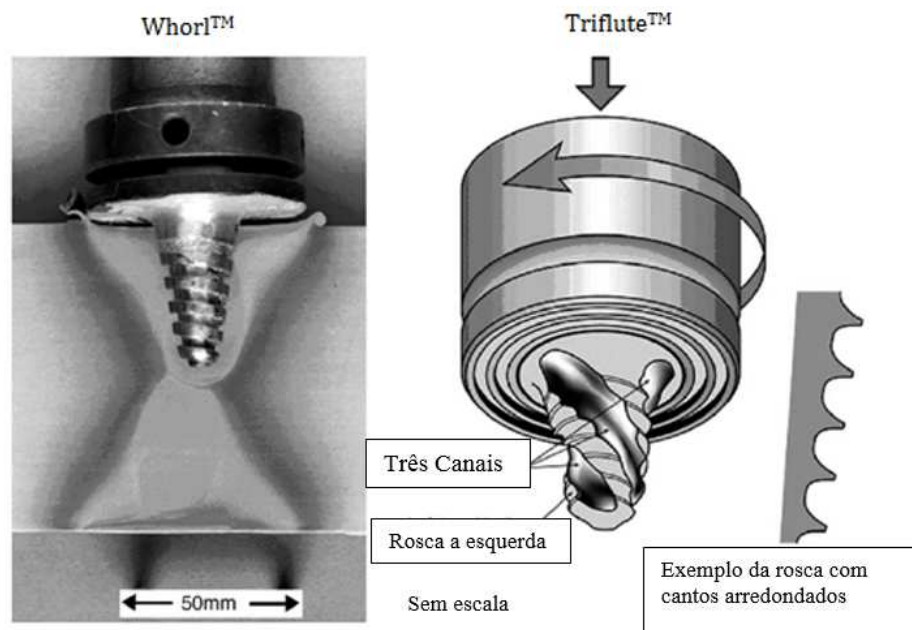
Pino – parte que se interpõe às peças, por quase toda a espessura de soldagem, que tem a função de trabalhar mecanicamente o material plastificado das peças base, levando-o para trás e para baixo da ferramenta, conforme esta é transladada. O diâmetro do pino é da mesma ordem da espessura da peça a ser soldada, enquanto seu comprimento é cerca de 3 a 5 décimos menor (para soldas com penetração total) (THOMAS *et al.*, 1999).

Agora como sabemos, a ferramenta tem duas funções preliminares: (a) aquecimento localizado, e (b) fluxo do material. Na fase inicial do mergulho da ferramenta, o aquecimento resulta primeiramente da fricção entre o pino e o objeto a soldar. Algum aquecimento adicional resulta da deformação do material. A ferramenta é mergulhada até que o ombro toque no objeto a soldar. A fricção entre o ombro e o objeto a soldar conduz ao componente um alto aquecimento. Do aspecto do aquecimento, o tamanho relativo do pino e o ombro são importantes, e as outras características de projeto não são críticas. O ombro prevê o confinamento do volume caloroso de material. A segunda função da ferramenta é à “agitação”

e o “movimento” do material. A uniformidade da microestrutura e as propriedades assim como as cargas de processo são governadas pelo projeto da ferramenta. Geralmente um ombro côncavo e um pino cilíndrico rosqueado são usados (ALMEIDA *apud* MISHRA *et al.*, 2005).

Algumas ferramentas com perfis especiais, tanto de pino como de suporte, foram desenvolvidas no TWI (Instituto de Soldagem do Reino Unido), com o intuito de aprimorar os estudos de melhoria na compreensão do fluxo do material e assimetrias do processo FSW. Podemos citar como exemplo as ferramentas WhorlTM e MX TrifluteTM, onde características complexas foram adicionadas para melhorar o fluxo do material e para reduzir esforços gerados no processo. As ferramentas WhorlTM e MX TrifluteTM podem ser vistas na Figura 14.

Figura 14 – Imagem das ferramentas WhorlTM e MX TrifluteTM desenvolvidas no TWI



Fonte: Adaptada de MISHRA, *et al.*, (2005)

Como se pode observar a ferramenta MX TrifluteTM diferencia-se da ferramenta WhorlTM por ter canais negativos em forma de hélice, utilizando o mesmo princípio de uma broca com ranhuras no sentido esquerdo, enquanto a WhorlTM os canais são inclinados semelhantes a um perfil de rosca.

Mishara *et al. apud* Thomas *et al.* (2005) demonstrou que o deslocamento do material seja menor do que uma ferramenta cilíndrica com o mesmo diâmetro devido a geometria do pino para ambas as ferramentas. Outros aspectos importantes das ferramentas WhorlTM e MX

Triflute™ é que ambas permitem um melhor fluxo do material plastificado, reduzem a força de soldagem, aumentam a interface entre o pino e o material plastificado, proporcionando desta maneira maior geração de calor. Thomas *et al.* (1991) sugeriu que o fator principal que determina a superioridade dos pinos das ferramentas Whorl™ sobre as ferramentas de pinos cilíndricos convencionais como sendo a relação do volume dinâmico ao volume estático, ou seja, o volume varrido durante a rotação ao volume do próprio pino, que é importante para fornecer um trajeto adequado ao fluxo de material.

O volume estático corresponde ao volume real do pino da ferramenta, enquanto o volume dinâmico corresponde ao volume aparente do pino quando o mesmo está em rotação. Sendo assim, o projeto de um pino com geometria adequada deve contemplar a relação existente entre o volume dinâmico (Vd) e o volume estático (Ve) do pino da ferramenta (ALMEIDA, 2013).

Almeida (2013) percebeu a influência do pino da ferramenta no processo de soldagem por fricção da liga 5083-O. Em seu trabalho foram usados pinos cônicos com rosca, cônico sem rosca e cilíndrico roscado. Chegou-se à conclusão que as juntas que usavam o pino cônico com rosca eram as que exibiam as melhores propriedades, comparativamente com as realizadas com os outros pinos. Este efeito pode estar relacionado com alta razão entre Vd e Ve, que favorecem o escoamento do material no entorno do pino, com conseqüente redução da força de soldagem. O aumento desta razão também leva ao aumento da área de contato entre o pino e o material, ocasionando maior aquecimento localizado, contribuindo assim para a redução da força de soldagem. Tais fatores justificam o desempenho superior das ferramentas cujo pino possui filetes de rosca.

Referente ao material da ferramenta Hiller (2007) comenta que a ferramenta deve ser fabricada com um material térmico e mecanicamente mais resistente que o metal de base, e que não contribui com o processo sob o ponto de vista da adição de material.

É ideal que os materiais para ferramenta devem ter um longo período de utilização, aumento assim a vida útil das ferramentas, e conseqüentemente reduzindo gastos relacionados com a substituição das mesmas. Eles devem possuir resistência à abrasão a elevadas temperaturas, e aliar dureza e resistência mecânica para que não deformem nem rompam por fratura sob as condições de operação. É da mesma forma importante que o material não reaja com o material da peça base sob as temperaturas de operação. Outro requisito do material da ferramenta é de que ele deve ser mal condutor de calor, no mínimo, menos condutor que o material da peça base (MISHRA *et al.*, 2005).

Visto que o ombro e o pino desempenham funções diferentes, eles podem ser fabricados de materiais diferentes. Porém, caso faça uso desta técnica deve-se ter cuidado no projeto da ferramenta, em relação a consequente diferença de expansão térmica. Na soldagem FSW de ligas de alumínio, têm sido usados comumente aços ferramenta para trabalho a quente como o AISI H13 (THREADGILL *et al.*, 2003).

Para soldagem de materiais com elevada temperatura de fusão pelo processo de FSW, as ferramentas devem ser resistentes ao desgaste em temperaturas elevadas e permitir a distribuição adequada de calor gerado durante o processo. Através de estudos de Collier *et al.* (2003); Konkol *et al.*, (2003); Lee *et al.*, (2004); Sato *et al.*, (2005) e Sorensen *et al.*, (2001), foi evidenciado que o nitreto de boro cúbico policristalino (PCBN) é capaz de atender estas necessidades, uma vez que ferramentas deste material permitem obter soldas pelo processo de FSW com sucesso em aços carbono, ligas de níquel, aços inoxidáveis AISI 316 e AISI 310, e também em aços inoxidáveis super dúplex UNS SAF 2507. As ferramentas de ligas refratárias, especialmente à base de tungstênio e rênio, também têm sido utilizadas com sucesso na soldagem de materiais com elevado ponto de fusão.

1.3.5. Aporte térmico na Soldagem por FSW

Para a obtenção de uma solda de boa qualidade, os parâmetros do processo citados anteriormente devem ser determinados e combinados individualmente para cada liga, espessura do material a soldar, geometria da ferramenta e tipo de equipamento utilizado. Neste contexto, Wei *et al.*, (2011) propôs um modelo simplificado para o cálculo do aporte térmico, que leva em consideração o torque “T” medido em (N.m), extraído indiretamente da potência do motor do equipamento que esta realizando a soldagem por fricção, a velocidade de rotação “ ω ” em (rpm) e a velocidade de avanço “v” em (mm/min) da ferramenta, conforme é mostrado na Equação 1.

$$AT = \frac{2\pi T\omega}{v} = \left(\frac{J}{mm}\right) \quad (1)$$

A velocidade de rotação da ferramenta combinada com a velocidade de soldagem são as variáveis do processo que possuem destaque por auxiliarem na definição das condições de soldagem por FSW. Desta forma, Sutton *et al.*, (2003), Cederqvist e Reynolds (2002), relacionaram estas variáveis e consideraram as condições de soldagem da seguinte forma: condição de soldagem a quente, a frio ou um condição intermediária. Da mesma forma,

Vilaça *et al.*, (2005) apresentou resultados onde a razão numérica entre a velocidade de soldagem e a velocidade de rotação, definiram a soldagem em função da quantidade de calor gerada pelo trabalho de atrito e deformação. Estas condições podem ser observadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Condições de soldagem em função da velocidade de avanço e velocidade de rotação.

Condição de Soldagem	Razão das Variáveis (VR/VS)
A Quente	$VR/VS \geq 4$
Intermediária	$2 \leq VR/VS \leq 4$
A frio	$VR/VS \leq 2$

Fonte: Adaptado de Vilaça, *et al.*,(2005)

Assim torna-se interessante saber a quantidade de calor imposta pelo processo em função da velocidade de soldagem e velocidade de rotação, para produzir soldas saudáveis e isentas de defeitos.

Uma vez que aportes térmicos insuficientes durante o processo de soldagem por FSW, podem resultar em regiões internas da junta soldada com ausência de material, caracterizado pelo defeito do tipo falta de preenchimento ou *warmhole*, isso porque ocorre um menor atrito ou menor tempo de permanência da ferramenta sobre o material. Outro tipo de descontinuidade ocasionado por aquecimento insuficiente é a cavidade superficial causada por falta de preenchimento interno, ou defeito do tipo *groove*, formando uma trajetória contínua ao longo do cordão da solda, normalmente no lado do avanço da junta soldada (KUMAR *et al.*, 2008; MISHRA *et al.*, 2007).

Por outro lado, aportes térmicos muito elevados podem resultar em defeitos como rugosidade superficial, sendo resultado de uma deformação plástica excessiva. Nesta condição de deformação plástica, o material pode aderir na ferramenta, não sendo possível o controle de seu escoamento na região de contato com o ombro da ferramenta (ARBEGAST, 2008). Nesse contexto, o aporte térmico é um fator determinante para garantir uma solda de qualidade, sendo desejada uma combinação de parâmetros que resulte em uma solda livre de defeitos.

1.3.6. Configuração das Juntas para o Processo de FSW

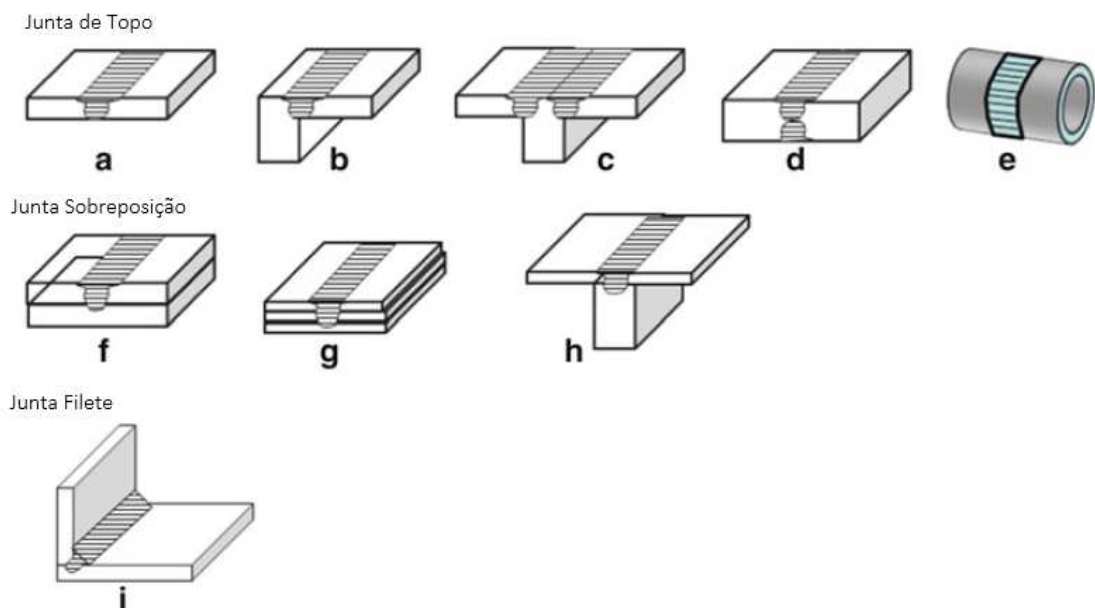
A grande maioria dos trabalhos de soldagem FSW tem sido realizada em juntas de topo lineares e com materiais de mesma espessura. Isto pelo fato do processo não requerer

nenhum material de adição, portanto, soldas filete não podem ser executadas. Embora o processo FSW seja muito flexível e uma variedade de juntas em uma, duas, ou três dimensões já foram demonstradas. Porém, a soldagem em muitas outras geometrias de junta foi demonstrada, entre as quais se destacam (THREADGILL *et al.*, 2003):

- Juntas de topo em materiais de espessuras dissimilares;
- Juntas de topo não lineares;
- Juntas sobrepostas;
- Juntas circunferenciais sobrepostas;
- Juntas circunferenciais de topo em tubos;
- Juntas de canto;
- Juntas T;
- Juntas flange / tubo;

Na Figura 15 podem ser observadas as configurações das juntas para o processo de FSW.

Figura 15 – Configuração de juntas para o processo de FSW: (a) junta topo, (b) topo em L, (c) topo em T, (d) duplo topo para chapas de grande espessura, (e) Circunferencial de topo em tubos, (f) sobreposição em T, (g) múltipla sobreposição, (h) sobreposição em T e (i) junta filete



Fonte: Adaptada de MISHRA, C. R., KUMAR, N., (2014)

Uma junta de topo simples foi a aplicada neste estudo, a mesma pode ser visualizada na Figura 15a. A junta de topo simples consiste de duas placas ou chapas com a mesma espessura, as quais são colocadas em uma placa de sustentação e fixadas firmemente para impedir que as juntas de topo encontradas estejam distantes. Na fase inicial do processo que consiste na penetração verticalmente da ferramenta, as forças são razoavelmente grandes e o cuidado extra é exigido para assegurar-se de que as extremidades das placas não se separem, desta forma, é importante que as peças a soldar estejam firmemente fixadas, impedindo assim qualquer movimento no sentido de separá-las da sua posição inicial. A ferramenta não consumível, já em rotação penetra na linha comum e atravessada ao longo desta linha quando o ombro da ferramenta está em contato com a superfície das placas, produzindo uma solda ao longo da linha de continuidade. Muitas outras configurações podem ser produzidas pela combinação de junções das peças no processo de FSW, tais como as junções em ângulo (Figura 15i), são possíveis e necessárias para algumas aplicações da engenharia (MISHRA *et al.*, 2005).

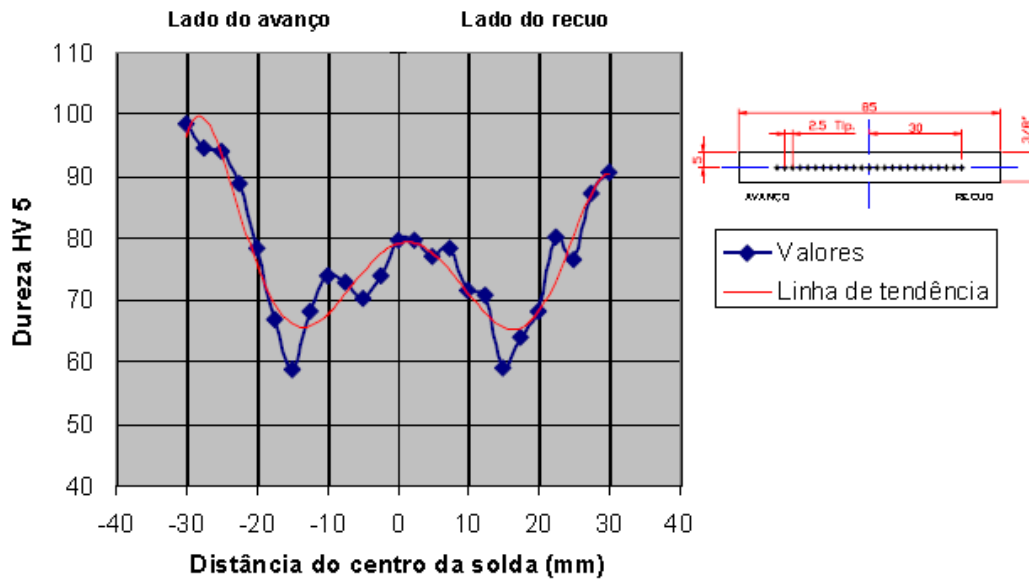
Vale ressaltar que nenhuma preparação especial é necessária para junções de topo no processo de FSW (MISHRA *et al.*, 2005). Duas placas de metal limpas podem facilmente ser unidas sob a forma de junções de topo sem muitas preocupações sobre as condições de superfície das placas.

1.3.7. Propriedades Mecânicas das Juntas Processadas por FSW

Dawes *et al.*, (1999), afirmam que soldas de alto desempenho com propriedades muitas vezes iguais ou superiores às do metal de base, podem ser produzidas pelo processo de soldagem FSW. De acordo com Mishra *et al.* (2005) o bom desempenho das juntas soldadas produzidas por FSW, está muitas vezes relacionado pelo fato do processo por FSW apresentar uma significativa alteração microestrutural, que por sua vez proporcionam variações nas propriedades mecânicas das juntas soldadas. Entretanto esta é uma afirmação que precisa ser considerada com cuidado e bastante atenção às particularidades de cada aplicação nos projetos de engenharia, visto que estas alterações dependem fortemente das condições de soldagem (que devem ser otimizadas) e do tipo de material que se está soldando (inclusive tratamento térmico ou condições de deformação mecânica).

Hiller e Ferreira (2005), estudaram o perfil transversal de dureza das soldas FSW no regime permanente, e constataram que diferentemente das soldas por fusão que apresentam a forma de um “U”, no processo FSW o perfil apresenta a forma de um “W”. Na Figura 16 é apresentado o perfil de dureza da liga de alumínio 5052, estudada pelos autores.

Figura 16 – Perfil de dureza da junta soldada por FSW – Liga Al 5052



Fonte: HILLER E FERREIRA, (2005)

Segundo KIM *et al.*, (2006) o perfil de dureza na forma de um “W” está relacionado as mudanças microestruturais na região do núcleo da solda, o que confere um aumento de dureza e resistência devido ao trabalho mecânico a quente e conseqüentemente refinamento na estrutura granular, dispersão de compostos intermetálicos, quebra da estrutura dendrítica original e a reduzida probabilidade de formação de vazios. Também é comprovado que na ausência de defeitos de soldagem, as soldas produzidas com as ligas de alumínio recozidas, fundidas e forjadas, geralmente não produz perdas nas propriedades do material em relação ao material de base, quando processadas pelo processo de FSW. Está afirmação é confirmada pelo ensaio de tração, onde as falhas ocorrem no material de base, bastante afastado da região da solda.

Na grande maioria dos casos a dureza da região soldada não é influenciada pela condição inicial do material, ou seja, níveis de dureza no núcleo da solda são os mesmos tanto para um liga endurecida quanto para uma recozida (THOMAS *et al.*, 1999). Os menores valores de dureza parecem ocorrer a uma pequena distância do núcleo da solda e as falhas por torção costumam ocorrer nesta região.

Russel (2004), realizou um estudo onde correlacionou a eficiência da junta soldada com a dependência dos parâmetros de soldagem, material de base e geometria da ferramenta utilizada. Em seu estudo pode comprovar que as ligas de Al 2024-T4 e Al 5083-H11 nas espessuras de 1.2mm e 6.4 respectivamente, obtiveram os maiores valores de eficiência da

resistência ao escoamento em relação ao material de base, chegando a valores próximos a 105%, já para a liga Al 7075-T7 com espessura de 25mm, este valor ficou próximo de 50%.

ERICSSON *et al.*, (2002) e GUERRA *et al.*, (2003), revelam ainda que as soldas FSW apresentavam bom desempenho em relação à fadiga. Onde em seus estudos encontraram resultados comparáveis aos do metal de base e desempenho igual ou superior ao atingido com processos de soldagem convencionais por fusão, como por exemplo, MIG e TIG, foram reportados, com a vantagem de apresentarem menor dispersão estatística.

A Tabela 7 mostra uma comparação entre valores de resistência à ruptura para diversas ligas de alumínio na condição inicial e após soldado.

Tabela 7 – Propriedades mecânicas de amostras de alumínio soldadas por FSW

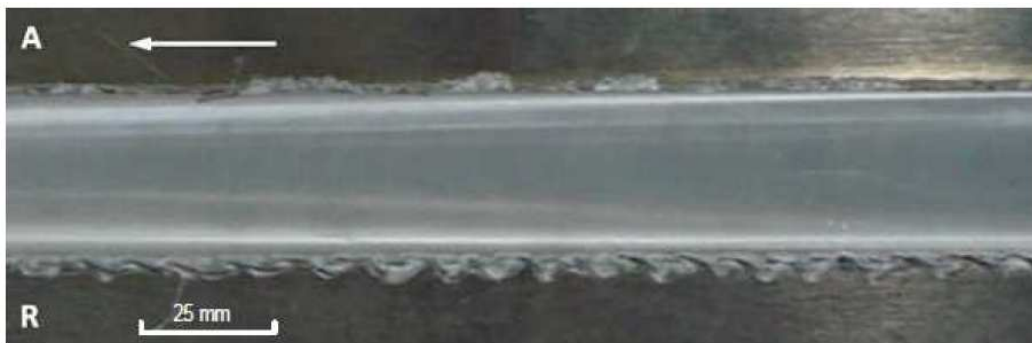
Material	Limite de escoamento (0,2%) [Mpa]	Limite de Ruptura [Mpa]	Alongamento [%]	Fator de soldagem: Ruptura FSW/ Ruptura Metal Base
2024-T3 Base	302	445	14,5	N/A
2024-T3 Base	304	432	7,6	0,87
5083 - O Base	148	298	23.5	N/A
5083 - O FSW	141	298	23.0	1.00
5083 - H321 Base	249	336	16.5	N/A
5083 - H321 FSW	153	305	22.5	0.91
6082 - T6 Base	286	301	10.4	N/A
6082 - T6 FSW	160	254	4.85	0.83
6082 - T6 FSW e Envelhecido	274	300	6.4	1.00
6082 - T4 Base	149	260	22.9	N/A
6082 - T4 FSW	138	244	18.8	0.93
6082 - T4 FSW e Envelhecido	285	310	9.9	1.19
7108 - T79 Base	295	370	14	N/A
7108 - T79 FSW	210	320	12	0.86
6082 - T4 FSW e Envelhecido	245	350	11	0.95
7108 - T79 Base	295	370	14	N/A
7475 - T76	420	490	9	N/A
7475 - T76 FSW	381	465	12,8	0,94
7475 - T76 FSW e Envelhecido	476	512	10	1,04

Fonte: Adaptada de KALLEE *et al.* (2001)

1.3.8. Fluxo de Material e Assimetrias do Processo

Thomas *et al.*, (1999), sugere que a assimetria do processo se dá devido à relação entre os movimentos de rotação e translação da ferramenta durante o processamento. Na Figura 17 é possível verificar que a solda realizada pelo processo FSW produz uma estrutura assimétrica em relação à linha da junta. Esta estrutura assimétrica se torna evidente por meio da diferença de quantidade de rebarbas nos lados do avanço e recuo da solda.

Figura 17 – Fotografia da superfície de uma solda FSW que dá indicações da assimetria do processo



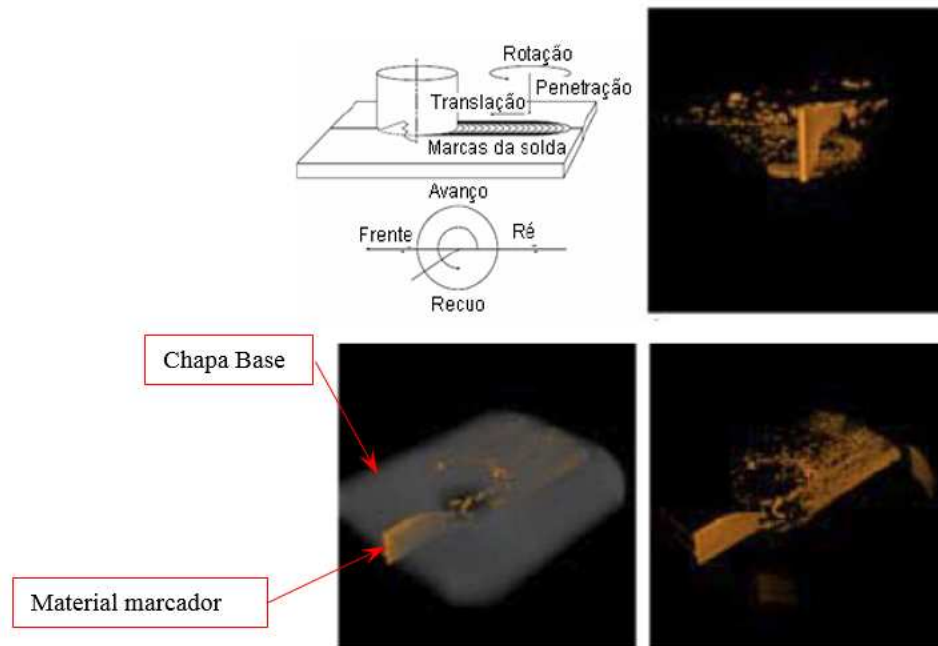
Fonte: ALMEIDA, 2013

O efeito que as variações impostas que o método tem na união soldada, podem ser identificadas pela assimetria do processo, juntamente com a combinação de outras condições de processo nas propriedades e morfologia da solda (GUERRA *et al.*, 2003).

A rotação do ombro da ferramenta na superfície da solda, contribui de forma significativa para caracterização do fluxo do material ao redor da ferramenta durante a soldagem. Sendo que o material flui de forma bastante assimétrica na região próxima à superfície da solda em comparação ao material que flui ao redor do pino da ferramenta (GUERRA *et al.*, 2003).

Esta assimetria do processo na região próxima à superfície da solda foi apresentada pelo trabalho de Schmidt *et al.* (2006), onde foram realizadas soldas pelo processo FSW em juntas de topo com chapas de alumínio adjacentes entrepostas por um material marcador. A soldagem era iniciada e então subitamente interrompida, sendo a ferramenta de soldagem retirada, e através da análise por tomografia computadorizada, a porção de material contendo a solda incluindo o ponto de parada, era então verificada. As imagens da tomografia computadorizada são apresentadas na Figura 18.

Figura 18 – Imagem da tomografia computadorizada do fluxo de material na soldagem FSW



Fonte: Adaptada de SCHMIDT *et al.*, 2006

As imagens tridimensionais da Figura 18 apresentam os resultados de um dos corpos de prova do estudo realizado por Schmidt *et al.* (2006), onde podemos observar a região cinza (suprimida em alguns casos) representa o material de base soldado, enquanto as regiões douradas representam o material marcador inserido ao longo da linha da junta (intacto na área à frente da solda, não afetada pela ferramenta) e disperso no interior do cordão de solda, após a passagem da ferramenta.

Na Figura 18, nota-se que o material utilizado como marcador após ser afetado pela ferramenta de soldagem, depositou-se principalmente no lado do recuo, por onde flui em maior quantidade, comprovando assim a característica assimétrica do fluxo e deposição do material no interior da junta soldada durante o processamento.

Para que se possa evitar problemas durante a realização das soldas pelo processo de FSW, é necessário ainda que de maneira aproximada, fazer uma investigação preliminar dos parâmetros que influenciam na qualidade da junta soldada. Visto que a partir das observações citadas acima, temos uma influência destes parâmetros no fluxo do material.

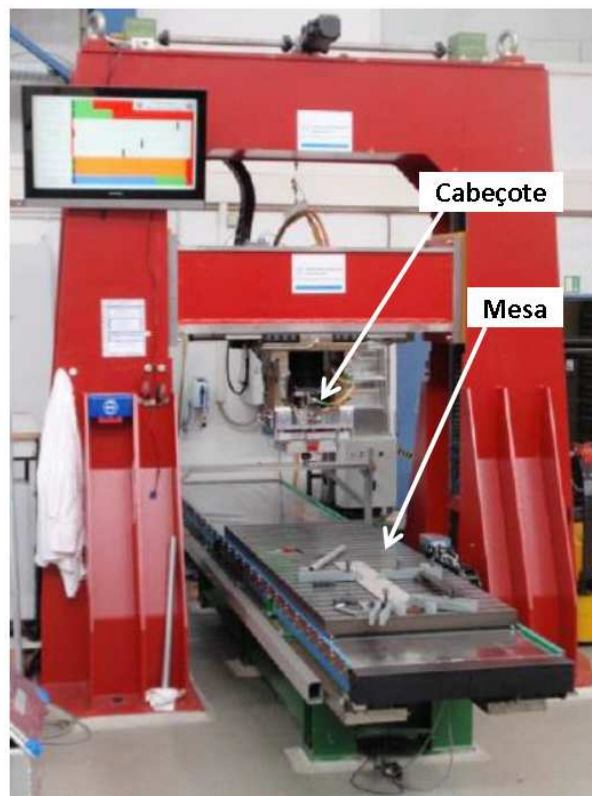
1.3.9. Equipamentos para Soldagem FSW

Muito dos trabalhos pioneiros do processo de FSW foram realizados em máquinas fresadoras CNC. Por ser um processo fundamentalmente mecânico a soldagem FSW é afetada pelos movimentos da ferramenta de soldagem impostos pelo equipamento de soldagem. Desta

forma, a adaptação da fresadora CNC ao processo de FSW se torna interessante, visto que apresentam grande rigidez, suportando assim as altas cargas verticais que são aplicadas às peças a serem soldadas. Outros parâmetros que se tornam importantes na utilização de fresadoras CNC é a grande variabilidade dos parâmetros como, inclinação do cabeçote, ampla faixa de rotações e velocidades de translação da mesa (velocidade de avanço), bem como o monitoramento da força axial, parâmetro também importante no processo (COOK *et al.*, 2003).

Dependendo da aplicação, as máquinas FSW disponíveis no mercado podem ter diversas construções. Elas podem ser baseadas no conceito de um pórtico com cabeçote ou mesa móvel para pequenas ou grandes peças e chapas, ver Figura 19.

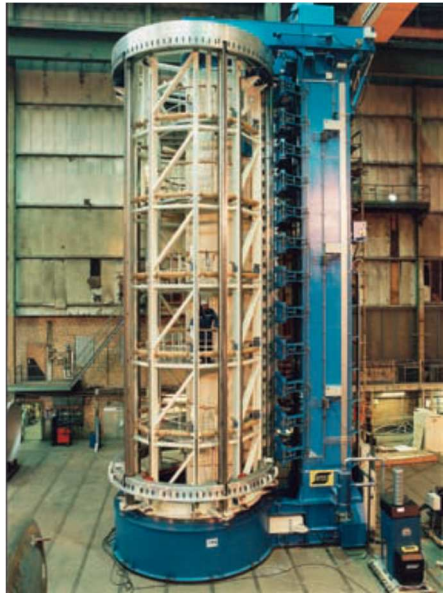
Figura 19 – Equipamento de FSW no conceito de pórtico.



Fonte: KOZMINSKI, 2015

Podem ter a viga principal na posição vertical, para soldagem de cilindros nesta posição, ver Figura 20.

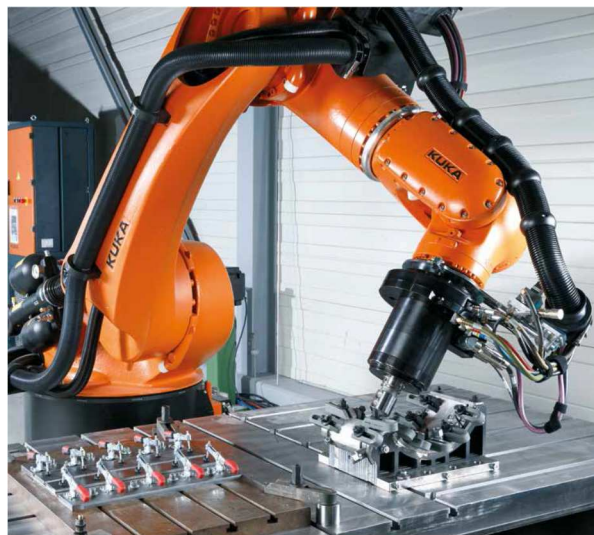
Figura 20 – Equipamento de FSW com viga principal na posição vertical.



Fonte: ESAB, 2015

Podem ser similares a robôs utilizados nos processos de soldagem convencional, com braço manipulador, neste caso são utilizados para aplicações mais complexas, ver Figura 21.

Figura 21 – Equipamento de FSW tipo robô.



Fonte: KUKA System, 2015

Ou ainda podem ser do tipo conhecido como “*tripod*”, com cabeçote suportado em três pontos por cilindros hidráulicos e até 5 graus de liberdade, possibilitando desta maneira grande versatilidade de movimentos assim como em termos de acesso para soldagem de peças relativamente pequenas (RUSSEL, 2004), ver Figura 22.

Figura 22 – Equipamento de FSW com 5 graus de liberdade.



Fonte: SCHILIVE, 2010

Uma característica marcante e comum das máquinas utilizadas no processo de soldagem por FSW deve ser sua robustez. Pois ela deve ser projetada ou adaptada de tal forma que suporte elevados esforços mecânicos gerados durante a realização do processo, principalmente na direção perpendicular à superfície de contato da ferramenta, mas também no plano que contém o cordão de solda, na direção do avanço, além de outra força lateral secundária, resultante do movimento de rotação da ferramenta HILLER (2007).

O equipamento de FSW que mais se difere dos demais apresentados é o robô, por não possuir rigidez suficiente conforme a maioria das máquinas fresadoras. No caso da utilização de robôs para o processo, o mesmo deve ser dotado de um sistema de controlador de força sobre a força aplicada durante a soldagem para que o caminho programado seja cumprido. Segundo Cook *et al.* (2003), pequenas variações na posição da ferramenta implicam em grandes modificações na intensidade da força axial sobre as peças sendo soldadas, uma vez que a força no início da soldagem pode ser de 3 a 5 vezes maior que no decorrer do processo.

Desta forma, a adequação da máquina ao processo e vice-versa deve ser avaliada previamente em relação à aplicação das soldas geradas, às limitações dos parâmetros de soldagem como a rotação e avanço, ao tamanho das peças que se deseja unir, assim como a capacidade da máquina de suportar as cargas impostas pelo processo (ALMEIDA, 2013).

1.3.10. Defeitos na Soldagem por FSW

Uma boa escolha dos parâmetros intrínsecos do processo de FSW, permitirá obter uma junta soldada com o mínimo ou isenta de defeitos, o que resultará em uma soldagem de melhor qualidade e com melhores propriedades mecânicas. Segundo James *et al.*, (2004), as quantidades de defeitos decorrentes do processo de soldagem por atrito são menores do que nos processos típicos de soldagem por fusão.

Leonard (2001), classifica em três grupos, os tipos de defeitos característicos que podem ocorrer no processo de soldagem por FSW, são eles:

- Defeitos do tipo vazio
- Defeitos na raiz da solda
- Defeitos na superfície

Defeitos do tipo vazio: este defeito manifesta-se sobre a forma de um canal longitudinal à direção de soldagem, mais ou menos contínuo. Os vazios são geralmente formados entre o núcleo da solda e a interface com a ZTMA, geralmente no lado do avanço. Nem todos os vazios aparecem na superfície, o que indica que apenas um exame visual não é suficiente para detectar sua existência. Pequenos vazios chamados poros também podem ser encontrados no interior do núcleo da solda (KIM *et al.*, 2006).

Uma das possíveis causas para o aparecimento deste defeito está relacionada a uma pressão inadequada da ferramenta na superfície da solda, e pela geometria do pino não ser adequada para a espessura a soldar, ou também sob a combinação de altas velocidades de deslocamento e baixas rotações. Essas ocorrências são geralmente associadas à falta de aporte de calor na junta, quando o avanço por rotação é alto o material plastificado é menos aquecido e é mais difícil de ser forjável pelo ombro, o que pode resultar em vazios (HILLER, 2007).

KIM *et al.*, (2006) reporta a ocorrência de vazios para combinações de alta rotação com altos avanços. Neste caso a causa apontada para o problema é um fluxo anormal e descontínuo do material plastificado no interior da solda durante a realização do processo, que é mais acentuada na fase inicial da junta soldada, devido à fluidodinâmica associada com o escoamento de material no estado sólido.

Para que seja evitado os defeitos do tipo vazio é necessário ajustar um valor correto para a penetração do ombro da ferramenta, que vai atuar na força vertical de soldagem, além da seleção ideal dos parâmetros como velocidade de rotação e velocidade de avanço, que vão

garantir um fluxo normal do material (KIM *et al.*, 2006). Nas Figuras 23 e 24 é possível observar o defeito do tipo vazio.

Figura 23 – Defeitos do tipo vazio, totalmente interno



Fonte: SCHILIVE, 2010

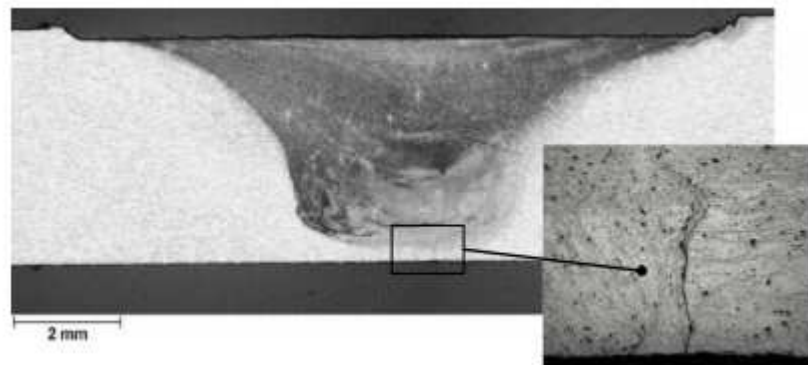
Figura 24 – Defeitos do tipo vazio, aparente a superfície da solda



Fonte: ALMEIDA, 2013

Defeitos na raiz da solda: este defeito geralmente acontece quando se tem uma penetração inadequada do pino da ferramenta (comprimento do pino muito menor que a espessura da chapa a soldar), por um desalinhamento da ferramenta de soldagem em relação à linha da junta, ou ainda quando existe uma camada de óxido muito espessa na linha da junta que não é completamente dispersada durante a soldagem. É considerado o defeito mais fácil de se detectar, pois diferentemente dos defeitos de vazio interno, o defeito de raiz geralmente é visto por exame visual. Segundo Leonard (2001) o defeito de raiz é considerado o mais destrutível em termos de propriedades mecânicas. O defeito do tipo raiz pode ser visualizado na Figura 25.

Figura 25 – Defeitos de raiz, remanescente da linha de interface das peças na base da solda



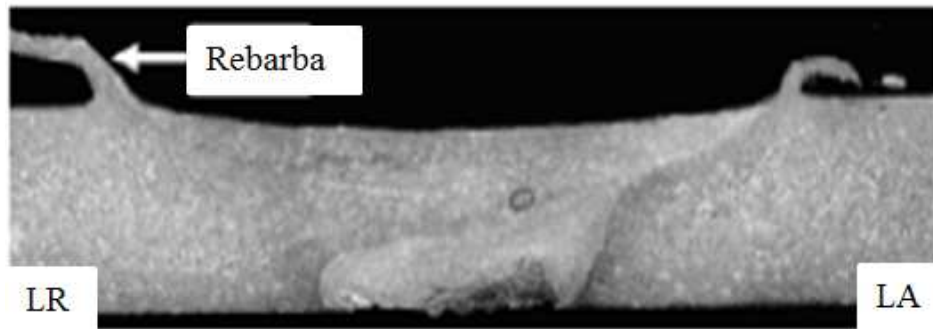
Fonte: ZETTLER *et al.*, 2004

Para que sejam evitados os defeitos na raiz da solda, é aconselhável a utilização de uma ferramenta com um pino de tamanho adequado, bem como alinhar a ferramenta em relação à linha da junta. Também é necessário eliminar a camada de óxido na interface das peças soldadas. Segundo estudos realizados por THOMAS *et al.*, (1999), o comprimento do pino para que não ocorra defeitos na raiz da solda deve ter um comprimento na ordem de 3 à 5 décimos menor que a espessura da chapa, por exemplo, para solda de chapas com espessura de 3,25mm o comprimento do pino de ser da ordem de 2,75 à 2,95mm.

Christiner e Sylva *apud* Leonard (1996) relatam que outra possível causa dos defeitos na raiz da solda é o excessivo afastamento das peças a serem unidas. Seus estudos comprovam que afastamentos de até 36% à espessura podem ser tolerados sem alteração significativa na resistência das soldas. Contudo, a partir deste limite defeitos de soldagem podem aparecer.

A rebarba excessiva, que ocorre quase sempre em maior quantidade no lado do recuo, é um fenômeno que podem ocorrer na superfície da solda e também ser considerado como defeito. Contudo, devido ao seu menor efeito destrutivo em relação às propriedades mecânicas da solda, eles não costumam ser investigados. Porém a rebarba pode levar a formação de outros defeitos, como por exemplo, um vazio devido à ejeção excessiva de material da junta, ou resultar num afinamento local da peça soldada. Desta maneira, comprometendo as propriedades mecânicas da junta soldada. O problema é normalmente associado a um sobreaquecimento da solda (HILLER, 2007). Na Figura 26 é possível verificar o defeito superficial do tipo rebarba.

Figura 26 – Defeito de superfície, excesso de rebarbas principalmente no lado do recuo



Fonte: Adaptada de LEONARD, 2001

Segundo Leonard (2001), o método de detecção dos defeitos do tipo vazio podem ser identificados por ensaios de raios-X convencional ou ultrassom. Já para inspeção dos defeitos na raiz da junta soldada, ao contrário das técnicas não destrutivas mais comuns como líquidos penetrantes, radiografias e inspeção visual, não são recomendadas. O único método 100% confiável para inspeção do defeito na raiz é o teste de dobramento com a raiz em tração, o que é obviamente um ensaio destrutivo.

1.4. Vantagens e Desvantagens do Processo FSW

Conforme estudos observados por Amâncio Filho (2002), Willians (2001), Cavaliere *et al.* (2005) e Almeida (2013), a soldagem por FSW apresenta algumas vantagens quando comparadas aos métodos convencionais por fusão, tais como MIG (Metal Inert Gas) e TIG (Tungsten Inert Gas), em que as propriedades obtidas na soldagem FSW se comparam e muitas vezes superam as soldas obtidas por processos convencionais para ligas de alumínio. No entanto o processo também apresenta algumas limitações.

A Tabela 8 apresenta as vantagens e desvantagem do processo por FSW, onde percebe-se que as vantagens são maiores quando comparada com as desvantagens. Isso se deve ao fato da procura cada vez mais intensa por redução de peso e consequente diminuição do consumo de combustível dos veículos automotores, bem como ao aumento do desempenho dos mesmos, a indústria automotiva está cada vez mais introduzindo as ligas de alumínio em seus produtos. Desta forma, podemos prever que a tecnologia de soldagem por FSW é uma tecnologia promissora, uma vez que permite a união de qualquer liga de alumínio sem adição de material, sem a preocupação da compatibilidade entre as ligas.

Tabela 8 – Vantagens e Desvantagens do Processo por FSW.

Vantagens	Desvantagens
União no estado sólido	Sistema de fixação de elevada rigidez
Boa resistência mecânica e a fadiga	Auto custo com equipamento de soldagem
Baixa distorção pós-soldagem	Baixa flexibilidade do equipamento de soldagem
Ausência de porosidade	Ferramenta específica para cada liga a ser soldada
Microestrutura refinada	Tempo elevado para preparação da máquina
Não produz fuligem ou exalação de gases	Difícil determinação dos parâmetros
Não requer metal de adição	
Não necessita gás de proteção	
Permite a união de qualquer tipo de liga de alumínio	
Permite a união de ligas dissimilares de alumínio	
Sem geração de respingos	
Energeticamente eficiente	

Fonte: Adaptada de ALMEIDA, 2013

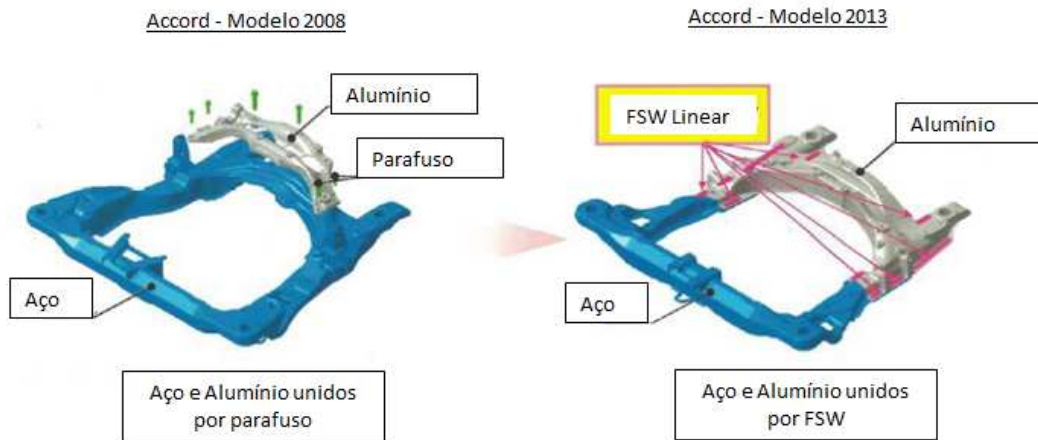
1.5. Aplicações do Processo de FSW

Na atualidade existem inúmeras aplicações do processo de FSW relatadas na literatura, sendo que a grande parte dos estudos dirigidos a esta técnica estão concentrados na indústria automobilística, marítima e aeroespacial.

Na indústria automobilística devemos salientar o feito conseguido pela Honda Motor Co., a qual foi a primeira empresa automotiva a desenvolver a tecnologia robotizada para soldagem de aço com alumínio e aplicada na produção em série de um veículo, trata-se do Honda Accord modelo 2013. Conforme dados divulgados pela própria empresa a união de aço e alumínio no sub conjunto do chassi permitiu uma redução de cerca de 25% do peso (6kg) da peça, quando comparada com o modelo anterior, que utilizada a união de aço e alumínio através de parafusos. Com a redução do peso do automóvel, houve um aumento da economia de combustível.

Na Figura 27 podemos observar a comparação entre o modelo do sub conjunto do chassi anterior e o modelo atual, onde permitiu um aumento da utilização do alumínio na estrutura do veículo.

Figura 27 – Comparação entre o sub-conjunto do Honda Accord 2008 e Accord 2013, este último utilizando o processo de FSW.



Fonte: Adaptada de KUSUDA, Y., 2013

Na indústria marítima, em 2004 a SAPA Group na Suécia, forneceu painéis para empresa Kvaerner Masa Yards Inc. na utilização do maior navio cruzeiro do mundo, o Voyager. O navio utilizou painéis com perfis soldados por FSW que mediam 34m². Na Figura 28 é possível observar os painéis fornecidos pela SAPA, bem como os detalhes do processo de união por FSW.

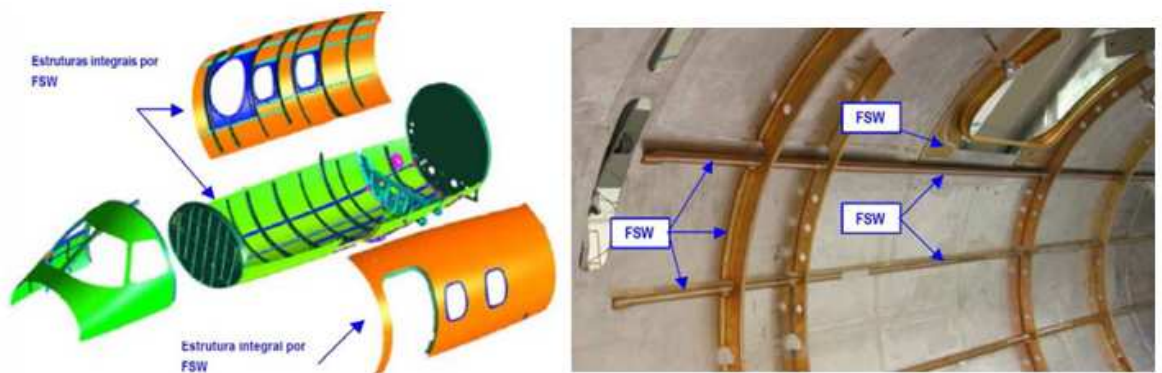
Figura 28 – Painéis fornecidos pela SAPA, detalhes do processo de união por FSW.



Fonte: Adaptada de FIORAVANTI, A.S., 2008

As aplicações na indústria aeroespacial, vão desde aeronaves para voos comerciais como é o caso da empresa Eclipse Aviation, que desde 2002 utiliza o processo de FSW para soldagem da fuselagem da aeronave Eclipse 500, construída por três estruturas integradas pelo processo de FSW. Até a indústria aeroespacial, onde podemos citar a NASA, que juntamente com a empresa Lockheed-Martin vem trabalhando na utilização do processo de FSW para soldagem dos tanques de combustível externos do Ônibus Espacial (FIORAVANTI, 2008). Detalhes das aplicações do processo de FSW na fuselagem da aeronave Eclipse 500 e do Ônibus Espacial, podem ser vistas nas Figuras 29 e 30.

Figura 29 – Pannel integral da fuselagem da aeronave Eclipse 500.



Fonte: Adaptada de FIORAVANTI, A.S., 2008

Figura 30 – Equipamento de FSW utilizado nos tanques de combustíveis do ônibus espacial.



Fonte: Adaptada de FIORAVANTI, A.S., 2008

2. OBJETIVOS E METODOLOGIA

Este trabalho tem como objetivo principal a avaliação de parâmetros necessários para obtenção de juntas soldadas pelo processo FSW isentas de defeitos e que apresentem resistência mecânica comparável àquela obtida através dos processos convencionais de soldagem. Além disso, foi estabelecida uma correlação entre a história térmica associada ao processo de FSW, a microestrutura produzida e o desempenho mecânico das juntas soldadas.

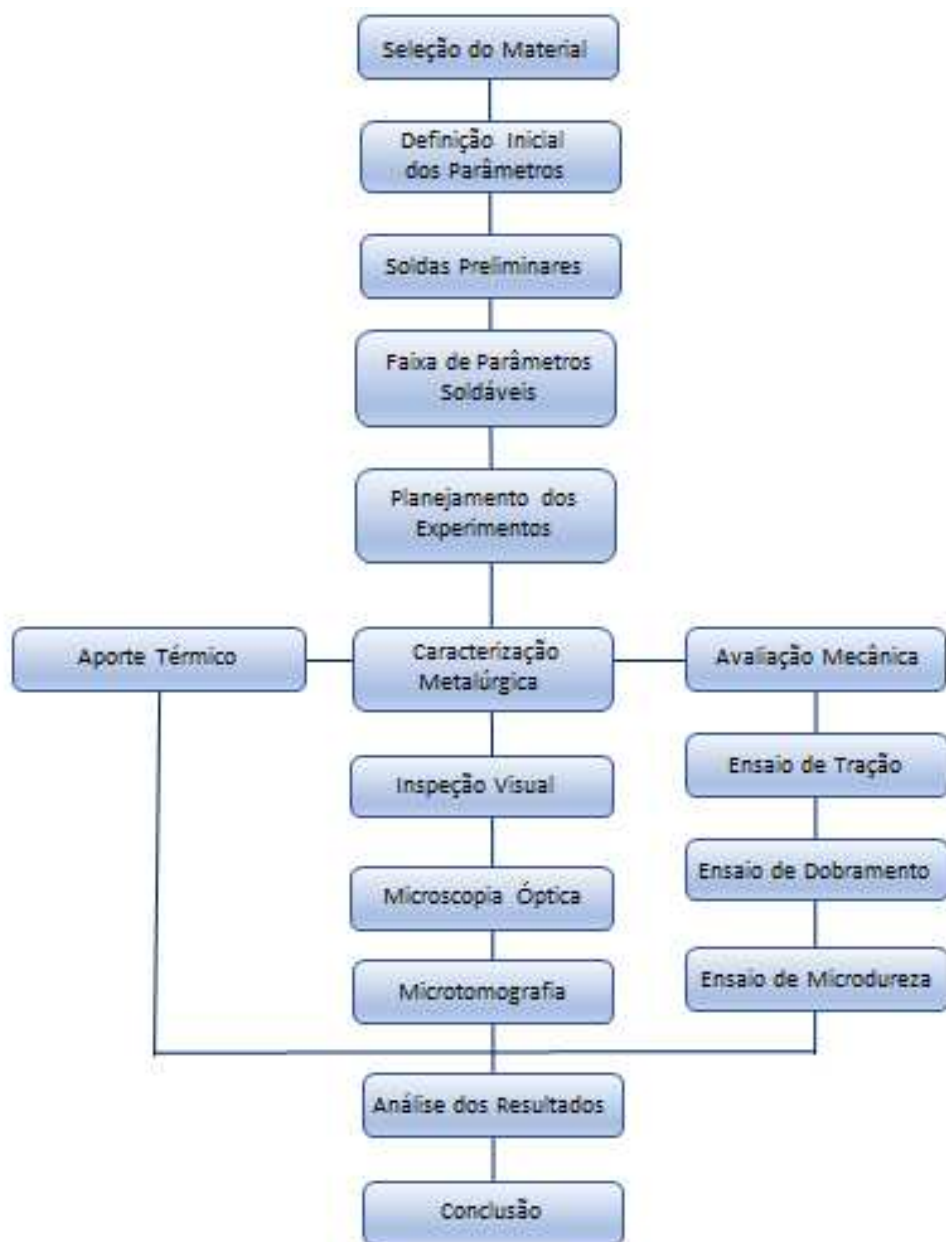
Para isto, a seguinte metodologia foi adotada:

- Realização de uma revisão bibliográfica sobre os temas abordados no trabalho, a fim de obter uma melhor compreensão dos parâmetros envolvidos na soldagem pelo processo FSW.
- Avaliação da influência das variáveis do processo sobre a qualidade da junta soldada pelo processo FSW.
- Projeto e fabricação da geometria da ferramenta de soldagem FSW.
- Especificação de uma metodologia de soldagem para o processo FSW com base nos equipamentos disponíveis e estabelecimento de procedimentos de soldagem para a obtenção de juntas isentas de defeitos.
- Execução de testes não-destrutivos e destrutivos para caracterização das soldas.
- Comparação dos resultados de desempenho das juntas soldadas correlacionando com a história térmica do processo.
- Discussão de resultados e conclusões.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste item é descrito em detalhes os equipamentos, dispositivos auxiliares, materiais, procedimentos, considerações e premissas utilizadas para realização de soldas pelo processo FSW em chapas de alumínio da liga 5182-O. Podemos visualizar o fluxograma das etapas do estudo na Figura 31.

Figura 31 – Fluxograma das etapas envolvidas no procedimento experimental



Fonte: Próprio Autor.

O fluxograma da Figura 31 apresenta a metodologia utilizada neste estudo. Onde inicialmente definiu-se o material de base a ser utilizado, depois os parâmetros iniciais de soldagem a partir da revisão bibliográfica. No segundo passo as soldas foram realizadas pelo processo de FSW, onde passaram por inspeção visual e ensaios mecânicos de dobramento e tração, a fim de definir os parâmetros ideais para produzir novas soldas.

Após a definição dos parâmetros ideais, as soldas passaram por análise da história térmica, análise macro e microestrutural e avaliação mecânica. Para avaliar a qualidade e as características superficiais das juntas soldadas, foi realizada inspeção visual. A partir da microscopia óptica foram obtidas macrografias para caracterizar a secção transversal das soldas, micrografias para caracterizar a morfologia da junta soldada, e também a técnica de microtomografia com Raios X, permitiu avaliar a integridade das soldas e quantificar possíveis defeitos do tipo vazio no interior das juntas soldadas. Por fim, foi realizada uma avaliação mecânica das juntas soldadas através de ensaios de tração, dobramento e microdureza.

3.1. Materiais

3.1.1. Metal Base

Atualmente o aperfeiçoamento da tecnologia FSW tem possibilitado inúmeras aplicações industriais, porém restritas quase que somente às ligas de alumínio, embora algumas iniciativas recentes indiquem uma expansão do processo para outras ligas metálicas, inclusive o aço.

Neste trabalho foi utilizada a liga Al 5182-O para a realização dos experimentos, a qual possui propriedades mecânicas correspondentes à condição de tratamento O, ou seja, recozida. A composição química e propriedades mecânicas podem ser vistas na Tabela 9.

Esta liga é amplamente utilizada em aplicações marítimas por sua boa resistência à corrosão neste ambiente. Conforme pode ser visualizado na Tabela 9, o principal elemento da liga é o magnésio, que é mais efetivo comparado com o manganês (elemento utilizado em outras séries de ligas) em relação ao aumento da resistência, conferindo às ligas da série 5xxx uma razoável resistência mecânica.

Tabela 9 – Composição química e propriedades mecânicas da liga Al 5182-O

Composição Química	
Manganês- Mn(%)	0,20 – 0,50
Silício – Si (%)	0,20 MÁX.
Cobre – Cu (%)	0,15 MÁX.
Titânio – Ti (%)	0,10 MÁX.
Cromo – Cr (%)	0,10 MÁX.
Magnésio-Mg(%)	4,0 – 5,0
Zinco-Zn(%)	0,25 MÁX.
Ferro-Fe(%)	0,35 MÁX.
Propriedades Mecânicas	
Limite Escoamento (N/mm ²)	110 MÍN.
Limite Resist. Tração (N/mm ²)	255 - 315
Along. (%)	13 MÍN.

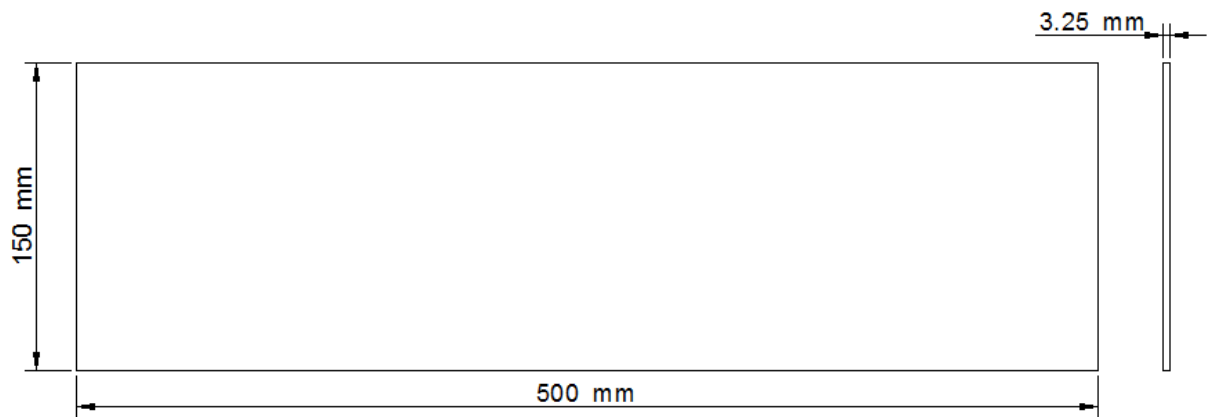
Fonte: Adaptada do Catálogo Novelis, (2015)

3.1.2. Preparação dos Corpos de Prova para Soldagem FSW

Os corpos de prova utilizados para soldagem pelo processo FSW foram confeccionados de uma chapa comercial com espessura nominal de 3,25 mm, nas dimensões de 150 x 500 mm. Os corpos de prova destinaram-se para realização de pré-testes para definição dos parâmetros adequados de soldagem e também para realização com os parâmetros já estabelecidos.

Não houve preparação especial das juntas dos corpos de prova utilizados no processo FSW, visto que os mesmos foram cortados em máquina laser, modelo Laser Bysprint 3015 do fabricante Bystronic, com potência total de 2200 Watts, a qual garante tolerâncias dimensionais de ± 0.15 mm para chapas de espessura 3,25 mm, tolerância está estabelecida através de testes práticos. Na Figura 32 é possível observar o desenho do corpo de prova.

Figura 32 – Corpo de prova utilizado no processo FSW



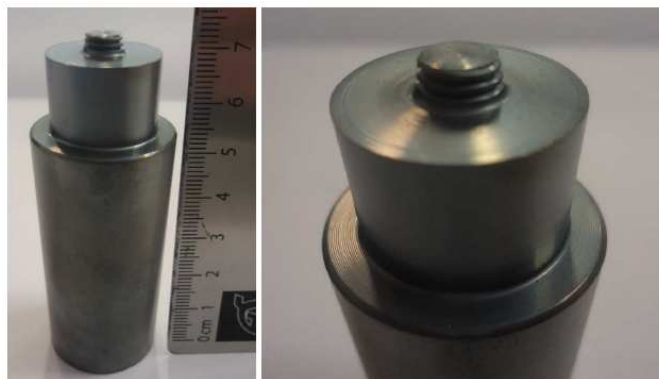
Fonte: Próprio Autor

3.1.3. Ferramenta de Soldagem FSW

Para definição da geometria da ferramenta, basicamente foram levados em consideração os dados de referências bibliográficas, principalmente Mishra *et al.* (2005). Desta maneira uma ferramenta foi projetada e fabricada, a geometria de pino escolhida foi a cônica com rosca, o perfil roscado contribui para distribuição e redução das forças envolvidas no processo na fase de imersão da ferramenta. A ferramenta é composta por um corpo, utilizado para a fixação junto a pinça da máquina fresadora, e de um pino com a geometria citada anteriormente.

A ferramenta é inteiriça e usinada em aço VF 800 AT. Na Figura 33 é apresentada a ferramenta utilizada na soldagem, bem como detalhes do ombro e pino usinados.

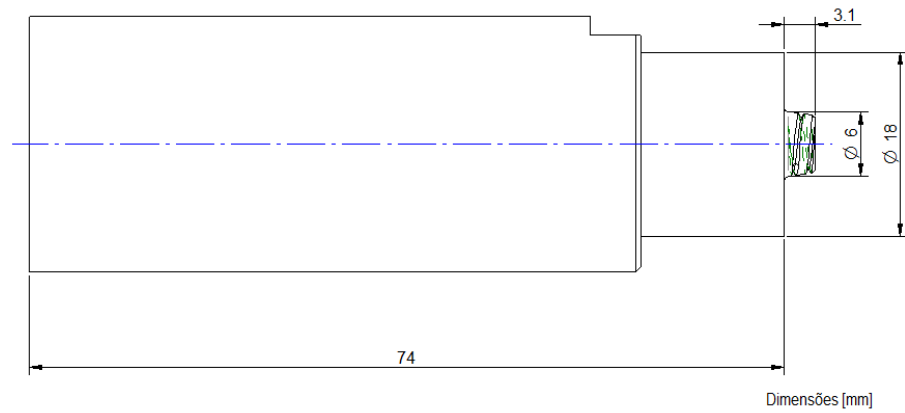
Figura 33 – Ferramenta para soldagem FSW e detalhes do ombro e pino.



Fonte: Próprio Autor.

Na Figura 34 é apresentado um desenho esquemático da ferramenta com as dimensões.

Figura 34 – Desenho esquemático da ferramenta para processo de FSW.



Fonte: Próprio Autor.

As ferramentas foram usinadas em uma máquina Multitarefa INT_J200 do fabricante Mazak, como pode ser visualizado na Figura 35.

Figura 35 – Máquina Multitarefa INT_J200, utilizada para usinagem das ferramentas.



Fonte: Próprio Autor.

3.2. Equipamentos

3.2.1. Máquina Adaptada para Soldagem FSW

Para a realização deste trabalho uma máquina especificamente projetada para a realização das soldas por FSW não estava disponível, razão pela qual uma máquina fresadora CNC foi adaptada para realização dos testes.

Desta maneira, houve a necessidade de avaliação prévia da adequação da máquina ao processo e vice-versa. As limitações de parâmetros de soldagem como rotação e avanço foram analisadas juntamente com a capacidade da máquina de suportar cargas impostas pelo processo. Alguns dispositivos e variáveis do processo foram adaptados para que a realização dos experimentos fosse viável utilizando o equipamento disponível, incluindo a geometria das ferramentas, os suportes e fixações, assim como alguns parâmetros de soldagem.

Figura 36 – Máquina fresadora CNC Integrex e1060V.



Fonte: Próprio Autor.

Os experimentos foram realizados através de uma adaptação da máquina fresadora de cinco eixos, modelo Integrex e1060V do fabricante Mazak, conforme pode ser visualizado na Figura 36, a mesma possui potência de 37 kW, velocidade de rotação de 1 a 10000 RPM, velocidades de deslocamento da mesa de até 40 m/min, inclinação do cabeçote de -30° até 120°, utilizando a ferramenta citada anteriormente, especialmente projetada para soldagem pelo processo FSW, apoios, fixadores e elementos de fixação próprios. A fresadora utilizada permite que parâmetros de rotação, direção, velocidade de avanço, profundidade de penetração e inclinação do cabeçote, sejam alterados no decorrer do processo, em função de programação previamente realizada e inserida através de comandos computadorizados na máquina.

Devido à preocupação em relação a adequação da máquina aos esforços oriundos do processo de soldagem FSW, através de uma consulta técnica ao fabricante foram obtidos os limites de força que o equipamento pode suportar. Os seguintes valores foram informados pelo fabricante:

Fuso do eixo X (Longitudinal) = 16,7 kN

Fuso do eixo Y (Transversal) = 16,7 kN

Fuso do eixo Z (Vertical) = 60,8 kN

3.2.2. Base de Soldagem FSW

Sobre a mesa da máquina foi montada uma base para posicionamento e fixação dos corpos de prova de alumínio a serem soldados.

O conjunto é composto dos seguintes elementos principais: Placa base, pinos guia e parafusos Allen M16x70 e M16x50, estes utilizados como fixadores. A placa base foi projetada para ser firmemente fixada à mesa e desta forma receber os demais componentes descritos acima, unindo através dos parafusos. Ela foi fixada diretamente sobre a mesa da fresadora, que proveu desta forma, um apoio rígido e estável para execução dos experimentos. Sua fixação à mesa foi feita por meio de 6 parafusos e porcas “T”, montados nos rasgos da mesa, onde possui o mesmo formato, de maneira similar à que é empregada para operações de usinagem.

Figura 37 – Dispositivo montado na mesa da máquina Integrex e1060V.



Fonte: Próprio Autor.

A tolerância dimensional em relação à espessura e a planicidade foram os fatores mais relevantes do projeto da base de soldagem, uma vez que para a realização dos experimentos, em que a força vertical é imposta por meio da penetração da ferramenta à superfície superior das peças, variações da espessura da base, poderiam comprometer o processo.

Para manter a posição da soldagem dos corpos de prova, foram utilizadas duas chapas de fixação, confeccionadas em aço ASTM A572 GR 50-1 com 19,00 mm de espessura.

3.3. Parâmetros Experimentais

3.3.1. Informações Básicas

Os corpos de prova para soldagem foram retirados de uma única chapa comercial de 3,25 mm de espessura. Suas dimensões foram determinadas de forma a permitir a realização de diversas tentativas de soldagem com comprimento total de 500 mm.

A ferramenta desenvolvida para realização do processo FSW foi fixada ao cabeçote da máquina por meio de um adaptador cônico com furo cilíndrico padronizado, para sujeição de ferramentas de usinagem com haste de 18 mm de diâmetro.

Os experimentos de soldagem foram realizados unindo dois corpos de prova descritos no subcapítulo 3.1.2. As soldas tiveram penetração total.

3.4. Métodos de Desenvolvimento dos Experimentos

Inicialmente foi necessário fazer uma avaliação quantitativa semi empírica dos esforços gerados no processo de soldagem, para assim concluir à adequação da máquina fresadora proposta para realização dos testes de soldagem.

Trabalhos experimentais de medição das forças de soldagem para um sistema tais como: ferramenta, material base e parâmetros de soldagem, compatíveis com o que se desejava utilizar foram utilizados como referências primárias.

Com base nas análises dos testes experimentais e também na revisão bibliográfica foram feitas correções e adaptações nos parâmetros utilizados para realização das soldas.

A fim de avaliar o efeito do aporte térmico durante a soldagem, foi priorizada a aplicação de diferentes velocidades de avanço, de modo a definir a maior velocidade que permite obter juntas soldadas de qualidade. Esta análise se torna importante, uma vez que o aumento da velocidade de soldagem pode significar maior produtividade durante o processo. A Tabela 10 apresenta os parâmetros utilizados no processo de soldagem por FSW.

Tabela 10 – Parâmetros utilizados no processo de soldagem por FSW.

Solda	Velocidade Avanço [mm/min.]	Sentido de rotação	Velocidade Rotação [RPM]	Profundidade Penetração [mm]	Ângulo Inclinação [°]	Tempo de Espera [s]
1	50	Horário				
2	100	Horário				
3	150	Horário	500	0,3	1	10
4	200	Horário				
5	250	Horário				

Fonte: Próprio Autor.

3.5. Modos de Avaliação das Soldagens

Cada soldagem obtida pelo processo FSW foi acompanhada durante sua realização sendo observados qualitativamente a vibração e o ruído do sistema, algumas soldagens foram

filmadas. As chapas foram soldadas em temperatura ambiente, sem pré ou pós-aquecimento do material, depois de soldadas foram visualmente inspecionadas.

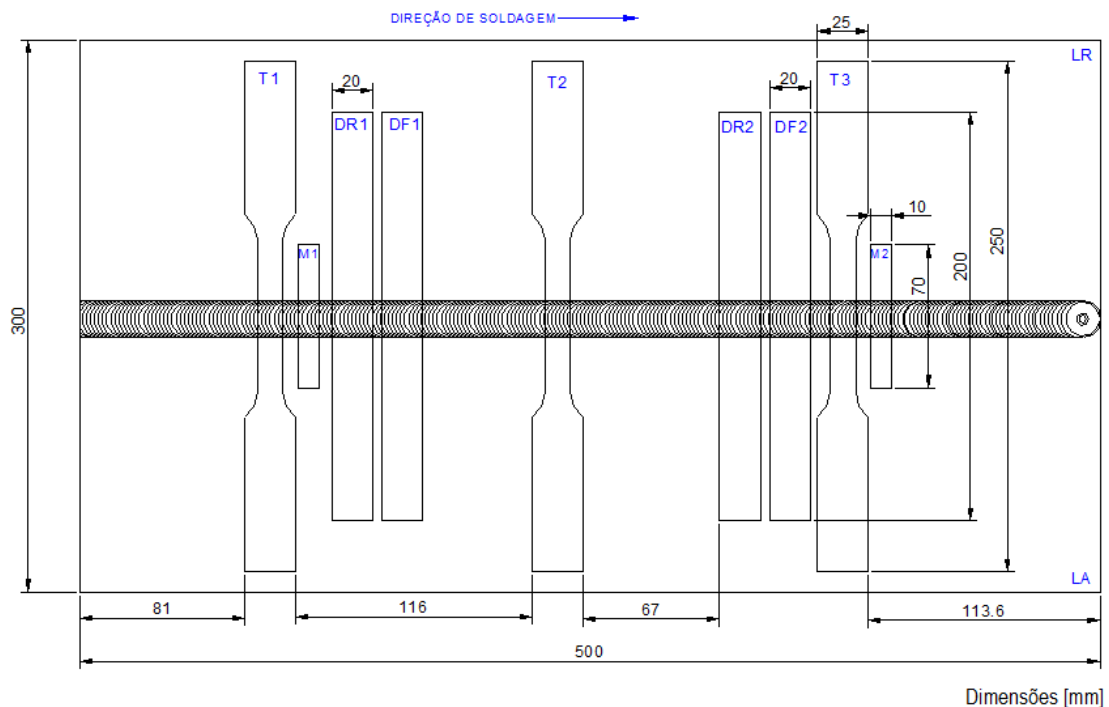
Fotos das soldas foram tiradas por meio de uma câmera fotográfica digital da marca Sony com resolução de 7.2 Megapixels. As fotografias para análise da superfície das soldas foram tiradas segundo um ângulo de aproximadamente 90° em relação à superfície de topo das peças. Quando aplicável, a direção de soldagem, a indicação dos lados de avanço (LA) e recuo (LR) e em alguns casos a escala foram adicionados eletronicamente.

3.5.1. Plano de corte das amostras

Para cada solda realizada nos testes finais foram retirados três corpos de prova de tração (T1, T2 e T3), quatro corpos de prova para dobramento (DR1, DF1, DR2 e DF2), sendo dois para dobramento de raiz e dois para dobramento de face e mais duas amostras representativas (M1 e M2) para análise metalográfica, medição do perfil de dureza e microtomografia com Raios X. Os primeiros 50 mm iniciais e finais de cada solda foram descartados, seguindo o recomendado pela norma ISO 25239-4:2011 “*Friction stir welding – Aluminium – Specification and qualification of welding procedures*”.

Na Figura 38 é apresentado um desenho esquemático do posicionamento dos corpos de prova de prova e a correspondente identificação dos mesmos.

Figura 38 – Representação esquemática do posicionamento dos corpos de prova na chapa base



Fonte: Próprio Autor.

3.5.2. Caracterização Macroestrutural

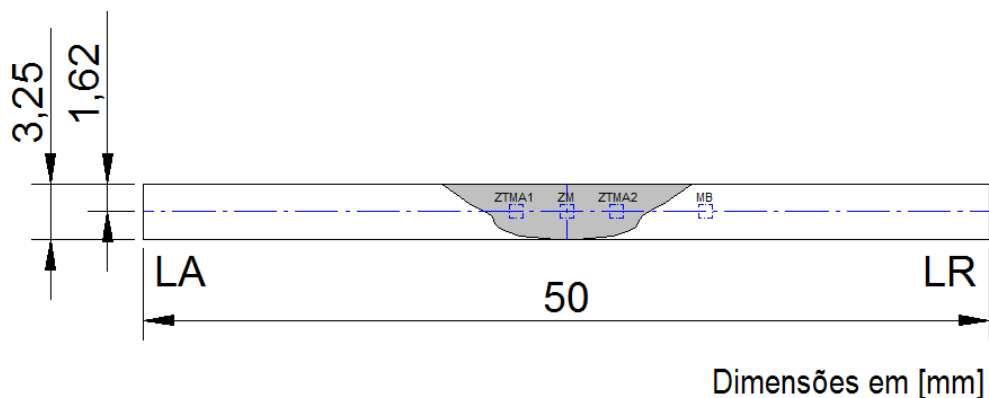
Primeiramente foi verificada a qualidade das juntas soldadas através de inspeção a olho nu. A largura do cordão de solda foi medida com paquímetro digital da marca Mitutoyo, com resolução de 1 centésimo de milímetros. Nesta fase de inspeção foi verificada a presença de defeitos macroscópicos superficiais e internos na junta soldada, para caracterização da superfície soldada foram tiradas fotos com câmera digital conforme descrita no item 3.5, já para caracterização da junta soldada foi utilizado microscópio digital portátil da marca DinoLite, modelo AM4115ZTL com faixa de ampliação de 40 vezes.

3.5.3. Caracterização Microestrutural

Uma seção transversal de cada solda realizada na etapa final dos testes foi realizada micrografia mediante tratamento da superfície para revelar suas regiões microestruturais notáveis. Para micrografia, as amostras foram embutidas a frio em resina, foi realizado um pré-lixamento com lixas de granulometrias de 220, 400 e 600. O polimento foi realizado com diamante, óxido de magnésio e sílica coloidal. Para verificação da microestrutura foi realizado ataque eletrolítico com uma fonte de corrente contínua e uma solução de ácido tetrafluobórico e água.

A Figura 39 indica os locais que foram analisadas as microestruturas em meia espessura das chapas soldadas na linha da junta.

Figura 39 – Representação esquemática da seção transversal das amostras utilizadas para análises microestruturais.



Fonte: Próprio Autor.

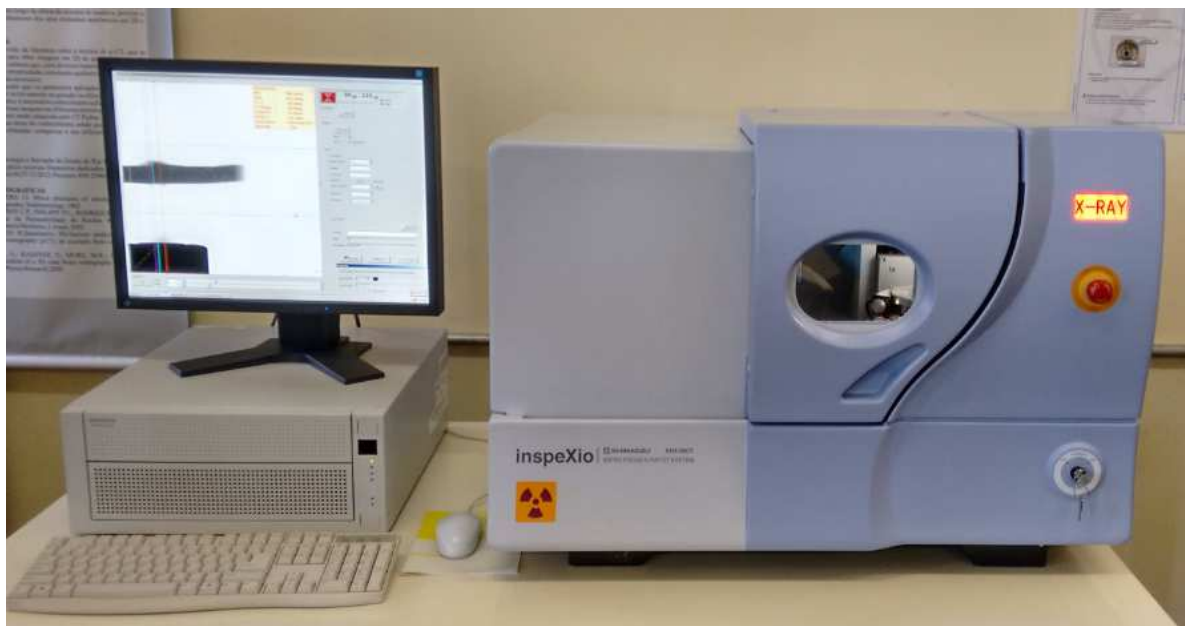
A Figura 39 as regiões destacadas por um quadrado são as regiões de interesse para análise microestrutural.

A microestrutura da zona da mistura “ZM” compreende aproximadamente a região de penetração do pino na junta soldada. A microestrutura da ZTMA1 e ZTMA2 compreende a transição entre a zona termomecanicamente afetada, que representa níveis de deformação e temperatura menores que a ZM, e por fim a microestrutura do material de base “MB”.

3.5.4. Ensaio de Microtomografia de Raios X

Foi realizada inspeção de microtomografia de Raios X com técnica de aquisição e processamento de imagens, foi utilizado um microtomógrafo da marca SHIMADZU, modelo SMX-90CT. O objetivo desta análise foi localizar defeitos não detectáveis através de inspeção visual, como por exemplo, defeitos do tipo vazio no interior da junta soldada. Os parâmetros principais para a realização deste ensaio foi uma fonte de Raios X de 90 kV e 111 μ A, onde para cada amostra foram obtidas em média 2400 imagens. Cada imagem foi ajustada em contraste e filtro através do *software* VGstudiomáx, onde resultou uma imagem em forma de 3D. A Figura 40 apresenta o equipamento utilizado no ensaio.

Figura 40 – Microtomógrafo, utilizado para realização dos ensaios de microtomografia de Raios X.

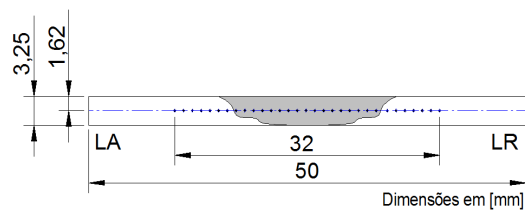


Fonte: Próprio Autor.

3.5.5. Avaliação de Microdureza

Nas mesmas seções utilizadas para a micrografia, uma sequência de testes de microdureza Vickers foi realizada para determinação do perfil transversal de dureza da solda, para esta análise foi seguido a Norma DIN EN 9015-2:2011 – “*Destructive test on welds in metallic materials – Hardness test – Part 2: Microhardness testing of welded joint*”. As indentações foram realizadas ao longo da metade da espessura das amostras. Foram realizadas 64 indentações com espaçamento de 0,5mm, igualmente distribuídas em um intervalo de 32mm, a força aplicada foi de 5N (0,5 kgf), por um tempo de 10 segundos. O equipamento utilizado é um microdurômetro da marca Emcotest modelo DuraScan 20. A Figura 41 apresenta o desenho esquemático do perfil horizontal de microdureza, e a Figura 42 apresenta o microdurômetro utilizado nos ensaios.

Figura 41 – Representação esquemática da seção transversal das amostras utilizadas para análises de microdureza.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 42 – Microdurômetro Emcotest DuraScan, utilizado para realização dos perfis de dureza.

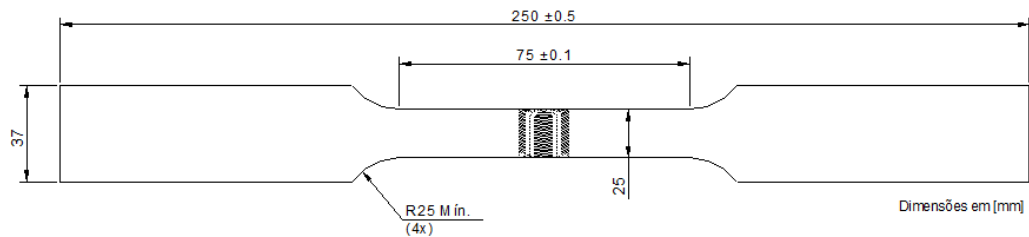


Fonte: Próprio Autor.

3.5.6. Ensaio de Tração

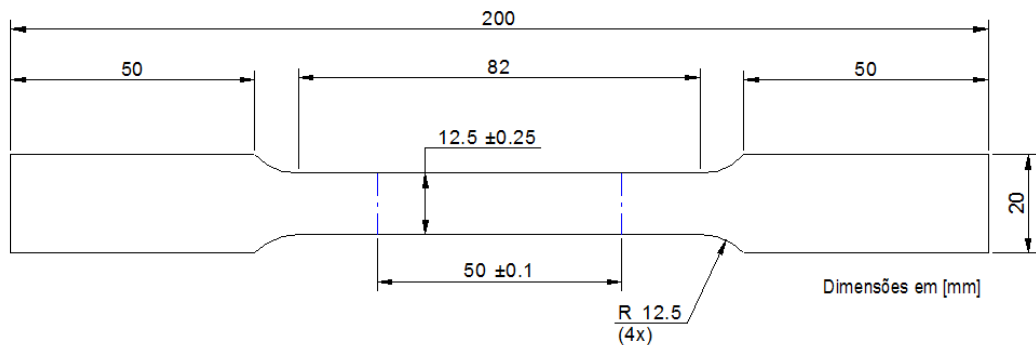
Foram extraídos três corpos de prova de tração, confeccionados conforme norma DIN EN ISO 4136:2013 “*Destructive tests on welds in metallic materials – Transverse tensile test*”, na direção transversal à solda para determinação do limite de resistência à ruptura, escoamento e o alongamento percentual do material após a soldagem, ver desenho do corpo de prova na Figura 43. Três corpos de prova foram retirados da chapa comercial utilizada para fabricação das peças base, extraídos perpendicularmente à direção de laminação, seguindo norma ABNT NBR 7549:2011 – “*Alumínio e suas ligas – Produtos laminados, extrudados e fundidos – Ensaio de tração*”, com o objetivo de possibilitar uma avaliação das perdas de resistência do material soldado em relação ao original, ver desenho do corpo de prova na Figura 44. O equipamento empregado para os ensaios de tração foi a máquina universal de ensaios EMIC, modelo DL 20000, com certificado de calibração Emic 711/14 emitido pela EMIC, válido até 07/2016. Os ensaios foram realizados em ambiente com temperatura e umidade controladas, respectivamente $20^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{C}$ e $55\%\pm 15\%$.

Figura 43 – Dimensão dos corpos de prova soldados para ensaio de tração.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 44 – Dimensão dos corpos de prova material base para ensaio de tração.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 45 – Máquina universal de ensaios, utilizada para ensaio de tração.



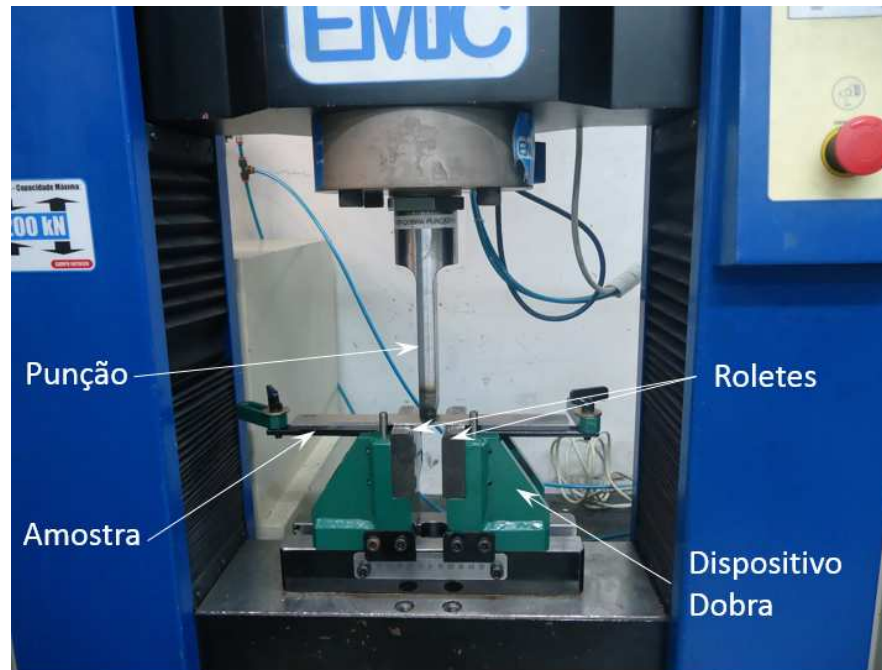
- 1 – Garra Superior
- 2 – Garra Inferior
- 3 – Seção móvel
- 4 – Célula de Carga
- 5 – Painel de controle
- 6 – Botão de emergência
- 7 – Base da máquina

Fonte: Próprio Autor.

3.5.7. Ensaio de Dobramento

Com o intuito de fazer uma avaliação qualitativa da ductilidade das soldas, as amostras passaram por ensaio de dobramento de face e raiz, para cada solda realizada foram retirados quatro corpos de prova para ensaio de dobramento, sendo dois de face e dois de raiz, as dimensões dos corpos de prova podem ser visualizadas na Figura 25. Estes testes seguiram a norma DIN EN ISO 5173:2010 – “*Destructive tests on welds in metallic materials – Bend tests*”. O teste recomenda que a amostra apoiada por dois roletes sofra um carregamento aplicado por um punção na face da solda até atingir um ângulo de dobramento próximo a 180°, sem apresentar fissuras na raiz. O mesmo equipamento utilizado para os ensaios de tração foi utilizado para os ensaios de dobramento, através de uma adaptação dos dispositivos para realização dos testes. A Figura 46 apresenta a configuração do ensaio de dobramento.

Figura 46 – Detalhe da configuração do ensaio de dobramento de raiz.



Fonte: Próprio Autor.

O posicionamento dos corpos de prova nas chapas soldadas, bem como a dimensão do raio do punção utilizado no ensaio de dobramento seguiram o padrão especificado na norma ISO 25239-4:2011 - *“Friction stir welding – Aluminium – Specification and qualification of welding procedures”*.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste item são descritos diversos aspectos da influência dos parâmetros de soldagem sobre as características das soldas produzidas pelo processo FSW. Principalmente por meios da confrontação dos resultados obtidos pelos diversos testes realizados, além da comparação com dados de referência publicados.

Nos testes preliminares são apresentados resultados qualitativos nos quais se basearam todos os ajustes necessários às ferramentas e os parâmetros de soldagem.

Após a definição dos parâmetros ideais para soldagem FSW, foi realizada uma análise a partir dos dados obtidos nos ensaios de tração, dobramento, perfil de dureza, análises metalográficas e microtomografia de Raios X. Baseado nestes dados se obteve a caracterização das soldas obtidas pela geometria da ferramenta utilizada no processo FSW.

4.1. Caracterização do Metal Base

Para comprovar os dados das propriedades mecânicas obtidas através do catálogo da Novelis (2015), amostras do material foram submetidas a ensaios de tração. Os resultados dos ensaios mecânicos como: limite de escoamento (N/mm²), limite de resistência à tração (N/mm²) e alongamento (%) são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Resultados dos ensaios mecânicos da liga Al 5182-O

Propriedades Mecânicas	
Limite Escoamento (N/mm ²)	130,80
Limite Resist. Tração (N/mm ²)	277,50
Along. (%)	25,09

Fonte: Próprio Autor

Os valores obtidos no ensaio de tração do metal de base referem-se à média de três corpos de prova extraídos perpendicularmente ao sentido de laminação da chapa base, uma vez que todas as soldas analisadas neste trabalho foram realizadas paralelamente ao sentido de laminação.

A composição química da liga de alumínio 5182-O, medida por espectrometria de emissão óptica é apresentada na Tabela 12.

Tabela 12 – Resultados da composição química da liga Al 5182-O

Composição Química	
Manganês- Mn(%)	0,510
Silício – Si (%)	0,083
Cobre – Cu (%)	0,069
Titânio – Ti (%)	0,018
Cromo – Cr (%)	0,001
Magnésio-Mg(%)	4,393
Zinco-Zn(%)	0,001
Ferro-Fe(%)	0,068

Fonte: Próprio Autor

4.2. Soldagem Processo FSW

4.2.1. Testes Preliminares – Parâmetros e Domínio de Soldagem

Os testes preliminares serviram para fazer os ajustes necessários a fim de obter soldas com o mínimo de defeito ou sua total ausência, para tanto foram realizadas soldas variando-se a velocidade de rotação, velocidade de avanço, o ângulo de inclinação da ferramenta, e penetração do ombro da ferramenta.

Desta maneira, os testes de soldagem foram então realizados. Na primeira etapa procurou-se estabelecer um domínio de soldagem com o objetivo principal de determinar os parâmetros de soldagem ideais. O cronograma dos testes preliminares serviu como ponto de partida, pois se identificou o potencial deste exercício para aumentar o conhecimento da influência de cada variável no contexto da realização do processo.

As soldas realizadas nesta etapa foram classificadas quanto à ocorrência dos seguintes fenômenos:

- Quebra da ferramenta de soldagem (geometria da ferramenta);
- Excesso de rebarbas;
- Vazios ou sulcos ao longo da solda;
- Visualização da linha da solda na raiz (penetração total);

A realização de ensaios mecânicos como tração e dobramento não foi realizada nesta etapa. Assim, as devidas modificações no ferramental e nos parâmetros de soldagem foram feitas baseadas em inspeção visual.

As observações realizadas durante e logo após a execução dos testes preliminares foram compiladas na “Tabela de Resultados” ver Anexo I. Nesta tabela podemos observar informações gerais dos parâmetros utilizados nos testes preliminares, referências comparativas a outros testes, além de alguns registros de ocorrência verificados durante a realização das soldagens. Para melhor identificar a intensidade dos problemas encontrados durante a soldagem, a tabela traz referência a um padrão de cores, da seguinte forma: a cor vermelha indica falhas ocorridas com intensidade elevada, a cor amarela com intensidade moderada e a cor verde com intensidade baixa ou ausência de defeitos.

Observações qualitativas foram feitas em relação à máquina fresadora, em relação aos parâmetros do processo selecionado como: ruído, vibração ou aquecimento excessivo.

As soldas foram realizadas nos corpos de prova previamente preparados com as dimensões de 150 x 500 mm. Após a fixação dos corpos de prova na base de soldagem, as soldas foram executadas.

A velocidade de penetração utilizada nos ensaios foi mantida constante em 10mm/min, de forma a diminuir os esforços sobre os mancais do cabeçote da máquina fresadora.

A análise visual dos cordões de solda obtidos com as diferentes combinações dos parâmetros, em conjunto com a análise da geometria da ferramenta, permitiu identificar qual a melhor combinação de parâmetros adequados para a realização do processo de soldagem com o mínimo de defeitos possíveis. Uma vez feitos os ajustes necessários, novos testes foram realizados, desta vez permitindo uma análise qualitativa e quantitativa dos resultados.

As soldagens preliminares foram realizadas para se chegar ao parâmetro ideal utilizado nos testes finais.

4.3. Parâmetros fixos para Soldagem FSW

4.3.1. Aporte térmico

Baseado nos resultados obtidos através dos testes preliminares foram definidos os parâmetros ideais para a realização dos testes subsequentes.

Cada parâmetro produziu três soldas segundo os parâmetros de soldagem definidos no item 3.4. As chapas foram soldadas com velocidade rotacional (ω) constante e velocidades de soldagem (v) de 50, 100, 150, 200 e 250 mm/min, conforme pode ser observado na Tabela 13. Os parâmetros aplicados resultar

am em valores de torque retirados indiretamente da máquina durante o processo de soldagem.

Desta forma o aporte térmico (AT) resultante para as diferentes velocidades de soldagem estudadas pode ser obtido segundo a relação proposta por Wei *et al.* (2011), apresentada na Equação 2. Para ser possível o cálculo do aporte térmico em J/mm a partir esta fórmula, emprega-se o torque médio “T” envolvido no processo em (N.m), a velocidade de rotação “ ω ” medida em (rpm) e a velocidade de soldagem “v” em (mm/min).

$$AT = \frac{2\pi T\omega}{v} = \left(\frac{J}{mm}\right) \quad (2)$$

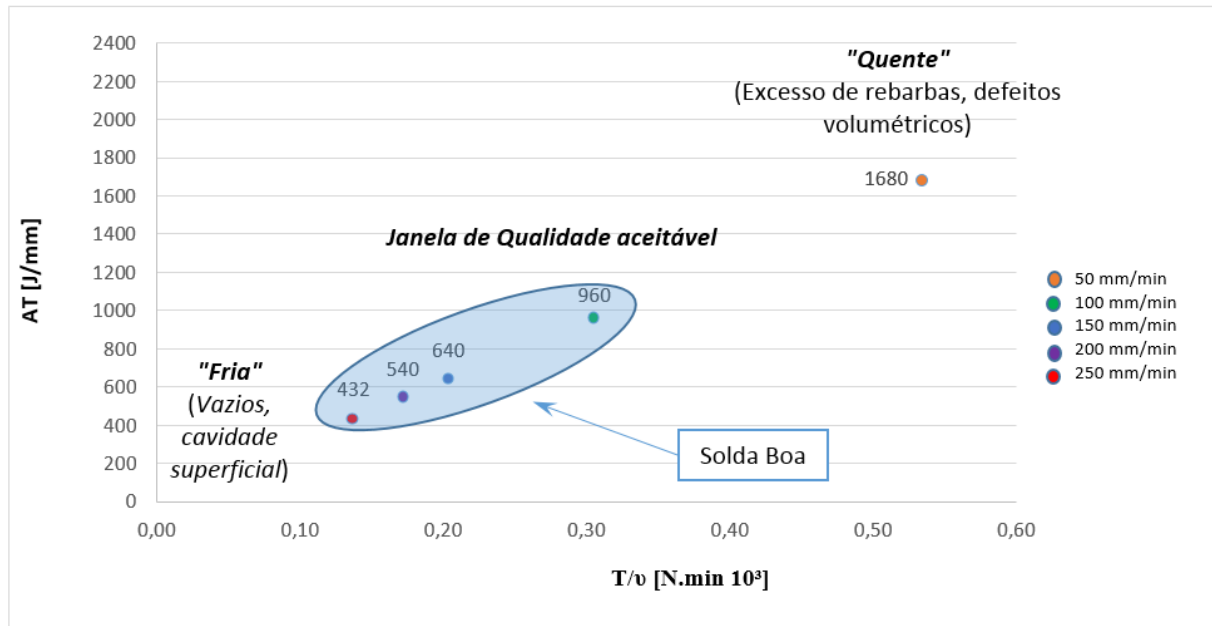
Tabela 13 – Média dos parâmetros de soldagem aplicados no processo FSW da liga de alumínio 5182-O, com seus respectivos torques e aportes térmicos resultantes.

Solda	Velocidade Avanço [mm/min.]	Sentido de rotação	Velocidade Rotação [RPM]	Profundidade Penetração [mm]	Ângulo Inclinação [°]	Tempo de Espera [s]	Torque médio [N.m]	Aporte térmico [J/mm]
1	50						26,74	1680
2	100						30,56	960
3	150	Horário	500	0,3	1	10	30,56	640
4	200						34,38	540
5	250						34,38	432

Fonte: Próprio Autor.

Através da Tabela 13, podemos observar que o aumento da velocidade de soldagem e do torque combinados resultam na redução do aporte térmico. A Equação 2, citada anteriormente para o cálculo do aporte térmico, apresenta as variáveis de velocidade de rotação, torque e velocidade de soldagem, sendo que para o presente estudo a variável velocidade de rotação é mantida constante. Desta forma, para a compreensão do efeito dos parâmetros de torque e velocidade de avanço, pode-se observar o gráfico da Figura 47, o qual mostra a influência da relação T/v no valor do aporte térmico.

Figura 47 – Influência da relação T/v no valor resultante do aporte térmico.



Fonte: Próprio Autor.

Neste caso, o aporte térmico calculado varia apenas pela influência da velocidade de avanço e do torque resultante do processo de soldagem por FSW. Observa-se que o aumento da velocidade de soldagem resulta no aumento do torque, isso é explicado pelo fato de que o aumento da velocidade durante o processo de soldagem acarreta na redução do tempo pelo qual o material sofre fricção pela ação da ferramenta. Como resultado, as temperaturas atingidas pelo material são menores, o que torna mais difícil o seu arraste pela ferramenta em rotação e, como consequência, há um aumento do torque resultante.

Outro fato que podemos observar neste estudo é que, o aumento da velocidade variando entre 50mm/min e 250mm/min foi mais expressivo que o aumento concomitante no torque entre 26,74 e 34,38 N.m. Esta informação se confirma através do trabalho de Kozminski (2015), como resultado, a partir da relação T/v proposta na Equação 2, ocorre a redução do aporte térmico com o aumento da velocidade de soldagem e do torque. Isso se explica pelo aumento de ambas as variáveis simultaneamente, sendo o aumento da velocidade mais acentuado. Desta forma, essa concorrência existente entre T e v pode esclarecer o comportamento visualizado na Figura 47.

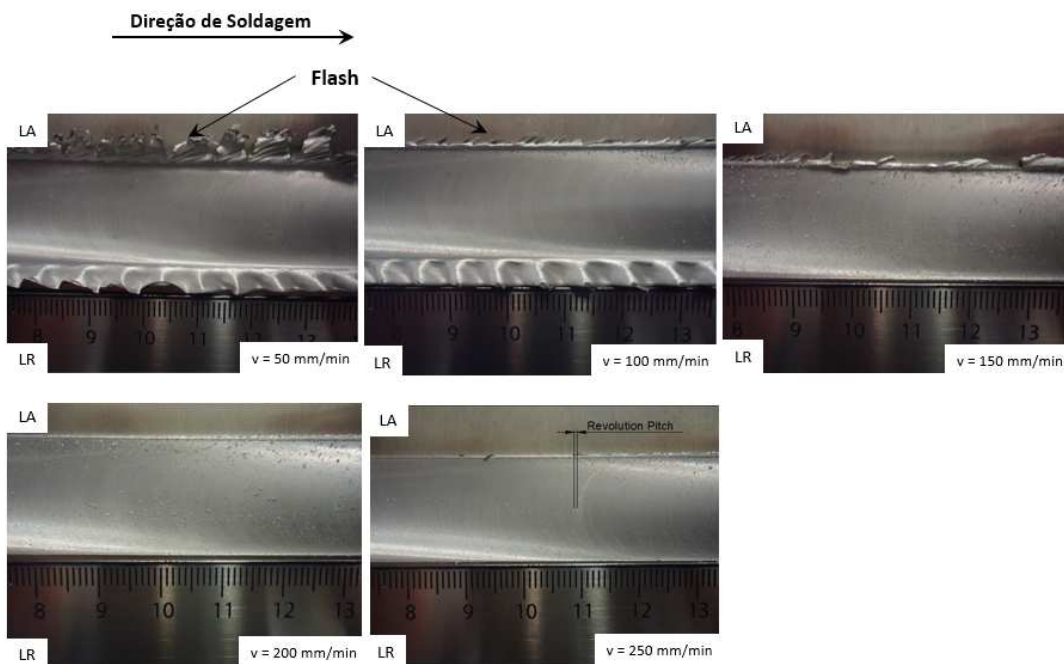
4.3.2. Inspeção Visual das Soldas FSW

Uma vez definidos os parâmetros para soldagem final apresentados na seção 4.3, foram realizadas três soldas de iguais parâmetros para cada velocidade de soldagem, totalizando desta forma quinze soldas, para posterior avaliação das propriedades mecânicas e metalográficas.

A Figura 48 apresenta as imagens em vista de topo de trechos do centro das soldas nas chapas de alumínio da liga 5182-O.

Uma característica marcante em termos de aparência da solda é a assimetria que é bastante acentuada, onde a rebarba (*flash*) está distribuída em maior parte no lado do recuo. Para todas as soldas, foi verificada a ausência de defeitos superficiais macroscópicos ao longo da junta soldada.

Figura 48 – Vista de topo de trechos centrais das soldas



Fonte: Próprio Autor.

Outra característica marcante na superfície das juntas soldadas é observada com o aumento da velocidade de soldagem ocorre um aumento do *revolution pitch* (v/ω), que representa o espaçamento linear formado por uma revolução da ferramenta, gerando as marcas semicirculares visualizadas na superfície da solda, conforme pode ser visualizado na Figura 35 para velocidade de soldagem de 250mm/min. Uma vez que neste estudo a

velocidade de rotação é mantida constante, em velocidades maiores a porção de material abrangida e movimentada a cada rotação da ferramenta é maior.

Há diferentes fatores que podem levar à formação excessiva de rebarbas “Flash”, como por exemplo, um comprimento de pino pequeno, que não se aproxima suficientemente da raiz da solda e favorece uma maior penetração do ombro da ferramenta, resultando em expulsão de material da cavidade da solda (KOZMINSKI, 2015). Contudo, um fator que possivelmente contribui para maior geração de *flash* é uma velocidade de avanço baixa, que ocasiona aportes térmicos elevados e propicia um fluxo de material excessivo, facilitando sua ejeção. Como neste estudo o parâmetro de soldagem variado foi a velocidade de avanço, a redução desta velocidade ocasionou o aumento do aporte térmico, gerando assim um maior fluxo de material da cavidade da solda para a superfície do material, formando uma maior quantidade de *flash* nas velocidades de 50mm/min e 100mm/min, como pode ser visualizado na Figura 48.

Percebe-se que a velocidade de soldagem também afeta a largura da junta soldada, isto é, velocidades maiores diminuem a largura da junta soldada, conforme pode ser visualizado na Figura 49.

Figura 49 – Vista de topo – Largura da junta soldada.



Fonte: Próprio Autor.

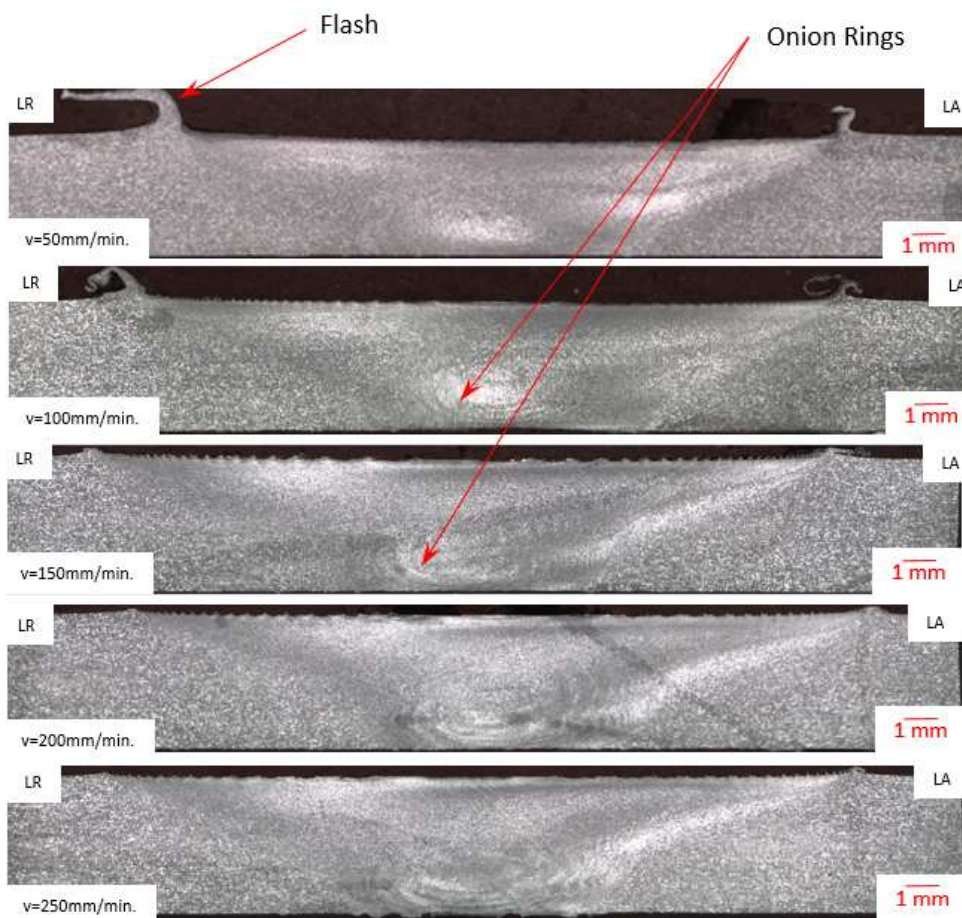
Essa diminuição da largura da junta soldada pode ser explicada pelo fato de maiores velocidades de soldagem acarretarem em um menor tempo de exposição a elevadas temperaturas, assim, um volume menor de material é aquecido e plastificado, resultando desta forma em uma diminuição da largura da junta soldada.

4.3.3. Detecção de Defeitos e Caracterização da Solda

A análise da superfície das soldas não possibilitou nenhuma conclusão em relação à integridade do cordão de solda, para isso, após a soldagem amostras da seção transversal foram preparadas para análise macroscópica, a fim de caracterizar a existência ou não de defeitos na junta soldada.

As macrografias obtidas através de lupa estereoscópica são apresentadas na Figura 50, onde mostra as características da seção transversal das juntas soldadas obtidas pelo processo de FSW.

Figura 50 – Macrografias da seção transversal das juntas soldadas com diferentes velocidades de soldagem.



Fonte: Próprio Autor.

Na figura 50 podemos observar a formação de *flash* para velocidades de soldagem menores, entre 50 e 100 mm/min, este fato ocorre para condições onde o aporte de calor foi maior, isso porque gera um fluxo de material excessivo, onde o ombro da ferramenta não consegue confinar todo o material que está sendo movimentado pela ferramenta, e uma parte deste material é assim expulsa na forma de *flash*.

Uma solução para este tipo de defeito pode ser o aumento da força axial, o aumento desta força resulta em um melhor contato do ombro da ferramenta com o material e aumenta a pressão exercida pelo mesmo, garantindo o seu melhor confinamento na cavidade da solda e prevenindo a formação de *flash*.

Outro aspecto importante que podemos observar na Figura 50 é a presença de *onion rings* na região da mistura. Os *onion rings* são linha de fluxo de material em forma de anéis que geralmente são encontrados em soldas por fricção (FSW), cuja formação é descrita por Kumar *et al.* (2008). A forma com que se apresenta os anéis na junta soldada, pode ser explicado pelo movimento de rotação do material camada por camada ao redor do pino da ferramenta, reproduzindo os relevos do seu perfil. Além disso, o material plastificado logo à frente da ferramenta é rotacionado e atinge o lado do recuo. Quando atinge esta região, a presença do material de base mais frio barra a movimentação do material plastificado, tendendo a forçar a sua saída da cavidade da solda, a expulsão é então restringida pelo ombro da ferramenta, que impõe ao material o percurso de rotação completo até atingir o lado de avanço. Este material, que conservou as marcas do movimento de rotação em camadas, encontra com o material no lado de avanço ainda devido à restrição do ombro, formando o aspecto de anéis, denominado de *onion rings*. Segundo Kumar *et al.* (2008) o material governado pelo ombro é movimentado a partir do lado de retrocesso e forjado contra o material no lado de avanço, promovendo desta forma a união dos materiais nesta região.

Também foi possível observar que o desempenho da ferramenta de geometria de pino cônico com rosca mostrou-se eficiente na obtenção da solda. Não há presença de vazios e a formação da seção transversal de junta soldada tem aspecto regular em todas as variações de velocidade de soldagem.

A partir destas observações podemos comprovar na prática os estudos relatados por Mishra *et al.* (2005) e Guerra *et al.* (2003), onde relatam que a geometria da ferramenta é o aspecto de maior influência no desenvolvimento do processo de soldagem FSW e que a presença de elementos geométricos no pino da ferramenta, melhoram o fluxo do material

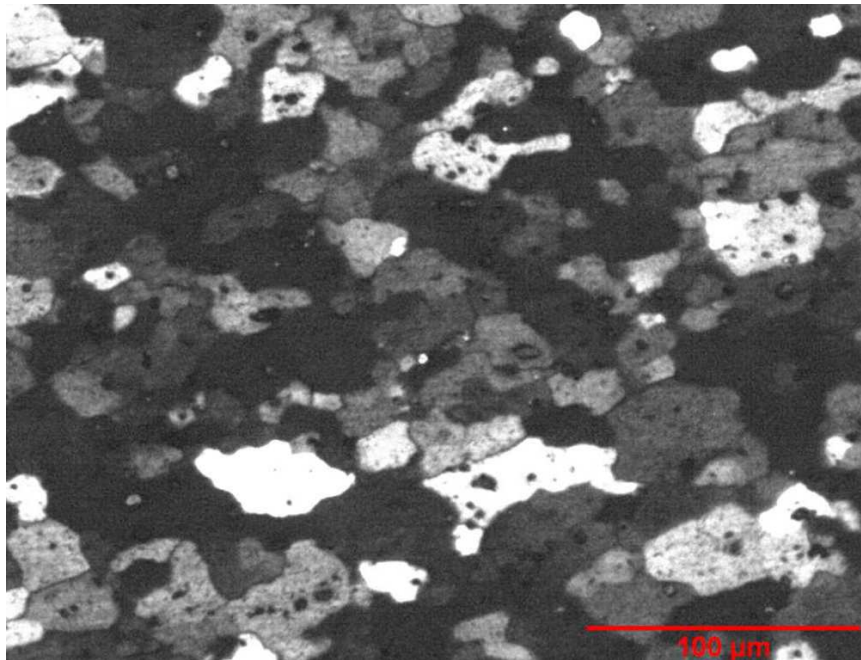
durante o processo de soldagem, reduzindo esforços gerados pelo processo, garantindo assim uma solda de melhor qualidade.

4.3.4. Micrografia

Através da avaliação das características microestruturais da solda podemos prever, por exemplo, o desempenho do material soldado quanto a sua resistência mecânica ou resistência à corrosão. O processo de solda por fricção FSW apresenta regiões que sofrem diferentes influências pela ação da ferramenta.

Primeiramente foi realizada a caracterização do metal de base para servir como referência na comparação com as amostras soldadas. A Figura 51 apresenta a micrografia do metal de base, onde podemos observar grãos orientados.

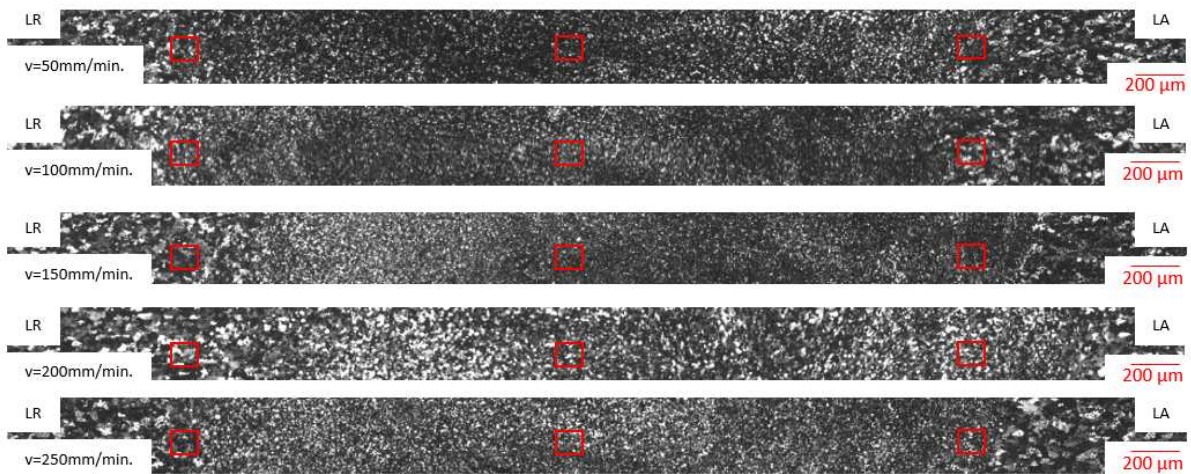
Figura 51 – Micrografia do metal de base.



Fonte: Próprio Autor

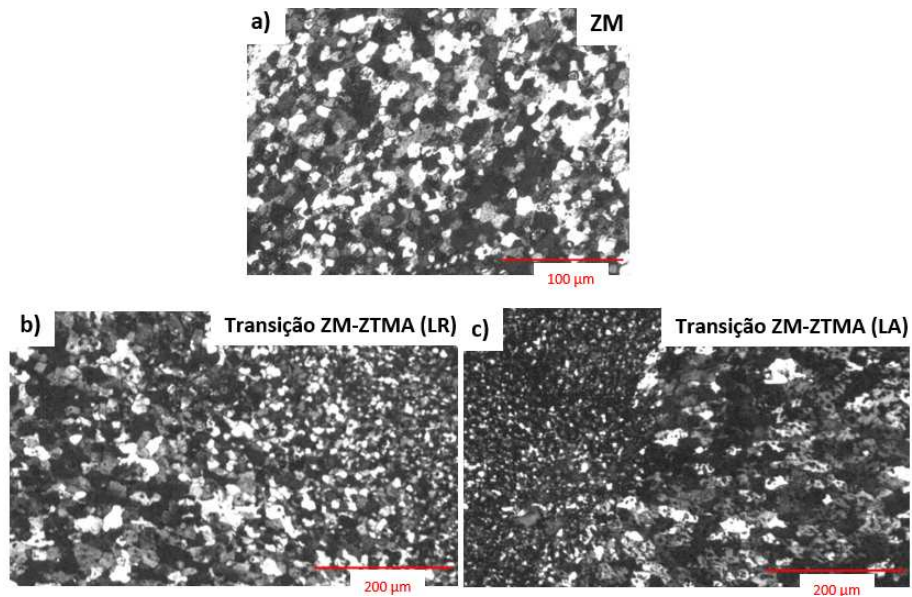
Com referência as microestruturas das amostras soldadas, as mesmas podem ser observadas nas figuras seguintes, em que exibe à grande diferença microestrutural da liga de alumínio 5182-O, evidenciando a zona termomecanicamente afetada (ZTMA) e a zona da mistura (ZM), também a região de transição entre elas. A Figura 52 apresenta a micrografia obtida para amostras realizadas com as diferentes velocidades de avanço estudadas neste trabalho.

Figura 52 – Micrografias da junta solda obtida com diferentes velocidades de avanço, sendo destacada a ZM e a transição entre a ZM-ZTMA no lado do avanço e recuo.



Fonte: Próprio Autor

Figura 53 – Micrografias da junta solda obtida com 50mm/min, onde: a) ZM, b) transição entre a ZM-ZTMA (LR), c) transição entre ZM-ZTMA (LA).



Fonte: Próprio Autor

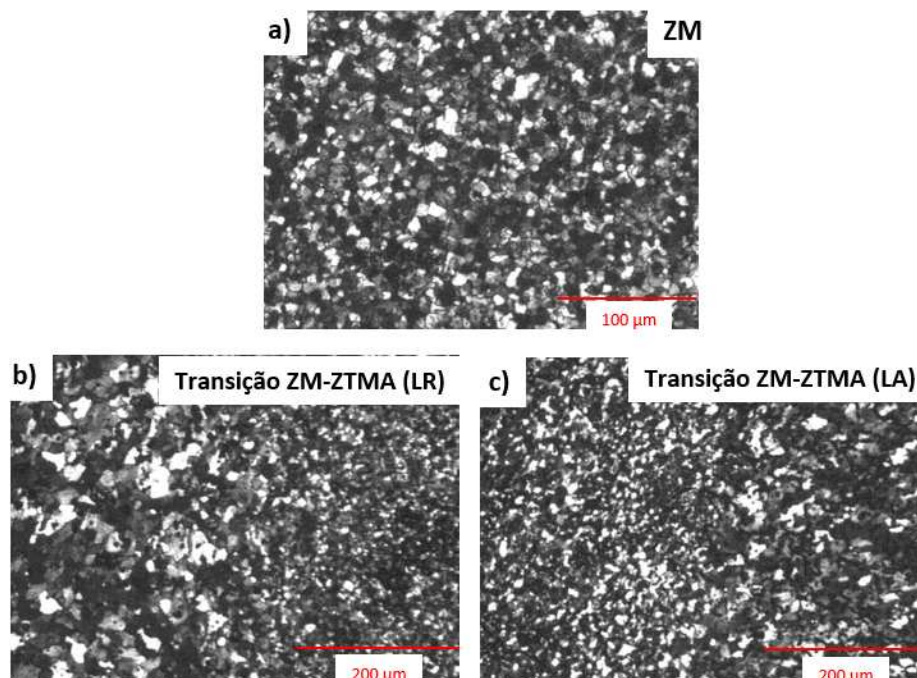
Na macrografia apresentada na Figura 53 é possível visualizar que a zona da mistura é caracterizada pela formação de uma microestrutura de grãos refinados, com morfologia equiaxial, isso devido à recristalização dinâmica imposta pelo elevado grau de deformação plástica e pela temperatura, conferidos ao material pela rotação e penetração da ferramenta durante o processo (CARLETTI, 2002).

A região de transição entre a ZM e a ZTMA tanto do lado do avanço como do recuo, é composta por pequenos grãos recristalizados, esta região é relativamente estreita com a fração dos grãos recristalizados caindo rapidamente com o aumento da distância a partir da ZM, sendo que a microestrutura na região da ZTMA não é tão refinada como a da ZM, isso se dá ao fato dos fenômenos de recuperação e recristalização serem menos intensos que no núcleo da solda.

Outro aspecto importante que podemos observar na Figura 53 é que a modificação microestrutural ocorrida na junta solda tanto do lado do recuo quanto do lado do avanço da ferramenta, não é a mesma devido à ação assimétrica da ferramenta sobre o material. Conforme relatado por Kozminski (2015), esta diferença se torna evidente na observação das regiões de fronteiras entre a ZM e a ZTMA em ambos os lados da seção transversal das soldas.

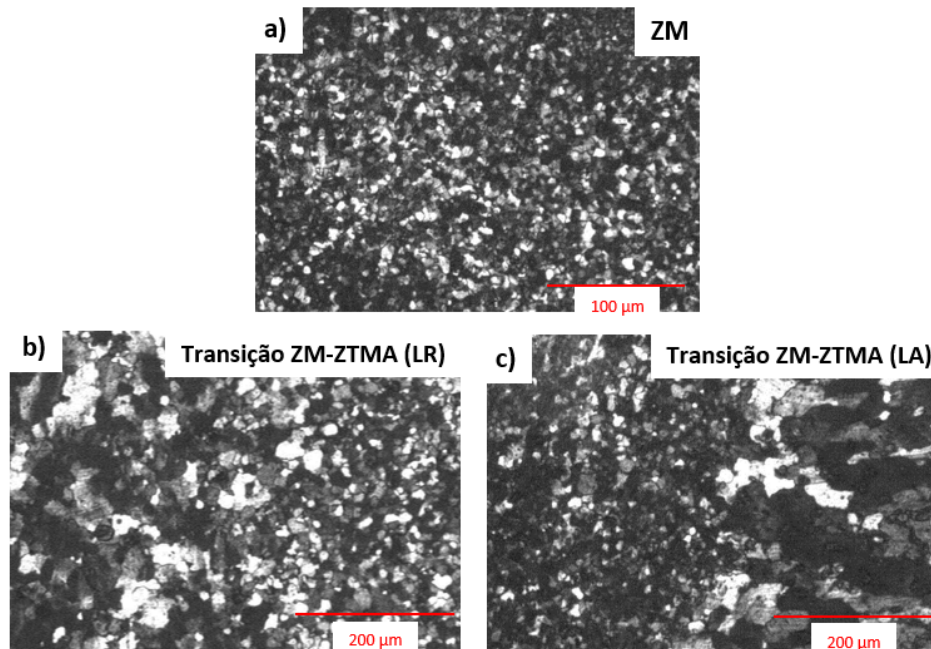
Nas Figuras 54 até 57 são apresentadas as micrografias das amostras com velocidades que variam de 100 a 250 mm/min, onde é identificado a ZM, a transição entre a ZM e ZTMA no lado do avanço e no lado do retrocesso.

Figura 54 – Micrografias da junta solda obtida com 100mm/min, onde: a) ZM, b) transição entre a ZM-ZTMA (LR), c) transição entre ZM-ZTMA (LA).



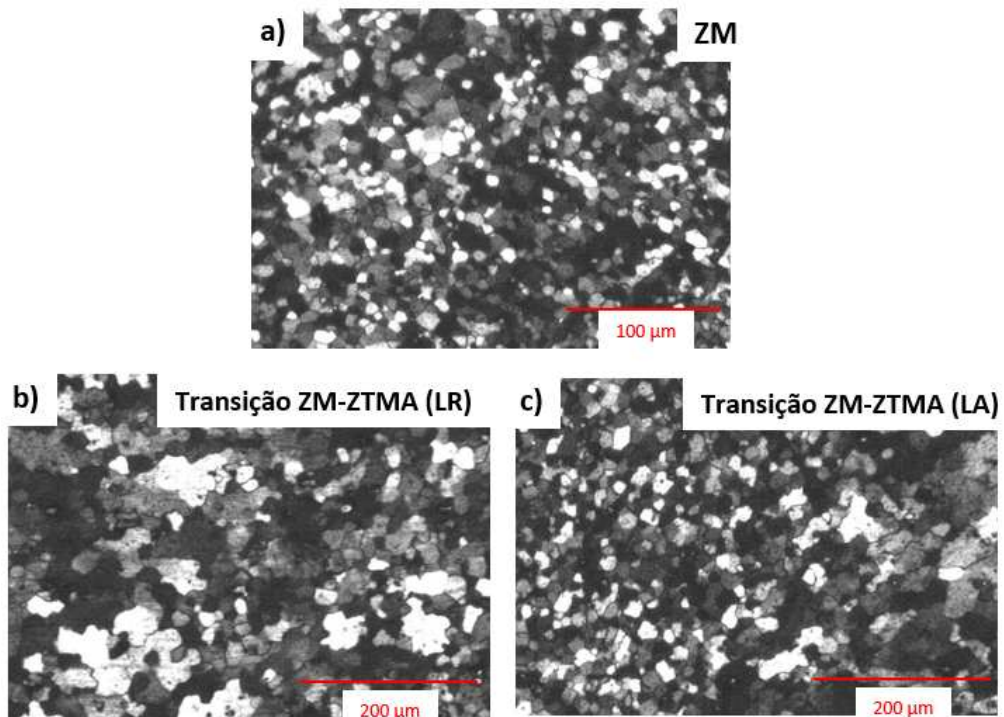
Fonte: Próprio Autor

Figura 55 – Micrografias da junta solda obtida com 150mm/min, onde: a) ZM, b) transição entre a ZM-ZTMA (LR), c) transição entre ZM-ZTMA (LA).



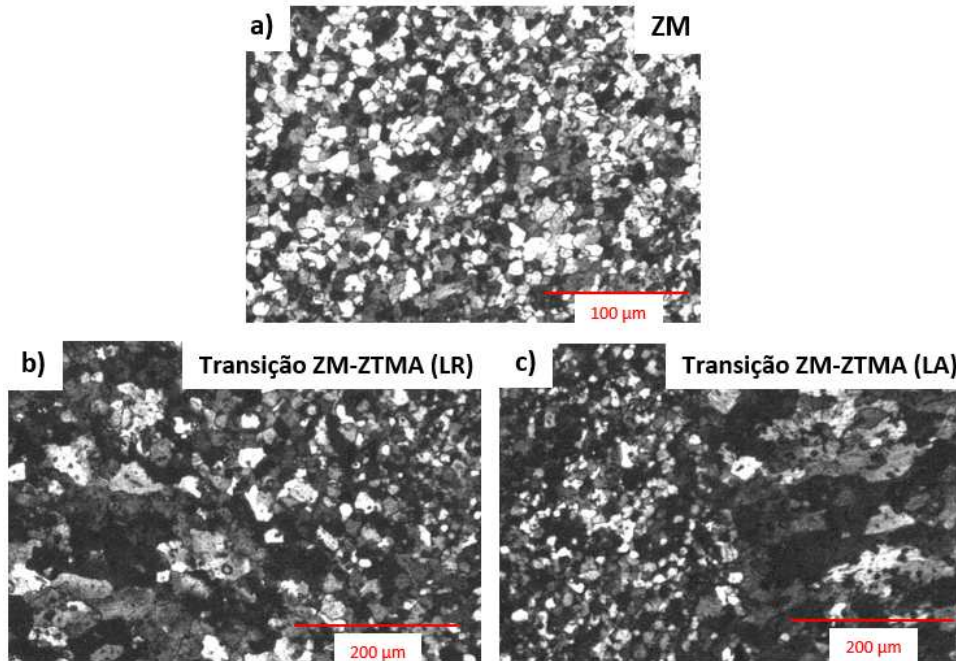
Fonte: Próprio Autor

Figura 56 – Micrografias da junta solda obtida com 200mm/min, onde: a) ZM, b) transição entre a ZM-ZTMA (LR), c) transição entre ZM-ZTMA (LA).



Fonte: Próprio Autor

Figura 57 – Micrografias da junta solda obtida com 250mm/min, onde: a) ZM, b) transição entre a ZM-ZTMA (LR), c) transição entre ZM-ZTMA (LA).



Fonte: Próprio Autor

O comportamento observado nas micrografias das Figuras 54, 55, 56 e 57 é representativo para as soldas obtidas com diferentes velocidades de soldagem. Onde fica evidenciado a assimetria do processo, conforme mencionado anteriormente.

É conhecido que as mudanças microestruturais na solda são afetadas principalmente pela taxa de aquecimento, temperatura de pico e posterior resfriamento. Conforme relatado por WEY *et al.* (2011) a taxa de resfriamento está associada com o aporte térmico, isto é, menor aporte térmico produz taxa de resfriamento maior.

As condições produzidas com menores aportes térmicos neste estudo, indica um maior refino de grão com o aumento da velocidade de soldagem entre 50 e 250 mm/min. Onde velocidades maiores geram menores aportes térmicos, como mostrado na Tabela 13, seção 4.3.1.

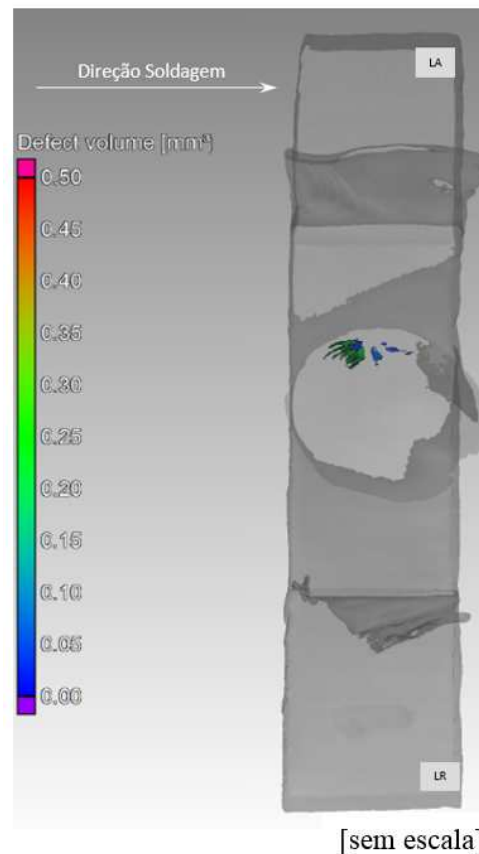
Segundo Theodoro (2013) a relação observada de aumento do refino microestrutural com a redução de temperaturas do processo pode ser explicada pelo fenômeno de recristalização, que ocorre em duas etapas dependendo da temperatura e do tempo de exposição do material. A primeira etapa é a recristalização primária, que envolve a nucleação de novos grãos, principalmente nos contornos dos grãos deformados. A segunda etapa é a recristalização secundária, que resulta no crescimento dos grãos já nucleados. No caso das juntas soldadas, a recristalização é ativada pela temperatura de soldagem e pela deformação

plástica que o material sofreu. Sendo assim, a redução de temperaturas com o aumento da velocidade de soldagem pode minimizar a ocorrência de recristalização secundária e o crescimento de grão, explicando a microestrutura mais refinada observada com velocidades de soldagem maiores.

4.3.5. Ensaio de Microtomografia de Raios X

Com o objetivo de verificar a existência ou não de descontinuidades internas na junta soldada, foi realizado ensaio de microtomografia de Raios X. A Figura 58 apresenta os resultados da inspeção por microtomografia para amostra com velocidade de soldagem de 50mm/min.

Figura 58 – Microtomografia da amostra com velocidade de soldagem de 50mm/min.



Fonte: Próprio Autor

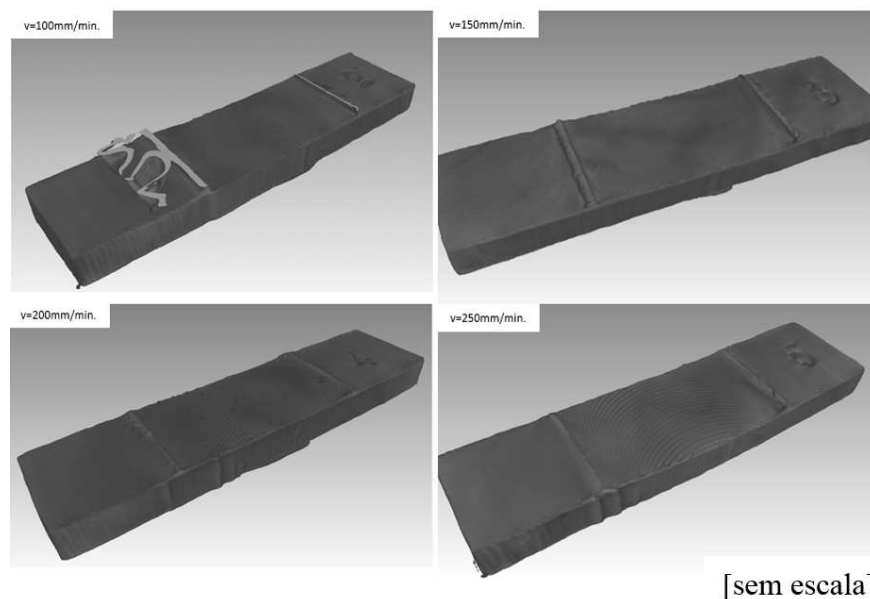
Através da inspeção por microtomografia apresentada na Figura 58, podem ser observadas descontinuidades volumétricas do tipo vazio na região da junta soldada do lado do avanço. Este tipo de descontinuidade pode estar associado a um aporte térmico excessivo, que

resulta em um aumento de temperatura durante o processo de soldagem, trazendo com consequência uma redução do torque resultante, como pode ser visualizado na Tabela 13. A diminuição do torque torna mais fácil o arraste da ferramenta na junta soldada, isso devido ao aumento do tempo durante o qual o material sofre fricção pela ação da ferramenta, como consequência temos temperaturas maiores no interior da junta.

Podemos prever que a descontinuidade do tipo vazio encontrado na velocidade de soldagem de 50mm/min está associado ao fato do alumínio ser um bom condutor de calor, o que resultou em uma grande diferença de temperatura entre o lado do avanço e o lado do recuo. Segundo Kozminski (2015) a rotação da ferramenta gera uma distribuição de calor não uniforme, de tal forma que a porção de material que está logo a sua frente atinge maior temperatura. Quando este material entra em rotação pela ação da ferramenta, este é movimentado em direção ao lado do recuo. Dependendo de alguns parâmetros do processo, uma parte deste material pode ser expulsa na forma de *flash* e outra parte segue o movimento até alcançar o lado do avanço. Quando esta porção de material atinge o lado do avanço, já se encontra com temperaturas menores do que a porção de material que agora está em contato direto com a ferramenta, fazendo com que a diferença de temperatura entre essas duas porções determine se a união será efetiva ou não.

Na Figura 59 é apresentado os resultados de inspeção por microtomografia para as velocidades de soldagem entre 100 e 250 mm/min.

Figura 59 – Microtomografia da amostra com velocidade de soldagem entre 100 e 250mm/min.



Fonte: Próprio Autor

Através dos resultados de inspeção de microtomografia apresentados na Figura 59, não foi possível observar descontinuidades volumétricas do tipo vazio, para velocidades de soldagem entre 100 e 250 mm/min, o que podemos prever que ocorreu uma união efetiva do material para estas condições de soldagem.

Descontinuidades volumétricas do tipo vazio, como o apresentado na Figura 58, podem resultar em desempenho insatisfatório durante os ensaios mecânicos de dobramento e ensaio de tração, prejudicando desta forma a performance das juntas soldadas durante os ensaios.

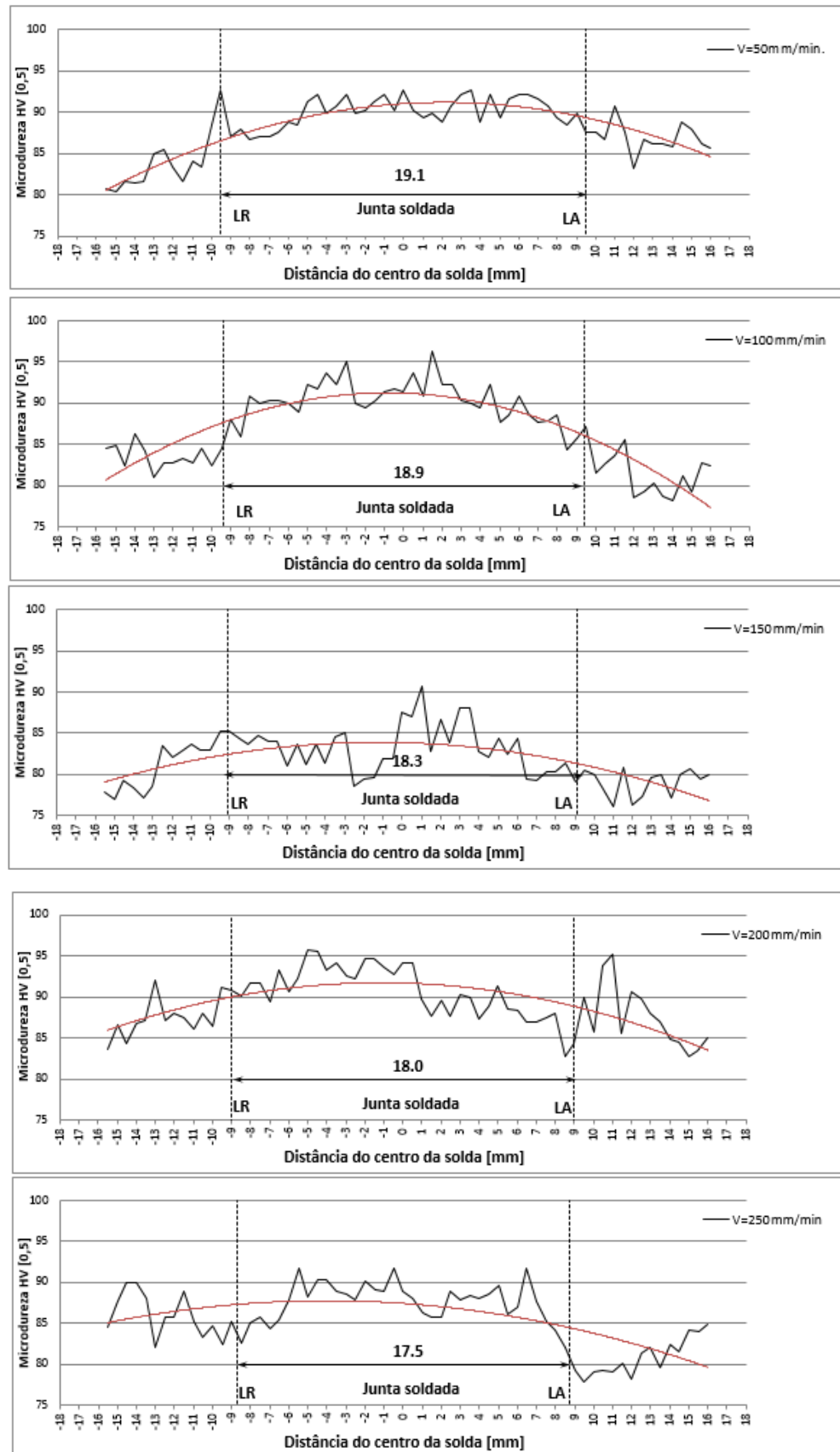
4.3.6. Perfil de Microdureza Vickers

É interessante a avaliação da microdureza, pois a variação dos valores de microdurezas na região soldada e no material de base é devido às diferenças microestruturais encontradas na região soldada, o que indica alterações microestruturais decorrentes do processo de soldagem por FSW.

Segundo Kozminski (2015) alguns fatores podem influenciar a dureza da junta soldada, tais como a composição química e o grau de encruamento do material de base, os efeitos metalúrgicos intrínsecos do processo de FSW bem como os parâmetros empregados. Com isso, a comparação entre os valores de dureza da região soldada e do material de base são importantes, pois podem indicar uma perda de ductilidade, eventualmente comprometendo a junta soldada.

Medições de microdureza foram realizadas à meia espessura das amostras soldadas, com objetivo de obter o perfil de dureza ao longo da seção transversal da junta soldada, conforme descrito no subitem 3.5.5. A Figura 60 apresenta os valores de dureza em função das velocidades de soldagem, também são indicadas as larguras das soldas, o lado do avanço e lado do recuo e uma linha de tendência que representa a tendência do perfil de dureza do interior da junta soldada.

Figura 60 – Perfil de microdureza Vickers em amostras produzidas com velocidades de soldagem entre 50 e 250 mm/min.



Fonte: Próprio Autor

Na Figura 60 o ponto zero indica a linha central da solda, onde aponta que os maiores valores de dureza estão na região da ZM, em todos os casos obteve-se valores de dureza acima dos encontrados no material de base, confirmando essa informação através da linha de tendência.

Segundo Kim *et al.* (2006) na soldagem de ligas de alumínio recozidas, fundidas e forjadas a soldagem através do processo FSW geralmente não produz perdas nas propriedades do material em relação ao metal de base. Na verdade, na região da mistura da solda há algum aumento de dureza e resistência devido ao trabalho mecânico a quente e conseqüentemente refinamento na estrutura granular, dispersão de compostos intermetálicos, quebra da estrutura dendrítica original e a reduzida probabilidade de formação de defeitos volumétricos do tipo vazio.

Neste estudo os ganhos de dureza na região da mistura (núcleo da solda) foi mais expressivo à medida que a velocidade de soldagem aumentou entre 50 e 250 mm/min, confirmando o mesmo comportamento observado por Kozminski (2015). Este fato pode ser atribuído à redução do tempo de exposição do material às temperaturas elevadas do processo. Assim, acontecendo à interrupção de processos de recristalização secundária, comprometendo o crescimento dos grãos e mantendo os grãos refinados.

4.3.7. Ensaio de Tração

Com o objetivo de verificar a eficiência da junta soldada obtida pelo processo FSW, corpos de prova foram submetidos a ensaios de tração, confeccionados e ensaiados conforme descrito na seção 3.5.6. Vale ressaltar que todos os corpos de prova foram retirados em corte transversal em relação à direção de soldagem, ou seja, perpendiculares ao sentido de laminação do material de base e que para cada combinação de parâmetros foram retirados três corpos de prova conforme a Figura 38 da seção 3.5.1.

O local de ruptura dos corpos de prova nos ensaios e os valores médios de limite de escoamento (N/mm²), limite de resistência (N/mm²) e alongamento (%) obtidos através da combinação de diferentes velocidades de soldagem e para o material de base podem ser visualizados na Tabela 14.

Tabela 14 – Ensaio de Tração – Média, desvios padrões das juntas soldadas

Velocidade de Soldagem [mm/min.]	Média limite resistência [MPa]	Média limite de escoamento [MPa]	Alongamento [%]	Local de Ruptura
Material Base	277,50	130,80	25,09	-
50	289,5 ±3	133,1 ±3,0	19,92 ±1,70	Solda
100	294,4 ±4	136,2 ±3,3	20,08 ±0,70	MB
150	284,0 ±6	131,6 ±2,6	20,97 ±1,10	MB
200	288,8 ±3	133,2 ±2,8	20,45 ±1,60	MB
250	283,0 ±4	129,9 ±2,5	22,53 ±1,70	MB

Fonte: Próprio Autor.

A eficiência da junta soldada é calculada tomando como base os valores médios do limite de escoamento, limite de resistência e alongamento, obtidos na caracterização do metal de base, ver seção 4.1. Os valores da eficiência da junta soldada podem ser visualizados na Tabela 15.

Tabela 15 – Resultados da eficiência da junta soldada no ensaio de tração

Velocidade de Soldagem [mm/min.]	Eficiência limite de resistência [%]	Eficiência limite de escoamento [%]	Eficiência Alongamento [%]
50	100	100	79,39
100	100	100	80,03
150	100	100	83,58
200	100	100	81,51
250	100	100	89,80

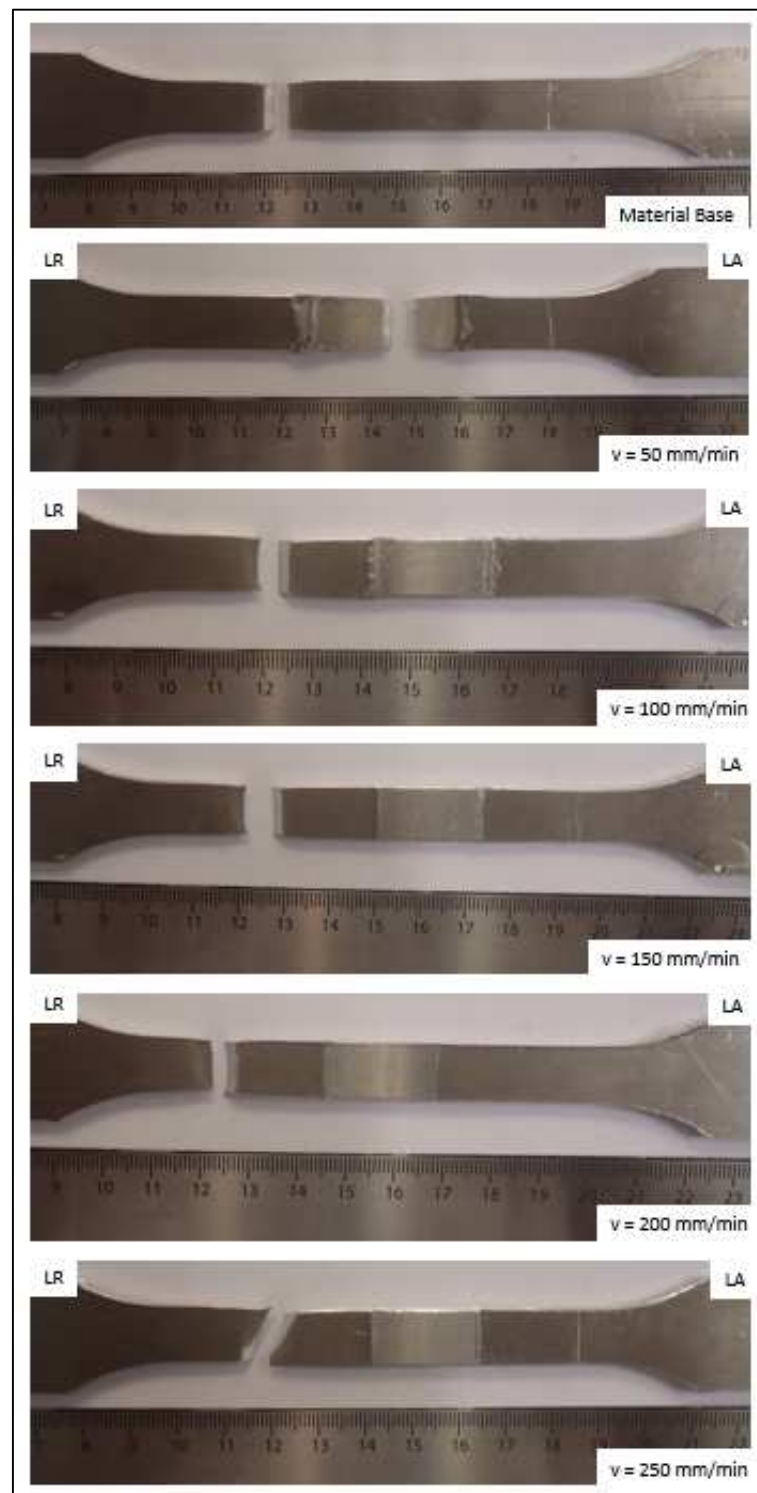
Fonte: Próprio Autor.

Para todas as velocidades de soldagem, os valores de limite de escoamento foram mantidos próximos aos valores observados nas amostras do material de base. Da mesma forma, o limite de resistência à tração ficou acima dos valores encontrados no material de base, e em todos os casos a eficiência supera os 100% quando comparada com o material de base.

O alongamento foi reduzido para todas as velocidades de soldagem em comparação ao material de base, o que pode ser resultado de um refino microestrutural na região soldada (KOZMINSKI, 2015).

As fotografias da Figura 61 apresentam, respectivamente, os corpos de prova perpendiculares ao sentido de laminação do material de base e das soldas realizadas com as diferentes velocidades de soldagem, rompidos após o ensaio de tração.

Figura 61 – Imagens do ensaio de tração do material de base e juntas soldadas com diferentes velocidades de soldagem.



Fonte: Próprio Autor.

Como pode ser visualizado na Figura 61, as amostras produzidas com velocidades de soldagem de 100, 150, 200 e 250 mm/min. apresentam rompimento no material de base, indicando que não houve redução na resistência mecânica das juntas soldadas quando comparadas aos corpos de prova do material de base. Já para velocidade de soldagem de 50mm/min., observou-se que a falha ocorre sobre a solda como ilustrado na Figura 61, situando-se a uma distância entre 3 e 5 mm afastada da linha de centro da solda no lado do avanço.

A boa qualidade da junta solda é comprovada pelo ensaio de tração, em que os corpos de prova fraturaram no metal de base e demonstraram boas propriedades mecânicas mesmo após soldados, para as amostras realizadas com velocidades de soldagem de 100 a 250 mm/min, o que permitiram a obtenção de solda com mistura homogênea e ausência de defeitos.

Para velocidade de soldagem de 50mm/min que apresentou rompimento na junta soldada, os valores de eficiência da junta estão muito próximos ao do metal de base, o que leva a acreditar que o rompimento na junta soldada está associado a dois defeitos distintos, onde o primeiro é a expulsão de material (*flash*) devido ao maior aporte térmico obtido com essa velocidade de soldagem, o que ocasiona um fluxo de material excessivo, facilitando sua ejeção, acarretando em uma redução da espessura da chapa na junta soldada, e o segundo defeito foi inspecionado através de microtomografia de Raios X, onde foram observados defeitos volumétricos do tipo vazio no lado do avanço, mesmo local de ruptura dos corpos de prova no ensaio de tração.

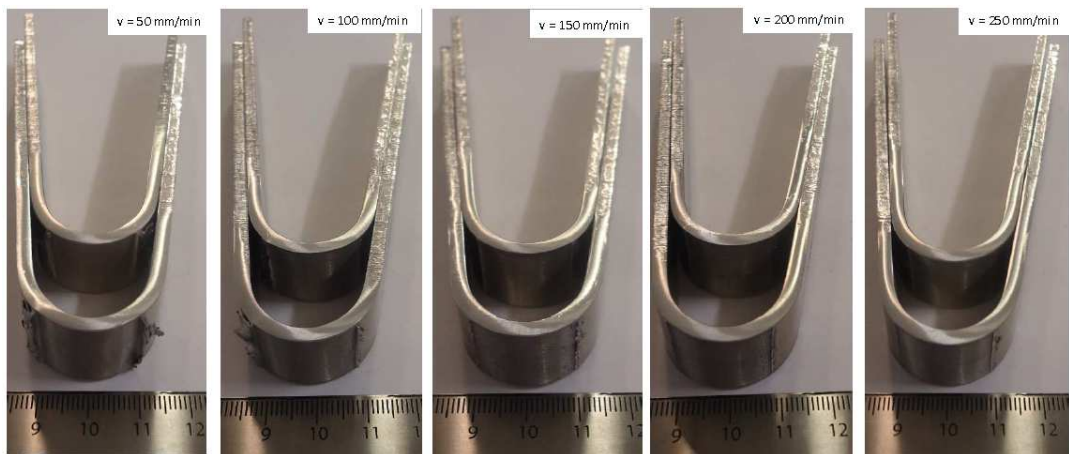
Vale ressaltar que segundo a norma ISO 25239-4:2011 “*Friction stir welding – Aluminium – Specification and qualification of welding procedures*” especifica que a eficiência da junta soldada para o limite de resistência à tração de ligas de alumínio na condição de tratamento O (recozida), não deve ser menor que o mínimo valor especificado na norma do material de base. No caso deste estudo, que foi utilizada a liga de alumínio 5182-O, o mínimo valor de limite de resistência à tração especificado pelo catálogo do fornecedor Novelis é de 255MPa, dessa forma aprovando todas as condições de velocidades testadas no intervalo de 50 a 250mm/min, mesmo para o caso da velocidade de soldagem que ocorreu o rompimento na junta soldada do lado do avanço, onde o limite de resistência à tração foi de $289,5 \pm 3$ MPa.

4.3.8. Ensaio de Dobramento

Com a finalidade de observar a ductilidade da região soldada e verificar se houve penetração total nas juntas, foram realizados ensaios de dobramento de face e raiz em amostras soldadas, de cada amostra foram retirados dois corpos de prova de face e dois corpos de prova de raiz, seguindo as especificações da norma ISO 25239-4:2011 “*Friction stir welding – Aluminium – Specification and qualification of welding procedures*”, a posição dos corpos de prova nas amostras podem ser visualizadas através da Figura 38 da seção 3.5.1.

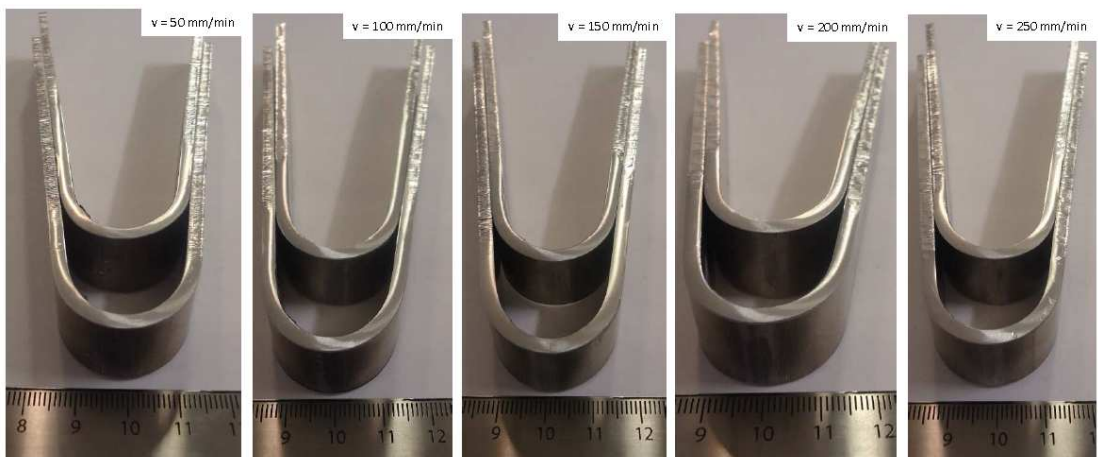
Foram avaliadas soldas produzidas com velocidades de soldagem de 50 a 250 mm/min, sendo apresentadas nas Figuras 62 e 63, o dobramento de face e raiz, respectivamente, e na Tabela 16 são apresentados os ângulos atingidos durante o ensaio.

Figura 62 – Dobramento de face em amostras produzidas pelo processo de FSW.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 63 – Dobramento de raiz em amostras produzidas pelo processo de FSW.



Fonte: Próprio Autor.

Tabela 16 – Ângulos de dobramento das amostras para cada velocidade de soldagem.

Velocidade de Soldagem [mm/min]	Dobramento	Ângulo de Dobramento [°]
50	Face	180
100	Face	180
150	Face	180
200	Face	180
250	Face	180
50	Raiz	180
100	Raiz	180
150	Raiz	180
200	Raiz	180
250	Raiz	180

Fonte: Próprio Autor.

Em todas as condições de soldagem, com velocidades variando de 50 a 250mm/min as amostras foram dobradas até um ângulo de 180°. Por mais que os valores de alongamento foram reduzidos em todas as velocidades de soldagem, conforme já visto no ensaio de tração, expresse uma redução de ductilidade, o ensaio de dobramento indicou que o nível de ductilidade das soldas é adequado, pois todas as amostras apresentaram ângulo de dobramento de 180°, tanto no dobramento de face como de raiz, sem apresentarem fissuras ou rompimento.

Segundo Gibson *et al.* (2014), a falha no dobramento de raiz é acompanhada por uma redução mensurável e geralmente significativa da vida em fadiga. Desta forma, o ensaio de dobramento de raiz é um bom indicador de desempenho do ensaio de fadiga em relação a falhas de raiz.

CONCLUSÕES

Através da realização do processo FSW em chapas de alumínio da liga 5182-O com 3,25mm de espessura, empregando-se uma ferramenta projetada e fabricada em aço VF800 AT, inclinada em 1°, com os conjuntos de parâmetros de soldagem previamente selecionados, possibilitou a obtenção de uma série de conclusões sobre a caracterização das soldas obtidas por este processo, entre elas:

- Os parâmetros do processo selecionados foram escolhidos adequadamente, pois as juntas soldadas apresentaram uma boa qualidade superficial. Soldas com mistura homogênea e livre de defeitos foram produzidas para velocidades de soldagem entre 100 e 250 mm/min, sendo que as juntas soldadas com descontinuidades volumétricas do tipo vazio na fronteira entre a zona da mistura e a ZTMA no lado do avanço foram obtidas com velocidade de soldagem de 50mm/min.
- Em todos os casos ocorreu um refinamento na microestrutura na região da mistura, com grãos recristalizados devido ao ciclo térmico e deformação plástica induzida pelo processo de soldagem, a distribuição microestrutural é assimétrica entre o lado do avanço e o lado do recuo, com refino de grão mais acentuado no lado do avanço da zona da mistura, o que ficou evidente a demarcação da fronteira com a ZTMA neste lado da junta soldada.
- A inspeção por microtomografia de Raios X mostrou-se como uma técnica confiável para detecção de descontinuidades do tipo vazio no interior das juntas soldadas com velocidade de 50mm/min.
- O aporte térmico é um fator determinante para garantir uma solda de qualidade, sendo desejada uma combinação de parâmetros que resultem em uma solda livre de defeitos, uma vez que aportes térmicos muito elevados podem resultar em defeitos como rugosidade superficial, excesso de flash e no caso da solda com velocidade de 50mm/min resultou em defeitos internos do tipo vazio, conforme visto em inspeção por microtomografia.

- O aumento da velocidade de soldagem combinado com o torque resultam em uma redução do aporte térmico, isso porque o aumento da velocidade de soldagem durante o processo acarreta na redução do tempo o qual o material sofre fricção pela ação da ferramenta.
- Os valores dos limites de escoamento e de resistência à tração das juntas soldadas foram próximos aos apresentados pelo material de base, com uma redução significativa nos valores de alongamento.
- No ensaio de dobramento tanto de face como de raiz, as juntas em todas as condições de soldagem, não apresentaram defeitos e obtiveram um ângulo de dobramento em ambos os casos de 180°, o que comprova a boa ductilidade do material na região soldada.
- Ocorreu um aumento da dureza na zona da mistura em relação ao material de base devido ao refino de grão. Este aumento também está relacionado com o aumento da velocidade de avanço de 50 para 250mm/min.
- Em relação aos parâmetros de soldagem, pode-se afirmar que o desempenho obtido pela combinação de velocidade de avanço de 250 mm/min, mostra-se o mais adequado para obtenção de solda com qualidades apreciável, uma vez que maiores velocidades de soldagem podem acarretar em aumento da produção.
- Os resultados obtidos mostram que a soldagem por FSW é capaz de produzir juntas de excelente qualidade, desde que utilizada uma combinação adequada de parâmetros de soldagem e geometria da ferramenta.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Soldar com maiores velocidades de soldagem com o objetivo de obter maior produtividade no processo.
- Aplicar o processo de FSW em um produto em escala de produção, substituindo o processo convencional de soldagem MIG.
- Avaliar o desgaste da ferramenta nas diferentes condições de soldagem.
- Testar outras condições de parâmetros e criar uma janela de trabalho mais precisa para o processo.
- Utilizar o processo de FSW para solda em ligas dissimilares, como por exemplo, alumínio e aço.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAL, **Relatório de Sustentabilidade da Indústria do Alumínio**. São Paulo, 2005. Disponível em: <<http://www.abal.org.br>>. Acesso em: 02 set. 2015.

ABAL, **Consumo de Alumínio deve Crescer 13% em 2011**. Abril 2011. Disponível em: <<http://www.abal.org.br>>. Acesso em 02 set. 2015.

ABNT NBR 6834. **Alumínio e suas ligas - Classificação da Composição Química**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2006.

ABNT NBR 6835. **Alumínio e suas ligas - Classificação das Têmperas**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2006.

ABNT NBR 7823. **Alumínio e suas ligas - Chapas - Propriedades Mecânicas**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2007.

ALCAN. **Manual de Soldagem**. 1ª Ed. São Paulo: ALCAN Alumínio do Brasil, p. 141, 1993.

ALMEIDA, D.T. **Estudo dos parâmetros no processo de soldagem de mistura por atrito (FSW) da liga de alumínio 5083-O**. Monografia, UNIJUÍ, Panambi, 2013.

AMÂNCIO FILHO, S.T. **Soldagem por Fricção de Junta Dissimilar em Ligas de Alumínio de AA2024 e AA6056**. Dissertação de Mestrado, UFSCar, São Carlos, 2002.

ARBEGAST, W. J. **A flow-partitioned deformation zone model for defect formation during friction stir welding**. Scripta Materialia, v.58, p. 372-376, 2008.

ASM METALS HANDBOOK. **Welding, brazing and soldering**. ASM International, v.6, 1993.

CAPELARI, Tiago V.. **Avaliação da Geometria da Ferramenta e Parâmetros do Processo FSW na Soldagem da Liga de Alumínio AA 5052**. Dissertação de Mestrado - PPGEM, UFRGS, Porto Alegre, 2006.

CARLETTI C. B. **Propriedades Mecânicas de Juntas Sobrepostas da Liga Al 6061 Soldadas por FSW**. Dissertação de Mestrado, UFSCar, São Carlos , 2002.

CAVALIERE, P., CERRI, E., SQUILLACE, A. **Mechanical Response of 2024-7075 Aluminium Alloys Joined by Friction Stir Welding**. Journal of Materials Science, 40, p. 3669 – 3676, 2005.

CEDERQVIST, L., REYNOLDS, A. P. **Factors affecting the properties of friction stir welding aluminum lap joints**. Welding Journal, Welding Research – Supplement to the Welding Journal, p. 7, 2002.

COLLIER, M., STEEL, R., NELSON, W., SORENSEN, C., PACKER, S. **Development of polycrystalline cubic boron nitride for friction stir processing of ferrous alloys**. Material Science Forum, v. 426-432, n .4, p. 3011-3016, 2003.

COOK, G.E., COX, C.D., HENDRICKS, C.E. **Controlling Robotic Friction Stir Welding**. Welding Journal, vol. 82, n°6, p. 28-34, 2003.

CRUZ, M. F.; NETO, C. de M. **Friction Stir Welding – Review: Potencial de Aplicação na Indústria**. Trabalho apresentado no XI Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa, São Jose dos Campos - SP, 2009

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

DAVIS, J.R. ASM International (Ed.). **ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys**. Ohio, 2002.

DAWES C J; SPURGIN E J R AND STAINES D G; **Friction Stir Welding Aluminum Alloy 5083 – Increased Welding Speed**, England: TWI Rep. n 684, 1999.

DICKERSON T.L., PRZYDATEK P., **Fatigue of Friction Stir Welds in Aluminum Alloys that Contain Root Flaws**, International Journal of Fatigue, September, 2002.

DIXON, R. Brazing and soldering. In: ASM Handbook. **Brazing and Soldering. United States: Procedure Development and Practice Considerations for Solid-State Welding**. ASM Internacional, 1994.

EAA. European Aluminum Association. **Aluminium Automotive Manual**. Disponível em: <<http://www.eaa.net/aam>>. Acesso em: 18 set. 2015.

ERICSSON M., SANDSTROM R., **Influence of Welding Speed on the Fatigue of Friction Stir Welds and Comparison with MIG and TIG**, International Journal of Fatigue, July 2002.

ESAB. **Technical Handbook: Friction Stir Welding**. Laxa – Suécia. Disponível em: <<http://www.esab.com>>. Acesso em: 30 nov. 2015.

EURO CAR BODY. **17th Global Car Body Benchmarking Conference**. Bad Nauheim – Alemanha, out. 2015.

FILLETI, A. **As novas aplicações para o alumínio na indústria automotiva**, Materiais automotivos e nanotecnologia – São Paulo, 2010.

FIORAVANTI, A. S. **Soldagem por FSW de Ligas de Alumínio ALCLAD AA2024-T3 e AA7075-T6**, Dissertação de Mestrado – UFRGS , Porto Alegre, 2008.

FULLER, C. B; KRAUSE, A. R; DUNAND, D.C.; SEIDMAN, D. N. **Microstructure and mechanical properties of a 5754 aluminum alloy modified by Sc and Zr additions**. Materials Science and Engineering, vol. 338, p 8-16, 2002.

GENICOLO, M. A. C., **Estudo De Viabilidade Para Implementação de Uniões Soldadas pelo Método Friction Stir Welding em Estruturas Aeronáuticas**, Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica de São Paulo, 2007.

GIBSON, B. T., LAMMLEIN, D.H., PRATER, T.J., LONGHURST, W.R. **Friction stir welding – Process, automation and control**. Journal of Manufacturing Processes, 16 (1): 56-73, 2014.

GILBREATH, W. P. **The vapor pressure of magnesium between 223° and 385° C**. Nasa technical note, NASA TN D-2723, p. 1-11, 1965.

GUERRA M., SCHMIDT C., McCLURE J.C. **Flow Patterns During Friction Stir Welding**, Materials Characterization 49, pp 95-101, 2003.

HATTINGH, D.G, BLIGNAULT, C., KRUGER, G.H., van NIEKERK, T.I., JAMES, M.N. **Characterization of the influences of FSW tool geometry on welding forces and weld tensile strength using an instrumented tool**. Journal of Materials Processing Technology, v. 203, p.46-57, 2008.

HILLER D J, FERREIRA M L R; **Adaptação de uma máquina fresadora vertical para soldagem FSW – Friction Stir Welding de ligas de alumínio**; In: III Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação – Anais do III COBEF, Joinville, SC, Brasil, 2005.

HILLER, DANIEL J. **Estudo de Parâmetros e Percursos no Processo de Soldagem de Mistura por Atrito (FSW) da Liga de Alumínio 5052**. Dissertação de Mestrado - COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.

ISO 25239-3. **Friction stir welding – Aluminium – Qualification of Welding Operators**. International Standard Organization, 2011.

ISO 25239-4. **Friction stir welding – Aluminium – Specification and qualification of welding procedures**. International Standard Organization, 2011.

JAMES, M. N.; BRADLEY, G. R.; LOMBARD, H.; HATTINGH, D. G. **The relationship between process mechanisms and crack paths in friction stir welded 5083-H321 and 5383-H321 aluminium alloys**. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 28, p. 245–256, 2005.

KALLEE S W, NICHOLAS E. D, THOMAS W M; **Friction Stir Welding – Invention, innovations and applications**; INALCO 2001 8TH International Conference on Joints in Aluminum, Munich – Germany, 28-30 March, 2001.

KIM Y.G., FUJII H, TSUMURA T, KOMOZAKI T, NAKATA K, **Three defect types in Friction Stir Welding of aluminum die casting alloy**; Materials Science and Engineering A 415, pp 250-254, 2006.

KRISHNAN K.N., **On the Formation of Onion Rings in Friction Stir Welds**, Materials Science and Engineering A 327, pp 246-251, 2002.

KONKOL, P.J., SORENSEN, C.D., NELSON, T.W., PACKER, S.M. **Characterization of friction stir weld in 500 Brinell hardness quenched and tempered steel**. In: International Symposium on FSW, 4. Proceedings, Park City, EUA, 2003.

KOU, S. **Welding Metallurgy**. New York: John Wiley & Sons, p. 410, 1987.

KOZMINSKI, EMÍLIA L.O. **Análise Microestrutural e Avaliação Mecânica de Juntas Soldadas por Fricção e Mistura Mecânica (FSW) do Aço Inoxidável Dúplex UNS S31803**. Dissertação de Mestrado - UFRGS, Porto Alegre, 2015.

KUMAR, K., KAILAS, S.V. **The role of friction stir welding tool on material flow and weld formation**. Materials Science and Engineering, A, 485, p. 367-374, 2008.

KUKA SYSTEM, **Catálogo KUKA friction stir welding technology**. Augsburg – Germany. Disponível em: <[http:// www.kuka-systems.com](http://www.kuka-systems.com)>. Acesso em: 05 nov. 2015.

KUSUDA, Y. **Honda develops robotized FSW technology to weld steel and aluminum and applied it to a massproduction vehicle**, Industrial Robot: An International Journal, Vol. 40 Iss 3 pp. 208 – 212, 2013

LEE, W.B., JUNG, S.B. **Joint Properties of Cu by FSW**. Materials Letters, v.58, p.1041-1046, 2004.

LEONARD A J, **Flaws in aluminum alloy Friction Stir Welds**. England: TWI Rep. N 726, April, 2001.

MARCONATO, E. A. **Influência de Defeitos nas Propriedades Mecânicas de Juntas Soldadas por FSW da Liga AA6013-T6**, Dissertação de Mestrado- UFSCar – São Paulo, 2009.

MISHRA, R. S., Ma, Z. Y. **Friction Stir Welding and Processing**, Materials Science and Engineering, vol 50, pág 1-78, 2005.

MISHRA, R. S. Ma, Z. Y. **Friction Stir Welding and Processing**. ASM International, 2007.

MISHRA, C. R., KUMAR, N. **Friction Stir Welding and Processing**, Science and Engineering, Suíça: Springer, 2014.

MONDOLFO, L.F. **Aluminium Alloys: Structure and Properties**. 1th ed. Butterworth London-Boston, p. 253-78, 1976.

NOVELIS, **Table of properties for semi-finished rolled aluminium goods**. Germany, June, 2008. Disponível em:<<http://www.novelis-specialities.com>>. Acesso em: 11 set. 2015.

OLSON, D.L.. ASM International (Ed.). **ASM Handbook V.6: Welding, Brazing and Soldering**. 8th ed., Metals Park, Ohio, 1977.

PINELLI, J. A. **Avaliação Microestrutural da Liga Al 380 Soldada pelo Processo Friction Stir Welding – FSW**. UFSCar/DEMa, 39 p. , 2006.

POLITI, E. **Química – Curso completo**. Editora Moderna, 1994.

PRADO R.A., MURR L.E., SOTO K.F. McCLURE J.C., **Self-optimization in Tool Wear for Friction Stir Welding Al 6061 + 29% Al2O3 MMC**, Materials Science and Engineering A00, p. 1-10, 2002.

PRAVEEN, P.; YARLAGADDA, P.k.d.v.. **Meeting Challenges in Welding of Aluminum Alloys Through Pulse Gas Metal Arc Welding**. Journal of Materials Processing Technology, 164-165, 2005.

RUSSEL M.J., **Development of Improved Tool Design and Parameters for the Friction Stir Butt Welding of 1.2, 6 and 25mm Thickness Aluminum Alloy, England: TWI Rep. n 801, 2004.**

SATO, Y.S. *et al.* **Microstructure and mechanical properties of friction stir welded SAF 2507 super duplex stainless steel**. Materials Science and Engineering, A 397, p. 376-384, 2005.

SAUNDERS, H. L.. Aluminum Association (Ed.). **Welding Aluminum: Theory and Practice**. Washington Dc, 1989.

SCHILIVE, GISMAR S. **Influência da Geometria da Ferramenta na soldagem da liga de Alumínio 5052 pelo Processo Friction Stir Welding**. Dissertação de Mestrado - PPGEM, UTFPR, Curitiba, 2010.

SCHMIDT H.N.B, DICKERSON T.L., HATTEL J.H., **Material Flow in Butt Friction Stir Welds in AA2024-T3 H.N.B**, Acta Materialia 54 pp 1199-1209, 2006.

SORENSEN, C.D., NELSON, T.W., PACKER, S.M. **Tool material testing for FSW of high temperature alloys**. In: International Symposium on Friction Stir Welding, 3. Proceedings, Kobe – Japan, 2001

SYLVA, G., CHRISTNER, B. **Friction Stir Weld Developments For Aerospace Applications**, International Conference on Advances in Welding Technology, Columbus, Ohio, 1996.

SUTTON, M. A., REYNOLDS, A. P., YANG, B., TAYLOR, R. **Mixed mode I/II fracture of 2024-T3 friction stir welds**. Engineering Fracture Mechanics 70, p. 2215-2234, 2003

THEODORO, M.C. **Soldagem por atrito com pino não-consumível em juntas dissimilares de aços inoxidáveis austeníticos UNS S31603 e superduplex UNS S32750**. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica, 2013.

THREADGILL, P.L. **Friction Stir Welding – The State of the Art**. England, TWI Rep. n 678, 1999.

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

THOMAS, W. M., E.D., NICHOLAS, J.C., NEEDHAM, M.G. MURCH, P. TEMPLESMITH, C.J. DAWES, G.B. **Patent Application No.9125978.8**, December 1991.

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

TOROS, S.; OZTURK, F.; KACAR, I. **Review of warm forming of aluminum–magnesium alloys**. Journal of Materials Processing Technology, vol. 207, p. 1-12, 2008.

TOTTEN, G.E.; MACKENZIE, D.S. **Handbook of Aluminium: Physical Metallurgy and Process**. Vol.1, Nova Iorque: Marcel Dekker, Inc., 2003.

TWI. The Welding Institute. **Materials Weldable by Friction Stir**. Disponível em: <<http://www.twi-global.com/capabilities/joining-technologies>>. Acesso em: 24 nov. 2015.










VILAÇA, P., QUINTINO, L., SANTOS, J. F. **iSTIR – Analytical thermal model for friction stir welding**. Journal of Materials Processing Technology, 169, p. 452-465, 2005

WEI, L.Y. NELSON, T.W. **Correlation of microstructures and process variables in FSW HSLA-65 steel**. Welding Journal, v.90, p.95-101, 2011.







WILLIAMS, S. W. **Welding of Airframes using Friction Stir**. AIR & SPACE EUROPE, V.3, p.3, 2001.

ZETTLER, R., LOMOLINO, S. **Study on root flaws in 4 mm thick AA2024-T351 FSW joints**. GKSS Forschungszentrum Geesthacht GmbH, 2004.

ANEXO I – TABELA RESULTADOS TESTES PRELIMINARES

Parâmetros de Soldagem								
Corpo de Prova (N°)	Ferramenta	Rotação (rpm)	Velocidade de Avanço (mm/min)	Tempo de Desperdício (s)	Penetração do anodo (mm)	Ângulo de Inclinação (°)	Observação	Foto
1	Ferramenta Roca SAC 1045	650	75	10	0,3	1°	-União de nexo está, não há rebarba suficiente para unir os chapas em nada espessura.	
2	Ferramenta Roca SAC 1045	1000	75	10	0,3	1°	-União de nexo está, não há rebarba suficiente para unir os chapas em nada espessura.	
3	Ferramenta Roca SAC 1045	1500	75	10	0,3	1°	-União de nexo está, não há rebarba suficiente para unir os chapas em nada espessura. - Escala de rebarba; Ferramenta quebrou.	
4	Ferramenta Roca VC 121	650	75	10	0,3	1°	-União de nexo está, não há rebarba suficiente para unir os chapas em nada espessura. - Escala de rebarba.	
5	Ferramenta Roca VC 121	1000	75	10	0,3	1°	-União de nexo está, não há rebarba suficiente para unir os chapas em nada espessura. - Escala de rebarba; Ferramenta quebrou.	
6	Ferramenta Roca SAC 1045	650	75	10	0,3	1°	-União de nexo está, não há rebarba suficiente para unir os chapas em nada espessura. - Escala de rebarba; Ferramenta quebrou.	
7	Ferramenta Roca VC 121	1000	75	10	0,3	1°	-União de nexo está, não há rebarba suficiente para unir os chapas em nada espessura. - Escala de rebarba; Ferramenta quebrou.	
8	Ferramenta Roca em corte SAC 1045	1000	75	10	0,3	1°	-União de nexo está, não há rebarba suficiente para unir os chapas em nada espessura. - Escala de rebarba; Ferramenta quebrou.	
9	Ferramenta Roca em corte VC 121	650	75	10	0,3	1°	-Ferramenta quebrou no início da solda.	

Parâmetros de Soldagem								Date: 01/04/2013
Corpo de Prova N°	Parâmetros	Rotação (rpm)	Velocidade de Avanço (mm/min)	Tempo de Exposição	Penetração do Ambró (mm)	Ângulo de Inclinação (°)	Observação	Foto
1	Parâmetros Base VFN600 AT	2100	45	20	0,6	3°	-União de referência, com boa penetração suficiente para unir as chapas em toda a espessura.	
2	Parâmetros Cônica I ba VFN600 AT	2100	45	20	0,6	3°	-União de referência, com boa penetração suficiente para unir as chapas em toda a espessura.	
3	Parâmetros Cônica I ba VFN600 AT	2500	45	20	0,6	3°	-União de referência, com boa penetração suficiente para unir as chapas em toda a espessura. - Excesso de rebarbas, nada a ser removido a solda.	
4	Parâmetros Cônica I ba VFN600 AT	1500	45	20	0,6	3°	- União de referência, -Solda Completa.	
5	Parâmetros Cônica I ba VFN600 AT	1000	45	20	0,6	3°	- União de referência, -Solda Completa, boa aparência.	
6	Parâmetros Cônica I ba VFN600 AT	750	45	20	0,6	3°	- União de referência, -Solda Completa, com presença de bolhas.	
7	Parâmetros Base Cônica VFN600 AT Inclinado (30 Graus de 27)	1500	45	20	0,6	3°	-União de referência, com boa penetração suficiente para unir as chapas em toda a espessura. - Excesso de varões.	
8	Parâmetros Base Cônica VFN600 AT Inclinado (30 Graus de 27)	2100	45	20	0,6	3°	-União de referência, com boa penetração suficiente para unir as chapas em toda a espessura. - Excesso de varões, de Rebarbas.	
9	Parâmetros Base Cônica VFN600 AT Inclinado (30 Graus de 27)	2100	45	20	0,6	5°	-União de referência, com boa penetração suficiente para unir as chapas em toda a espessura. - Excesso de varões, de Rebarbas.	

L0	Parafina Raia Cinco VFM00AT	2100	45	20	0,6	3"	-União de resina bi, resina nova H2O a sulfama para unir as chapas em nada espessura, -Vozão em nada e acionada a solda,	
L1	Parafina Raia Cinco VFM00AT	1500	45	20	0,6	3"	-União de resina bi, -Ciclos de Rebarbas,	
L2	Parafina Raia Cinco VFM00AT	1000	45	20	0,6	3"	-União de resina bi, -Distribuição de Rebarbas,	
L3	Parafina Raia Cinco VFM00AT	750	45	20	0,6	3"	-União de resina bi, resina nova H2O a sulfama para unir as chapas em nada espessura,	
L4	Parafina Raia Cinco VFM00AT	500	45	20	0,5	3"	-Solda em nada e resina H2O a sulfama a solda,	
L5	Parafina Raia Cinco VFM00AT	500	45	20	0,5	1"	-União de resina bi, resina nova H2O a sulfama para unir as chapas em nada espessura, -Deve ser distribuída a profundidade do arco,	

Fundamentos de Geología								
Código de la nota	Enunciado	Responde a par	Verdad de / o no (sí/no)	Por qué (si responde)	Enunciado de / o no (sí/no)	Jugo la de / o no (sí/no)	Nota	Foto
1	Enunciado de la nota 1	Sí	SI	no	SI	SI		
2	Enunciado de la nota 2	Sí	SI	no	SI	SI		
3	Enunciado de la nota 3	Sí	SI	no	SI	SI		
4	Enunciado de la nota 4	Sí	SI	no	SI	SI		
5	Enunciado de la nota 5	Sí	SI	no	SI	SI		
6	Enunciado de la nota 6	Sí	SI	no	SI	SI		
7	Enunciado de la nota 7	Sí	SI	no	SI	SI		
8	Enunciado de la nota 8	Sí	SI	no	SI	SI		
9	Enunciado de la nota 9	Sí	SI	no	SI	SI		