

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

Estudo do comportamento mecânico, metalúrgico e elétrico de juntas sobrepostas dissimilares da liga de Cobre ASTM C110 e de Alumínio AA6060-T5 produzidas pelo processo de soldagem por fricção e mistura mecânica (FSW) modificado

Aldoni Gabriel Wiedenhöft

Trabalho realizado na Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre

2018

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do título de Doutor em Engenharia, área de concentração em Ciência e Tecnologia dos Materiais e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador (in memoriam): Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker.

Co -Orientador: Prof. Dr. Afonso Reguly.

Banca Examinadora:

Dr. Marco Durlo Tier – Unipampa /Alegrete

Dr. Fabiano Dornelles Ramos-IFRGS

Dr. Marcio Levi Kramer de Macedo – DEMET/UFRGS

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Coordenador do PPGE3M

Dedico aos meus filhos.
Maximiliano Nunes Wiedenhöft,
Joana Nunes Wiedenhöft, a minha esposa.
Rosita Nunes Wiedenhöft e aos meus pais...
Olinto Wiedenhöft e
Juvelina Brandão Wiedenhöft.

“Jamais considere seus estudos como uma obrigação, mas como uma oportunidade invejável para aprender a conhecer a influência libertadora da beleza do reino do espírito. Para seu próprio prazer pessoal e para proveito da comunidade à qual seu futuro trabalho pertence.”

Albert Einstein

CIP - Catalogação na Publicação

Wiedenhof, Aldoni Gabriel Wiedenhof

Estudo do comportamento mecânico, metalúrgico e elétrico de juntas sobrepostas dissimilares da liga de Cobre ASTM C110 e de Alumínio AA6060-T5 produzidas pelo processo de soldagem por fricção e mistura mecânica (FSW) modificado / Aldoni Gabriel Wiedenhof Wiedenhof. -- 2018.

110 f.

Orientador: Prof. Dr. Afonso Reguly. Reguly..

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2018.

1. Solda por Fricção FSW. 2. Alumínio. 3. Cobre. 4. Junta sobreposta. 5. Materiais dissimilares. I. Reguly., Prof. Dr. Afonso Reguly., orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não poderia ser concluído sem a fé divina que trago comigo e da ajuda de diversas pessoas às quais presto minha sincera homenagem:

Aos colegas da UNIPAMPA prof. Dr. Gustavo Fuor e prof. Dr. Tonilson Roseno, ao prof. Dr. Marco Durló Tier pelo apoio incentivo nas horas de dúvidas e incertezas, ao Laboratório de Usinagem da Unipampa Alegrete RS e principalmente ao meu Orientador Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker (in memoriam) pelo incentivo e orientação, apoio e confiança no meu trabalho onde sempre incentivou dando a maior atenção disponibilizando os laboratórios e bolsistas para auxílio deste estudo, juntamente com a Co-orientação do Prof Dr Afonso Reguly.

Ao Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) da Escola de Engenharia da UFRGS, aos professores em especial ao Prof Dr Tonilson de Souza Rosendo, aos bolsistas, Henrique, Bill, Filipe, ao Dr Rubens Braga, o Rubão, que fez a análise de ultrassom, ao Prof. Dr Roberto Homrich do Departamento de Eng. Elétrica da UFRGS, em especial ao amigo e prof. Dr. Heraldo Amorim pelos conselhos e trocas de informação.

Aos amigos e colegas e a todos os demais parceiros não citados, que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração desta tese, dedico toda a gratidão e principalmente aos meus filhos e esposa pelo apoio e motivação contínua aos estudos em todos os momentos de minha vida.

INDICE

Conteúdo

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação	2
1.2	Objetivo Geral.....	2
•	Objetivo específico.....	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ESTADO DA ARTE	3
2.1	Ligas de alumínio.....	3
2.2	Ligas de Cobre	5
2.3	Soldagem pelo processo (<i>Friction Stir Welding</i> -FSW)	6
2.3.1	O processo FSW	6
2.3.2	Parâmetros de Processo	7
2.3.3	Tipos de juntas.....	8
2.3.4	Regiões da solda FSW	9
2.3.5	Geração de calor e geometria da ferramenta no processo FSW	11
2.3.6	Juntas sobrepostas soldadas pelo processo FSW.....	13
2.3.7	Principais estudos sobre soldas FSW em juntas sobrepostas dissimilares Cu/Al	17
2.4	Resistividade elétrica	20
2.5	Aporte Térmico.....	23
2.6	Projeto de experimento	25
3	Materiais e Métodos	27
3.1	Procedimento Experimental.....	28
3.2	Equipamentos utilizados na execução das soldas	31
3.3	Caracterização das amostras	32
3.3.1	Análises metalográficas	33
3.3.2	Ensaio de cisalhamento	33
3.3.3	Ensaio de fadiga.....	34
3.3.4	Medição de microdureza	35
3.3.5	Testes de resistividade elétrica	35
3.3.6	Avaliação por ultrassom	36
4	RESULTADOS e discussão	37
4.1	Macrografia e micrografia	38
4.2	Resistência ao cisalhamento	42

4.3	Desempenho em fadiga.....	45
4.4	Microdureza	47
4.4	Resultados de resistividade elétrica	50
4.5	Resultado de ultrassom	52
4.6	Esforços durante a soldagem	54
4.7	Temperaturas durante a soldagem	56
5	Discussão DOS RESULTADOS	58
5.1	Relação temperatura / velocidade de rotação / esforços de soldagem	58
5.2	Defeitos de soldagem.....	61
5.3	Caracterização metalúrgica das juntas soldadas	65
5.4	Desempenho mecânico	71
5.4.1	Solicitação monotônica (ensaio de cisalhamento).....	71
5.4.2	Solicitação cíclica (ensaio de fadiga)	73
5.5	Efeitos da resistividade elétrica na junta soldada	75
5.6	Considerações finais	76
6	CONCLUSÕES.....	78
7	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	80
8	Referencias bibliograficas.....	81
9	APENDICE	87
9.1	APENDICE I – Testes preliminares	87
9.2	APENDICE II – Desenhos	92
9.1	APENDICE III – Resultados de fadiga	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1– Representação esquemática da FSW.....	6
Figura 2 – Parâmetros de soldagem.....	8
Figura 3 – Tipos de juntas que podem ser unidas pelo processo FSW	9
Figura 4 – Esquema da secção transversal típica do processo FSW na produção de uma junta de topo	10
Figura 5 – Representação do fluxo de material durante a soldagem por fricção linear	11
Figura 6 – Ferramenta de soldagem FSW	12
Figura 7 – Tipos de da junta de solda sobreposta.....	13
Figura 8 – Macro e microestrutura de uma junta sobreposta dissimilar Al/Cu, soldada pelo processo FSW.....	14
Figura 9 – Macrografia da seção transversal de uma junta sobreposta dissimilar Al/Cu soldada por FSW, mostrando vazios na região da solda.	15
Figura 10 – Perfil de microdureza em uma solda dissimilar Cu/Al produzida pelo processo FSW.....	16
Figura 11 – Micrografias da seção transversal de uma junta sobreposta Cu/Al soldada pelo processo FSW: a) região superior esquerda da junta; b) região central	17
Figura 12 – Fluxograma do trabalho	27
Figura 13 – Dimensões das juntas soldadas	28
Figura 14 – Movimento da ferramenta mostrando a implementação do ACI.....	29
Figura 15 – Dispositivo de fixação das amostras e arranjo de medição da temperatura e carga axial.....	31
Figura 16– Soldagem das amostras e esquema mostrando as posições dos sensores de temperatura	32
Figura 17 – Ferramenta de usinagem utilizada no presente trabalho obs; (unidades mm).	32
Figura 18 – Representação esquemática dos ensaios de tração realizados.....	33
Figura 19 – Demarcações das linhas de medição dos perfis de microdureza.....	35
Figura 20 – Medição da resistência elétrica da junta soldada.	36
Figura 21 – Junta sobreposta Cu/Al obtida pelo processo FSW com (ACI-900).....	38
Figura 22 – Macrografia (a) e micrografia (b) da seção transversal de uma solda com (ACI-1000).....	38
Figura 23 – Micrografia da seção transversal de uma solda correspondente à ZM na chapa de Al com (ACI 1000).....	39

Figura 24 – Macrografia da seção longitudinal de uma solda mostrando as bandas de agitação com (ACI-900).	40
Figura 25 – Macrografia da seção longitudinal de uma solda mostrando o ACI 1000 rpm.	40
Figura 26 – Macrografias mostrando a presença de defeitos em algumas soldas:(a) vazio na seção transversal sem ACI-1000) e (b) defeito do tipo túnel no lado do avanço sem ACI-800.	41
Figura 27 – Curvas força x deslocamento para as soldadas realizadas a 800 rpm.	42
Figura 28 – Curvas força x deslocamento para as juntas soldadas a 900 rpm.	42
Figura 29 – Curvas força x deslocamento para as juntas soldadas a 1000 rpm.	43
Figura 30 – Curvas força x deslocamento para as juntas soldadas a 1100 rpm.	43
Figura 31 – Curvas S-N representando a vida em fadiga média para as juntas soldadas com ACI e sem ACI a 1000 rpm.	46
Figura 32 – Perfis de microdureza medidos verticalmente no plano transversal das soldas produzidas com 800 rpm: (a) plano L1 (final do cordão) e (b) plano L2 (início do cordão).	47
Figura 34 – Perfis de microdureza medidos verticalmente no plano transversal das soldas produzidas com 1000 rpm: (a) plano L1 (final do cordão) e (b) plano L2 (início do cordão).	48
Figura 35 – Perfis de microdureza medidos verticalmente no plano transversal das soldas produzidas com 1100 rpm: (a) plano L1 (final do cordão) e (b) plano L2 (início do cordão).	48
Figura 36 – Perfis de microdureza medidos horizontalmente no plano transversal das soldas produzidas com 800 rpm no lado L1 (final do cordão): (a) solda com ACI e (b) solda sem ACI.	48
Figura 37 – Perfis de microdureza medidos horizontalmente no plano transversal das soldas produzidas com 800 rpm no lado L2 (final do cordão): (a) solda com ACI e (b) solda sem ACI.	49
Figura 38 – Perfis de microdureza medidos horizontalmente no plano transversal das soldas produzidas com 1100 rpm no lado L1 (final do cordão): (a) solda com ACI e (b) solda sem ACI.	49
Figura 39 – Perfis de microdureza medidos horizontalmente no plano transversal das soldas produzidas com 1100 rpm no lado L2 (final do cordão): (a) solda com ACI e (b) solda sem ACI.	50

Figura 40 – Média e desvio padrão da resistividade elétrica medidas para as amostras em estudo.....	51
Figura 41– Ecogramas dos ensaios de ultrassom: (a) ecograma de referência e (b) ecograma correspondente à medição da amostra com ACI-1000.	52
Figura 42 – Força axial medida durante a soldagem nas amostras com ACI.....	54
Figura 43 – Força máxima medida durante a penetração da ferramenta em função da velocidade de rotação.	55
Figura 44 – Média dos esforços para a força axial entre 50 e 150 s (processo em regime).55	
Figura 45 – Temperaturas medidas durante a soldagem para as quatro velocidades de rotação em estudo.56	
Figura 46 – Regiões de medição de temperatura: lado do avanço e lado do recuo.	59
Figura 47 – Temperaturas máximas observadas em cada lado da ferramenta	59
Figura 48 – Média da temperatura máxima x velocidade de rotação.	60
Figura 49 – Força axial durante a soldagem por fricção.	60
Figura 50 – Macrografia da seção longitudinal de soldas FSW: (a) com ACI e (b) sem CI61	
Figura 51 – Macrografia da seção longitudinal de uma solda produzida com baixa rotação e sem o movimento ACI a 800rpm, mostrando a presença de vazios.....	61
Figura 52 – Micrografia de solda produzida com rotação de 800 rpm.....	62
Figura 53 – Macrografia no sentido longitudinal mostrando os lados do avanço (LA) e do recuo (LR) em uma solda realizada a 800 rpm e 10 mm/min de avanço.	63
Figura 54 – Defeito de cavidade associada a baixas rotações com avanço excessivo.	63
Figura 55 – Micrografia da região soldada: (a) solda obtida a 800 rpm; (b) solda obtida a 1000 rpm.....	65
Figura 56 – Micrografia da interface de solda mostrando intensa mistura entre Cu e Al com ACI1000rpm.....	66
Figura 57 – Corte longitudinal de solda produzida a 1000 rpm com ACI	67
Figura 58- Solda 800 rpm sem ACI	67
Figura 59 – Micrografia das regiões (a), (b), e (c) da Solda 800 rpm sem ACI.....	68
Figura 60 – Análise de EDS da região (b) solda 800 rpm sem ACI.....	68
Figura 61 – Micrografia das regiões (a), (b), e (c) da Solda 1000 rpm com ACI	69
Figura 62 – Micrografia das regiões (a), (b), e (c) da Solda 1000 rpm com ACI	69
Figura 63 – Análise de EDS da região (b) Solda 1000 rpm com ACI	70
Figura 64 – Gráfico para a resistência ao cisalhamento em função da velocidade de rotação.	71

Figura 65 – Gráfico para a resistência ao cisalhamento função da implementação ACI.	72
Figura 66 – Junta soldada fraturada após ensaio de cisalhamento.	72
Figura 67 – Região de início de uma solda: (a) com ACI e (b) sem ACI.	73
Figura 68 – Fratura em ensaio de fadiga de uma junta soldada (C(ACI)1000 rpm)	73
Figura 69 – Mostra da região fraturada no ensaio de fadiga.	74
Figura 70 – Seção transversal de uma solda mostrando uma mistura homogênea entre os materiais (C (ACI)1000 rpm).	75
Figura 71 – Seção transversal de soldas produzidas com ACI a: (a) 800 rpm e (b) 1000 rpm.....	75
Figura 72 – Efeito do percentual de elementos de liga na condutividade do cobre	77
Figura 73 – Falhas causadas devido à geração excessiva de calor em rotações elevadas ...	87
Figura 74 – Fusão parcial no Al em amostra produzida com velocidade de rotação de 2500 rpm:.....	88
Figura 75 - Amostras preliminares a 800 rpm	Figura 76 – Amostras preliminares a 900 rpm
Figura 77 – Amostras preliminares a 1000 rpm.	Figura 78 – Amostras preliminares a 1100 rpm
Figura 79 – Visão geral das amostras preliminares soldadas a 1000 rpm.....	89
Figura 80 – Solda com ACI (1000 rpm) após ensaio de cisalhamento	90
Figura 81– Região de início da solda mostrando o cordão de solda produzido sem ACI (1100 rpm).	91
Figura 82 – Corpo do dispositivo de fixação da ferramenta.....	92
Figura 83 – Elemento de posicionamento dos sensores de temperatura, no dispositivo de fixação da ferramenta.	93
Figura 84 – Vista esquemática em perspectiva do conjunto de soldagem.	94
Figura 85 – Ferramenta de soldagem.	94

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AISI : American Iron and Steel Institute;
CP : corpo de prova;
DIN : Deutsches Institut fur Normung;
FSW : friction stir welding;
FSLW : friction stir Lap welding;
FSpW : friction spot welding;
ISO : International Organization for Standardization;
ACI: Avanço contrário inicial
US : União Secundária;
UP : União Principal;
MEV : microscopia eletrônica de varredura;
MO : microscopia óptica;
N : incremento final da amostragem na coleta de dados em processo de soldagem;
Q : aporte de energia térmica e mecânica;
ZM : Zona de mistura;
S: Rotações por minuto
t : tempo de amostragem na coleta de dados em processo de soldagem;
T5 : tratamento térmico e envelhecimento natural;
TA : trinca anular;
TC : trinca circunferencial;
 ω : velocidade angular da ferramenta de soldagem;
xn : profundidade de penetração da ferramenta no incremento n;
ZTMA : zona termo mecanicamente afetada;
ZTA : zona termicamente afetada.
ZM : Zona de mistura;

RESUMO

O processo de solda por fricção (FSW) é um dos processos inovadores que está sendo apresentado e estudado, na comunidade científica e empresas, por propiciar uma união de excelente qualidade. No entanto existem questões ainda a serem resolvidas principalmente nas soldas de materiais dissimilares como é o caso das ligas de cobre e alumínio. O objetivo deste trabalho é produzir uniões da liga de Cobre e Alumínio, pois esses materiais são qualificados como de difícil soldabilidade pelos sistemas convencionais restringindo assim sua aplicação. Este trabalho avaliou a soldagem de juntas sobrepostas de uma liga de alumínio (ASTM 6060 T5) e a liga de cobre (ASTM-B-187, C 110- têmpera meio dura) em que o cobre é posicionado acima do alumínio. As juntas foram soldadas pelo processo de soldagem por fricção e mistura mecânica (FSW) com quatro velocidades de rotação (800, 900, 1000, e 1100 rpm), com a velocidade de avanço mantida em 10 mm/min. foi também avaliada a influência de um avanço contrário ao inicial (ACI) de 2 mm no início da solda. As juntas produzidas foram avaliadas através de ensaios de cisalhamento, fadiga, microestrutura, ultrassom e resistividade elétrica. Não foi observada influência significativa dos parâmetros de processo sobre a resistência mecânica. No entanto, a soldagem com ACI de 1000 rpm foram os parâmetros que apresentaram os melhores resultados e menor dispersão entre as condições avaliadas. A resistência elétrica das juntas soldadas em todas as condições se mostrou muito próxima da média entre as resistências das ligas utilizadas, indicando a viabilidade da aplicação desse processo em conexões elétricas. Em relação à fadiga, ficou evidenciado um aumento em torno de 30% na vida das juntas soldadas com ACI. Os ensaios de ultrassom não mostraram descontinuidades que comprometessem a aplicação de nenhuma das juntas soldadas.

ABSTRACT

The friction welding process (FSW) is one of the innovative processes being presented and studied, in the scientific community and companies, for providing a union of excellent quality. However, there are still issues to be solved mainly in soldering of dissimilar materials such as copper and aluminum alloys. The objective of this work is to produce copper and aluminum alloy joints, since these materials are classified as difficult solderability by conventional systems, thus restricting their application. This work evaluated the welding of overlapping joints of an aluminum alloy (ASTM 6060 T5) and the copper alloy (ASTM-B-187, C 110-hardened quench) in which the copper is positioned above the aluminum. The joints were welded by the friction welding and mechanical mixing (FSW) process with four rotational speeds (800, 900, 1000, and 1100 rpm), with the feed rate maintained at 10 mm / min. The influence of a non-initial advance (ACI) of 2 mm at the beginning of the weld was evaluated. The joints produced were evaluated through shear, fatigue, microstructure, ultrasonic and electrical resistivity tests. No significant influence of process parameters on mechanical strength was observed. However, the welding with (ACI) of 1000 rpm were the parameters that presented the best results and lower dispersion among the evaluated conditions. The electrical resistance of the welded joints in all conditions was very close to the average between the resistances of the alloys used, indicating the feasibility of the application of this process in electrical connections. In relation to fatigue, an increase of around 30% in the life of welded joints with (ACI) was evidenced. Ultrasound tests showed no discontinuities that would compromise the application of any of the welded joints.

1 INTRODUÇÃO

O processo de soldagem dos materiais é um desafio para humanidade, envolvendo um misto de ciência, tecnologia e arte (MACHADO, 1976).

Na atualidade dispomos de inúmeras variações nos processos que foram se consolidando, firmando-se como soluções aos desafios que surgiam. No entanto, com o avanço da tecnologia, a preocupação constante em preservar o meio ambiente pelo uso de tecnologias limpas, e a busca pela diminuição do consumo de energia, busca-se, propostas mais atrativas que atendam a esses anseios.

Wichelhaus (1975) apresentou um processo inovador de soldagem, o que é conhecido como processo de fricção convencional. O processo realiza a soldagem no estado sólido. Produzindo a formação um filme na interface dos elementos a serem unidos, as características finais da solda são de excelentes qualidades e foram realizadas no estado plástico sem atingir o ponto de fusão. A união foi obtida por meio de intenso trabalho à quente ao qual o material foi submetido nos instantes finais do processo. Na ocasião, Wichelhaus apresentou um semi-eixo usado na indústria automobilística soldado por fricção. Uma limitação era a aplicabilidade do processo apenas para união axial de elementos cilíndricos ou tubulares.

Em 1991, o TWI (The Welding Institute), da Inglaterra, apresentou à comunidade científica um novo processo de soldagem denominado *Friction Stir Welding* (FSW) que traduzido para o português, Solda por Fricção e Mistura Mecânica onde permitia a obtenção de juntas de topo no estado sólido (THOMAS; NICHOLAS, 1991). O processo, abriu caminho às novas possibilidades, permitindo a soldagem de ligas de baixa soldabilidade, difíceis de soldar por processos convencionais que envolvem fusão (em função de suas propriedades físico-químicas), como ligas (Al, Mg e Cu, por exemplo), materiais compósitos e materiais dissimilares.

Outra importante atratividade do novo processo que contribuiu para a sua ascensão foi o fato de não ser poluente, ao passo que os processos convencionais têm a poluição como um sério problema, por razões da presença de fumos prejudicial à saúde dos operadores.

O processo, por envolver a inter-relação de muitas variáveis, tem demandado desde o seu advento, estudos pela comunidade científica na busca do entendimento dos mecanismos formadores da união, para um completo domínio da tecnologia.

Neste contexto, este trabalho busca estudar a soldagem de materiais dissimilares por meio do processo FSW, concentrando atenção numa junta de ligas de Cobre ASTM C 110 e de Alumínio AA6060-T5 que tem potencial de aplicação na transmissão de energia elétrica,

aterramentos e ligações a barramentos de alta tensão (LIU et al., 2008; ZADEH; SAEID; SAZGARI, 2007; GALVÃO et al., 2013). Este tipo de junta, apesar de suas excelentes propriedades elétricas e térmicas, tem aplicação limitada pelas dificuldades de união por meio de processos convencionais e pela baixa resistência mecânica obtida (WATANABE; SAKUYAMA; YANAGISAWA, 2003). O estudo realizado teve como foco o processo de soldagem FSW aplicado à obtenção de juntas sobrepostas de ligas Cu/Al. Alguns autores, como YAZDANIAN (2011) denominam esta aplicação do FSW em juntas sobrepostas como FSLW (*Friction Stir Lap Welding*), embora não haja um consenso quanto a esta denominação. Busca-se a otimização de parâmetros do processo FSW para a juntas sobrepostas dissimilares de ligas Cu/Al, visando garantir o seu funcionamento do ponto de vista elétrico e mecânico.

1.1 Motivação

As dificuldades encontradas para a produção de juntas soldadas de ligas em Cobre ASTM C 110 e de Alumínio AA6060-T5 por processos convencionais, serviu de motivação para a realização desse estudo. Por tratar-se de um processo relativamente novo, tem-se a necessidade de estudos aprofundados para a utilização do FSW na obtenção desse tipo de união. A junta dissimilar em estudo tem aplicação geralmente associada a componentes elétrico/eletrônicos e na área de transmissão de energia. Assim, este trabalho busca contribuir com o aumento do nível de conhecimento sobre o processo FSW aplicado à união de materiais dissimilares.

1.2 Objetivo Geral

Estudar a aplicação do processo FSW na obtenção de juntas sobrepostas dissimilares de ligas de Cobre ASTM C 110 e de Alumínio AA6060-T5;

- Objetivo específico.
- Avaliação de defeitos através de uma inspeção visual.
- Estudar os efeitos dos parâmetros de processo sobre o comportamento mecânico, microestrutura e resistividade elétrica da geometria da junta;
- Analisar o comportamento em fadiga da junta soldada com aplicação de (ACI), avanço contrário inicial da solda.
- Ajustar os parâmetros de processo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ESTADO DA ARTE

2.1 Ligas de alumínio

As ligas de alumínio, em termos de processamento, dividem-se em dois grandes grupos que são as ligas de alumínio para trabalho mecânico e as ligas de alumínio para fundição. No âmbito deste trabalho serão abordadas apenas as ligas de alumínio para trabalho mecânico. Essas ligas são classificadas de acordo com os elementos químicos em maior quantidade, utilizando uma designação com quatro dígitos para identificação. Ligas de alumínio são encontradas no mercado na forma de chapas, perfis extrudados e laminados, tarugos e fios.

Nas indústrias automobilística e aeronáutica cada vez mais são procurados materiais de baixa densidade, que permitam produzir estruturas com baixo peso, visto que o consumo de combustível aumenta proporcionalmente com este. Além da redução do peso, buscaram-se também materiais de menor custo, resistentes ao meio (corrosão e temperatura) e com melhor desempenho mecânico. Face o exposto, as ligas leves ganham cada vez mais espaço para aplicações estruturais nos segmentos industriais. Dentre as ligas leves, as ligas de alumínio são as mais usadas devido as suas boas propriedades mecânicas aliadas ao baixo peso, além de ainda ter boa resistência à corrosão. As ligas de alumínio começaram a ser usadas desde a descoberta do fenômeno de endurecimento por tratamento térmico, por parte de Alfred Wilm em Berlim, no ano de 1906. O seu trabalho levou ao desenvolvimento do conhecido duralumínio (Al-3,5Cu-0,5Mg-0,5Mn) que foi rapidamente adaptado na Alemanha para secções estruturais dos dirigíveis Zeppelin e para o avião Junkers F13 que fez o seu primeiro voo em 1919. Assim, as ligas de alumínio têm sido os principais materiais para construção aeronáutica, que por sua vez têm sido um importante estímulo para o desenvolvimento de novas ligas (PEPE, N.; 2005).

O duralumínio foi o precursor das ligas da série 2XXX, incluindo a liga 2014 e 2024 que são usadas até os dias de hoje. Outro grupo de ligas de alumínio muito usadas na indústria aeronáutica são as ligas da série 7XXX devido às suas excelentes propriedades mecânicas e resistência à corrosão. Recentemente também se vê um uso crescente das ligas da série 6XXX na indústria aeronáutica.

As ligas de alumínio possuem uma codificação adicional em função de sua resposta a tratamentos térmicos e mecânicos, onde cada tratamento é designado por um código após a designação da família à qual a liga pertence. As ligas que podem ter as propriedades alteradas por tratamento térmico são: 2XXX, 6XXX, 7XXX e 8XXX (ASM v.2, 1995). A

codificação adicional em relação aos tratamentos térmicos ou mecânicos aplicados às ligas de alumínio pode ser de acordo com Weingaertner e Schroeter, (1991).

F – como fabricado, sem garantias dos valores de propriedades mecânicas;

O – recozido, para produtos com o máximo de ductilidade e conformabilidade;

H – encruado, aplicado a ligas não tratáveis termicamente, onde a resistência mecânica é obtida por deformação mecânica;

W – solubilização, para ligas que tem aumento de resistência por precipitação à temperatura ambiente, a partir de uma rotina de aquecimento e resfriamento;

T – termicamente tratável, podendo ter ou não encruamento adicional, como mostra a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Tabela 1 – Codificação para os tratamentos térmicos das ligas de alumínio tratáveis termicamente.

Código	Tipo de tratamento
T1	Resfriado após processo de fabricação e envelhecido naturalmente até condição estável
T2	Resfriado, deformado plasticamente a frio e por fim envelhecido naturalmente até condição estável.
T3	Solubilizado, deformado plasticamente a frio e envelhecido naturalmente até condição estável.
T4	Solubilizado e envelhecido naturalmente até condição estável.
T5	Resfriado após o processo de fabricação a uma temperatura elevada e envelhecida artificialmente.
T6	Solubilizado e envelhecido artificialmente.
T7	Solubilizado e estabilizado (super envelhecimento).
T8	Solubilizado, deformado plasticamente a frio e envelhecido artificialmente.
T9	Solubilizado, envelhecido artificialmente e em seguida
T10	Resfriado após o processo de fabricação a uma temperatura elevada, deformado plasticamente a frio e posteriormente envelhecido artificialmente.

[http://www. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 6835 NOV 2000](http://www.abnt.org.br)

2.2 Ligas de Cobre

O cobre é um dos principais materiais não ferrosos em aplicações na engenharia, tanto no estado puro como em ligas. Exibe excelente resistência à corrosão e alta condutividade térmica e muito alta condutividade elétrica. A condutividade elétrica do cobre puro é tão alta que é usado como padrão de referência para a comparação na forma do IACS (International Annealed Copper Standard).

O cobre e suas ligas são muito utilizados em usos arquitetônicos, cunhagem, condensador, trocadores de calor, encanamento, núcleos de radiadores, instrumentos musicais, fechaduras, fixadores, dobradiças, componentes de munição e conectores elétricos.

Pequenas quantidades de elementos de liga são frequentemente adicionadas ao cobre para melhorar certas características. A liga pode aumentar ou reduzir a resistência, a dureza, a condutividade elétrica e térmica, a resistência à corrosão ou alterar a cor. Os elementos de liga primária comuns incluem estanho (resultando em bronze) ou zinco (resultando em latão). O Cobre é distribuído em uma ampla variedade de ligas incluindo cobre de berílio, cobre de cromo e bronze de alumínio em chapa, bloco, barra, anéis.

O sistema de classificação das ligas de cobre, adotado pela ASTM (American Society for Testing and Materials) e pela CDA (Copper Development Association), divide as ligas em função dos principais elementos de liga, como mostra a Tabela 2

Tabela 2 – Classificação das ligas de cobre

Série CDA/ASTM	Tipo de liga
C 1XX	Cu comercialmente puro e Cu ligado
C 2XX	Latão binário (cobre-zinco)
C 3XX	Latão com chumbo (Cu-Zn-Pb)
C 4XX	Latão com estanho (Cu-Zn-Sn)
C 5XX	Bronzes (Cu-Sn, c/ ou sem fósforo)
C 6XX	Cobre-alumínio, cobre-silício
C 7XX	Cuproníquel e alpaca

<http://www.infomet.com.br/site/metais-e-ligas-conteudo14/12/2016>

2.3 Soldagem pelo processo (*Friction Stir Welding* -FSW)

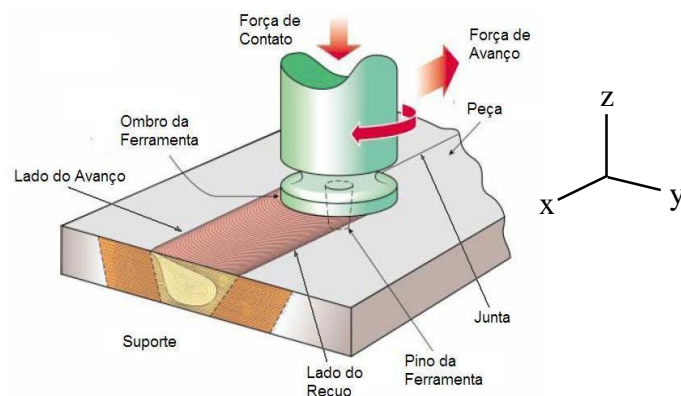
2.3.1 O processo FSW

O processo de Soldagem FSW é um processo de ligação no estado sólido que foi apresentado pelo TWI (*The Welding Institute*) em 1991, denominado de *Friction Stir Welding* (FSW) (THOMAS; NICHOLAS, 1991). No processo uma junta de topo é obtida inteiramente no estado sólido, não necessitando de material de adição e de maneira não poluente.

No FSW a união é obtida por meio de uma ferramenta rotativa que promove um complexo fluxo de material, valendo-se da sua capacidade de deformação plástica. A ferramenta é composta por duas regiões: pino e ombro como podem ser visto na Figura 1. O pino é a entidade responsável pela mistura dos materiais das chapas enquanto o ombro tem a função oferecer energia térmica por meio de atrito além de reter o material que tende a fluir da região da solda (Vilaça, P, IST 2003). Os parâmetros de soldagem (rotação, velocidade de avanço, ângulo de inclinação da ferramenta, etc.) e a geometria da ferramenta, exercem papel significativo no padrão de fluxo de material entre as chapas sendo soldadas. Para obter soldas de qualidade (livres de defeitos e com resistência estrutural) é importante compreender as características do processo, dos parâmetros utilizados e sua relação com as características dos materiais soldados (R. S. Mishra 2005)

O processo de soldagem FSW consiste na união por ação conjunta do calor e plastificação mecânica dos materiais, originados pela rotação de uma ferramenta atritando e deformando o material, conforme ilustra a Figura 1.

Figura 1– Representação esquemática da FSW



Fonte: Hiller, 2007

O calor gerado pelo atrito e pela deformação plástica leva ao amolecimento dos materiais, aumentando a plasticidade e possibilitando a sua mistura. É intensa a deformação

plástica dos materiais na vizinhança da ferramenta e a consequente alteração da microestrutura dos mesmos (Smith, W. F., 1998).

A ferramenta penetra nas chapas numa profundidade pré-definida (proporcional às dimensões do pino) e a seguir realiza um movimento de translação (avanço) na interface entre duas chapas em contato, resultando num cordão de solda. Ao longo do processo a ferramenta exerce uma força axial sobre as chapas.

Como exposto anteriormente, o atrito da ferramenta através do movimento de rotação, em conjunto com a deformação plástica, desenvolve calor necessário para promover a soldagem. O aquecimento local aumenta a plasticidade do material na vizinhança da ferramenta que dado o seu movimento de rotação movimenta o material da frente para trás do pino, promovendo a ligação dos materiais e produzindo a junta. (Vilaça, P, IST 2003).

2.3.2 Parâmetros de Processo

O processo de soldagem FSW envolve diversas variáveis como: tipo de junta, natureza dos materiais, características da máquina operatriz, características da ferramenta de soldagem e parâmetros de processo. As variáveis segundo Rosato (Rosato Júnior 2003), possuem influência na microestrutura resultante da soldagem e, conseqüentemente, no comportamento geral da junta.

Portanto, para um determinado contexto de variáveis (junta, material, máquina-operatriz e ferramenta) haverá uma combinação de parâmetros de processo que possibilitarão obter soldas qualidade, definindo certa janela de processamento. Os principais parâmetros de processo na soldagem FSW, segundo Ericsson (Ericsson e Sandstrom, 2003; James et al., 2005), são:

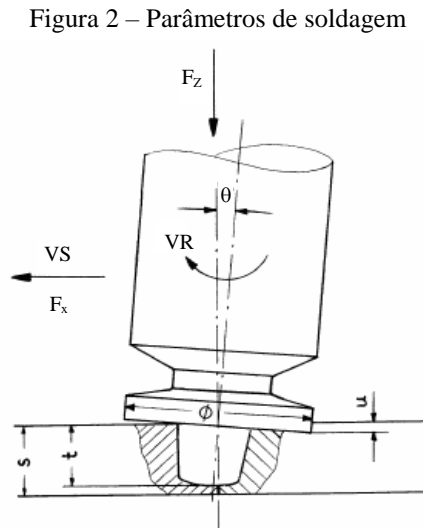
- Velocidade de soldagem (V_S)
- Velocidade de rotação (V_R)
- Força axial no eixo z (F_z)
- Força de avanço no eixo x (F_x)
- Penetração da ferramenta no eixo z (t)
- Ângulo de inclinação da ferramenta no eixo z (θ)
- Penetração do ombro (u);
- Tempo de penetração do pino (t_p)

Obs.: a orientação dos eixos, x, y e z estão mostradas na Figura 1.

O lado do cordão no qual a rotação da ferramenta e a direção de deslocamento encontram-se na mesma direção (ver Figura 1) é chamado de lado de avanço, enquanto o

outro é o lado de recuo. As diferentes combinações de parâmetros de soldagem produzem microestruturas ligeiramente diferentes nesses dois lados, dependendo do material que está sendo processado, da geometria da ferramenta.

A Figura 2 ilustra esquematicamente a ferramenta de soldagem e seu posicionamento em relação à chapa durante o processo, onde podem ser vistos os diferentes parâmetros possíveis de controle do processo.

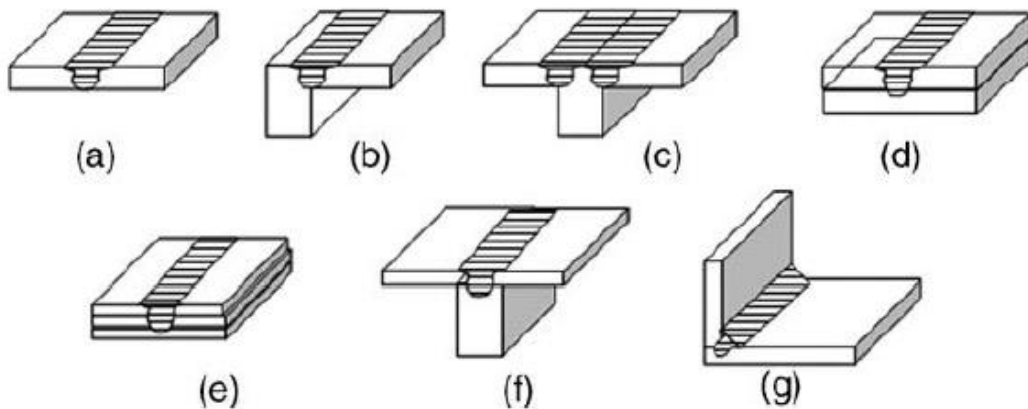


Dentre os parâmetros de processo citados, a velocidade de soldagem e rotação da ferramenta definem três condições de soldagem FSW: à quente, intermediária e à frio, em função da quantidade de calor gerado pelo trabalho de atrito e deformação (Sutton et al., 2003). Nos estudos realizados por Vilaça (Vilaça *et al.*, 2005), foi considerada a razão numérica entre esses dois parâmetros de processo como condição para definir a soldagem em função da quantidade de calor gerado.

2.3.3 Tipos de juntas

O processo FSW foi originalmente desenvolvido para a obtenção de juntas de topo (*butt joint*), entretanto o mesmo também pode ser aplicado em diferentes configurações como pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 – Tipos de juntas que podem ser unidas pelo processo FSW



Fonte: Mishra, 2005.

As juntas mostradas na Figura 3 são:

- a – junta de topo, tem aplicações em chapas planas, perfis planos, soldagem circunferencial de tubos e união de diferentes espessuras de material;
- b – junta topo de aresta,
- c – junta de topo em T união entre chapas;
- d – junta sobreposta;
- e – junta sobreposta múltipla;
- f – junta sobreposta
- g – junta de filete cordão, também empregada na união flange / tubo.

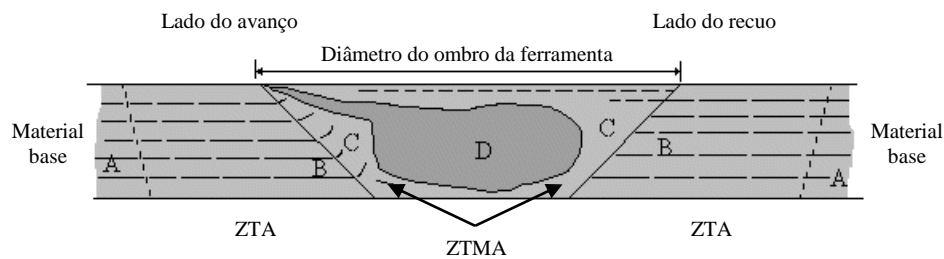
2.3.4 Regiões da solda FSW

A macroestrutura resultante da soldagem pelo processo FSW possui algumas diferenças em relação àquela dos processos de soldagem convencionais (por fusão). Na Figura 4 tem-se uma ilustração da seção transversal de um cordão de solda obtido pelo processo FSW, onde estão destacadas as diferentes regiões (ou zonas) da solda. Os estudos de (Fratini e Buffa 2005), realizados em uma liga de alumínio AA6082 revelaram as regiões padrões como:

- Região A – Metal Base (MB): região não afetada pelo calor ou deformação induzida pela ferramenta de soldagem;
- Região B – Zona Termicamente Afetada (ZTA): região afetada pelo ciclo térmico durante a soldagem, o que leva a modificações microestruturais e de propriedades mecânicas;

- Região C – Zona Termo-Mecanicamente Afetada (ZTMA): nesta região o material é deformado plasticamente pela ferramenta e a temperatura atinge patamares que causam modificações no material;
- Região D – Zona de Mistura (ZM): é a região central da solda onde o material sofre intensa deformação plástica e a temperatura é muito elevada ocorrendo recristalização dinâmica.

Figura 4 – Esquema da seção transversal típica do processo FSW na produção de uma junta de topo



Fonte: Adaptado de Fratini e Buffa 2005

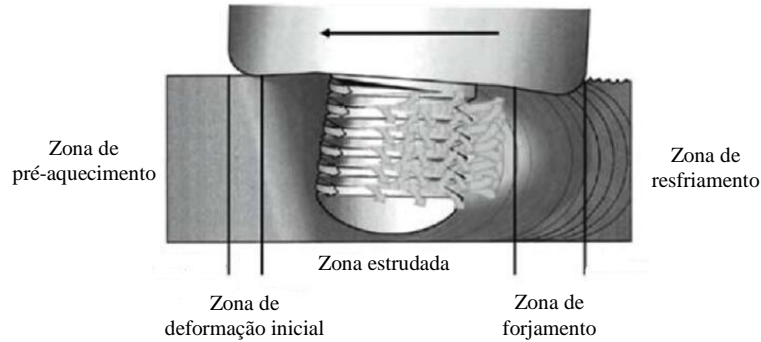
A recristalização dinâmica pode ser atribuída aos fenômenos envolvidos no trabalho à quente do material (Jata e Semiatin, 2000; Sathiya *et al.*, 2005), que no caso da união por FSW é devido à ação combinada do ombro e pino da ferramenta como fontes geradoras de calor por atrito e deformação plástica simultaneamente (Fratini e Buffa, 2005).

Segundo os estudos de SU *et al.*, (2003), a região denominada de ZTMA é a que possui uma estrutura altamente deformada, onde ocorreu crescimento de subgrãos que são, conforme Dieter (1981), contornos de grão de baixo ângulo alongados a partir do metal base. Além disso, essa região possui grãos com elevada densidade de discordâncias, o que sugere que o processo de recuperação ocorre parcialmente (SU *et al.*, 2003).

A existência de todas essas zonas assim como suas proporções pode variar consideravelmente dependendo de inúmeros fatores que afetam a soldagem FSW como a geometria da ferramenta, tipo de junta, parâmetros de soldagem e material base.

Muitos autores fazem analogia do processo FSW com processos de conformação mecânica, dada a intensa deformação plástica a que o material é submetido. A Figura 5 apresenta um esquema da seção longitudinal do cordão durante a soldagem, onde estão destacados os diferentes fenômenos térmicos e mecânicos que ocorrem na vizinhança da ferramenta na medida em que está translada produzindo o cordão de solda (Paiva, 2009)

Figura 5 – Representação do fluxo de material durante a soldagem por fricção linear



Fonte: Paiva, 2009

2.3.5 Geração de calor e geometria da ferramenta no processo FSW

Durante o processo de soldagem, ocorre um aporte de calor decorrente do atrito promovido entre a ferramenta e as chapas, e também da deformação plástica dos materiais. A energia térmica gerada está atrelada aos parâmetros de processo.

Segundo Moghaddam (Moghaddam et al., 2011), o calor total Q , gerado no processo de soldagem FSW é diretamente proporcional à rotação da ferramenta e inversamente proporcional à velocidade soldagem, como mostra a equação 1.

$$Q \propto \frac{n}{v_f} \quad (1)$$

Onde:

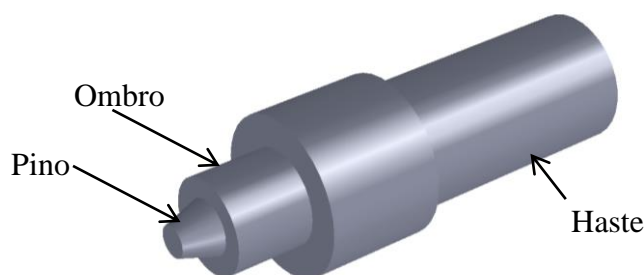
n : rotação da ferramenta (notação do autor)

v_f : velocidade do soldagem (notação do autor)

Esta relação deve ser avaliada de forma cuidadosa, uma vez que está associada à geração total de calor Q havendo uma relação de compromisso entre as duas velocidades. Caso a geração de calor seja muito elevada, há o risco de atingir a temperatura de fusão dos materiais, o que seria prejudicial à qualidade da solda. Por outro lado, uma geração de calor muito baixa pode comprometer a solda, levando a formação de defeitos, ou até impedindo a união dos metais. Desse modo, é necessário que os parâmetros de soldagem sejam estabelecidos de forma que a temperatura durante o processo esteja adequada aos materiais.

A ferramenta de soldagem também exerce papel importante no resultado final do processo, uma vez que gera calor pela ação do atrito e por promover a deformação plástica dos metais. A Figura 6 ilustra uma ferramenta FSW, destacando seus principais elementos.

Figura 6 – Ferramenta de soldagem FSW



Fonte autor

A geometria do pino e do ombro tem efeito importante na geração de calor e no fluxo de material, conseqüentemente, interferindo nas propriedades mecânicas finais da junta soldada (Zhao 2005).

O calor gerado pelo atrito entre o ombro e o substrato leva à redução do limite de escoamento do material do substrato, facilitando a deformação plástica e, conseqüentemente, o processo de soldagem. Logo, um aumento na espessura da junta a unir demanda maior quantidade de calor para a obtenção de uma união com qualidade, que por sua vez é conseguido alterando-se as dimensões da ferramenta (Thomas e Dolby, 2002; Song e Kovacevic, 2003). O ombro também tem a função de restringir a “fuga” do material que é deslocado pelo pino da região da soldagem (Buffa et al., 2005). O pino tem a função de gerar trabalho mecânico pela deformação plástica do material, além de controlar o fluxo de material em seu entorno e abaixo do ombro (Song e Kovacevic, 2003).

Alguns autores fazem uma analogia do fluxo de material na soldagem FSW com processos de conformação mecânica (Lockwood e Reynolds, 2003). No FSW, o material deslocado pelo pino tem uma tendência de subir à superfície na região à frente do pino, semelhante a um processo de extrusão. O ombro impede a fuga desse material, realizando um trabalho de forjamento contínuo no material (Lockwood e Reynolds, 2003).

Buffa (2005) sugere que o pino como é a fonte primária responsável por deformação e tem papel secundário na geração de calor, enquanto o ombro é a fonte primária de calor e tem papel secundário na deformação.

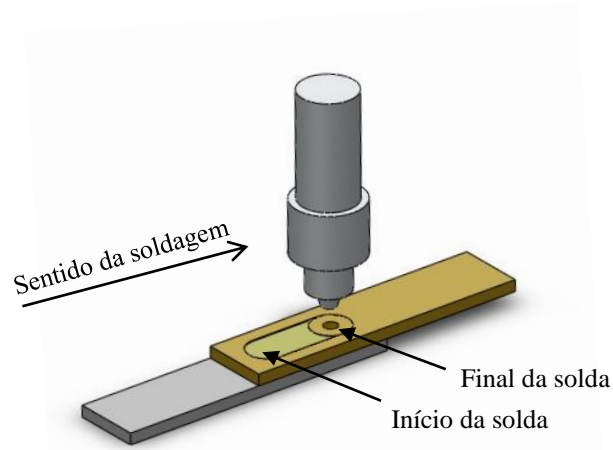
A combinação de geometria entre ombro e pino exerce papel importante para o resultado final da solda no processo FSW. As proporções entre os elementos da ferramenta (pino e ombro) dependem da espessura das chapas a serem soldadas. (Guerra 2003) traz algumas recomendações para as dimensões da ferramenta em função da espessura das chapas (junta de topo). Em seu trabalho, Guerra sugere que o comprimento do pino seja alguns décimos de milímetro menor que a espessura das chapas e que o seu diâmetro seja

aproximadamente igual à espessura. Com relação ao ombro, Guerra recomenda que este possua um diâmetro de aproximadamente três vezes o diâmetro do pino.

2.3.6 Juntas sobrepostas soldadas pelo processo FSW

O processo FSW, originalmente desenvolvido para obtenção de juntas de topo, também pode ser utilizado para produção de juntas sobrepostas (VILAÇA, et al 2005; ZETTLER, 2010). Juntas sobrepostas encontram grande aplicação industrial e, em diversos casos, deseja-se unir materiais diferentes (juntas dissimilares) (ABDOLLAH-ZADEH, et al. 2008). A Figura 7 mostra um desenho esquemático de uma junta sobreposta dissimilar entre ligas de cobre e alumínio obtidas pelo processo FSW, onde o Cu é o elemento superior e o Al o inferior da junta.

Figura 7 – Tipos de da junta de solda sobreposta.



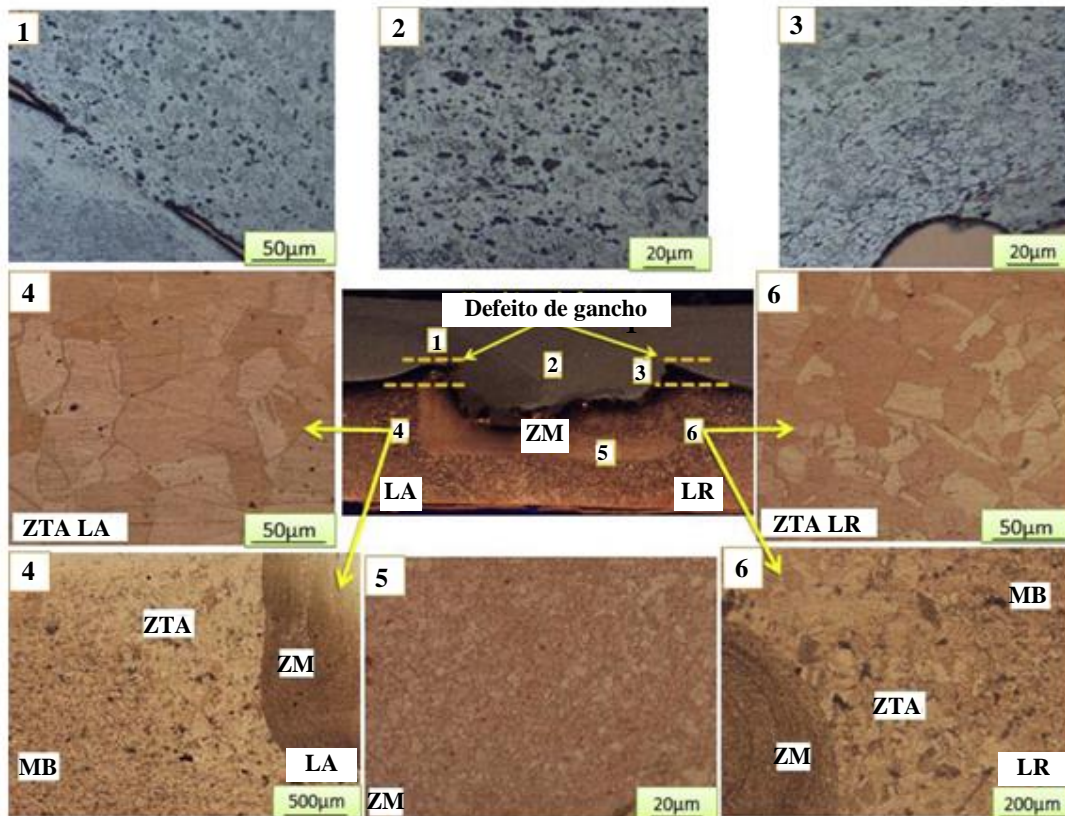
Fonte autor

Os mecanismos envolvidos na formação da união são bastante semelhantes aos do processo FSW aplicado às juntas de topo (ELREFAEY et al. 2004). A qualidade da solda depende do adequado aporte térmico e mistura promovidos pela ferramenta.

A Figura 8 mostra a macroestrutura e detalhes da microestrutura nas diferentes zonas de uma junta sobreposta dissimilar de ligas de Al/Cu soldada pelo processo FSW. As figuras 8.1, 8.2 e 8.3, tem-se detalhes da chapa superior da liga de alumínio, enquanto que nas figuras 8.4, 8.5 e 8.6, vê-se detalhes da liga de cobre. As regiões mostradas na figura 8.4 e 8.5 referem-se à zona termicamente afetada (ZTA), onde é notório o aumento dos grãos pelo efeito da temperatura. Na figura 8.5 tem-se a zona de mistura (ZM) onde as microestruturas são bastante refinadas em decorrência da recristalização dinâmica que ocorre nessa região.

Entre as zonas ZTA e ZM existe ainda a zona termomecânica afetada (ZTMA) a qual não está visível na figura.

Figura 8 – Macro e microestrutura de uma junta sobreposta dissimilar Al/Cu, soldada pelo processo FSW.



Fonte: Adaptado de BISADI, 2012.

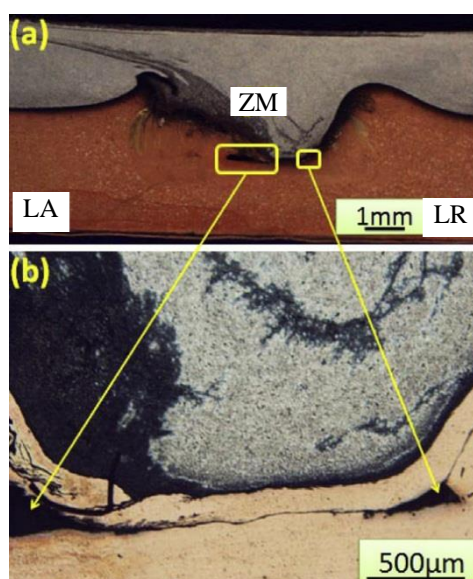
Observação: LA, refere-se ao lado do avanço e LR, refere-se ao lado do recuo.

Pesquisas mostram que existe uma janela de parâmetros de processo, principalmente em termos de velocidade de rotação e velocidade de soldagem, capaz de produzir soldas de qualidade (livre de defeitos e com boas propriedades mecânicas)

Se os parâmetros de soldagem não forem definidos de forma adequada para o material a ser soldado, defeitos podem ocorrer. Segundo LAKSHMINARAYANAN et al, (2011), velocidades de soldagem muito baixas tendem a gerar microtrincas enquanto que para velocidades altas, cavidades ou vazios são os problemas normalmente observados.

A Figura 9 mostra a macrografia da seção transversal de uma junta sobreposta dissimilar Al/Cu onde pode-se observar a presença de vazios e túneis como reportam alguns autores, decorrente da combinação inadequada de parâmetros de processo (BISADI, 2012). Assim como relatado por LAKSHMINARAYANAN (2011) esses defeitos tendem a ocorrer quando é utilizada uma velocidade de soldagem muito elevada.

Figura 9 – Macrografia da seção transversal de uma junta sobreposta dissimilar Al/Cu soldada por FSW, mostrando vazios na região da solda.



Fonte: Adaptado de BISADI, 2012

A velocidade de rotação, como já apresentado, tem forte influência no aporte térmico, sendo parâmetro importante na temperatura atingida durante o processo. Sabe-se que a temperatura tem forte influência no tamanho de grão, o que tende a prejudicar as propriedades mecânicas da junta (CAVALIERE et al 2005), como normalmente se observa na ZTA (ver Figura 8). Alguns autores relatam a ocorrência de um patamar na temperatura, ou seja, após atingir uma determinada magnitude esta não se eleva mais. Este fenômeno tem sido explicado pela modificação (diminuição) do coeficiente de atrito entre material e ferramenta decorrente do aumento da temperatura (CAPELARI, 2006).

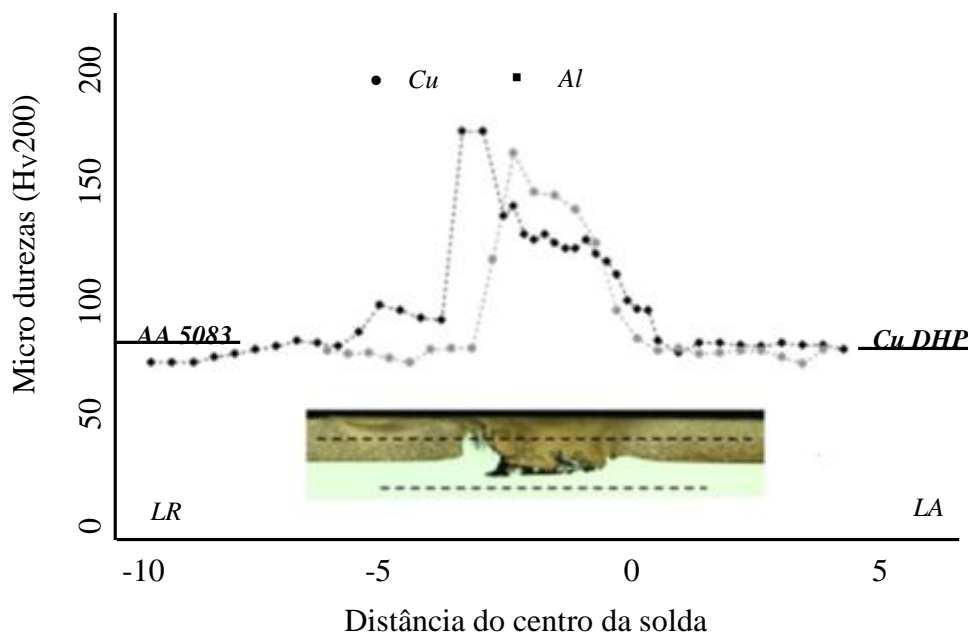
O aumento da rotação, ao contrário do que se imagina, acarreta na diminuição da zona de mistura. Este fato pode ser atribuído ao aumento significativo da temperatura de processamento do material nas imediações da ferramenta, que diminui significativamente o fluxo de material (COLEGROVE; et al 2007).

Uma preocupação que se tem em soldas de materiais dissimilares é a formação de compostos intermetálicos ou *intermetallic compounds* (IMC), uma vez que estes compostos

são extremamente duros e frágeis. Os autores (H.BISADI; et al 2012, A. ELREFAEY; et al 2005) coloca que a presença de compostos intermetálicos resulta no enfraquecimento da junta, devido a sua elevada fragilidade e à presença de microtrincas em seu entorno, as quais atuam como concentradores de tensão (ABDOLLAH-ZADEH, et al. 2008). Estudos recentes sobre a presença de compostos intermetálicos duros na soldagem FSW de juntas sobrepostas dissimilares entre ligas de cobre e ligas de alumínio demonstram que estes podem contribuir positivamente para a união (Galvão et al., 2011, 2012). Segundo TAN et all (2013) se os compostos intermetálicos estiverem distribuídos uniformemente na matriz podem resultar em aumentos da ordem de 70% na resistência da união. Isso pode ser conseguido pelo controle do aporte de energia ao processo, ou seja, pela adequada combinação dos parâmetros de processo, principalmente velocidade de rotação e velocidade de soldagem.

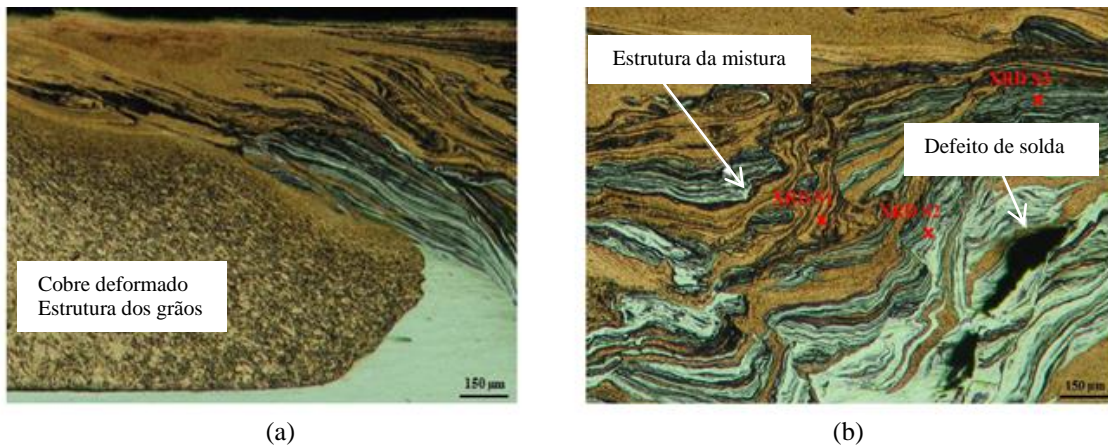
Geralmente a presença de compostos intermetálicos é evidenciada por picos de dureza quando se analisa o perfil de microdureza em uma junta soldada, como mostra a Figura 10 (Galvão et al., 2013).

Figura 10 – Perfil de microdureza em uma solda dissimilar Cu/Al produzida pelo processo FSW.



Contudo, estudos mostram que nem sempre essas flutuações (picos) de dureza estão associadas à presença de compostos intermetálicos. Em algumas situações a intensa deformação plástica promovida pela ferramenta leva à formação de grãos extremamente pequenos (da ordem de nm) distribuídos na zona de mistura (Galvão et al., 2013). A Figura 11 (a) mostra a micrografia da seção transversal de uma junta sobreposta dissimilar Cu/Al soldada pelo processo FSW (a mesma solda do perfil de microdureza mostrado na Figura 10), onde se vê a intensa deformação plástica e a mistura entre os dois materiais (GALVÃO et al, 2011). Segundo o autor, o ombro da ferramenta exerce papel chave no processo de mistura dos materiais, por reter o fluxo de material que é deslocado pelo pino.

Figura 11 – Micrografias da seção transversal de uma junta sobreposta Cu/Al soldada pelo processo FSW: a) região superior esquerda da junta; b) região central



Fonte: Adaptado de GALVÃO, 2013

Na Figura 11 (b) tem-se a micrografia de uma região central da solda, onde se vê intensa mistura entre o material da chapa superior (Cu) e inferior (Al). Para verificar se os picos de dureza mostrados na Figura 10 eram decorrentes da presença de compostos intermetálicos. Galvão et al., realizaram análises de difração de raios-X (XRD) nos pontos destacados como XRD S1, S2 e S3 na Figura 11 (b). Segundo os autores, não foram encontradas evidências quanto a presença de intermetálicos. A explicação para os picos de dureza foi encontrada em posteriores análises com microscopia de transmissão onde grãos extremamente finos foram encontrados naqueles pontos.

2.3.7 Principais estudos sobre soldas FSW em juntas sobrepostas dissimilares Cu/Al

Um das primeiras publicações encontradas sobre a aplicação da soldagem FSW em juntas sobrepostas dissimilares entre uma liga de alumínio AA1100-H24 e Cobre comercialmente puro, foi apresentada por Elrefaey et al. (Elrefaey et al. 2004), que

estudaram a resistência da junta em função de variados parâmetros. No estudo, foi demonstrada forte dependência da resistência à fratura em relação a profundidade de penetração do pino, sendo que valores extremamente baixos de resistência foram encontrados quando o pino não penetrou completamente na chapa inferior, neste caso, no cobre. Os maiores valores de resistência corresponderam à penetração de 0,2 mm na chapa inferior.

Posteriormente, Abdollah-Zadeh et al. (Abdollah-Zadeh, et al. 2008) realizaram a soldagem entre chapas de uma liga de Alumínio AA1060 e Cobre (99%) comercialmente puro, de 4 e 3mm de espessura, respectivamente. No estudo, apontaram a existência de dois fatores que determinam as características de resistência da união: (a). Geração de intermetálicos duros em altos aportes térmicos e (b). Falta de aporte térmico, situação denominada de junta fria, onde a baixa geração de energia térmica resulta em vazios na união.

A principal diferença na soldagem entre os estudos dos dois pesquisadores citados refere-se à geometria da ferramenta. No primeiro caso apresentado por Elrefaey et al (2004), o comprimento do pino possuía apenas 2mm e as chapas possuíam 2mm (chapa superior de Al) e 1mm (chapa inferior de Cu). Para Abdollah-Zadeh et al. (2008) o pino da ferramenta utilizada em seus estudos possuía 6,5 mm de comprimento, para espessuras de chapas de 4mm (chapa superior de Al) e 3mm (chapa inferior de Cu), caracterizando uma maior penetração do pino na chapa inferior. Comparando os dois estudos, os resultados de Abdollah-Zadeh et al. se mostraram melhores em termos de desempenho mecânico, o que acredita-se estar associado à maior profundidade de penetração na chapa inferior.

Os mesmos pesquisadores, Saeid, Abdollah-zadeh e Sazgari (2010), refinaram suas pesquisas em termos de parâmetros ótimos para a produção da união soldada e também afirmaram que a melhor configuração da soldagem sobreposta é com o material mais dúctil na parte superior, no caso, o alumínio.

Xue et al., (2011) relataram sobre os benefícios de uma ferramenta com um pino de maior diâmetro (comparativamente ao utilizado por outros pesquisadores) para juntas sobrepostas dissimilares Al/Cu. Em seus estudos utilizaram um pino de 8 mm de diâmetro para chapas de 3 mm de espessura dos materiais AA1060 e Cobre comercialmente puro. Segundo os autores, o maior diâmetro permite utilizar rotações menores, inibindo a propagação de Compostos Intermetálicos.

Firouzdor e Kou (2012), no mesmo ano, realizaram a soldagem de chapas de uma liga de AA6061 e Cobre comercialmente puro, utilizando uma configuração de união diferenciada, chamada por eles de modificada, em que uma tira de cobre é posicionada na forma de topo junto a chapa de alumínio. Os autores constataram um aumento significativo na resistência desta junta em comparação com uma sobreposta convencional.

Mais recentemente, Akbari, Behnagh e Dadvand (2012) confrontaram dois casos de configuração da junta sobreposta: o primeiro com uma liga de alumínio AA7070 acima (em contato com o ombro) e Cu comercialmente puro abaixo; e o segundo caso com essa configuração invertida. Os pesquisadores concluíram que para os mesmos parâmetros de soldagem, o primeiro caso proporciona um maior aporte de energia devido a menor condutividade térmica da liga de Alumínio, em comparação ao Cobre. Para o experimento desenvolvido, isso implicou na melhor resistência da união, pois no segundo caso esta geração de calor foi insuficiente para promover a união entre os dois materiais. Segundo os autores, a liga de alumínio na parte superior da junta favorece a dissipação do calor mais rápido não promovendo aporte térmico suficiente na chapa de cobre que esta sobreposta a do alumínio.

Recentemente, Galvão et al.; (2013), trouxeram à tona alguns questionamentos referentes aos parâmetros utilizados na soldagem de juntas dissimilares sobrepostas, em relação ao apresentado por outros autores na soldagem entre as ligas de Al e Cu. Os autores desenvolveram estudos em uniões soldadas com dois tipos de ligas de Alumínio, AA6082-T6 e AA5083-H111 soldadas de forma sobreposta com a liga de Cobre-DHP (R240). Foi demonstrado pelos autores que a liga envolvida Cu/Al tem forte influência nas características metalúrgicas e mecânicas da união.

A apresentação dos estudos em ordem sequencial de publicação é importante para compreensão do estado da arte e um embasamento para o trabalho aqui apresentado. Os parâmetros utilizados, os materiais soldados e os pesquisadores envolvidos estão compilados na Tabela 3.

Tabela 3 Compilado dos trabalhos mais relevantes sobre soldagem FSW de juntas sobrepostas dissimilares Al/Cu

Pesquisador	Elrefaey, Takashi e Ikeuchi (2004)	Adolaah-Zadeh, Saeid e Sazgari (2008)	Saeid, Abdolaah-Zadeh, Sazgari (2010)	Xue, et. al. (2011)	Firouzdor e Kou (2011)	Akbari, Abdi e Dadvand (2012)	Bisadi, et. al. (2013)	Galvão, et. al. (2013)
Materiais	Al 1100 H24 / Cu	Al 1060 / Cu	Al 1060 / Cu	Al 1060 / Cu	Al 6061 / Cu	Al 7070 / Cu	Al 5083 / Cu	Cu R240 / Al 6082-T6 Cu R240 / Al 5083 H111
Espessuras (mm)	2 - 1	4 - 3	4 - 3	3 - 3	1,6 - 1,6	2 - 2	2,5 - 3	1 - 6
Rotação (rpm)	2000	1500	1180	600	1400	1400	825	600
Avanço (mm/min)	198	118	95	50	76	25	32	50
Ângulo de inclin.	3°	3°	3°	—	3°	2°	3,5°	0°
φ Pino (mm)	—	5	5	8	4	5	5	3
Comp. Pino (mm)	—	6,5	6,5	4	1,6	3,5	3,8	1
φ Ombro (mm)	—	15	15	20	10	17,5	19	9,5
mm/rot	0,0990	0,0787	0,0805	0,0833	0,0543	0,0179	0,0388	0,0833

2.4 Resistividade elétrica

A resistividade (expressa por $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$) corresponde à dificuldade de mobilidade dos elétrons num material, sendo independente de suas dimensões. A resistência elétrica (expressa em Ω) também corresponde à dificuldade de mobilidade dos elétrons mas de um elemento, ou seja, depende das suas dimensões. Matematicamente a resistência de um resistor é dada pela Equação 2, Alvarenga (2007).

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2)$$

Onde R é a resistência elétrica, ρ a resistividade do material, l o comprimento e A a área da seção transversal do elemento.

Portanto, resistência e resistividade são características que se dificultam a condutividade elétrica. Vários fatores afetam na escolha de materiais para condutores elétricos, sendo o alumínio e o cobre, largamente utilizado devido sua condutividade elétrica elevada. Em sistemas elétricos, é usual a necessidade de unir conectores entre si, seja numa rede de transmissão de energia ou entre equipamentos. Nessas conexões torna-se necessário um elemento de conexão, funcionando como um elemento de interface (Braunovic, 1994).

Outro fator importante a ser considerado é a possibilidade (um tanto frequente) de a conexão precisar ser utilizada entre conectores de materiais diferentes, normalmente

alumínio de um lado e cobre do outro. Nessas situações o elemento de conexão precisa ser bimetalico, alumínio numa extremidade e cobre na outra para promover uma conexão otimizada, em termos elétricos, entre os conectores. Normalmente essas junções são feitas por meio de uniões parafusadas ou por soldagem a brasagem (solda fria) que é um método não convencional de soldagem que utiliza a brasagem u aplica um terceiro material para fazer a união e implementar o processo. Essas uniões bi metálicas têm como principal inconveniente a formação de um “par galvânico” na região de contato dos materiais diferentes comprometendo a passagem da corrente elétrica e afrouxando (por corrosão) a união com o tempo, podendo interromper completamente a passagem da energia.

Alguns autores têm estudado a aplicação do processo FSW na obtenção de uniões bimetalicas para conexões elétricas (Braunowic, 1994). Normalmente essas conexões operam com temperaturas na faixa de 100 a 150 °C. Temperaturas superiores a esta faixa normalmente requer algum tipo de intervenção, pois pode significar um sobre carregamento elétrico na junção. Inspeções periódicas são necessárias, pois, devido a ação da temperatura, pode ocorrer alteração nas propriedades elétricas da junta, principalmente sua resistividade (Braunowic, 1994). Além da formação de compostos intermetálicos podendo comprometer mecanicamente a conexão (Braunowic, 1994).

Alguns estudos mostram ainda que a presença e espessura de IMCs também interferem na resistência elétrica de uma união bimetalica (Braunowic, 1994). A resistividade elétrica aumenta com o crescimento dos compostos intermetálicos, e estes, por sua vez, tendem a crescer com a temperatura. Assim, mais um aspecto que demanda controle na temperatura de serviço da conexão. Lee (Won-Bae Lee et al. 2006), estudou os efeitos dos compostos intermetálicos nas propriedades eletro-mecânicas de juntas bimetalicas recozidas após serem soldadas pelo processo FSW e conclui que ocorrem mudanças significativas na resistividade elétrica.

Em juntas soldadas compostas por um único material, o tamanho de grão é o principal fator responsável pelo nível de condutividade elétrica, uma vez que os contornos de grãos podem constituir um obstáculo à mobilidade dos elétrons. Desse modo, o fenômeno de coalescência do grão resulta em leve aumento da condutividade elétrica. Alternativamente, uma redução na condutividade elétrica ocorre em zonas processadas onde ocorreu o refino de grãos.

Precipitados, por sua vez, afetam principalmente a dureza da matriz e não a condutividade elétrica, uma vez que os elétrons podem facilmente encontrar caminhos

alternativos e fluir em uma matriz altamente condutora formada por alumínio e cobre (Santos et al., 2011).

Segundo Ivair et al, (A. S. Ivair, Girotto M. Emerson, 2002), existem vários métodos que podem ser usados para avaliar a resistividade elétrica, como por exemplo: pontes de impedância, método dos pulsos, métodos sem contato, método das duas pontas, método eletrômetro e método da sonda de quatro pontas ou de quatro terminais. O método de quatro pontas foi proposto por L. Wenner em 1915 e adotado por L. B. Valdes em 1954 para realizar medidas de resistividade elétrica em materiais semicondutores, sendo esse o método experimental mais utilizado para caracterização elétrica de metais e semicondutores quando deseja-se rapidez e precisão nos resultados (A. S. Ivair, Girotto M. Emerson, 2002). A Tabela 4 mostra um comparativo entre algumas propriedades elétricas e físicas do cobre e do alumínio puros, incluindo a resistividade elétrica.

Tabela 4 – Comparativo entre algumas propriedades elétricas e físicas do alumínio e do cobre, puros.

Característica	Cobre	Alumínio
Grau de pureza (%)	>99,9	> 99,5
Densidade	8,89	2,703
Resistividade (Ω mm ² /m)	0,017241	0,02826
Coefficiente de dilatação linear ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	$17 \cdot 10^{-5}$	$23 \cdot 10^{-5}$
Coefficiente de variação da resistência elétrica ($\Omega \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)	0,00393	0,00403
Ponto de fusão ($^{\circ}\text{C}$)	1080	660
Condutividade (w/cm $^{\circ}\text{C}$)	3,8	2,4
Tensão de ruptura (N/mm ²)	225	125 a 205
Módulo de elasticidade (N/mm ²)	26	14
Alongamento a ruptura (%)	20 a 40	1 a 4

Fonte: Padrão IACS (padrão internacional do cobre recosido)

2.5 Aporte Térmico

É de grande importância ter um modelo matemático que possa estimar a geração de calor. De acordo com LAKSHMINARAYANAN (2011), esse controle do aporte térmico é responsável pela microestrutura da região soldada e de soldas livres de defeitos.

Tal modelo baseia-se em alguns aspectos da geometria da ferramenta no comportamento das forças entre ferramenta e peça de trabalho. O mais clássico é a lei de atrito de Coulomb. O modelo analítico considera para a fonte de calor alguns dos parâmetros do processo, em especial a velocidade de rotação. No entanto, os modelos analíticos clássicos não incluem o efeito da velocidade de soldagem, que é um parâmetro de processo, onde se pressupõem o deslizamento do material. A força de mergulho (força Z) pode ser usada para estimar a pressão sob a ferramenta, que então pode ser aplicada na lei de fricção de Coulomb. Uma das desvantagens é que algumas versões desses modelos analíticos precisam de dados de entrada medidos experimentalmente, como a força Z . No caso de uma solda instrumentada, o torque para girar a ferramenta também pode ser monitorado, medindo-se diretamente a potência rotacional da ferramenta que é próxima da geração total de calor pela ferramenta. Schmidt *et al.* (2004).

O modelo analítico usa a forma geométrica da ferramenta e a abordagem clássica é incluir o efeito principal do ombro (dado pelo raio do mesmo), os lados do pino (dados pelo raio do pino e altura sob a suposição de uma forma cilíndrica) e a ponta do pino, supondo que a ponta seja plana e não arredondada, o que é frequentemente usado e foi o aplicado nesse trabalho. O calor é gerado pelo movimento rotativo entre a ferramenta e as chapas a serem soldadas. Há duas contribuições para a geração de calor: (i) dissipação friccional ou de atrito, e (ii) dissipação plástica ou viscosa. A dissipação de atrito é impulsionada pelo campo de tensão de atrito na interface de contato. Mas é importante para enfatizar que mesmo sob um alto grau de deslizamento, o material deformado deve estar presente para acomodar o fluxo de material ao redor do pino da ferramenta. A dissipação plástica é impulsionada pela deformação do material ocorrendo na camada de cisalhamento ao redor da ferramenta.

Na lei de atrito, que simplesmente relaciona a tensão de cisalhamento friccional à pressão através de um coeficiente de atrito m , esse coeficiente pode variar de 0 a 0,6, onde valores ao redor de 0,3 são frequentemente relatados; no entanto, os valores exatos de m para soldagem em diferentes condições e combinações de ferramentas / peças são difíceis de medir experimentalmente. Os modelos analíticos de fontes de calor são frequentemente modelos do fluxo de calor na peça de trabalho conforme a fórmula 3 Schmidt *et al.* (2004)

$$Q = \frac{2}{3} \pi * \omega * r * \mu * F_z \quad (3)$$

Onde: Q é aporte térmico gerado kW, ω e velocidade angular na ferramenta, μ é o coeficiente de atrito, F_z é força axial de mergulho.

2.6 Projeto de experimento

Fisher, em 1924, criou a Análise de Variância (ANOVA) para comparar simultaneamente amostras de variáveis contínuas com distribuição normal e cujas variâncias não diferem significativamente entre si, ou seja, que podem ser consideradas como estimativas da variância populacional s^2 .

Segundo Montgomery e Runger (Montgomery e Runger, 1999), “*por um planejamento fatorial, queremos dizer que, em cada tentativa completa ou réplica do experimento, todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores são investigadas*”. Desta forma, o efeito de um fator é definido como variação na resposta, produzida pela mudança no nível do fator. Além disso, os autores sintetizam declarando que “*Efeitos fatoriais são a única maneira de descobrir interações entre as variáveis*”.

A ANOVA é uma ferramenta de teste estatístico amplamente difundido entre os pesquisadores, e aplica-se fundamentalmente para verificar se existe uma diferença significativa entre as médias e se os fatores exercem influência em alguma variável dependente. A principal aplicação da ANOVA é a comparação de médias oriundas de grupos diferentes, também chamados tratamentos, como por exemplo, médias históricas de questões de satisfação, empresas que operam simultaneamente com diferentes rendimentos, entre muitas outras aplicações.

Existem dois métodos para calcular a variância: dentro de grupos (MQG) e a variância das médias (MQR). Em um modelo estatístico ANOVA, calculam-se esses dois componentes de variância. Se a variância calculada usando a média (MQR) for maior do que a calculada usando os dados pertencentes a cada grupo individual (MQG), isso pode indicar que existe uma diferença significativa entre os grupos.

Existem dois tipos de problemas a serem resolvidos através da ANOVA: problemas a níveis fixos e problemas a níveis aleatórios. A maioria dos estudos é realizada a níveis fixos, uma vez que o segundo tipo de problema (aleatório) somente surgirá quando ocorrer um estudo envolvendo uma escolha aleatória de fatores. A Tabela 5 sintetiza a apresentação convencional dos resultados em uma análise de variância, (Montgomery e Runger, 1999).

Tabela 5 – Exemplo de apresentação de resultado de uma Análise de Variância ou tabela ANOVA.

Fonte de Variação	Variância			Teste F
	SQ	GDL	MQ	
Entre Grupos	SQG	K-1	MQG	MQG/MQR
Dentro dos Grupos	SQR	N-K	MQR	
Total	SQT	N-1		

Fonte: Montgomery & Runger, 1999

A seguir tem-se uma rápida descrição dos termos da tabela ANOVA, mostrada na Tabela 5.

✓ **SQT** = SQG + SQR; (mede a variação geral de todas as observações).

É a soma dos quadrados totais. Onde:

- SQG - soma dos quadrados dos grupos (tratamentos), associada exclusivamente a um efeito dos grupos.
- SQR - soma dos quadrados dos resíduos, devidos exclusivamente ao erro aleatório, medido dentro dos grupos.

✓ **MQG** = SQG (K - 1); (É a média quadrada dos grupos).

✓ **MQR** = Média quadrada dos resíduos (entre os grupos).

✓ **Teste F** = MQG / MQR

✓ **N - 1** = (K - 1) + (N - K); (Indica o grau de liberdade).

Observações:

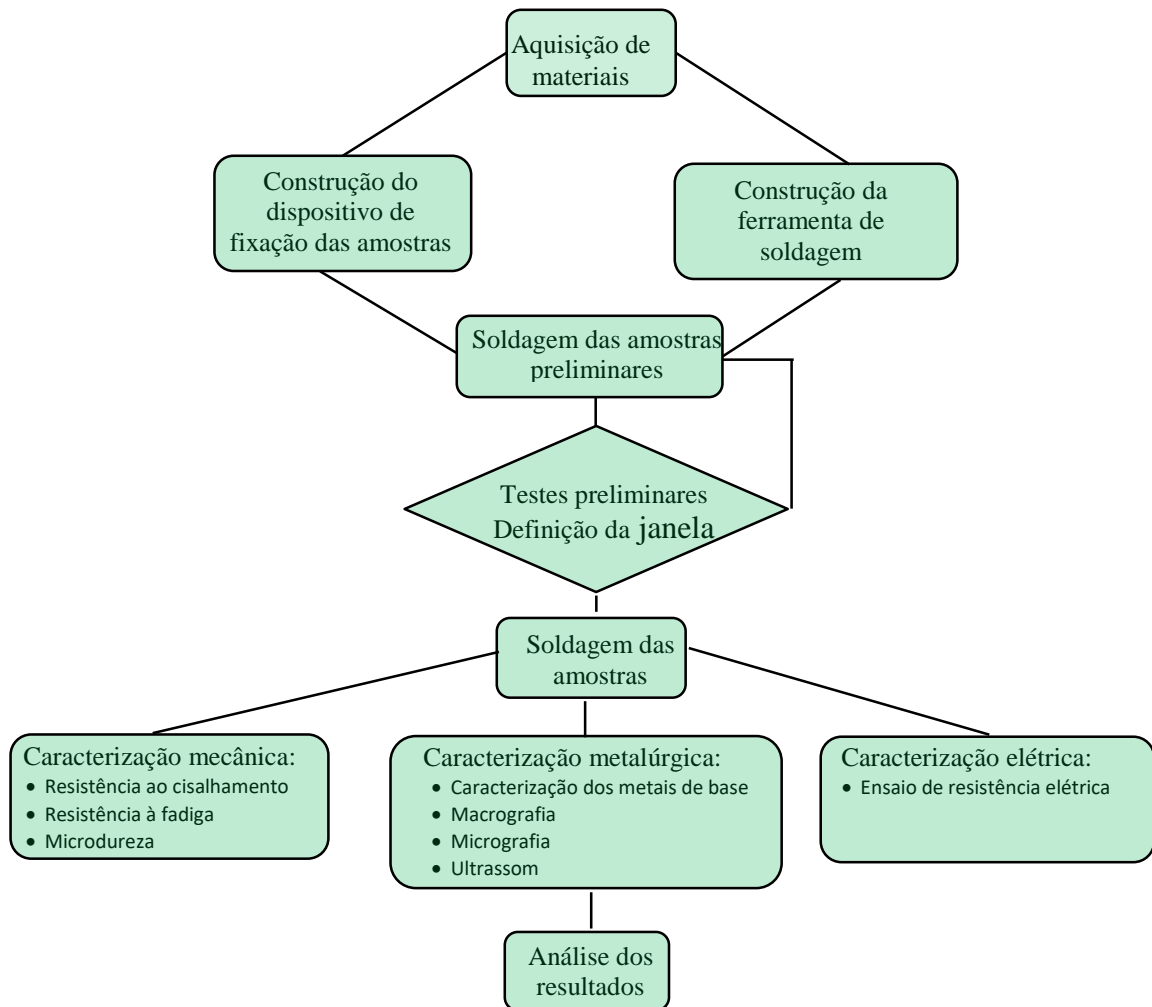
- N: quantidade de grupos;
- K: quantidade de elementos;
- Os parâmetros SQG e MQG medem a variação total entre as médias. Já os parâmetros SQR e MQR medem a variação das observações de cada grupo.

A hipótese nula sempre será rejeitada quando F calculado for maior que o valor tabelado. Da mesma forma, se MQG for maior que MQR, rejeita-se a hipótese nula, (Montgomery e Runger, 1999).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os procedimentos executados neste estudo visam determinar a influência da velocidade de rotação e velocidade de soldagem sobre as características de juntas soldadas dissimilares através do processo FSW. Além dos parâmetros citados, foi avaliada a influência da execução de um recuo da ferramenta no início do processo. Juntas sobrepostas obtidas através da união da liga de cobre ASTM C110 com a liga de alumínio AA6060-T5 foram avaliadas em termos de resistência mecânica ao cisalhamento, resistência à fadiga, microdureza e resistência elétrica da região soldada. A Figura 12 ilustra o fluxograma do trabalho.

Figura 12 – Fluxograma do trabalho



Fonte autor

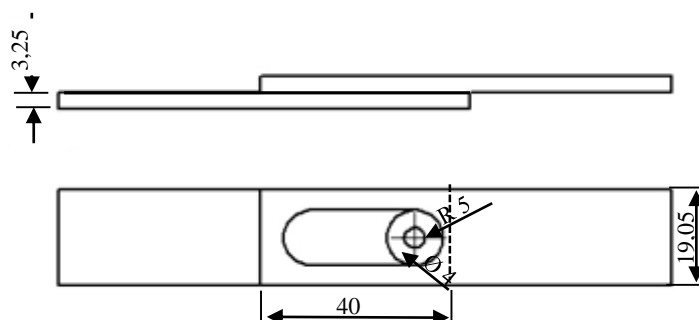
Materiais e corpos de prova

No presente estudo foram utilizadas ligas de alumínio AA6060-T5 e de cobre ASTM B110 para a obtenção das juntas soldadas. Ambas as ligas foram adquiridas na forma de barras retangulares com largura de 19,05 mm e espessura de 3,15 mm.

A Tabela 8 e a Tabela 9 apresentam a composição química das ligas de alumínio e cobre, respectivamente. Essa caracterização foi feita por meio de espectroscopia de emissão ótica utilizando um espectrômetro Bruker modelo Q2, no Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) da UFRGS.

As amostras para o estudo foram produzidas na forma de juntas soldadas sobrepostas dissimilares na forma de corpos de prova para ensaio de tração, cujas dimensões estão apresentadas na Figura 13. Em todas as amostras, a chapa de cobre foi posicionada sobre a de alumínio. O comprimento total de soldagem foi de 30 mm, sempre centralizado em relação à porção sobreposta da junta, de comprimento igual a 40 mm.

Figura 13 – Dimensões das juntas soldadas



Fonte autor

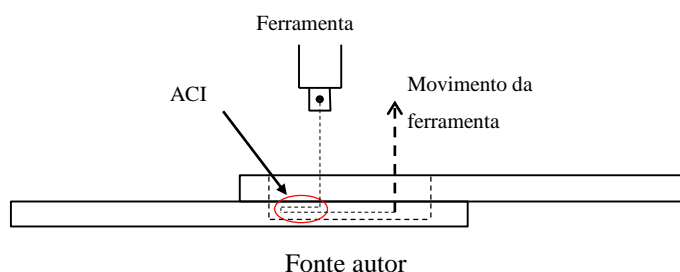
3.1 Procedimento Experimental

A definição dos parâmetros de processo a serem utilizados na obtenção das amostras tomou como base trabalhos realizados por outros pesquisadores sobre soldagem FSW para juntas sobrepostas (COELHO et al., 2008, SAIED et al., 2010, XUE et al., 2011a, XUE et al., 2011b). Estes trabalhos serviram de ponto de partida para se chegar a uma janela adequada de parâmetros de soldagem, a qual foi aprimorada por meio de testes preliminares. Os critérios utilizados para avaliação das soldas preliminares foram a ocorrência de união entre as chapas (avaliado em ensaio de cisalhamento) e a aparência visual do cordão de solda

(inspeção visual, em termos da isenção de defeitos superficiais). Detalhes das análises das soldas preliminares encontram-se no Apêndice 9.1.

Após sucessivos testes, verificou-se que os parâmetros com maior influência sobre a qualidade visual da solda são a velocidade de rotação e sua velocidade de soldagem, o que está de acordo com estudos envolvendo a soldagem de juntas dissimilares entre ligas de alumínio e cobre (XUE, et al., 2011a, EISMAEILI et al., 2011, TAN et al., 2013). Nos ensaios de cisalhamento, as soldas preliminares apresentaram falhas no início do cordão de solda, o que acredita-se estar associado às condições iniciais do processo (possivelmente baixa temperatura). A ocorrência destas falhas motivou a implementação de um movimento diferenciado da ferramenta nos instantes iniciais da soldagem, o que é referido neste texto como “ACI”, (avanço inicial contrário). O ACI consiste em iniciar a solda em uma posição adiante daquela correspondente ao início planejado para a solda, fazendo com que antes de avançar em direção ao final do cordão a ferramenta se desloque até o início deste, como ilustra a Figura 14. Acredita-se que a utilização do recuo faz com que a extremidade do cordão de solda no lado no início seja formada em um momento em que a temperatura da ferramenta e das chapas já se encontra mais elevada, melhorando o comportamento mecânico da junta.

Figura 14 – Movimento da ferramenta mostrando a implementação do ACI.



Após os testes preliminares (resultados apresentados no Apêndice I), foram selecionados os parâmetros que permitiram soldas com melhor aparência por inspeção visual. Os parâmetros de processo que foram variados neste estudo foram a velocidade de rotação da ferramenta (800 a 1100 rpm) e utilização ou não de um ACI de 2 mm no início do processo. A velocidade de soldagem e o ângulo de inclinação da ferramenta foram mantidos constantes em 10 mm/min e 3° respectivamente.

A combinação dos parâmetros de processo mantidos a níveis variáveis resulta em um projeto fatorial de experimentos com duas fontes (parâmetros), uma avaliada a quatro níveis (velocidade de rotação) e outra a dois (Movimentos do ACI) totalizando 8 combinações diferentes, aqui chamadas de parâmetros de soldagem. A Tabela 6 apresenta os oito parâmetros de soldagem estudados nesse trabalho. Para cada parâmetro de soldagem foram produzidas seis amostras, sendo duas para análise metalográfica, uma para observações de ultrassom e resistividade elétrica e três para os ensaios de cisalhamento, para maior representatividade dos resultados. O tempo de soldagem das soldas produzidas sem recuo corresponde a 138 s enquanto nas soldas com ACI, por demandarem da ferramenta um percurso 2 mm maior, o tempo é de 150 s.

Tabela 6 – Parâmetros de processo utilizados para a produção das amostras.

Parâmetros de soldagem	Velocidade de rotação (rpm)	ACI	Ângulo ferramenta (°)	Velocidade de soldagem (mm/min)	Tempo de soldagem (s)
C-800	800	Sim	3	10	150
S-800	800	Não	3	10	138
C-900	900	Sim	3	10	150
S-900	900	Não	3	10	138
C-1000	1000	Sim	3	10	150
S-1000	1000	Não	3	10	138
C-1100	1100	Sim	3	10	150
S-1100	1100	Não	3	10	138

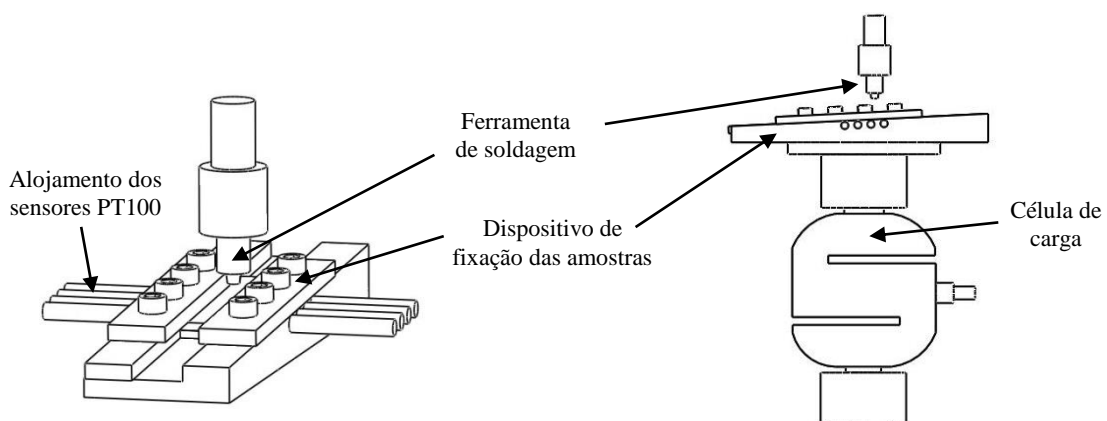
3.2 Equipamentos utilizados na execução das soldas

As soldas foram realizadas em um centro de usinagem CNC marca Romi, modelo Centur D 800, que pertencente ao Laboratório de usinagem CNC da Unipampa. Este equipamento foi utilizado por possibilitar o uso de um programa em código numérico para a realização do movimento da ferramenta, possibilitando o controle dos parâmetros de processo definidos, e tem potência de 15 kW e velocidade angular de até 7500 rpm, sendo um equipamento robusto, capaz de garantir a rigidez necessária para a soldagem em estudo.

Para a fixação das amostras durante a soldagem, foi construído um dispositivo de aço ABNT 1045. Devido ao eixo árvore da máquina utilizada ser fixo, o dispositivo de fixação foi projetado com uma inclinação de 87° em relação ao eixo da ferramenta, para implementar o ângulo de inclinação da ferramenta de 3° como desejado. No dispositivo foram criados espaços para colocação de sensores de temperatura de forma que estes estivessem posicionados ao longo do cordão de solda. Ao todo foram 8 pontos de medição de temperatura, sendo 4 pontos de cada lado da amostra. A medição foi realizada por meio de sensores resistivos do tipo PT100.

Além da medição da temperatura ao longo do cordão de solda, também foi medida a força axial promovida pela ferramenta durante a soldagem. Para medição da força axial foi utilizada uma célula de carga Instron de 10 kN. A aquisição dos dados foi feita por meio de um condicionador de sinais modelo Spider 8 da HBM, controlado por computador. A Figura 15 ilustra o dispositivo construído e os arranjos utilizados para medição da temperatura e da carga axial.

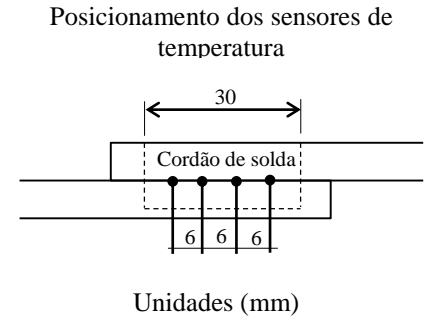
Figura 15 – Dispositivo de fixação das amostras e arranjo de medição da temperatura e carga axial.



Fonte autor

A Figura 16 mostra o processo de soldagem, onde pode-se ver o dispositivo de fixação, a ferramenta de soldagem e os sensores de temperatura.

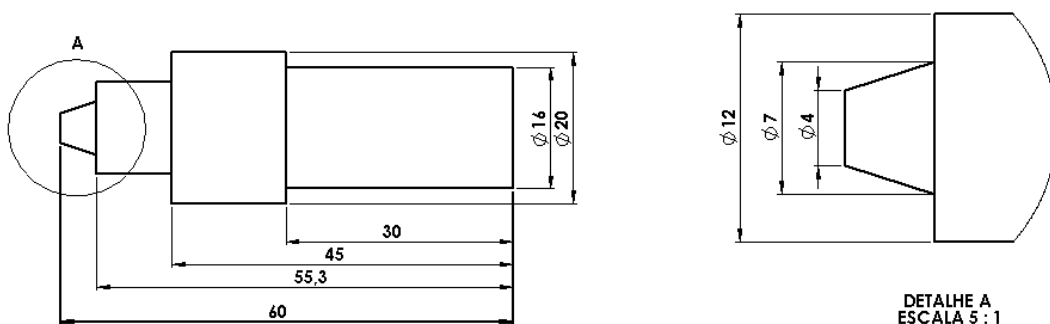
Figura 16– Soldagem das amostras e esquema mostrando as posições dos sensores de temperatura



Fonte autor

A especificação das dimensões da ferramenta foi feita em função das espessuras das chapas a serem soldadas. Segundo Capelari (2006) e Souza (2010) as dimensões em uma ferramenta de soldagem FSW, deve possuir uma relação diametral pino/ombro de aproximadamente 1/3. A ferramenta foi desenvolvida com um pino cônico e liso (sem rosca), por questões de simplicidade, custo e por não ser o foco deste trabalho investigar efeitos da geometria da ferramenta. O material utilizado para a construção da ferramenta foi o aço AISI H13, devido à sua elevada resistência mecânica, dureza à quente e resistência ao desgaste, o que permite uma longa vida útil frente à severidade do processo. A ferramenta foi usinada em torno CNC e após a usinagem foi submetida a um tratamento térmico de têmpera e revenido, resultando em uma dureza em torno de 50 HRC. A Figura 17.

Figura 17 – Ferramenta de usinagem utilizada no presente trabalho obs; (unidades mm).



Fonte autor

3.3 Caracterização das amostras

As amostras soldadas utilizando os parâmetros de soldagem mostrados na Tabela 6 foram submetidas a caracterizações mecânicas (resistência ao cisalhamento, resistência à fadiga, microdureza), metalúrgica (metalografia, ultrassom) e elétrica (resistência elétrica), como ilustrado no fluxograma da Figura 12.

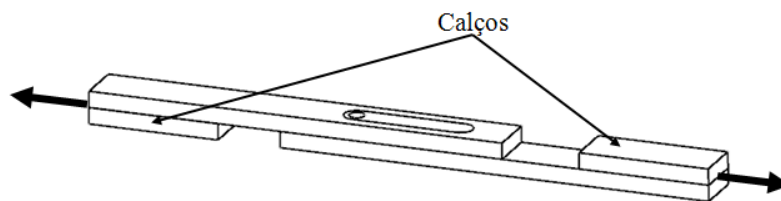
3.3.1 Análises metalográficas

Para cada parâmetro de soldagem, foram produzidas duas amostras para caracterização metalográfica. As amostras foram seccionadas em planos longitudinal e transversal ao cordão de solda. O corte foi realizado com uma máquina de corte de precisão marca ISOMET 2000 e posteriormente embutidas à frio em resina e submetidas a lixamento e polimento. Devido à natureza dissimilar da junta soldada, o ataque químico e análise das imagens foram realizados em duas etapas, uma para o cobre e outra para o alumínio. Para o ataque químico do cobre, foi utilizada uma solução de água (H_2O), hidróxido de amônio (NH_4OH) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2), todos na mesma proporção. Durante o ataque do cobre o alumínio foi protegido. Após o ataque foi feito o registro de imagens da macro e microestrutura do cobre. Para o ataque químico do alumínio foi utilizado ácido fluorídrico a 0,5% enquanto o cobre foi protegido. Após o ataque químico foi feito o registro de imagens da macro e microestrutura do alumínio. Por fim, as imagens da microestrutura do cobre e do alumínio, foram montadas utilizando um software de processamento de imagens. Para a observação e registro das imagens foi utilizada microscopia ótica (MO) com um microscópio marca Olympus, modelo BX 51 M, com câmera digital acoplada.

3.3.2 Ensaios de cisalhamento

As amostras foram submetidas a ensaio de cisalhamento em uma máquina de ensaios servo-hidráulica MTS com uma taxa de deslocamento de 0,375 mm/min. Os corpos de prova foram produzidos com as dimensões mostradas na Figura 13. Para garantir o alinhamento da junta durante os ensaios, foram colocados “suportes” nas extremidades da amostra, como ilustrado na Figura 18, eliminando, assim, esforços indesejados de torção sobre a junta. O procedimento adotado é similar ao apresentado por Abdollah-Zadeh et al. (2008).

Figura 18 – Representação esquemática dos ensaios de tração realizados



Fonte autor

Foram medidas a força e o deslocamento durante o ensaio e, posteriormente plotou-se gráficos *força x alongamento* para os diferentes parâmetros de soldagem. Foram ensaiados três corpos de prova para cada parâmetro de soldagem.

3.3.3 Ensaio de fadiga

Após os ensaios de cisalhamento, identificou-se a combinação de parâmetros de soldagem correspondente às soldas de melhor desempenho mecânico para estudo do desempenho em fadiga. Os testes foram executados em uma máquina de ensaios servo-hidráulica MTS, na forma de tração flutuante, com razão de tensão R de 0,1.

Foram produzidas 36 amostras utilizando a combinação de parâmetros de soldagem selecionada, sendo 18 amostras contendo ACI e 18 sem ACI. Para cada condição com e sem ACI foram aplicados seis níveis de carregamento, com três repetições para cada ensaio (totalizando 18 testes para cada condição e 36 testes no total). Os seis níveis de carregamento foram definidos com base na carga correspondente a 1 mm de alongamento observada no teste de cisalhamento para a amostra com ACI com melhor desempenho no ensaio monotônico descrito na seção 3.3.2. As cargas máximas utilizadas nos ensaios de fadiga foram 25, 30, 35, 40, 45 e 50% da carga de referência. Em cada nível de carregamento, a carga mínima foi definida como 10% da carga máxima ($R=0,1$). A frequência utilizada em todos os ensaios foi de 10 Hz.

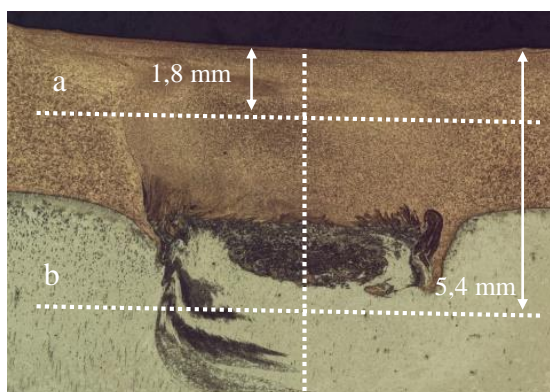
A partir dos resultados dos ensaios de fadiga, foi construída a curva de Wöhler (curva S-N) para o parâmetro de soldagem testado. Devido a elevada dispersão de resultados característica do comportamento em fadiga, foi realizada uma análise de variância (ANOVA), com confiabilidade de 95%, para avaliar a significância dos dados.

3.3.4 Medição de microdureza

Os ensaios de microdureza foram realizados com indentador Vickers (HV) e carga de 200 g (HV_{200}) em um microdurômetro Instron modelo Tukon 2100B na seção transversal das juntas soldadas em pontos espaçados de forma equidistante, de maneira a fornecer um perfil de microdureza.

Três linhas de medição foram adotadas, como mostrado na Figura 19. A linha vertical (perpendicular à superfície) foi posicionada ao centro do cordão de solda e estende-se da superfície superior até a inferior. As duas linhas horizontais foram posicionadas a meia altura das chapas superior (cobre) e inferior (alumínio), identificadas como linhas a e b, respectivamente. As linhas horizontais varrem a amostra lateralmente, num comprimento de aproximadamente 18 mm (9 mm para cada lado partindo do centro da amostra). Todas as indentações distaram 0,5 mm entre si. Os três perfis de microdureza foram avaliados em dois planos distintos, um próximo ao início do cordão (região do recuo) – plano identificado como L2 – e em um plano próximo ao final do cordão (a uma distância de 5 mm do furo deixado pela ferramenta) – plano identificado como L1.

Figura 19 – Demarcações das linhas de medição dos perfis de microdureza



Fonte autor

3.3.5 Testes de resistividade elétrica

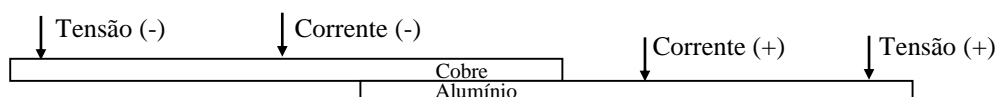
Com o objetivo de verificar o comportamento elétrico do cordão de solda foi feita a medição da resistividade elétrica nas amostras. O método das quatro pontas (método de Wenner) foi aplicado nas medições. As medições foram realizadas no Laboratório de Medições Elétricas do curso de Engenharia Elétrica da UFRGS, utilizando um espectrômetro de impedância Cropico, modelo DO5.

Para servir como um padrão de referência para a resistividade do cordão de solda, foram produzidas juntas sobrepostas Al/Al e Cu/Cu com a combinação de parâmetros de

soldagem correspondente às soldas de melhor desempenho mecânico nos ensaios de cisalhamento. Mediu-se, então, a resistividade dessas soldas de mesmo material, também adotando o método de 4 pontos.

A Figura 20 ilustra, esquematicamente o posicionamento dos terminais de posicionamento dos 4 fios para a medição da resistividade.

Figura 20 – Medição da resistência elétrica da junta soldada.



Fonte autor

Avaliação por ultrassom

Para verificar a existência de descontinuidades internas nos cordões de solda, as amostras foram submetidas à inspeção por ultrassom. Os testes foram realizados com um aparelho GE/Krautkramer, modelo USD-15 com um transdutor Olympus C110 de 6mm de diâmetro. As configurações de ensaio estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7– Parâmetros utilizados nos ensaios de ultrassom

Parâmetros do ensaio	Unidade
Frequência	5 MHz
Bloco padrão	V1
Velocidade de ensaio	6320 m/s
Ganho do eco de fundo com sinal a 80%	31 dB
Ganho do eco da interface entre as chapas na solda com sinal a 80%	41 dB
Ganho do eco da região sem solda com sinal a 80%	27 dB

No ensaio, o transdutor foi transladado longitudinalmente, ao longo de todo o comprimento do cordão de solda. Numa solda livre de defeitos, pulsos tendem a ter pequena amplitude em toda a extensão do cordão devido à homogeneidade do percurso da onda sonora. Por outro lado, numa solda com descontinuidades, estas refletem a onda, aumentando a amplitude do pulso.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente trabalho foi feito o estudo da soldagem de juntas sobrepostas dissimilares Cu/Al, utilizando o processo FSW. Oito combinações diferentes de parâmetros de processo (parâmetros de soldagem) foram avaliadas, a partir de testes preliminares. Para cada parâmetro de soldagem foram produzidas 6 amostras, (3 para ensaios mecânicos, 1 para ensaio de ultrassom e resistividade elétrica e 2 para metalografia). Neste capítulo são apresentados os resultados das caracterizações realizadas conforme descrição apresentada no (apêndice I).

A Tabela 8 e a Tabela 9 apresentam a composição química das ligas de alumínio e cobre, respectivamente. Essa caracterização foi feita por meio de espectroscopia de emissão ótica utilizando um espectrômetro Bruker modelo Q2, no Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) da UFRGS.

Tabela 8 – Composição química da liga AA6060-T5.

Valores em percentual de peso										
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Pb	Sn
0,409	0,260	0,054	0,087	0,483	0,0074	0,0050	0,014	0,0094	0,050	0,0050
V	Sr	Zr	Cd	Co	B	Ag	Bi	Ca	Al	
0,0064	0,0020	0,0022	0,0050	0,0030	0,0010	0,0010	0,0060	0,0010	98,56	

Tabela 9 – Composição química da liga de cobre ASTM B110.

Valores em percentual de peso							
Zn	Pb	Sn	P	Mn	Fe	Ni	Si
0,061	0,050	0,0050	0,0100	0,0100	0,0068	0,047	0,0050
Al	S	As	Bi	Se	Sb	Cu	
0,014	0,0050	0,0100	0,0100	0,0100	0,0100	99,85	

As propriedades mecânicas das ligas em estudo foram avaliadas em ensaio de tração em três amostras para cada material. Os corpos de prova de seção retangular conforme especificações da norma NBR ISO 6892 foram realizados os ensaios no Laboratório de Metalurgia Física da UFRGS utilizando uma máquina servo-hidráulica MTS com uma taxa de deslocamento de 0,375 mm/min. A Tabela 10, mostra a média das propriedades mecânicas medidas no ensaio.

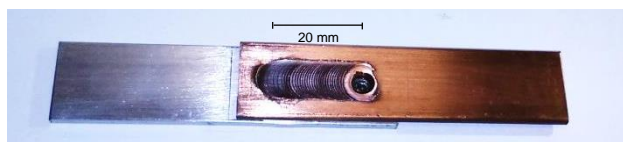
Tabela 10 – Propriedades mecânicas das ligas de alumínio (AA6060-T5) e cobre (ASTM B110).

Material	Limite de resistência (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento (%)
Cobre	320,67	318,31	20,01
Alumínio	197,42	155,37	16,22

4.1 Macrografia e micrografia

A Figura 21 apresenta de uma junta soldada sobreposta dissimilar Cu/Al, obtida pelo processo FSW logo após o processo de soldagem. O cordão de solda é visível na superfície superior da junta, onde se vê também, o furo deixado pelo pino da ferramenta, que é característico do processo.

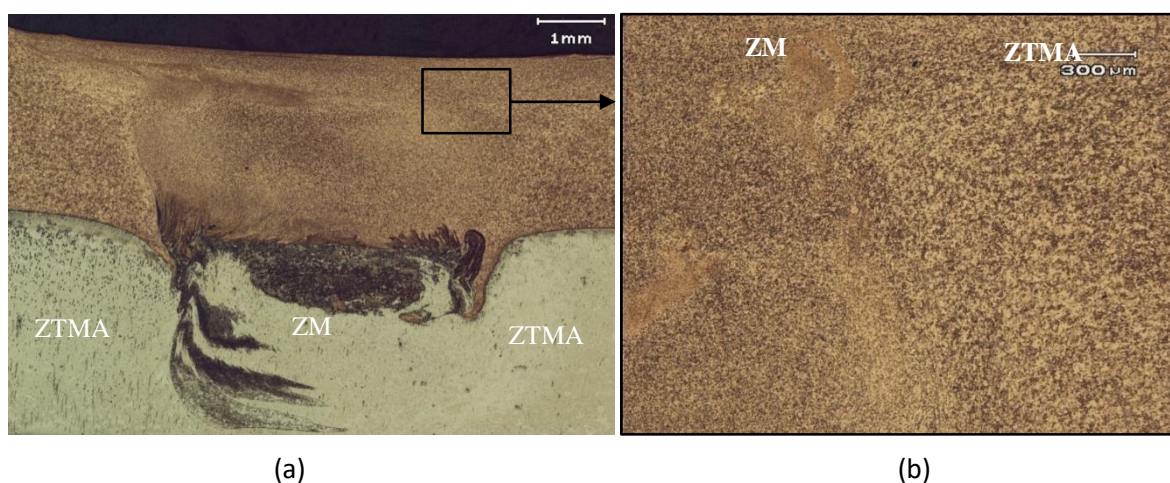
Figura 21 – Junta sobreposta Cu/Al obtida pelo processo FSW com (ACI-900).



Fonte autor

Na Figura 22 estão mostradas a macrografia e a micrografia da seção transversal de uma solda realizada com velocidade de rotação de 1000 rpm. Na Figura 22(a) é possível visualizar a mistura entre as chapas superior (Cu) e inferior (Al), a zona de mistura (ZM) e a zona termo-mecanicamente afetada (ZTMA).

Figura 22 – Macrografia (a) e micrografia (b) da seção transversal de uma solda com (ACI-1000).



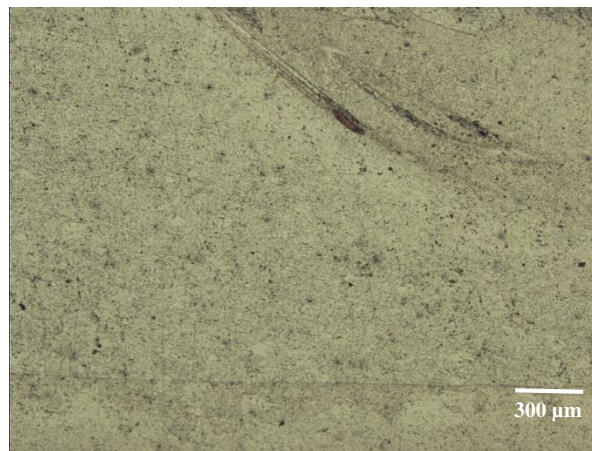
Fonte autor

Na Figura 22b se vê a microestrutura da região destacada na Figura 22a, onde é notória a diferença do tamanho de grão entre as diferentes zonas da solda. A ZM tem uma microestrutura bastante refinada em decorrência do fenômeno de recristalização dinâmica a que o material (no caso o cobre) é submetido durante o processo, conforme já observado por outros autores, como Li Xia-Wei (2011).

Além das zonas ZM e ZTMA sabe-se que existe ainda uma zona termicamente afetada (ZTA), porém esta não ficou visível na macrografia da Figura 22, possivelmente estendendo-se além dos limites da imagem.

A Figura 23 mostra a micrografia da ZM para a chapa de alumínio, onde verifica-se o refinamento da microestrutura nessa região novamente em decorrência da recristalização dinâmica. As manchas escuras correspondentes a partículas de cobre misturadas pela ação da ferramenta durante o processo de soldagem.

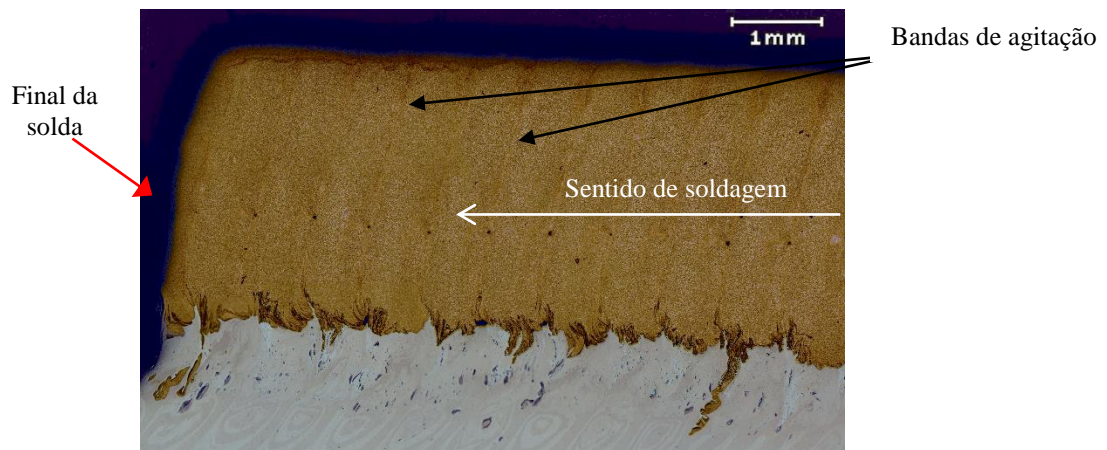
Figura 23 – Micrografia da seção transversal de uma solda correspondente à ZM na chapa de Al com (ACI 1000).



Fonte autor

A Figura 24 apresenta a macrografia da seção longitudinal de uma solda produzida com rotação de 900 rpm. Esta junta soldada apresenta a formação de bandas de agitação, que são características do processo FSW. As bandas de agitação formam uma estrutura com aspecto semelhante a uma mola cujo espaçamento aumenta com o aumento da velocidade de soldagem. Também afetam as propriedades da solda, aumentando levemente a resistência a tração e a tensão de escoamento (MOGHADDAM et al., 2011). A Figura 24 também permite a visualização da mistura entre as chapas de cobre e alumínio.

Figura 24 – Macrografia da seção longitudinal de uma solda mostrando as bandas de agitação com (ACI-900).



Fonte autor

O movimento do avanço contrário inicial (ACI), que está sendo proposto neste trabalho, no início do cordão de solda, promove uma mistura mais intensa entre os materiais das chapas superior e inferior, como mostra o destaque a Figura 25, referente a uma solda produzida com rotação de 1000 rpm.

Figura 25 – Macrografia da seção longitudinal de uma solda mostrando o ACI 1000 rpm.

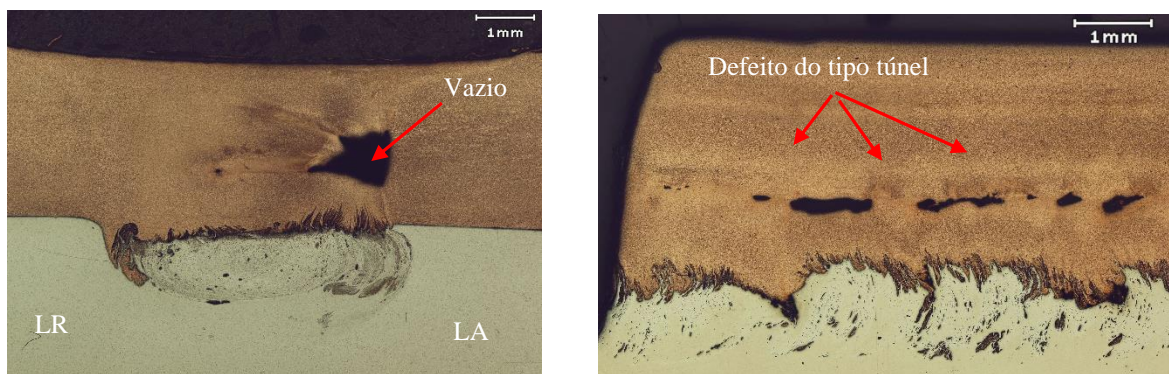


Fonte autor

Algumas soldas apresentaram defeitos de soldagem. A Figura 26a mostra a macrografia da seção transversal de uma solda produzida a 1000 rpm, sem a aplicação do ACI, onde se vê um vazio no lado do avanço (LA), que é o lado mais frio do processo devido

a falta de tempo de mistura no início do processo ou até mesmo a temperatura muito baixa nessa região. Na Figura 26b tem um defeito do tipo túnel, visível na seção longitudinal de uma solda produzida com 800 rpm sem aplicação do movimento do ACI, fato esse que justifica que as soldas produzidas com o ACI possibilitam um melhor arranjo na matriz produzindo uma mistura mais homogênea.

Figura 26 – Macrografias mostrando a presença de defeitos em algumas soldas:(a) vazio na seção transversal sem ACI-1000 e (b) defeito do tipo túnel no lado do avanço sem ACI-800.



(a)

(b)

Fonte autor

4.2 Resistência ao cisalhamento

A resistência ao cisalhamento das amostras soldadas foi avaliada através de ensaios de cisalhamento. Foram monitorados a força e o deslocamento durante o ensaio. A partir dos dados do ensaio, foram plotadas curvas *força x deslocamento* para cada amostra, sendo três amostras para cada um dos oito parâmetros de soldagem em estudo. As Figura 27,

Figura 28, Figura 29 e Figura 30 mostram as curvas de resistência ao cisalhamento obtidas para as soldas produzidas com velocidade de rotação de 800, 900, 1000 e 1100 rpm, respectivamente. Em cada gráfico são mostradas as curvas *força x deslocamento* das soldas produzidas com ACI e sem ACI para cada velocidade de rotação, ou seja, cada gráfico mostra curvas de seis amostras.

Figura 27 – Curvas força x deslocamento para as soldadas realizadas a 800 rpm.

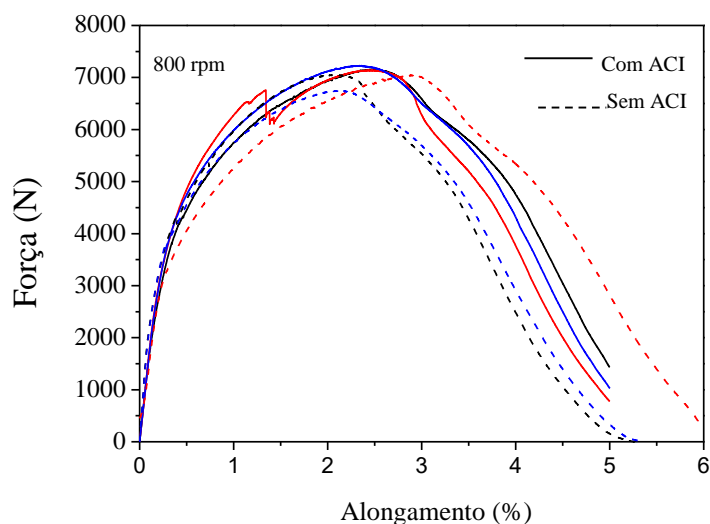


Figura 28 – Curvas força x deslocamento para as juntas soldadas a 900 rpm.

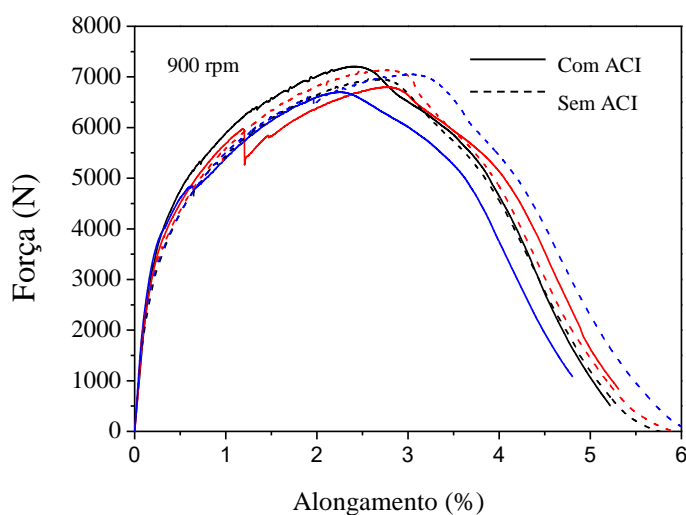


Figura 29 – Curvas força x deslocamento para as juntas soldadas a 1000 rpm.

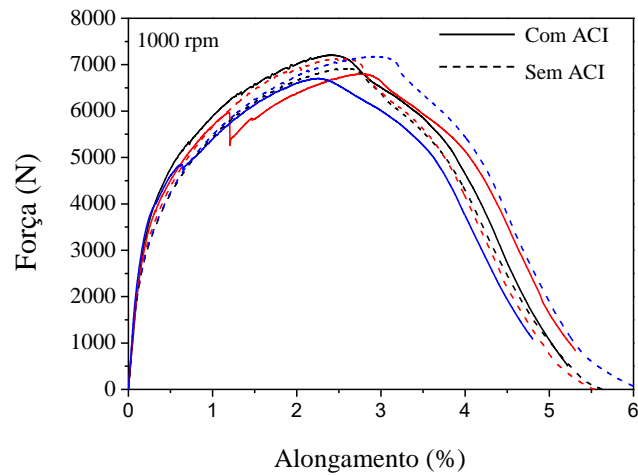
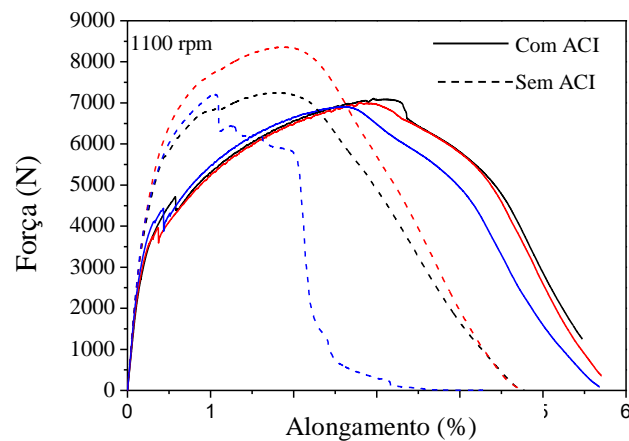


Figura 30 – Curvas força x deslocamento para as juntas soldadas a 1100 rpm.



A Tabela 11 apresenta a média e o desvio padrão para as forças máximas medida nos ensaios de cisalhamento das amostras.

Tabela 11 – Média e desvio padrão da força máxima medida nos ensaios de cisalhamento das juntas soldadas.

Velocidade de rotação (rpm)	Solda sem ACI		Solda com ACI	
	Carga máxima (N)	Desvio padrão (N)	Carga máxima (N)	Desvio padrão (N)
800	6857	137	7175	38
900	7053	069	6906	216
1000	7085	119	7083	34
1100	7613	528	7009	80

Para avaliar a significância dos fatores (velocidade de rotação, solda com ACI e solda sem ACI na resistência, foi feita uma análise de variância). A Tabela 12 apresenta os resultados correspondentes à análise de variância (ANOVA) de dois fatores para velocidade de rotação e movimento do ACI com intervalo de confiança de 0,05 (95% de confiança). A fonte *A* corresponde à velocidade de rotação e a fonte *B* ao uso ou não do movimento de avanço ACI.

Tabela 12 – Tabela ANOVA para resistência ao cisalhamento (= 90%).

Fonte	SQ	GDL	MQ	F calc.	% Contribuição	F tab.	α=Signif?
Fonte A	0,38	3	0,125	1,73	0,263713	2,46	NÃO
Fonte B	0,06	1	0,065	0,90	0,137131	3,05	NÃO
INTERAÇÃO	0,63	3	0,212	2,92	0,447257	2,46	SIM
Erro	1,16	16	0,072		0,151899		
Total	2,23	23			1		

4.3 Desempenho em fadiga

Após a obtenção dos resultados de resistência ao cisalhamento, tomou-se o parâmetro de soldagem que apresentou o melhor resultado em termos resistência ao cisalhamento e dispersão. Pela análise da Tabela 11 percebe-se que as soldas produzidas com velocidade de rotação de 1000 rpm com ACI apresentam uma combinação de alta resistência e pouca dispersão, sendo a escolhida para o ensaio de fadiga. Os ensaios de fadiga foram realizados em uma máquina de ensaios servo-hidráulica MTS, com solicitação de tração flutuante com razão de carregamento $R = 0,1$ e frequência de 10 Hz. Seis níveis de carregamentos foram empregados, tomando por base a força correspondente a 1 mm de alongamento do ensaio monotônico para a solda realizada com a configuração com (ACI)1000 rpm. Para cada nível de carregamento, foram testadas 3 amostras com e sem ACI. A Tabela 13 mostra os parâmetros utilizados nos ensaios de fadiga. Os resultados de vida em função do carregamento são apresentados na Tabela 14.

Tabela 13 – Condições de carregamento adotadas nos ensaios de fadiga.

% da resistência monotônica	Carga máxima (N)	Carga mínima (N)	Amostras com ACI	Amostras sem ACI
50	2909,0	290,90	3	3
45	2618,0	261,80	3	3
40	2327,2	232,72	3	3
35	2036,3	203,63	3	3
30	1745,4	174,54	3	3
25	1454,5	145,45	3	3

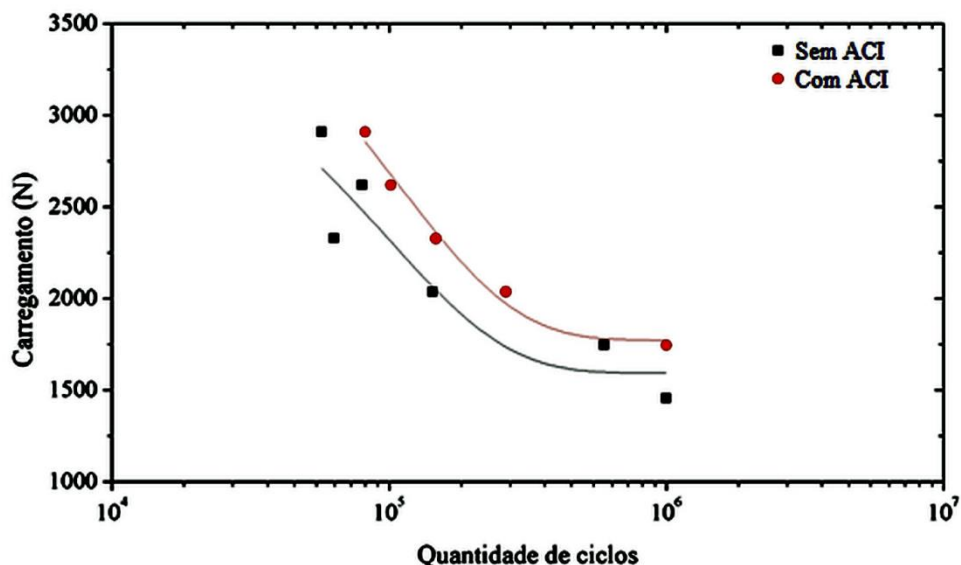
Tabela 14 – Vida em fadiga para as condições avaliadas.

% carga	Sem ACI		Com ACI	
	Vida Média (ciclos)	Desvio padrão (ciclos)	Vida Média (ciclos)	Desvio padrão (ciclos)
25	1,00E+06	0,00E+00	1,00E+06	0,00E+00
30	1,00E+06	0,00E+00	5,96E+05	2,21E+05
35	2,20E+05	5,37E+04	1,79E+05	9,91E+04
40	1,47E+05	3,35E+04	6,32E+04	3,41E+04
45	9,37E+04	2,05E+04	8,77E+04	5,94E+03
50	7,65E+04	1,26E+04	6,25E+04	1,76E+04

A Figura 31 apresenta a curva S-N (curva de Wöhler) construída a partir das médias dos resultados dos ensaios de fadiga para as soldas com e sem ACI. A curva indica uma melhora no desempenho em fadiga proporcionada pelo uso do ACI. Na, Figura 31 os pontos

demarcados correspondem aos dados medidos experimentalmente enquanto as linhas foram construídas por interpolação exponencial.

Figura 31 – Curvas S-N representando a vida em fadiga média para as juntas soldadas com ACI e sem ACI a 1000 rpm.



Para avaliar a significância dos fatores (solda com ACI e solda sem ACI) no desempenho em fadiga, foi feita uma análise de variância. A Tabela 15 apresenta os resultados correspondentes à análise de variância (ANOVA) de dois fatores para carregamento e uso do movimento do ACI com intervalo de confiança de 0,05 (95% de confiança). A fonte *A* corresponde ao nível de carregamento e a fonte *B* ao uso ou não do movimento do ACI. Conforme esperado, o nível de carregamento influi significativamente sobre a vida da junta. A aplicação do movimento ACI no início do processo também mostrou influência sobre o desempenho em fadiga, bem como a interação entre os dois fatores.

Tabela 15 – Tabela ANOVA para o ensaio de fadiga ($\alpha = 95\%$).

Fonte	SQ	GDL	MQ	F calc.	% Contribuição	F tab.	≠Signif.
C (ACI)	5,083x10 ¹²	5	1,016x10 ¹²	188,00	0,896494	2,62	SIM
S (ACI)	7,541x10 ¹⁰	1	7,541x10 ¹⁰	13,95	0,066498	4,26	SIM
INTERAÇÃO	1,827x10 ¹¹	5	3,655x10 ¹⁰	6,76	0,032239	2,62	SIM
Erro	1,297x10 ¹¹	24	5,407x10 ⁹		0,004768		
Total	5,471x10 ¹²	35			1		

As amostras soldadas utilizando os parâmetros de soldagem mostrados na Tabela 6 foram submetidas a caracterizações mecânicas (resistência ao cisalhamento, resistência à fadiga, microdureza), metalúrgica (metalografia, ultrassom) e elétrica (resistência elétrica), como ilustrado no fluxograma da Figura 12.

Microdureza

As medições de microdureza foram realizadas na escala (HV) Vickers e carga de 200 g (HV_{200}) em pontos espaçados de forma equidistante em 0,5 mm, de maneira a fornecer perfis de microdureza na seção transversal da solda, conforme detalhado no item 3.3.4.

As Figura 32 a Figura 35 apresentam os perfis de microdureza medidos na direção vertical, como mostrado na Figura 19, para as velocidades de rotação de 800, 900, 1000 e 1100rpm, respectivamente. Em cada gráfico são mostradas duas curvas, uma correspondente ao plano de medição próximo ao início do cordão (plano L2) e outra correspondente ao plano de medição próximo ao final do cordão (plano L1). Os perfis foram medidos a partir da superior (Cu) até a superfície inferior (Al), como mostra a Figura 19.

Figura 32 – Perfis de microdureza medidos verticalmente no plano transversal das soldas produzidas com 800 rpm: (a) plano L1 (final do cordão) e (b) plano L2 (início do cordão).

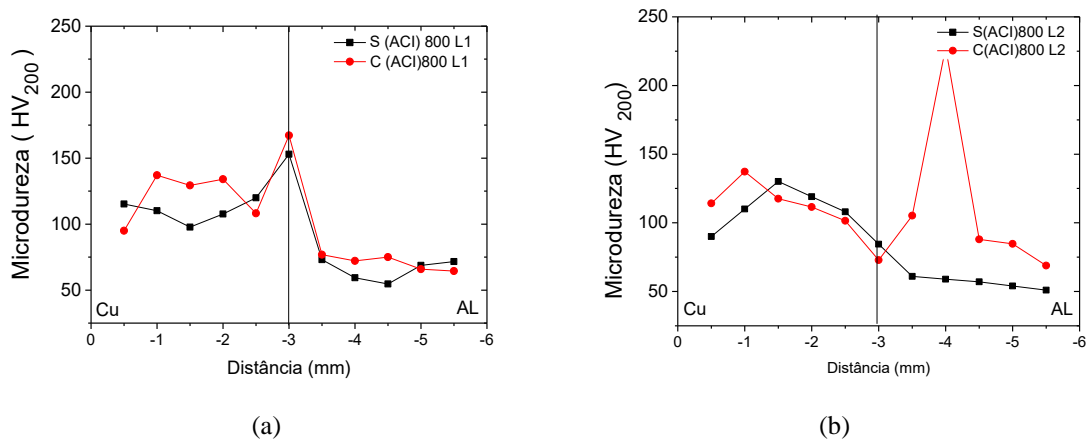


Figura 33 – Perfis de microdureza medidos verticalmente no plano transversal das soldas produzidas com 900 rpm: (a) plano L1 (final do cordão) e (b) plano L2 (início do cordão).

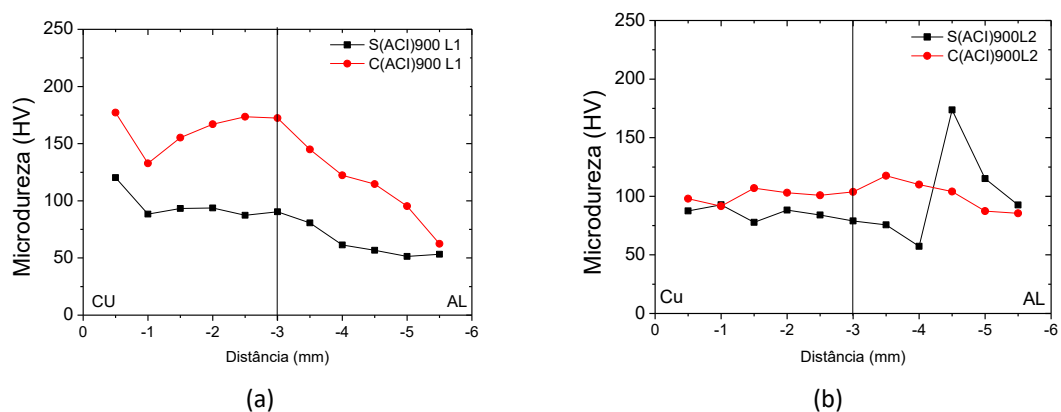


Figura 34 – Perfis de microdureza medidos verticalmente no plano transversal das soldas produzidas com 1000 rpm: (a) plano L1 (final do cordão) e (b) plano L2 (início do cordão).

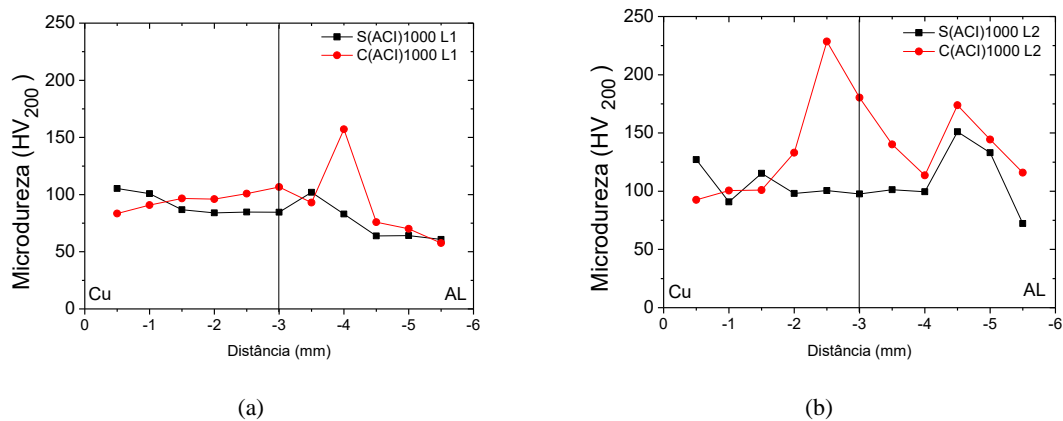
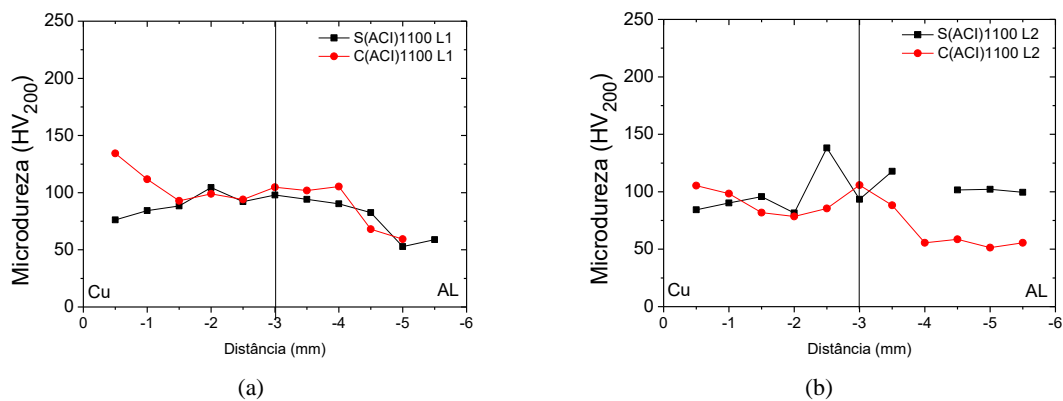
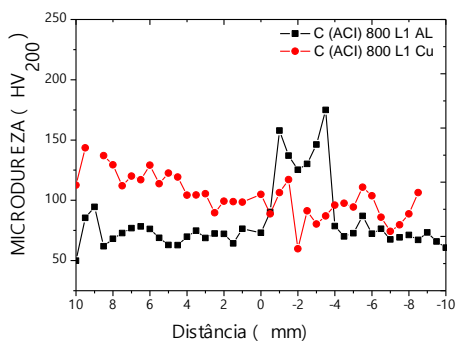


Figura 35 – Perfis de microdureza medidos verticalmente no plano transversal das soldas produzidas com 1100 rpm: (a) plano L1 (final do cordão) e (b) plano L2 (início do cordão).

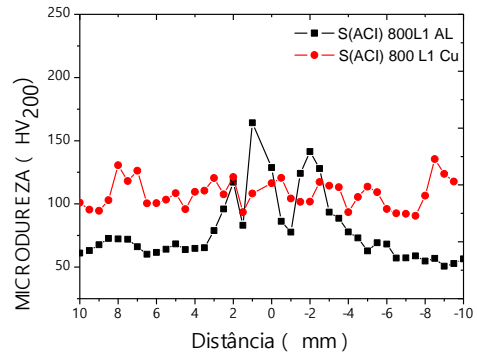


As Figura 36 a Figura 39 apresentam os perfis de microdureza medidos horizontalmente a meia altura das chapas superior (Cu) e inferior (AL), como mostrado na Figura 19 (linhas a e b), para as velocidades de rotação de 800 e 1100 rpm no início do cordão (L2) e no final do cordão (L1).

Figura 36 – Perfis de microdureza medidos horizontalmente no plano transversal das soldas produzidas com 800 rpm no lado L1 (final do cordão): (a) solda com ACI e (b) solda sem ACI.

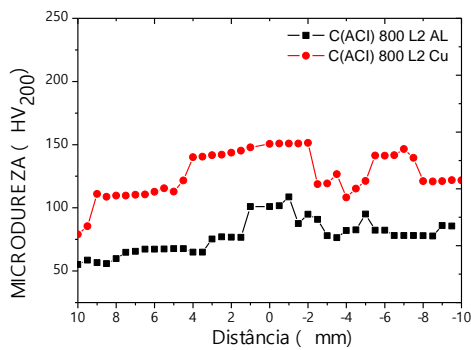


(a)

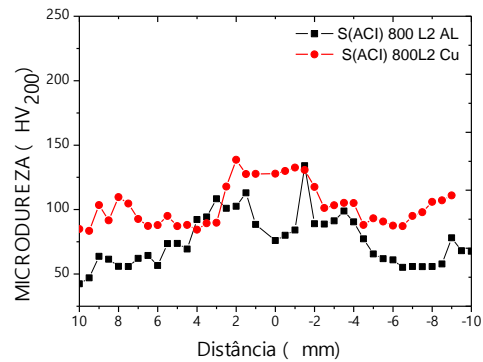


(b)

Figura 37 – Perfis de microdureza medidos horizontalmente no plano transversal das soldas produzidas com 800 rpm no lado L2 (final do cordão): (a) solda com ACI e (b) solda sem ACI.

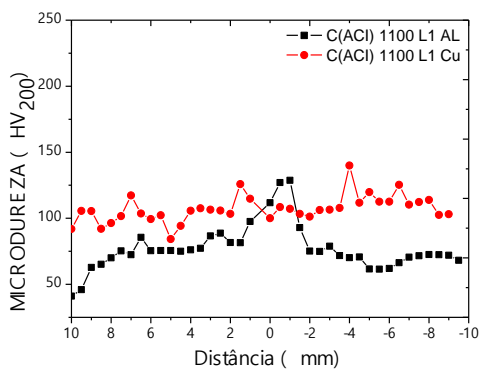


(a)

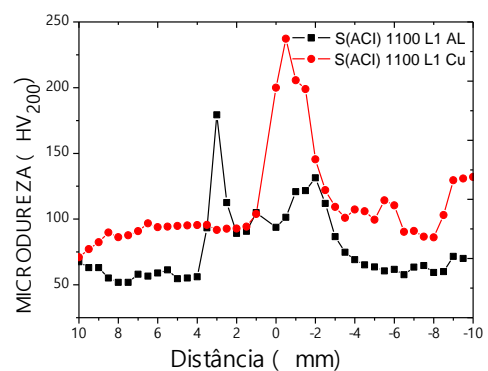


(b)

Figura 38 – Perfis de microdureza medidos horizontalmente no plano transversal das soldas produzidas com 1100 rpm no lado L1 (final do cordão): (a) solda com ACI e (b) solda sem ACI.

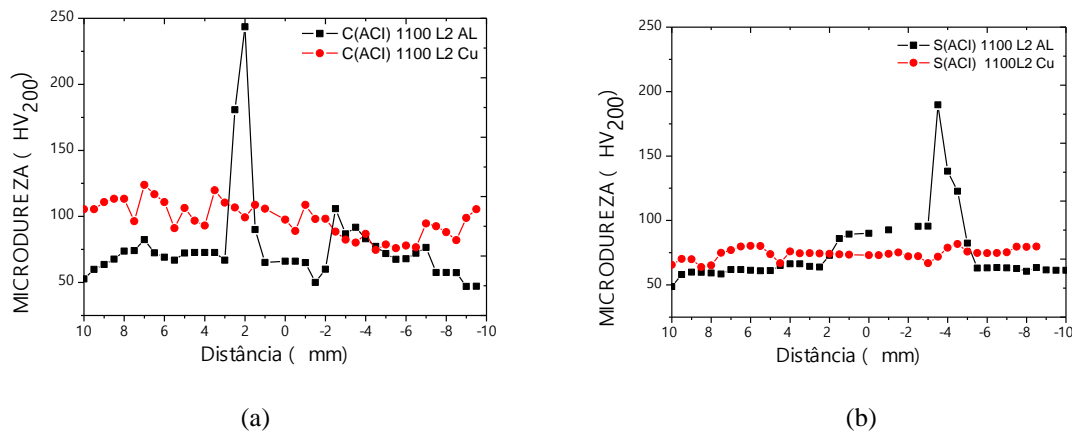


(a)



(b)

Figura 39 – Perfis de microdureza medidos horizontalmente no plano transversal das soldas produzidas com 1100 rpm no lado L2 (final do cordão): (a) solda com ACI e (b) solda sem ACI.



4.4 Resultados de resistividade elétrica

O método de Wenner (método das quatro pontas) foi aplicado nas medições de resistividade elétrica das amostras.

A Tabela 16 apresenta os resultados de resistividade do cordão de solda para juntas sobrepostas Al/Al e Cu/Cu produzidas com velocidade de rotação de 1000 rpm, que é a configuração que produziu o melhor comportamento mecânico em termos de resistência ao cisalhamento. Esses dados foram medidos para servir de referência na comparação com a resistividade das juntas soldadas Cu/Al estudadas nesse trabalho. Na Tabela 16 é apresentada a média da resistividade medida nas juntas e também a média referente aos materiais em estado puro a partir de dados disponíveis na literatura ALVARENGA, B.; MÁXIMO, A. Curso de física. Vol. 3. 3ª ed. São Paulo: Scipione, 2007.

Tabela 16 – Resistividade elétrica a elétrica das juntas soldadas Al/Al e Cu/Cu e dos metais em estado puro.

Material	Resistência elétrica soldas (Ω)	Resistência elétrica metais puros (Ω)
Solda Cu/Cu	0,0116	0,0165*
Solda Al/Al	0,0247	0,0318*
Média [#]	0,0182	0,02415

* Dados extraídos de Alvarenga, B.; Máximo, A. (2007)

[#] Média calculada a partir dos parâmetros correspondentes ao Al e Cu

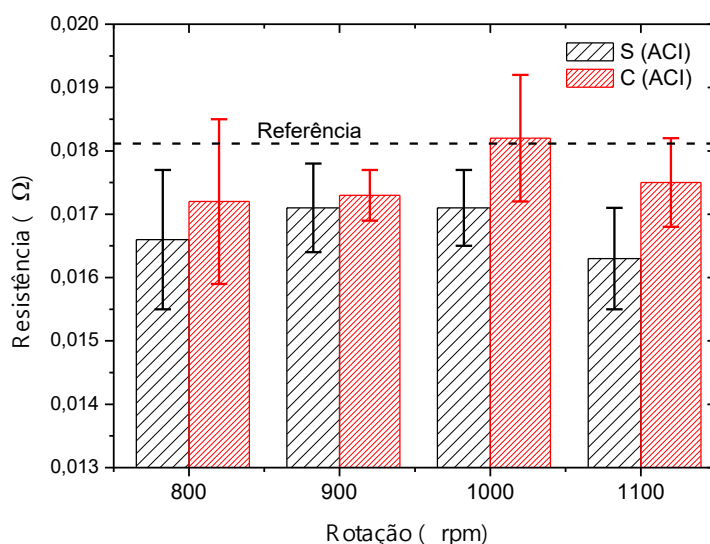
A Tabela 17 apresenta os resultados de resistividade elétrica medidos para as juntas soldadas produzidas com as configurações de soldagem estudadas nesse trabalho.

Tabela 17 – Resistividade elétrica medidas para as amostras em estudo.

Rotação (rpm)	Com ACI		Sem ACI	
	Resistência (Ω)	Desvio Padrão (Ω)	Resistência (Ω)	Desvio Padrão (Ω)
800	0,0172	0,0013	0,0166	0,0010
900	0,0173	0,0004	0,0170	0,0007
1000	0,0182	0,0009	0,0170	0,0005
1100	0,0174	0,0006	0,0162	0,0007

Para uma melhor visualização dos dados de resistividade da Tabela 17, os mesmos são reproduzidos graficamente na Figura 40.

Figura 40 – Média e desvio padrão da resistividade elétrica medidas para as amostras em estudo.



Para avaliar a significância dos fatores (solda com ACI e solda sem ACI) no desempenho em resistência elétrica, foi feita uma análise de variância (Anova) de dois fatores, onde SQA é a velocidade de rotação e SQB se refere ao uso ou não do ACI.

Tabela 18 Anova para avaliação de resistência elétrica

Fonte	SQ	GDL	MQ	F calc.	% Contribuição	F tab.	Signif?
SQA	3,500E-07	3	1,167E-07	0,08	0,15	2,46	NÃO
SQB	6,000E-08	1	6,000E-08	0,04	0,04	3,05	NÃO
Interação	1,191E-05	3	3,970E-06	2,60	0,43	2,46	SIM
Erro	2,447E-05	16	1,530E-06		0,36		
Total	3,679E-05	23	$\alpha = 0,10$		1		

De acordo com a tabela 18, nenhum dos parâmetros avaliados apresentou influência significativa sobre a resistência elétrica das juntas soldadas. Por outro lado, a interação entre os fatores se mostrou significativa. Segundo Santos et al, (2011), e Akinlabi et al., (2011),

ocorre durante o processo de soldagem por fricção uma pequena variação na resistividade elétrica em relação ao material base. Segundo Braunovic et al., 1994, em uniões entre cobre e alumínio as fases intermetálicas podem se formar de forma relativamente rápida, tanto durante a soldagem quanto em regime de trabalho, como em picos de altas temperaturas que é o caso dos conectores em regime de trabalho. Esses compostos são formados aleatoriamente na matriz da solda e segundo Galvão (2012), se não estiverem bem distribuídos na matriz pode comprometer a união soldada.

4.5 Resultado de ultrassom

Foi realizada inspeção por ultrassom nos cordões de solda para verificar a existência de defeitos internos. Os testes foram realizados como descrito no item 0, com as configurações de ensaio apresentadas na Tabela 7. Foi feita a observação dos ecogramas decorrentes da varredura da sonda ao longo do cordão de solda.

A Figura 41 mostra fotos de dois ecogramas medidos no ensaio de ultrassom. Na Figura 41 (a) está mostrado o ecograma utilizado como referência, o qual foi obtido numa medição onde o transdutor foi posto numa posição anterior ao início do cordão. Esse ecograma apresenta três picos, onde os picos da esquerda para a direita correspondem a: superfície superior, interface entre as chapas e superfície inferior, respectivamente. A Figura 41b mostra o ecograma de medição de uma amostra com (ACI-1000). Para facilitar a observação, foi configurada uma nova escala onde o primeiro pico corresponde à superfície superior e o segundo pico corresponde à junta soldada. Observou-se que todas as soldas apresentaram continuidade, pois a amplitude dos sinais da região da solda foi sempre menor que a amplitude do sinal do eco de fundo (terceiro pico da Figura 41a). Este padrão foi observado para todas as amostras.

Figura 41– Ecogramas dos ensaios de ultrassom: (a) ecograma de referência e (b) ecograma correspondente à medição da amostra com ACI-1000.



(a)



(b)

O equipamento utilizado nas medições não fornece eletronicamente os dados correspondentes aos ecogramas. Em função disso foi feito o registro fotográfico da tela do equipamento durante as medições.

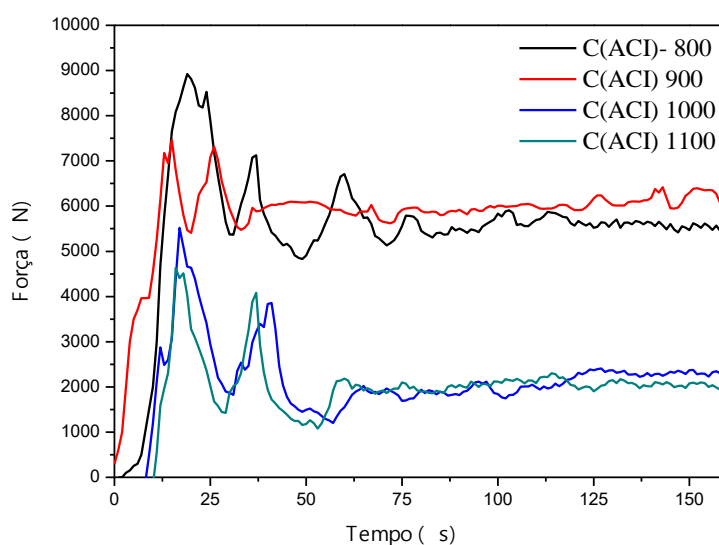
4.6 Esforços durante a soldagem

A medição da força axial durante a soldagem foi realizada com uma célula de carga Instron de 10 kN, e para a aquisição dos dados utilizou-se um condicionador de sinais modelo Spider 8 da HBM.

Como o objetivo principal da análise dos esforços foi avaliar o efeito da velocidade de rotação, as medições foram feitas somente nas amostras com ACI de (800, 900, 1000 e 1100 rpm). A inserção do movimento de recuo, por implicar em maior tempo de soldagem, implica em maior temperatura e, conseqüentemente, em menores esforços de soldagem.

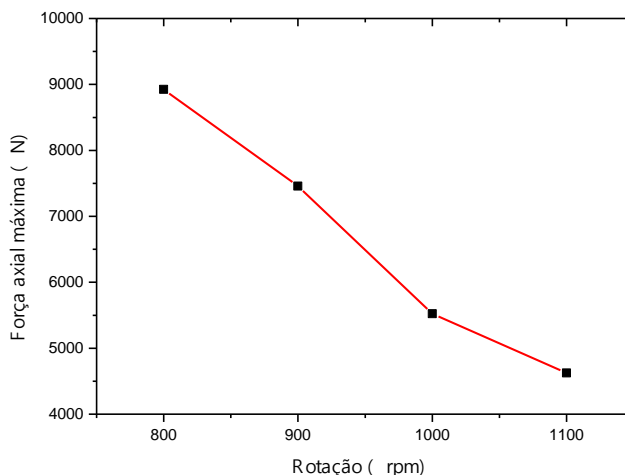
A Figura 42 apresenta os resultados medidos para as soldas produzidas com ACI, para as quatro velocidades de rotação em estudo. Percebe-se, que a partir dos 50s de soldagem (aproximadamente) a solda encontra-se em regime, pois a força apresenta pouca variação até o final da solda.

Figura 42 – Força axial medida durante a soldagem nas amostras com ACI.



Os picos maiores na Figura 42 correspondem à penetração da ferramenta. A Figura 43 apresenta os valores máximos (picos) de força axial medido durante a penetração da ferramenta. Os valores mais elevados foram observados para a rotação mais baixa da ferramenta, o que é esperado devido ao menor aporte de calor. Pela Figura 43 percebe-se que o aumento da rotação resulta em uma redução da força axial máxima de forma aproximadamente linear.

Figura 43 – Força máxima medida durante a penetração da ferramenta em função da velocidade de rotação.



Foi calculada a média da força axial do intervalo entre 50 e 150 s (tempo total de soldagem) a fim de comparação do efeito da velocidade de rotação nos esforços de soldagem quando o processo de soldagem se encontra em regime. A Figura 44 apresenta os dados calculados para a força média, onde se vê que esforços mais elevados são observados para as velocidades de rotação mais baixas.

Figura 44 – Média dos esforços para a força axial entre 50 e 150 s (processo em regime).

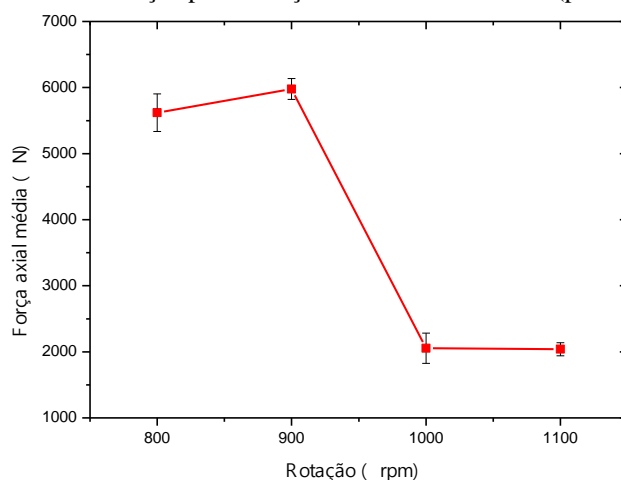


Tabela 19 Aporte térmico em função da força axial F_z

Configuração de soldagem em rpm	F_z Média (KN)	Q (quantidade de calor Kw)
C (ACI) 800	5,5	13.816
C (ACI) 900	6	16.929
C (ACI) 1000	2,2	6.897
C (ACI) 1100	2,1	7.242

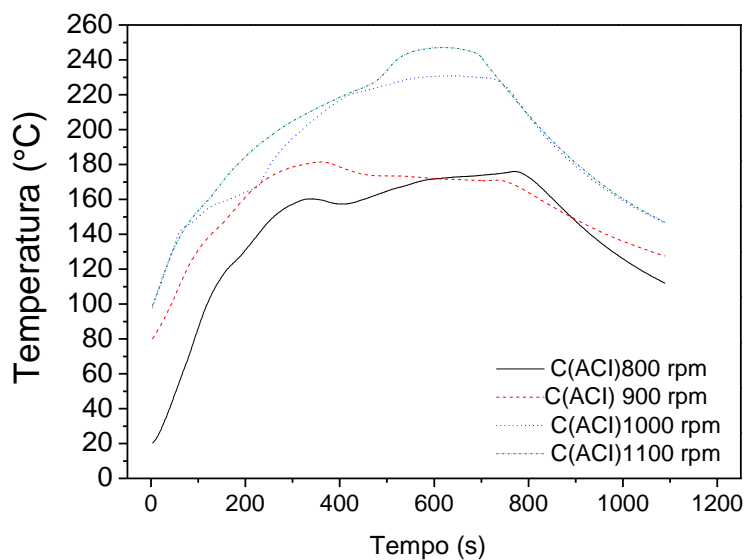
4.7 Temperaturas durante a soldagem

Durante a execução das soldas por fricção, foi medida a temperatura em diferentes pontos da junta soldada. As medições foram realizadas em 8 pontos, sendo 4 pontos de cada lado da amostra por meio de sensores resistivos do tipo PT100.

Como o objetivo principal da análise da temperatura foi avaliar o efeito da velocidade de rotação, as medições foram feitas somente nas amostras com ACI de 800, 900, 1000 e 1100 rpm). Sabe-se que inserção do movimento do ACI, por implicar em maior tempo de soldagem, implica em maior temperatura.

Cabe ressaltar que a temperatura foi medida na borda lateral das amostras, ou seja, a 6 mm do centro da ferramenta. Portanto é de se esperar que a temperatura na vizinhança da ferramenta atinja temperaturas maiores que as apresentadas na Figura 45. A Figura 45 apresenta as médias de temperaturas medidas nos oito sensores posicionados em cada amostra, para as quatro velocidades de rotação testadas.

Figura 45 – Temperaturas medidas durante a soldagem para as quatro velocidades de rotação em estudo.



A Tabela 20 apresenta os valores máximo, mínimo e médio medidos para as quatro condições de soldagem avaliadas com ACI.

Tabela 20 – Valores máximo, mínimo e médio da temperatura medida para cada condição de soldagem.

Configuração de soldagem	Temperaturas (°C)		
	Mínima	Máxima	Média
C (ACI) 800	138,6	186,7	161,9
C (ACI) 900	149,7	214,6	172,1
C (ACI) 1000	143,1	218,2	183,2
C (ACI) 1100	173,5	247,1	198,6

A análise de variância (ANOVA) para os resultados de temperatura em função da rotação são apresentados na Tabela 21, para um intervalo de confiança de 5%. Diferenças significativas foram encontradas para os efeitos de ambas as fontes (velocidade de rotação e posição do sensor de temperatura). Sendo SQA lado do recuo e SQB lado do avanço, a interação entre elas mostrou-se sem significância.

Tabela 21 – ANOVA para temperatura em função da rotação da ferramenta e da posição do termopar.

Fonte	SQ	GDL	MQ	F calc.	% Contribuição	F tab.	95%
SQA	16431,23	7	2347,318	22,46	0,277012	2,16	SIM
SQB	17805,12	3	5935,040	56,80	0,700406	2,75	SIM
Interação	1824,19	21	86,866	0,83	0,012331	1,72	NÃO
Erro	6687,43	64	104,491		0,012331		
Total	42747,96	95			1		

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste trabalho foi realizado o estudo da aplicabilidade do processo FSW na obtenção de juntas sobrepostas dissimilares Cu/Al, investigando a união da junta soldada com o cobre sobreposto a chapa do alumínio, verificando também a influência dos parâmetros velocidade de rotação, avanço e de um novo parâmetro, chamado de ACI imposto pela ferramenta sobre características mecânicas e microestruturais da junta soldada.

5.1 Relação temperatura / velocidade de rotação / esforços de soldagem

Os resultados das medições de temperatura durante a soldagem mostraram uma tendência de aumento da temperatura com velocidades de rotação, como pode ser visto na Figura 48. Este resultado está de acordo com o já apresentado por outros autores, como Tang et al. (2006), e está associado ao maior aporte térmico proporcionado pelo maior aumento da velocidade de rotação. Tang et al., 2006, demonstraram que a temperatura aumenta consideravelmente com o aumento da taxa de deformação do material, promovida pela ferramenta.

Um aporte térmico insuficiente (baixa velocidade de rotação) pode levar à formação de defeitos como os vazios internos, como mostrado na Figura 26. Por outro lado, velocidades de rotação muito altas podem levar a mudanças microestruturais indesejadas e a formação de defeitos de soldagem relacionados à fusão de um dos materiais. Nos testes preliminares que antecederam a elaboração dos parâmetros de processo estudados neste trabalho (ver apêndice I) verificou-se que velocidades de rotação elevadas estavam levando à fusão do alumínio. Isso pode ser visto na Figura 74, onde está mostrada a microestrutura no local onde houve fusão. A presença de dendritas evidencia a ocorrência de fusão localmente, como será mostrado no apêndice I.

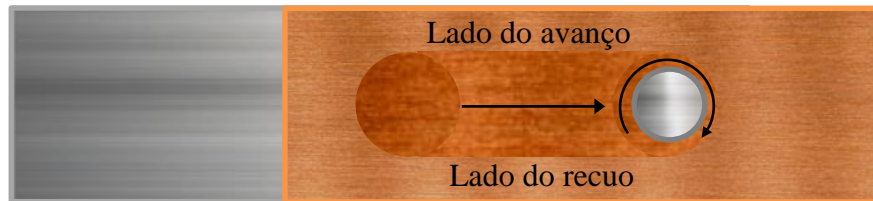
Assim se vê que existe uma faixa ótima para a velocidade de rotação, dependente dos materiais envolvidos na soldagem, cujo limite inferior associado à formação porosidades e vazios e o superior à fusão do metal de menor ponto de fusão.

Dentre estes limites, a faixa otimizada para a velocidade de rotação é dependente ainda de fatores como: geometria da ferramenta, configuração da junta dissimilar (elemento superior e inferior), comprimento, largura e espessura das chapas. O estudo indica que a janela de possibilidade de produção de soldas de qualidade aceitável associada ao patamar de temperatura é muito estreita.

Para melhor visualização do efeito da velocidade de rotação na temperatura, foi feita a verificação da temperatura máxima em cada configuração de soldagem. A temperatura foi

medida em quatro pontos em ambos os lados da solda (pontos 1, 2, 3 e 4 no lado do avanço e pontos 5, 6, 7 e 8 no lado do recuo). A Figura 46 mostra um desenho esquemático destacando os lados do avanço e do recuo, que estão associados aos sentidos de rotação e translação da ferramenta de soldagem.

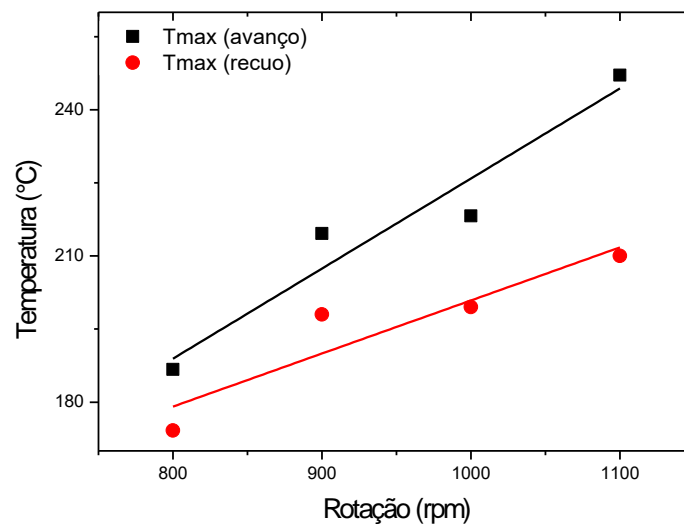
Figura 46 – Regiões de medição de temperatura: lado do avanço e lado do recuo.



Fonte autor

A Figura 47 apresenta as temperaturas máximas observadas nos lados do avanço e do recuo. Observa-se que as maiores temperaturas são sempre observadas no lado do avanço da junta soldada, o que se deve ao maior fluxo de material que ocorre nessa região, como já apresentado por outros autores como BISADI, H. et. al. (2013) e Abdollah-Zadeh et. al. (2008).

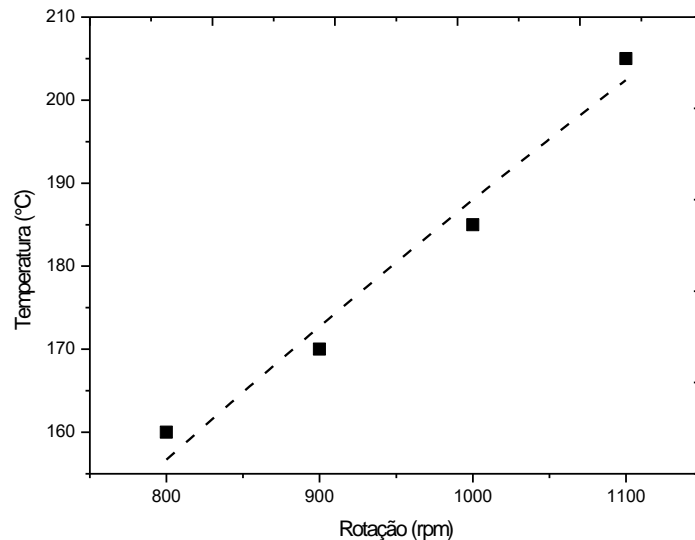
Figura 47 – Temperaturas máximas observadas em cada lado da ferramenta



Além da maior temperatura, o lado do avanço apresenta a maior variação desta, como apresentado na Tabela 20, que mostra as temperaturas máximas (lado do avanço) e mínimas (lado do recuo). No lado do avanço observou-se um ΔT de 64,1 °C enquanto no lado do recuo o ΔT medido foi de 34,9 °C, ou seja, uma diferença em torno de 50%. Segundo Arbogast (2008), essa variação de temperatura é responsável pelas diferentes estruturas formadas numa mesma junta soldada, podendo estar associada à formação de defeitos.

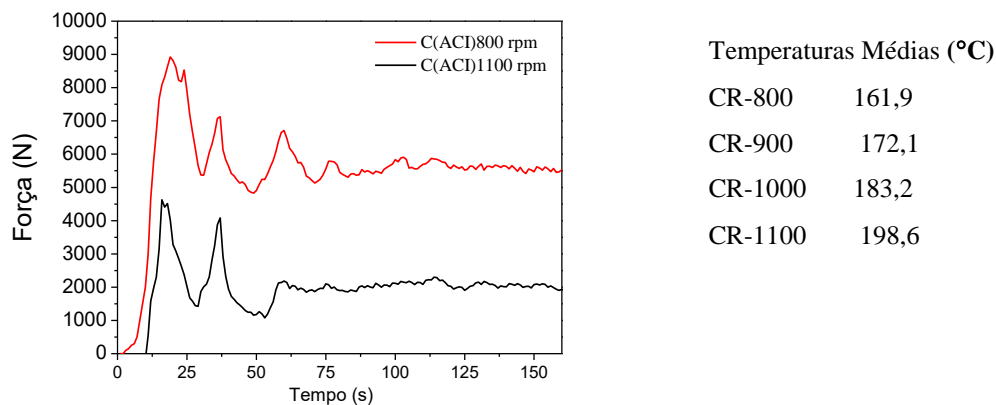
A Figura 48 apresenta a média de temperatura para cada configuração de soldagem realizada com o movimento de recuo. O resultado obtido, que corresponde ao valor médio das médias entre os lados de avanço e de recuo para cada solda.

Figura 48 – Média da temperatura máxima x velocidade de rotação.



A temperatura também exerce um papel importante nos esforços gerados durante o processo. A apresenta a força axial medida durante a soldagem das amostras com ACI 800 e ACI de 1100 rpm respectivamente. Observa-se um pico de esforço no início do processo, associado à baixa temperatura nesse estágio. É notória a diferença entre os esforços desenvolvidos na soldagem a 800 rpm e a 1100 rpm. A maior rotação se traduz em maior aporte térmico e, conseqüentemente em maior temperatura, aumentando a plasticidade das chapas e diminuindo os esforços, Gerlich, et al. (2005).

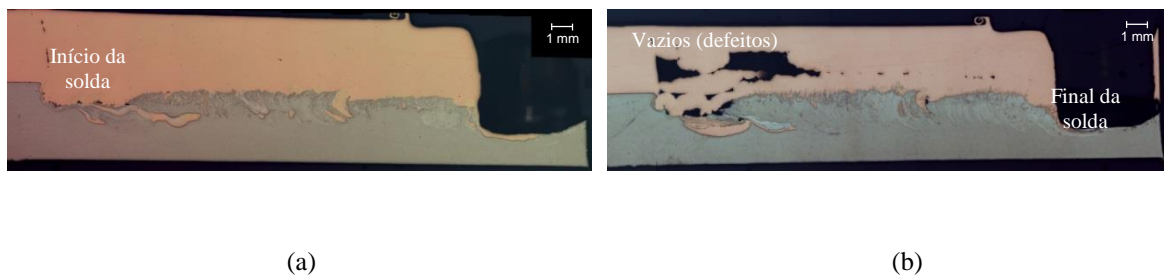
Figura 49 – Força axial durante a soldagem por fricção.



O movimento de avanço ACI, estudado neste trabalho, contribui para uma melhor realização da soldagem, pois mantém a ferramenta por mais tempo no estágio inicial do

processo, permitindo a rápida elevação da temperatura antes da translação desta até o final da solda. A maior temperatura no início do cordão favorece a mistura e fluxo de material nessa região gerando uma maior ligação entre as chapas e menor quantidade de defeitos associados ao aporte térmico. Isto pode ser claramente observado na Figura 50 que mostra uma solda produzida com ACI Figura 50(a) e outra sem ACI Figura 50(b). É notório que na solda produzida com ACI houve melhor mistura entre as chapas em relação a solda sem recuo.

Figura 50 – Macrografia da seção longitudinal de soldas FSW: (a) com ACI e (b) sem ACI



Fonte autor

Destaca-se a importância na escolha do dispositivo de sujeição das chapas no processo FSW, de modo que possam rigidez e resistência adequadas.

5.2 Defeitos de soldagem

Os processos de soldagem por fricção são susceptíveis à formação de diversos tipos de defeitos, sendo o aporte térmico de grande influência. Neste trabalho, principalmente na fase dos testes realizados, foram observadas diversas falhas que possuem relação direta ou indireta com o aporte térmico.

A presença de vazios ao longo do cordão de solda usualmente está associada a um aporte térmico insuficiente que, por sua vez, decorre de baixas velocidades de rotação. Este tipo de defeito foi bastante notório nas soldas realizadas a 800 rpm ilustrado na Figura 51.

Figura 51 – Macrografia da seção longitudinal de uma solda produzida com baixa rotação e sem o movimento ACI a 800rpm, mostrando a presença de vazios.

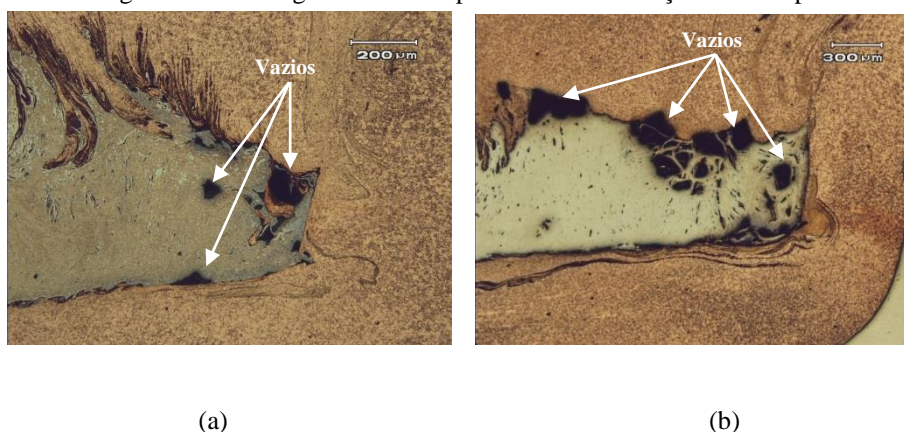


Fonte autor

Essas falhas tendem a ocorrer devido a dificuldade de mistura dos materiais pela ferramenta, em razão da pouca plasticidade decorrente da baixa temperatura, como já abordado por alguns autores como Zhou C, Yang (2006). Em alguns casos este vazio estende-se ao longo do cordão sendo, nesses casos, denominado de túnel (*tunneling*) (Vilaça, 2005).

A Figura 52 apresenta micrografias da seção longitudinal correspondente ao início do cordão de uma solda produzida com ACI (Figura 52(a) e sem ACI Figura 52(b), ambas produzidas com velocidade de rotação de 800 rpm. Nas duas soldas é notória a presença de vazios, associados ao pouco aporte térmico.

Figura 52 – Micrografia de solda produzida com rotação de 800 rpm

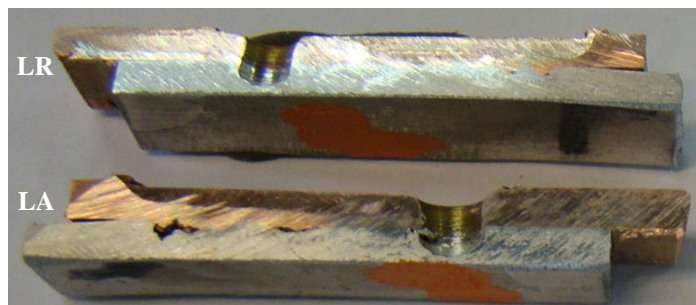


Fonte autor

É visível a melhora na mistura promovida pelo uso do movimento do ACI, quando compara-se a Figura 52(a) com a Figura 52(b). Pode-se afirmar que o ACI, melhora o fluxo de material, como já era de se esperar em função do maior tempo da ferramenta no início do cordão (L2). A presença da ferramenta por mais tempo nessa região aumenta a temperatura nessa zona e eleva a plasticidade do material, facilitando a mistura. De qualquer modo, a velocidade de rotação, por ser baixa (800 rpm), não contribui para o adequado aporte térmico e o resultado é uma solda ainda com defeitos, mas consideravelmente em menor quantidade que nas soldas realizadas com os mesmos 800 rpm mas sem o movimento do ACI.

A Figura 53 mostra macrografias no sentido longitudinal de uma solda realizada com velocidade de rotação de 800 rpm e com movimento ACI onde estão mostrados os lados do avanço (LA) e do recuo (LR). Observa-se uma melhor mistura entre Cu e Al no lado do recuo em relação ao lado do avanço onde se vê alguns vazios. Isso se deve à melhor mistura que se tem no LR decorrente do maior tempo de mistura, como já discutido por outros autores, como Bisadi, (2012).

Figura 53 – Macrografia no sentido longitudinal mostrando os lados do avanço (LA) e do recuo (LR) em uma solda realizada a 800 rpm e 10 mm/min de avanço.



Fonte autor

Este tipo de descontinuidade, (falta de preenchimento, vazios) geralmente ocorre no lado do avanço mostrado na Figura 53 é bastante comum e se fez presente em muitas amostras testadas neste trabalho, não comprometendo, aparentemente, o desempenho mecânico monotônico da junta.

Outro tipo de falha relativamente comum ao processo FSW está mostrado na Figura 54. Este tipo de falha é conhecido como falta de preenchimento ou defeito de cavidade e é caracterizado pela “ruptura” do material no lado do avanço (ver Figura 46). Este tipo de defeito está associado à combinação de baixas velocidades de rotação com elevadas velocidades de avanço, o que ficou evidenciado nos testes preliminares que serviram de base para a determinação dos parâmetros estudados nesse trabalho (800 rpm / sem ACI / 30 mm/min). Observações semelhantes foram apresentadas por C. W., Tan (2013).

Figura 54 – Defeito de cavidade associada a baixas rotações com avanço excessivo.



Fonte autor

O aporte excessivo de calor também pode resultar em defeitos de soldagem. Como é mostrado no apêndice I deste estudo onde apresenta amostras soldadas com velocidade de avanço de 10 mm/min realizadas nos testes preliminares nas rotações de 1300, 2000 e 2500 rpm. Nestes casos, a região soldada é comprometida pelo excessivo aumento de temperatura, o que faz com que esta atinja o ponto de fusão do alumínio (menor que o do cobre) em alguns pontos. O alumínio funde localmente e vaza para fora da interface da junta.

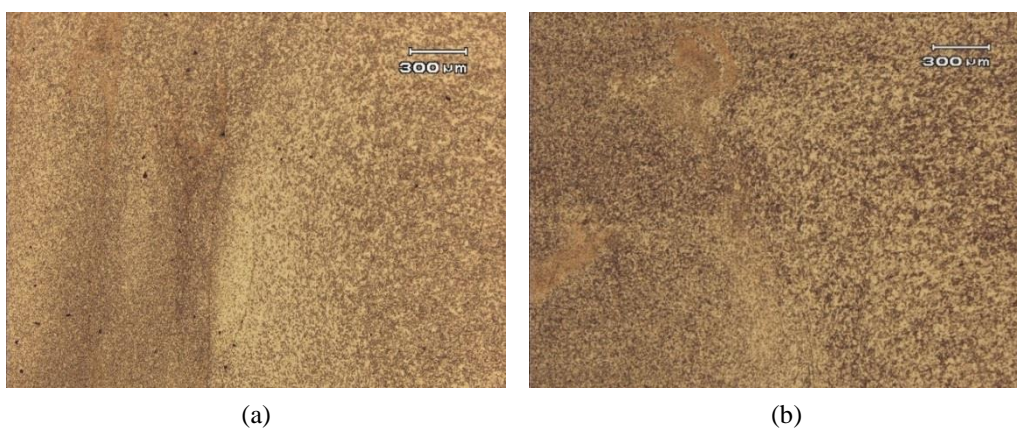
Isso acabou limitando a faixa de estudo da velocidade de rotação neste trabalho, cujo máximo foi definido em 1100 rpm que foi a máxima rotação em que não se verificou esse fenômeno.

5.3 Caracterização metalúrgica das juntas soldadas

Já é bem conhecido o efeito do aporte térmico e do trabalho mecânico imposto pela ferramenta de soldagem nas mudanças microestruturais dos materiais na soldagem FSW. A Figura 55 mostra micrografias da seção transversal da parte correspondente ao cobre na transição entre a zona de mistura (ZM) e a zona termo-mecanicamente afetada (ZTMA). Na Figura 55(a) está mostrada uma solda produzida sem ACI com velocidade de rotação de 800 rpm e na Figura 55(b) tem-se uma solda realizada sem ACI a 1000 rpm. É notória a diferença da microestrutura entre as soldas produzidas a 800 e a 1000 rpm. As soldas produzidas com 800 rpm apresentaram uma microestrutura mais refinada em relação as soldas realizadas com 1000 rpm. Este resultado está condizente com o esperado uma vez que nesta região o material sofre recristalização dinâmica e esta é dependente do nível de trabalho mecânico imposto pela ferramenta de soldagem. Como a temperatura na solda produzida com 800 rpm é inferior àquela da solda a 1000 rpm, o encruamento no primeiro caso é mais intenso.

Outro fator que contribui ao crescimento dos grãos na solda a 1000 rpm é a temperatura mais elevada neste caso, como já apresentado por Jata e Semiantin, (2000).

Figura 55 – Micrografia da região soldada: (a) solda obtida a 800 rpm; (b) solda obtida a 1000 rpm



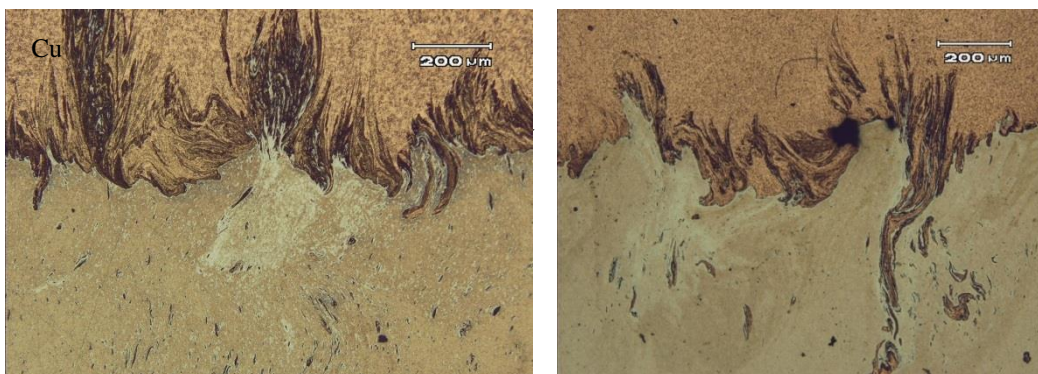
Fonte autor

Observando a Figura 55(b) percebe-se uma transição suave entre a ZM e a ZTMA na solda realizada com 1000 rpm. Por outro lado, na solda realizada a 800 rpm (Figura 55(a)) ocorre uma mudança abrupta no tamanho de grão, criando uma espécie de interface entre essas duas zonas. Acredita-se que isso esteja associado com o aumento da velocidade de rotação produzindo um maior aporte térmico da solda realizada a 1000 rpm o que proporciona uma mistura mais homogênea. Essa diferença na microestrutura tem reflexo no

perfil de microdureza. Os perfis de microdureza medidos na seção transversal das soldas mostram uma maior diferença de dureza entre a ZTA e a SZ nas amostras soldas com baixa rotação (800 rpm) em relação as soldas produzidas com alta rotação (1100 rpm), como pode ser visto nas Figura 36(a) e Figura 38(b).

A Figura 56 apresenta duas micrografias da seção transversal mostrando a interface entre as chapas em uma junta de boa qualidade (praticamente livre de defeitos e de boa resistência mecânica) soldada com rotação de 1000 rpm e com ACI no início do processo. Pode-se observar a ocorrência de intensa mistura entre os materiais das chapas superior (Cu) e inferior (Al), formando uma estrutura “entrelaçada” entre os dois materiais, de maneira semelhante ao apresentado por outros autores como Peng Liu et. al. (2008) e Fratine et. al. (2006). Segundo Fratine (2006). Este autor a temperatura máxima atingida nessa região de intensa mistura foi inferior à temperatura solidus local da liga Cu-Al e há evidências de recristalização dinâmica, devido à alta temperatura e intenso trabalho mecânico.

Figura 56 – Micrografia da interface de solda mostrando intensa mistura entre Cu e Al com ACI1000rpm



Fonte autor

Com a aplicação do movimento do ACI em uma solda com 1000 rpm. Observa-se que o cordão é livre de defeitos em toda a sua extensão, o que se deve à combinação de velocidade de rotação e velocidade de avanço associadas a aplicação do movimento do ACI no início do processo o que se traduz numa ótima combinação de parâmetros promovendo um aporte térmico satisfatório para a realização do processo.

Figura 57 – Corte longitudinal de solda produzida a 1000 rpm com ACI

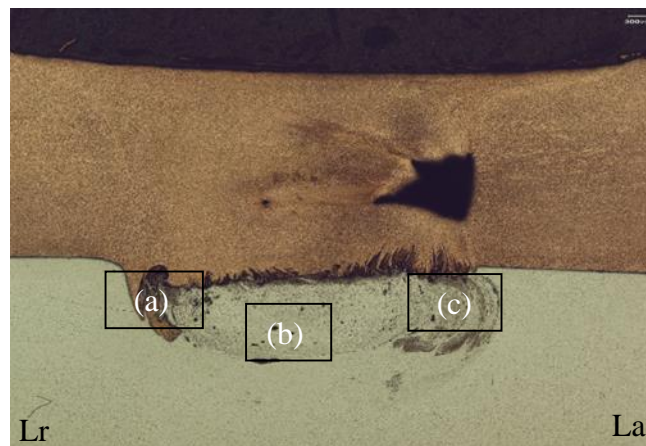


Fonte autor

É visível na Figura 57 uma estrutura em bandas. Alguns autores atrelam este comportamento ao fenômeno de envelhecimento da liga (Yang, J. et. al., 2014), contudo isto foge do escopo desse trabalho.

A Figura 58 – mostra a regiões da junta sobreposta Cu/Al numa secção transversal onde mostra-se o lado do avanço (La), e o lado do recuo (Lr), juntamente com as micrografias a, b, e c onde (a), representa a zona termomecânica afetada pela temperatura, (ZTMA), lado do recuo, (b) apresenta a zona de mistura (ZM) e (c) apresenta a zona termomecânica afetada pelo temperatura, (ZTMA) do lado avanço.

Figura 58- Solda 800 rpm sem ACI

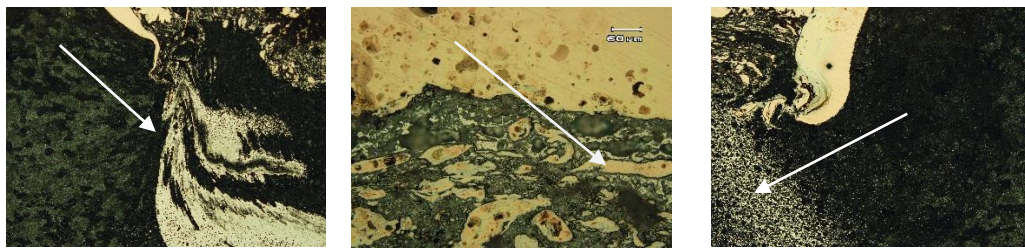


Fonte autor

Na Figura 58 (a) a seta mostra os grãos de alumínio deformados entrelaçando-se com os grãos de cobre formando uma mistura homogênea mostrando a zona de interface da ZTMA e ZM, a figura (b) a seta mostra a ZM revelando grão deformados e alongados em

forma aquixial juntamente com os grãos de cobre formando uma estrutura que passou pelo processo de recristalização, a figura (c) a seta mostra uma estrutura formada por grãos mais refinados em função desse lado a temperatura ser um pouco mais baixa no lado do avanço e o trabalho mecânico foi mais intenso.

Figura 59 – Micrografia das regiões (a), (b), e (c) da Solda 800 rpm sem ACI.



(a)

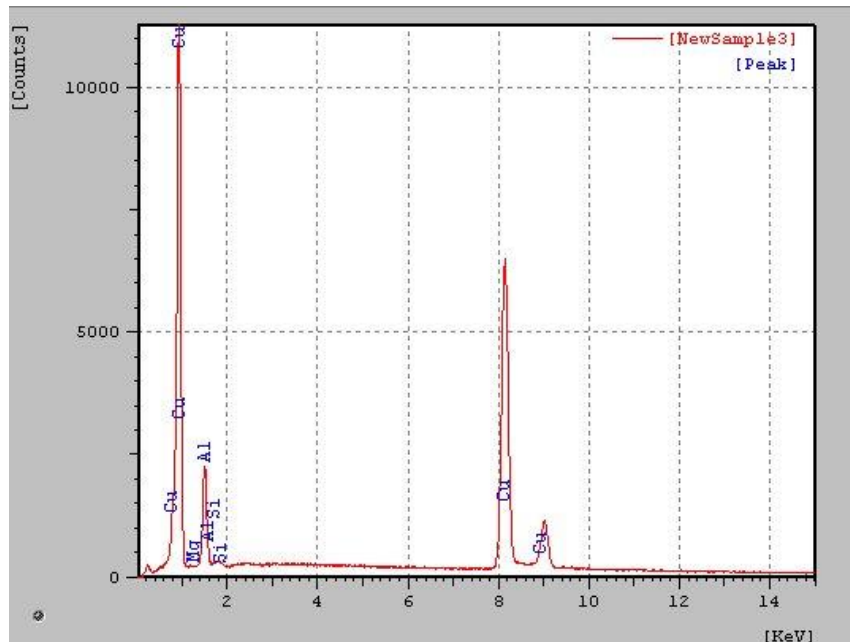
(b)

(c)

Fonte autor

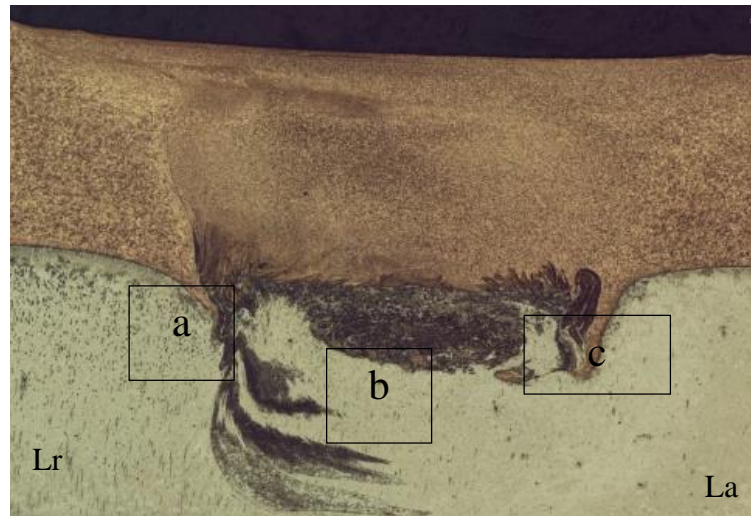
Para análise dos constituintes formadores da matriz da região soldada a 800 rpm sem ACI foram analisados através do ensaio de EDS mostrado na Figura 60, e não se verificou a formação de (IMC), compostos intermetálicos revelando uma mistura de Cu/Al.

Figura 60 – Análise de EDS da região (b) solda 800 rpm sem ACI



Fonte autor

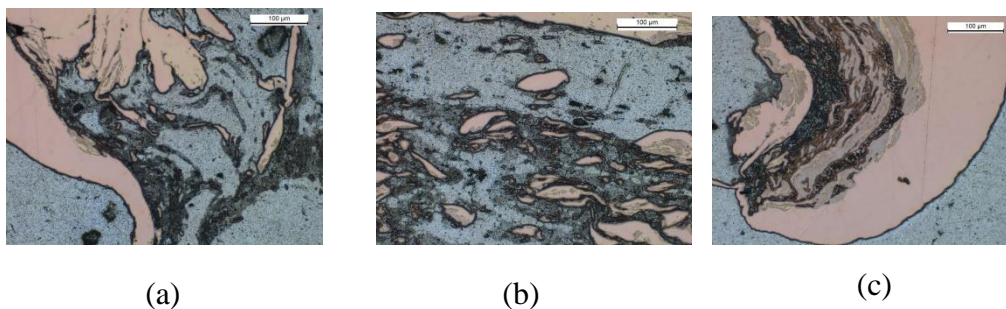
Figura 61 – Micrografia das regiões (a), (b), e (c) da Solda 1000 rpm com ACI



Fonte autor

A Figura 61 mostra as regiões em destaque das micrografias da regiões da Figura 62 onde (a) é o lado do recuo, e verifica-se que a parte escura é uma mistura rica em cobre e alumínio, a parte cinza é formada por grãos de alumínio deformados pelo trabalho mecânico na zona ZTMA e a parte mais clara é o cobre entrelaçando-se com o alumínio, (b) a zona de mistura onde o cobre e o alumínio passaram pelo processo de recristalização devido a temperatura mais elevada (c) o lado do avanço onde o material flui para esse lado devido as altas temperaturas podendo causar pequenos defeitos e comprometer a resistência mecânica da junta soldada Dubourg L, (2010).

Figura 62 – Micrografia das regiões (a), (b), e (c) da Solda 1000 rpm com ACI

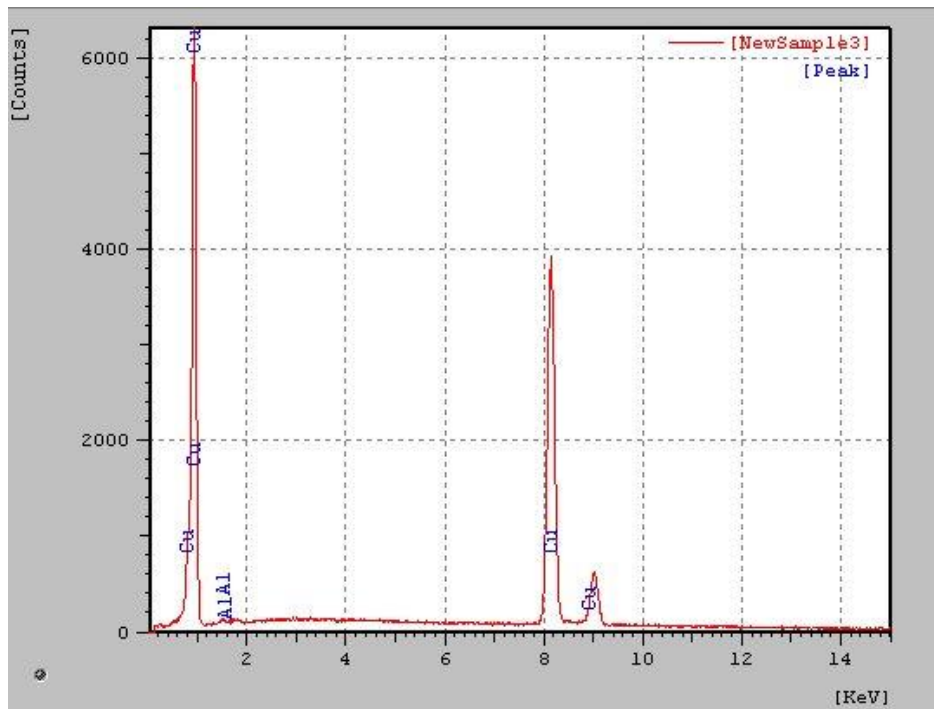


Fonte autor

Para análise dos constituintes formadores da matriz da região soldada a 1000 rpm com ACI foram analisados através do ensaio de EDS mostrado na Figura 63 mostra a região da solda realizada a 1000 rpm com ACI mostrando uma solda sem defeitos onde foi realizado

o mapeamento dos constituintes formadores da região através do ensaio de EDS na zona de mistura (b) e verificou-se uma liga de Cu/Al sem apresentar a formação de IMC.

Figura 63 – Análise de EDS da região (b) Solda 1000 rpm com ACI



Fonte autor

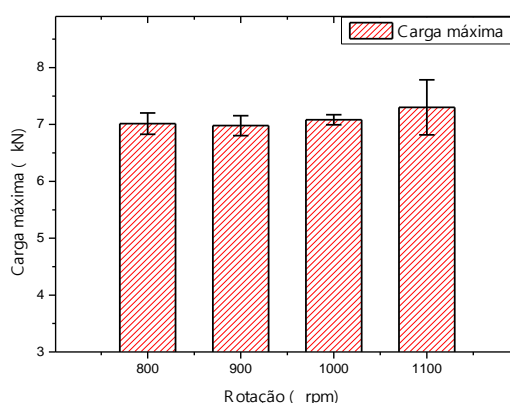
5.4 Desempenho mecânico

5.4.1 Solicitação monotônica (ensaio de cisalhamento)

Os resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento mostram um comportamento satisfatório para todas as combinações de parâmetros testadas. Entende-se como comportamento mecânico satisfatório a combinação de alta resistência com pouca dispersão. De maneira geral pode-se dizer que a resistência mecânica ao cisalhamento é insensível aos parâmetros de processo (velocidade de rotação e movimento do ACI) dentro da faixa estudada nesse trabalho. Isso ficou evidenciado pela análise de variância realizada sobre os resultados de cisalhamento (Tabela 12) que não mostrou significância para as variáveis de processo individualmente. O resultado foi um comportamento muito parecido entre as combinações de soldagem em termos de resistência ao cisalhamento. A resistência mecânica das amostras é da ordem de 7 kN sendo a combinação de soldagem com ACI de 1000 rpm a que apresentou a menor dispersão (Figura 64).

Para melhor avaliar individualmente cada parâmetro de processo sobre a resistência ao cisalhamento foi feita uma análise da interação entre cada variável e a resistência por meio de gráficos de dois fatores. A Figura 64 apresenta um gráfico da média das cargas máximas no qual os resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento são avaliados apenas em função da rotação.

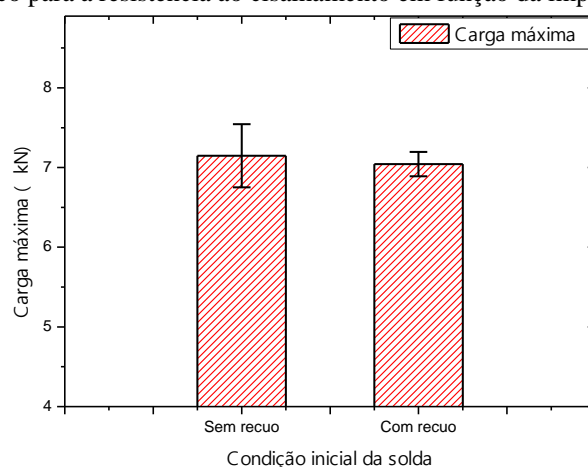
Figura 64 – Gráfico para a resistência ao cisalhamento em função da velocidade de rotação.



Nesta análise, o uso ou não do movimento do ACI é desconsiderado, permitindo a avaliação, de forma isolada, do efeito da velocidade de rotação. Apesar da influência não significativa da velocidade de rotação sobre a resistência ao cisalhamento, identificada através da análise de variância (Tabela 12), a Figura 64 mostra que a dispersão dos resultados nas soldas realizadas a 1100 rpm é consideravelmente maior. A menor dispersão foi observada para as soldas realizadas a 1000 rpm.

Uma análise de dois fatores também foi realizada para avaliar individualmente o efeito da aplicação do ACI na resistência ao cisalhamento das soldas. A Figura 65 mostra um gráfico de dois fatores para a resistência ao cisalhamento em função da implementação do movimento de ACI. Neste gráfico é desconsiderado o efeito da velocidade de rotação, de modo que este reflete a influência individual do uso de ACI sobre a resistência ao cisalhamento. Apesar de não haver influência significativa do uso de ACI sobre a resistência ao cisalhamento, identificada através da análise de variância (Tabela 12), a Figura 65 mostra que o movimento do ACI diminuiu consideravelmente a dispersão nos resultados.

Figura 65 – Gráfico para a resistência ao cisalhamento em função da implementação do ACI.



Para buscar uma melhor compreensão da influência dos parâmetros de processo no comportamento mecânico das juntas, foram feitas análises de falhas em algumas amostras. Para todas as configurações de soldagem estudadas nesse trabalho a fratura ocorreu na chapa de Al nas proximidades do início do cordão, como mostra a Figura 66.

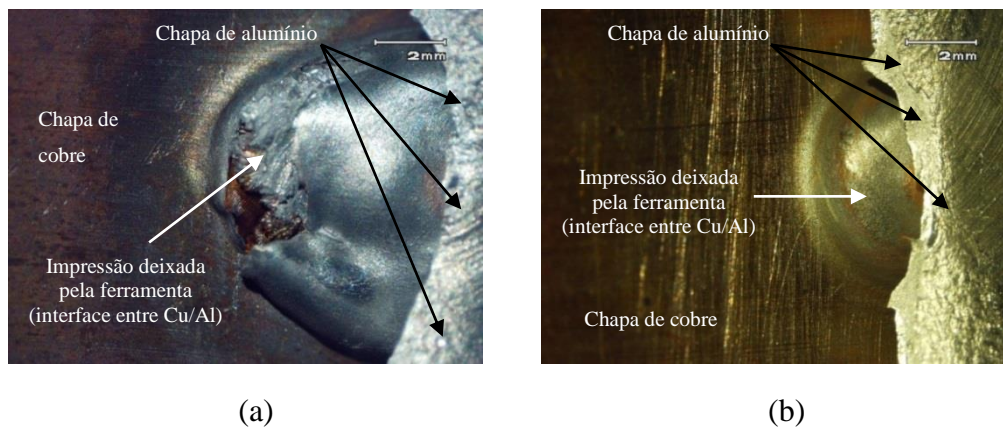
Figura 66 – Junta soldada fraturada após ensaio de cisalhamento.



Fonte autor

Por meio das análises de fratura, ficou evidente o benefício do ACI na mistura entre as chapas superior e inferior no estágio inicial do processo. A Figura 67 mostra a região de início do cordão de solda em corpos de prova após os ensaios de cisalhamento, vistos por baixo da chapa de cobre. Na Figura 67 (a) está mostrada uma solda realizada com ACI a 1000 rpm e na Figura 67 (b) tem-se uma solda realizada sem ACI a 1000 rpm.

Figura 67 – Região de início de uma solda: (a) com ACI e (b) sem ACI.



Fonte autor

Pela Figura 67 (a) observa-se que na solda com ACI houve uma melhor adesão entre os materiais das chapas superior e inferior, o que está evidenciado pelo aspecto irregular da interface entre as chapas, indicando que houve maior resistência ao “arrancamento”. Já na solda produzida sem ACI Figura 67 (b), a interface da solda tem um aspecto liso, sugerindo que uma fraca adesão entre os materiais.

5.4.2 Solicitação cíclica (ensaio de fadiga)

Ao passo que os ensaio de cisalhamento não mostraram um efeito significativo do recuo na resistência monotônica das juntas soldadas, nos ensaios de fadiga, seu benefício foi marcante. As soldas produzidas com ACI apresentaram uma curva S-N superior em relação as soldas sem ACI, evidenciando um ganho em termos da resistência e da vida em fadiga, o que pode ser visto na Figura 31.

Em todas as amostras a falha por fadiga se deu pela propagação de uma trinca transversal na chapa de alumínio nas proximidades do início do cordão da solda, o que já era esperado em função da concentração de tensões nesse ponto. A Figura 68 mostra a falha de uma junta soldada durante o ensaio de fadiga, onde se vê a fratura na chapa de alumínio.

Figura 68 – Fratura em ensaio de fadiga de uma junta soldada (C(ACI)1000 rpm)

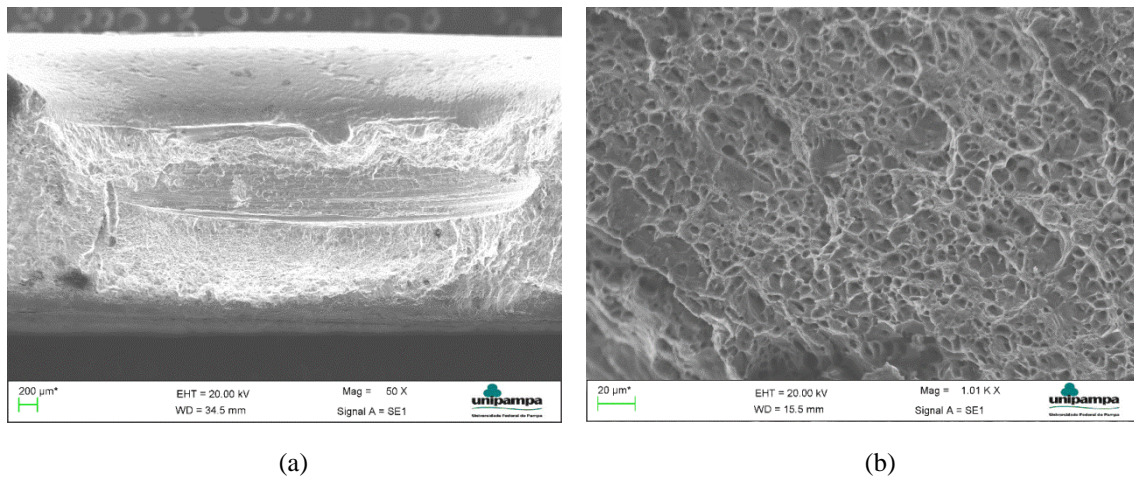


Fonte autor

A concentração das tensões na região do início do cordão somada à menor resistência do alumínio em relação ao cobre faz com que a falha sempre ocorra na chapa de Al junto ao

início do cordão, como também relatado por C.W. Tan et al (2013). Após a nucleação, a trinca se propaga transversalmente até as bordas laterais da chapa de Al. Isso significa que a trinca inicia e se propaga em zonas da solda onde se acredita ter maior tenacidade em relação ao metal base (ZM e ZTMA). Ademais, o melhor desempenho apresentado pelas soldas com ACI reforça essa suposição, uma vez que a maior temperatura nessa região contribui para uma maior extensão dessas zonas de solda em relação às soldas sem ACI. A Figura 69 mostra a superfície de fratura após o ensaio de fadiga.

Figura 69 – Mostra da região fraturada no ensaio de fadiga.



Fonte autor

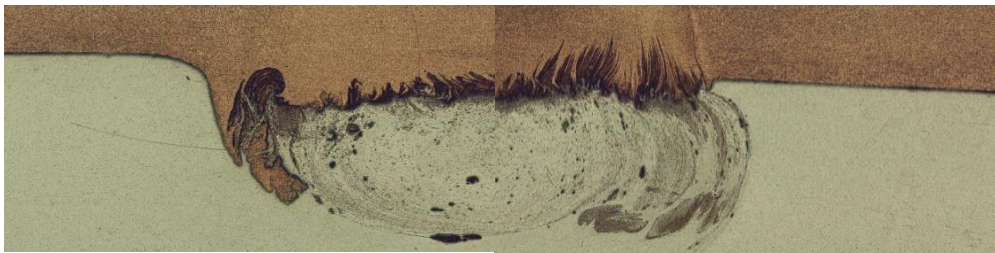
A Figura 69 (a) mostra um aspecto bastante liso, típico de falhas por fadiga, mas pela Figura 69 (b) pode-se ver que os micromecanismos de fratura são dúcteis, o que está evidenciado pela presença de microcavidades (dimples). Estes resultados estão condizentes outros apresentados na literatura, como C.W. Tan et al (2013).

5.5 Efeitos da resistividade elétrica na junta soldada

Em juntas bimetálicas, a homogeneidade da mistura é um fator que influencia fortemente a condutividade elétrica, com a resistividade de misturas mais homogêneas se aproximando da média das resistividades observadas para cada material. Numa solda em que a mistura entre os materiais é heterogênea, a resistividade da junta é menor do que aquela em uma junta homogênea, como relatado por Santos et al. (2011).

A Figura 70 apresenta um corte transversal de uma junta produzida com ACI a uma rotação de 1000 rpm. Pode-se ver que essa configuração de soldagem resultou numa mistura bem consistente, praticamente sem defeitos. No gráfico da Figura 40, pode-se ver que essa junta foi a que apresentou a maior resistividade e com valor próximo à média da resistividade medida nas soldas de referência (soldas Al/Al e Cu/Cu).

Figura 70 – Seção transversal de uma solda mostrando uma mistura homogênea entre os materiais (C (ACI)1000 rpm).



Fonte autor

As soldas produzidas sem ACI nas rotações de 800 e 1100 rpm apresentaram a menor resistência elétrica em média dentre as amostras estudadas. Isso pode ser mostrado na análise de variância a 95% de confiabilidade mostrado na Tabela 18 e na Figura 40. Observa-se, portanto, que baixos valores de resistência podem indicar uma mistura não homogênea, servindo como um parâmetro para inspeção da qualidade geral da junta soldada, como também apresentado por Santos et al. (2011). As Figura 71 (a) e (b) mostram as seções transversais de juntas soldadas produzidas com ACI a 800 e a 1000 rpm, respectivamente. É notória a presença de vazios na solda produzida com 800 rpm, caracterizando uma interface bem mais heterogênea que aquela da solda produzida a 1000 rpm.

Figura 71 – Seção transversal de soldas produzidas com ACI a: (a) 800 rpm e (b) 1000 rpm.



Fonte autor

5.6 Considerações finais

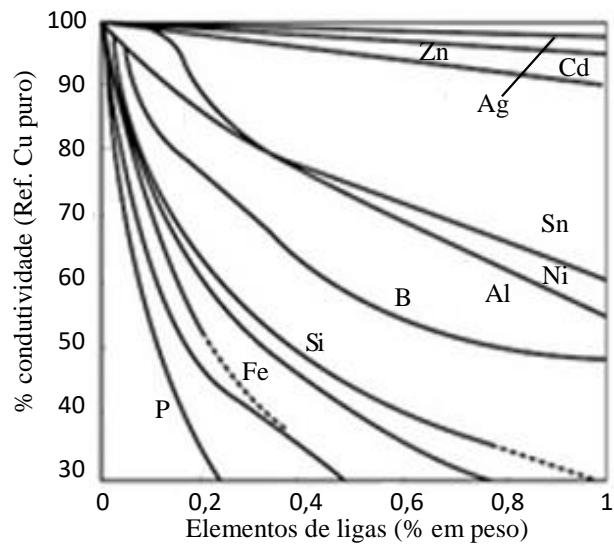
A partir dos resultados percebe-se que a janelada otimizada em termos da velocidade de rotação situa-se entre 900 e 1000 rpm. O avanço contrário inicial (ACI) não mostrou efeito significativo sobre a resistência monotônica da junta, mas em fadiga foi fator determinante. Acredita-se que isto esteja associado à melhor mistura no início do cordão de solda, promovida pelo ACI. Esta melhor mistura nesta região pode ser observada nas Figura 50 e Figura 67. A presença de defeitos na região de início do cordão, o que tende a ocorrer quando não se usa o ACI favorece a nucleação de trincas de fadiga que comprometem o comportamento mecânico da junta sob sollicitação cíclica. No caso de sollicitação monotônica estes defeitos não são relevantes.

A combinação ótima de parâmetros foi de 1000 rpm com ACI, dentro da faixa de estudo deste trabalho. Esta combinação resultou em soldas que se destacaram frente as demais, tendo desvio padrão menor para todas as propriedades estudadas e um aumento de aproximadamente 30% na vida em fadiga

Comparando os resultados obtidos através da análise da resistência elétrica das juntas com os ensaios mecânicos, a condição que permitiu maior resistência elétrica também foi a que mostrou o melhor desempenho nos ensaios de tração, que foi a solda produzida com ACI a 1000 rpm. Todos esses resultados indicam a obtenção de soldas de boa qualidade com o movimento ACI a 1000 rpm, e evidenciam os benefícios da aplicação do movimento ACI.

Outro ponto que fica evidente é a existência de uma relação entre o desempenho elétrico e o desempenho mecânico de uma junta FSW dissimilar. As juntas de interface mais homogênea e de melhor desempenho mecânico são as que apresentam maior resistividade elétrica, diminuindo sensivelmente a condutividade da junta, já demonstrados Segundo Santos et al, 2011, e Akinlabi et al., 2011 e Braunovic et al., 1994. Esse comportamento já era esperado, pois quanto maior o teor de Al no Cu, menor será a condutividade deste como mostra a Figura 72. Pode-se ver pela Figura 72 que a presença do Al compromete a condutividade do cobre. Observando os resultados mostrado na Tabela 16, percebe-se que este efeito não compromete a utilização da junta para transmissão de energia elétrica, como no caso de aplicações em condutores elétricos, por exemplo.

Figura 72 – Efeito do percentual de elementos de liga na condutividade do cobre



Adaptado de: Mendenhall, J. H., 1977

Por fim, ficou evidente que existe um compromisso entre desempenho elétrico e mecânico para as juntas soldadas, não sendo possível um ganho efetivo de ambos dentro da faixa de parâmetros em estudo. Outro fator que é importante considerar é o ACI aumenta ligeiramente o tempo de soldagem, sem dar um ganho efetivo de resistência monotônica. Assim, só faz sentido usá-lo em situações de solicitação de fadiga.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizado um estudo de juntas sobrepostas dissimilares Cu/Al produzidas com uma modificação do processo FSW. Foram investigados os efeitos da aplicação de um movimento diferenciado da ferramenta no estágio inicial do processo, denominado de avanço contrário inicial (ACI), no comportamento mecânico, metalúrgico e elétrico das juntas soldadas. Além do ACI outra variável investigada foi a velocidade de rotação. Os diferentes parâmetros de processo estudados neste trabalho mostraram ser possível a realização de soldas de boa qualidade para as ligas em estudo, revelando uma janela otimizada para a rotação entre 900 e 1000 rpm.

A partir dos resultados obtidos nesse trabalho, pode-se concluir:

- A melhor combinação de parâmetros neste estudo foi de rotação de 1000 rpm com ACI, o que resultou em soldas que se destacaram frente as demais, tendo desvio padrão menor para todas as propriedades estudadas e um aumento de aproximadamente 30% na vida em fadiga;
- É possível obter soldas dissimilares Cu/Al de boa qualidade pelo processo FSW com a chapa de cobre sobreposta a chapa do alumínio;
- A velocidade de rotação apresenta uma janela muito estreita para a obtenção de soldas de qualidade, levando-se em consideração as demais configurações estudadas (geometria da ferramenta, dimensões das chapas, avanço, ângulo de inclinação, etc.);
- Uma mistura homogênea entre os materiais das chapas superior e inferior é possível dentre as configurações estudadas;
- Os ensaios de resistência elétrica mostram que soldas com interface heterogênea (mistura pobre e presença de defeitos) possuem menor resistividade elétrica;
- A implementação do ACI no início do processo diminui os defeitos de soldagem;
- O ACI não tem efeito significativo sobre a resistência monotônica da junta, mas em fadiga é fator determinante;
- O ACI representa acréscimo no tempo total de soldagem, portanto seu uso é justificado apenas em solicitações cíclicas (fadiga);
- A resistência elétrica das soldas de parâmetros 1000 rpm com ACI foram as soldas que mais se aproximaram da resistência média (tomada como padrão) entre as soldas Al/Al e Cu/Cu, sugerindo uma mistura mais otimizada entre Cu e Al para esta condição;

- Existe um compromisso entre desempenho elétrico e mecânico para as juntas soldadas, não sendo possível um ganho efetivo de ambos dentro da faixa de parâmetros em estudo.

7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Desenvolver solda em novas dimensões com os mesmos materiais
- Desenvolver geometrias de ferramentas diferentes
- Testar novos parâmetros de processo
- Estudar o comportamento da resistividade elétrica em função da área soldada.
- Testar novas posições de soldas.
- Fazer análise de corrosão acelerada e comparar com juntas parafusadas.
- Desenvolver conectores elétrico bi metálicos da liga Al/Cu e verificar sua capacidade de aplicação na distribuição e ligações elétricas.
- Realizar estudos em soldas produzidas com aplicação do uso do ACI em diversas configurações de soldagem.

8 Referencias bibliograficas

- ABDOLLAH-ZADEH, A., Saeid, T., Sazgari, B., 2008. **Microstructural and mechanical properties of friction stir welded aluminum/copper lap joints**. *Journal of alloys and compounds*, 460, pp. 535-538.
- ADDISON, A.C., Robelou, A.J., 2004, '**Friction Stir Spot Welding: Principal parameters and their effects**', Proceedings of the 5th International Symposium on Friction Stir Welding – 5thISFSW, Metz, France.
- ALCOA – **Ligas e têmperas de extrusão**. ALCOA Alumínio e Cia, 2010, 52p. Banco de dados disponível em: <https://www.alcoa.com/brasil/pt/resources/pdf/industria/cat_alogo_ligas_temperas_2010.pdf>. Acesso em 25 de julho de 2014.
- ANDREUCCI, R. **Ensaio não destrutivo por ultrassom**. Ed. Jan/2011
www.abendi.org.br
- ARBEGAST, W.J., 2008, '**A flow-partitioned deformation zone model for defect formation during friction stir welding**', *ScriptaMaterialia* 58, pp. 372-376.
- ASM International Handbook Committee **Welding handbook, welding processes 8 ed. Americacam Society for Metals**, 1991, vol2 p 739-762
- BADARINARAYAN, H. F. Hunt, K. Okamoto. **Friction Stir Stitch Welding – Process Development and Mechanical Property Evaluation**. 6th International Symposium of Friction Stir Welding ISFSW6, 10-13 October 2006, Montreal, Canada
- BRAUNOVIC, M. and Alexandrov, N.: '**Intermetallic Compounds at Aluminium-to-Copper Electrical Interfaces: Effect of Temperature and Electric Current**'. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology Part A* 1994 17(1) 78-85(1994).
- BUFFA, G.; Huaa, J.; Shivpuri, R.; Fratini, L. **Design of the friction stirwelding tool using the continuum based FEM model**. *Materials Science & Engineering A*, 419, p. 381-388, 2006.
- CAPELARI, T.V. **Avaliação da Geometria de Ferramenta e Parâmetros do Processo FSW na Soldagem da Liga de Alumínio AA 5052**. 69f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2006.
- COELHO, R.S., Kostka, A., Santos, J.F., Pyzalla, A.R., 2008, **Friction-stir dissimilar welding of aluminium alloy to high strength steels: Mechanical properties and their relation to microstructure**. *Adv. Eng. Mater* 10, pp. 961-972.
- CRESPO, A.A., 2002. **Estatística Fácil, 18ª Edição**. Ed Saraiva, São Paulo.
- DEQING, W.; Shuhua, L.; Zhaoxia; C. **Study of friction stir welding of aluminum**. *Journal of Materials Science*, 39, p. 1689–1693, 2004.
- DIETER, G. E. **Metalurgia mecânica**. 2.ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1982.

- 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, 25, p. 1379–1387, 2003.
- Dubourg L, Merati A, Jahazi M. **Process optimisation and mechanical properties of friction stir lap welds of 7075–T6 stringers on 2024–T3 skin.** Mater Des31:3324–30. Des, 2010.
- ESMAEILI, A., Givi, M.K.B., Rajani, H.R.Z., 2011. **A metallurgical and mechanical study on dissimilar friction stir welding of aluminum 1050 to brass (CuZn30).** Materials Science and Engineering a 528, pp. 7093-7102.
- FRATINI, L.; Buffa, G. **CDRX modelling in friction stir welding of aluminum alloys.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, 45, p. 1188–1194, 2005.
- GALVÃO, I., Verdera, D., Gesto, D., Loureiro, A., Rodrigues, D.M. Influence of aluminium alloy type on dissimilar friction stir lap welding of aluminium to copper. Journal of Materials Processing Technology, v. 213, p. 1920-1928, 2013.
- GERLICH, A., Su, P., North, T. H. and Bendzsak, G.J., (2005) Friction stir spot welding of aluminum and magnesium alloys, Materials Forum, Vol. 29, (ed. J.F. Nie, et al.), pp. 290-294.
- GODINHO, V., Zettler, R., Lomolino, S., **Friction stir weld zone evaluation by image analysing techniques,** 2003
- GUERRA, M. Schmidt, C, McClure, J.C, Murr, I.E, Nunes B, A.C..**Flow patterns during friction stir welding.** Materials Characterization 49, pp. 95-101. 2003.
- HILLER, D.J. **Estudo de Parâmetros e Percursos no Processo de Soldagem de Mistura por Atrito (FSW) da Liga de Alumínio 5052.** 2007. 128f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- IVAIR. A. Santos, Emerson. M. Giroto. **Medidas de Resistividade Elétrica DC em Sólidos como efetuadas corretamente.** Qui. Nova, Vol. 25, No. 4, 639-647, 2002.
- JATA, K. V.; Semiatin, S. L. **Continuous dynamic recrystallization during friction stir welding of high strength aluminum alloys.** Scripta Materialia, 43, p.743–749, 2000.
- KWONY, J., Saito N., Shigematsu I., **Friction stir process a new manufacturing technique of ultrafine grained aluminum alloy.** J. Mater. Sci. Lett. 21 pp. 1473-1476. 2002.
- Lakshminarayanan, A. K., Ma Larvizhi, S., Balasubramanian, **Developing friction stir welding window for AA2219 aluminium alloy.** Transactions of Nonferrous Metals Society of China 21, pp. 2339-2347. 2011.
- LEBEDEV, V. K, and Chernenko, I. A, **Friction Welding,** SoV. Tech. Rev. C. Weld. Surf. vol 4, pp- 59-168, 1992.
- LEE WON-BAE, et al, **Interfacial reaction in steel–aluminum joints made by friction stir welding.** Scripta Materialia 55 355–358 (2006)

- LEONARD, A. J. **Microstructure and Ageing Behaviour of FSWs in Aluminium Alloys 2014A – T651 and 7075-T651**. TWI UK, p.14, 2000.
- LOCKWOOD, W.D.; Reynolds, A.P. **Simulation of the global response of a friction stir weld using local constitutive behavior**. Materials Science and Engineering A339, p. 35–42, 2003.
- MACHADO, I.G., **Soldagem & Técnicas Conexas: Processos**, Laboratório de soldagem & Técnicas Conexas (LS&TC), Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 1996.
- MARQUES. H., **Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa** 2009.
- MENDENHALL, J. H., **Understanding Copper Alloys**. Olin Brass Corporation, East Aton IL, 1977.
- MOGHADDAM, M.S., Parvizi, R., Haddar-Sabzevar, M., Davoodi, A., 2011. **Microstructural and mechanical properties of friction stir welded Cu-30Zn brass alloy at various feed speeds: influence of stir bands**. Materials and Design 32 pp. 2749–2755.
- MONTGOMERY, D.C., Runger, G.C., **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. Ed. LTC, Rio de Janeiro 1999.
- OKAMOTO, K. Hunt, F. Hirano, S. **Development of Friction Stir Welding Technique and Machine for Aluminum Sheet Metal Assembly – Friction Stir Welding of Aluminum for Automotive Applications (2)** - SAE Congress, Detroit, SAE Technical paper SP-1959, p 121-125, 2005.
- OLEA, C. W. **Influence of energy input in friction stir welding on structure evolution and mechanical behaviour of precipitation hardening in aluminium alloys (AA2024-T351, AA6013-T6 and Al-Mg-Sc)**. Tese de doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade de Bochum, Alemanha, 2008.
- OLEA, C., W. Roseno T., **Sub-structural analyses of friction stir welded joints in an AA 6056Al-alloy in T4 and T6 temper conditions**. Materials Science and Engineering A 454-455, pp 52-62. 2007.
- PAIVA, F. G. A.; **Caracterização de Junta Soldada por Atrito Linear com Mistura (FSW) da Liga Al-Mg-Si AA 6063**. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. São Paulo, 2009.
- PARK, H.S. T. Kimura, T. Murakami, Y. Nagano, K. Nakata, M. Ushio, **Microstructures and mechanical properties of friction stir welds of 60% Cu–40 % Zn copper alloy**. Mater Sci Eng A, 371, pp. 160–169 (2004),
- PEPE, N.; **Comportamento à Corrosão e Fadiga de Juntas Soldadas por Fricção Linear da Liga AA5083-H111**, MSc Thesis, IST, 2005;

- ROSATO Júnior, A. **Estrutura integral por soldagem por atrito friction stir welding – FSW – requisitos básicos para o projeto estrutural**. São José dos Campos – SP: ITA, 262 p. Dissertações de Mestrado. 2003.
- Mishra, R. S., Ma, Z. Y. “**Friction Stir Welding and Processing**”, *Materials Science and Engineering*, (R50) 1-78. 2005.
- SAEID, T.; Abdollah-Zadeh, A.; Sazgari, B. **Weldability and Mechanical Properties of Dissimilar Aluminum-Copper Lap Joints Made by Friction Stir Welding**. *Journal of Alloys and Compounds*, 490, p.652-655, 2010.
- SMITH, W. F., **Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**, 3ª Edição McGraw-Hill de Portugal, 1998
- SANTOS T. G. et al. **Modification of electrical conductivity by friction stir processing of aluminum alloys**, *Int J Adv Manuf Technol*. 57:511–519 DOI 10.1007/s00170-011-3308-4, 2011.
- SANTOS, J. F. et al. **Metallurgy and weld performance in friction stir welding**. In: Lohwasser, D.; Chen, Z. *Friction Stir Welding: From Basics to Applications*. Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, p.317-319, 2010.
- SONG, M.; Kovacevic, R. **Thermal modeling of friction stir w** *Tools &Manufacture*, 43, p. 605–615, 2003.
- SOUZA, G. S. **Influência da Geometria da Ferramenta na Soldagem da Liga de Alumínio 5052 pelo Processo FrictionStirWelding**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010.
- SU,J. Q.; Nelson, T. W.; Mishra, R.; Mahoney, M. **Microstructuralinvestigation of friction stir welded 7050 - T651 aluminium**. *Acta Materialia Journal*, 51, p. 713-729, 2003.
- SUTTON, M. A.; Yang, B.; Reynolds, A. P.; Taylor, R. **Microstructural studies of friction stir welds in 2024-T3 aluminum**. *Materials Science and Engineering A*, 323, p. 160–166, 2002.
- TAN, C.W., Jiang, Z.G., Li, L.Q., Chen, Y.B., Chen, X.Y., 2013. **Microstructural evolution and mechanical properties of dissimilar Al-Cu joints produced by friction stir welding**. *Materials and Design* 51, pp. 466-473.
- Tang, W., Guo, X., McClure, J.C., Murr, L.E., Nunes, A. **Heat Input and Temperature Distribution in Friction Stir Welding**, *Journal of Materials Processing and Manufacturing Science* Vol. 37, No. 2, Pp.163-172, 1999.
- THOMAS W.M., E.D. Nicholas, J.C. Needham,M.G. Murch, P. Templesmith, andC.J. Dawes, G.B. **Patent 9125978.8**, Dec1991
- THOMAS W M, Dolby R E, “**Friction Stir Welding Developments**”, *6th International Conference on Trends in Welding Research*, Callaway Gardens Resort, Pine Mountain, Georgia, USA, April 2002

- THOMAS W N, Staines D G, Johnson K I, Evans P; **Com-stir™ – compound motion for friction stir welding and machining**; Published on TWI's website, March 2003
- THOMAS W N, Staines D G, Nicholas E D, Evans P; **Reversal Stir Welding Re-stir™**; Published on TWI's website, January 2003
- THOMAS W N, Staines D G, Watts E R, Norris I M, **The Simultaneous use of two or more friction stir welding tools**, Published on TWI's website, January 2005
- THOMAS, W M, Minus, I, Smith, P T. **Friction Stir Welding of an Aluminum Alloy – Effects of Tool Geometry**. England: Rep. n 668, 1999.
- THOMAS, W. M.; Dolby, R. E. **Friction Stir Welding Developments**. 6th International Conference on Trends in Welding Research, 15-19, Georgia, USA April 2002.
- THOMAS, W. M.; Nicholas, E. D.; Smith, S. D. **Friction stir welding – tool development**. TMS Annual Meeting, p.1–10, 2001.
- 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.
- TWEEDY, B.T. C.A. Widener, D.A. Burford, **The effect of surface treatments on the faying surface of friction stir spot welds, Friction Stir Welding and Processing IV**, TMS, 333-340, 2007.
- VALANT, M., Yarrapareddy, E., Kovacevic, R. ‘**A novel tool design for friction stir spot welding**’, Proceedings of the 7th International Conference on Trends in Welding Research, USA, 2005.
- VILAÇA, P.; **Fundamentos dos Processos de Soldadura por Fricção Linear: Análise Experimental e Modelação Analítica**, PhD Thesis, IST, 2003;
- VILAÇA, P.; Quintino, L.; Santos, J. F. **STIR–Analytical thermal model for friction stir welding**. Journal of Materials Processing Technology, 169, p. 452–465, 2005.
- WATANABE. T, Takayama H, Yanagisawa A. Joining of aluminum alloy to steel by friction stir welding. Journal of Materials Processing Technology, 178(1–3): 342–349, 2006.
- WEINGAERTNER, W.L.; Schroeter, R. B. **Tecnologia de usinagem do alumínio e suas ligas**. 2^a Ed. São Paulo: ALCAN Alumínio do Brasil, 80p. 1991.
- WICHELHAUS, G. “Berechnung der Stoßflächentemperatur beim Reibschweißen”. In Schweissen, 27(10 p.9-10, 1975) Smith, W. F., **Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**, 3^a Edição McGraw-Hill de Portugal, 1998
- XUE, P., Ni, D.R., Wang, D., Xiao, B.L., Ma, Z.Y. **Effect of friction stir welding parameters on the microstructure and mechanical properties of the dissimilar Al-Cu joints**. Materials Science and Engineering A528, pp. 4683-4689. 2011a.

XUE, P., Xiao, B.L., Wang, D., Ma, Z.Y. **Achieving high property friction stir welded aluminum/copper lap joint at low heat input.** Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 16, pp. 657-661. 2011b.

ZHAO, Y.; Lin, S.; Wu, L.; Qu, F. **The influence of pin geometry on bonding and mechanical properties in friction stir weld 2014 Al alloy.** Materials Letters, 59, p. 2948–2952, 2005.

Zhou C, Yang X. **Effect of kissing bond on fatigue behavior of friction stir welds on Al 5083 alloy.** J Mater Sci, 41:2771–7. 2006.

Tan, C. W., Jiang, Z.G., Li, L.Q., Chen, Y.B., Chen X.Y. **Microstructural evolution and mechanical properties of dissimilar Al–Cu joints produced by friction stir welding** 2013.

Ilman M.N., Kusmono, P.T. Iswanto **Fatigue crack growth rate behaviour of friction-stir aluminium alloy AA2024-T3 welds under transient thermal tensioning** Volume 50, pages 235–243, September 2013

Ericsson M, Sandström R. **Fatigue crack propagation in friction stir welded and parent AA6082, Steel** Int J Fatigue 29:57,2007.

Bisadi, H. A. Tavakoli, M. Tour Sangsaraki, S.K. **Tour, The influences of rotational and welding speeds on microstructures and mechanical properties of friction stir welded Al 5083 and commercially pure copper sheets lap joints,** Mater. Des. 40 80–88. 2013

Elrefaey, A., Takahashi, M., Ikeuchi, K, **Microstructure of aluminium/copper lap joint by friction stir welding and its performance.** Journal of High Temperature Society 30, 286–292. 2004.

Firouzdar, V., Kou, S., **Al-to-Cu friction stir lap welding.** Metallurgical and Materials Transactions A 43A, 303–315, 2012.

Akbari, M., Abdi Behnagh, R., Dadvand, A. **Effect of materials position on friction stir lap welding of Al to Cu.** Science and Technology of Welding and Joining 17, 581–588, 2012.

ALVARENGA, B.; MÁXIMO, A. Curso de física. Vol. 3. 3ª ed. São Paulo: Scipione, 2007.

9 APENDICE

9.1 APENDICE I – Testes preliminares

Nos ensaios preliminares foram testados diversos parâmetros, afim de obter uma janela que aproximasse a realização das soldas.

O aporte excessivo de calor também pode resultar em defeitos de soldagem. A Figura 73 apresenta amostras soldadas com velocidade de avanço de 10 mm/min nas rotações de 1300, 2000 e 2500 rpm. Nestes casos, a região soldada é comprometida pelo excessivo aumento de temperatura, o que faz com que esta atinja o ponto de fusão do alumínio (menor que o do cobre) em alguns pontos. O alumínio funde localmente e vaza para fora da interface da junta como pode ser visto nos pontos destacados na Figura 74.

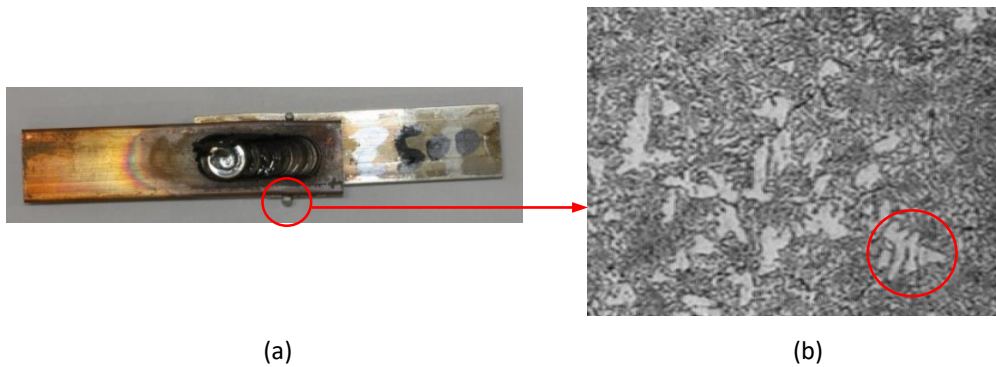
Figura 73 – Falhas causadas devido à geração excessiva de calor em rotações elevadas



Fonte autor

Para comprovar a ocorrência de fusão localizada do Al, a porção vazada mostrada na Figura 73 foi submetida a uma análise metalográfica. A Figura 74 mostra uma micrografia da região supostamente “vazada”, onde se vê a presença de dendritas comprovando a fusão e solidificação do material nesse local. É importante salientar que, embora a fusão do Al ocorra em pontos localizados, esse fenômeno compromete a soldagem, pois desalinha a geometria da junta como fica evidente na Figura 74. Isso acabou limitando a faixa de estudo da velocidade de rotação neste trabalho, cujo máximo foi definido em 1100 rpm que foi a máxima rotação em que não verificou-se esse fenômeno.

Figura 74 – Fusão parcial no Al em amostra produzida com velocidade de rotação de 2500 rpm:
a) macrografia da junta destacando o material fundido e b) micrografia na zona onde houve fusão.



Fonte autor

Outro tipo de defeito algumas vezes relatado na literatura em soldas FSW costuma ocorrer na interface das chapas, em que estas ficam separadas por finas camadas de óxidos (Zhou C, Yang 2006). Este tipo de defeito não foi visível neste trabalho.

Cabe destacar que os diversos parâmetros do processo FSW como geometria da ferramenta, ângulo de inclinação, velocidade de rotação, velocidade de avanço e força axial exercem influência sobre a qualidade da junta. A interação entre estas terá reflexo na temperatura de soldagem afetando a mistura na interface das chapas (Cho JH et al 2005). Estas inter-relações, no entanto, fogem do escopo deste estudo

As Figura 75 a Figura 79 mostram fotos das juntas soldadas realizadas na etapa de testes preliminares, com as rotações de 800, 900, 1000 e 1100 rpm, respectivamente.

Figura 75 - Amostras preliminares a 800 rpm



Figura 76 – Amostras preliminares a 900 rpm



Fonte autor

Figura 77 – Amostras preliminares a 1000 rpm.



Figura 78 – Amostras preliminares a 1100 rpm



Fonte autor

Figura 79 – Visão geral das amostras preliminares soldadas a 1000 rpm



Fonte autor

Na etapa de testes preliminares, foi verificado o aspecto geral da fratura nos ensaios de cisalhamento. A Figura 80 apresenta uma vista inferior da chapa de cobre após o ensaio de cisalhamento na região do início do cordão, ou seja, onde ocorreu o ACI. Observa-se que aparentemente houve certa dificuldade no “arranchamento” da chapa de alumínio, sugerindo uma maior mistura entre as chapas superior e inferior.

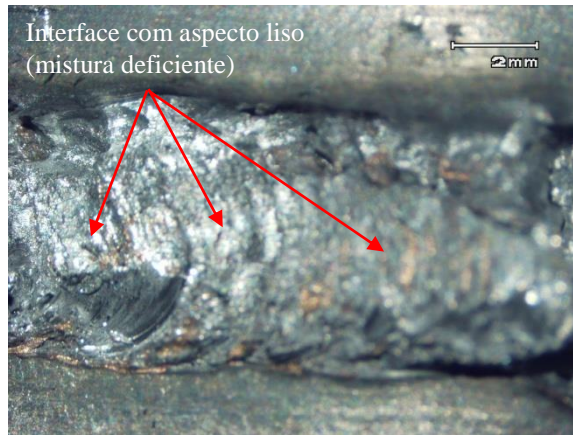
Figura 80 – Solda com ACI (1000 rpm) após ensaio de cisalhamento



Fonte autor

A Figura 81 apresenta uma junta soldada sem ACI e rotação de 1100 rpm, após o ensaio de cisalhamento, onde se vê a interface entre as chapas. O aspecto da interface sugere que houve mínima resistência ao “arranchamento” da chapa de alumínio, dado o aspecto relativamente liso da superfície. Isso, sugere uma mistura deficiente para esta combinação de soldagem (S-1100). Resultados semelhantes foram relatados por Abdollah-Zadeh et al., 2007, que atribuem este efeito às elevadas velocidades (rotação ou avanço), que dificultam a ocorrência de mistura e favorecem a formação de trincas e porosidades, reduzindo a resistência mecânica da junta.

Figura 81– Região de início da solda mostrando o cordão de solda produzido sem ACI (1100 rpm).



A análise da Figura 81 sugere uma melhora no processo devido à presença de maior quantidade de alumínio agregado à chapa de cobre. Os resultados dos ensaios de cisalhamento não mostraram alteração significativa na resistência mecânica para carregamento monotônico, para estas condições. Contudo o ACI no início do cordão de solda pode estar contribuindo para a redução na dispersão dos resultados.

9.2 APENDICE II – Desenhos

As Figura 82, Figura 83, Figura 84 e Figura 85 mostram, respectivamente os desenhos de: dispositivo de suporte, dispositivo de posicionamento dos sensores de temperatura, conjunto de soldagem e ferramenta.

Figura 82 – Corpo do dispositivo de fixação da ferramenta.

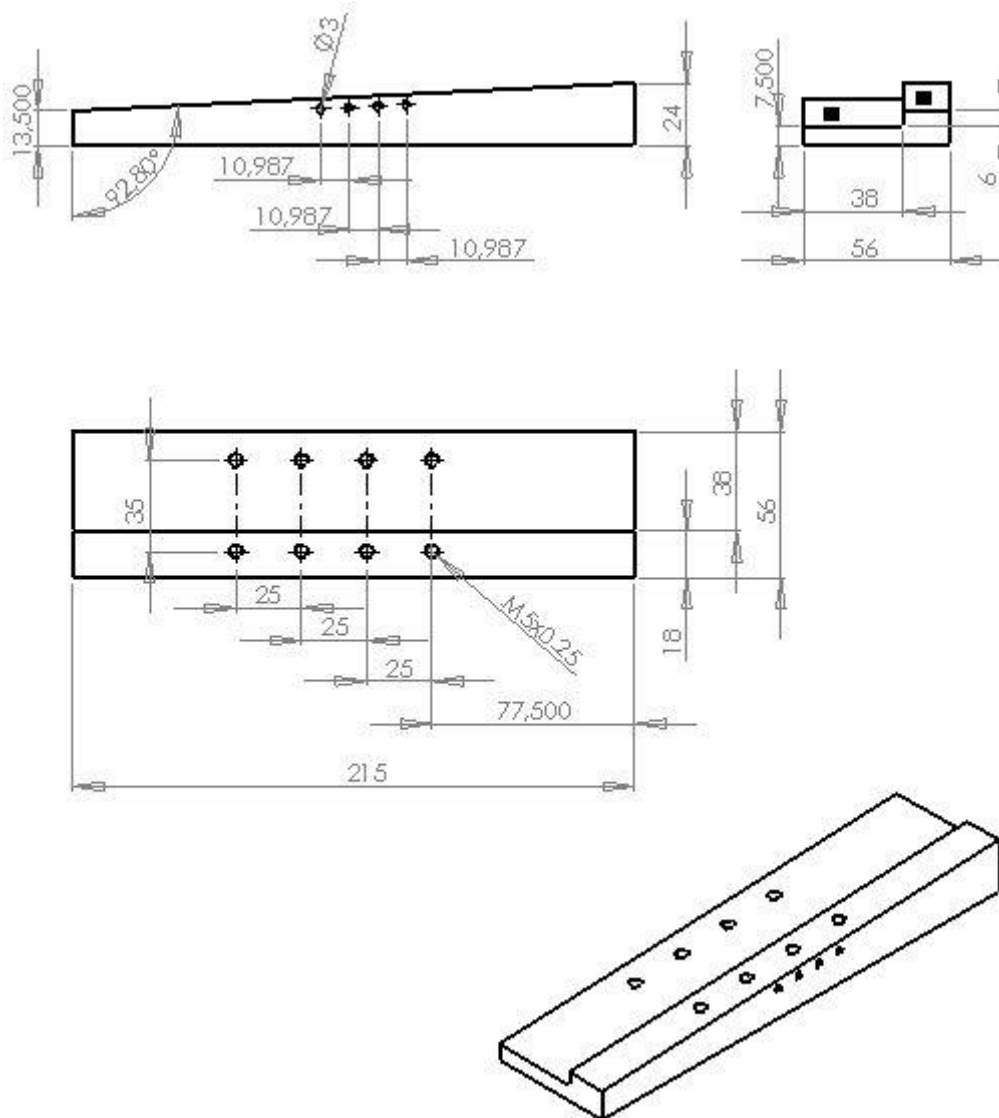


Figura 83 – Elemento de posicionamento dos sensores de temperatura, no dispositivo de fixação da ferramenta.

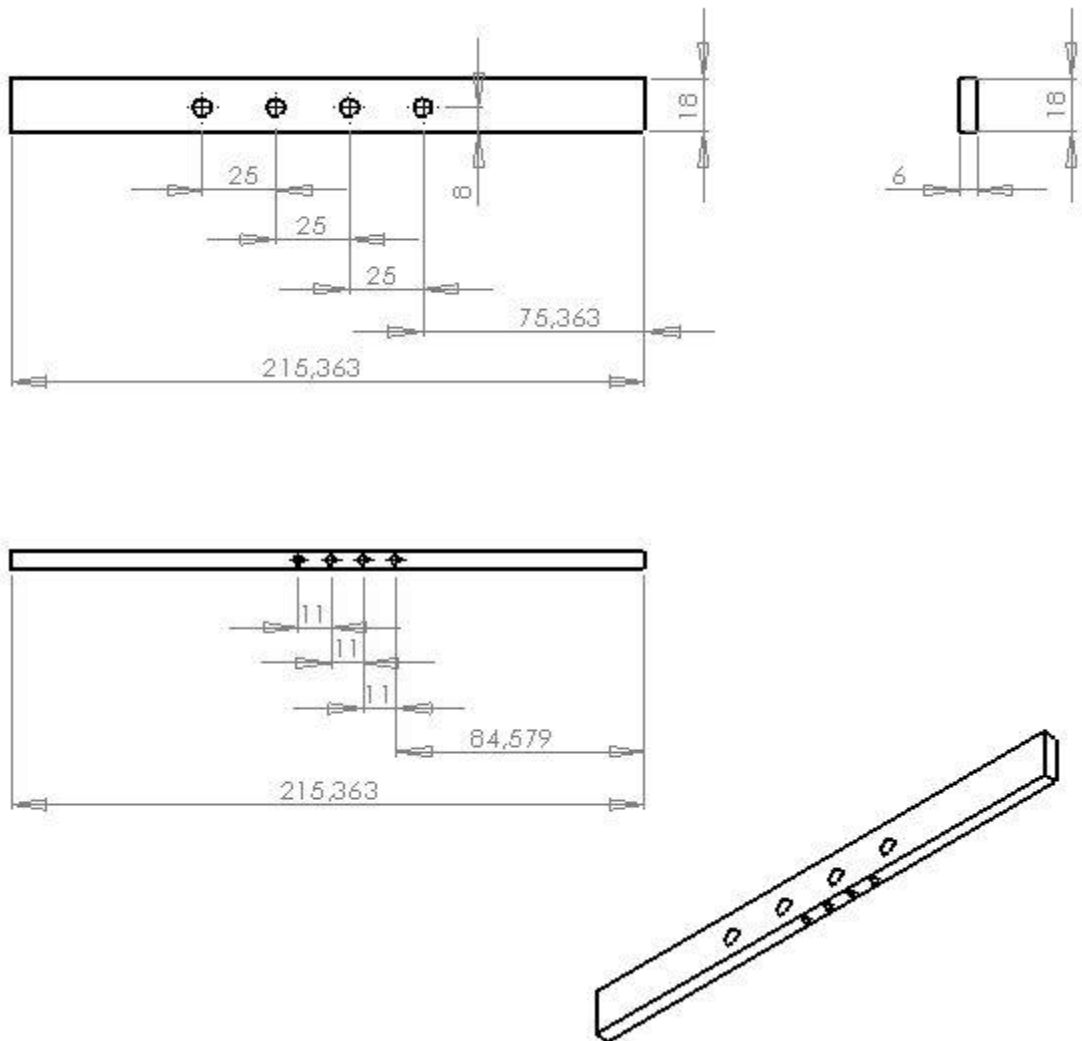


Figura 84 – Vista esquemática em perspectiva do conjunto de soldagem.

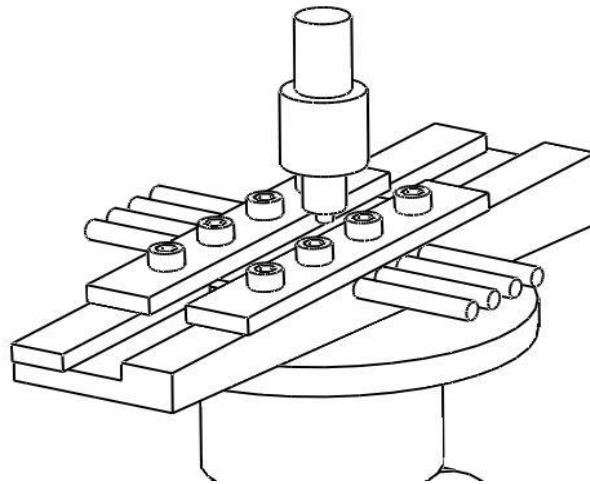
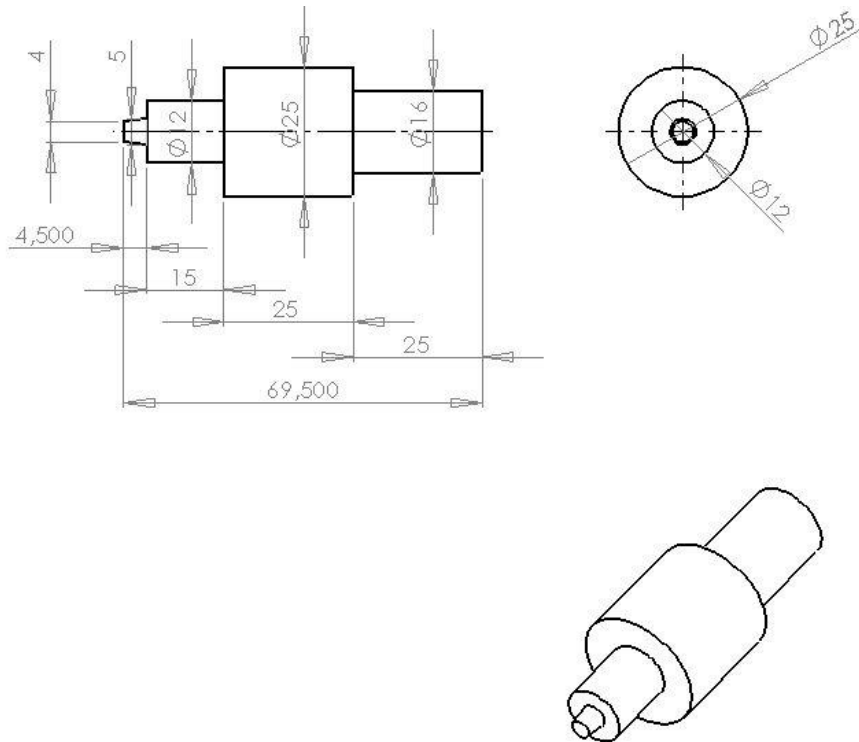


Figura 85 – Ferramenta de soldagem.



9.1 APENDICE III – Resultados de fadiga

A Tabela 22 e a Tabela 23 mostram os resultados dos ensaios de fadiga para as soldas realizadas com e sem ACI, respectivamente.

Tabela 22 – Resultados dos ensaios de fadiga das soldas com ACI (C-1000).

CP	Carga ensaio	Tensão máxima [MPa]	Tensão mínima [MPa]	Seção transversal [mm ²]	Carga máxima [N]	Carga mínima [N]	Número de ciclos para fratura	T [°C]
SI-089-13-R 11	50%	47,11	4,71	61,75	2909,0	290,90	64707	25,0
SI-089-13-R 12	50%	47,11	4,71	61,75	2909,0	290,90	89862	23,4
SI-089-13-R 13	50%	47,11	4,71	61,75	2909,0	290,90	75046	26,6
SI-089-13-R 20	45%	42,40	4,24	61,75	2618,1	261,81	107965	25,1
SI-089-13-R 21	45%	42,40	4,24	61,75	2618,1	261,81	102982	24,6
SI-089-13-R 22	45%	42,40	4,24	61,75	2618,1	261,81	70258	24,2
SI-089-13-R 14	40%	37,69	3,77	61,75	2327,2	232,72	181002	23,9
SI-089-13-R 15	40%	37,69	3,77	61,75	2327,2	232,72	147387	28,5
SI-089-13-R 16	40%	37,69	3,77	61,75	2327,2	232,72	114021	24,1
SI-089-13-R 23	35%	32,98	3,30	61,75	2036,3	203,63	231729	26,9
SI-089-13-R 24	35%	32,98	3,30	61,75	2036,3	203,63	161499	24,5
SI-089-13-R 25	35%	32,98	3,30	61,75	2036,3	203,63	266952	26,2
SI-089-13-R 17	30%	28,27	2,83	61,75	1745,4	174,54	1000000	25,8
SI-089-13-R 18	30%	28,27	2,83	61,75	1745,4	174,54	1000000	26,5
SI-089-13-R 19	30%	28,27	2,83	61,75	1745,4	174,54	1000000	29,3
SI-089-13-R 26	25%	23,56	2,36	61,75	1454,5	145,45	1000000	22,7
SI-089-13-R 27	25%	23,56	2,36	61,75	1454,5	145,45	1000000	24,2
SI-089-13-R 28	25%	23,56	2,36	61,75	1454,5	145,45	1000000	28,4
SI-089-13-R 29	16%	14,84	1,48	61,75	916,3	91,63	1000000	24,7

Tabela 23 – Resultados dos ensaios de fadiga das soldas sem ACI (S-1000).

CP	Carga ensaio	Tensão máxima [MPa]	Tensão mínima [MPa]	Seção transversal [mm ²]	Carga máxima [N]	Carga mínima [N]	Número de ciclos para fratura	T [°C]
SI-089-13-S 11	50%	47,11	4,71	61,75	2909,0	290,90	81125	29,5
SI-089-13-S 12	50%	47,11	4,71	61,75	2909,0	290,90	60290	30,6
SI-089-13-S 13	50%	47,11	4,71	61,75	2909,0	290,90	46121	25,2
SI-089-13-S 20	45%	42,40	4,24	61,75	2618,1	261,81	81462	27,2
SI-089-13-S 21	45%	42,40	4,24	61,75	2618,1	261,81	88351	28,5
SI-089-13-S 22	45%	42,40	4,24	61,75	2618,1	261,81	93278	25,7
SI-089-13-S 14	40%	37,69	3,77	61,75	2327,2	232,72	93278	24,7
SI-089-13-S 15	40%	37,69	3,77	61,75	2327,2	232,72	70236	27,5
SI-089-13-S 16	40%	37,69	3,77	61,75	2327,2	232,72	26108	24,3
SI-089-13-S 23	35%	32,98	3,30	61,75	2036,3	203,63	129436	25,4
SI-089-13-S 24	35%	32,98	3,30	61,75	2036,3	203,63	114550	27,4
SI-089-13-S 25	35%	32,98	3,30	61,75	2036,3	203,63	293180	23,4
SI-089-13-S 17	30%	28,27	2,83	61,75	1745,4	174,54	686010	25,0
SI-089-13-S 18	30%	28,27	2,83	61,75	1745,4	174,54	758321	24,2
SI-089-13-S 19	30%	28,27	2,83	61,75	1745,4	174,54	344013	32,2
SI-089-13-S 26	25%	23,56	2,36	61,75	1454,5	145,45	1000000	25,1
SI-089-13-S 27	25%	23,56	2,36	61,75	1454,5	145,45	1000000	23,2
SI-089-13-S 28	25%	23,56	2,36	61,75	1454,5	145,45	1000000	31,5
SI-089-13-S 29	35%	32,98	3,30	61,75	2036,3	203,63	186762	31,2
SI-089-13-S 30	33%	30,62	3,06	61,75	1890,9	189,09	325067	28,0