



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

LUCAS QUEIROZ MELO DA COSTA

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM PROCESSO DE SOLDAGEM DE LIGAS
DE ALUMÍNIO AA2017 E AA5083 POR FRICÇÃO E MISTURA (FSW)**

Recife

2018

LUCAS QUEIROZ MELO DA COSTA

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM PROCESSO DE SOLDAGEM DE LIGAS
DE ALUMÍNIO AA2017 E AA5083 POR FRICÇÃO E MISTURA (FSW)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Soldagem

Orientador: Prof^o. Dr. Armando Hideki Shinohara

Recife

2018

Catálogo na fonte
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

C837e Costa, Lucas Queiroz Melo da.
Estudo e desenvolvimento de um processo de soldagem de ligas de alumínio AA2017 e AA5083 por fricção e mistura (FSW) / Lucas Queiroz Melo da Costa - 2018. 89 folhas, il., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Armando Hideki Shinohara.

TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Departamento de Graduação em Engenharia Mecânica, 2018.
Inclui Referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Soldagem. 3. FSW. I. Shinohara, Armando Hideki (Orientador). II. Título.

UFPE

621CDD (22. ed.)

BCTG/2018-478

LUCAS QUEIROZ MELO DA COSTA

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM PROCESSO DE SOLDAGEM DE LIGAS
DE ALUMÍNIO AA2017 E AA5083 POR FRICÇÃO E MISTURA (FSW)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: 05/12/2018.

BANCA EXAMINADORA

Profº. Dr. Armando Hideki Shinohara (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Profº. Dr. Tiago Leite Rolim (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Profª. Drª. Maria Antonieta Cavalcanti de Oliveira (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pois sem Ele eu não teria chegado à posição que alcancei, e nada disso seria possível.

Aos meus pais, pelo incansável apoio e incentivo durante todos os anos de estudo.

Ao meu professor e orientador prof. Armando Hideki Shinohara, por todas as oportunidades concedidas e orientação na elaboração deste trabalho.

Ao professor Hidetoshi Fujii, professor do *Japan Welding Research Institute of Osaka University (JWRI)*, pelo fornecimento das ferramentas e chapas de diversas ligas de alumínio utilizadas no trabalho.

À comissão do programa Brasil-Japão, pelo incentivo e estímulo à pesquisa científica que possibilitou a realização deste trabalho.

Aos professores Dr. Tiago Rolim e Rogério, pelo auxílio e orientação durante as atividades experimentais deste trabalho.

Aos técnicos Rubens e Janaína Cirino, pelo auxílio durante as atividades em laboratório referentes a este trabalho.

A assistente Hissae Fujiwara e ao colega de graduação Luís Fabrício, pela cooperação e assistência durante diversas atividades deste trabalho.

Aos demais profissionais, colegas e colaboradores que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

O propósito deste trabalho foi conhecer e estudar o processo de Soldagem por Fricção e Mistura aplicado à confecção de juntas de alumínio, dentro das condições de operacionais do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE (DEMEC – UFPE). O estudo classifica-se como uma pesquisa básica estratégica, de caráter explicativo e metodologia experimental, buscando ampliar os conhecimentos existentes na área de processos de união de superfícies – Engenharias – com o objetivo de propor soluções e melhorias no processo de soldagem por FSW, aplicado para reconhecidos problemas práticos enfrentado pela indústria atual, nos seus mais diversos setores. A metodologia base deste trabalho consistiu primeiramente em projetar e desenvolver um aparato experimental específico para o processo FSW, seguido da realização de diversas soldagens com variação de parâmetros e liga de alumínio trabalhada. Posteriormente, foram realizados ensaios não-destrutivo (Radiografia Industrial e planeza) e destrutivos (Tração e Dobramento). Por fim, a microestrutura do material da junta soldada foi analisada através de Metalografia (Microscopia Ótica). Os resultados gerais confirmaram vantagens do processo FSW quando comparado com outros métodos tradicionais de soldagem por fusão, tais como qualidade da solda e resistência mecânica. Entretanto, alguns defeitos oriundos do próprio processo de soldagem foram observados e tiveram suas causas raiz analisada, consolidando uma base teórica fundamental para aperfeiçoamento e maior domínio desta tecnologia por parte do DEMEC – UFPE.

Palavras-chave: Soldagem. FSW. Engenharia mecânica.

ABSTRACT

The purpose of this work was to know and study the Friction Stir Welding process applied to the manufacture of aluminum joints, within the operating conditions of the Department of Mechanical Engineering at UFPE (DEMEC - UFPE). The study is classified as a basic strategic research, with explanatory character and experimental methodology, aiming to extend the existing knowledge in the area of surface union processes - Engineering - with the objective of proposing solutions and improvements for the Friction Stir Welding process (FSW), applied for recognized practical problems faced by the current industry, in its most diverse sectors. The basic methodology of this work was firstly to project and develop a specific experimental apparatus for the FSW process, followed by the performance of several welds with variation of parameters and worked aluminum alloy. Subsequently, non-destructive (Industrial Radiography and Planicity) and destructive (Traction and Bending) tests were performed. Finally, the microstructure of the welded joint material was analyzed through Metallography (Optical Microscopy). The overall results confirmed advantages of the FSW process when compared to other traditional methods of fusion welding, such as weld quality and mechanical strength. However, some defects originated during the welding process itself were observed and its root causes were analyzed, consolidating a fundamental theoretical basis for the improvement and better mastery of this technology by DEMEC – UFPE.

Keywords: Welding. FSW. Mechanical engineering.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	PROBLEMÁTICA.....	9
1.2	PERGUNTA DE PESQUISA.....	11
1.3	JUSTIFICATIVA.....	12
1.4	OBJETIVOS.....	14
1.4.1	Objetivo Geral.....	14
1.4.2	Objetivos Específicos	14
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	HISTÓRICO	16
2.2	CONCEITOS FUNDAMENTAIS	19
2.2.1	Princípio de funcionamento	19
2.2.2	Parâmetros de Soldagem	21
2.2.3	Geração de calor	24
2.2.4	Fluxo de material	26
2.2.5	Microestrutura.....	28
2.2.6	Propriedades e defeitos.....	30
3	METODOLOGIA	32
3.1	DESENVOLVIMENTO DO APARATO EXPERIMENTAL	32
3.1.1	Aparato experimental adaptado.....	34
3.1.2	Aparato experimental fornecido	35
3.1.3	Aparato experimental projetado.....	36
3.2	EXECUÇÃO DE SOLDAGENS POR FRICÇÃO E MISTURA DE CHAPAS DE ALUMÍNIO	41
3.2.1	Sessão 1	41
3.2.2	Sessão 2	43
3.2.3	Sessão 3.....	44
3.3	AVALIAÇÃO DE DEFEITOS E PROPRIEDADES MECÂNICAS	46
3.3.1	Ensaio de planeza	46
3.3.2	Radiografia Industrial	48
3.3.3	Ensaio de dobramento.....	50
3.3.4	Ensaio de Tração.....	52
3.4	ANÁLISE METALOGRÁFICA.....	54

3.4.1	Preparação das amostras para análise metalográfica	54
3.4.2	Procedimento de microscopia ótica	57
4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	58
4.1	JUNTAS SOLDADAS	58
4.1.1	Sessão 1	58
4.1.2	Sessão 2	59
4.1.3	Sessão 3	61
4.2	ENSAIO DE PLANEZA	65
4.3	ENSAIO NÃO-DESTRUTIVO.....	66
4.3.1	Sessão 1	66
4.3.2	Sessão 2	66
4.3.3	Sessão 3	68
4.4	ENSAIOS DESTRUTIVOS	70
4.4.1	Ensaio de dobramento	70
4.4.2	Ensaio de Tração	73
4.5	ANÁLISE METALOGRÁFICA	79
4.5.1	Amostra #3.....	79
4.5.2	Amostra #4.....	80
4.5.3	Amostra #6.....	82
5	CONCLUSÃO	84
	REFERÊNCIAS	87

1 INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMÁTICA

A Indústria Mecânica vem passando, principalmente nas últimas décadas, por um processo de franca expansão, com avanços científicos conquistados nos diversos campos da engenharia. A demanda por produtos tem aumentado não apenas em números absolutos, mas também no tocante à qualidade e desempenho das peças e equipamentos fabricados. Como consequência desse fenômeno, os processos envolvidos na fabricação desses equipamentos têm se tornado cada vez mais importantes, em especial aqueles responsáveis pela união de superfícies e materiais, como a soldagem.

Apesar disso, as técnicas de soldagem convencionais atualmente adotadas – em sua grande maioria do tipo por fusão – apresentam diversas limitações e desvantagens, comprometendo a eficiência do processo de fabricação e a *performance* dos produtos obtidos. Na soldagem por fusão, fatores como o uso de solventes de limpeza e gases protetores, alto consumo de energia para manter o arco elétrico e alteração da zona fundida pela utilização de metais de adição acabam por comprometer aspectos energéticos e ecológicos do processo, além de prejudicar as propriedades mecânicas das peças soldadas (MISHRA e MA, 2005).

Como esclarecem Kumar e Ramana (2014) “Fabricantes estão sob pressão crescente para fabricar produtos mais fortes e leves, usando menos energia, menos materiais danosos ao meio ambiente, com custo mais baixo e de forma mais rápida do que nunca”. Em especial os setores aeronáutico e aeroespacial vêm sofrendo com a necessidade urgente de novos métodos mais baratos e eficientes para a confecção de juntas soldadas de alumínio – um dos materiais de maior aplicação dentro desses setores – de alta resistência mecânica, principalmente no tocante à resistência a fadiga e fratura. Isso ocorre porque algumas dessas ligas de alumínio (séries 2XXX e 7XXX) são geralmente classificadas como não soldáveis devido à sua pobre microestrutura de solidificação e porosidade da zona fundida, aliadas à perda de propriedades mecânicas na região soldada em relação ao metal base (MISHRA e MA, 2005).

Além disso, processos convencionais de soldagem por fusão de ligas de alumínio tornam-se difíceis pela formação de bolhas devido ao gás hidrogênio e compostos

intermetálicos frágeis aprisionado no metal da região soldada. A soldagem de materiais de composição química distinta também é um grande desafio, devido à formação de novas fases e soluções dentro da estrutura resultante que enfraquecem as propriedades dos

materiais originais (KIM et al., 2005; MRO CZKA et al., 2008; FABRICIO FILHO et al., 2017).

1.2 PERGUNTA DE PESQUISA

O trabalho visa, ao término de sua realização, responder à seguinte pergunta:

Como ocorre o processo de soldagem por fricção e mistura de chapas de alumínio?

1.3 JUSTIFICATIVA

A soldagem por fricção e mistura é uma tecnologia simples, limpa e inovadora para a junção de metais leves, inventada pelo *The Welding Institute (TWI)* em 1995, no Reino Unido. O mecanismo básico de operação desse método é extremamente simples: uma ferramenta rotacional não consumível, com um design projetado especialmente para esta aplicação, é inserida nas faces adjacentes das placas que se desejam soldar. Em seguida, a ferramenta é transladada ao longo da interface da junta. O aquecimento causado pela fricção entre a ferramenta e a peça em trabalho associado com o calor gerado pela deformação plástica do metal amolece o material da junta, permitindo que ele seja “misturado”, carregado e depositado ao longo da interface entre as placas através da combinação dos movimentos de rotação e translação da ferramenta. (SINGH, 2012; MISHRA e MA, 2005).

O processo de Soldagem por Fricção e Mistura apresenta muitas vantagens sobre os métodos convencionais de soldagem adotados atualmente. Do ponto de vista ecológico, não utiliza gases de proteção, não gera gases tóxicos durante o processo, não utiliza metais de adição nem consumíveis, não gera desperdícios e, por ocorrer ainda no estado sólido, consome muito menos energia do que os processos baseados em arco elétrico. Na esfera metalúrgica, a soldagem em temperaturas abaixo do ponto de fusão (estado sólido) permite a formação de uma solda de alta qualidade, eliminando todos os problemas relativos à solidificação e reduzindo os efeitos do aquecimento excessivo, como crescimento de grão e distorção na junta soldada. A não utilização de materiais de adição evita problemas de compatibilidade na composição da solda, permitindo trabalhar de maneira otimizada com materiais considerados “difíceis” de serem soldados por métodos de fusão, como ligas de Alumínio, obtendo produtos finais com poucas perdas em resistência mecânica. Em alguns casos, é possível obter uma solda até mais resistente do que o metal base. (MISHRA e MA, 2005; KUMAR E RAMANA, 2014; SINGH, 2012).

Tabela 1. Benefícios do Processo de Soldagem por Fricção e Mistura (FSW) (MISHRA e MA, 2005).

Metallurgical benefits	Environmental benefits	Energy benefits
Solid phase process	No shielding gas required	Improved materials use (e.g., joining different thickness) allows reduction in weight
Low distortion of workpiece	No surface cleaning required	Only 2.5% of the energy needed for a laser weld
Good dimensional stability and repeatability	Eliminate grinding wastes	Decreased fuel consumption in light weight aircraft, automotive and ship applications
No loss of alloying elements	Eliminate solvents required for degreasing	
Excellent metallurgical properties in the joint area	Consumable materials saving, such as rugs, wire or any other gases	
Fine microstructure		
Absence of cracking		
Replace multiple parts joined by fasteners		

De acordo com Mishra e Ma (2005) o “FSW [Soldagem por Fricção e Mistura] é considerado como sendo o maior desenvolvimento em junção de metais de uma década [...]”. Os benefícios dessa tecnologia vão além dos aspectos metalúrgicos que consolidam sua qualidade na produção de peças e equipamentos de alta performance, chegando a vantagens econômicas muito atrativas para a Indústria Mecânica. Devido à sua versatilidade em lidar com diversos materiais, facilidade de implementação e automação, alto potencial de repetibilidade e baixo custo de investimento em maquinário, o FSW tem encontrado bastante aplicação nos mais diversos setores de produção, em especial nas Indústrias Naval, Aeronáutica, Aeroespacial e Automotiva.

Apesar de grandes descobertas e aplicações bem-sucedidas do FSW num espaço de tempo relativamente curto após sua invenção, muitos aspectos do processo ainda são pouco entendidos e requerem mais estudo. Suas vantagens em relação aos processos convencionais de soldagem foram consolidadas, o que tem gerado bastante interesse em pesquisa e desenvolvimento por parte da Indústria em parceria com a Academia. Pode-se então afirmar que a soldagem por fricção e mistura constitui hoje um dos maiores desafios no campo da união de metais.

Na esfera nacional brasileira, em especial no Nordeste, pouco se conhece acerca do FSW e suas vantajosas aplicações na Indústria Mecânica. Na Academia – tomando como modelo a UFPE – poucos trabalhos vêm sido conduzidos consistentemente nesse tema, o que mostra a carência em pesquisa e desenvolvimento nessa tecnologia nas Universidades da região. Recentemente, uma iniciativa foi fundada através do Programa Brasil-Japão, do qual o Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC) da UFPE faz parte – sob a tutela do Prof. Armando Shinohara, em trazer treinamentos e cursos intensivos práticos (formato “*PBL – Project Based Learning*”) acerca do FSW, em parceria com a Universidade de Osaka – sob a tutela do Prof. Hidetoshi Fujii.

Este trabalho é fruto de treinamentos e pesquisas em desenvolvimento tecnológico no processo de Soldagem por Fricção e Mistura, apresentando adicionalmente como objetivo o propósito de gerar conhecimento e fomentar futuros trabalhos que irão mais a fundo nas lacunas atuais do conhecimento acerca desse processo.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral:

Conhecer o processo de Soldagem por Fricção e Mistura de chapas de Alumínio.

1.4.2 Objetivos Específicos

O trabalho apresenta como objetivos específicos:

- Desenvolver o aparato experimental para a execução da soldagem por fricção e mistura de chapas de alumínio;
- Executar a soldagem de chapas de alumínio pelo processo de fricção e mistura;
- Avaliar os possíveis defeitos e propriedades mecânicas da junta soldada;
- Caracterizar a microestrutura formada na junta soldada.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho encontra-se dividido em três tópicos principais: Fundamentação Teórica, Metodologia e Apresentação e Discussão de Resultados.

Em Fundamentação Teórica, trata-se brevemente acerca do histórico de desenvolvimento tecnológico do processo FSW, seguido de conceitos e características fundamentais acerca deste processo de soldagem. Em Metodologia, aborda-se o procedimento de pesquisa e trabalho conduzido durante todo este estudo, em cada uma das suas etapas, tal como se segue:

- Desenvolvimento de aparato experimental: Adaptação, fabricação e otimização da infraestrutura de modo a otimizar o processo FSW a ser conduzido;
- Execução de soldagens por fricção e mistura de chapas de alumínio: Método utilizado para soldar chapas de alumínio de diferentes ligas, com variação de alguns parâmetros;
- Avaliação de defeitos e propriedades mecânicas: Realização de ensaios destrutivos e não-destrutivos sobre amostras das juntas soldadas;
- Análise metalográfica: Realização de microscopia ótica sobre amostras de juntas soldadas.

Em Apresentação e Discussão de Resultados são apresentadas as juntas de alumínio confeccionadas pelo processo de fricção e mistura, juntamente com os ensaios e análise metalográfica realizados, discutindo-se também a correlação entre estes resultados e algumas comparações com dados encontrados na literatura. A subdivisão deste tópico é dada da seguinte maneira:

- Juntas soldadas: Apresentação das juntas soldadas pelo processo de fricção e mistura, discussão inicial acerca da qualidade das juntas com base no procedimento experimental conduzido e inspeção visual;
- Ensaio de planeza: Ensaio relativo à planeza da junta soldada;
- Ensaio não-destrutivo: Ensaio de Radiografia Industrial sobre as juntas soldadas;
- Ensaios destrutivos: Ensaio de tração e dobramento sobre amostras das juntas soldadas;
- Análise Metalográfica: Microscopia ótica de amostras das juntas soldadas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 HISTÓRICO

O processo de Soldagem por Fricção e Mistura teve sua invenção desenvolvida pelo *The Welding Institute* (TWI), em 1991 no Reino Unido, sendo posteriormente patenteada pelo próprio Instituto. Desde 1995, na Europa, o FSW vem sendo usado para fins produtivos, inicialmente para a soldagem de extrudados na confecção de painéis para aplicações marítimas (SINGH, 2012).

Thomas (1997), em seu estudo inicial acerca do FSW, concluiu que muitos materiais leves com aplicação nas Indústrias Automotivas, Marítima e Aeroespacial podem ser fabricados através da soldagem por fricção e mistura. No mesmo ano, Rhodes et al. (1997) realizou um estudo acerca da aplicação do FSW para materiais da construção Aeroespacial. Posteriormente, sendo continuado por Liu et al. (1997), que estudou a soldagem da liga 6061-T6, de alumínio, através de diferentes condições de velocidade de soldagem e rotação da ferramenta, pôde-se observar a variação dos parâmetros cristalográficos e dos valores de dureza na região “misturada” com as alterações nas condições do processo.

Colligan (1999) estudou a deformação plástica dentro da zona misturada durante o FSW e concluiu que o movimento de material plastificado nessa região é influenciado pelo pino da ferramenta utilizada. Jata et al. (2000) afirmaram em seu trabalho que o tamanho de grão na zona soldada varia com as taxas de deformação e temperaturas impostas ao material daquela região. Além disso, Jata et al. (2000) estudaram o efeito do tratamento térmico após a soldagem (121°C por 24 horas) nas propriedades e microestruturas de uma junta de Alumínio soldada por FSW. Ficou claro que, sem o tratamento térmico, a ductilidade e resistência a tração reduziram após o processo, ocorrendo fratura na Zona Termicamente Afetada (ZTA). Com o tratamento térmico, os valores se mantiveram constantes – antes e após o processo FSW.

Sutton et al. (2002) testaram a soldagem por FSW de juntas de 7mm de espessura da liga 2024-T351 de alumínio. Após análises metalúrgica, de dureza e energia, concluiu-se que existe a possibilidade de alterar a microestrutura da zona soldada – consequentemente melhorando uma série de propriedades do material da junta – através da manipulação dos parâmetros do processo de soldagem por Fricção e Mistura.

Peter et al. (2003) aplicaram a liga AA 5083 de Alumínio no processo FSW variando condições como: design de ferramenta, velocidade de rotação e translação. Ficou constatado que as propriedades da solda são determinadas principalmente pela carga térmica aplicada no processo, ao invés da deformação mecânica imposta pela ferramenta. Trabalhos subsequentes como o de Mustafa e Adem (2004) também comprovaram que a resistência mecânica da solda pode ser atribuída à geração de calor durante o processo de mistura.

Yan et al. (2005) concluíram que o grão na região misturada da solda (*Weld Nugget*) é muito refinado e que a precipitação se distribui igualmente nessa zona. Os estudos foram conduzidos através da soldagem por FSW, da liga 2014 de alumínio, utilizando ferramentas com 4 tipos distintos de pinos acoplados (essenciais para mistura do material durante o processo).

O ângulo de inclinação da ferramenta em relação ao plano das peças soldadas por FSW também tem um papel crucial no controle de defeitos durante o processo FSW. Chen et al. (2006) observou que pequenos ângulos de inclinação resultam num fluxo reduzido de material durante o processo, gerando juntas com pouca ligação na zona misturada (*kissing bonds*), o que por sua vez reduz a resistência à tração da solda. Por outro lado, foi constatado que altos ângulos de inclinação acabam por gerar o *flash*, formação caracterizada pelo “espalhamento” lateral do material plastificado. Hua et al. (2006) confirmaram as mesmas conclusões ao atestar o efeito do ângulo de inclinação da ferramenta no fluxo de material na região da solda FSW da liga 5456 de Alumínio, gerando defeitos e controlando as propriedades na zona da junta soldada.

Scalpi et al. (2007) reportaram que o perfil do *shoulder* da ferramenta FSW influencia o tamanho do grão na zona misturada e, conseqüentemente, afeta as propriedades mecânicas da solda obtida. Hirata et al. (2007) abordaram a relação entre a microestrutura nessa zona misturada e as propriedades mecânicas da solda, concluindo que o refino de grão na região da mistura melhora uma ampla gama de propriedades da junta obtida.

Kumar e Kailas (2008) estudaram a influência da carga axial aplicada sobre as peças trabalhadas e o posicionamento relativo da interface dessas peças em relação ao eixo da ferramenta, avaliando as implicações desses parâmetros sobre a resistência à tração da junta soldada. Foi então observado que existe uma carga axial

ótima acima da qual a solda torna-se livre de defeitos, com uma eficiência de união de 84%.

Sakthivel et al. (2009) investigaram o efeito da variação da velocidade transversal (velocidade de soldagem) no FSW sobre as propriedades metalúrgicas e mecânicas de uma liga de Alumínio, concluindo que a microestrutura resultante na zona do *nugget* (misturada) é composta por grãos finos equiaxiais, mais homogêneos em velocidades transversais reduzidas.

Fahimpour et al. (2012) compararam juntas da liga 6061 de Alumínio obtidas por processos de soldagem FSW e TIG (GTMAW), concluindo que as juntas soldadas por processo de fricção e mistura possuem melhores propriedades de resistência à corrosão.

De maneira geral, os trabalhos desenvolvidos a partir de 2012 pelos mais diversos autores (Koilraj et al., Elatharasan et al., dos Santos JF., entre outros) passaram a focar de maneira mais incisiva a otimização dos parâmetros do processo FSW (velocidade de rotação, velocidade de soldagem, ângulo de inclinação, perfil de ferramenta, etc) para aplicações diversas, também buscando caracterizar as propriedades mecânicas e microestruturais das juntas soldadas, a partir da variação desses parâmetros (VERMA e MISRA, 2015).

Na indústria atual, o processo de Soldagem por Fricção e Mistura (FSW) vem sendo adaptado para a confecção de uniões cada vez mais complexas, acarretando numa melhora significativa na qualidade e custo dos bens produzidos. A medida que o processo vem amadurecendo, designers – aproveitando as vantagens do FSW – vêm desenvolvendo produtos especificamente voltados para este processo de união de superfícies (SINGH, 2012).

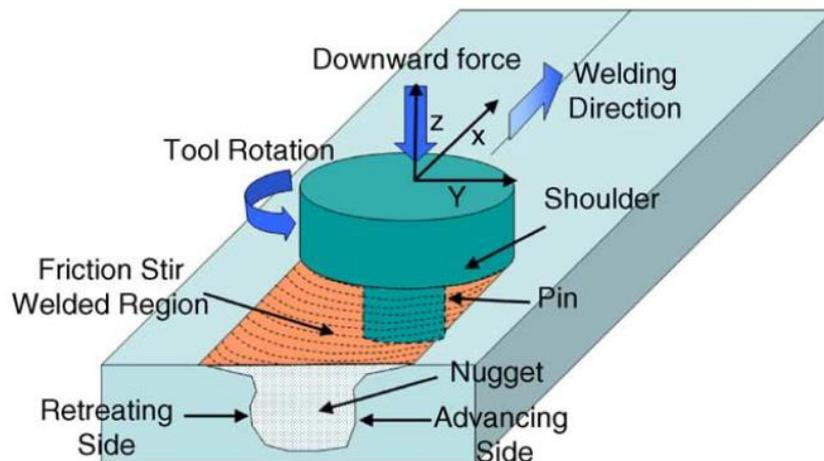
2.2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

2.2.1 Princípio de funcionamento

Como explicitado na seção introdutória deste trabalho, o princípio de funcionamento do processo de soldagem por fricção e mistura (FSW) é simples e direto: Uma ferramenta rotacional não consumível é introduzida na interface entre as duas superfícies que se deseja unir e, a partir do calor gerado pela fricção ferramenta/peça e pela própria deformação plástica do material base, tem-se a plastificação dos materiais na interface, sendo a mistura proporcionada pelo movimento rotatório/translacional da ferramenta, formando assim a junta soldada.

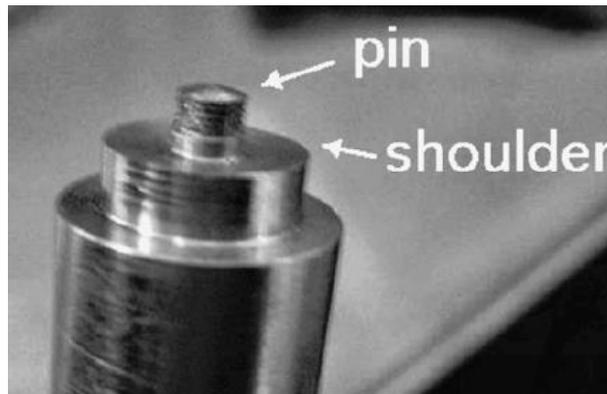
Para um entendimento mais profundo acerca dos fenômenos físicos que permeiam este processo, é necessária a definição de alguns elementos e conceitos, representados esquematicamente na figura:

Figura 1. Esquema básico do processo FSW (MISHRA e MA, 2005)



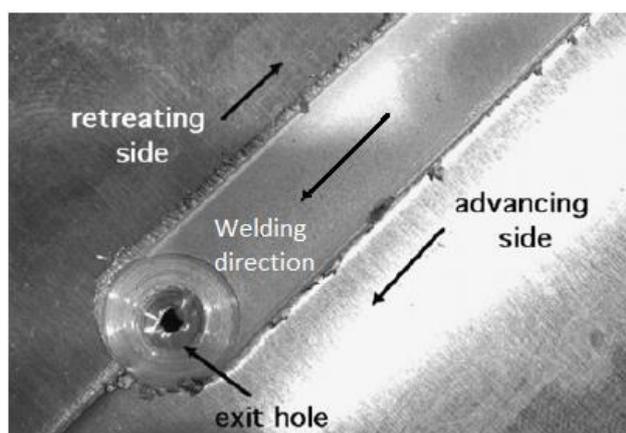
- **Ferramenta:** Elemento metálico não consumível a ser introduzido na interface das superfícies que se deseja soldar. É composto por um “ombro” (*shoulder*, em contato com a superfície em soldagem) e um pino (*pin*, introduzido na interface entre as superfícies), sendo este último confeccionado com um comprimento um pouco menor do que a espessura das chapas a serem soldadas. Recebe movimento rotativo de um eixo mecânico (proveniente de um motor elétrico acoplado), transmitindo-o à interface da junta.

Figura 2. Detalhe da ferramenta rotacional para FSW (NANDAN et al., 2008)



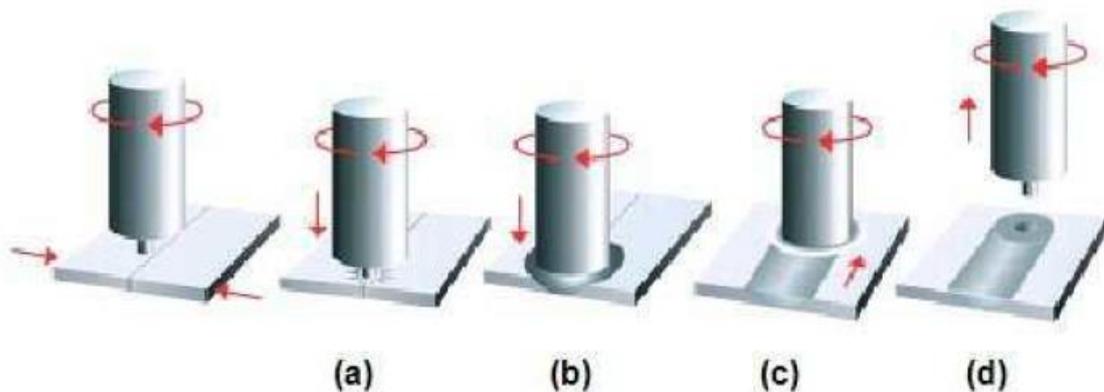
- Direção de soldagem: Direção na qual a ferramenta é transladada, formando assim o cordão soldado.
- Downward Force: Força aplicada pela ferramenta contra as superfícies sendo soldadas.
- Rotação da ferramenta: Imposta pelo eixo mecânico acoplado à ferramenta, define o sentido e a velocidade de rotação desta, delimitando assim as zonas conhecidas como *Advancing side* e *Retreating side*.
- Retreating side: Zona da junta onde material plastificado é circulado da região a frente para a região traseira à ferramenta, através do movimento rotativo imposto pelo conjunto pino/ombro.
- Advancing side: Zona da junta onde material plastificado é circulado da região traseira para a região a frente da ferramenta, através do movimento rotativo imposto pelo conjunto pino/ombro.
- Nugget: Região formada pelo material plastificado e misturado durante o processo FSW.

Figura 3. Detalhe do movimento da ferramenta rotacional e zonas formadas durante o FSW (NANDAN et al., 2008 - adaptado)



Inicialmente, as superfícies – chapas, no caso em estudo – devem ser firmemente fixadas, com a finalidade de evitar o movimento indesejado durante a soldagem. Em seguida, a ferramenta rotacional é ativada, sendo lentamente introduzida na interface entre as peças até que o seu ombro encoste sobre a superfície das chapas. O calor é gerado devido à fricção entre a ferramenta e o material da peça, plastificando-o a uma temperatura abaixo da fusão. Iniciado o movimento de translação, material plastificado passa a circular em volta da ferramenta em movimento, sendo carregado da região a frente para a região traseira desta, à medida que a translação ocorre. O contato com a superfície do ombro “forja” o material depositado no trilho da ferramenta em movimento, conferindo um acabamento planificado à junta soldada.

Figura 4. Esquema básico dos processos envolvidos durante o FSW: a) Início da soldagem, b) Introdução da ferramenta, c) Processo FSW de união das superfícies e d) Retirada da ferramenta (fim do processo). (SINGH, 2012)



2.2.2 Parâmetros de Soldagem

Para a realização do processo de Soldagem por Fricção e Mistura, se faz necessário conhecer e manipular diversos parâmetros, com a finalidade de se obter a solda desejada. Abaixo lista-se os principais parâmetros a serem observados durante a soldagem por FSW. Com exceção às referências explicitadas, toda esta seção foi fundamentada em Singh (2012).

- Design da Ferramenta:

A geometria da ferramenta é o aspecto mais influente do desenvolvimento do processo FSW (MISHRA e MA, 2005). Seu design é capaz de influenciar diversos fenômenos e variáveis durante a soldagem, tais como: geração de calor, fluxo de material plastificado, potência requerida e velocidade de soldagem – tanto rotacional quanto transversal, sendo assim fundamental para o controle de qualidade da solda obtida. Apesar dos conhecimentos obtidos com o passar do tempo, o efeito da geometria da ferramenta no FSW ainda não foi sistematicamente classificado (FUJII et al., 2005).

Para suportar as condições do processo, é necessário ainda que a ferramenta seja confeccionada de modo a possuir alta resistência mecânica e a corrosão, dureza, resistência ao desgaste em altas temperaturas de serviço e baixa condutividade térmica.

Apesar de realizados esforços significativos no passado recente para desenvolver ferramentas economicamente viáveis e resistentes, a maioria das pesquisas conduzidas têm sido de natureza essencialmente empírica, e um desenvolvimento mais aprofundado nessa área é necessário para melhorar a viabilidade do processo FSW, especialmente em ligas mais duras (SINGH, 2012; FUJII et al., 2005).

Convencionalmente adota-se para projeto da ferramenta um diâmetro de pino aproximadamente igual à espessura das superfícies que se deseja soldar, com um comprimento um pouco menor do que essa espessura. No tocante ao ombro, seu comprimento deve permitir uma boa fixação no eixo mecânico rotativo, enquanto que seu diâmetro não deve ser muito grande, com o intuito de diminuir a região de material plastificado (SINGH, 2012).

- Velocidades:

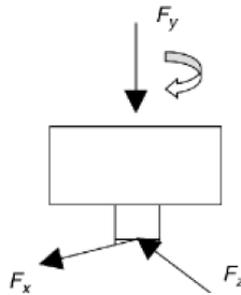
São duas as principais velocidades a serem parametrizadas durante o processo de soldagem por fricção e mistura: as velocidades de rotação da ferramenta e de translação sobre a junta sendo soldada, que influenciam em conjunto a geração de calor durante o processo. Apesar do relacionamento complexo entre essas variáveis, pode-se afirmar, de maneira geral, que o aumento da velocidade rotacional, bem como a diminuição da velocidade de translação da ferramenta, contribui para o aumento do calor gerado (KUMAR E RAMANA, 2014).

Apesar do papel fundamental do calor em plastificar o material da junta e reduzir as forças que atuam sobre a ferramenta, um aquecimento excessivo pode trazer sérias consequências, em especial no que se refere às propriedades finais da solda.

- Forças Aplicadas:

Durante a soldagem por FSW são três as principais forças atuantes no processo, todas elas relacionadas com a ferramenta, tal como é representado na imagem abaixo:

Figura 5. Esquema das forças atuantes durante o processo FSW (SINGH,2012).



F_x : Paralela à direção de soldagem, é basicamente determinada pela resistência do material à translação da ferramenta, podendo ser estimada uma vez conhecidas as propriedades desse material. Essa força tende a ser reduzida à medida que o material é aquecido e plastificado em torno da ferramenta.

F_y : Perpendicular ao plano sendo soldado, é necessária para manter a ferramenta devidamente introduzida na região da interface. Dentre os fatores que afetam o seu módulo, destaca-se as propriedades do material soldado e a velocidade de translação.

F_z : Atuando perpendicularmente à direção de translação, essa força deriva da fixação e junção das superfícies para soldagem, contribuindo para o atrito/fricção entre o pino da ferramenta e o material sendo soldado. Tal fricção, juntamente com a força vertical F_y , requerem do eixo mecânico acoplado um determinado torque, que afetará o fluxo de material plastificado e o desgaste da ferramenta (SINGH, 2012).

- Ângulo de inclinação:

Outro parâmetro durante o processo FSW é o ângulo de inclinação da ferramenta em relação ao plano das superfícies a serem soldadas. É sabido que a inclinação da

ferramenta entre 2º e 4º, de modo que a parte traseira fique mais baixa do que a região frontal, é capaz de melhorar a qualidade da solda obtida, auxiliando o fluxo e o forjamento do material plastificado no “trilho” da ferramenta (SINGH, 2012).

2.2.3 Geração de calor

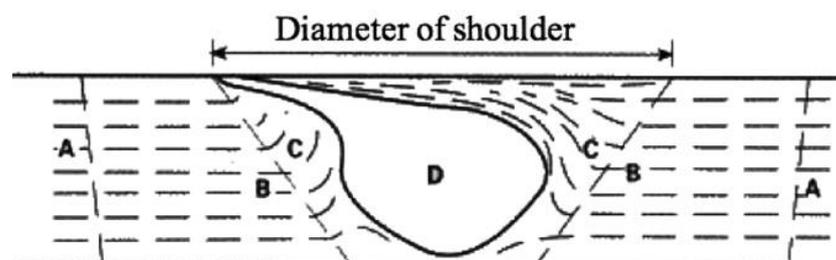
Durante a soldagem por fricção e mistura (FSW), o calor é gerado basicamente devido a 2 fatores: a fricção entre a ferramenta rotacional e a peça sendo soldada e a deformação plástica do material da junta. Ambos associados à velocidade da rotação da ferramenta. De maneira geral, assume-se que a geração de calor ocorre predominantemente na região do ombro da ferramenta – devido à sua maior área de contato com a peça (SINGH, 2012).

Apesar de existirem literaturas que abordam analiticamente o tema da geração de calor no processo FSW, este trabalho dará enfoque a medidas experimentais, em acordo com seu objetivo de analisar empiricamente o comportamento de uma junta soldada pelo processo de fricção e mistura.

- Zonas Térmicas:

Com o calor sendo transmitido à peça trabalhada, parte dessa energia é absorvida pela microestrutura do material, resultando em propriedades mecânicas diferenciadas. Como esse processo ocorre de maneira diferenciada ao longo da peça – devido ao gradiente térmico existente a partir da região de contato entre a ferramenta e as superfícies – zonas térmicas distintas são formadas, como mostrado abaixo:

Figura 6. Esquema das zonas térmicas formadas durante o processo FSW: a) Metal Base, b) Zona Termicamente Afetada, c) Zona Termomecanicamente Afetada e d) Zona Misturada (NANDAN et al., 2008).



Tais zonas serão posteriormente abordadas ao se discutir a Microestrutura formada durante o processo de Fricção de Mistura.

- Campo de temperatura:

O ciclo de soldagem, como um todo, apresenta comportamentos térmicos distintos durante sua execução, formando os seguintes estágios:

Dwell: Estágio no qual o material é pré-aquecido pela ferramenta rotacional inserida na interface, ainda em estado estacionário, de modo a atingir uma temperatura suficiente para iniciar o processo de translação;

Aquecimento Transiente: Ao transladar a ferramenta, ocorre inicialmente um estado transiente onde o perfil de temperatura em torno da ferramenta varia de maneira complexa;

Estado pseudo-estacionário: Quando o processo de translação se estabiliza, o campo de temperatura permanece essencialmente constante, do ponto de vista macroscópico;

Estado pós-estacionário: Perto do fim da solda, o calor produzido na extremidade da peça tende a “refletir” para a região em torno da ferramenta, gerando um superaquecimento localizado (SINGH, 2012).

Mahoney et al. (1998) realizaram a soldagem por FSW de duas chapas da liga 7075Al-T651 de alumínio com 6.35mm de espessura, medindo a distribuição de temperatura em torno da zona misturada. De maneira geral, chegou-se a conclusão de que o campo de temperatura durante o estado pseudo-estacionário apresenta seus valores de pico na região próxima à zona misturada, na superfície superior da peça. Além disso, observou-se que à medida que se afasta da zona misturada em direção às extremidades da peça e da superfície superior em direção à superfície inferior, as temperaturas registradas decaem.

- Energia e torque:

Ao mesmo tempo que se deseja aumentar a velocidade de translação sobre a peça, minimizando o calor transmitido (consequentemente reduzindo os impactos sobre a microestrutura e propriedades da junta soldada) e aumentando a produtividade (reduzindo o consumo energético e o tempo do processo de soldagem), é necessário também ponderar acerca da temperatura na região em torno da ferramenta, fundamental para promover o fluxo de material e prevenir danos ao equipamento.

De maneira geral, à medida que a velocidade de translação aumenta, mais “fria” se torna a região a frente da ferramenta, o que reduz a plastificação do material e aumenta o torque necessário para fazer a “mistura” característica do processo FSW. Numa situação crítica, o fluxo de material pode ser comprometido e a ferramenta rotacional pode vir à fratura (SINGH, 2012).

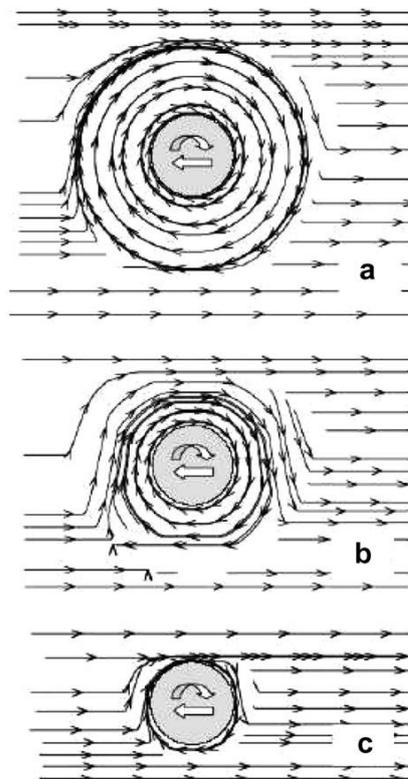
2.2.4 Fluxo de material

Estudos experimentais e simulações computacionais demonstraram várias características relativas ao fluxo de material durante o FSW e o processo de união. Hoje sabe-se que a maior parte do fluxo de material ocorre através do *retreating side* e que o transporte de material plastificado para a região do “trilho” atrás da ferramenta forma a junta soldada.

Basicamente existem três tipos de fluxo que afetam o transporte de material plastificado durante o FSW. Primeiramente existe um anel de fluxo circular de material plastificado em torno da ferramenta, causado principalmente pelo movimento de rotação e fricção entre a ferramenta e o material da peça. Depois, o movimento rotacional do pino tende a empurrar o material plastificado para a região traseira próxima à ferramenta, o que por sua vez gera um contra fluxo de uma quantidade de material equivalente para a região à frente. Este último ocorrendo em zonas mais afastadas em relação à ferramenta. Por último, existe o movimento relativo entre peça e ferramenta rotacional. O fluxo total de material plastificado durante o FSW ocorre pela composição desses três efeitos simultaneamente (NANDAN et al., 2008).

Estão apresentadas a seguir as linhas de fluxo de material em planos horizontais em volta da ferramenta, em três elevações diferentes:

Figura 7. Linhas de fluxo de material plastificado em diferentes planos horizontais próximos à ferramenta. a) 0.35mm, b) 1.59mm e c) 2.28mm abaixo da superfície superior, para uma placa de aço inoxidável 304 com 3.18mm de espessura soldada numa velocidade de 4mm/s e rotação de 300rpm (NANDAN et al., 2008)



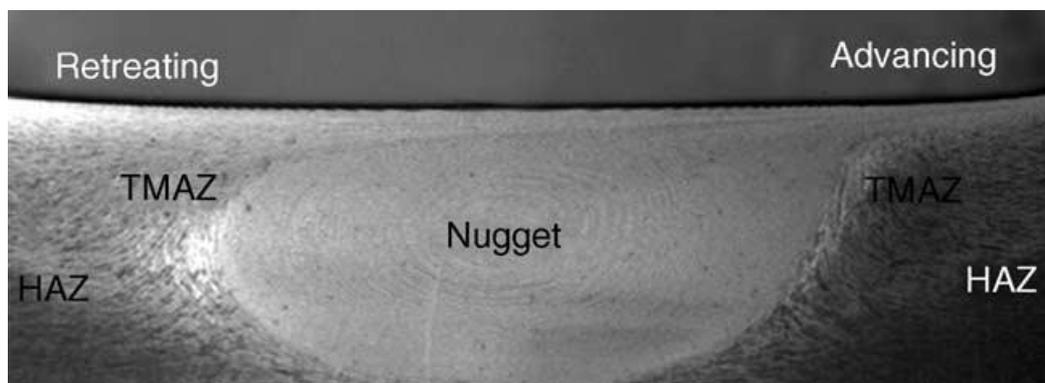
Como se pode observar, as linhas de fluxo mostram a existência de um anel próximo à ferramenta onde o fluxo de material é circular, sendo seu tamanho afetado pelas propriedades do material, parâmetros de soldagem e taxa de transmissão de calor para a ferramenta. Nas imagens, é possível observar ainda que essa zona de recirculação é maior em regiões mais próximas à superfície superior, devido ao maior transporte promovido pelo ombro da ferramenta.

Passada a zona de recirculação, pode-se observar que o fluxo de material plastificado se dá em maior parte no *retreating side*, havendo também um contra fluxo pelo *advancing side*, mais próximo à ferramenta em elevações menores. Uma consequência importante do fluxo precário de material no *advancing side* é a formação de “buracos de minhoca”, que serão tratados mais especificamente em tópicos posteriores deste trabalho. A velocidade máxima é obtida próximo ao ombro da ferramenta, na superfície superior, decaindo rapidamente à medida que se afasta dessa região (NANDAN et al., 2008).

2.2.5 Microestrutura

De maneira geral, a solda obtida pelo processo FSW possui tamanho de grão reduzido, sem oxigênio aprisionado ou porosidade gasosa. Baseado na caracterização microestrutural, três zonas distintas podem ser observadas: a Zona Misturada (*nugget*), a Zona Termomecanicamente Afetada (TMAZ) e a Zona Termicamente Afetada (HAZ).

Figura 8. Macrografia das diferentes zonas microestruturais obtidas após o processamento da liga 7075Al-T651 de Alumínio pelo processo de Fricção e Mistura (MISHRA e MA, 2005).



É interessante notar que esta mesma categorização foi apresentada na análise das Zonas Térmicas resultantes do FSW, em tópicos anteriores deste trabalho. Isto ocorre porque a geração de calor – juntamente com as taxas de deformação impostas – são os principais fatores de influência sobre a microestrutura resultante da soldagem por FSW.

- Zona Misturada (*nugget*):

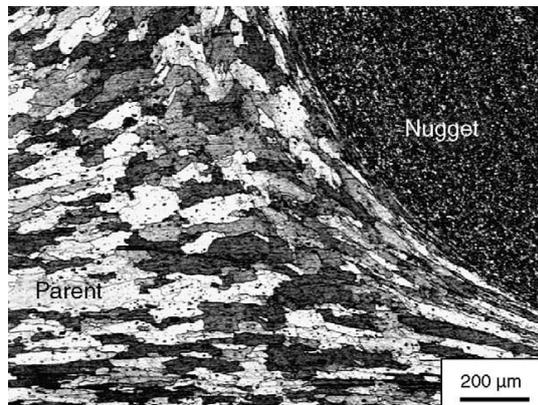
Nessa região, a intensa deformação plástica associada com o calor gerado por fricção resulta numa microestrutura refinada com grãos equiaxiais, recristalizada dinamicamente e em geral com baixa densidade de discordâncias. O formato da região misturada e o tamanho dos seus grãos dependem significativamente dos parâmetros de soldagem e propriedades do material base. Enquanto que altas deformações impostas resultam numa diminuição do tamanho de grão, o aumento na temperatura de pico durante o ciclo térmico contribui para o aumento deste, sendo esta temperatura de pico o fator determinante na formação dos grãos recristalizados em ligas de Alumínio. Dessa forma, o tamanho de grão tende a aumentar com o acréscimo na rotação da ferramenta ou redução da velocidade transversal – ambos

contribuem para o aumento do calor gerado na Zona Misturada – podendo acontecer formação de gradientes à medida que se afasta da linha central de soldagem (MISHRA E MA, 2005).

- Zona Termomecanicamente Afetada (TMAZ):

Uma das particularidades do processo FSW é a formação de uma zona de transição entre a região misturada/recristalizada e o material base, denominada por Zona Termomecanicamente Afetada. A TMAZ experimenta tanto deformação quanto aumento de temperatura, mas não apresenta recristalização devido às baixas taxas de deformação plástica impostas. A dissolução de alguns precipitados é observada na TMAZ, a depender do ciclo térmico imposto. Uma característica própria dessa região é a estrutura altamente deformada, formando uma fronteira distinta com a Zona Misturada (MISHRA E MA, 2005).

Figura 9. Microestrutura típica da TMAZ na liga 7075Al de Alumínio processada por Fricção e Mistura (MISHRA E MA, 2005).



- Zona Termicamente Afetada (HAZ):

Após a TMAZ, forma-se na peça trabalhada por FSW uma Zona Termicamente Afetada, que experimenta um ciclo térmico, mas não sofre deformação plástica alguma. A HAZ retém a microestrutura do material base, mas ao atingir altas temperaturas pode sofrer algumas mudanças, principalmente no tocante à estrutura dos precipitados.

2.2.6 Propriedades e defeitos

Após a soldagem por fricção e mistura, é de fundamental importância o conhecimento das propriedades da junta soldada obtida, bem como seus principais defeitos decorrentes do processo, para garantir a segurança e eficiência da sua aplicação. A seguir, realiza-se uma breve descrição de algumas propriedades encontradas para soldas FSW:

- Tensões residuais: Apesar de ocorrer no estado sólido e em temperaturas relativamente baixas, o FSW é caracterizado pela existência de tensões residuais significativas quando comparadas com outros processos de soldagem. Isso ocorre em grande parte devido ao seu mecanismo de fixação das peças a serem soldadas, muito mais rígido do que os empregados em métodos convencionais de soldagem, o que acaba por restringir a contração tanto longitudinal quanto transversal da peça durante seu resfriamento pós FSW (MISHRA E MA, 2005).
- Dureza: Analisando ligas de Alumínio endurecidas tanto por precipitação quanto por solução sólida, concluiu-se que o processo FSW acarreta na formação de uma região de dureza reduzida em ligas endurecidas por precipitação, perto da Zona Misturada. Isso ocorre em grande parte porque, apesar da redução do tamanho de grão durante o processo, a dissolução de precipitados na região próxima a solda durante o ciclo térmico diminui a dureza da microestrutura local (MISHRA E MA, 2005).
- Resistência Mecânica: Estudos mostraram que a soldagem por Fricção e Mistura resulta numa resistência mecânica menor se comparada com as propriedades do material base. Isso é explicado pela redução no número de discordâncias pré-existentes juntamente com a dissolução de precipitados endurecedores. A realização de tratamentos térmicos de envelhecimento pós-soldagem apresentou melhorias na tensão de escoamento devido ao aumento da fração volumétrica dos precipitados, o que também acaba comprometendo a resistência máxima à tração e ductilidade do material (MAHONEY et al., 1998).
- Fadiga: Nos últimos anos vários estudos têm sido conduzidos com o intuito de analisar a resistência à fadiga de peças soldadas por FSW, o que permitiu tirar algumas conclusões acerca do desempenho relativo a esta

propriedade. Foi constatado que, de maneira geral, as peças soldadas por Fricção e Mistura apresentam menor resistência à fadiga em relação ao material base, apesar de possuírem maior resistência se comparado com outros métodos convencionais de soldagem. A qualidade superficial das soldas por FSW constitui um fator importante na resistência à fadiga das peças obtidas. O efeito dos parâmetros de soldagem durante o processo FSW apresentam influência complexa sobre a resistência à fadiga, o que não permitiu a obtenção de padrões consistentes relativos a essa propriedade até o presente momento (MISHRA e MA, 2005).

Com relação aos principais defeitos e seus comportamentos observados nas peças soldadas por FSW, pode-se destacar:

- Porosidade e defeitos superficiais: Nenhuma característica específica do fluxo do material foi relacionada com a formação de porosidade, portanto nenhum mecanismo unificado relativo a este defeito é conhecido;
- “Buracos de minhoca”: formados e intensificados com o aumento relativo da velocidade de translação em relação à velocidade rotacional da ferramenta, devido ao fluxo inadequado de material plastificado em direção ao fundo da solda;
- “Flash” ou formação defeituosa superficial: Ocasionado em função do superaquecimento da superfície de contato entre o ombro da ferramenta e o material da peça;
- Trincas e vazios: Geralmente influenciados pelo aumento na velocidade transversal de soldagem, possuindo também dependência com a liga do material base.

De maneira geral, os defeitos tendem a ser concentrar no *advancing side* devido à transição microestrutural abrupta entre a refinada Zona Misturada (*nugget*) e a Zona Termomecanicamente Afetada (TMAZ), transição essa que ocorre de maneira mais suave no *retreating side*, caracterizando esta última como uma zona relativamente livre de defeitos (*defect free*) (NANDAN et al., 2008).

3 METODOLOGIA

Este trabalho, de acordo com os objetivos previamente delineados, classifica-se como uma pesquisa básica estratégica, de caráter explicativo e metodologia experimental, buscando ampliar os conhecimentos existentes na área de processos de união de superfícies – Engenharias – com o intuito de propor soluções e melhorias para reconhecidos problemas práticos enfrentado pela indústria atual, nos seus mais diversos setores.

Através da realização de experimentos baseados na literatura da fundamentação teórica deste trabalho, em laboratórios do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco (DEMEC – UFPE), foram obtidas pelo Processo de Fricção e Mistura (FSW) juntas soldadas de ligas de alumínio. Posteriormente, conduziram-se ensaios mecânicos – tanto destrutivos quanto não-destrutivos – para avaliar as propriedades da junta. Juntamente com a caracterização microestrutural do material soldado, foram então identificados fatores que contribuem e determinam a ocorrência dos fenômenos característicos do processo, realizando-se também uma comparação com valores da literatura para verificação da qualidade e eficiência do processo conduzido.

Como mencionado anteriormente, esta seção será subdividida de maneira simplificada em 4 tópicos, que traduzem os objetivos específicos previamente estabelecidos neste trabalho. São eles: Desenvolvimento do aparato experimental, Execução de soldagens por fricção e mistura de chapas de alumínio, Avaliação de defeitos e propriedades mecânicas e Caracterização Microestrutural.

3.1 DESENVOLVIMENTO DO APARATO EXPERIMENTAL

Assim como os demais processos de união de superfícies, o processo de soldagem por fricção e mistura requer uma infraestrutura própria para sua realização, exigindo cuidados especiais durante sua execução visando a otimização do processo e segurança dos operadores envolvidos. Por ser um processo de união em estado sólido, as grandezas de torque e força apresentam magnitudes relevantes que devem ser consideradas no dimensionamento da infraestrutura montada. Por se basear na geração de calor por fricção, o aspecto térmico deve ser previamente estimado e acompanhado continuamente durante todo o procedimento.

Atualmente na Indústria e na Academia diversas montagens são utilizadas para a realização deste tipo de soldagem, variando desde estruturas mais rígidas e fixas até aparatos robotizados com diversos graus de liberdade – o que acaba também por ampliar a gama de operações possíveis de serem realizadas sobre os mais diversos materiais e configurações geométricas. Independente da variação adotada, o maquinário básico necessário ao FSW é composto basicamente por 3 estruturas bem definidas:

- Estrutura de transmissão e geração de potência;
- Estrutura de fixação;
- Ferramenta rotacional.

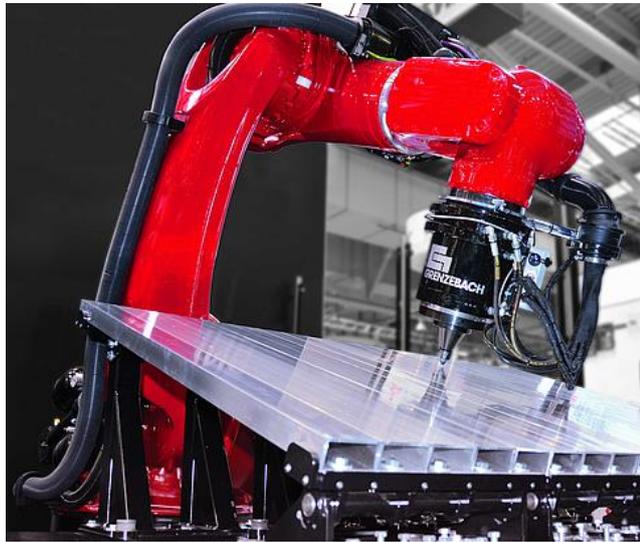
Figura 10. Exemplo de maquinário rígido e fixo para a realização de soldagens planas por fricção e mistura.

(Fonte: <http://web.mst.edu/~fricstir/>)



Figura 11. Exemplo de maquinário robótico com diversos graus de liberdade para a execução de soldagens por fricção e mistura.

(Fonte: <https://www.grenzebach.com/products-markets/friction-stir-welding/#>)



Devido à inexistência de trabalhos consistentes de natureza empírica anteriores a este na presente Instituição de Ensino – UFPE, fez-se necessário o desenvolvimento completo do aparato experimental para a realização das soldagens por fricção e mistura. Nesse sentido, em função dos recursos limitados e restrição de tempo para completar o estudo, parte da infraestrutura necessária teve que ser adaptada de equipamentos já presentes no Departamento de Engenharia Mecânica – DEMEC, sendo outra parte fornecida por fontes externas e ainda alguns componentes completamente projetados e fabricados para esta aplicação. Para a execução do FSW no DEMEC da UFPE, será utilizado o Laboratório de Fabricação por Usinagem.

3.1.1 Aparato experimental adaptado

A parte do aparato experimental que necessitou ser adaptada de equipamentos já existentes no DEMEC compreende a estrutura de geração e transmissão de torque (potência), que também terá papel na fixação das chapas de alumínio a serem soldadas. Para isso, foi utilizada a máquina fresadora tipo vertical do próprio Laboratório de Usinagem (com seu cabeçote de topo), possuindo potência suficiente para realizar a soldagem de placas de alumínio segundo os parâmetros da literatura utilizada neste trabalho. Para adequar o equipamento ao processo FSW, foi dada uma inclinação de 3° ao cabeçote, acoplando também um bocal adaptador para posterior fixação da ferramenta rotacional.

Figura 12. Fresadora a ser utilizada no Laboratório de Fabricação por Usinagem do DEMEC, UFPE. Destaque para a inclinação de 3° (FABRICIO FILHO et al., 2017).



3.1.2 Aparato experimental fornecido

Além da estrutura adaptada, parte do aparato a ser utilizado teve de ser adquirido especificamente para este estudo por se tratar de componentes dedicados ao processo FSW, inexistentes até então no atual departamento. Este é o caso da ferramenta rotacional e das chapas de alumínio que serão soldadas ao longo deste trabalho.

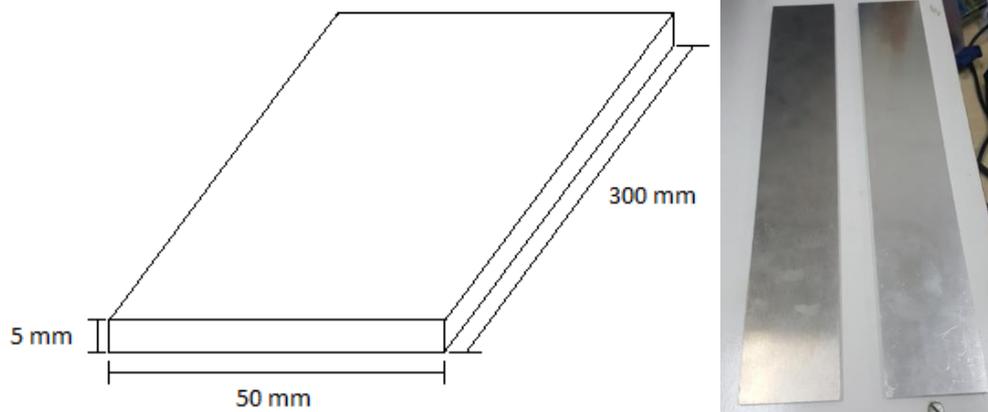
Tais equipamentos foram então importados do Japão através do programa Brasil-Japão, numa parceria entre a Universidade Federal de Pernambuco – representada pelo prof. Armando Shinohara – e a Universidade de Osaka – representada pelo prof. Hidetoshi Fujii, na ocasião do PBL acerca da soldagem por fricção e mistura conduzido na própria UFPE em 2016.

Na ocasião, foram fornecidas diversas unidades de placas de alumínio, de diversas ligas específicas, variando entre 3 e 5mm de espessura. As dimensões da chapa são de 50x300mm. Diversas unidades de ferramentas rotacionais também foram importadas, também específicas para as duas espessuras supracitadas, trabalhando apenas com o material alumínio.

Figura 13. Ferramentas próprias para o FSW adquiridas para este trabalho, dedicadas para placas de alumínio de 3mm (à esquerda) e 5mm (à direita). (Fonte: acervo pessoal)



Figuras 14 e 15. Exemplo das chapas de alumínio adquiridas para soldagem por fricção e mistura e suas dimensões. (Fonte: acervo pessoal)

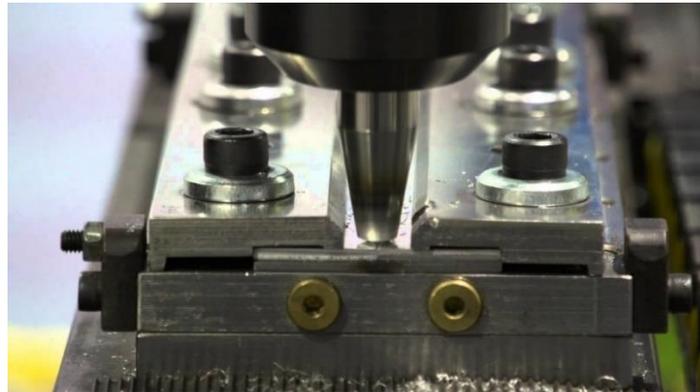


3.1.3 Aparato experimental projetado

Finalmente, alguns últimos componentes do maquinário experimental necessário ao FSW foram então projetados e fabricados especificamente para este estudo, observando os equipamentos adaptados e fornecidos anteriormente no tocante à compatibilidade estrutural. Dessa forma, uma estrutura de fixação para as placas de alumínio sobre a mesa da fresadora universal adaptada foi desenvolvida pelo próprio aluno, a partir do zero. Por se tratar de um trabalho de natureza exploratória com limitação de recursos, o projeto do equipamento se deu de forma essencialmente prática, prezando pela simplicidade, baixo custo, durabilidade e versatilidade.

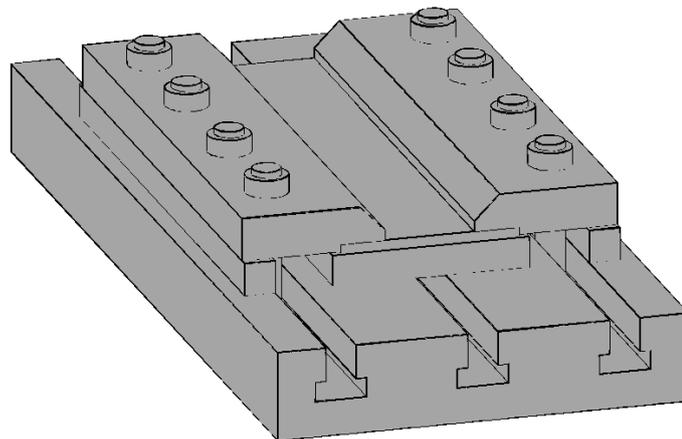
O design principal da estrutura de fixação foi inspirado em exemplos encontrados na literatura, academia e indústria, para situações onde as condições de operação eram similares ao aparato experimental até então montado.

Figura 16. Modelo de Fixador FSW empregado atualmente na indústria e pesquisa, utilizado como base para o projeto do fixador deste trabalho. (ESAB, 2014).

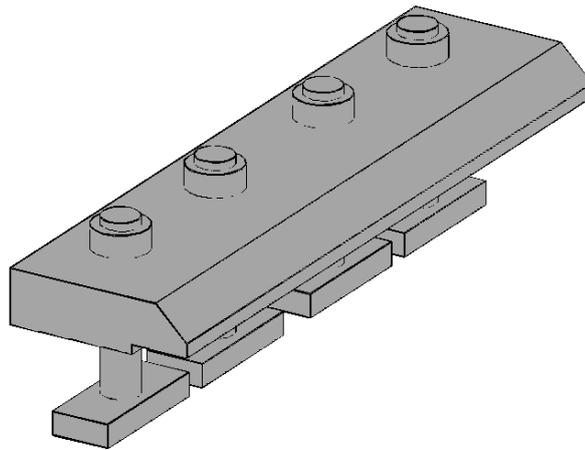


Observando as características da mesa da fresadora universal utilizada neste estudo, chegou-se a um projeto inicial para a estrutura de fixação, como mostra a montagem abaixo. O Software CAD utilizado para este projeto foi o *Microstations*, da Bentley Systems Inc.

Figura 17. Projeto inicial da base fixadora para FSW desenvolvido pelo aluno (Fonte: acervo pessoal)



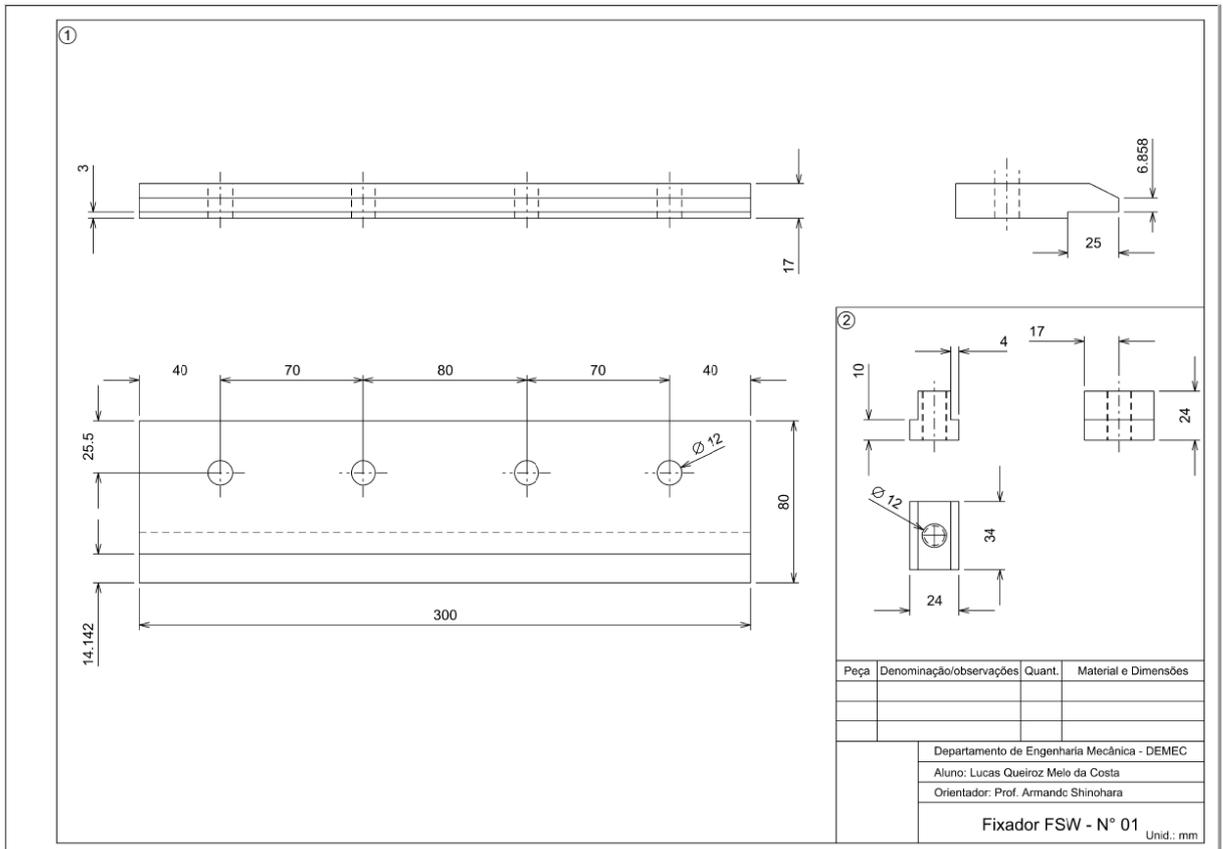
*Figura 18. Detalhe do projeto inicial da estrutura fixadora para FSW desenvolvido pelo aluno
(Fonte: acervo pessoal)*



O material utilizado para o “corpo do fixador” (componente em maior proporção na imagem acima, responsável efetivamente por fixar as chapas de alumínio) foi o Aço Naval (Maraging), em função da sua resistência à corrosão (maior durabilidade) e disponibilidade no departamento (DEMEC – UFPE). As demais peças foram fabricadas em aço comum SAE 1020, em função do seu custo reduzido e boa resistência mecânica. Alguns componentes do fixador, tais como porcas e roscas, foram comprados já em sua forma final, com o intuito de reduzir custos e simplificar o processo de fabricação.

As dimensões para o projeto foram então definidas com base na configuração das reentrâncias na mesa da fresadora universal (como se pode observar em imagens anteriores), tamanho das chapas de alumínio adquiridas (importadas), dimensões das chapas já disponíveis para fabricação no departamento (DEMEC) e componentes comprados em sua forma final (roscas e porcas, com meia polegada de diâmetro). Em função do tempo e infraestrutura disponível para fabricação, a usinagem da estrutura fixadora teve de ser terceirizada para a empresa *Usiman*, de acordo com as especificações supracitadas e representadas no projeto abaixo.

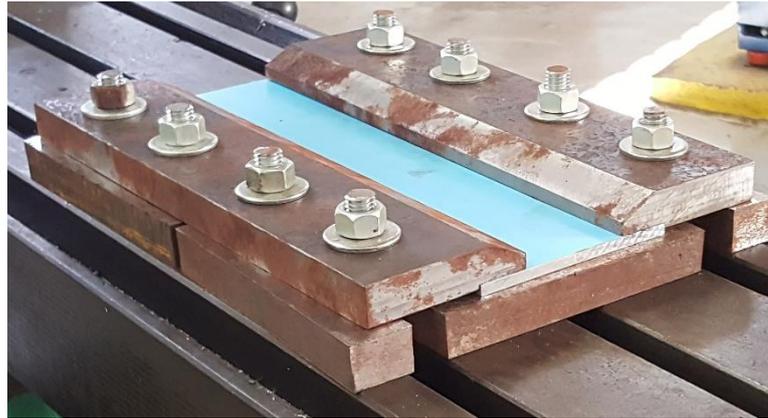
Figura 19. Projeto da estrutura fixadora para FSW desenvolvido pelo aluno
(Fonte: acervo pessoal)



Após a confecção e montagem destes componentes, foi montada e testada a base fixadora para o processo de soldagem por fricção e mistura, como segue:

Figuras 20 e 21. Produto final do projeto da base fixadora para FSW desenvolvido pelo aluno
(Fonte: acervo pessoal)





Ressalta-se que durante a primeira sessão de soldagem FSW (descrita em detalhes nos tópicos seguintes deste trabalho), foi observado um desalinhamento da interface entre as chapas de alumínio em relação a trajetória da ferramenta rotacional imposta pela fresadora universal. Em função disso – tendo em vista a rigidez do projeto inicial da base fixadora – foi necessário aumentar o diâmetro dos furos por onde passam as roscas para fixação (4 em cada estrutura fixadora) num valor de 4mm, permitindo assim maior maneabilidade das chapas e melhor alinhamento do conjunto. A placa de apoio às chapas de alumínio (como mostrado na imagem acima, logo abaixo das chapas em azul) também teve sua superfície de contato com o alumínio retificada, com o intuito de melhorar o alinhamento e planeza da junta confeccionada.

No referente à versatilidade, é válido ressaltar ainda que, embora projetada especificamente para a infraestrutura montada neste trabalho, esta base fixadora tem condições de – com poucas adaptações – se adequar a outros maquinários voltados para a soldagem por fricção e mistura, bem como a chapas planas de diferentes espessuras. Mais especificamente, mudanças teriam de ser concentradas sobre as “porcas em T” utilizadas para “agarrar” a estrutura fixadora nos rasgos em “T” da mesa da fresadora vertical, bem como na espessura da placa de suporte às chapas de alumínio para adequar o conjunto a outras espessuras de juntas a serem soldadas.

3.2 EXECUÇÃO DE SOLDAGENS POR FRICÇÃO E MISTURA DE CHAPAS DE ALUMÍNIO

Nesta seção é detalhada a metodologia adotada para a soldagem de diversas juntas de alumínio pelo processo de Fricção e Mistura, utilizando para isso do aparato experimental desenvolvido anteriormente, com variação de alguns parâmetros.

Ao longo deste trabalho, as soldagens executadas foram realizadas em três sessões distintas, cada uma com características e parâmetros próprios, de modo que experiências adquiridas em sessões anteriores serviram de base para o delineamento do processo de confecção de novas soldas. A intenção – ao final dessas sessões – é maximizar a qualidade da junta obtida, o que é posteriormente atestado através dos ensaios mecânicos conduzidos.

Para facilitar a compreensão, foi elaborado um código para identificar cada sessão de soldagem FSW e cada junta soldada, da seguinte maneira:

- Sessões (em ordem cronológica): 1T, 2T, 3T;
- Juntas soldadas (em ordem cronológica): #0, #1, #2, #3, #4, #5, #6.

Cada sessão de soldagem encontra-se abaixo subdividida nos seguintes tópicos:

- Código da sessão;
- Soldas confeccionadas;
- Parâmetros de soldagem adotados;
- Observações acerca do procedimento experimental.

Vale ressaltar que todos os resultados das soldas obtidas serão posteriormente detalhados em tópicos seguintes deste trabalho.

3.2.1 Sessão 1

Figura 22. Soldagem FSW realizada durante a Sessão 1



- Código da Sessão: 1T
- Solda confeccionada: #0
- Parâmetros de soldagem adotados:

✓ Junta #0:

Liga de alumínio: 5083;

Rotação: 800 rpm;

Sentido de rotação: Anti-horário;

Avanço: 106 mm/min.

- Observações acerca do procedimento experimental:

Na ocasião da primeira sessão de confecção de soldas FSW, era planejada a soldagem de três juntas de alumínio da liga 5083, sob os mesmos parâmetros previamente descritos. No entanto, foi observada durante a fase de montagem um desalinhamento da interface entre as placas em relação à trajetória a ser percorrida pela ferramenta rotacional durante o procedimento. Devido à rigidez da base fixadora até então desenvolvida, foi impossibilitado o realinhamento do conjunto. Dessa forma, optou-se por realizar apenas uma única soldagem, com o intuito de avaliar posteriormente o impacto desse desalinhamento na qualidade da junta soldada.

Durante o procedimento experimental, a profundidade da ferramenta rotacional sob a interface entre as placas de alumínio – parâmetro controlado visualmente, devido a limitações do aparato experimental desenvolvido – teve de ser ajustada. Tal regulagem gerou imperfeições características, a serem discutidas nos tópicos seguintes deste trabalho.

Vale ressaltar que os parâmetros adotados nesta sessão – variado em pequena magnitude para os procedimentos subsequentes – foram adotados com base em material teórico fornecido pelo prof. Hidetoshi Fujii, na ocasião do PBL acerca do FSW ministrado na UFPE em 2016. Além disso, os parâmetros e liga adotados também buscam replicar as condições adotadas pela pesquisa do colega de graduação Luís Carlos Fabrício Filho, que desenvolveu um trabalho (artigo científico) acerca da inspeção de juntas soldadas por FSW através do ensaio de Radiografia Industrial. A intenção com isso é verificar as diferenças na qualidade da junta soldada com o aparato experimental desenvolvido especificamente para este presente trabalho, não utilizado na confecção da junta utilizada no referido artigo científico.

3.2.2 Sessão 2

Figura 23. Soldagem FSW realizada durante a Sessão 2



- Código da Sessão: 2T
- Soldas confeccionadas: #1, #2, #3
- Parâmetros de soldagem adotados:

✓ Juntas #1, #2, #3:

Liga de alumínio: 5083;

Rotação: 800 rpm;

Sentido de rotação: Horário;

Avanço: 106 mm/min.

- Observações acerca do procedimento experimental:

Na segunda sessão de confecção de soldas FSW foram executadas 3 soldagens da mesma liga de alumínio utilizada na primeira sessão (5083), sob os mesmos parâmetros de operação. Nessa ocasião, a base fixadora para as placas de alumínio já havia sido adaptada (como descrito em tópicos anteriores deste trabalho), eliminando o problema de desalinhamento anteriormente observado.

O objetivo desta nova série de soldagens sob os mesmos parâmetros é avaliar o desempenho da base fixadora modificada em comparação às juntas soldadas anteriores (obtidas na sessão 1T e na confecção do artigo científico do colega Fabrício). Além disso, através da repetição do mesmo procedimento experimental, buscou-se observar a variabilidade apresentada pela junta soldada através do método de fricção e mistura, consolidando também a qualidade do processo realizado neste trabalho para estes parâmetros operacionais.

Vale ressaltar que, para as sessões 2T e 3T, uma nova unidade de ferramenta rotacional foi adotada, nas mesmas especificações daquela utilizada para todas as outras juntas soldadas anteriormente.

3.2.3 Sessão 3

Figura 24. Soldagem FSW realizada durante a Sessão 3



- Código da Sessão: 3T
- Soldas confeccionadas: #4, #5, #6
- Parâmetros de soldagem adotados:
- Juntas #4, #5, #6:
 - Liga de alumínio: 2017;
 - Rotação: 800 rpm;
 - Sentido de rotação: Anti-horário;
 - Avanço:
 - #4: 37,5 mm/min;
 - #5: 50 mm/min;
 - #6: 75 mm/min.
- Observações acerca do procedimento experimental:

Durante a terceira e última sessão de soldagens FSW, em função da restrição de tempo e recursos para finalizar o estudo, foram implementadas duas variações de parâmetro simultaneamente, em relação às sessões anteriores: a liga de alumínio e o avanço da ferramenta rotacional durante o procedimento experimental.

Através dessas alterações, buscou-se analisar o comportamento de diferentes ligas quando aplicadas ao método de soldagem por fricção e mistura, além de estudar

a variação do parâmetro de avanço na qualidade e propriedades mecânicas da junta obtida. Novamente, o parâmetro de avanço foi adotado a partir do material teórico fornecido pelo prof. Hidetoshi Fujii, na ocasião do PBL acerca do FSW ministrado na UFPE em 2016.

3.3 AVALIAÇÃO DE DEFEITOS E PROPRIEDADES MECÂNICAS

Com a finalidade de atestar a qualidade da junta soldada pelo método de fricção e mistura, são conduzidos alguns ensaios mecânicos de modo a avaliar certas propriedades mecânicas – estratégicas para a aplicação deste processo de união de superfícies na indústria metalmeccânica, sendo esses: Ensaio de planeza, radiografia industrial, ensaio de tração e ensaio de dobramento.

Nos tópicos abaixo são descritos brevemente cada um destes ensaios, bem como as condições laboratoriais de sua realização no DEMEC - UFPE e a metodologia utilizada para o procedimento experimental.

3.3.1 Ensaio de planeza

O ensaio de planeza é um procedimento utilizado com a intenção de avaliar a planeza/planicidade de uma determinada superfície, seja ela parte de um maquinário, componente estrutural fabricado, juntas soldadas, entre outros. De maneira geral, este teste se dá através da marcação da coordenada “z” (altura) de diversos pontos de uma superfície apoiada sob uma mesa nivelada, através de um equipamento especializado conectado a uma central de processamento computadorizada, onde finalmente um índice de planeza (amplitude entre as medidas tomadas) é calculado como resultado do ensaio.

Para sua realização no DEMEC – UFPE, utilizou-se a máquina do Laboratório de Medição por Coordenadas, modelo *Mitutoyo Coordinate Measuring Machine Beyond Crista C 574*, sob o comando do Prof. Tiago Rolim, responsável pelo referido laboratório.

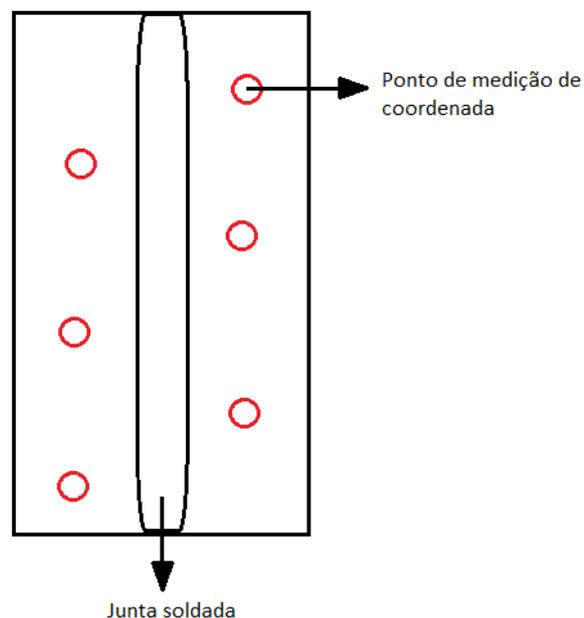
Figura 25. Máquina do Laboratório de Medição por Coordenadas do DEMEC – UFPE, utilizada no ensaio de planeza



O procedimento experimental consistiu em marcar a coordenada “z” (altura) de diversos pontos sob a área do conjunto soldado por FSW, em relação ao plano base da máquina, calculando posteriormente a maior amplitude medida como o “índice de planeza” da peça.

O padrão e a quantidade de medições em cada conjunto foram como mostrados abaixo:

Figura 26. Padrão adotado para medição da planeza no conjunto soldado por FSW



Além de atestar a qualidade do processo FSW implementado neste trabalho, optou-se por fazer um estudo comparativo com uma das amostras soldadas (sem o uso da base fixadora) para o artigo científico do colega de graduação Luis Carlos Fabricio (previamente citado). As peças medidas foram:

- Peça 1 (sem uso da base fixadora): Alumínio liga 5083 “v.1”, Nov/2016;
- Peça 2 (com uso da base fixadora): Alumínio liga 5083 “#3”, Ago/2018;

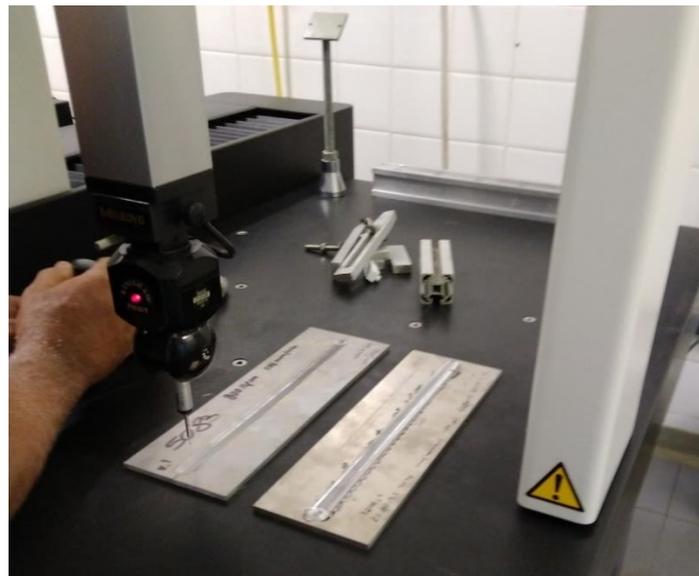
Ambas foram soldadas sob os mesmos parâmetros:

- Rotação: 800 rpm;
- Avanço: 106 mm/min.

Figura 27. Amostras utilizadas na medição por coordenadas, “v.1” (em cima) e “#3” (embaixo).



Figura 28. Procedimento de realização das medições por coordenadas



Resultados referentes a este ensaio (índice de planeza de cada uma das juntas soldadas) são apresentados nas seções seguintes deste trabalho.

3.3.2 Radiografia Industrial

O ensaio não-destrutivo de radiografia industrial é utilizado para se obter informações acerca de defeitos internos de uma peça, como vazios e inclusões, sem destruir/inutilizar o componente ensaiado. Ele consiste na incidência de radiação penetrante – raios-X – sob a peça a ser avaliada, sendo a radiação que consegue

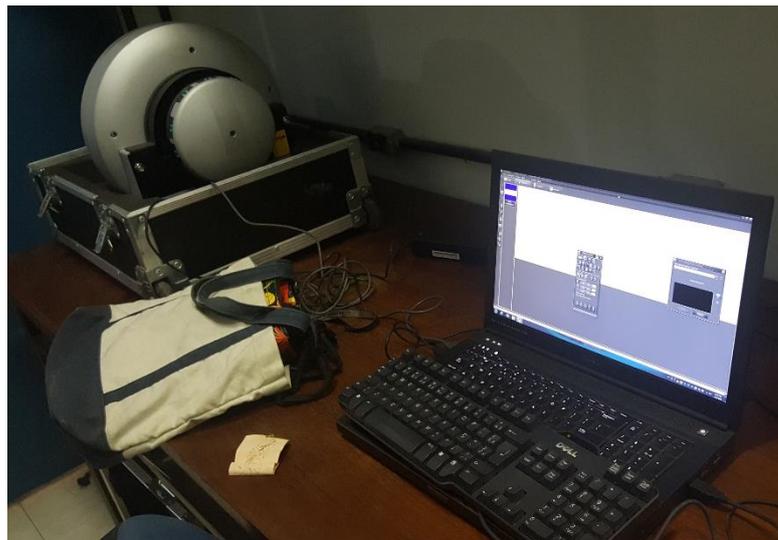
atravessar o objeto posteriormente captada por um filme fotográfico ou digital. Por fim, tem-se a formação de uma imagem que pode ser então processada e interpretada de modo a avaliar a estrutura interna do material.

Para sua realização no DEMEC – UFPE, utilizou-se o emissor de raios-X do Laboratório de Radiografia Industrial, modelo ICM CP120B, juntamente com o equipamento de leitura e reutilização do detector (scanner) modelo HD-CR 35NDT. Os ensaios foram conduzidos pelo prof. Armando Shinohara, responsável pelo referido laboratório.

Figura 28. Montagem laboratorial para a inspeção por radiografia das juntas FSW



Figura 29. Equipamento de leitura e processamento do filme radiográfico



Por se tratar de um ensaio rápido, não-destrutivo e de baixo custo, o procedimento experimental consistiu em radiografar em toda sua extensão todas as amostras soldadas neste trabalho, de acordo com os seguintes parâmetros:

- Voltagem do emissor de raios-x: 120kV;
- Corrente do emissor de raios – x: 1 mA;
- Distância emissor-peça radiografada: 1 m;
- Tempo de exposição: 90s.

Resultados referentes a este ensaio (imagens radiográficas das juntas FSW) são apresentados nas seções seguintes deste trabalho.

3.3.3 Ensaio de dobramento

O dobramento é um ensaio mecânico destrutivo que fornece uma indicação qualitativa acerca da ductilidade de um material. Seu procedimento é simples e fácil de ser implementado, consistindo no dobramento propriamente dito de um corpo de prova de um determinado material a ser analisado. No caso de componentes soldados, o procedimento é realizado sobre um corpo de prova extraído da junta soldada, sendo o trecho da solda posicionado no “centro” da aplicação do esforço de dobramento. Pré-definida a angulação do ensaio, a avaliação é feita no tocante à presença de trincas e outras fissuras no corpo de prova uma vez atingido o dobramento requisitado.

Para sua realização no DEMEC – UFPE, utilizou-se a máquina universal de ensaios do Laboratório de Ensaios Mecânicos do DEMEC – UFPE, modelo EMIC DL 1000. Os ensaios foram conduzidos pelo técnico Rubens, responsável pelo referido laboratório.

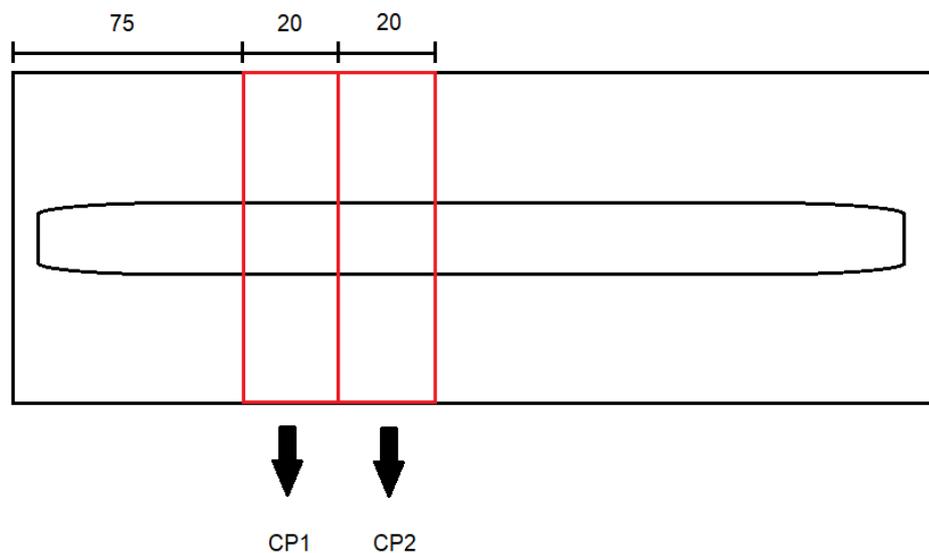
Figura 30. Máquina universal de ensaios preparada para o ensaio de dobramento de amostras das juntas FSW



O procedimento experimental tem início na definição dos corpos de prova. Devido ao tempo necessário para realizar este tipo de ensaio, optou-se por selecionar apenas algumas juntas FSW para a retirada destes corpos, que serão ensaiados tanto em dobramento quanto em tração. Para melhor avaliar as propriedades mecânicas de ambas as ligas soldadas (5083 e 2017, como explanado em tópicos anteriores deste trabalho) e baseado nos resultados obtidos através do ensaio radiográfico, foram escolhidas as juntas “#3” e “#6” para a retirada de corpos de prova para ensaios destrutivos.

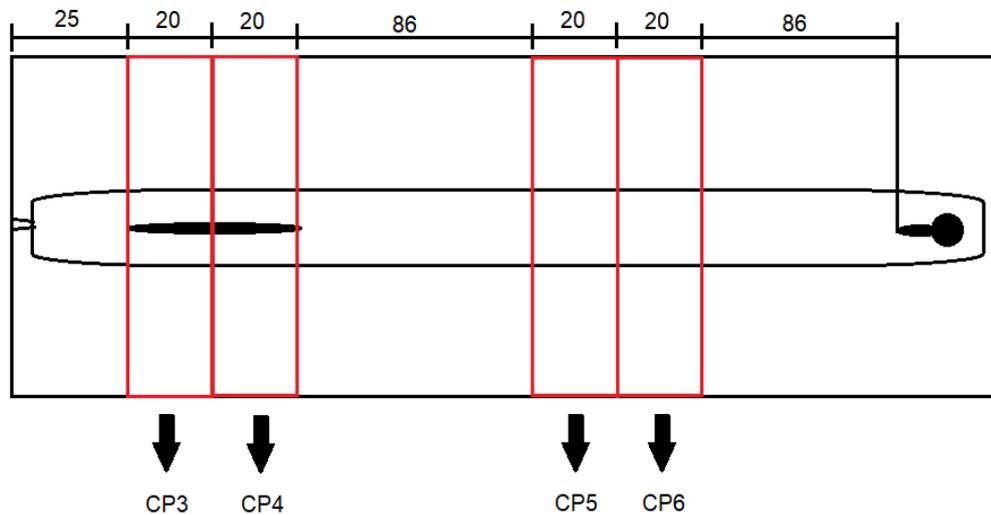
A obtenção destes corpos a partir das juntas soldadas foi orientada também pelos resultados da radiografia, buscando avaliar seções com e sem defeitos internos do tipo vazio/porosidade. Para a junta soldada “#3” buscou-se retirar amostras de regiões mais afastadas das extremidades da solda, com o intuito de evitar possíveis imperfeições do procedimento de soldagem por fricção e mistura.

Figura 31. Diagrama de obtenção dos corpos de prova a partir da junta soldada “#3”. Dimensões me milímetros.



Já na junta soldada “#6” buscou-se retirar amostras de regiões com e sem defeitos internos, segundo o analisado através das imagens de radiografia.

Figura 32. Diagrama de obtenção dos corpos de prova a partir da junta soldada “#6”. Dimensões em milímetros. Trechos em escuro representam regiões onde vazios foram observados através de ensaio não-destrutivo de radiografia industrial



Todos os corpos de prova obtidos apresentam configuração retangular, com dimensões 20 x 100 x 5mm. Como mostram as imagens acima, tais corpos foram nomeados por ordem de obtenção – de CP1 a CP6, sendo esta a nomenclatura utilizada no decorrer deste trabalho. Vale ressaltar que estas amostras serão utilizadas tanto para os ensaios de dobramento quanto de tração, e, portanto, esta parte da metodologia será omitida do tópico subsequente, evitando repetição.

No tocante ao ensaio de dobramento propriamente dito, o procedimento experimental consistiu na realização do ensaio sobre os corpos de prova CP2, CP3 e CP5, de acordo com os seguintes parâmetros:

- Raio do cutelo: 8 mm;
- Abertura dos apoios para o corpo de prova: 42 mm;
- Angulação do ensaio: Não definida, prosseguindo o dobramento até a falha (trinca/fratura) do componente.

Resultados referentes a este ensaio (imagens dos corpos fissurados e sua angulação máxima suportada) são apresentados nas seções seguintes deste trabalho.

3.3.4 Ensaio de Tração

O ensaio de tração é um tipo de teste aplicado com o intuito principal de avaliar a resistência mecânica de um material, o que pode ser feito através da medição de

diversos parâmetros, tais como: módulo de elasticidade, limite de escoamento, resistência máxima de ruptura, tenacidade, resiliência, entre outros. O procedimento para este tipo de ensaio consiste em tracionar um corpo de prova do material a ser analisado, medindo-se durante este processo o carregamento (tensão aplicada) e deformação da amostra. Para o caso de juntas soldadas, é retirado e ensaiado um corpo de prova da seção transversal da região soldada, de modo que a solda fique perpendicular ao esforço trativo aplicado.

Para sua realização no DEMEC – UFPE, utilizou-se a máquina universal de ensaios do Laboratório de Ensaios Mecânicos do DEMEC – UFPE, modelo EMIC DL 1000. Os ensaios foram conduzidos pelo técnico Rubens, responsável pelo referido laboratório.

Figura 33. Máquina universal de ensaios preparada para o ensaio de tração de amostras das juntas FSW



O procedimento experimental consistiu em realizar o ensaio de tração sob os corpos de prova CP1, CP4 e CP6, de acordo com a nomenclatura e o procedimento de obtenção destas amostras relatado no tópico anterior deste trabalho.

Resultados referentes a este ensaio (imagens dos corpos fraturados e dados referentes a sua resistência mecânica) são apresentados nas seções seguintes deste trabalho.

3.4 ANÁLISE METALOGRÁFICA

A análise metalográfica da junta soldada pelo processo de fricção e mistura tem o propósito de fornecer informações acerca das propriedades da solda obtida, atestando os fenômenos físicos descritos na literatura e validando o processo executado. Para tal caracterização, será utilizado o equipamento de Microscopia Ótica do Laboratório de Microscopia e Análise Macroestrutural do DEMEC-UFPE, com o auxílio da técnica Janaína André Cirnino, responsável pelo referido laboratório.

Nesta seção, são descritos os procedimentos adotados na preparação das amostras para análise metalográfica e o procedimento de microscopia ótica propriamente dito.

3.4.1 Preparação das amostras para análise metalográfica

Antes de iniciar o procedimento de preparação das amostras, devido às restrições de tempo e recursos para a finalização deste estudo, foi necessário escolher um número limitado de juntas para retirada de espécimes que serão devidamente trabalhados e analisados através da microscopia ótica. Visando variar os resultados obtidos e analisar diversas configurações de soldagem (parâmetros, ligas, entre outros), foram escolhidas as juntas “#3”, “#4” e “#6” para a retirada de tais amostras.

As juntas foram então cortadas na máquina cortadora do Laboratório de Metalografia do DEMEC – UFPE, com o auxílio do técnico Rubens, para a retiradas dos espécimes.

Figura 34. Máquina cortadora do Laboratório de Metalografia utilizada para a obtenção das amostras FSW.



Uma vez obtidas, as amostras foram embutidas a quente com o material Baquelite visando a formação de uma peça apropriada para as fases posteriores de preparação e análise por microscopia, utilizando-se também do maquinário do Laboratório de Metalografia. Todo o procedimento subsequente relativo à preparação das amostras contou com a supervisão e auxílio da técnica Janaína.

Figura 35. Aparato para embutimento a quente do Laboratório de Metalografia utilizado para a preparação das amostras FSW.



Seguindo o procedimento de preparação, as peças embutidas foram então lixadas e polidas, com a finalidade de expor apropriadamente a estrutura interna do material para a fase posterior de ataque químico, evitando impurezas e má configurações geométricas da microestrutura que resultariam na impossibilidade da análise por microscopia. Para o lixamento, foi utilizado o seguinte escalonamento (em ordem crescente de refino da granulação) das lixas: P220, P320, P400, P600 e 1500. Para o polimento, foi utilizado um pano apropriado compatível com diversos materiais metálicos, juntamente com uma pasta de diamante com 1μ (um micrón) de tamanho de partícula.

Figuras 36 e 37. Aparato para lixamento e polimento de amostras embutidas do Laboratório de Metalografia utilizado para a preparação das amostras FSW.



Na última etapa de preparação das amostras FSW foi realizado o ataque químico dos espécimes lixados e polidos, objetivando criar um contraste e exposição da microestrutura apropriados para a microscopia ótica. Para este procedimento, foi utilizada a solução ácida *Keller* (ácido fluorídrico (HF) + ácido nítrico (HNO₃) + ácido clorídrico (HCl)), com um tempo de ataque de aproximadamente 12 segundos.

Figura 35. Material utilizado para a formação da solução ácida Keller, submetida às amostras para o ataque químico.

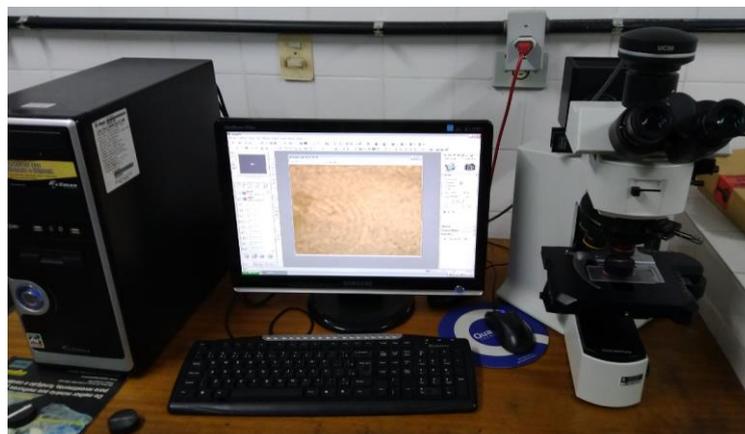


3.4.2 Procedimento de microscopia ótica

Para a realização da microscopia ótica propriamente dita foram utilizados os equipamentos do Laboratório de Microscopia e Análise Macroestrutural do DEMEC – UFPE, mais especificamente o Microscópio Ótico modelo Olympus BX51M e o *workstation* acoplado a este, responsável pela visualização e armazenamento das imagens. Todo o procedimento foi orientado e supervisionado pela técnica Janaína, responsável pelo referido laboratório.

Como a intenção do experimento era apenas observar a distorção microestrutural do material após a soldagem FSW – o que tem impacto direto nas propriedades mecânicas previamente observadas neste trabalho – observando as zonas formadas e a granulação obtida, uma ampliação mínima de 5 vezes foi adotada para a obtenção de todas as imagens analisadas.

Figura 36. Equipamento do laboratório Microscopia e Análise Macroestrutural utilizado na análise por Microscopia Ótica das amostras soldadas por FSW.



4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção apresentam-se os resultados obtidos a partir da implementação da metodologia previamente descrita, sendo esses discutidos a partir de uma análise dos procedimentos experimentais empregados, dados da literatura e comparativos com alguns trabalhos previamente conduzidos no DEMEC – UFPE.

Como mencionado anteriormente, esta seção será subdividida em tópicos de acordo com os experimentos práticos conduzidos no tocante à confecção e ensaio das juntas soldadas pelo processo de fricção e mistura, sendo eles: Juntas soldadas, Ensaio de planeza, Ensaio não-destrutivo, Ensaio destrutivo e Análise metalográfica.

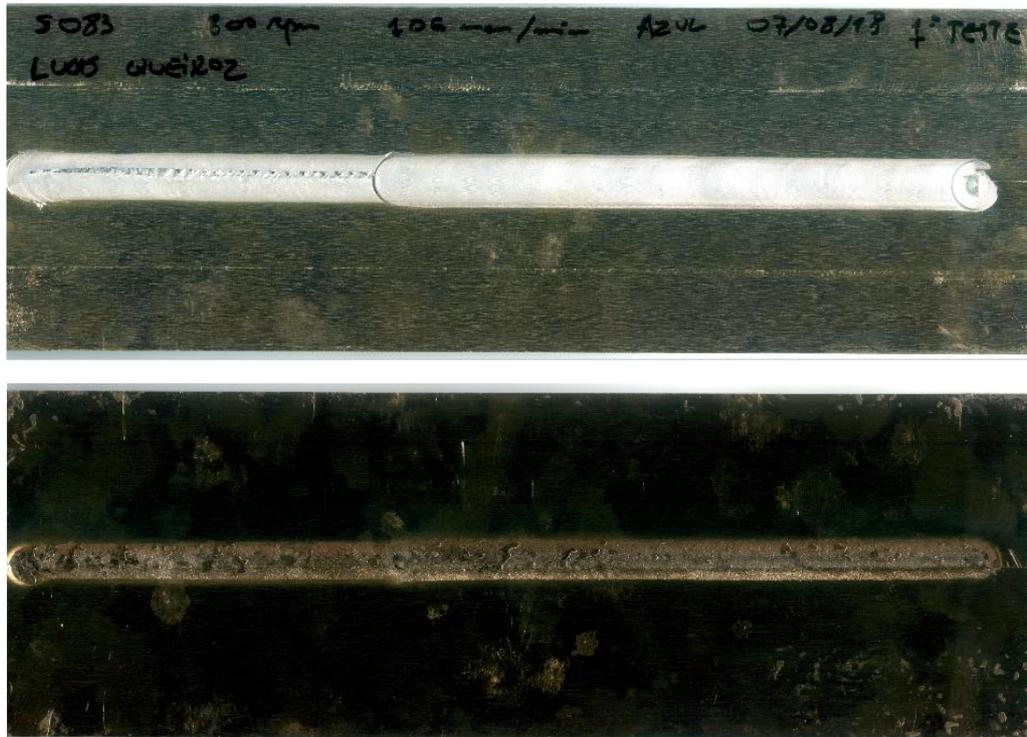
4.1 JUNTAS SOLDADAS

As juntas soldadas pelo processo de fricção e mistura, de acordo com a nomenclatura previamente estabelecida, apresentaram os seguintes resultados finais de sua confecção:

4.1.1 Sessão 1

Na primeira sessão - como previamente descrito – apenas a junta “#0” foi soldada, apresentando a seguinte configuração final:

Figura 37. Junta "#0" soldada pelo método FSW



Como foi possível observar durante o procedimento experimental e inspeção visual após a soldagem, a junta apresentou uma diferença no acabamento superficial superior da solda, entre os trechos inicial e final. Como explicitado na metodologia, isto ocorreu em função de um ajuste na profundidade da ferramenta rotacional durante a realização do próprio processo FSW. O desalinhamento da ferramenta em relação às interfaces das placas de alumínio acarretou numa soldagem “diagonalizada”, com o final do trecho de solda quase “saindo” da zona de contato entre essas placas. Pode-se ressaltar ainda a alta qualidade do acabamento superficial nas faces inferior e superior (em seu trecho final) da junta soldada.

4.1.2 Sessão 2

Na segunda sessão, três novas juntas foram soldadas pelo método de fricção e mistura, a saber: “#1”, “#2” e “#3”, apresentando as seguintes configurações finais:

Figura 38. Junta "#1" soldada pelo método FSW



Figura 39. Junta "#2" soldada pelo método FSW

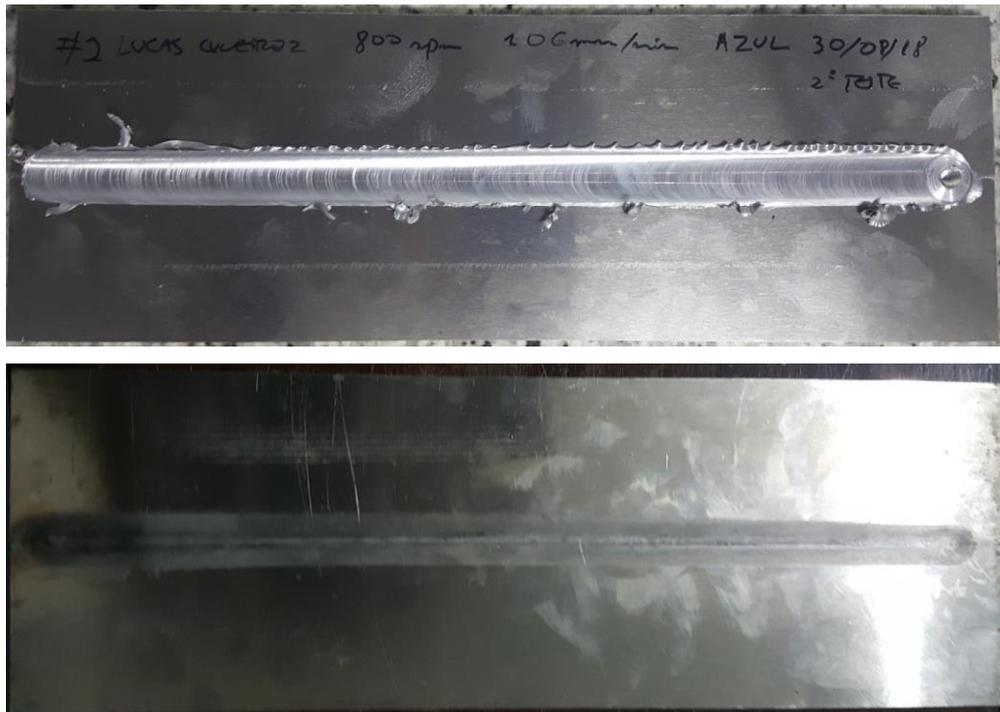
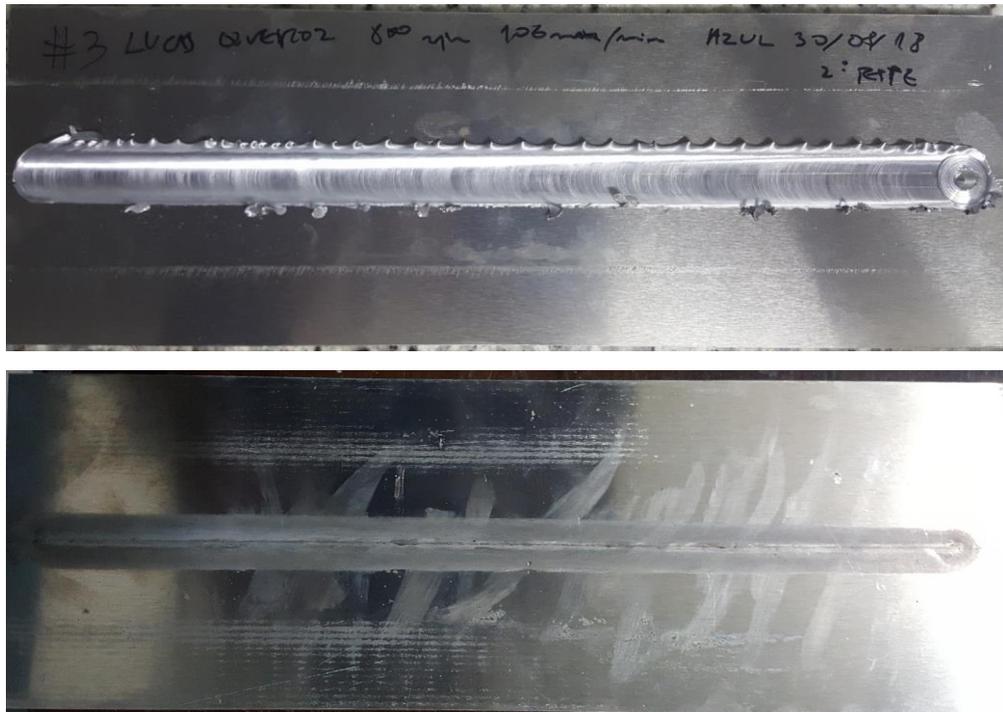


Figura 40. Junta “#3” soldada pelo método FSW



Pelo fato de, nesta sessão, todas as juntas terem sido soldadas sob os mesmos parâmetros, os resultados finais da solda confeccionada foram bastantes similares. De maneira geral, todas apresentaram um acabamento de alta qualidade na face inferior, enquanto que a face superior trabalhada apresentou aspecto “grosseiro”, com excessiva formação de *flash*. Tal fenômeno é justificado pelo excesso de calor gerado durante o processo, o que indica uma má seleção de parâmetros de soldagem ou ineficiência na dissipação de calor por parte do aparato experimental desenvolvido. Ressalta-se, na junta “#1”, a presença do filme protetor das placas de alumínio na face inferior, que por descuido não foi removida antes do processo de soldagem.

4.1.3 Sessão 3

Na terceira e última sessão, outras três juntas FSW foram confeccionadas, a saber: “#4”, “5” e “#6”, apresentando as seguintes configurações finais:

Figura 41. Junta "#4" soldada pelo método FSW

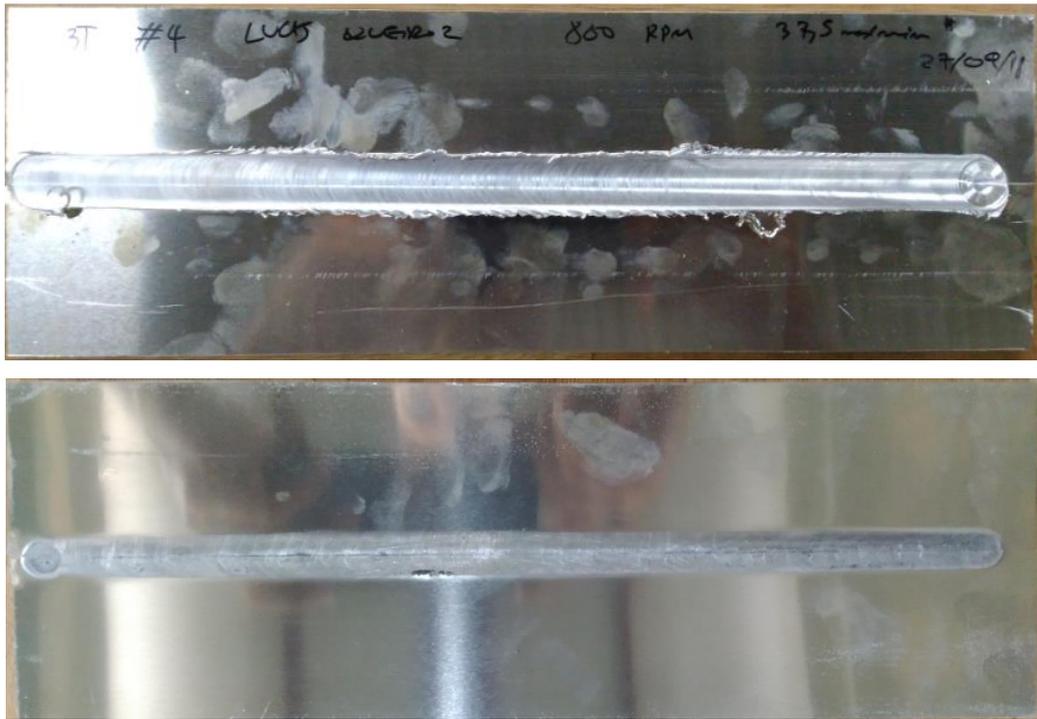
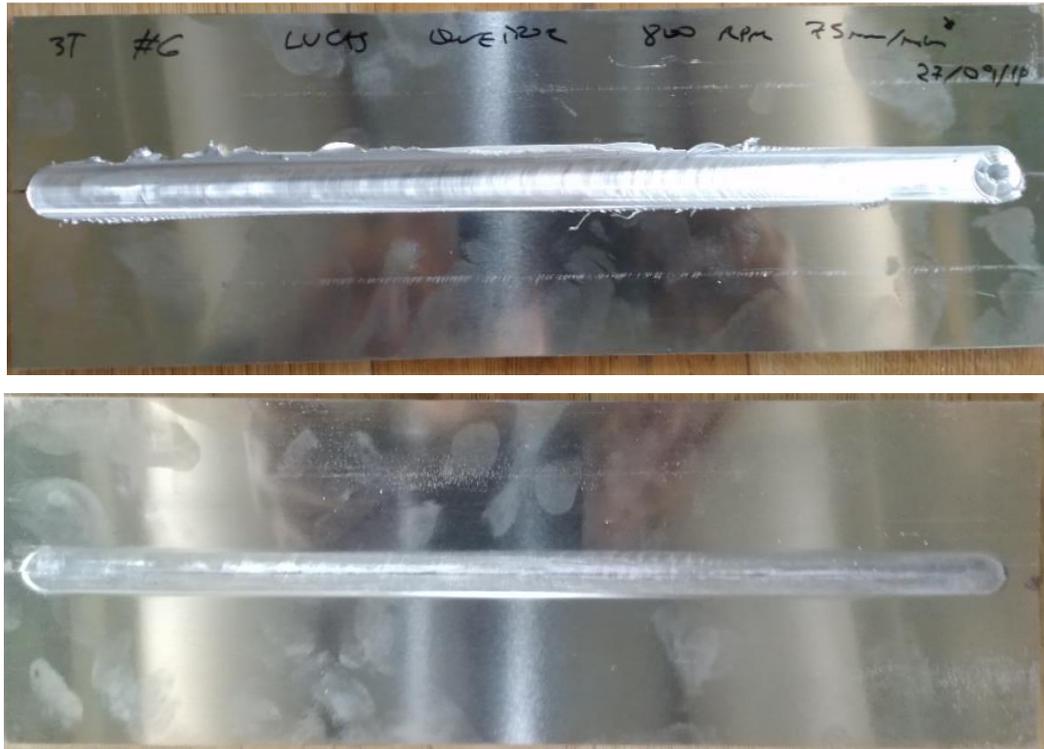


Figura 42. Junta "#5" soldada pelo método FSW



Figura 43. Junta "#6" soldada pelo método FSW



Similarmente às soldagens da sessão anterior, todas as juntas soldadas durante a terceira sessão também apresentaram uma alta qualidade do acabamento superficial na face inferior, enquanto que na face superior o aspecto da solda tornou-se mais “grosseiro”, com excessiva formação de *flash*. Desta vez, dois fatores são apontados como causadores do excesso de calor durante o processo FSW que acarreta este tipo de defeito: a variação do parâmetro de avanço da ferramenta rotacional e realização das soldagens em série (sem intervalos para o resfriamento do aparato experimental).

Pelo primeiro fator, o aumento da velocidade de avanço tende a reduzir o calor gerado, diminuindo o efeito de *flash* observado. Devido a inexistência de tempo para resfriamento do aparato experimental entre as soldagens, no entanto, as soldas confeccionadas posteriormente (que no procedimento adotado apresentaram maior velocidade de avanço) tendem a possuir um aquecimento mais elevado das placas de alumínio, o que implica numa maior formação de *flash*.

Como resultado final, observa-se que a solda “#4”, apesar de possuir menor velocidade de translação da ferramenta, apresentou menor formação de *flash* entre as três juntas soldadas. A junta “#5”, realizada sob parâmetro intermediário,

apresentou excessivo aquecimento proveniente do aparato experimental e conseqüentemente um aumento na formação de *flash*. Finalmente, a solda “#6” apresentou também um excessivo aquecimento, porém não tão elevado quanto a junta imediatamente anterior (#5) em função do avanço mais elevado.

4.2 ENSAIO DE PLANEZA

Os resultados referentes ao ensaio de planeza traduzem-se pelo Índice de Planeza, que nada mais é do que a amplitude da altura “z” medida em uma junta soldada apoiada sobre uma superfície nivelada. Tal índice acaba, portanto, por determinar o quão alinhada e plana está essa junta soldada pelo processo de fricção e mistura, característica desejável na aplicação desse método de união de superfícies na indústria metalmeccânica.

Os índices de planeza medidos com as juntas previamente selecionadas – “v.1” e “#3”, bem como o valor de referência da mesa nivelada para apoio dessas juntas soldadas, foram então obtidos como se segue:

Amostra	Índice de planeza (μm)
Referencial da mesa nivelada	0,8
v.1	100
#3	47

Como pode ser observado, a utilização do aparato experimental desenvolvido neste trabalho – especialmente o uso da base fixadora projetada e fabricada especificamente para este processo nas condições operacionais do DEMEC – se mostrou bastante eficiente no sentido de produzir juntas soldadas planas e alinhadas, quando comparadas com outras anteriormente confeccionadas pelo mesmo método sem o uso do referido aparato. Tal característica obtida permite a obtenção de juntas de melhor qualidade no que se refere a propriedades de resistência mecânica e adequação ao projeto estrutural do equipamento para o qual o FSW se apresenta como método viável de união de componentes.

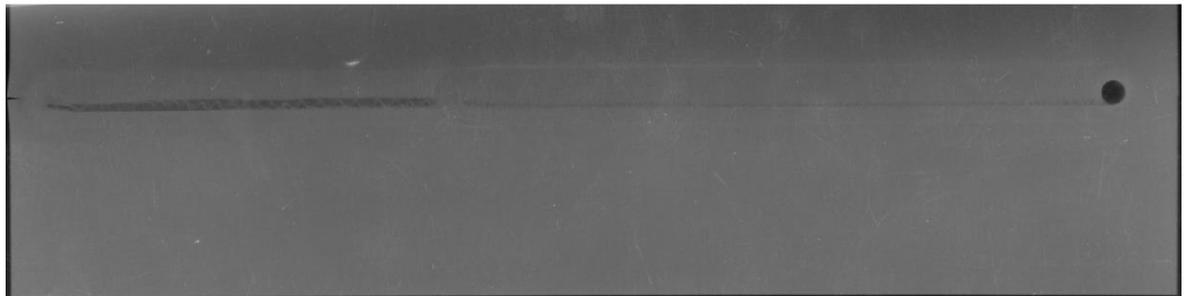
4.3 ENSAIO NÃO-DESTRUTIVO

O ensaio não-destrutivo de Radiografia Industrial conduzido apresenta como resultado imagens radiográficas das juntas analisadas. Como mencionado anteriormente, devido à rapidez e praticidade deste tipo de ensaio, todas as juntas confeccionadas pelo método de fricção e mistura (FSW) puderam ser radiografadas. Abaixo seguem os resultados obtidos a partir deste ensaio não-destrutivo, bem como uma análise dos defeitos encontrados nas soldas executadas.

4.3.1 Sessão 1

A junta “#0” – única soldada durante a primeira sessão – apresentou o seguinte resultado na radiografia:

Figura 44. Radiografia da junta “#0”, soldada pelo método FSW



Observa-se nesta radiografia os vazios formados no trecho inicial da solda, em função da insuficiente profundidade da ferramenta rotacional sobre a peça sendo trabalhada. Após a correção, no entanto, observa-se a persistência da porosidade interna, ainda que de modo mais atenuado. Este defeito se prolonga por todo o trecho de solda, se concentrando no *retreating side*. Causas para este fenômeno merecem maior atenção e estudo, mas podem estar relacionadas com o desalinhamento da trajetória da ferramenta rotacional sobre a interface das placas de alumínio.

4.3.2 Sessão 2

As juntas “#1”, “#2”, e “#3” apresentaram os seguintes resultados através da radiografia:

Figura 45. Radiografia da junta "#1", soldada pelo método FSW

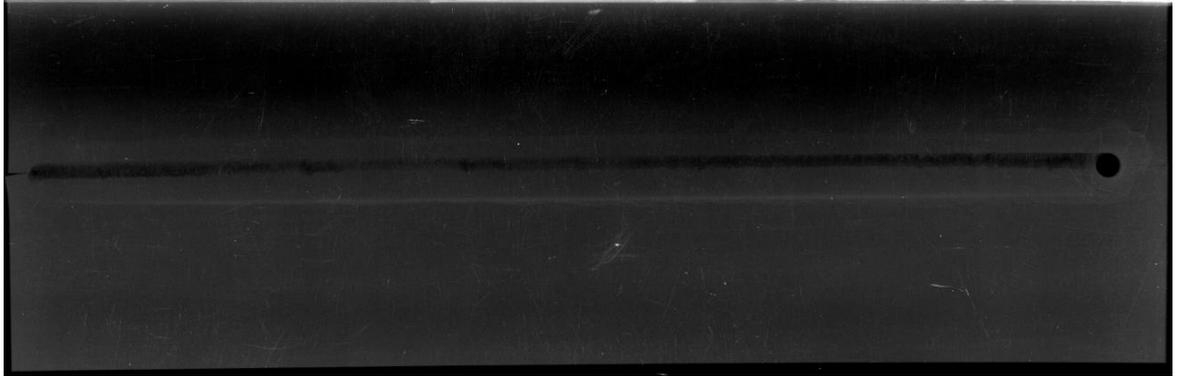


Figura 46. Radiografia da junta "#2", soldada pelo método FSW

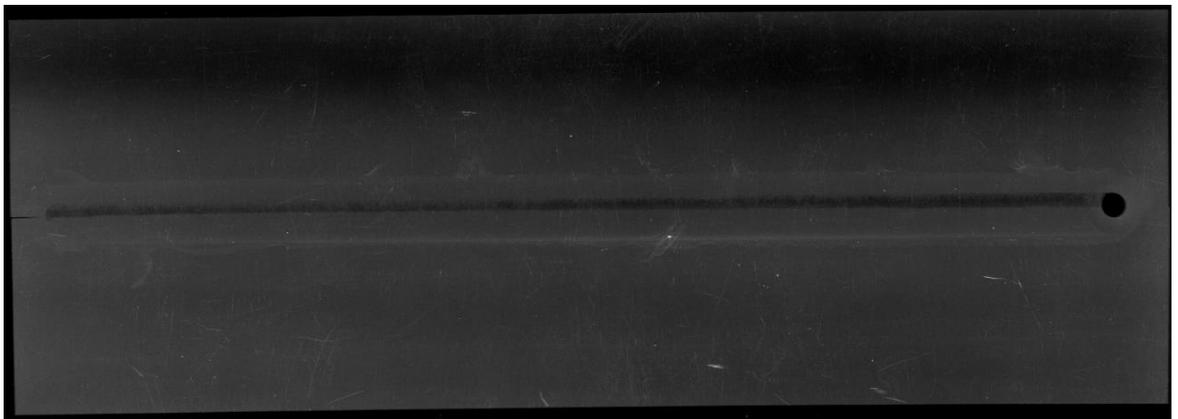
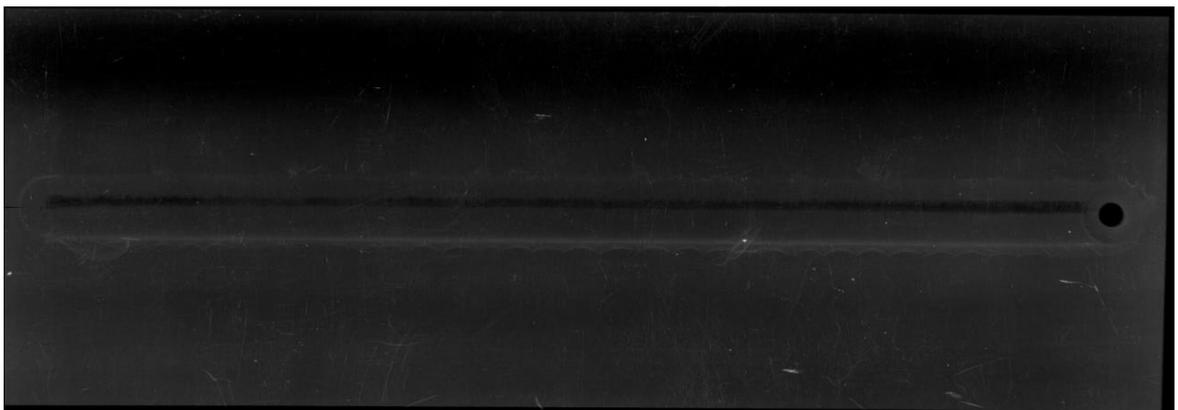


Figura 47. Radiografia da junta "#3", soldada pelo método FSW



Devido ao fato das três juntas trabalhadas nesta sessão pertencerem à mesma liga (5083) de alumínio soldadas sob os mesmos parâmetros, semelhantemente com o que ocorreu na análise do processo FSW propriamente dito, os resultados da radiografia são bastante similares. Em todos os casos, observa-se uma larga "trilha" de porosidade/vazios no interior da solda, concentrando-se no *advancing side*. Tal

configuração condiz com informações da literatura que afirmam a concentração desse tipo de defeito neste lado da solda, devido a uma transição abrupta entre a microestrutura refinada da Zona Misturada (*nugget*) e a Zona Termomecanicamente Afetada (*TMAZ*), ao contrário da transição mais gradual observada no *retreating side*. (NANDAN et al., 2008)

4.3.3 Sessão 3

Finalmente, as juntas “#4”, “#5” e “#6” apresentaram os seguintes resultados através da radiografia:

Figura 48. Radiografia da junta “#4”, soldada pelo método FSW



Figura 49. Radiografia da junta “#5”, soldada pelo método FSW



Figura 50. Radiografia da junta “#6”, soldada pelo método FSW



Com a variação do parâmetro de velocidade de translação da ferramenta rotacional, os resultados obtidos na radiografia também variaram de acordo com a soldagem executada, apesar de todas as juntas pertencerem à mesma liga de alumínio (2017). As juntas “#4” e “#5” não apresentaram porosidade interna (segundo o que mostram as imagens radiográficas) enquanto que a “#6”, por ter sido soldada a uma velocidade maior, apresentou alguns trechos com formação de vazios. Isto está de acordo com informações da literatura, que afirma o aumento de defeitos superficiais e de porosidade com o aumento na velocidade de soldagem, devido a formação e intensificação de “buracos de minhoca” perto do fundo das placas soldadas, o que por sua vez é causado pelo fluxo ineficiente de material nesta região. (NANDAN et al., 2008)

Ressalta-se ainda que, devido a imprecisões durante o ensaio radiográfico, a imagem da junta “#4” não pode ser recuperada completamente, ficando apenas um trecho da solda visível para análise. A junta “#5”, devido a uma correção na profundidade da ferramenta rotacional durante o procedimento do FSW, apresentou em seu trecho final uma descontinuidade na solda.

4.4 ENSAIOS DESTRUTIVOS

4.4.1 Ensaio de dobramento

Os resultados do ensaio de dobramento, para os fins deste trabalho, são representados pela angulação máxima suportada pela amostra da junta soldada até o início de fissuras visíveis, o que caracteriza a falha do componente. Dessa forma, é feita uma avaliação qualitativa acerca da ductilidade da junta soldada por FSW.

Abaixo é mostrado os resultados referentes aos corpos de prova CP2, CP3 e CP5, ensaiados por dobramento.

- CP2:

Figuras 51, 52 e 53. Corpo de prova CP2 fissurado durante ensaio de dobramento

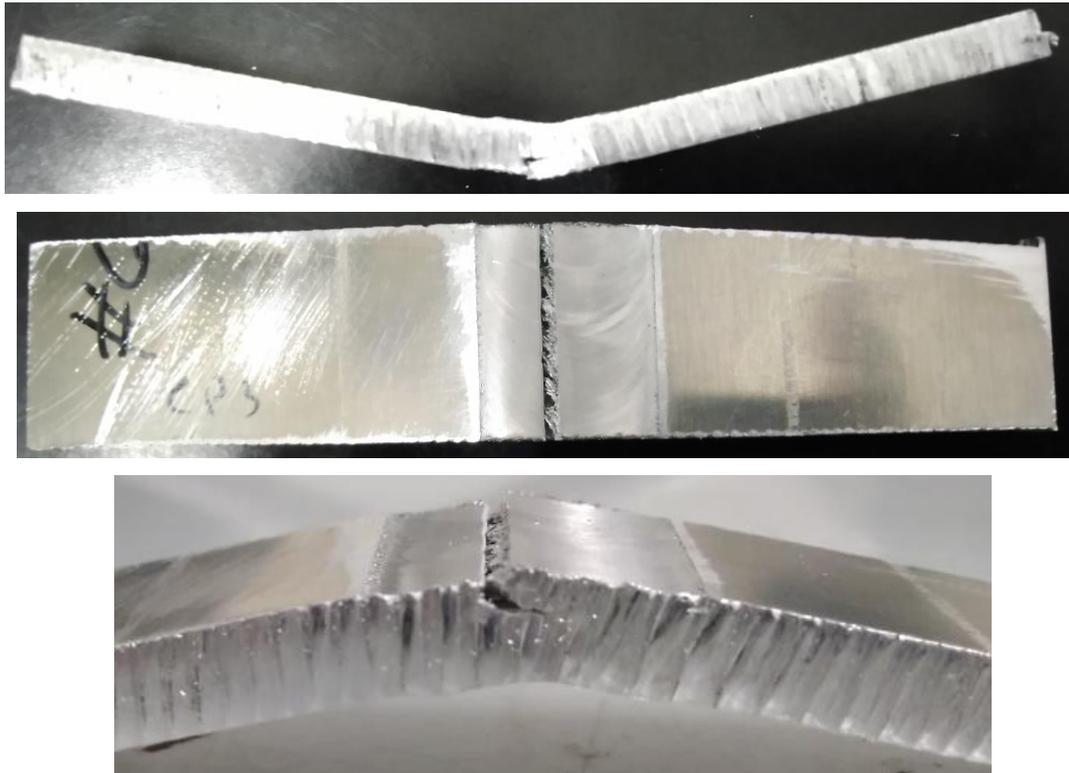


O corpo de prova CP2 – pertencente à liga 5083 de alumínio - apresentou angulação máxima de cerca de 20° antes da sua fissura, que ocorreu de maneira abrupta e “guiada” pelo vazio interno formado durante o processo de soldagem por fricção e mistura, tal como é percebido nas imagens acima. Desta forma, conclui-se

que o procedimento experimental conduzido produziu uma junta ineficiente, sem propriedades de ductilidade que o classificariam como de alta qualidade para a indústria metalomecânica.

- CP3:

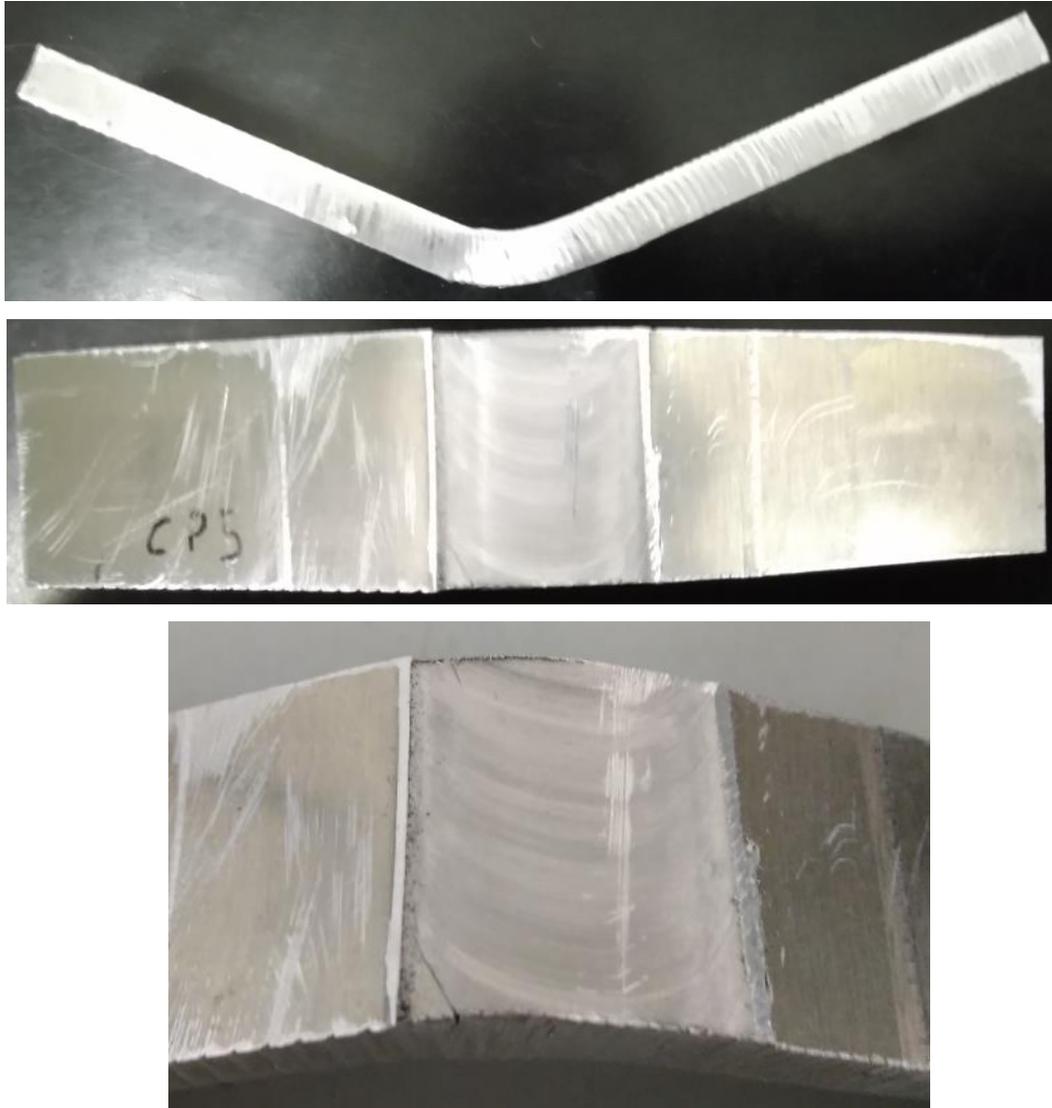
Figuras 54, 55 e 56. Corpo de prova CP3 fissurado durante ensaio de dobramento



O corpo de prova CP3 – pertencente à liga 2017 de alumínio – também foi retirado de um trecho de junta soldada que durante o ensaio radiográfico apresentou defeitos internos do tipo vazio. Dessa forma, o resultado obtido com seu dobramento assemelha-se ao apresentado para o CP2, apesar da liga e dos parâmetros de soldagem terem sido distintos. A angulação máxima obtida antes da fissura foi cerca 20°, com a falha ocorrendo de maneira abrupta e também “guiada” pelo vazio interno formado durante o processo de soldagem por fricção e mistura, tal como é percebido pelo aspecto “sujo” da fratura nas imagens acima. Desta forma, conclui-se que trechos de uma junta soldada por FSW que apresentam vazios internos em geral não apresentam propriedades de ductilidade que os classificariam como de alta qualidade para a indústria metalomecânica.

- CP5:

Figuras 57, 58 e 59. Corpo de prova CP5 fissurado durante ensaio de dobramento



Por fim, foi ensaiado por dobramento o corpo de prova CP5 – pertencente à liga 2017 de alumínio e retirado de um trecho de junta soldada que durante o ensaio radiográfico não apresentou defeitos internos do tipo vazio. A angulação máxima obtida antes da aparição de pequenas fissuras foi cerca 45°. Destaca-se que tais fissuras, além de sua dimensão e propagação reduzida, iniciaram-se nas extremidades laterais do corpo de prova, devido a não-existência de defeitos internos que atuassem como nucleadores de trinca – tal como observado nos corpos de prova anteriores. Pode-se inferir ainda que tais trincas teriam se originado a partir de imperfeições resultantes do processo de confecção dos corpos de prova, o que

implicaria que um componente estrutural soldado por FSW potencialmente apresentaria ainda melhores propriedades de ductilidade. Desta forma, conclui-se que trechos de uma junta soldada por FSW que não apresentam vazios internos em geral apresentam boas propriedades de ductilidade, classificando-os como de alta qualidade para a indústria metalmeccânica.

4.4.2 Ensaio de Tração

Os resultados do ensaio de tração, para os fins deste trabalho, serão avaliados em termos de tensão máxima suportada, curva tensão x deformação obtida e análise qualitativa da fratura no corpo de prova. Dessa forma, é feita uma avaliação da resistência mecânica da junta soldada pelo processo de fricção e mistura.

Abaixo é mostrado os resultados referentes aos corpos de prova CP1, CP4 e CP6, ensaiados por tração.

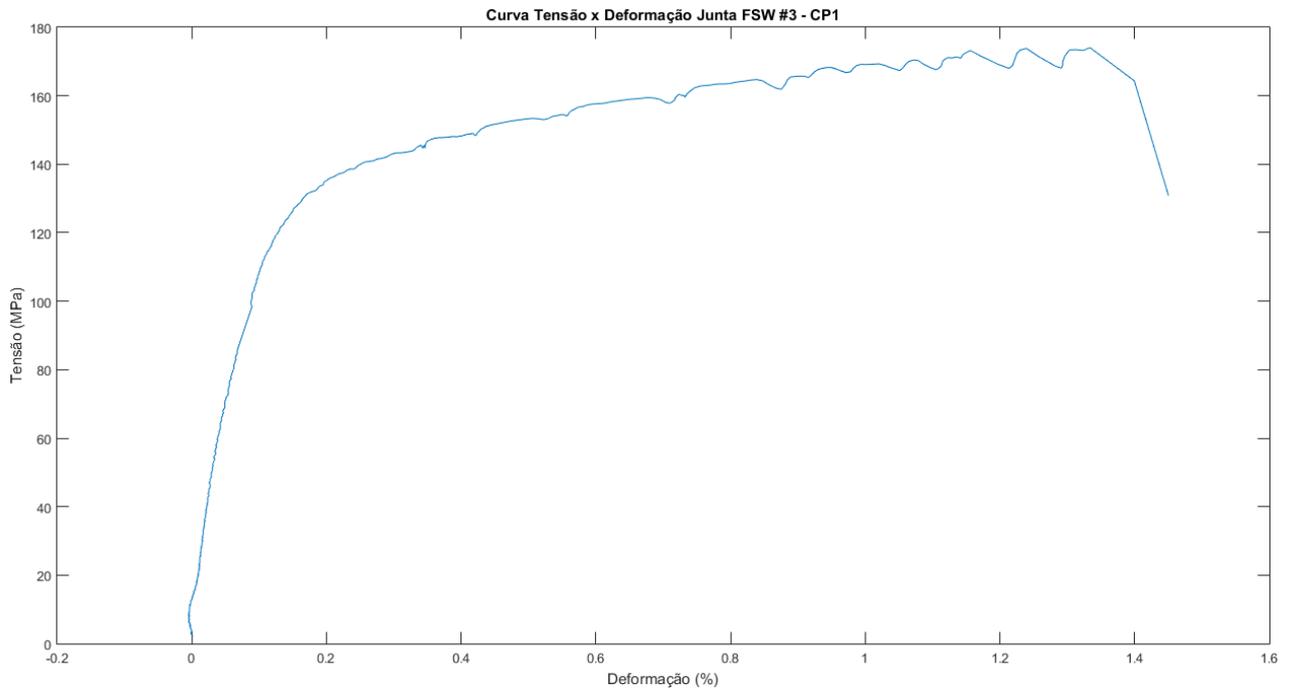
- CP1:

Figuras 60 e 61. Corpo de prova CP1 fissurado durante ensaio de tração



O corpo de prova CP1, pertencente à liga 5083 de alumínio e retirado de uma junta com a presença de vazios internos/porosidade, apresentou uma fratura nucleada pelo defeito interno apresentado, estendendo-se até a superfície superior da amostra, tal como é observado acima. A curva tensão x deformação e a resistência máxima suportada pelo corpo de prova é dado abaixo:

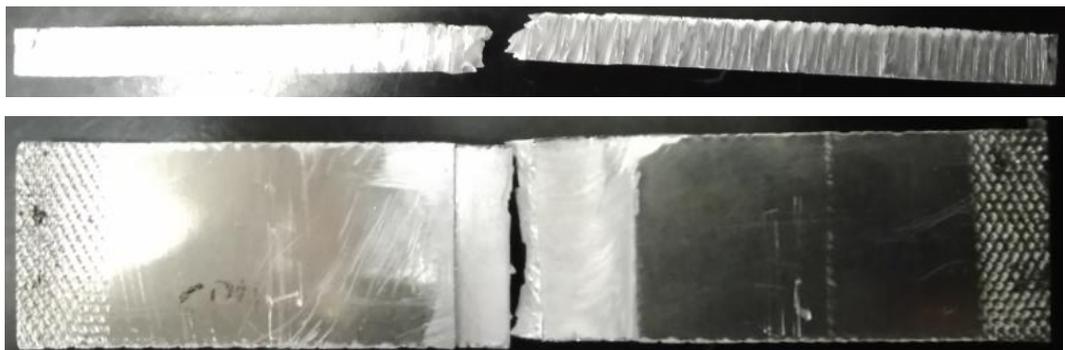
Figura 62. Curva tensão x deformação para o corpo de prova CP1



Como se pode observar, a curva tensão x deformação apresentou aspecto característico para este tipo de ensaio, com algumas oscilações que podem ser atribuídas ao maquinário laboratorial utilizado e à propagação interna da trinca nucleada pelo vazio resultante do processo de soldagem FSW. A tensão máxima suportada pelo corpo de prova CP1 foi de 174MPa, imediatamente antes de sua fratura, o que fica abaixo dos valores médios encontrados para este tipo de material (alumínio 5083): 230 ~290MPa. (METALTHAGA, 2018)

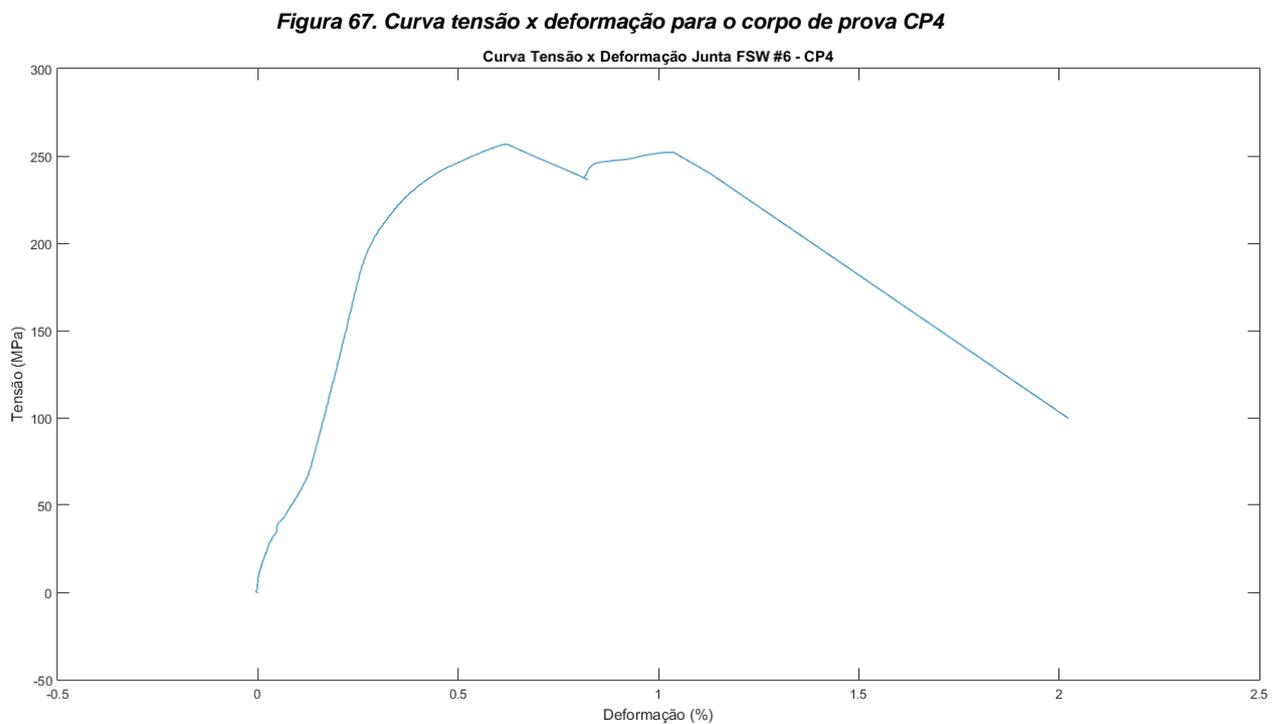
- CP4:

Figuras 63 à 66. Corpo de prova CP4 fissurado durante ensaio de tração





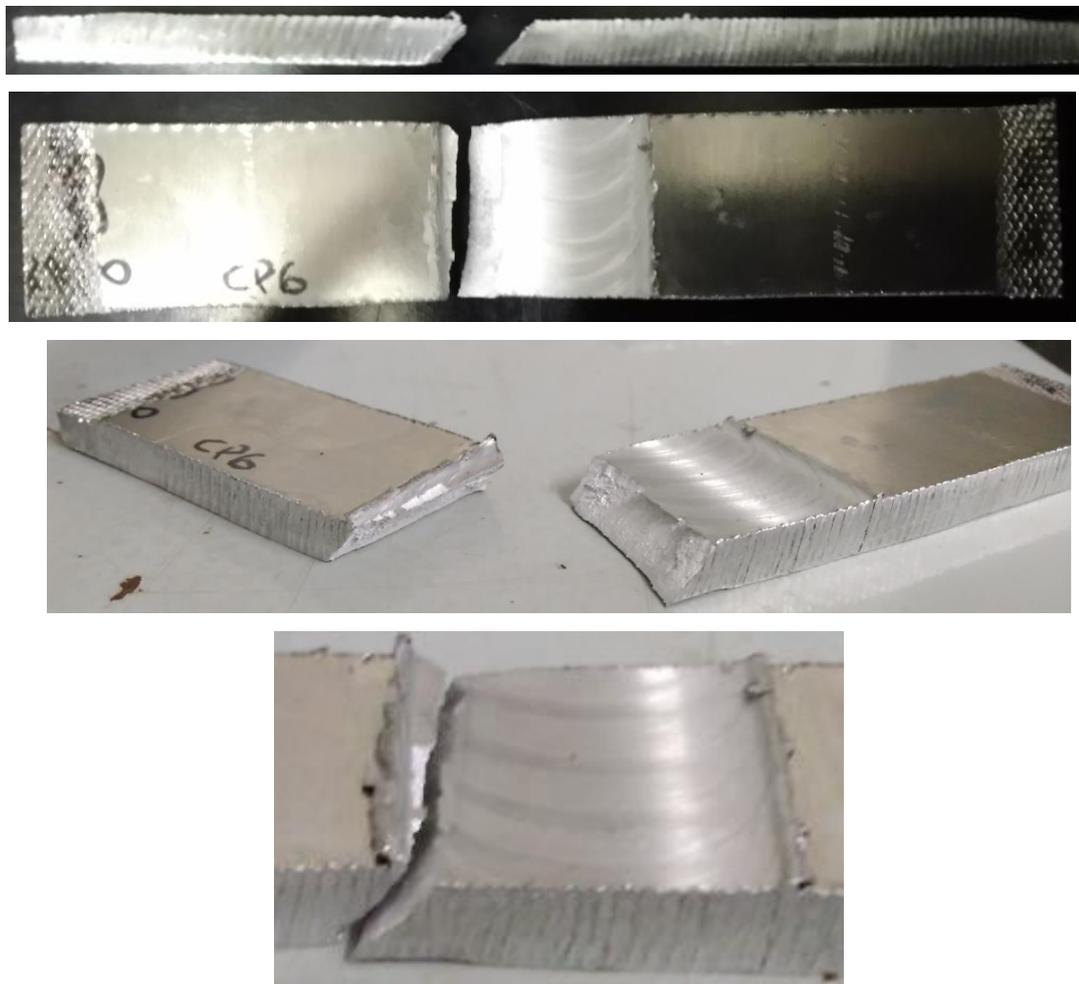
O corpo de prova CP4, pertencente à liga 2017 de alumínio e retirado de um trecho de junta com a presença de vazios internos/porosidade, também apresentou uma fratura nucleada pelo defeito interno apresentado, estendendo-se até a superfície superior da amostra, tal como é observado acima. A curva tensão x deformação e a resistência máxima suportada pelo corpo de prova é dado abaixo:



Como se pode observar, a curva tensão x deformação apresentou aspecto particular, não comum para este tipo de ensaio. Destaca-se a queda na tensão suportada com a deformação próxima ao valor de 1%, o que é atribuído à propagação interna da trinca nucleada pelo vazio resultante do processo de soldagem FSW. A tensão máxima suportada pelo corpo de prova CP4 foi de 257MPa, imediatamente antes de sua fratura, o que fica abaixo dos valores médios encontrados para este tipo de material (alumínio 2017): 380 ~448MPa. (IMPÉRIO DOS METAIS, 2018)

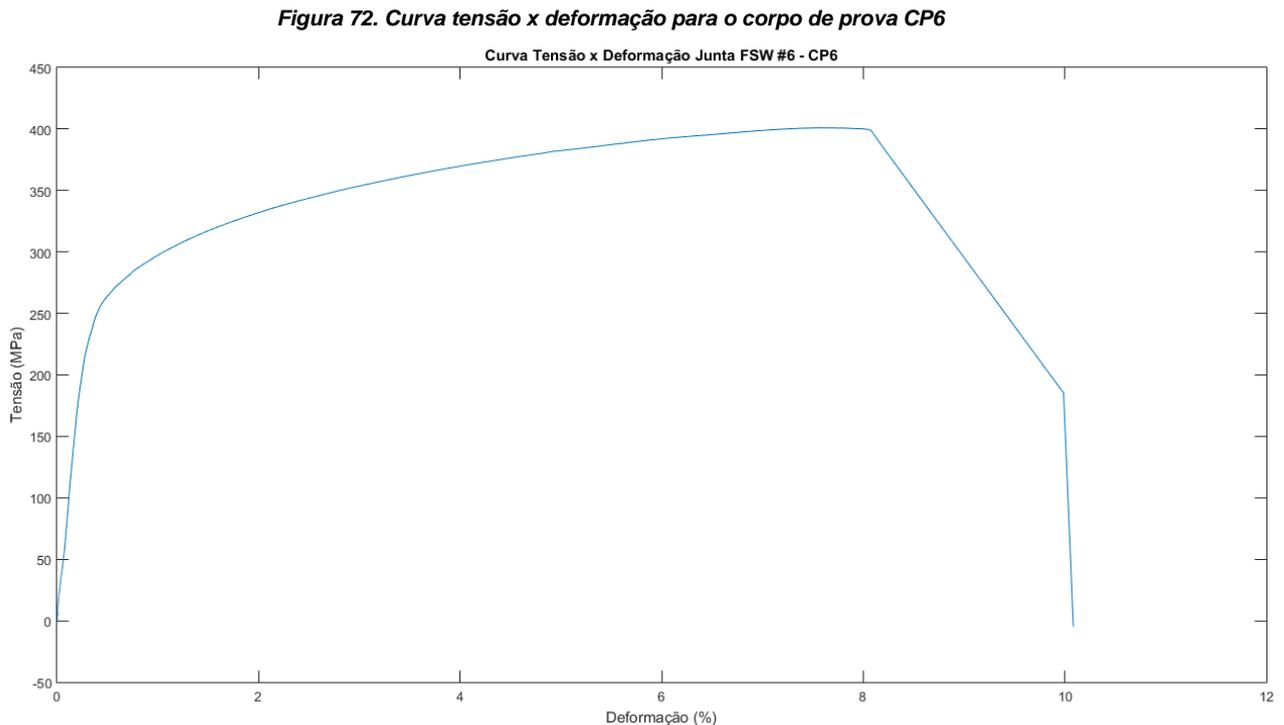
- CP6:

Figuras 68 à 71. Corpo de prova CP6 fissurado durante ensaio de tração



O corpo de prova CP6, também pertencente à liga 2017 de alumínio porém retirado de um trecho de junta sem a presença de vazios internos/porosidade, apresentou uma fratura com comportamento diferente dos demais. Ao contrário dos outros corpos de prova ensaiados, a fratura não se nucleou a partir de defeito interno

algum (pois não havia), partindo da extremidade do *retreating side* até uma região do metal base (não misturado durante o FSW) na face inferior. Tal fenômeno indica um comportamento dessa junta FSW próximo ao de uma peça inteiriça, como se não tivesse sido unida por um processo de soldagem. A curva tensão x deformação e a resistência máxima suportada pelo corpo de prova é dado abaixo:



Como se pode observar, a curva tensão x deformação apresentou aspecto característico de um material maciço, próprio deste tipo de ensaio. A tensão máxima suportada pelo corpo de prova CP6 foi de 401MPa, imediatamente antes de sua fratura, o que fica dentro dos valores médios encontrados para este tipo de material (alumínio 2017): 380 ~ 448MPa. (IMPÉRIO DOS METAIS, 2018)

Com isso, conclui-se que a presença de defeitos internos do tipo “vazios” numa junta soldada apresenta caráter fundamental na redução de sua resistência mecânica, abaixo dos limites médios para o material base não-soldado. Além disso, a presença de tais defeitos pode funcionar como potencial nucleador de trincas internas que podem se propagar de maneira silenciosa, reduzindo a confiabilidade e a segurança da aplicação deste método de soldagem para estruturas metálicas em geral. No entanto, uma soldagem FSW sem vazios internos mostrou-se capaz de gerar uma junta teoricamente “maciça” (de acordo com os testes conduzidos), comportando-se

como uma única peça que não passou por processo de união de superfícies e apresentando valores de resistência mecânica dentro dos limites médios para o material não-soldado.

4.5 ANÁLISE METALOGRÁFICA

A análise metalográfica das amostras FSW através da microscopia ótica apresenta como resultado imagens do tipo micrografia ótica, retratando diversas regiões do espécime em análise. Abaixo são então apresentadas algumas imagens referentes a cada uma das amostras trabalhadas, juntamente com uma breve discussão dos principais fenômenos que podem ser destacados em cada caso.

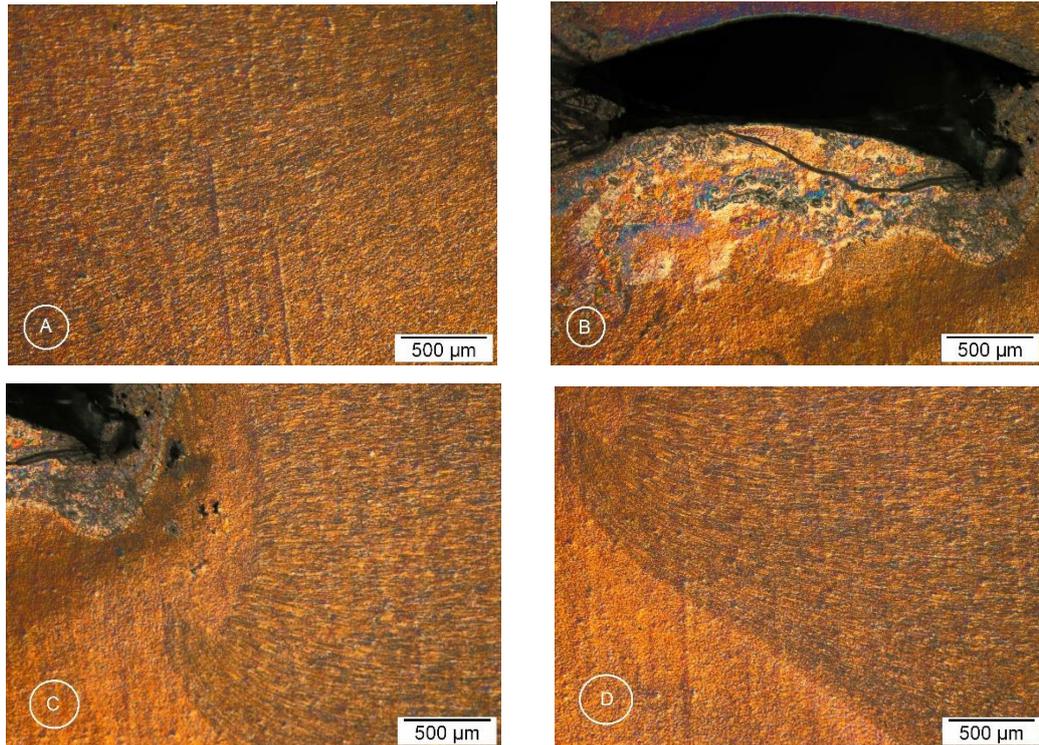
Ressalta-se novamente que, em função da restrição de tempo e infraestrutura laboratorial para a conclusão deste estudo, apenas uma análise “macro” será realizada no tocante as imagens obtidas com a microscopia, não sendo o foco deste trabalho discorrer sobre temas relevantes como: contorno de grão, formação de precipitados, entre outros.

4.5.1 Amostra #3

O espécime relativo à junta soldada “#3”, após a preparação discorrida anteriormente neste trabalho, apresentou as seguintes configurações microestruturais ao ser analisado através da microscopia ótica:

Figura 73. Microscopia ótica de amostra da junta “#3”, com destaque para a textura microestrutural em regiões características da seção transversal da solda



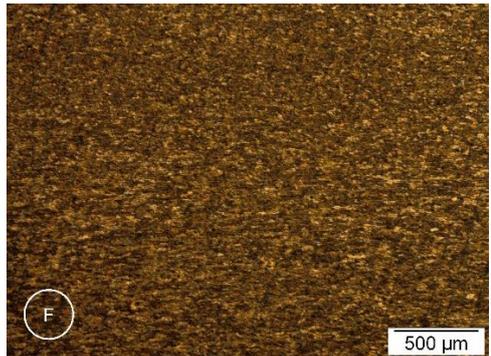
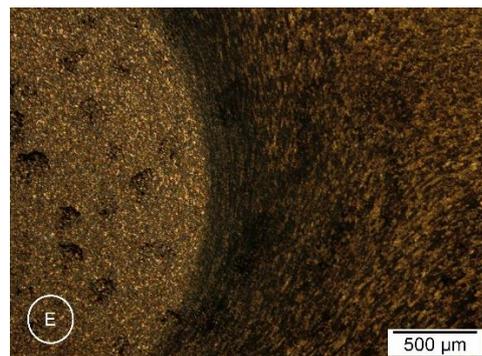
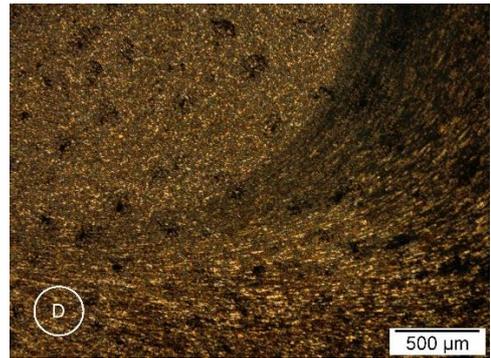
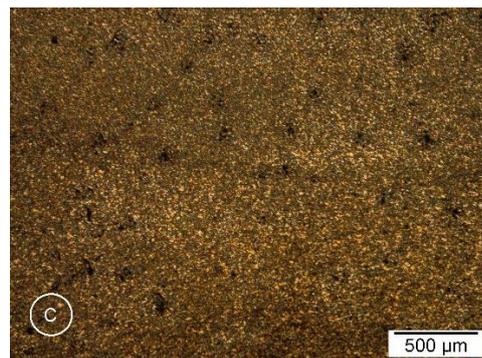
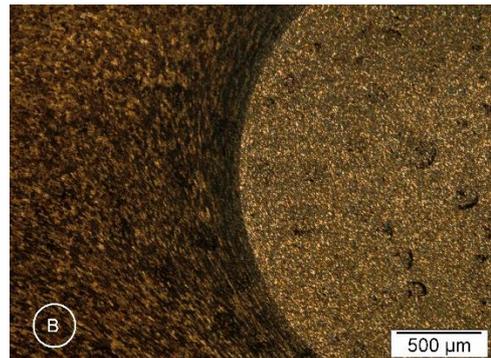
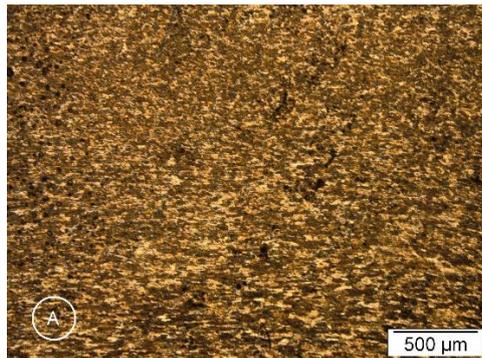


Infelizmente, as imagens obtidas na microscopia ótica não permitiram observar muito da textura microestrutural da junta soldada. Fatores responsáveis podem estar associados à preparação da amostra (em especial o ataque químico e um possível “tratamento térmico” acidental durante o embutimento à quente), magnificação da microscopia, entre outros. Destaque para a textura do material base (a), seguido do comportamento do vazio presente na junta soldada “#3” (já identificado na radiografia) (b). Imagens (c) e (d) mostram a fronteira de formação da Região Termomecanicamente Afetada – mais especificamente no *advancing side* – onde a transição para a textura mais refinada do *nugget* (zona à esquerda nas imagens “c” e “d”) ocorre de maneira mais abrupta, gerando uma zona tensionada e mais suscetível à falha mecânica (nucleação e propagação de fissuras).

4.5.2 Amostra #4

O espécime relativo à junta soldada “#4”, após a preparação discorrida anteriormente neste trabalho, apresentou as seguintes configurações microestruturais ao ser analisado através da microscopia ótica:

Figura 74. Microscopia ótica de amostra da junta “#4”, com destaque para a textura microestrutural em regiões características da seção transversal da solda

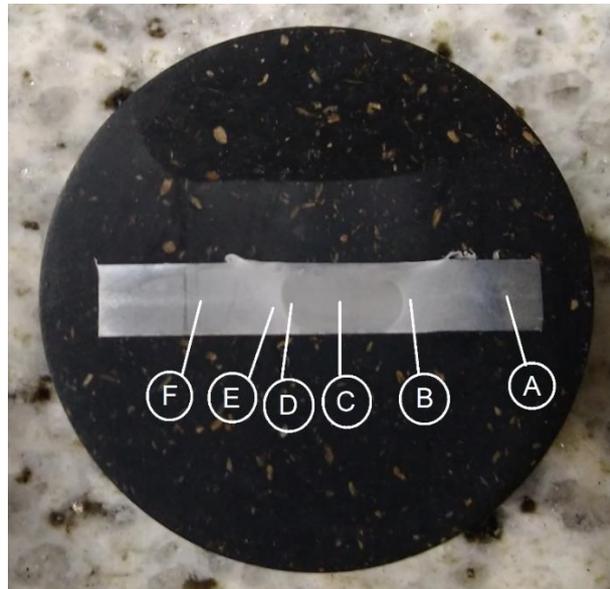


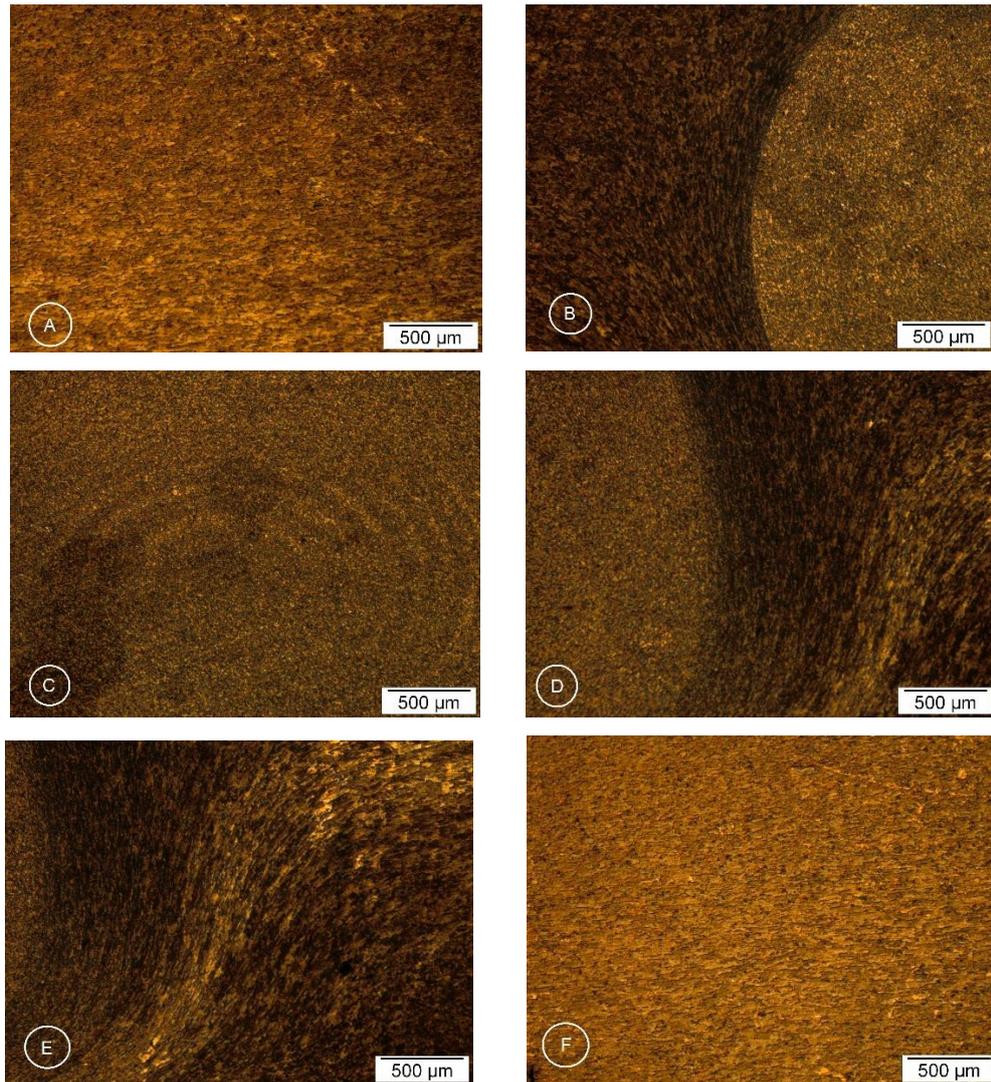
Na amostra da junta “#4”, uma melhor visualização pode então ser observada. Destaque para a Região Termicamente Afetada do *retreating side* (f), levemente mais refinada do que o material base (a). Imagens (b) e (e) mostram respectivamente as Regiões Termomecanicamente Afetadas dos *advancing* e *retreating side*, onde se observa uma transição mais abrupta no *advancing side* em contraste com uma zona mais “suave” e refinada no *retreating side*. Imagem (c) retrata a zona do *nugget*, muito mais refinada do que o material base ou demais zonas. Finalmente, micrografia (d) apresenta a transição do *nugget* próximo ao *retreating side* com a zona superior da solda (visualizada na parte de baixo na imagem), sendo possível observar a formação de uma granulação mais grosseira, o que também é um fenômeno típico do processo FSW segundo a literatura consultada.

4.5.3 Amostra #6

O espécime relativo à junta soldada “#6”, após a preparação discorrida anteriormente neste trabalho, apresentou as seguintes configurações microestruturais ao ser analisado através da microscopia ótica:

Figura 75. Microscopia ótica de amostra da junta “#6”, com destaque para a textura microestrutural em regiões características da seção transversal da solda





Do mesmo modo como observado na amostra #4, as micrografias apresentadas para a amostra #6 permitem analisar bem as Zonas Termomecanicamente Afetadas nos *advancing* e *retreating sides* (“b” e “d” respectivamente) onde o fenômeno relativo à granulação e transição da microestrutura se repete. Micrografia (e) permite observar detalhes na textura da microestrutura do *retreating side*, evidenciando o fluxo do material plastificado nessa região durante o processo FSW. Imagens (a) e (f) permitem visualizar o material base de ambos os lados da amostra. Finalmente, um fenômeno característico pode ser bem visualizado na micrografia (c), referente ao denominado “*onion rings*”. Tal formação é fruto do fluxo de material plastificado dentro do *nugget*, e varia de acordo com a ferramenta rotacional e velocidade de translação adotada durante a soldagem por fricção e mistura.

5 CONCLUSÃO

A soldagem por Fricção e Mistura é um processo inovador e revolucionário. O seu processamento – envolvendo essencialmente apenas uma ferramenta rotacional e as superfícies a serem unidas – vai de encontro com vários métodos “tradicionais” já estabelecidos na indústria de união de superfícies, o que lhe confere benefícios singulares. Dentre as vantagens deste método, destaca-se a redução do impacto ecológico e dos custos associados ao processo devido a não utilização de insumos consumíveis, baixa distorção e diminuição dos defeitos metalúrgicos em função das reduzidas temperaturas desenvolvidas durante a soldagem e não inserção de um metal de adição, além de boas propriedades mecânicas (resistência e ductilidade), microestrutura refinada resultante do processo, entre diversos outros.

Apesar de básicos, os procedimentos e análises adotados e desenvolvidos cumpriram o objetivo proposto. Uma infraestrutura laboratorial – composta por equipamentos obtidos externamente, projetados e fabricados pelo aluno e empresa especializada em usinagem terceira (Usiman) ou ainda adaptados do próprio Departamento (DEMEC) – voltada especificamente para o processo FSW foi montada e catalogada visando reutilização em trabalhos futuros. Múltiplas soldagens por Fricção e Mistura foram conduzidas, com variação de parâmetros de operação e liga de alumínio sendo trabalhada. Tais juntas soldadas foram examinadas via ensaios não-destrutivo (radiografia industrial) e mecânicos (tração e dobramento), além de terem sua microestrutura analisada via metalografia (microscopia ótica).

Através da metodologia supracitada, uma das principais aplicações para este método – a soldagem de ligas de alumínio – foi consolidada dentro das condições de operação do DEMEC – UFPE. O procedimento adotado sob os parâmetros de liga AA2017, 800 rpm de rotação da ferramenta e 50 mm/min de velocidade de soldagem permitiu a obtenção de soldas livres de defeitos internos (vazios/porosidades), com baixa distorção e boas propriedades mecânicas de resistência à tração e ductilidade.

Observou-se que a utilização de uma base fixadora projetada especificamente para o processo FSW contribui para a melhoria da qualidade da junta soldada, tanto em termos de planeza das superfícies unidas quanto no que se refere à “unicidade” da peça trabalhada – que nada mais é do que a característica da junta de responder a esforços mecânicos como se fosse uma única peça inteiriça, e não a união de dois componentes distintos. Tal união entre as chapas permitiram uma resistência

mecânica similar àquela encontrada em componentes não-soldados (peças únicas), o que foi comprovado através dos ensaios de tração e dobramento conduzidos neste trabalho.

Através da variação dos parâmetros de soldagem, concluiu-se que a geração de calor – aqui variada através da velocidade de translação da ferramenta rotacional – contribui como fator determinante na plastificação e fluxo do material ao longo da solda, fundamental para a obtenção de um cordão totalmente preenchido. O ensaio mecânico não-destrutivo de radiografia industrial mostrou ser uma ferramenta bastante eficiente na detecção de vazios e porosidades internas, fundamental para a posterior investigação e mitigação desses defeitos. Realizados os demais ensaios mecânicos, ficou claro que a presença de tais vazios afeta drasticamente as propriedades mecânicas de resistência da junta, tornando-se um fator decisivo na viabilidade da aplicação deste método de união em situações práticas envolvendo componentes mecânicos soldados. Por fim, a análise metalográfica por microscopia ótica permitiu observar a formação de regiões distintas na microestrutura do material, no tocante à textura e granulação desta, o que explica um aumento na resistência mecânica na zona misturada (mais refinada através do processo FSW) em detrimento da formação de “zonas de transição abrupta”, suscetíveis à fragilização e nucleação de trincas.

Defeitos resultantes do procedimento conduzido neste trabalho – ainda que nos parâmetros otimizados alcançados – ainda são observados, com destaque para o *flash* recorrente em todas as juntas soldadas. Apesar de sabida a correlação deste fenômeno com o mecanismo de geração de calor durante o FSW, causas raízes específicas ainda são desconhecidas, podendo estar associadas com a má dissipação de calor proporcionada pela estrutura de fixação projetada e fabricada neste estudo.

É válido destacar que, apesar de todas as conclusões e análises desenvolvidas neste trabalho, muito ainda há por ser feito. Ainda que considerada apenas a infraestrutura disponível atualmente no DEMEC – UFPE para a pesquisa acerca do processo FSW, diversos outros estudos fundamentais para o domínio desta tecnologia têm condições de serem conduzidos, tais como o desenvolvimento de uma ferramenta rotacional própria, otimização de parâmetros para outras ligas e espessuras de chapas, entre outros. Mais uma vez, o presente trabalho cumpre o seu propósito de servir de base para o desenvolvimento de novas pesquisas – inovadoras para o

contexto do DEMEC – que podem render excelentes frutos acadêmicos e profissionais para a Instituição de Ensino, alunos e Empresas locais do setor metalmeccânico.

REFERÊNCIAS

FABRICIO FILHO, L. C. et al. **Digital Radiographic Inspection and Characterization of Defects in Joined Aluminum Alloy AA5083 for Shipbuilding by the FSW Process.** In: INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 2017, Curitiba, Anais...Curitiba: COBEM, 2017.

ESAB. **Friction Stir Welding Demonstration.** In: FABTECH, 2014, Atlanta. Disponível em: < <https://www.youtube.com/watch?v=SyqIqSfWEr0> >. Acesso em: 24 de jul. 2018.

FUJII, H. et al. **Effect of Tool Shape on Mechanical Properties and Microstructure of Friction Stir Welded Aluminum Alloys.** Materials Science and Engineering, Elsevier. 2005.

IMPÉRIO DOS METAIS. **Alumínio 2017.** 2018. Disponível em: < http://www.imperiodosmetais.com.br/downloads/download_ficha_tecnica/aluminio/2017.pdf >. Acesso em: 7 nov. 2018.

KIM, Y. G. et al. **Three Defect Types in Friction Stir Welding of Aluminum Die Casting Alloy.** Materials Science and Engineering, Elsevier. 2005.

KUMAR, H. M. A.; RAMANA, V. V. **An Overview of Friction Stir Welding (FSW): A New Perspective.** International Journal of Engineering and Science, v. 4, nº 6, p. 01-04, jun. 2014.

METALTHAGA. **Tabela Técnica: Metalcast 3 – Liga de Alumínio 5083.** 2018. Disponível em: < <http://metalthaga.com.br/wp-content/uploads/2015/11/4-METALCAST-3-Ligas-de-Aluminio-5083.pdf> >. Acesso em: 7 de nov. 2018.

MISHRA, R. S.; MA, Z. Y. **Friction Stir Welding and Processing.** Reports: A Review Journal – Materials Science and Engineering, Elsevier. 2005.

MROCZKA, K. et al. **Microstructure and Properties of FSW joints of 2017A/6013 Aluminum Alloy Sheets.** International Scientific Journal, v. 33, nº 2, p. 93-96, out. 2008.

NANDAN, R.; DEBROY, T.; BHADESHIA, H. K. D. H. **Recent Advances in Friction Stir Welding – Process, Weldment Structure and Properties**. Progress in Materials Science, Elsevier. 2008.

SINGH, B. R. **A Hand Book on Friction Stir Welding**. Lambert Academic Publishing, UK. 2012. Disponível em: < <https://www.researchgate.net/publication/235429608> >. Acesso em: 24 jul. 2018.

VERMA, S. M.; MISRA, J.P. **A Critical Review of Friction Stir Welding Process**. In: DAAAM International Scientific Book. 2015. Cap 22, p.249-266.