

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

DEPARTAMENTO DE MECÂNICA

ENGENHARIA MECÂNICA

FABIO JOSÉ ROSEIRA

**ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA GEOMETRIA DOS CANAIS DA MESA
DE SOLDAGEM NO PROCESSO DE FRICTION STIR WELDING**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2017

FABIO JOSÉ ROSEIRA

**ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA GEOMETRIA DOS CANAIS DA MESA
DE SOLDAGEM NO PROCESSO DE FRICTION STIR WELDING**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em engenharia mecânica do departamento de mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Roger Navarro
Verastegui

Co-Orientador: Prof. Dr. Luciano Augusto
Lourençato

PONTA GROSSA

2017



TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA GEOMETRIA DOS CANAIS DA MESA DE SOLDAGEM NO PROCESSO DE FRICTION STIR WELDING

Por

FABIO JOSÉ ROSEIRA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 3 de julho de 2017 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Luciano Augusto Lourençato

Coorientador

Prof. Dr. Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz

Membro Titular

Prof. Dr. Oscar Regis Júnior

Membro Titular

Prof. Dr. Marcos Eduardo Soares

Responsável pelos TCC

Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de
Carvalho

Coordenador do Curso

RESUMO

ROSEIRA, Fabio José. **Análise da variação da geometria dos canais da mesa de soldagem no processo de Friction Stir Welding**. 47 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017.

Friction Stir Welding é um processo de soldagem por atrito, ainda em desenvolvimento e com muitos parâmetros sendo estabelecidos empiricamente para cada caso específico. O processo é capaz de realizar a soldagem linear contínua devido ao atrito gerado pela rotação de uma ferramenta não consumível na região a ser unida. A mesa de apoio tem a função de auxiliar na fixação das peças e garantir uma boa dissipação do calor gerado no processo. Ainda há poucos estudos sob a influência na mesa de apoio no processo e na geração de defeitos. Pretende-se verificar a influência da existência de um canal na mesa de apoio, sob a linha de soldagem, com duas geometrias diferentes (côncavo e retangular) comparado com os resultados obtidos sem a existência do canal na qualidade da junta soldada de alumínio nas ligas 5053-H34 e 1200-H14. Os canais devem permitir uma penetração completa da ferramenta sem que haja contato da ferramenta com a mesa de apoio. Tal estudo mostrou-se ineficaz na melhora da qualidade da união soldada. Os canais apenas prejudicaram a união para a liga de alumínio 5052-H34. Enquanto para a liga de alumínio 1200-H14 o canal retangular evitou o contato de ferramenta com uma mesa, que foi constatado na ausência de um canal, sem prejuízo aparente a qualidade da solda, enquanto o canal côncavo prejudicou a qualidade da junta.

Palavras chaves: *Friction Stir Welding* (FSW). Mesa de apoio. Canais. Ligas de Alumínio.

ABSTRACT

ROSEIRA, Fabio José. **Análise da variação da geometria dos canais da mesa de soldagem no processo de Friction Stir Welding**. 47 pages. Trabalho de Conclusão de Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017.

Friction Stir Welding is a process of welding by friction, still in development and with many parameters being established empirically for each specific case. The process is capable of performing continuous linear welding due to the friction generated by the rotation of a non-consumable tool in the region to be joined. The table of support has the function of assisting in fixing the parts and ensure a good dissipation of the heat generated in the process. There are still few studies under the influence in the table of support in the process and in the generation of defects. It is intended to verify the influence of the existence of a channel in the support table, under the welding line, with two different geometries (concave and rectangular) compared to the results obtained without the existence of the channel in the quality of the welded joints of aluminum in the alloys 5053-H34 and 1200-H14. The channels should allow a complete penetration of the tool without any contact of the tool with the table of support. This study proved to be ineffective in improving the quality of the welded joint. The channels only harmed the union for 5052-H34 aluminum alloy. While for the 1200-H14 aluminum alloy the rectangular channel avoided tool contact with a table, which was find in the absence of a channel, without apparent damage to the quality of the weld, while the concave channel impaired the quality of the joint.

Keywords: Friction Stir Welding (FSW). Baking. Channel. Aluminum Alloys.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Ilustração do processo de soldagem por FSW..... | 10 |
| Figura 2: Desenho esquemático do processo de FSW | 14 |
| Figura 3: Juntas típicas de FSW | 16 |
| Figura 4: Ferramenta de FSW..... | 18 |
| Figura 5: Exemplos de perfis de ombro vistos de baixo | 19 |
| Figura 6: Diferentes geometrias de pino para ferramentas de FSW | 20 |
| Figura 7: Ferramenta de FSW com pino não concêntrico | 20 |
| Figura 8: Diagrama esquemático da microestrutura das soldagens por FSW em alumínio..... | 23 |
| Figura 9: Fresadora Cardoso FC30 adaptada para realização de FSW | 26 |
| Figura 10: Ferramenta de FSW utilizada nos ensaios, já montada no cabeçote..... | 28 |
| | 28 |
| Figura 11: Vista explodida da mesa de soldagem com um canal retangular | 29 |
| Figura 13: Junta soldada de alumínio 5052 H34 com canal retangular..... | 35 |
| Figura 14: Vista em corte da junta em alumínio 5053-H34 com canal retangular | 35 |
| Figura 15: Junta soldada de alumínio 5052 H-34 com canal côncavo | 36 |
| Figura 17: Junta de alumínio 5053 H-34 sem a presença do canal | 37 |
| Figura 18: Corte da junta de alumínio 5052 H-34 soldada sem canal na mesa | 38 |
| Figura 19: Junta da liga de alumínio 1200-H14 sem a presença de canal na mesa | 40 |
| Figura 20: Corte da junta soldada de alumínio 1200-H14 sem a presença de canal na mesa | 41 |
| Figura 21: Junta soldada de alumínio 1200-H14 com canal côncavo | 42 |
| Figura 22: Corte da junta soldada de alumínio 1200-H14 com canal côncavo..... | 42 |
| Figura 23: Junta soldada de alumínio 1200-H14 com canal retangular | 43 |
| Figura 24: Corte da junta de alumínio 1200-H14 com canal retangular | 44 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Condição de desenvolvimento de FSW para ligas de alumínio..... | 13 |
| Tabela 2: Propriedades mecânicas de amostras de alumínio soldadas por FSW..... | 15 |
| Tabela 3: Comparação da energia necessária para efetuar a soldagem em uma liga de alumínio 6082 com 6mm de espessura..... | 16 |
| Tabela 4: Composição química da liga de alumínio 5052 | 24 |
| Tabela 5: Composição química da liga de alumínio 1200 | 25 |
| Tabela 6: Parâmetros de soldagem aplicados aos experimentos | 27 |
| Tabela 7: Sequência para realização dos experimentos | 32 |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 9 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 11 |
| 2.1 PROCESSO DE SOLDAGEM..... | 11 |
| 2.2 PROCESSO DE FRICTION STIR WELDING | 11 |
| 2.2.1 Histórico dos Processo de Friction Stir Welding | 12 |
| 2.2.2 Definição do Processo de Friction Stir Welding | 13 |
| 2.2.3 Características da união por Friction Stir Welding | 14 |
| 2.2.4 Parâmetros do Processo de Friction Stir Welding..... | 17 |
| 2.2.5 Ferramenta de Friction Stir Welding | 18 |
| 2.2.6 Base de Fixação para Soldagem por Friction Stir Welding..... | 21 |
| 2.2.7 Caracterização da Junta Resultante do Processo de Friction Stir Welding em Alumínio | 21 |
| 2.2.7.1 Tipos de defeitos na união por Friction Stir Welding..... | 23 |
| 2.3 CARACTERISTICAS DAS LIGAS DE ALUMÍNIO APLICADAS AOS EXPERIMENTOS..... | 24 |
| 2.3.1 Alumínio 5052-H34 | 24 |
| 2.3.2 Alumínio 1200-H14 | 25 |
| 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL..... | 26 |
| 3.1 EQUIPAMENTO E PARAMETROS PARA REALIZAÇÃO DE FRICTION STIR WELDING | 26 |
| 3.2 FERRAMENTA E PEÇAS PARA SOLDAGEM | 27 |
| 3.3 CANAIS NA MESA DE SOLDAGEM..... | 28 |
| 3.3.1 Superfície Sem Canal | 29 |
| 3.3.2 Canal Retangular | 30 |
| 3.3.3 Canal Côncavo | 30 |
| 3.4 PROCEDIMENTO PARA REALIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS | 31 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 3.5 | AVALIAÇÃO DAS AMOSTRAS | 32 |
| 4. | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 34 |
| 4.1 | LIGA DE ALUMÍNIO 5052-H34 | 34 |
| 4.1.1 | Canal Retangular para a Liga 5052-H34..... | 34 |
| 4.1.2 | Canal Côncavo para a Liga 5052-H34..... | 36 |
| 4.1.3 | Sem Canal para a Liga 5052-H34..... | 37 |
| 4.1.4 | Avaliação dos Resultados para a Liga de Alumínio 5052-H34 | 38 |
| 4.2 | LIGA DE ALUMÍNIO 1200-H14 | 39 |
| 4.2.1 | Sem Canal para a liga 1200-H14..... | 39 |
| 4.2.2 | Canal Concavo para a Liga 1200-H14..... | 41 |
| 4.2.3 | Canal Retangular para a Liga 1200-H14..... | 43 |
| 4.2.4 | Avaliação dos Resultados para a Liga de Alumínio 1200-H14 | 44 |
| 5. | CONCLUSÕES | 45 |
| 6. | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 46 |

1. INTRODUÇÃO

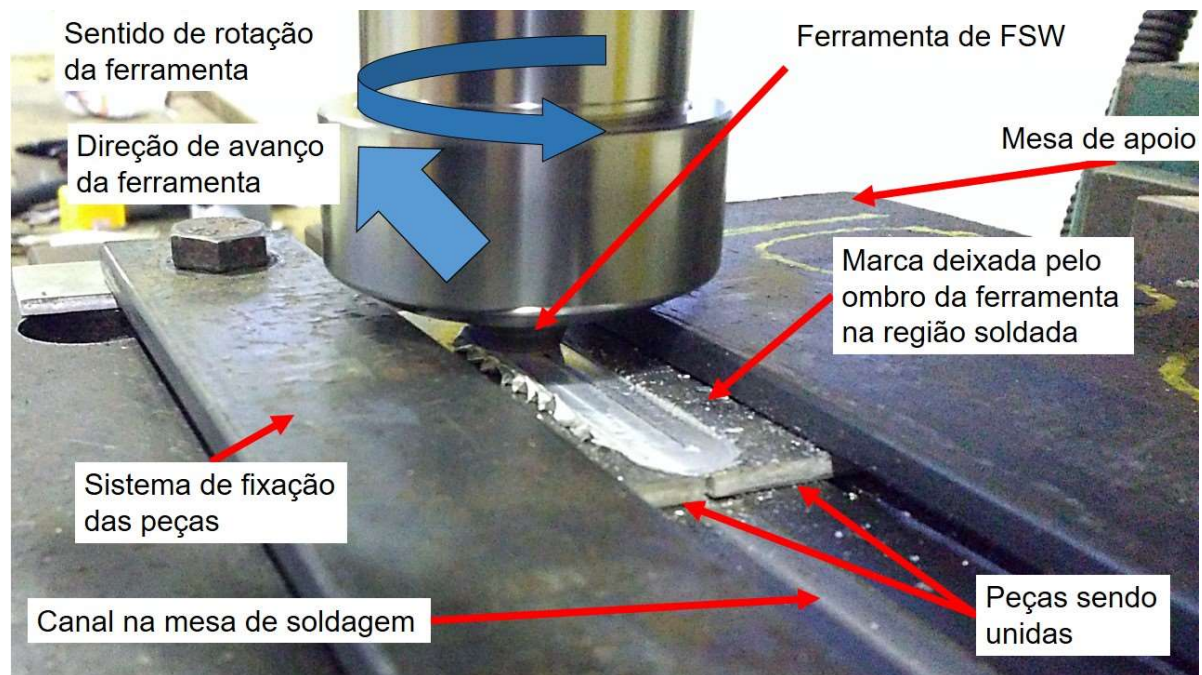
A necessidade de criar máquinas e equipamentos para suprir suas limitações levou a humanidade a desenvolver tecnologias de fabricação cada vez mais aprimoradas, dentre elas a soldagem é hoje o mais importante processo para união de metais a nível industrial, sendo aplicada na fabricação e recuperação de peças simples, para fabricação de joias, ou ainda para estruturas complexas e de alto grau de responsabilidade na indústria aeroespacial, nuclear e química (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

O Processo de *Friction Stir Welding* (FSW), também chamado de Soldagem por Atrito com Pino Não Consumível, foi criado por Wayne Thomas no *The Welding Institute*, Cambridge no Reino Unido em 1991. É um processo de soldagem de materiais no estado sólido que ganhou destaque ao se mostrar eficiente para soldagem de ligas de alumínio tratado com processo de envelhecimento sem prejudicar as propriedades do material (NANDAN; DEBROY; BHADESHIA, 2008).

O processo gera calor através do atrito da ferramenta com as peças a serem unidas. O ombro da ferramenta aquece a peça para que o metal perca resistência mecânica ao ponto que seja possível que o pino realize a mistura dos materiais mecanicamente, movendo-se pela linha de solda. A mesa de apoio tem como função, fixar as peças a serem unidas, evitar a fuga de material da região da união. O processo é ilustrado na figura 1 (MISHRA; MAHONEY, 2007).

Com base nisso, serão comparadas a qualidade da união de junta de topo da liga de alumínio 5052 H34 e 1200 H14 soldado por FSW com duas geometrias de canal distintas na mesa de apoio com os resultados obtidos sem esses canais, para obtenção de uma união sem defeitos. Esses canais são confeccionados em barras de mesmo material da mesa que posicionados em um rebaixo já previamente existente na mesa de soldagem.

Figura 1: Ilustração do processo de soldagem por FSW



Fonte: Autoria própria.

Uma das geometrias de canal escolhidas é um canal retangular com 0,3mm de profundidade para evitar o contato da ferramenta com a mesa, este canal permite que uma quantidade muito pequena de material da junta escape para esse espaço durante o processo, portanto, sem prejudicar a união. O outro canal adotado é côncavo e com uma profundidade máxima de 0,8mm, que devido ao seu formato deve evitar que haja formação de cantos vivos no material deformado para o interior do canal.

Pretende-se comparar a qualidade das juntas e presença de defeito variando a geometria do canal para constatar se é viável a presença dos mesmos para a melhor qualidade da união. A utilizou-se de uma metodologia para controle dos parâmetros do processo para dar confiabilidade aos resultados do trabalho.

A existência do canal sob a linha de soldagem deve permitir o dimensionamento da ferramenta com o comprimento do pino mais próximo ao valor da espessura da peça, garantido uma penetração completa, sem risco de contato da ferramenta com a mesa e sem haver significativa perda de material para o canal. Sendo assim deve-se obter uma solda de melhor qualidade, sem regiões com falta de deformação, ou falta de material na união, tornando o processo menos sensível a variações de espessura das peças soldadas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O processo de *Friction Stir Welding* (FSW) é classificado dentre os processos de soldagem existentes como um processo que ocorre no estado sólido dos materiais em que o calor necessário ao processo é obtido através do atrito.

2.1 PROCESSO DE SOLDAGEM

O processo de soldagem é definido pela ASW (*American Welding Society*) como: “A operação que visa obter a coalescência localizada, produzida pelo aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a aplicação de pressão e de metal de adição”. Onde coalescência é definida pela mesma como sendo: “O crescimento em um único corpo dos materiais sendo soldados” (AWS, 1994).

Embora haja evidências de peças fabricadas com processos de soldagem a mais 6000 anos pelo império Persa, foi com as experiências de Sir Humphrey Davy com o arco elétrico em 1801, e a utilização do acetileno por Edmund Davy em 1836 que a partir da primeira Guerra Mundial ela passou a ser amplamente utilizada como processo de fabricação. Hoje existem mais de 70 processos de soldagem difundidos nas diversas áreas de fabricação, eles podem ser classificados conforme o tipo de energia usado para realizar a união das peças, pela classificação adotada pela ASW, dentro dos processos de soldagens que ocorrem no estado sólido está a soldagem por atrito, onde é incluso o processo de FSW. (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

2.2 PROCESSO DE FRICTION STIR WELDING

Diferente dos processos tradicionais de soldagem por atrito, utilizados desde 1891, restrito a união de topo para peças cilíndricas com face plana. O processo de FSW permite que seja feita uma soldagem linear contínua em diversos tipos de juntas. (THOMAS et al., 1991).

2.2.1 Histórico dos Processo de Friction Stir Welding

O processo de FSW também chamado de soldagem por atrito linear com mistura (SALM), ou ainda, Soldagem por Atrito com Pino Não Consumível (SAPNC) foi criado e patenteado por Wayne Morris Thomas no *The Welding Institute*, em Cambridge no Reino Unido em 1991 (NANDAN; DEBROY; BHADESHIA, 2008; PAIVA, 2009; THOMAS et al., 1991).

Embora não se restrinja a esses materiais, o processo ganhou destaque quando foi evidenciado que o método solda facilmente as ligas de alumínio das séries 2000 e 7000, ditas como não soldáveis pelos processos convencionais (com fusão de material), que são amplamente utilizadas na indústria aeronáutica (MISHRA; MAHONEY, 2007).

A aplicação do processo de FSW torna-se muito atrativo na substituição do uso de rebites para fixação da fuselagem de alumínio na estrutura dos aviões. O resultado é significativo para a redução de peso que gera melhor rendimento, economia e menos poluição. A aplicação de FSW na fabricação do jato executivo Eclipse 500, por exemplo, substituindo peças rebitadas, resultou em uma diminuição de peso e por consequência, uma melhora no consumo estimada em 4% (MENDEZ; EAGAR, 2002).

Ainda que se destaque pelas suas vantagens na união de peças de alumínio e suas ligas o processo hoje já é aplicado para a soldagem de titânio, aço, zinco, magnésio, cobre e suas ligas. O processo também pode ser aplicada a composto ou materiais plásticos adequados, tais como termoplásticos (HILLER, 2007; THOMAS et al., 1991; THOMAS; JOHNSON; WIESNER, 2003a).

O processo de FSW é relativamente novo, e até 2009, os parâmetros de controle do processo ainda eram criados de forma empírica. Por isso o nível de aplicação a nível industrial ainda é limitado a algumas ligas e certas espessuras de peças unidas, conforme listado na Tabela 1 (CRUZ; NETO, 2009).

Tabela 1: Condição de desenvolvimento de FSW para ligas de alumínio

| Ligas de Alumínio | Em Produção | Pré-Produção Desenvolvimento | Em Pesquisa | Demonstrado |
|-------------------|-------------|------------------------------|-------------|-------------|
| 1xxx | | | | X |
| 2xxx<25mm | X | | | |
| 2xxx 25-50mm | | | X | |
| 3xxx<25mm | | | | X |
| 4xxx<5mm | | | | X |
| 5xxx<25mm | X | | | |
| 6xxx<25mm | X | | | |
| 6xxx 25-50mm | | X | | |
| 7xxx<25mm | X | | | |
| 7xxx 25-50mm | | | X | |
| 8xxx | | | | X |

Fonte: Adaptado de CRUZ; NETO, 2009.

2.2.2 Definição do Processo de Friction Stir Welding

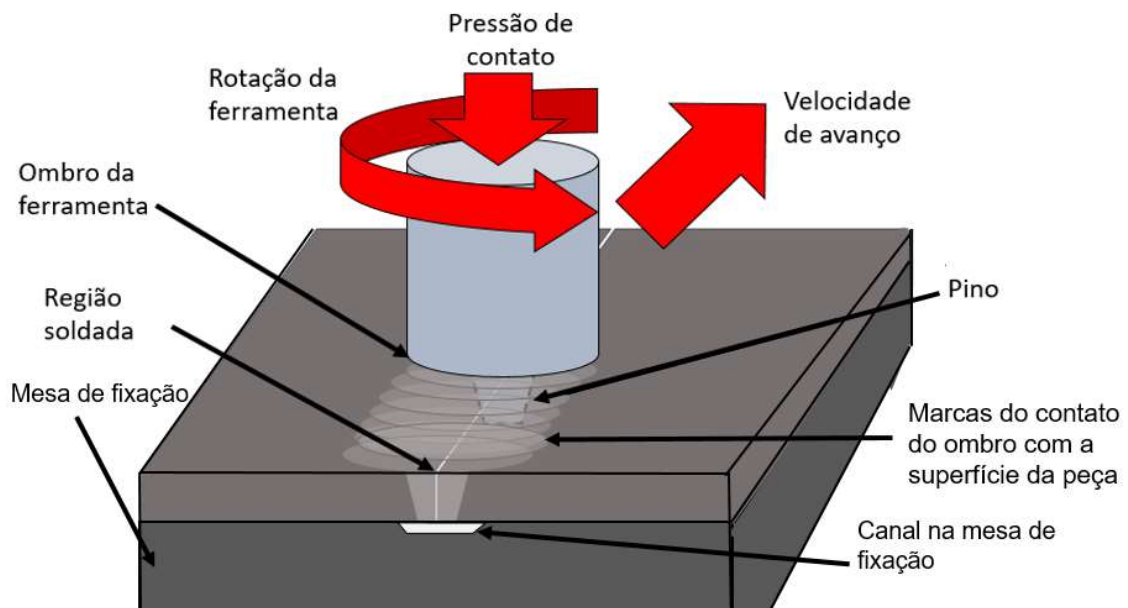
O processo pode ser dividido em 4 etapas: o “mergulho de fricção”, o tempo de permanência, a soldagem e o afastamento. A penetração da ferramenta na junta, denominado mergulho de fricção, se dá de maneira lenta em que o calor necessário para plastificar o material é obtido pelo atrito gerado pelo movimento de rotação do pino que é pressionado contra a peça. As forças envolvidas nesta fase são consideradas relativamente grandes. Esta etapa dura até que o ombro da ferramenta entre em contato com a superfície da peça (ALMEIDA, 2015; CRUZ; NETO, 2009; THOMAS et al., 1991).

O tempo de Permanência (“*dwel time*”) no local da penetração inicial do pino é necessário para que a peça e a ferramenta atinjam a temperatura de trabalho, antes de ser iniciada a etapa de soldagem e dura poucos segundos. É importante frisar a importância do contato do ombro da ferramenta com a superfície da peça para prover calor suficiente para permitir a posterior movimentação do pino sem comprometer a ferramenta (MISHRA; MAHONEY, 2007; THOMAS et al., 1991).

A etapa de soldagem é onde a união é efetivamente concretizada. Consiste na passagem do pino da ferramenta pela linha que deve ser unida realizando movimento de rotação no próprio eixo, esse movimento relativo do ombro da ferramenta com a superfície das placas gera calor a tal ponto que o material

imediatamente adjacente ao pino possa ser deformado e misturado mecanicamente pelo avanço da ferramenta, que percorre a região a ser soldada, de modo que após a passagem da ferramenta essas regiões se unem e se dá a união das peças, conforme é ilustrado na figura 2 (THOMAS et al., 1991; MISHRA; MAHONEY, 2007).

Figura 2: Desenho esquemático do processo de FSW



Fonte: Autoria própria.

Por fim o afastamento ocorre após cessar o avanço da ferramenta, em que a mesma é elevada pra fora junta, antes de ser desligada a rotação (ALMEIDA,2015).

2.2.3 Características da união por Friction Stir Welding

Diante da gama de processos de soldagem disponíveis o processo de FWS ganha importância por superar algumas restrições de outros processos. Primeiramente por ser capaz de soldar todas as ligas de alumínio, inclusive as ditas: não soldáveis pelos processos convencionais (series 2000 e 7000) e a união entre ligas diferentes de alumínio (e outros materiais). Além disso a qualidade da união é muito próxima a resistência do próprio metal base, conforme pode ser observado na Tabela 2, em que a tensão máxima suportada pelo metal base é comparada com a da junta unida pela soldagem por atrito com pino não consumível para algumas ligas de

alumínio. Na mesma Tabela pode se evidenciar a baixa deformação causa nas peças durante o processo. Isso reduz a possibilidade de empenamento da peça e garante uma maior estabilidade dimensional (ALMEIDA, 2015; CRUZ; NETO, 2009).

Tabela 2: Propriedades mecânicas de amostras de alumínio soldadas por FSW

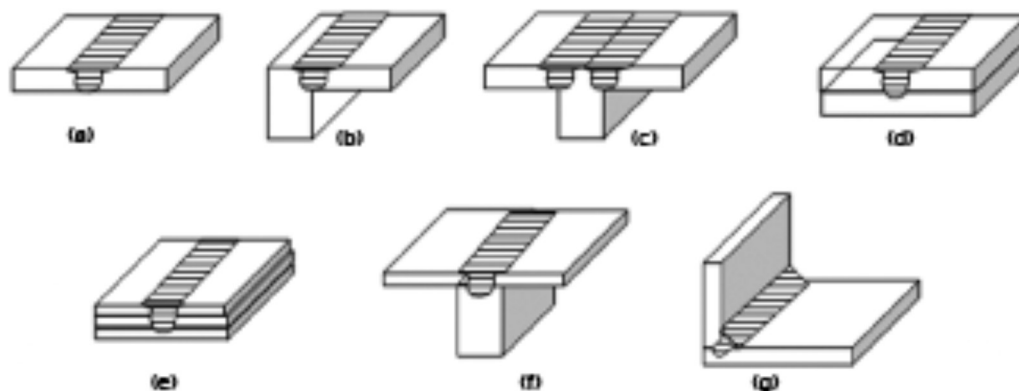
| Material | Tensão de escoamento (MPa) | Resistencia à tração (MPa) | Deformação (%) | Eficiência da junta ($\sigma_{\max\text{FSW}}/\sigma_{\max}$) |
|----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|---|
| 5083-O metal base | 148 | 298 | 23,5 | 1,00 |
| 5083-O FSW | 141 | 298 | 23,0 | |
| 5083-H metal base | 249 | 336 | 16,5 | 0,91 |
| 5083-H FSW | 153 | 305 | 22,5 | |
| 6082-T6 metal base | 286 | 301 | 10,4 | 0,83 |
| 6082-T6 FSW | 160 | 254 | 4,85 | |
| 6082-T4 metal base | 149 | 260 | 22,9 | 0,93 |
| 6082-T4 FSW | 138 | 244 | 18,8 | |
| 7108-T79 metal base | 295 | 370 | 14,0 | 0,86 |
| 7108-T79 FSW | 210 | 32023,5 | 12,0 | |

Fonte: Adaptado de CRUZ; NETO, 2009.

O processo apresenta ainda todas as vantagens dos processos de soldagem por atrito convencionais, em que a união ocorre por deformação plástica do material base abaixo da temperatura de fusão, porém a solda pode ter comprimento contínuo ilimitado. Como não há fusão de material não ocorrem rachaduras de solidificação, evita trincas a quente, evita o surgimento de fases frágeis do material, reduz significativamente a possibilidade de problemas de porosidade na junta, não há perda de elementos de liga e no caso das ligas de alumínio tratadas termicamente há pouca perda de propriedades. Além disso a deformação mecânica gera um completo refinamento da microestrutura na região da junta soldada (RAYMUNDO et al., 2015).

O processo foi desenvolvido inicialmente para reparo de rachaduras e união de peças com um plano comum, como nas juntas de topo. Embora juntas de filete não possam ser executadas por esse processo devido à falta de metal de adição há outros tipos de junta que podem ser unidas por este processo de soldagem, a figura 3 mostra algumas juntas características de união por FSW (HILLER, 2007; THOMAS et al., 1991; THOMAS; JOHNSON; WIESNER, 2003a).

Figura 3: Juntas típicas de FSW



Fonte: MISHRA; MAHONEY, 2007.

O processo também apresenta vantagens energéticas quando comparado aos processos convencionais, conforme pode ser observado na Tabela 3 em que é comparado o nível de energia necessário para realização da solda pelos principais processos de soldagem para uma liga de alumínio (CRUZ; NETO, 2009).

Tabela 3: Comparação da energia necessária para efetuar a soldagem em uma liga de alumínio 6082 com 6mm de espessura

| Processo | Velocidade de soldagem (mm/min) | Potência de trabalho (kW) | Potência bruta requerida (kW) | Aporte térmico (KJ/mm) |
|------------------|---------------------------------|---------------------------|-------------------------------|------------------------|
| FWS | 500 | 2 | 2,5 | 0,24 |
| MIG | 300 | 7,5 | 8,6 | 1,5 |
| CO2 Laser | 5000 | 10 | 112 | 0,12 |
| | 1600 | 5 | 55 | 0,18 |

Fonte: Adaptado de CRUZ; NETO, 2009.

A economia gerada pelo processo por não precisar de material de adição na junta é uma vantagem durante a fabricação e no desempenho das máquinas, que podem ter melhor eficiência pela menor massa da estrutura quando a união é realizada por FSW (MENDEZ; EAGAR, 2002).

O processo ainda é visto como uma tecnologia ambientalmente correta pois além de não necessitar de consumíveis (gases de proteção e metal de adição), não emite substâncias nocivas ao meio ambiente, não gera escoria, não exige limpeza da superfície com solventes (MISHRA; MAHONEY, 2007).

O processo apresenta algumas desvantagens na execução, como o fato de não ser portátil e exigir cuidados na fixação das peças à serem unidas. Além disso o maquinário necessário para a execução com bons parâmetros de controle ainda é caro e é necessário projetar uma ferramenta pra cada tipo de junta e espessura de peça. Ainda há restrições, por de parâmetros não desenvolvidos, para alguns materiais (Souza,2010).

2.2.4 Parâmetros do Processo de Friction Stir Welding

Como o processo depende do calor gerado, o mesmo é influenciado pela condutividade térmica da peça de trabalho, da ferramenta e da mesa de fixação. A partir disso, os principais parâmetros a serem considerados para realização do processo de FSW são aqueles capazes de variar a quantidade de calor envolvido: a rotação da ferramenta, a velocidade de avanço, a força vertical de forjamento, o material soldado e da ferramenta e, por fim, a geometria da ferramenta (MISHRA; MAHONEY, 2007).

A velocidade de avanço da ferramenta determina a velocidade de soldagem. Essa velocidade influencia inversamente na geração de calor para realização da união, pois quanto o menor tempo que o ombro da ferramenta fica sobre a superfície (maior velocidade de avanço), menor a quantidade de calor gerado pelo atrito (FREITAS, 2017).

A rotação da ferramenta também está ligada a velocidade de soldagem desejada, e deve ser suficiente para que o atrito do ombro da ferramenta aqueça o material soldado à temperatura que seja possível realizar a união. A rotação da ferramenta também é responsável pela mistura mecânica do material base (MISHRA; MAHONEY, 2007).

A força vertical de forjamento é a força exercida pelo ombro da ferramenta sobre a superfície da peça e está intimamente ligada com o aporte térmico do processo e com a formação de rebarbas na superfície da peça. Sendo que a força de forjamento aumenta consideravelmente com o aumento da penetração do ombro na

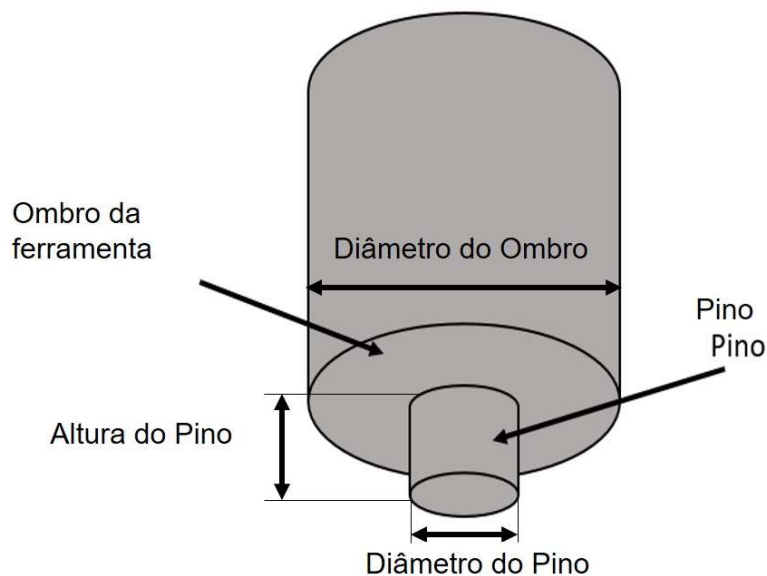
peça. A relação entre a rotação, velocidade de avanço e força vertical de forjamento seguem uma relação que não é linear, o que dificulta a extrapolação de parâmetros para essa variável. O excesso de força vertical pode fazer o material da junta aderir à mesa de apoio (HILLER, 2007; MISHRA; MAHONEY, 2007; SANTOS et al., 2014).

Além desses fatores ainda há influência do ângulo de inclinação da ferramenta sobre superfície que é necessário para alguns modelos de ferramenta. Essa inclinação auxilia na movimentação do material da união e no forjamento da superfície da junta após a passagem do pino (MISHRA; MAHONEY, 2007).

2.2.5 Ferramenta de Friction Stir Welding

A ferramenta de FSW mais simples, como a representação na figura 4, é basicamente um cilindro escalonado com dois diâmetros distintos em que a região com diâmetro menor é chamado de pino e tem a função de realizar mistura do material que é soldado. Enquanto a superfície plana do diâmetro maior é chamado de ombro da ferramenta e gera calor através do atrito, exercendo pressão sobre a superfície da peça sendo soldada e também conter o material plastificado para que não escape da região da junta, evitando porosidade na solda (HILLER; FERREIRA, 2005).

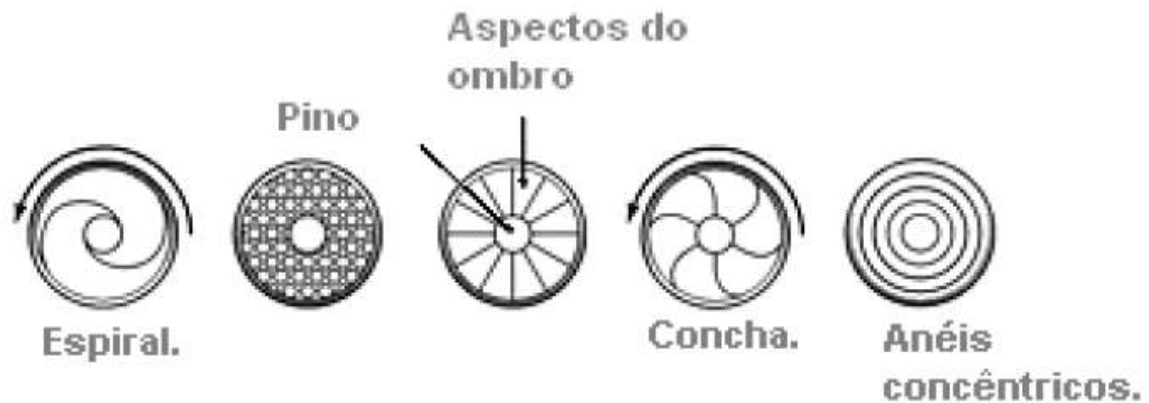
Figura 4: Ferramenta de FSW



Fonte: Autoria própria.

O plano do ombro pode ser liso ou com ranhuras, a figura 5 mostra alguns exemplos de perfis de ombro, essas marcas no perfil podem ajudar a aumentar a geração de calor, melhorar o acabamento superficial e aumentara velocidade de soldagem (HILLER; FERREIRA, 2005; PAIVA, 2009; THOMAS; JOHNSON; WIESNER, 2003a).

Figura 5: Exemplos de perfis de ombro vistos de baixo

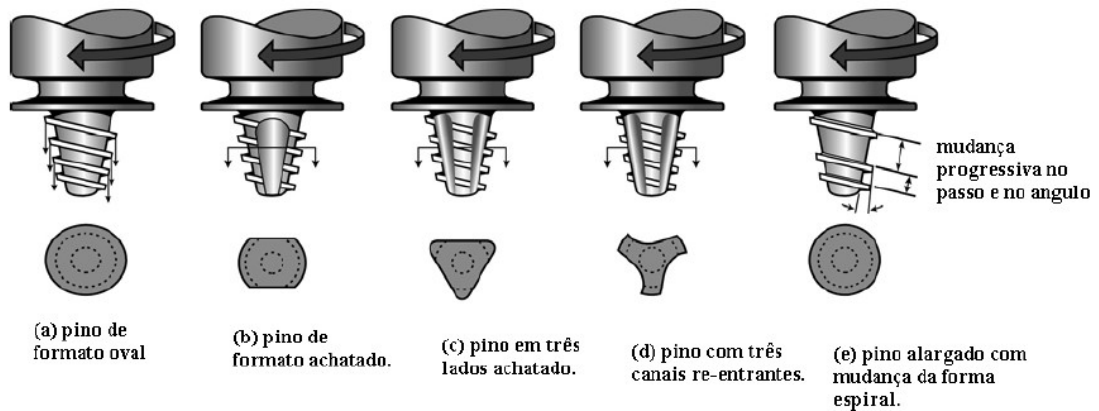


Fonte: PAIVA, 2009.

Para o dimensionamento do ombro, *The Welding Institute* desenvolveu uma relação entre o diâmetro do ombro da ferramenta e o diâmetro do pino entre 2,5 para 1 e 3 para 1, para ser adotada para a maioria das ligas de alumínio em peças com espessura menor que 6mm (HILLER; FERREIRA, 2005; MISHRA; MAHONEY, 2007).

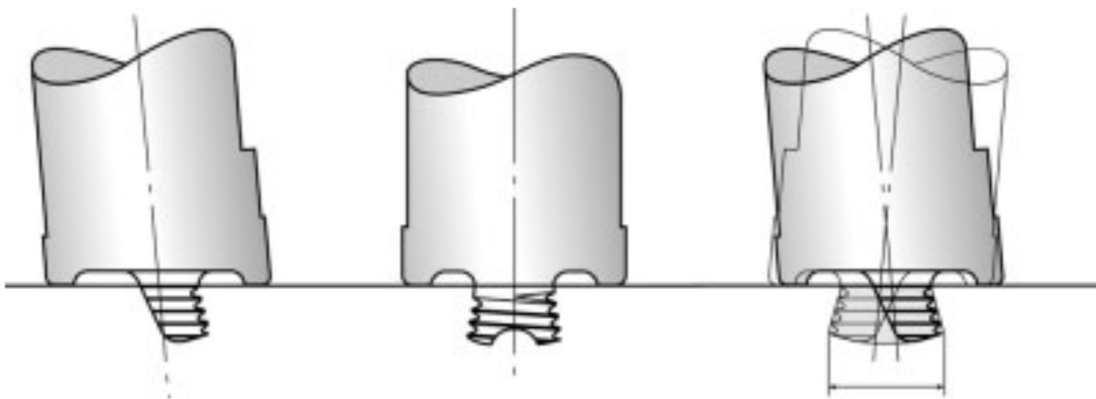
O pino também pode ter uma geometria mais complexa para favorecer a mistura do material da solda, inclusive o modelo cilíndrico é considerado pouco eficiente comparado aos cônicos, o pino ainda pode possuir rosca, cavidades, ou ainda pode não ser concêntrico com a rotação da ferramenta, para melhorar a mistura, as figuras 6 e 7 mostram alguns exemplos dessas variações na geometria do pino (ALMEIDA, 2015; HILLER; FERREIRA, 2005; PAIVA, 2009; THOMAS; JOHNSON; WIESNER, 2003a).

Figura 6: Diferentes geometrias de pino para ferramentas de FSW



Fonte: PAIVA, 2009.

Figura 7: Ferramenta de FSW com pino não concêntrico



Fonte: THOMAS; JOHNSON; WIESNER, 2003.

Para o dimensionamento da ferramenta é recomendado que o diâmetro e comprimento do pino seja igual a espessura da peça soldada, para o caso de um solda completa das chapas. Entretanto é recomendado que o comprimento do pino seja 0,3 a 0,5mm menor que a espessura da peça. Essa diferença de tamanho é para evitar que por alguma variação de espessura na peça a ferramenta entre em contato com a superfície da base de fixação das peças e possa quebrar sem grandes defeitos de falta de penetração do pino (HILLER; FERREIRA, 2005).

Quanto ao material da ferramenta, para soldagem de peças de alumínio as ferramentas de aço apresentam boas propriedades para espessuras de peça menores que 12mm. O mais comum é a utilização de aço ferramenta H 13, entretanto, é possível obter bons resultados com a utilização de aço AISI 4340, que recozido, tem uma dureza de até 260 HB e uma tensão limite de escoamento de 475 MPa (FREITAS, 2017; GERDAL, 2003).

2.2.6 Base de Fixação para Soldagem por Friction Stir Welding

A base onde são fixadas as peças a serem unidas (*backing*), é responsável por garantir o posicionamento das peças, conter o material plastificado durante a passagem da ferramenta para que não haja perda de material da união e dissipar o calor produzido durante o processo (HILLER; FERREIRA, 2005; MISHRA; MAHONEY, 2007; SANTOS et al., 2014).

Quanto ao posicionamento, para realização da união é necessário que as peças a serem unidas não sejam forçadas uma contra a outra, mas sim fixadas bem próximas para não se afastarem durante a passagem da ferramenta. Como as forças desenvolvidas durante a passagem da ferramenta pela linha de soldagem são consideravelmente elevadas esse sistema de fixação torna-se um fator crítico para a execução de uma boa solda evitando a separação das placas ou algum tipo de distorção que ainda possa ocorrer (HILLER, 2007).

É necessário que a mesa de apoio permita uma boa dissipação do calor gerado pelo processo para evitar defeitos do tipo vazio. O material da mesa também não pode reagir facilmente com o material da junta soldada (HASAN; ISHAK; REJAB, 2015; SANTOS et al., 2014).

Até 2014 ainda existiam poucos estudos sob a influência na mesa de apoio no processo de FSW, e a maioria dos encontrados são referentes à troca de calor durante o processo e a geração de defeitos. Ou ainda sobre o material da superfície da mesa para minimização de defeitos na solda. Sendo assim, fica uma brecha para a influência da geometria da mesa sob a linha de solda na qualidade do processo (SANTOS et al., 2014).

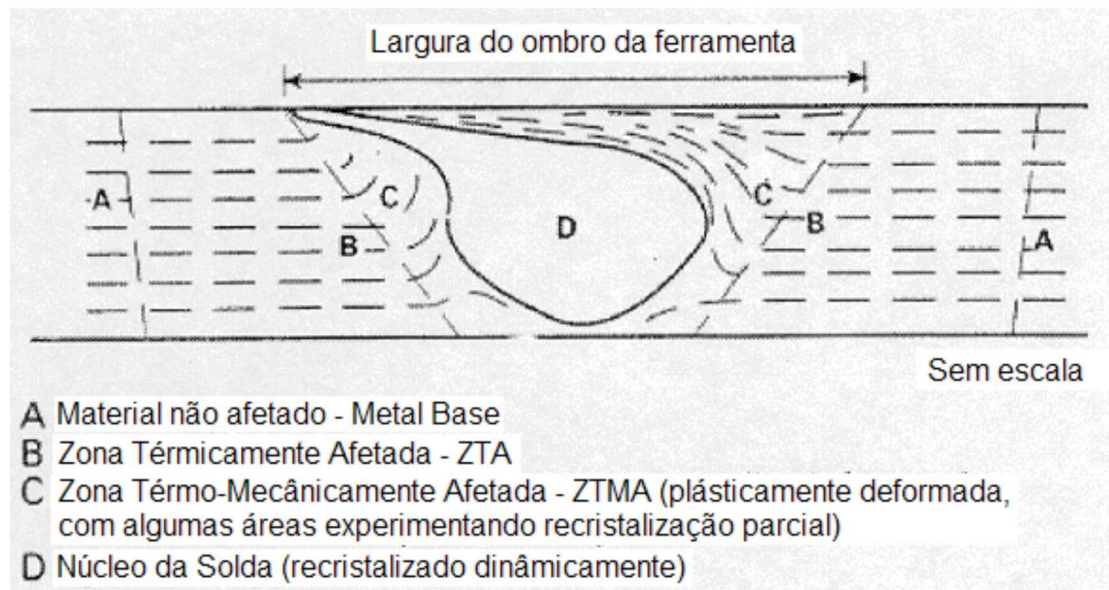
2.2.7 Caracterização da Junta Resultante do Processo de Friction Stir Welding em Alumínio

Todo processo de soldagem deixa modificações na estrutura do material na região da junta comparado com as regiões adjacentes, essas diferenças podem ser

de composição ou microestrutura. Como o processo de FSW não utiliza-se metal de adição ou material de proteção a junta soldada é composta essencialmente do mesmo material das peças unidas. Assim, pela classificação criada por THREADGILL, 1999 e adotada pelo *The Welding Institute*, as juntas de soldagem de alumínio foram classificadas em quatro regiões, mostradas na figura 8, com características particulares atribuídas pelo processo de união. (HILLER; FERREIRA, 2005).

- Zona A: Região suficientemente afastada da junta para não sofrer influência do processo de união e manter todas as suas propriedades inalteradas;
- Zona B: Zona termicamente afetada, embora não sofra nenhum tipo de deformação mecânica essa região tem sua microestrutura afetada pelo ciclo térmico oriundo do processo. Embora não sofra mudanças claras de microestrutura os precipitados envelhecidos ou super-envelhecidos possivelmente passam parcialmente para a solução sólida;
- Zona C: Zona termo-mecanicamente afetada, além de sofrer maiores efeitos do ciclo térmico do processo essa região experimenta significativa deformação mecânica, visível na reorientação do metal base, entretanto há poucos sinais de recristalização e no resfriamento há um aumento da dureza nas ligas possivelmente devido à precipitação;
- Zona D: Chamada de “*Nugget*” é a região central da solda dentro da ZTMA, próximo ao local onde o pino passou, onde os grãos são recristalizados pelo movimento do material gerado pelo pino da ferramenta. A microestrutura do núcleo consiste de grãos equiaxiais muito finos e todo precipitado é dissolvido, porém no resfriamento alguns precipitados irão nuclear e crescer, levando ao aumento de dureza. Há ainda uma outra região formada, chamada de “*onion rings*” que nem sempre é visível e provavelmente está ligada às variações de velocidade de avanço e de rotação da ferramenta, assim como a sua geometria (HILLER, 2007, KRISHNAN, 2002, JUNIOR, 2011).

Figura 8: Diagrama esquemático da microestrutura das soldagens por FSW em alumínio



Fonte: Adaptado de THREADGILL, 1999.

2.2.7.1 Tipos de defeitos na união por Friction Stir Welding

As juntas realizadas por FSW podem apresentar três tipos de defeitos característicos do processo: vazio, falta de penetração e defeitos de superfície.

O defeito do tipo vazio é a falta de material na junta soldada. Pode ocorrer como um canal sem material no sentido da solda (normalmente na direção do avanço da ferramenta), ou como porosidade na junta. É consequência de baixo aporte térmico devido a velocidade de avanço elevada, baixa rotação ou geometria da ferramenta inadequados. Ou ainda pela pressão inadequada do ombro sobre a superfície da peça (ALMEIDA, 2015).

Falta de penetração é o problema típico de mau dimensionamento do pino da ferramenta ou algumas vezes pode ser causado pelo desalinhamento da ferramenta com a linha de solda. É fácil de ser detectado na parte inferior da junta pela falta de mistura de material (ALMEIDA, 2015; MISHRA; MAHONEY, 2007).

O defeito de superfície é a rebarba excessiva de material na superfície da peça. É sempre maior do lado do recuo do ombro (relacionando a rotação com o sentido do avanço). Embora em pequena quantidade não tenha consequência significativas, em excesso pode significar uma perda de material da junta (ALMEIDA, 2015; HILLER, 2007).

2.3 CARACTERÍSTICAS DAS LIGAS DE ALUMÍNIO APLICADAS AOS EXPERIMENTOS

O alumínio tem se mostrado uma alternativa viável para redução de massa de equipamentos na indústria aeroespacial e automotiva nos últimos anos para melhora na performance e redução na emissão de poluentes.

2.3.1 Alumínio 5052-H34

A nomenclatura da liga 5052, segue o padrão determinado pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR 6834 de 2000, que diz respeito composição da liga de alumínio, em que o principal elemento de liga é o magnésio, que determina melhores propriedades mecânicas a liga quando comparado a utilização de manganês. A composição detalhada é dada na Tabela 4. Enquanto a Designação H34 indica o tratamento de endurecimento da liga, no caso, meio encruamento, seguido do processo de estabilização (ABNT,2000a; ABNT, 2000b; ALMEIDA, 2015).

Tabela 4: Composição química da liga de alumínio 5052

| Al | Mg | Fe | Cr | Si | Cu | Mn | Zn | Outros |
|------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|
| 96 % | 2,2 % | 0,4 % | 0,15 % | 0,25 % | 0,1 % | 0,1 % | 0,1 % | 0,15 % |
| 99 % | 2,8 % | | 0,35 % | | | | | |

Fonte: ABNT, 2000a.

Embora, diferente das series 2000 e 7000, a série 5000 para ligas de alumínio seja considerada de boa soldabilidade pelos métodos convencionais, a utilização da solda por atrito já se apresenta em condições de aplicação industrial dentro da faixa de espessura que pretende-se aplicar nesse estudo. (ALMEIDA, 2015; CRUZ; NETO, 2009).

Considerada de boa resistência mecânica (limite de resistência: 255 MPa e Limite de escoamento de 200 MPa), apresenta um modulo de elasticidade igual a 70,3 GPa, atinge o ponto de fusão entre 600°C e 640°C e apresenta uma condutibilidade térmica de aproximadamente 0,33cal/cm s °C. Devido a sua alta resistência a corrosão

esta liga de alumínio é normalmente aplicada em construções navais, tanques de combustível, tanques criogênicos, além de estamparia de maneira geral (ALMEIDA, 2015; HILLER, 2007; WEBMATERIAL,2017b).

2.3.2 Alumínio 1200-H14

A série 1xxx das ligas de alumínio indica o alumínio sem elemento de liga, e o segundo dígito (2) indica o nível de impureza tolerável, nesse caso de 1%. Na Tabela 5 está a composição aceitável para essa liga pela classificação da ABNT. Quanto a indicação de tratamento, a liga foi tratada por encruamento até meia dureza. (ABNT,2000a; ABNT, 2000b).

Tabela 5: Composição química da liga de alumínio 1200

| Al | Si + Fe | Zn | Mn | Cu | Ti |
|----------------|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 99,00 % | 1,00 % | 0,10 % | 0,05 % | 0,05 % | 0,05 % |

Fonte: ABNT, 2000a.

Trata-se de uma liga facilmente encontrada comercialmente é utilizado fabricar peças estampadas e utensílios domésticos em geral. Essa liga apresenta baixas propriedades mecânicas (limite de resistência: 128 a 172 MPa e Limite de escoamento de 152 MPa), e um alto módulo de elasticidade (684 GPa), atinge o ponto de fusão a 658°C e apresenta uma condutibilidade térmica de aproximadamente 0,53cal/cm s °C (WEBMATERIAL,2017a).

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para realização dos experimentos buscou-se manter um padrão para todos os ensaios a fim de reduzir as variáveis que pudessem interferir nos resultados.

3.1 EQUIPAMENTO E PARAMETROS PARA REALIZAÇÃO DE FRICTION STIR WELDING

Utilizou-se para os experimentos desse trabalho uma fresadora convencional, modelo Cardoso FC30, adaptada para a realização do processo de FSW, representada na figura 9 (FREITAS,2017).

Figura 9: Fresadora Cardoso FC30 adaptada para realização de FSW



Fonte: Autoria própria.

O equipamento permite controle da rotação da ferramenta, velocidade de avanço, ângulo de inclinação da ferramenta e profundidade de penetração da ferramenta da peça, que é associado a força de forjamento exercida pelo ombro da ferramenta sobre a peça (que não é mensurável diretamente nesse equipamento).

Baseado nos parâmetros que apresentaram melhores resultados nos experimentos de FREITAS,2017 na soldagem de chapas de alumínio 1200 de 3,25mm, foram estabelecidos os parâmetros da máquina conforme a Tabela 6. Para garantir maior força de forjamento a penetração do ombro da ferramenta foi fixada 0,1 mm a mais que os experimentos de FREITAS,2017.

Tabela 6: Parâmetros de soldagem aplicados aos experimentos

| | |
|-----------------------|--------------------------|
| Avanço da ferramenta | 30 mm/min |
| Rotação da ferramenta | 2000 rpm |
| Ângulo de incidência | 0° |
| Tempo de Permanência | 20 s |
| Ferramenta | Cilíndrica de ombro reto |
| Penetração do Ombro | 0,5 mm |

Fonte: Autoria própria.

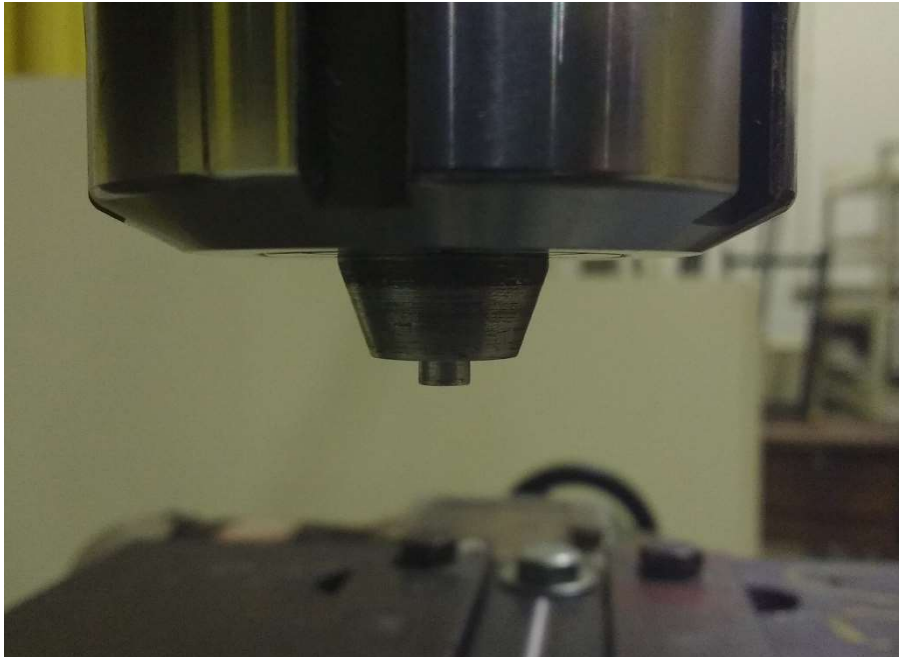
O aumento na profundidade de penetração do ombro também teve o propósito de que o pino da ferramenta penetrasse em toda a espessura das chapas.

3.2 FERRAMENTA E PEÇAS PARA SOLDAGEM

A ferramenta foi confeccionada em aço SAE 4340 recozido. A geometria e dimensões para diâmetro do ombro e pino foram as mesmas de Freitas, no caso, uma ferramenta cilíndrica com diâmetro do ombro de 14mm e diâmetro do pino: 5mm, representada na figura 10. A altura do pino, que deve estar adequada a espessura da chapa foi estipulada em 2,7mm, seguindo a recomendação de MISHRA; MAHONEY,2007 de aproximadamente 0,5 mm menor que a espessura da chapa de Alumínio. Tendo em vista que o processo de FSW se destaca pela sua aplicação em ligas de alumínio, as limitações de esforços da fresadora adaptada para realização dos experimentos e na disponibilidade do mercado, foram selecionadas para

realização do experimento as ligas de alumínio 5052-H34 e 1200-H14. As peças unidas são placas de alumínio com espessura de 3,25mm, disponível comercialmente, com cerca de 50mm de largura por 80 mm de comprimento (direção da soldagem).

Figura 10: Ferramenta de FSW utilizada nos ensaios, já montada no cabeçote



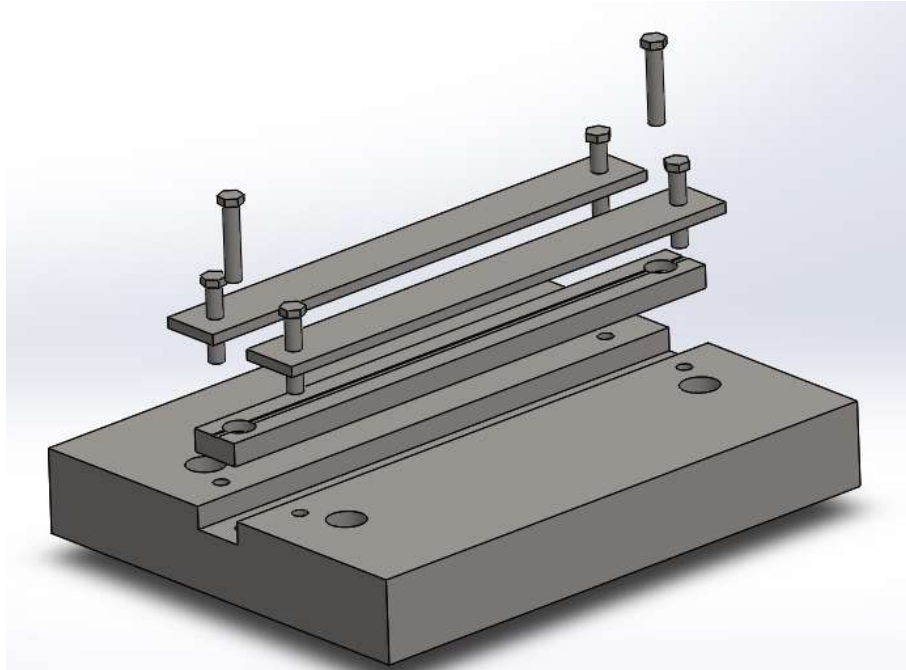
Fonte: Autoria própria.

3.3 CANAIS NA MESA DE SOLDAGEM

A mesa atualmente utilizada para fixação das placas já possui o rebaixo necessário para troca de superfície de apoio, já prevendo a necessidade de adaptação de algum modelo de canal, na direção do avanço da ferramenta, para melhorar o processo de soldagem.

As barras nas quais foram confeccionados os canais são barras de aço SAE 1020 com perfil de 1,5 x 0,5 polegadas (38,13 x 12,71mm) com cerca de 400mm de comprimento. Essas barras são fixadas no canal de perfil semelhante ao das barras (de maneira à evitar a movimentação das barras) e ainda fixadas por dois parafusos M12, conforme é mostrado na figura 11.

Figura 11: Vista explodida da mesa de soldagem com um canal retangular



Fonte: Autoria própria, SolidWorks 2015

3.3.1 Superfície Sem Canal

A superfície lisa da mesa de fixação sob a linha de soldagem é a condição adotada durante a adaptação da máquina fresadora para realização do processo de soldagem por fricção. Freitas relatou que usando uma ferramenta com o pino de 2,7mm sem a presença de um canal houve contato da ferramenta com a mesa de fixação e isso influenciou negativamente no contato do ombro com a peça.

A ausência de um canal sob a linha de soldagem evita que haja perda de material plastificado durante a passagem da ferramenta, podendo contribuir para evitar regiões com defeito do tipo vazio na solda.

Para essa superfície será aplicada a barra de aço sem realizar usinagem na superfície.

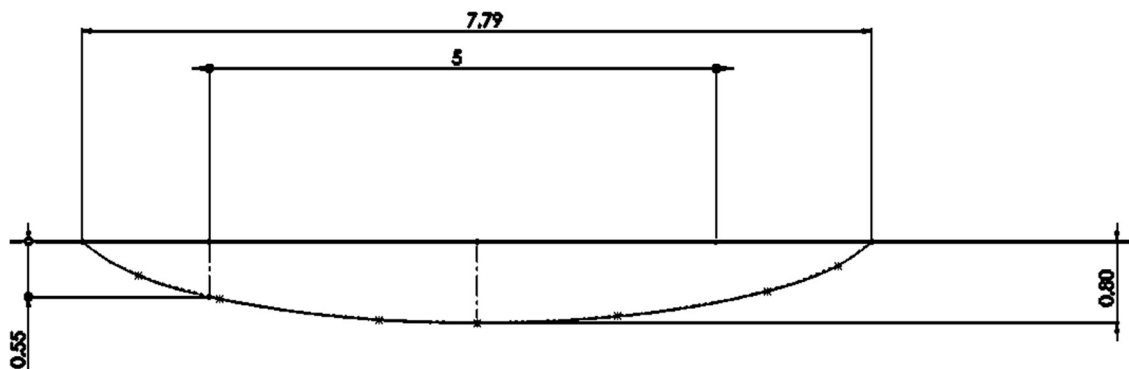
3.3.2 Canal Retangular

A geometria do primeiro canal é retangular e foi concebido pelo processo de usinagem (fresamento). Com perfil de 8mm de largura por 0,4mm de profundidade. A largura do canal é 3 mm maior que o diâmetro do pino da ferramenta para evitar que algum pequeno erro de alinhamento resulte no contato da ferramenta com as bordas do canal. Se ele for demasiadamente largo haverá perda de material da união para o canal.

3.3.3 Canal Côncavo

O segundo modelo de canal foi usinado com uma fresa de topo com diâmetro de 8 mm atuando com 15° de inclinação com relação ao eixo vertical. A inclinação da ferramenta de usinagem gera um canal arredondado, conforme a simulação do perfil feita com o auxílio do software de CAD (figura 12).

Figura 12: Perfil do canal côncavo obtido com simulação no SolidWorks 2015 com uma Fresa de 8mm inclinada 15°



Fonte: Autoria própria SolidWorks 2015.

Essa geometria permite com que a diferença entre a profundidade máxima do canal e a profundidade a 2,5mm do centro, que é o limite por onde deve passar a ferramenta, seja pequena (0,25mm), evitando que haja grande perda de material da união no centro do canal e que haja risco de contato das extremidades do pino com a superfície do canal.

Além disso o acabamento arredondado na região além da passagem do pino minimiza a perda de material da união que seja forçado para o canal durante a passagem da ferramenta. Esse acabamento arredondado na parte inferior da peça soldada resultante da geometria do canal deve dar uma função similar ao cordão de reforço de solda dos métodos convencionais de soldagem.

3.4 PROCEDIMENTO PARA REALIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS

A realização dos experimentos se dá pelo método OFAT (*One Factor At a Time*) em que é alterado apenas um parâmetro do processo por vez para avaliação dos resultados, neste caso será variado apenas a geometria do canal na mesa de apoio.

Primeiramente foi devidamente instalada a ferramenta no cabeçote da fresadora. Em seguida foi fixado o canal à ser avaliada na mesa e ajustado o alinhamento do mesmo com a direção do movimento de avanço da ferramenta para que a mesma movimentasse-se centralizada com o canal. Em seguida foram fixadas as peças de alumínio, da mesma liga, com o prelo das chapas de maneira que elas ficassem em contato, mas não fossem comprimidas uma contra a outra e a linha da solda ficasse alinhada com o centro do canal e por consequência com o eixo central da ferramenta.

Ajustados os parâmetros de rotação e avanço da ferramenta foi acionada a rotação da ferramenta, no sentido anti-horário, a uma altura segura para que não houvesse contato entre a ferramenta e a superfície das peças e a uma distância longitudinal de aproximadamente uma vez o diâmetro do ombro do centro da ferramenta a uma das extremidades das chapas de alumínio.

Em seguida a ferramenta foi baixada até tocar a superfície das peças de alumínio. Essa posição foi determinada utilizando-se um pequeno pedaço de papel umedecido na superfície das peças sob a ferramenta, de maneira que quando o papel se movesse no sentido de rotação da ferramenta foi definido o ponto zero da superfície das peças. A partir desse ponto a ferramenta foi baixada lentamente 3,2mm.

Concluída a penetração da ferramenta nas peças aguardou-se cerca de 20 segundos para que a ferramenta e a peça atingissem a temperatura de soldagem. Só então foi acionando o avanço da ferramenta para que se desse início a efetiva soldagem das peças. A soldagem foi realizada até que o ombro da ferramenta se aproximasse da extremidade das placas, quando o avanço da ferramenta foi desligado e em seguida a ferramenta foi elevada a uma distância segura das peças e o equipamento foi desligado.

Esse mesmo processo foi repetido para todos os modelos de base para a soldagem avaliados tanto para as peças de alumínio 5052 H34 quanto para 1200 H14. A sequência dos experimentos seguiu a ordem descrita abaixo (Tabela 7).

Tabela 7: Sequência para realização dos experimentos

| Sequência | Material | Base |
|------------------|-----------------|------------------|
| 1º | 5052 H-34 | Canal Retangular |
| 2º | 5052 H-34 | Canal Concavo |
| 3º | 5052 H-34 | Sem Canal |
| 4º | 1200 H-14 | Sem Canal |
| 5º | 1200 H-14 | Canal Concavo |
| 6º | 1200 H-14 | Canal Retangular |

Fonte: Autoria própria.

3.5 AVALIAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras foram avaliadas para buscar identificar os defeitos apresentados, as influências da variação da base na mesa de soldagem em cada liga.

Inicialmente foi avaliado se houve separação das placas de alumínio durante o processo de soldagem, ou ainda se haviam sinais alguma falha de alinhamento das peças com a ferramenta (como a marca de contato do ombro e pino descentralizadas) e as amostras que apresentaram algum desses problemas foram descartadas.

Nas amostras validadas nos quesitos anteriores, foi avaliado posteriormente a qualidade superficial da região de contato do ombro com as peças, a existência de

excesso de rebarba e a presença de vazios superficiais. Além disso foi observado se havia algum tipo de fixação entre a mesa e as peças.

Na parte inferior das amostras foi avaliada a persistência da linha delimitando as duas peças, a presença de vazios e a deformação do material vazado para as amostras unidas com a existência do canal na mesa de soldagem.

Em seguida as amostras foram cortadas, com o auxílio de uma serra manual, perpendicularmente a linha de soldagem próximo ao centro do comprimento do cordão de solda para que houvesse menor influência do aquecimento gerado pelo tempo de permanência e pelo ponto de saída do pino no resultado da união avaliada. Essas amostras foram lixadas com lixas de granulometria decrescente de 180 até 1200. Com isso foi avaliada a presença de vazios no interior das amostras, falta de penetração do pino e ainda falta de mistura na união.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Aqui serão descritas as influencias identificadas nos resultados dos experimentos com a variação dos parâmetros. Assim como associar os defeitos apresentados com as recomendações da bibliografia. As imagens das amostras são da vista superior da junta, vista inferior da junta e

4.1 LIGA DE ALUMÍNIO 5052-H34

Foram Avaliados primeiramente os resultados das amostras da liga de alumínio 5052 para os três modelo de superfície.

4.1.1 Canal Retangular para a Liga 5052-H34

Foram iniciados os experimentos com o canal retangular montado na mesa de fixação, sob a junta a ser soldada. O resultado desse experimento pode ser observado na figura 13, na vista superior da junta (esquerda) formou-se excesso de rebarba (seta 1), que já era esperado devido ao aprofundamento do ombro sobre a peça, comparado aos experimento de Freitas. Nota-se também que, apesar do ótimo acabamento superficial na área de contato do ombro com a peça, surgiu um defeito do tipo vazio paralelo ao sentido da junta do lado do avanço da ferramenta, indicado pela seta 2. Este defeito está afastado da linha de soldagem cerca de 2,5mm, isso indica que o defeito se formou logo ao lado da passagem do pino.

Na parte Inferior da Junta (figura 13 direita), pode-se notar a ausência de defeito superficial e o completo desaparecimento da linha entre as peças, o que caracteriza uma boa qualidade da união. Com relação a deformação pela presença do canal, ela está bem definida no lado do avanço da ferramenta (indicado pela seta), cerca de 0,5 mm mais afastado do centro da peça que o defeito na parte superior, porém, não há

uma delimitação tão acentuada do outro lado da junta, conforme pode ser observado na Vista em corte da junta (figura 14).

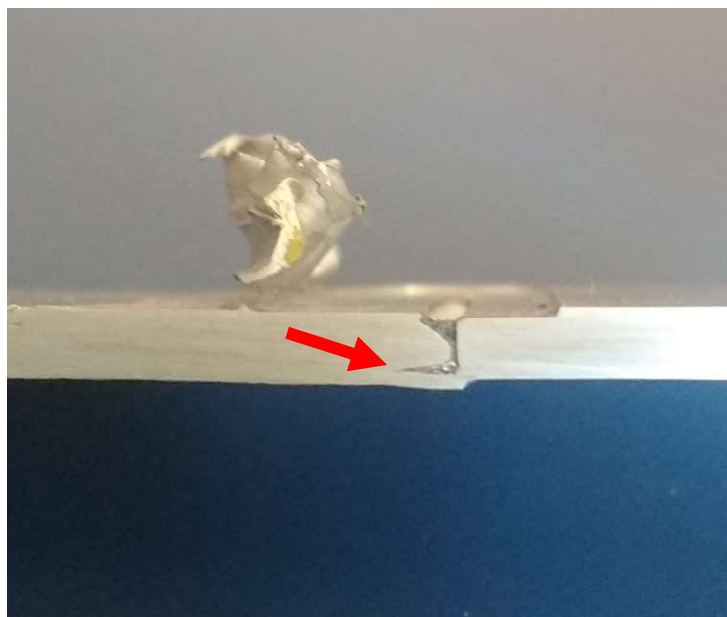
Figura 13: Junta soldada de alumínio 5052 H34 com canal retangular



Fonte: Autoria própria.

Nota-se (indicado na figura) a falta de mistura de material que ainda permite identificar visualmente a deformação mecânica sofrida pelas peças de alumínio.

Figura 14: Vista em corte da junta em alumínio 5053-H34 com canal retangular



Fonte: Autoria própria.

4.1.2 Canal Côncavo para a Liga 5052-H34

Na amostra soldada com a aplicação do canal côncavo (figura 15), foi obtido um resultado similar ao anterior na superfície da solda no que diz respeito ao acabamento superficial e formação de rebarba, com uma linha de vazio (indicada pela seta) um pouco mais larga, sugerindo maior fuga de material plastificado da junta para o canal durante a passagem da ferramenta conforme mostrado na figura 15 esquerda. Na parte inferior da união (figura 15 direita) notasse que o material deformou-se para dentro do canal e com isso o pino não teve comprimento suficiente para realizar uma mistura adequada, mantendo bem definida a linha de encontro das duas peças, que está indicada pela seta.

Figura 15: Junta soldada de alumínio 5052 H-34 com canal côncavo



Fonte: Autoria própria.

Na figura 16 podemos notar que a falta de mistura parece ter sido acentuada pela perda de material da união para o canal. Vale mencionar a falta de efetividade da união que não manteve-se após o corte da amostra.

Figura 16: Vista em corte da junta de alumínio 5052-H34 com a presença do canal côncavo.



Fonte: Autoria própria.

4.1.3 Sem Canal para a Liga 5052-H34

Na junta soldada sem a presença do canal sob as placas ainda contatou-se o defeito de vazio na superfície, mostrando que o defeito, embora tenha alguma ligação, não é causado pela presença do canal (Figura 17 esquerda). Na parte inferior da junta (figura 17 direita), podemos notar uma boa mistura, sem a presença da linha limitando a região de união das peças.

Figura 17: Junta de alumínio 5053 H-34 sem a presença do canal



Fonte: Autoria própria.

Na figura 18, temos a imagem de perfil da junta em que pode-se notar uma melhor mistura, com o defeito não continuando na horizontal como nas juntas anteriores. Podendo assim ser considerada a junta com melhor resultado até o momento.

Figura 18: Corte da junta de alumínio 5052 H-34 soldada sem canal na mesa



Fonte: Autoria própria.

Nenhuma das amostras apresentou algum tipo de fixação da peça à mesa após o processo de soldagem. Também não houve indicio de significativo contato do pino com a superfície da mesa de soldagem, apenas sinais de contato do alumínio da junta prensado pelo pino contra a base.

4.1.4 Avaliação dos Resultados para a Liga de Alumínio 5052-H34

O defeito de vazio na superfície das juntas de alumínio 5052-H34 de acordo com a bibliografia podem ser causados por falta de aporte térmico, falta de pressão do ombro sobre a junta ou geometria inadequada da ferramenta. Comparando os resultados obtidos por HILLER,2007 no estudo para a mesma liga só foi obtido para rotação da ferramenta próxima, com velocidade de avanço cerca de 5 vezes maior que a utilizada nestes experimento e com metade da penetração de ombro.

Sendo assim pode afirmar-se que o aporte térmico e a pressão não foram os parâmetros que afetaram a qualidade da junta. Então pode-se supor que é necessário rever o projeto da ferramenta. No trabalho de HILLER,2007 foi mantida a proporção

do diâmetro do pino igual a espessura das chapas (no caso 4,5mm). No trabalho de ALMEIDA,2013 o mesmo defeito superficial surgiu com a utilização de uma ferramenta cônica lisa para união de alumínio 5083-O com 6,25mm de espessura e foi solucionado com a utilização de uma ferramenta cônica roscada.

Apesar dos resultados da influência do canal não ser totalmente conclusivo, os resultados indicam que para os parâmetros de soldagem, ferramenta e liga utilizada a presença do canal apenas prejudica a qualidade da junta soldada, devido à perda de material. Pois sem o canal não houve sinal de falta de penetração ou de contato da ferramenta com o a mesa.

4.2 LIGA DE ALUMÍNIO 1200-H14

Os experimento da influência dos canais foram repetidos para a mesma liga dos experimentos para a liga 1200, para a qual os parâmetros utilizados foram determinados (FREITAS,2017). As imagens das amostras a seguir foram feitas após as mesmas serem cortadas, por isso são visíveis as descontinuidades nas peças como a indicada pela seta 1, na imagem 19.

4.2.1 Sem Canal para a liga 1200-H14

Inicialmente foi utilizada a base sem canal. Diferente dos resultados anteriores, com a liga 5052-H34, o acabamento superficial, na figura 19 (esquerda), não ficou tão bom (seta 2) e é possível ver as marcar circulares do avanço do ombro da ferramenta (seta 3). Também há conforme esperado há presença excessiva de rebarba porém não há o mesmo defeito de vazio na superfície como na soldagem da liga 5052.

Figura 19: Junta da liga de alumínio 1200-H14 sem a presença de canal na mesa

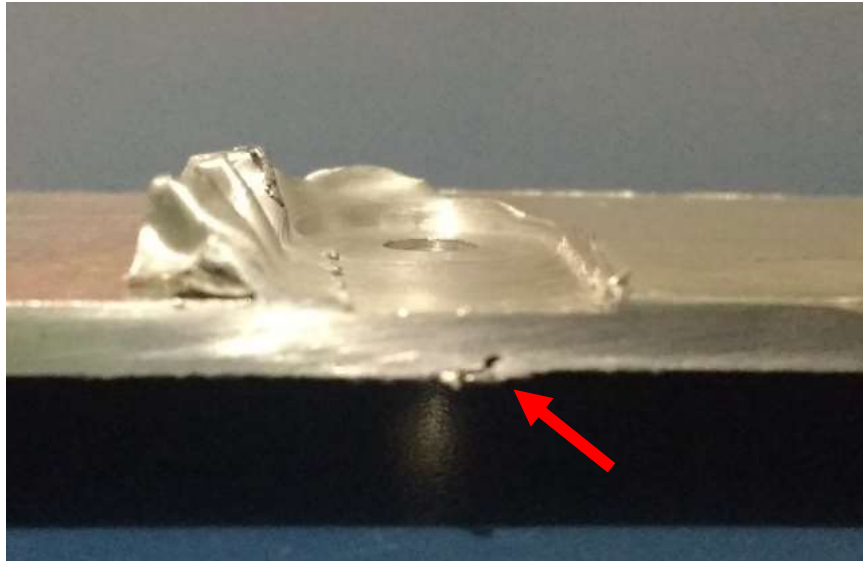


Fonte: Autoria própria.

Na figura 19 (direita) também pode-se observar, indicado pela seta 4, a falta de preenchimento na parte inferior da junta e o furo passante deixado pela ferramenta no ponto de saída. É relevante mencionar que foi observada uma vibração excessiva na realização desse experimento, podendo-se dizer que houve algum contato da ferramenta com a superfície da mesa de soldagem, na qual foi contatado alguns riscos nas mesmas dimensões do pino da ferramenta. Além disso a amostra aderiu parcialmente à mesa após a soldagem, sendo necessário certo esforço para removê-la (sendo que das amostras que apresentaram essa adesão, foi a mais contundente).

A partir do corte da amostra (figura 20) pode-se observar que os defeitos aparentes na superfície inferior da junta se refletem em um pequeno defeito do tipo vazio no interior da junta, indicado pela seta, onde aparentemente houve uma deficiência na mistura, podendo inclusive ser resultado do contato do pino da ferramenta com a mesa de soldagem.

Figura 20: Corte da junta soldada de alumínio 1200-H14 sem a presença de canal na mesa



Fonte: Autoria própria.

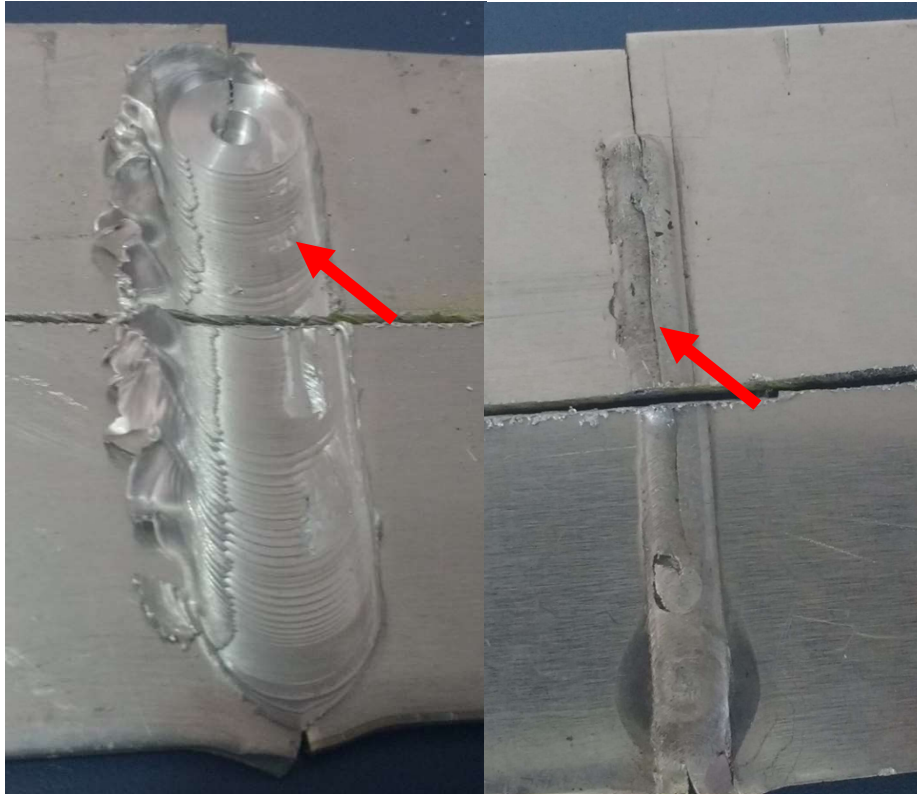
4.2.2 Canal Concavo para a Liga 1200-H14

A amostra resultante do experimento com a presença do canal côncavo sob a linha de soldagem também ficou parcialmente fixada na mesa de soldagem, é possível observar, na figura 21 esquerda, indicado pela seta alguns defeitos do tipo vazio pontuais na superfície de contato do ombro. Com relação ao acabamento superficial, apresenta as mesmas marcas da passagem do ombro e o excesso de rebarba.

Na superfície inferior da junta (figura 21 direita) é possível notar a deformação de material que ocupou o espaço vazio gerado pelo canal, dando a aparência muito similar ao reforço de um cordão de solda feito pelo métodos convencionais com deposição de material (eletrodo revestido ou MIG, por exemplo). Pode ser vista ainda a linha de encontro das duas peças, indicada pela seta, mostrando que como o material deformou para o interior do canal o pino não teve penetração suficiente. Vale mencionar que no ponto de penetração da ferramenta na peça, onde ela permanece por mais tempo para realizar o aquecimento não é possível ver essa linha. Nota-se também um defeito pontual do tipo vazio na mesma posição da face superior, podendo

ser efeito de algum defeito da própria peça base de alumínio, pois não se repetiu no restante da linha de solda.

Figura 21: Junta soldada de alumínio 1200-H14 com canal côncavo



Fonte: Autoria própria.

Na imagem em corte da junta (figura 22) pode ser observado um defeito do tipo vazio, indicado pela seta que forma um canal paralelo a linha de soldagem, na profundidade da extremidade inferior do pino da ferramenta se estendendo do centro da junta até cerca de 2,5mm para o lado do avanço da ferramenta.

Figura 22: Corte da junta soldada de alumínio 1200-H14 com canal côncavo

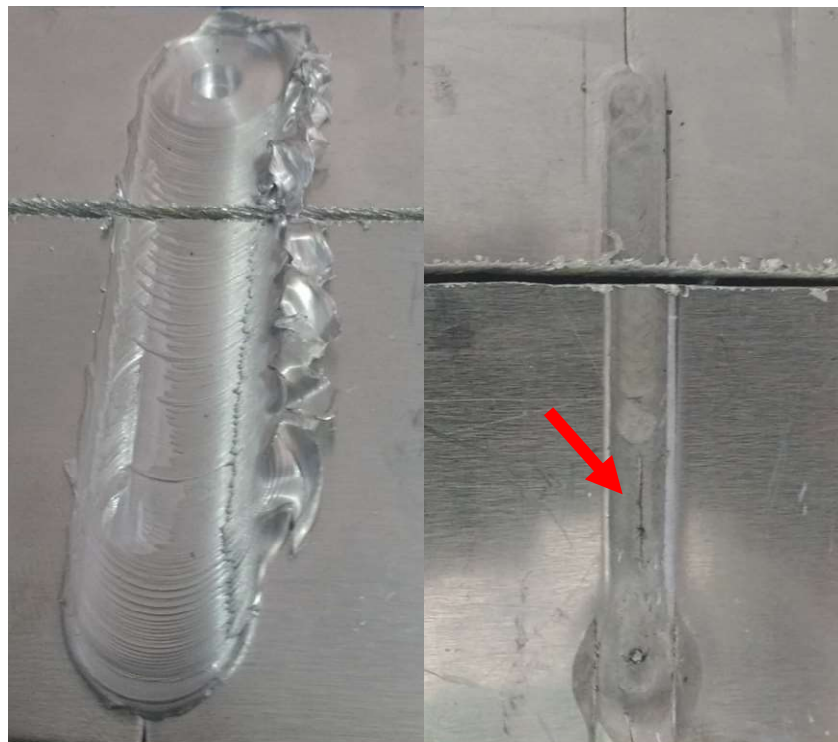


Fonte: Autoria própria.

4.2.3 Canal Retangular para a Liga 1200-H14

A amostra soldada com a presença do canal retangular na mesa de soldagem (figura 23) apresenta uma qualidade superficial semelhante as outras amostras dessa mesma liga (marcas do ombro, excesso de rebarba e ausência de defeitos do tipo vazio) no lado de contato do ombro. Após o experimento ela também ficou parcialmente fixada à mesa de soldagem. Na parte inferior apresenta menor perda de material de junta para o canal comparada a amostra soldada com o canal côncavo, a linha de encontro das duas peças também não se fez presente na maior parte do cordão, exceto próximo ao ponta de penetração do pino (indicado pela seta). Isso pode ser resultado de alguma variação na espessura das placas ou deformação causada pelo sistema de fixação.

Figura 23: Junta soldada de alumínio 1200-H14 com canal retangular



Fonte: Autoria própria

Na figura 24, que mostra a vista em corte da junta pode ser visto que o defeito do tipo vazio que segue pela linha de soldagem (indicado pela seta), na posição da extremidade do pino da ferramenta no lado do avanço do giro da ferramenta, similar ao resultado da amostra sem o canal.

Figura 24: Corte da junta de alumínio 1200-H14 com canal retangular



Fonte: Aatoria própria

4.2.4 Avaliação dos Resultados para a Liga de Alumínio 1200-H14

Pode ser constatado que as propriedades dessa liga de alumínio resultaram num acabamento superficial das amostras inferior ao da liga 5052-H34, porém não houve em nenhuma das configurações o surgimento do defeito de tipo vazio continuo na superfície de contato do ombro. Porém permaneceu o defeito do tipo vazio formando um canal próximo a extremidade de passagem do pino no lado do avanço da ferramenta.

Com relação à influência do canal, o canal retangular apresentou melhor resultado que a ausência do mesmo. Mostrou ser eficiente para evitar o contato com a mesa sem gerar aparente diferença de preenchimento na junta devido ao material plastificado que se deformou para o canal com a passagem da ferramenta.

É provável que o defeito do tipo vazio na parte inferior da amostra soldada sem o canal seja o mesmo defeito que que nas outras amostras ficou no interior da junta, sendo assim, o canal retangular apenas escondeu o defeito no interior da junta.

Embora a geração de rebarba tenha sido similar ao apresentado pela outra liga, a penetração do ombro gerou uma força de forjamento excessiva para esse material causando a fixação parcial da peça na mesa.

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados deste trabalho, pode-se chegar as seguintes conclusões:

- A utilização dos canais foi pouco significativa para a eliminação dos defeitos das juntas;
- Os resultados indicam que presença do canal com as proporções adotadas prejudicaram a junta nos experimento realizados com as amostras da liga de alumínio 5052-H34;
- Na liga de alumínio 1200-H14 a utilização do canal retangular indica ser uma opção viável, para evitar o contato da ferramenta com a superfície da mesa de apoio, sem prejuízo visível à qualidade a junta;
- A diferença de propriedades das ligas ensaiadas resulta em diferentes resultados no processo. A diferença de defeito superficial presente, pode ser influência da grande diferença no modulo de elasticidade das duas ligas no estado sólido (70,3GPa para o 5052-H34 e 684GPa para o 1200-H14), a diferença de propriedades também sugere ter influenciado na resistência à penetração da ferramenta, evitando o contato da mesma com a base na união da primeira liga utilizada;
- A utilização de um método para determinação da altura de contato da ferramenta com o metal base favoreceu a qualidade das informações obtidas nesse estudo;
- O projeto da ferramenta parece ter sido relevante para a presença dos defeitos, sendo assim é recomendável que os resultados sejam revistos para um projeto de ferramenta com geometria mais adequada para as peças ensaiadas.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR 6834** - Alumínio e suas ligas - Classificação. Rio de Janeiro, 2000a.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR 6835** Alumínio e suas ligas - Classificação das têmperas. Rio de Janeiro, 2000b.

ALMEIDA, D. T. DE. **Análise microestrutural e avaliação mecânica de juntas soldadas por fricção e mistura mecânica (FSW) da liga de alumínio 5281-O**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

AMERICAN WELDING SOCIETY (AWS). **Standard welding terms and definitions**. Miami, 1994.

CRUZ, M. F.; NETO, C. DE M. **Friction stir welding** –potencial de aplicação na indústria. XI Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa, p. 5–9, 2009.

FREITAS, P. V. H. **Adaptação do processo de soldagem friction stir welding para uma fresadora convencional**. Universidade Tecnológica Federal Do Paraná, 2017.

GERDAL. **Manual de Aços**. SLM, 2003.

HASAN, M. M.; ISHAK, M.; REJAB, M. R. M. **A simplified design of clamping system and fixtures for friction stir welding of aluminium alloys**. v. 9, n. December, p. 1628–1639, 2015.

HILLER, D. D. J. **Estudo de parâmetros e percursos no processo de soldagem de mistura por atrito (FSW) da liga de alumínio 5052**. RIO DE JANEIRO: Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2007.

HILLER, D. D. J.; FERREIRA, M. L. R. **adaptação de uma máquina fresadora vertical para soldagem FSW-“friction stir welding” de ligas de alumínio**. III Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. Joinvile: 2005. Disponível em: <http://www.abcm.org.br/pt/wp-content/anais/cobef/2005/COF_021049442.pdf>

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3^a ed. Belo Horizonte: Wander Melo Mirana, 2011.

MATWEB. **Aluminium 5053-H34**. Disponível em: <<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=8644ac88ccb647869449d6ff6ddfaed>>. Acesso em: 7 jun. 2017

MATWEB. **Aluminium 1200 composition spec**. Disponível em: <<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=79f3ce8d6d8c433ab48d1149de8b7c50>>. Acesso em: 7 jun. 2017

MENDEZ, P. F.; EAGAR, T. W. **New trends in welding in the aeronautic industry.** 2nd Conference of New Manufacturing Trends. Bilboa, Espanha: 2002

MISHRA, R. S.; MAHONEY, M. W. **Friction stir welding and processing.** ASM International, p. 368, 2007.

NANDAN, R.; DEBROY, T.; BHADESHIA, H. K. D. H. **Recent advances in friction stir welding** – process, weldment structure and properties. Progress in Materials Science, v. 53, n. 6, p. 980–1023, 2008.

PAIVA, F. G. A. **Caracterização de junta soldada por atrito linear com mistura (FSW) da liga Al-Mg-Si AA 6063.** Universidade de São Paulo, p. 118, 2009.

RAYMUNDO, E. A. et al. **Análise microestrutural e comparativa entre os processos de soldagem por fricção (friction stir welding – FSW) e TIG (gas tungsten arc welding - GTAW) em ligas de alumínio aeronáutico de série 2xxx .** 8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. Salvador: 2015

SANTOS, T. F. A. et al. **Desenvolvimento de sistema de apoio com depósito cerâmico para soldagem e processamento por atrito com pino não consumível.** v. 19, p. 104–113, abr. 2014.

SOUZA, G. S. **Influência da geometria da ferramenta na soldagem da liga de alumínio 5052 pelo processo Friction Stir Welding.** Dissertação de Mestrado em Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2010.

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

THOMAS, W. M. et al. **Friction stir butt welding friction welding.** United Kingdom Patent Office, 1991.

THOMAS, W. M.; JOHNSON, K. I.; WIESNER, C. S. **Friction stir welding:** recent developments in tool and process technologies. Advanced Engineering Materials, v. 5, n. 7, p. 485, 489, 2003.