

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO – Engenharia Mecânica
Disciplina MEC041 - Trabalho Final de Graduação II

AVALIAÇÃO DA VIDA EM FADIGA EM JUNTAS DE LIGA DE ALUMÍNIO AA 5052 SOLDADAS POR SOLDA PONTO POR FRICÇÃO

Roberto Bonamigo – Aluno
158983@upf.br

Dr. William Haupt – Professor Orientador
williamhaupt@upf.br

Comissão Examinadora – Esp. Volmir Supptitz, Dr. Luiz Airton Consalter

RESUMO

O processo de fadiga se dá devido a cargas cíclicas aplicadas em componentes, ocasionando trincas no material e causando assim a grande maioria das falhas e rupturas dos componentes. Mesmo com todo o progresso tecnológico as juntas soldadas continuam a ser o ponto crítico, suscetível a falha e defeitos por fadiga. Esse trabalho tem por finalidade a análise e avaliação de juntas soldadas, usando um método de soldagem não convencional, a soldagem ponto por fricção. Busca-se analisar a vida em fadiga de diferentes juntas, soldadas com diferentes geometrias de ferramentas, comparando assim as suas respectivas vidas em fadiga e propriedades mecânicas para justificar a utilização do método de soldagem ponto por fricção como um método para soldagem. O material utilizado foi a liga leve de alumínio AA 5052, que possui um menor peso e representa um elevado custo-benefício as indústrias em relação a outros aços. Primeiramente foram fabricadas três diferentes ferramentas para a realização da soldagem, na sequência foi realizado a soldagem ponto por fricção utilizando os mesmos parâmetros de soldagem para todas as ferramentas, após isso foram preparados corpos de prova para a avaliação da vida em fadiga, usando 50% do limite máximo de escoamento de cada junta soldada e também um corpo de prova, para cada condição, para caracterização macrográfica, micrográfica e para as microdurezas das juntas soldadas. Tendo-se realizado todas as etapas do trabalho, com os resultados obtidos, buscou-se comparar a vida em fadiga, aonde todas as juntas obtiveram vida infinita em fadiga, e as microdurezas das diferentes juntas soldadas para justificar a utilização da soldagem ponto por fricção em ligas de alumínio como uma melhoria para as indústrias.

Palavras chave: soldagem ponto, vida em fadiga, ligas de alumínio.

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos foram substanciais as tentativas de evolução na qualidade dos produtos, em busca de uma produção mais sustentável e a maior preservação do meio ambiente. A redução de custos também é um ponto visado por essa evolução, tanto os

custos de produção quanto os relacionados a manutenção, esse ponto é principalmente buscado nas indústrias automobilísticas e aeronáuticas. Para essa redução, os materiais devem possuir certas características, sendo elas, alta resistência mecânica, boa resistência a corrosão e baixa densidade, tendo em vista essas características se torna viável a produção de peças mais duráveis e mais leves.

As ligas leves, como as de Al e Mg, possuem os atributos desejados pelas indústrias, porém o uso de tais materiais pode não se tornar viável devido a dificuldade em uni-los através dos métodos usuais de soldagem. Em 1991, *The Welding Institute (TWI)* desenvolveu a soldagem por fricção (FSW), tecnologia que com sucesso foi aplicada em juntas de diversas ligas metálicas. O processo ocorre no estado sólido com a realização de elevado calor por fricção, ocasionando assim a deformação plástica. Essa fricção é decorrente do atrito de uma ferramenta não-consumível e a superfície do material a ser soldado (CAMPANELLI, ALCÂNTARA e SANTOS, 2011).

A solda contínua não é obrigatória para que o desempenho de um produto seja satisfatório, tendo em vista isso, uma tecnologia derivada foi desenvolvida para possibilitar a união por ponto de ligas metálicas: soldagem por fricção por ponto (FSpW) (CAMPANELLI, ALCÂNTARA e SANTOS, 2011).

De acordo com PLAINE (2016), o processo de soldagem por ponto por fricção apresenta importantes características: boa qualidade superficial, velocidade de soldagem elevada, eficiência energética elevada; reduzindo o número de etapas de processo e um grande potencial de aplicação industrial sendo que o processo é geometricamente compatível para a substituição de rebites.

Nesse contexto, hoje em dia, o processo de soldagem por fricção por ponto já é bem difundido em várias juntas de ligas leves, como a de alumínio. Porém, o uso desse método de soldagem em juntas dissimilares como por exemplo, ligas de Al e Ti, não é muito confiável, pois esse tópico ainda é alvo de pesquisas e devido a isso há pouca informação disponível sobre o assunto (PLAINE, 2016).

O presente trabalho tem a finalidade de analisar a vida em fadiga e propriedades mecânicas de diferentes juntas soldadas pelo método de soldagem FSpW, sendo fabricadas e utilizadas três ferramentas com geometria distintas para a realização da soldagem mantendo sempre os mesmos parâmetros. Para análise da vida em fadiga foram fabricados cinco corpos de prova por condição, e um corpo de prova, por condição, para análise das microdurezas e caracterização macrográfica e micrográfica das juntas soldadas. O material usado foi a liga de alumínio AA 5052 que é uma liga leve e, portanto, tem uma baixa densidade.

Como resultado do trabalho, busca-se obter resultados satisfatórios, para que a utilização da soldagem por fricção por ponto em ligas de alumínio seja viável nas indústrias, com uma excelente qualidade nas juntas soldadas e consolidando o método como confiável e produtivo.

1.1 Objetivos Gerais e Específicos

- 1 Avaliar a vida em fadiga de diferentes juntas soldadas da liga de alumínio AA 5052 pelo processo de soldagem ponto por fricção.
- 2 Analisar três diferentes ferramentas para realização da soldagem;
- 3 Caracterizar a soldagem por fricção por ponto em chapas sobrepostas;
- 4 Comparar as microdurezas das juntas soldadas;
- 5 Caracterizar visualmente macrograficamente e micrograficamente as juntas soldadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

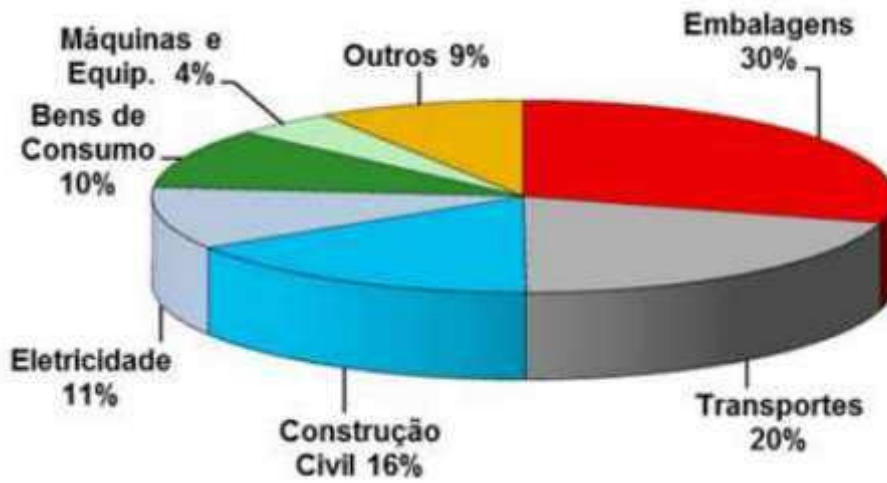
Neste tópico serão abordados assuntos pertinentes para a realização do trabalho, como ligas de alumínio e suas propriedades, processo de soldagem por fricção e soldagem ponto por fricção e a vida em fadiga de juntas soldadas. Demonstrando assim os pontos para compreender a análise da vida em fadiga de juntas soldadas de uma liga de alumínio.

2.1 Alumínio e suas ligas

O alumínio é um dos elementos mais encontrados na crosta terrestre, sendo o terceiro no quesito abundância, mesmo sendo bastante encontrado o alumínio só começou a ser usado em escala industrial recentemente (TOLOTTI, 2015). Por ter excelentes propriedades mecânicas, como ótima resistência a corrosão, densidade baixa, condutividade elétrica e térmica elevadas, além da facilidade em ser processado por diversos métodos de fabricação fazem com que o alumínio seja destacado, principalmente nas indústrias automotiva e aeroespacial. Apenas o aço fica à frente do alumínio quando se refere aos metais mais usados no mundo (CAPELARI, 2006).

Algumas ligas de alumínio apresentam elevada resistência mecânica, que em certos casos acabam sendo superiores aos aços com baixo teor de carbono, aliada a boa durabilidade e excelente resistência a corrosão, contendo peso específico que equivale a 1/3 do peso específico do aço, fazem com que o alumínio seja procurado pelas indústrias como forma de substituição de componentes ou partes estruturais, tendo como finalidade reduzir o peso e conseqüentemente aumentando a carga útil. Por conta dessas propriedades o alumínio e suas ligas se tornam atrativos aos mais diversos segmentos da indústria, principalmente nos setores automobilísticos como o de transportes (TOLOTTI, 2015). Como mostrado na Figura 1 o setor de embalagens lidera o consumo de alumínio no Brasil seguido justamente pelo setor de transportes.

Figura 1 - Principais segmentos consumidores no Brasil.



Fonte: Tolotti (2015).

2.1.1 Ligas de alumínio

Para se obter propriedades desejadas a um devido produto se faz necessário a adição de elementos de liga ao material. Devido a capacidade que o alumínio tem em se combinar com os mais diversos elementos de liga, o uso de ligas de alumínio oferece a indústria uma grande variedade de aplicações. A influência nas propriedades do metal constituinte varia de acordo com a quantidade de elementos de liga a sua interação com outros elementos. No Quadro 1 estão listados os principais elementos de liga do alumínio e seus efeitos (MALTA, 2019).

Quadro 1 - Elementos de liga do alumínio e seus efeitos

Elementos de Liga	Efeitos
Cobre (Cu)	Aumento da resistência e dureza, gradativamente até 12%Cu. Diminuição da resistência à corrosão. Confere boas propriedades mecânicas a temperaturas elevadas.
Silício (Si)	Até o ponto eutético, aumento da fluidez, diminuição da contração do material e da fragilidade à quente.
Magnésio (Mg)	Aumento da resistência à corrosão e ao impacto. Aumento da usinabilidade, dureza a temperatura ambiente. Aumento da suscetibilidade a corrosão sob tensão.
Zinco (Zn)	Excelente ductibilidade a temperatura ambiente. Aumento da suscetibilidade a corrosão sob tensão.

Fonte: Adaptado Malta (2019).

2.1.1.1 Classificação das ligas de alumínio

Através de sistemas internacionais são designadas as diferentes ligas de alumínio. Esses sistemas são propostos por associações como a *Aluminum Association* (AA). A nomenclatura elaborada por essa associação é a mais amplamente utilizada.

Segundo a sua composição, as ligas de alumínio são divididas em duas categorias: composições para trabalho mecânico e composições para fundição. O objeto de estudo será a classificação para trabalho mecânico. A classificação da liga se dá devido ao principal elemento de liga adicionado, seguindo uma classificação em série de quatro dígitos, conforme mostra a Tabela 1 (CAPELARI, 2006).

Tabela 1 - Principais elementos de liga das séries de alumínio

Série	Principal elemento de liga
1xxx	Al \geq 99%
2xxx	Cu
3xxx	Mn
4xxx	Si
5xxx	Mg
6xxx	Mg/Si
7xxx	Zn

Fonte: Capelari (2006).

O primeiro dígito dessa designação representa o elemento de liga que está presente em maior quantidade. Na sequência, o segundo dígito representa possíveis modificações na composição original da liga, caso esse dígito seja zero representa a liga em seu formato original, sem nenhuma alteração, porém se houver qualquer alteração esse dígito poderá variar entre, números inteiros, de 1 a 9. Referente aos dois dígitos restantes, os mesmos servem para o grau de pureza das ligas ou diferencia-las dentro de cada grupo (VACCHI, 2017).

2.1.1.2 Liga de alumínio AA5052

As ligas de alumínio da série 5xxx, a qual pertence a liga 5052, são ligas de Al-Mg que combinam uma ampla faixa de resistência mecânica juntamente com a facilidade de serem soldadas e conformadas. As ligas Al-Mg apresentam resistência mecânica equivalente às de outras ligas recozidas, apresentam também boa ductilidade. O teor de magnésio presente nas ligas influencia na soldabilidade, ligas com teor de magnésio superiores a 3,5% apresentam menor soldabilidade (MOREIRA, 2014).

Devido a características como excelente qualidade do acabamento superficial, com baixa rugosidade e aspecto brilhoso intenso, as ligas de Al-Mg formam uma combinação desejável para o uso dessas ligas na fabricação de produtos para as indústrias (MOREIRA, 2014).

As ligas da série 5xxx apresentam teores de magnésio entre 0,5 a 6,0%. As características da liga como a resistência mecânica, resistência a fadiga, resistência a corrosão, além de possuírem um peso inferior devido a presença de magnésio na composição química fazem como que essa série seja aplicada nas indústrias aeroespacial, naval e automobilística (VACCHI, 2018).

A composição química, expressa em porcentagem, da liga de alumínio AA5052 pode ser visualizada na Tabela 2, aonde o elemento de liga com maior porcentagem é o magnésio (Mg), variando a sua quantidade entre 2,2 a 2,8% e a maior parcela da composição se dá pelo próprio alumínio (Al).

Tabela 2 - Composição de elementos de liga da liga AA5052

Liga	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Outros	Al
AA5052	0,25	0,40	0,10	0,10	2,2- 2,8	0,15- 0,35	-	0,10	-	0,15	Rest.

Fonte: Malta (2019).

A liga de alumínio AA5052, é principalmente uma liga de aplicação naval que apresenta todas as características das ligas Al-Mg, essa liga também é aplicada em vergalhões ferroviários, moldes e matrizes e carrocerias de caminhões (MALTA, 2019).

Como a liga é usada em aplicações que requerem elevado grau de confiança, se faz necessário que o método de soldagem adequado seja empregado no material para a certeza de juntas soldadas confiáveis.

2.1.2 Soldabilidade da liga de alumínio AA5052

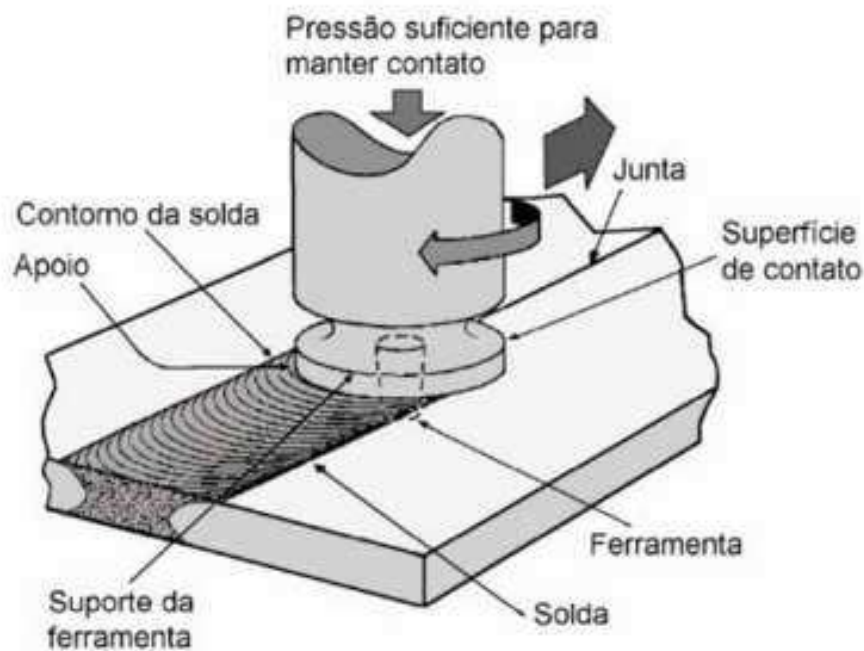
Como a liga AA5052 pode apresentar em sua composição teor de magnésio abaixo de 2,5%, isso faz com que quando soldada por um processo de fusão a arco, a junta fique sujeita a trincas durante a fase de solidificação, isso ocorre caso o metal de adição e o metal base tenham a mesma composição química (COSTA, 2015).

Por se tratar de um problema que ocorre na solidificação da junta, um outro método de soldagem pode ser empregado, a soldagem por fricção por ponto (FSpW), aonde a união dos materiais ocorre no estado sólido.

2.2 Soldagem por fricção

O método de soldagem por fricção (FSW), foi criado em 1991 pelo *The Welding Institute* (TWI) na Inglaterra. A soldagem consiste em uma ferramenta de elevada resistência e com geometria adequada que é rotacionada e mergulhada, de forma lenta, na junção das peças a serem soldadas. Nesse método de soldagem a ferramenta não é consumível. A Figura 2 exemplifica o método de soldagem por fricção (MATTEI, 2011).

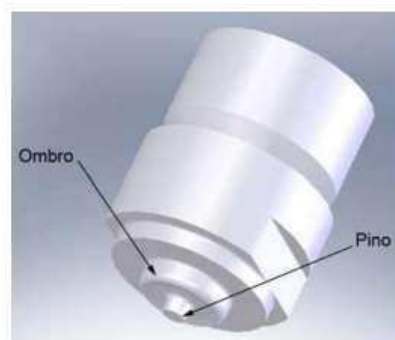
Figura 2 - Método de soldagem por fricção



Fonte: Mattei (2011).

Conforme mostrado na Figura 3 a ferramenta é composta por um shoulder (ombro) e um pino. Devido ao calor gerado pelo ombro e pelo pino inseridos na junta ocorre a soldagem, que provoca a plastificação do material, realizando a mistura dos dois lados da junta. A ductilidade do material sofre um aumento devido ao aquecimento localizado ao redor do pino, com a combinação do movimento de avanço e da rotação da ferramenta proporcionam o movimento do material da frente do pino para trás. Por fim como resultado do processo obtêm-se uma junta confeccionada no estado sólido do material. Com as diferentes formas geométricas que a ferramenta de soldagem pode assumir, a movimentação ao redor do pino pode variar complexamente (FIORAVANTI, 2008).

Figura 3 - Típica ferramenta de FSW



Fonte: Fioravanti (2008).

Para início do processo é setada a rotação desejada para a ferramenta, após isso é feito o contato entre a ferramenta e a junta até que o ombro e a superfície do material

a ser soldado entrem em contato. Após a plastificação do material dá se início ao movimento de translação no sentido e alinhamento da junta. Antes de se encerrar o processo a ferramenta é recolhida o que ocasiona em um furo do mesmo diâmetro do pino no material, esse furo também é chamado de “furo remanescente”. A figura 4 mostra a sequência do processo de FSW (FIORAVANTI, 2008).

Figura 4 - Sequência do processo FSW e resultado da solda



Fonte: Mattei (2011).

A ferramenta do processo de soldagem não é consumível, portanto, precisa ter geometria que gere uma boa soldagem, tenha vida útil considerável e não gere torques demasiados no equipamento. Para a definição da geometria da ferramenta há uma série de fontes de atrito que podem ser levadas em consideração, fontes de atrito na fricção rotativa, nos processos de transformação, no qual estão incluídos a superfície de atrito da mistura e a retirada da ferramenta do material (MATTEI, 2011).

Como mostrado na Figura 5, as ferramentas podem adotar diferentes geometrias, podem ser com ponteiros lisos, com roscas, cônicas ou com sulcos. O ombro da ferramenta também pode variar sendo liso, em espiral, côncavo ou combinando todas essas geometrias (MATTEI, 2011).

Figura 5 - Diferentes geometrias de ferramenta para o FSW



Fonte: Mattei (2011).

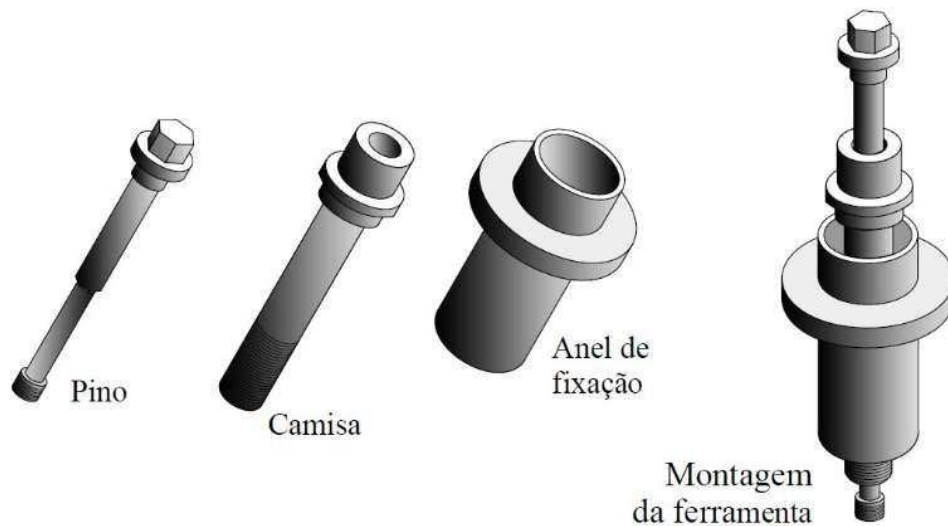
O método de soldagem FSW destaca-se por permitir soldagens a elevadas velocidades e é bastante aplicado em ligas de alumínio, porém, nos aços de grandes espessuras o método apresenta dificuldades, isso ocorre por causa do elevado aquecimento da ferramenta o que diminui consideravelmente a vida útil da mesma (MATTEI, 2011).

O FSW desde a década de 90 é um dos mais importantes desenvolvimentos para a união de metais, além de empregar uma eficiência energética, versatilidade e possuir inexistência de resíduos, requisitos que são essenciais para um maior cuidado com o meio ambiente (FIORAVANTI, 2008).

2.2.1 Soldagem ponto por fricção

Um método de soldagem derivado do FSW é a soldagem ponto por fricção (FSpW), a principal diferença entre os dois é que no FSpW não há movimento transversal da ferramenta. Um ponto relevante nessa técnica de soldagem consiste no fato que a junta soldada não apresenta, no final do processo, um furo remanescente na superfície da chapa, uma vez que, a soldagem ponto por fricção preenche por completo a junta soldada. Esse ponto tem grande relevância tendo em vista que o furo remanescente atua como um ponto concentrador de tensão e corrosão (CAMPANELLI, 2012). O que garante esse ponto para o FSpW é a forma como o dispositivo é desenvolvido, composto por três peças independentes, mostradas na Figura 6, são elas o pino, a camisa e o anel de fixação, que garantem que o furo deixado pela penetração da ferramenta na chapa seja preenchido (CASTRO et al., 2018).

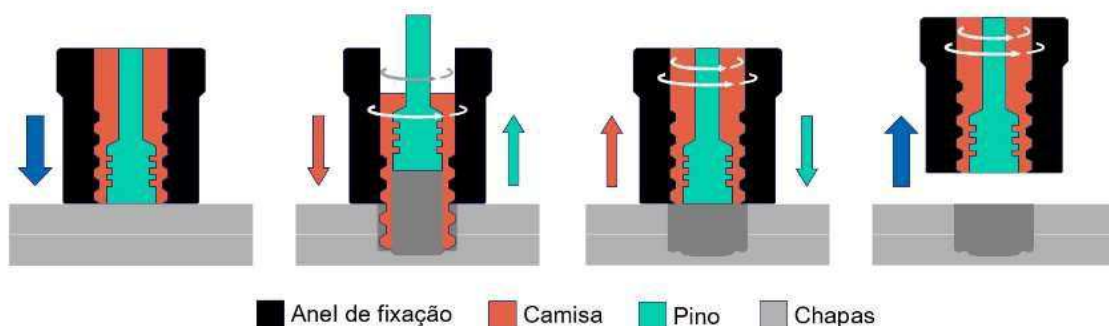
Figura 6 - Peças para composição da ferramenta de soldagem FSpW



Fonte: Castro et al. (2018).

O método de soldagem FSpW é dividido em quatro etapas e possui duas variantes, penetração da camisa e penetração do pino. Na penetração da camisa, o anel exerce a força para fixação do material para garantir a fixação, após a camisa penetra nas chapas e o pino se desloca na direção oposta a penetração, criando uma cavidade, aonde o material plasticizado fica depositado. O pino e a camisa são então rotacionados a fim de gerar calor por fricção ao material, possibilitando a mistura entre as chapas superior e inferior. Na terceira etapa, a camisa e o pino são deslocados no sentido oposto ao da penetração, fazendo com que o pino empurre o material deslocado novamente para as chapas, preenchendo o espaço deixado pela camisa. Por último, o anel de fixação libera as chapas e a ferramenta é removida da superfície do material, finalizando a soldagem ponto por fricção em duas chapas sobrepostas. A Figura 7 exemplifica o processo (CASTRO et al., 2018).

Figura 7 - Etapas da soldagem ponto por fricção



Fonte: Castro et al (2018).

Na variante de penetração do pino, o processo é semelhante, mas nessa variante ocorre a formação de uma cavidade anular, que é gerada quando a camisa usada para

acomodar o material empurrado pela penetração do pino é retraída (CAMPANELLI, 2012).

No FSpW os parâmetros importantes para o processo são: velocidade de rotação da ferramenta, profundidade de penetração, tempo de rotação (depois de ter alcançado a profundidade desejada nas chapas), velocidade de penetração da ferramenta, força aplicada e a geometria da ferramenta. Esses parâmetros são de extrema importância, pois são responsáveis pelo tamanho da zona de ligação, fluxo de material, calor gerado, microestruturas, dureza e pela geometria entre as chapas (MAZZAFERRO, 2008).

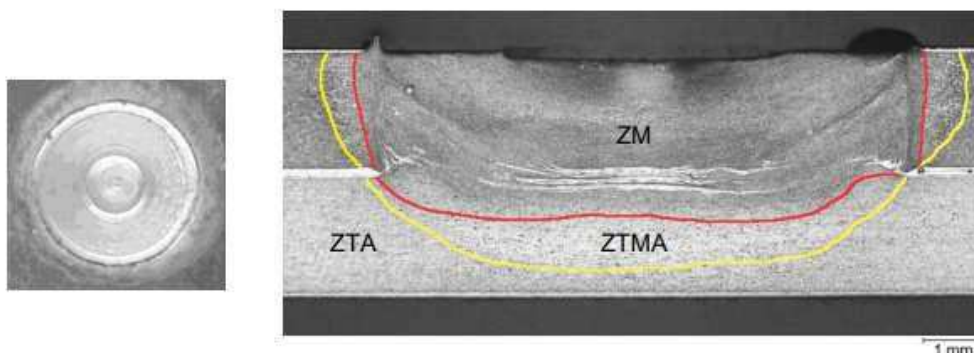
2.2.1.1 Microestrutura de juntas soldadas por FSpW

A microestrutura das juntas soldadas pelo método de soldagem ponto por fricção é dividida pelo metal base (MB), zona de mistura (ZM), zona termomecanicamente afetada (ZTMA) e zona termicamente afetada (ZTA).

Na zona de mistura (ZM) acontece a deformação plástica com uma elevada temperatura, recristalizando o material e realizando a mistura das chapas. Na zona termomecanicamente afetada (ZTMA) a deformação plástica e a temperatura são menores em relação a ZM, ocasionando à recuperação do material. Referente a zona termicamente afetada (ZTA), a deformação dos graus normalmente não ocorre, mas a microestrutura do material pode sofrer alterações por conta da temperatura alcançada. A Figura 8 mostra o aspecto visual da solda e suas respectivas zonas (MAZZAFERRO, 2008).

De acordo com CAMPANELLI, (2012) O tamanho das regiões varia dependendo do material que está sendo soldado e dos parâmetros utilizados na soldagem. Um ponto positivo na microestrutura se deve ao fato de a ZM não apresentar quase nenhum defeito metalúrgico (CAMPANELLI, 2012).

Figura 8 - Macrografia e aspecto visual de uma junta de uma liga de Al soldada por FSpW



Fonte: Campanelli (2012).

2.3 Vida em fadiga em juntas soldadas

Fadiga é um tipo de falha que ocorre quando um material é exposto a longos períodos sob tensões repetidas ou ciclos de deformação. Normalmente quando um material é submetido a tensões dinâmicas e variáveis pode ocorrer falha por fadiga. Essa falha pode acontecer antes que o material atinja seus limites de resistência a tração ou escoamento. Entre as falhas dos metais estima-se que a grande maioria aconteça por fadiga. Esse tipo de falha acontece de forma repentina e muitas vezes de forma abrupta (CALLISTER, RETHWISCH, 2016).

A soldagem gera tensões residuais e pode vir a ser um concentrador de tensões, por conta disso a soldagem diminui a vida em fadiga de um componente estrutural que está sujeito a cargas cíclicas. Então se em uma estrutura houver juntas soldadas, a resistência das juntas soldadas será a resistência de toda a estrutura (SILVEIRA, 2015).

Segundo Shigley (2005), a fratura por fadiga surge de três diferentes estágios. No primeiro estágio ocorrem microtrincas, que não são visíveis a olho nu, e são causadas pela cíclica deformação plástica do material. No segundo estágio são formadas superfícies de fratura oriundas da progressão das micro para macrotrincas, essas trincas são separadas por sulcos paralelos. No terceiro estágio é aonde ocorre a fratura rápida e repentina devido ao material não poder mais suportar as cargas, essa falha pode ser tanto frágil como dúctil.

2.3.1 Métodos para análise da vida em fadiga

Conforme Norton (2011) os modelos de falha por fadiga são utilizados tendo em vista a área de aplicação e o objetivo a ser alcançado. Existem três modelos, sendo eles, a tensão por número de ciclos (S-N), deformação por número de ciclos (ϵ -N) e a mecânica da fratura linear estática (MFLE). Esses modelos tem como objetivo estimar o número de ciclos (N) do material até a sua falha.

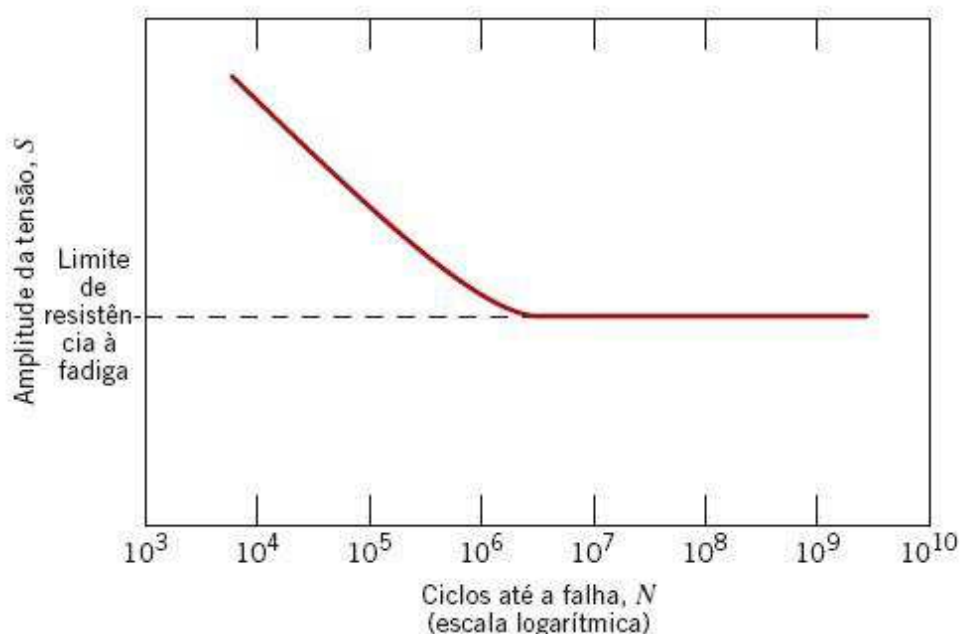
A fadiga pode ser dividida em dois regimes, fadiga de baixo ciclo e fadiga de alto ciclo, aonde que o número de ciclos (N) determina o regime. Para N igual ou menor de 1000 ciclos o regime pode ser considerado de baixo ciclo e para N maior que 1000 o regime pode ser considerado de alto ciclo (NORTON, 2011).

2.3.1.1 Tensão por número de ciclos (S-N)

Esse modelo de falha por fadiga relaciona os valores de tensão com os valores de ciclos. As tensões que podem ser aplicadas para se obter os resultados da vida em fadiga, essas tensões podem ser de torção, flexão rotativa ou de tração e compressão. Os resultados do ensaio de fadiga realizados por esse modelo são obtidos de forma rápida (CALLISTER, RETHWISCH, 2016).

Com esse método pode-se identificar uma curva S-N, aonde é mostrado os limites de tensão e fadiga do material. Se o valor limite de tensão do material não for ultrapassado significa que o corpo de prova possui vida infinita a fadiga. Também pode-se determinar a tensão limite de resistência a fadiga do material (BRANCO, 1999). A figura 9 mostra um exemplo de uma curva S-N de um material com limite de resistência a fadiga.

Figura 9 - Curva S-N de um material que possui limite de resistência a fadiga



Fonte: Callister, Rethwisch (2016).

2.4 Considerações sobre a revisão bibliográfica

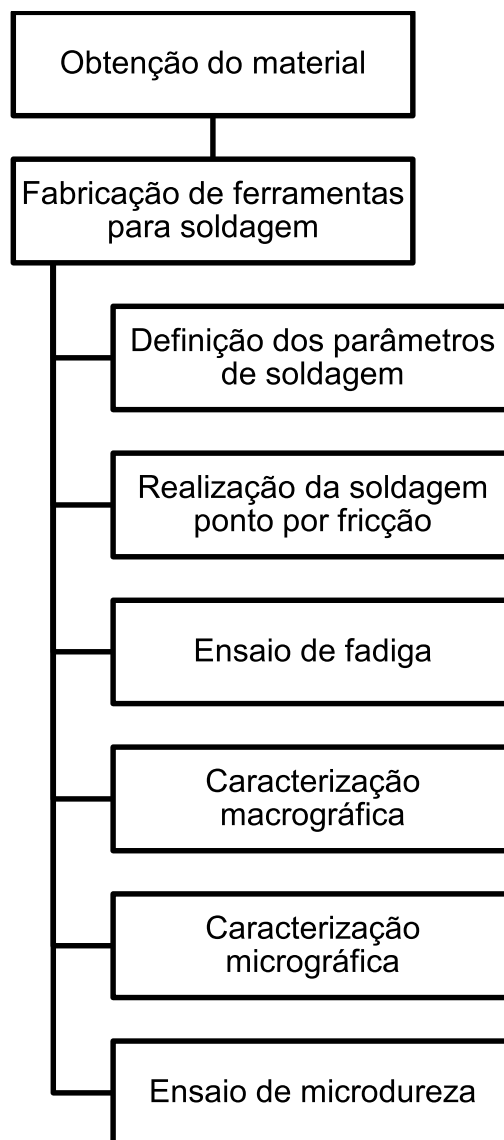
Com a conclusão deste capítulo foi possível obter informações sobre as características e propriedades, assim como as utilidades e soldabilidade, das ligas de alumínio e da liga de alumínio AA5052. O funcionamento, a microestrutura e as vantagens do processo de soldagem ponto por fricção em ligas de alumínio. Além da importância da vida em fadiga de juntas soldadas e dos métodos para se conseguir obter os limites da vida em fadiga dos materiais.

Tendo em vista todos esses pontos foi-se acumulado embasamento teórico para o andamento do trabalho.

3 METODOLOGIA

Nesse capítulo será descrito as etapas utilizadas para a realização do trabalho. O fluxograma da Figura 10 ilustra a sequência de etapas que foram executadas, com a premissa de realizar a soldagem ponto por fricção na liga de alumínio AA5052 e análise da vida em fadiga e caracterização da microestrutura da junta soldada.

Figura 10 - Fluxograma das etapas utilizadas no trabalho



Fonte: Autor (2020).

Seguindo o proposto no fluxograma inicialmente foi definido o material que será utilizado, seguido da fabricação de ferramentas de soldagem com diferentes geometrias, depois a definição dos parâmetros de soldagem e a realização da soldagem. Após isso foi feito o ensaio de fadiga para análise da vida em fadiga e a caracterização macrográfica e micrográfica da junta soldada, e por fim, análise das microdurezas através do ensaio de microdureza.

3.1 Material

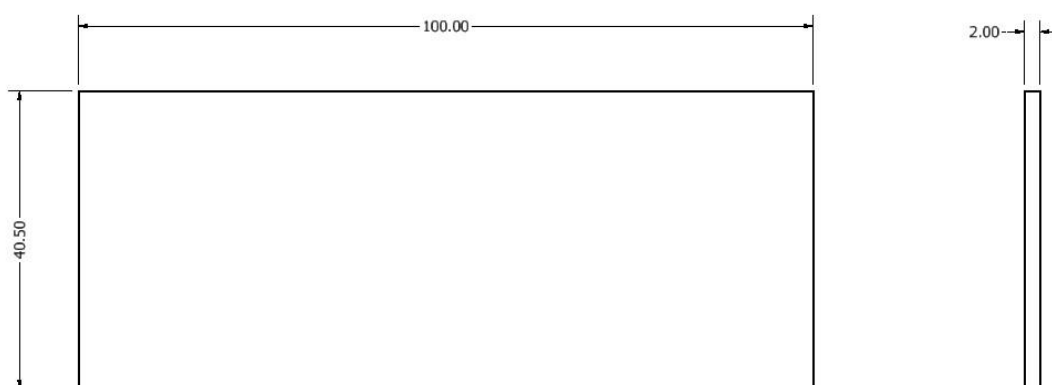
O metal base usado nesse trabalho foi a liga de alumínio AA5052, que é uma da série 5xxx e possui alta resistência a corrosão e boa resistência mecânica. As ligas pertencentes a essa série têm como seu principal elemento de liga o magnésio.

Principalmente na indústria naval busca-se materiais com excelente resistência a corrosão e baixa densidade, por conta disso, a liga de alumínio AA5052 é visada nessa indústria.

3.1.1 Corpo de prova para realização da soldagem FSpW

As juntas foram elaboradas com corpos de prova sobrepostos, confeccionados em chapa de espessura 2,0mm, com dimensões de 100mm de comprimento e 40,50mm de largura. As dimensões desses corpos de provas foram dimensionadas para atender ao processo de soldagem de acordo com o tamanho da ferramenta. O perfil do corpo de prova pode ser visto na Figura 11.

Figura 11 - Perfil do corpo de prova utilizado na soldagem (dimensões em mm)



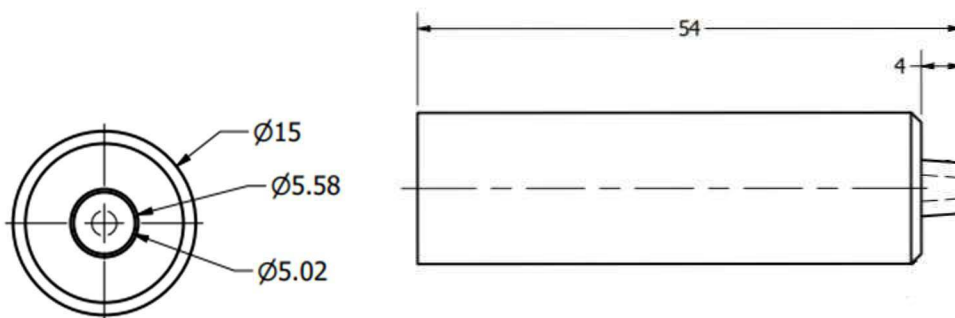
Fonte: Autor (2021).

3.2 Ferramentas de soldagem

Para realizar a soldagem foram fabricadas três ferramentas com geometrias distintas, nos quais foram usados os dados referentes ao processo FSW o qual é semelhante ao FSpW, seguindo com os dados de referência bibliográfica, segundo Mazaferro (2008), a geometria da ferramenta afeta nas zonas de ligação, microdurezas e geometria do ponto de solda, tendo em vista isso foram definidas as geometrias das ferramentas. A ferramenta do processo é dividida entre o corpo e o pino e seguindo os dados de Plaine (2016) possuirão diâmetro de 15mm e 6mm respectivamente, aonde a geometria do pino será diferente. Sendo assim as geometrias definidas para o pino serão, com ponteira lisa, ponteira triangular e ponteira com rosca cônica.

A geometria de rosca cônica foi definida pois influencia nas forças envolvidas no processo e na fase de imersão da ferramenta. A Figura 12 mostra o desenho esquemático para essa geometria.

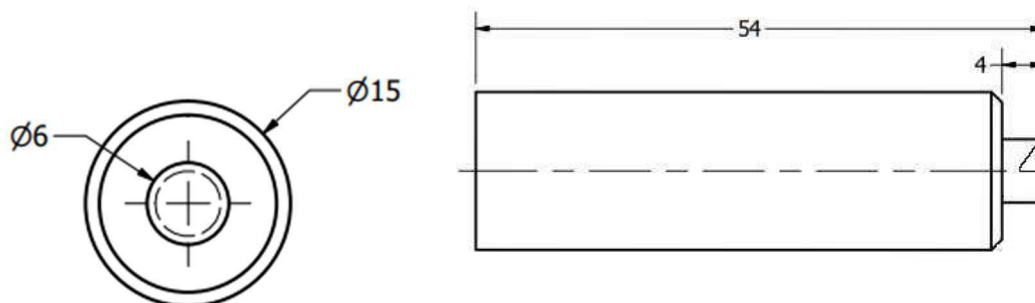
Figura 12 - Pino com ponteira cônica rosçada



Fonte: Autor (2021).

A geometria triangular, aonde a ponta da ferramenta possui sulcos triangulares, foi definida pois influencia na mistura e fluxo do material e promove um fluxo descendente no material. A Figura 13 mostra o desenho esquemático para essa geometria.

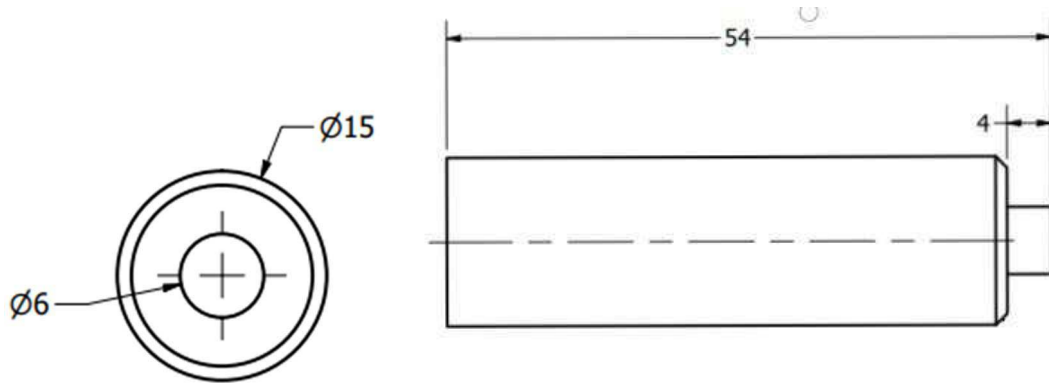
Figura 13 - Pino com ponteira rosçada



Fonte: Autor (2021).

A geometria lisa foi definida pois contribui em maior geração de calor e deformação plástica do material. A Figura 14 mostra o desenho esquemático para essa geometria.

Figura 14 - Pino com ponteira lisa



Fonte: Autor (2021).

Para fabricação das ferramentas foi usinado o aço VC 131 temperado, como a ferramenta não é consumível este processo será efetuado apenas uma vez.

Para a realização da usinagem foram utilizados um torno e uma fresadora com capacidades para obter os requisitos de geometria necessários.

3.3 Parâmetros de soldagem

Para a definição dos parâmetros de soldagem foram utilizados parâmetros consolidados na literatura na soldagem por fricção, principalmente por Tolloti (2015), o qual busca obter a maior velocidade na soldagem já que isso implica maior produtividade. Esses parâmetros serão mantidos para todas as ferramentas e em todas as soldagens realizadas. A tabela 3 mostra os parâmetros que serão utilizados.

Tabela 3 - Parâmetros utilizados para a soldagem

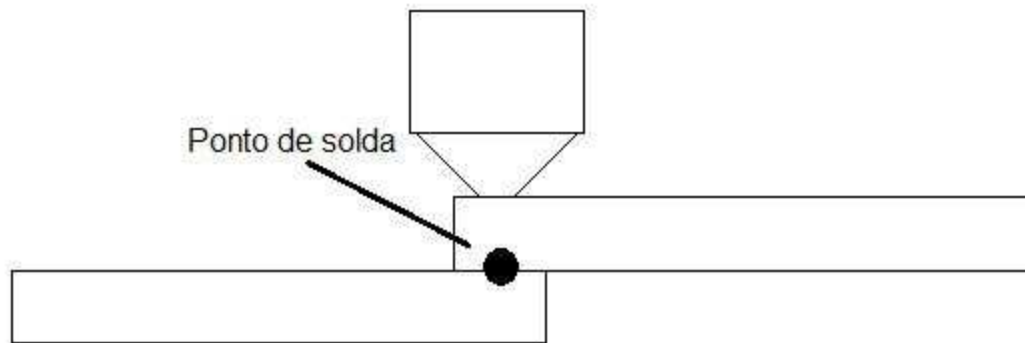
Ferramenta	Velocidade de avanço (mm/min)	Velocidade de rotação (RPM)	Profundidade de penetração	Sentido da rotação	Tempo de espera
Lisa, roscada e triangular	60	4000	3,7	Horário	10

Fonte: Autor (2021).

3.4 Ensaio de soldagem ponto por fricção

Para a realização da soldagem os corpos de prova ficaram sobrepostos e então foi efetuada a soldagem seis vezes para cada ferramenta usando os mesmos parâmetros de soldagem já definidos. Este número de soldagens se dá devido a quantidade de corpos de prova necessários para posterior análise. A soldagem ocorreu no núcleo da Universidade de Passo Fundo, com um torno CNC capaz de realizar a soldagem ponto por fricção. A Figura 15 exemplifica as chapas sobrepostas, enquanto a Figura 16 mostra a realização da soldagem.

Figura 15 - Exemplo de soldagem em chapas sobrepostas



Fonte: Autor (2020).

Figura 16 – Realização da soldagem



Fonte: Autor (2021).

3.5 Ensaio de fadiga

O ensaio foi realizado com a finalidade de avaliar a vida em fadiga das juntas soldadas. Foram preparados cinco corpos de prova para cada condição avaliada. O ensaio seguirá a norma ASTM E 466. Se a junta obter um milhão de ciclos sem falhas será presumido que a junta possui vida infinita a fadiga.

O ensaio foi realizado em uma máquina capaz de executar ensaios de fadiga com pelo menos capacidade de 100 kN, aonde foram utilizadas tensões cíclicas com frequência de 10 Hz e uma carga equivalente a 50% da tensão máxima do material. Essa carga foi definida após realização de ensaios de tração nos pontos de solda.

Com o ensaio buscou-se encontrar os valores de tensão e número de ciclos para então realizar a plotagem de gráficos para a comparação dos resultados obtidos para os pontos de solda de cada ferramenta. As tensões aplicadas foram de tração-compressão.

3.6 Caracterização macrográfica

Nessa etapa foi verificada a qualidade superficial das juntas soldadas com inspeccionamento a olho nu. A dimensão do ponto de solda foi medida através de um instrumento de medição com resolução de centésimos de milímetros. A inspeção teve como finalidade verificar a presença de defeitos macroscópicos superficiais da junta soldada. Foram também realizadas imagens dos corpos de prova com o auxílio de um microscópio.

3.7 Caracterização micrográfica

Os corpos de prova foram submetidos a tratamentos de superfícies para exibirem suas microestruturas, aonde foram lixados e polidos. Após, para verificar a microestrutura, sofreram um ataque com solução de ácido e água.

Nessa etapa buscou-se analisar a microestrutura das diferentes regiões formadas na junta soldada, sendo, a zona de mistura (ZM), a zona afetada pelo calor (ZAC) e o metal base (MB).

As imagens foram produzidas em diferentes escalas para encontrar a melhor visualização do material. Na figura 16 pode-se visualizar o microscópio usado para a realização das imagens.

3.8 Ensaio de microdureza

Para avaliação da microdureza foi usado o método Vickers, através de um microdurômetro com capacidade de carga de 2000 gramas. Foram realizadas três endentações nas diferentes zonas de interesse. O ensaio seguiu a norma ASTM E92, com tempo de aplicação de carga de 15 segundos com uma carga de 300 gramas. Visando avaliar a dureza nas diferentes zonas das juntas soldadas.

3.9 Considerações sobre a metodologia

Com a realização de todas as etapas propostas na metodologia conseguiu-se obter resultados confiáveis para analisar a vida em fadiga, além de suas características, de juntas soldadas da liga de alumínio AA5052 soldadas por soldagem ponto por fricção, visando a comparar as diferenças entre os resultados obtidos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

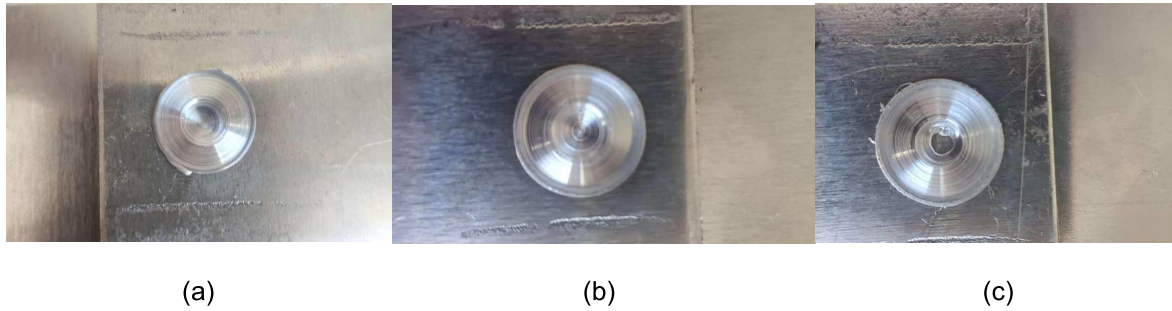
O principal ponto deste capítulo é referente aos principais tópicos da metodologia empregada aos experimentos, nos pontos de fabricação das ferramentas, realização da soldagem, ensaio de fadiga, caracterizações e microdurezas.

Primeiramente foram fabricadas as ferramentas para soldagem e a realização dos pontos de solda. O aço VC 131 temperado atendeu aos requisitos e as ferramentas não sofreram desgaste durante a realização da soldagem.

Os pontos de soldas oriundos de cada ferramenta foram sujeitos a caracterização macrográfica, aonde foram inspecionados a olho nu para verificação de alguma trinca ou deformidade superficial, o que não ocorreu para os pontos de solda realizados com as ferramentas lisa e cônica roscada, já o ponto de solda realizado pela ferramenta triangular apresentou uma deformidade, aonde a ferramenta atravessou as duas chapas, ocasionando em um furo no final do ponto de solda.

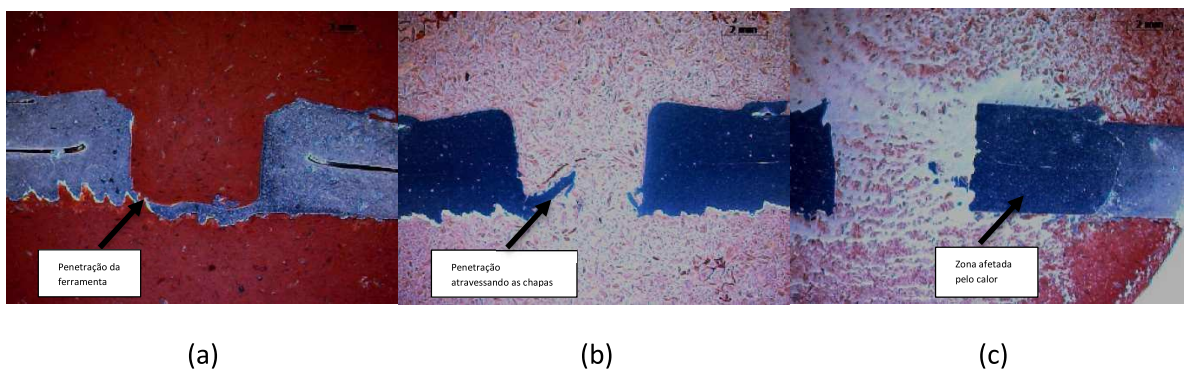
As dimensões dos pontos de solda não variaram de forma significativa entre as ferramentas. Os diâmetros dos pontos de solda ficaram em 20mm, 21mm e 22mm, para as ferramentas de pino liso, pino cônico roscado e pino triangular respectivamente. A figura 17 mostra os pontos de solda resultantes de cada ferramenta. Também, foram realizadas imagens macroscópicas dos pontos de solda cisalhados, aonde pode ser notar a diferença na cor do material na zona afetada termicamente, a figura 18 mostra os pontos de solda cisalhados, com realce a penetração da ferramenta e zonas afetadas pelo calor.

Figura 17 – Pontos de solda, (a) Ponteira lisa (b) Ponteira roscada (c) Ponteira triangular



Fonte: Autor (2021).

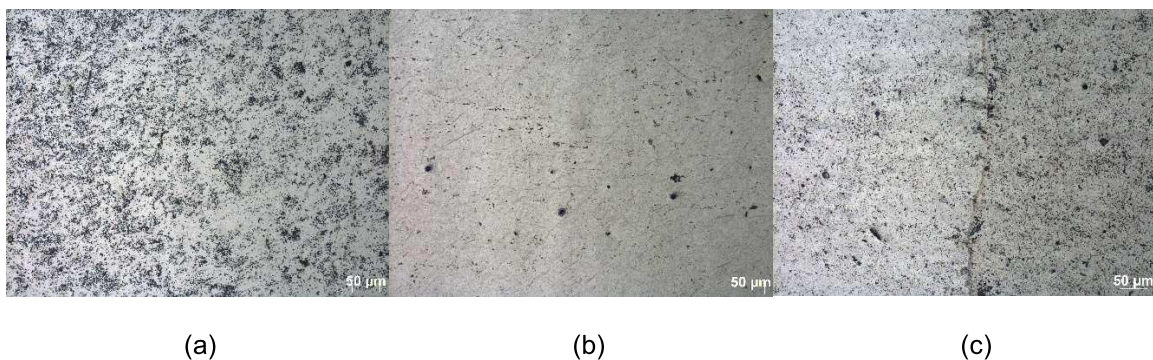
Figura 18 – Visão macrográfica do ponto de solda cisalhado, (a) Ponteira lisa (b) Ponteira roscada (c) Ponteira triangular



Fonte: Autor (2021).

Os corpos de prova foram também sujeitos a caracterização microscópica, aonde obteve-se imagens ampliadas da microestrutura do material. As imagens foram feitas com ampliação de 200x e pôde se perceber que a zona afetada pelo calor, juntamente com a zona de mistura ficaram com diferente coloração, mostrando que o material teve suas propriedades alteradas com o calor gerado. A figura 19 mostra a microestrutura dos diferentes pontos de solda realizados pelas ferramentas. No ponto de solda da ferramenta triangular fica bem visível a transição do material base para a zona afetada pelo calor.

Figura 19 – Caracterização micrográfica dos pontos de solda, (a) Ponteira lisa (b) Ponteira roscada (c) Ponteira triangular



Fonte: Autor (2021).

Com os ensaios de cisalhamento realizados para obtenção do limite de escoamento, foi-se realizado o ensaio de fadiga dos pontos de solda. Os valores encontrados de limite de escoamento foram de 157 MPa para ferramenta lisa, 90 MPa para ferramenta roscada e 111,5 MPa para ferramenta triangular. Então foram utilizados os valores de 50% do limite de escoamento de cada ponto soldado. Foi usado a mesma frequência de 10 Hz para todos os ensaios. Todos os corpos de prova atingiram UM milhão de ciclos sem falha, assim como descrito na revisão bibliográfica, são considerados como vida infinita a fadiga.

A tabela 4 apresenta a distribuição das amostras, com o valor das cargas e o número de ciclos obtidos.

Tabela 4 – Resultados obtidos do ensaio de fadiga

Ferramenta	Corpo de prova	Carga(kN)	Número de ciclos
Lisa	CP 01	2,21	1000000
	CP 02		
	CP 03		
	CP 04		
	CP 05		
Roscada	CP 01	1,27	1000000
	CP 02		
	CP 03		
	CP 04		
	CP 05		
Triangular	CP 01	1,57	1000000
	CP 02		
	CP 03		
	CP 04		
	CP 05		

Fonte: Autor (2021).

Com a análise dos resultados pode-se notar que o ponto de solda da ferramenta lisa obteve um limite de escoamento maior e que todas as soldas realizadas com as três diferentes ferramentas obtiveram resultados satisfatórios de vida infinita a fadiga.

Para o ensaio de microdureza, pelo método de Vickers (HV), foram separados um corpo de prova de cada ferramentas. Foram realizadas três endentações nos pontos de interesse, sendo eles o metal base (MB), a zona afetada pelo calor (ZAC) e a zona de mistura (ZM). Na ferramenta lisa pode-se notar a diminuição da microdureza entre o metal base e a zona de afetada pelo calor e o aumento da microdureza entre a zona de afetada pelo calor e a zona de mistura, na ferramenta roscada essa variação ainda ocorre, mas em menor escala e na ferramenta triangular a microdureza tem dispersões quase uniformes, porém sendo relativamente maior na zona afetada pelo calor. Os valores e as dispersões podem ser analisados na tabela 5.

Tabela 5 – Resultados do ensaio de microdureza dos pontos de solda

Ferramenta	Zonas de interesse	Ponto 1 (HV)	Ponto 2 (HV)	Ponto 3 (HV)	Média microdureza (HV)
Lisa	MB	125	115	115	118
	ZAC	91	92	97	93
	ZM	101	98	100	100
Roscada	MB	65	64	67	65
	ZAC	57	44	54	52
	ZM	60	60	58	59
Triangular	MB	57	46	55	53
	ZAC	55	59	61	58
	ZM	46	52	48	49

Fonte: Autor (2021).

Pode-se perceber que a média da microdureza da ferramenta lisa é a maior entre as ferramentas, enquanto que as microdurezas das ferramentas roscada e triangular possuem valores menores e quase se equiparam.

Com a realização de todas as etapas estabelecidas na metodologia obteve-se os resultados para a conclusão do trabalho, atendendo a todos os pontos propostos. Visando a analisar o principal objetivo do trabalho, a vida em fadiga dos pontos de solda.

5 CONCLUSÕES

O principal objetivo desse trabalho foi analisar a vida em fadiga de juntas soldada da liga de alumínio AA5052 por soldagem ponto por fricção.

A princípio foi estudado, através da literatura, as características da liga de alumínio, o método de soldagem por fricção e soldagem ponto por fricção, além de como funciona a fadiga e como definir a vida em fadiga da junta soldada.

Com a elaboração da metodologia foram definidas todas as etapas que precisariam ser realizadas para o trabalho e após foram executadas.

Em relação a macrografia dos pontos de solda, os mesmos apresentaram similaridades, seja em tamanho do ponto, aspecto visual e qualidade macrográfica da junta soldada. Somente em alguns casos o ponto de solda foi atravessado pela ferramenta ocasionando em um furo no ponto de solda, o que pode ser considerado uma deformidade visual.

Quanto a micrografia dos pontos de solda, as ferramentas também apresentaram similaridades aonde, nas imagens micrográficas, pode-se notar a região afetada pelo calor em coloração diferente do material base, mostrando que naquela área o material teve suas propriedades alteradas.

Em comparações com o objetivo principal que seria a vida em fadiga das juntas soldada, para todas as ferramentas e para todos os corpos de prova ensaiados o resultado foi o mesmo, um milhão de ciclos sem falha, o que resulta em vida infinita em fadiga, portanto todas as soldagens realizadas atenderam esse requisito.

Com relação as microdurezas dos pontos de solda houve vantagem para as soldas realizadas com a ferramenta de ponta lisa que apresentou valores maiores que as outras ferramentas. Quanto as ferramentas de ponta roscada e triangular os valores de microdureza ficaram bem próximos e praticamente equiparados.

De toda forma, as soldagens realizadas pelas ferramentas apresentaram similaridades quando submetidas às variantes designadas pelo trabalho. Como resultado final e atendendo ao objetivo principal do trabalho, todas as soldagens realizadas pelas três ferramentas atenderam ao critério de um milhão de ciclos sem falha e, portanto, apresentaram vida infinita a fadiga.

Por fim, para trabalhos futuros, tem-se como sugestão a análise das fraturas que ocorreram no ensaio de fadiga e a realização da soldagem em outros materiais com as mesmas ferramentas para analisar como os pontos de solda se comportariam.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E466**: Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials, ASTM International.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E92**: Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials, ASTM International.

BRANCO, C. M.; FERNANDES, A. A; CASTRO, P. T.; **Fadiga de estruturas soldadas**. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1999.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais**: Uma introdução. John Wiley & Sons, Inc., 2016.

CAMPANELLI, Leonardo; **Estudo do processo de soldagem por fricção por ponto da liga de magnésio AZ31**. 83 p. (Engenharia de materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.

CAMPANELLI, Leonardo; ALCÂNTARA, Nelson; SANTOS, Jorge; **Soldagem por ponto no estado sólido de ligas leves**, Soldag. insp. São Paulo, Vol.16, No. 3, p.300-307, Jul/Set 2011.

CAPELARI, Tiago; **Avaliação da geometria de ferramenta e parâmetros do processo FSW na soldagem da liga de alumínio AA5052**. 69 p. (Engenharia mecânica) – Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

CASTRO, Camila; PLAINE, Athos. Et al. **Estudo dos parâmetros do processo de soldagem a ponto por fricção de chapa fina da liga de alumínio AA2198-T8**. Soldag. insp. vol.23 no.3 São Paulo Jul/Set. 2018.

COSTA, Pedro; **Estudo dos processos TIG alimentado e MIG-P CC+ aplicados ao passo de raiz na liga AA5052.** 87 p. (Engenharia mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

FIORAVANTI, Artur; **Soldagem por FSW de ligas de alumínio ALCLAD AA2024-T3 e AA7075-T6.** 78 p. (Engenharia mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

MALTA, Maria; **Obtenção e caracterização de superfícies super-hidrofóbicas anticorrosivas em liga de alumínio 5052 a partir de diferentes filmes HDL e agentes redutores de energia de superfície.** 117 p. (Engenharia mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

MATTEI, Fabiano; **Desenvolvimento de equipamento para estudo de soldagem por fricção.** 166 p. (Engenharia de minas, metalúrgica e de materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

MAZZAFERRO, Cíntia; **Soldagem a ponto por fricção e mistura mecânica de um aço TRIP 500: processo, microestrutura e propriedades.** 99 p. (Engenharia de minas, metalúrgica e de materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

MOREIRA, Thiago; **Caracterização microestrutural e textural, por difração de elétrons retroespalhados (EBSD), da Solda a LASER em liga de Alumínio AA5052.** 77 p. (Engenharia de materiais) – REDEMAT, Ouro Preto, 2014.

NORTON, R. L.; **Projeto de máquina: uma abordagem integrada.** Bookman, Porto Alegre, 2013.

PLAINE, Athos; **Estudo do processo de soldagem a ponto por fricção de juntas dissimilares entre ligas de alumínio e titânio.** 157 p. (Engenharia de materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2016.

SHIGLEY, J. E.; **Projeto de Engenharia Mecânica.** Bookman, Michigan, 2005.

SILVEIRA, Júlio; **Avaliação dos métodos de tensão estrutural e curva mestre para determinação da vida em fadiga de juntas soldadas.** 154 p. (Projeto e processos de fabricação) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2015.

TOLOTTI, Diego; **Análise microestrutural e avaliação mecânica de juntas soldadas por fricção e mistura mecânica (FSSW) da liga de alumínio 5182-O.** 120 p. (Engenharia de minas, metalúrgica e de materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

VACCHI, Guilherme; **Avaliação da resistência à corrosão localizada do alumínio em juntas dissimilares Al-Ti soldada por fricção por ponto (FSpW).** 87 p. (Engenharia de materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2017.