

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

Departamento de Metalurgia

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE UMA
TECNOLOGIA DE UNIÃO DE TAMPA DE CILINDRO DE MOTOR**

Tiago Luís dos Santos Silva

Trabalho de Diplomação

Orientador: Professor Dr. Afonso Reguly

Porto Alegre

2023

CIP - Catalogação na Publicação

Silva, Tiago Luís dos Santos
Estudo da viabilidade técnica e econômica de uma
tecnologia de união de tampa de cilindro de motor /
Tiago Luís dos Santos Silva. -- 2023.
57 f.
Orientador: Afonso Reguly.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Porto
Alegre, BR-RS, 2023.

1. Solda por fricção. 2. Alumínio . 3. Soldagem. 4.
Redução de Custo. I. Reguly, Afonso, orient. II.
Título.

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

“Uma longa viagem começa com um único passo”.

Lao-Tsé

À minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Afonso Reguly pelos ensinamentos, oportunidades, amizade e confiança depositada.

Ao Eng. Metalúrgico Rafael Eugenio dos Santos pelos ensinamentos, acolhimento, confiança depositada em meu trabalho e conhecimentos compartilhados.

Aos meus familiares que proporcionaram todo o apoio e incentivo para essa etapa.

Ao Lourival Rech pelas oportunidades de pesquisas fornecidas por meio de amostras, projetos e desafios.

Aos meus colegas de trabalho da Stihl que me auxiliaram no desenvolvimento do trabalho.

Ao colega Vicente Matin Biason que me incentivou desde o primeiro dia de trabalho com quem tive muita troca de informações.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VI
LISTA DE TABELAS	VIII
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	XV
RESUMO	X
ABSTRACT	XI
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivo	2
2 Revisão Bibliográfica	3
2.1 Cilindros de motores à combustão	3
2.2 Processo de união da tampa do cilindro por selagem	4
2.3 Alumínio	5
2.3.1 Alumínio fundido Al-Si	6
2.3.2 Liga de AlSi9Cu3	8
2.4 Processos de união	11
2.4.1 Soldagem por ultrassom	11
2.4.2 Soldagem laser	12
2.4.3 União por difusão	14
2.4.4 Soldagem por fricção e mistura mecânica	17
3 Procedimento Experimental	23
3.1 Materiais	24
3.2 Método qualitativo de comparação entre os processos	24
3.3 Análise de redução de custo	25
3.4 Ferramenta de soldagem por fricção	25
3.5 Procedimento de soldagem	26
3.6 Parâmetros de processo	27
3.7 Inspeção visual	28

3.8	Análise microestrutura.....	28
3.9	Microscopia ótica.....	29
3.10	Ensaio de microdureza.....	29
4	Resultados e Discussão.....	30
4.1	Resultado qualitativo dos métodos de união.....	30
4.2	Ferramenta de soldagem	33
4.3	Avaliação superficial	34
4.4	Análise macroestrutural e microestrutural	35
4.5	Ensaio de microdureza.....	38
4.6	Redução de custo	39
5	Conclusões.....	41
6	Trabalhos Futuros	42
7	Referências	43

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1-1	Exemplos de cilindros com canais de transferência de ar.....	4
Figura 2.2-1	Diagrama de processos de união de tampas ao cilindro	5
Figura 2.3-1	Diagrama de equilíbrio Al-Si (adaptado pelo autor)	7
Figura 2.3-2	A) Microestrutura da liga Hipoeutética, B) Microestrutura Eutética c) microestrutura hipereutética (adaptado pelo autor).	8
Figura 2.3-3	Microestrutura AlSi9Cu3 bruto de fundição atacado com HF1 2%, aumento de 500x.....	11
Figura 2.4-1	Desenho esquemático do método de soldagem por ultrassom (adaptado pelo auto)	12
Figura 2.4-2	Característica de uma junta de alumínio AA5754 unidas por soldagem por ultrassom	12
Figura 2.4-3	Desenho esquemático funcionamento de laser ND-YAG	14
Figura 2.4-4	Típica macroestrutura de uma junta soldada por laser	14
Figura 2.4-5	Mecanismo de união por difusão	15
Figura 2.4-6	Exemplos de fornos para soldagem por difusão	16
Figura 2.4-7	Microestrutura da liga de alumínio AA7075 de uma junta soldada por difusão	16
Figura 2.4-8	Desenho esquemático de processo soldagem por mistura mecânica por fricção (adaptado pelo autor).....	17
Figura 2.4-9	Alguns tipos de pino de ferramenta FSW (adaptado pelo autor).....	20
Figura 2.4-10	Desenho esquemático geometria de ombros e diferentes ranhuras na base do mesmo (adaptado pelo autor).	20
Figura 2.4-11	Típica macroestrutura de uma junta de uma liga alumínio AlMgSc soldada por fricção (adaptado pelo autor).....	22
Figura 3.1-1	Chapas de alumínio AlSi9Cu3.....	24
Figura 3.2-1	Cilindro utilizado para avaliar os processos de união.....	25
Figura 3.4-1	Desenho CAD ferramenta de soldagem.....	26
Figura 3.5-1	Sistema de fixação e bancada de soldagem	27
Figura 3.10-1	Posições de endentações de microdureza	29
Figura 4.2-1	Ferramenta de soldagem desenvolvida após soldagem das amostras ...	34
Figura 4.3-1	Superfície da amostra SC-16	35

Figura 4.4-1 Macrografias da seção transversal das amostras: SC-07, SC-10, SC-15 e SC-16.....	36
Figura 4.4-2 – Microestrutura da zona de mistura SC-7 SC-10 SC-15 e SC-16.....	37
Figura 4.4-3 – Interface entre a ZM e MB da amostra SC-16.....	38
Figura 4.4-4 – Interface entre a zona afetada pelo calor e zona de mistura SC-07, SC-10, SC-15, SC-16.....	38
Figura 4.5-1 – Perfil de dureza da amostra SC-16	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.3-1	Propriedades do alumínio alta pureza	6
Tabela 2.3.2-1	Reações durante a solidificação da AlSi9Cu3 (adaptado pelo autor)	10
Tabela 2.4.4-1	Parâmetros apresentados pela literatura para alumínio fundido.....	19
Tabela 3.1-1	Composição química AlSi9Cu3.....	24
Tabela 3.4-1	Composição química aço H13	26
Tabela 3.6-1	Parâmetros de solda	27
Tabela 3.7-1	Defeitos conforme ISO 25239-4.....	28
Tabela 4.1-1	Quadro comparativo entre os métodos	33
Tabela 4.3-1	Parâmetros de Solda.....	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ZAC – Zona afetada pelo calor

ZM – Zona de mistura

ZTMA – Zona termo mecanicamente afetada

RESUMO

Seguindo as tendências da indústria 4.0 impulsionadas por uma evolução social e sustentável, empresas competitivas têm buscado novas alternativas para adequar seus métodos de produção. Métodos consolidados têm sido reavaliados cedendo espaço a incorporação de tecnologias inovadoras. Com esse objetivo, nesse trabalho foi investigado uma tecnologia para substituir o processo de selagem de união de tampas de cilindros de motor de combustão interna. Foram avaliadas características de diferentes processos como: sustentabilidade, segurança operacional e produtividade. Como resultado, o método de solda por fricção e mistura mecânica se apresentou mais adequado, e, desta forma; um estudo experimental foi aplicado. Foram projetadas ferramenta e bancada de soldagem usando uma fresadora, e produzidas uniões em chapas de AlSi9Cu3. Com os resultados da avaliação por inspeção visual, análise metalográfica e perfil de microdureza, evidenciaram-se uma qualidade desejável nos aspectos microestruturais; redução da porosidade e um aumento de 15% na dureza comparando o material base com a zona da junta. Além disso, com as velocidades de soldagem obtidas por união, produzida com qualidade desejável, o método de solda por fricção e mistura mecânica poderia substituir o método atual com uma destacável redução de custo.

ABSTRACT

Following the trends of Industry 4.0 driven by a social and sustainable evolution, competitive companies have sought new alternatives to adapt their production methods. Consolidated methods have been reevaluated giving way to the incorporation of innovative technologies. With this objective, in this work we investigated a technology to replace the process of sealing the union of internal combustion engine cylinder lids. Characteristics of different processes were evaluated such as: sustainability, operational safety and productivity. As a result, the friction stir welding method was found to be the most suitable, and thus an experimental study was applied. Welding tools and benches were designed using a milling machine, and joints were produced on AlSi9Cu3 plates. With the results of the evaluation by visual inspection, metallographic analysis and microhardness profile, a desirable quality in microstructural aspects, reduction of porosity and a 15% increase in hardness compared to the base material and the joint zone were evidenced. In addition, with the welding speeds obtained by joining producing with desirable quality the friction stir welding method could replace the current method with an outstanding cost reduction.

1 INTRODUÇÃO

A necessidade eminente de adequação das indústrias, das quais as demandas da sociedade fazem com que empresas competitivas estejam em constante busca de novas tecnologias de produção. Em um trabalho ativo de melhoria contínua, há uma busca por métodos mais sustentáveis que proporcionem redução de custos, segurança operacional (incluindo automação de processos) e aumento da produtividade. Com as novas tendências de produção que visam a robotização dos processos de fabricação, inovadores métodos têm sido avaliados e desenvolvidos. Dessa maneira, ao seguir as tendências da Indústria 4.0, linhas de produção autônomas, inteligente e com modelos sustentáveis de produção têm sido almejadas (MAESTRI *et al.*, 2021).

Na produção de motores a combustão interna de equipamentos agrícolas de pequeno porte são utilizados cilindros de alumínio. Um dos métodos utilizados tem sido o de fusão sob pressão onde necessita ter uma cavidade passante para a posterior montagem do motor. Ao final da linha de montagem esta cavidade é fechada por uma tampa que é unida por selagem. Esse método tem sido utilizado para não afetar as propriedades dos materiais, cilindro e tampa, pois não aplica temperatura ou pressão. Por outro lado, seu uso requer um cuidado especial com o selante desde seu armazenamento até a sua aplicação e, adicionalmente, ao final do processo todas as uniões são submetidas a testes de estanqueidade. Como forma de reduzir custos e adequar a produção as novas tecnologias, inovadores processos de união têm sido almejado. Em um primeiro plano, métodos convencionais de fusão poderiam ser utilizados na união da tampa ao cilindro, como por exemplo MIG, MAG e TIG. Entretanto, as uniões por alumínio são suscetíveis a trincas induzidas por hidrogênio e requerem um controle rigoroso de aplicação (HAN *et al.*, 2020). Nesse âmbito, as uniões por processos de estado sólido têm sido investigadas como alternativa, pois, além das melhorias nas propriedades mecânicas e bem-estar do operador, seu uso pode reduzir os gastos e aumentar a produtividade.

1.1 Motivação

Este trabalho foi motivado pela busca de um processo alternativo para o atual método de montagem de tampas de cilindros de motores, tendo em foco as tendências da indústria 4.0, a redução de custos de produção e o aumento da produtividade.

1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é avaliar a viabilidade técnica-econômica de um outro modal para união de tampas de cilindro de motores da liga de alumínio fundido AlSi9Cu3.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cilindros de motores à combustão

Os motores são aparatos que transformam energia elétrica, térmica, hidráulica, ou outras formas de energia em energia mecânica. O motor de combustão, em especial, é considerado uma máquina térmica que transforma calor em trabalho (BRUNETTI, 2018). Estes engenhos são classificados pela sua forma de combustão como: combustão externa, quando a combustão do combustível e do ar é fora do cilindro, por exemplo caldeiras a vapor; e, combustão interna, quando ocorre a queima da mistura de combustível com ar dentro do cilindro do motor (GUPTA, 2012). Desta forma, o cilindro é o componente do motor onde ocorre a combustão controlada que é direcionada para impulsionar o movimento linear da biela convertido em movimento circular pelo eixo do virabrequim. Em motores de combustão interna os cilindros devem ser projetados para atender algumas características como:

- ✓ Ciclo termodinâmico:
 - ciclo Otto – Fornecimento de calor sob volume constante;
 - ciclo diesel – Fornecimento de calor sob pressão constante;
 - ciclo duo – Fornecimento de calor sob pressão e volume constante;
 - e,
 - ciclo Joule ou Ciclo Brayton.
- ✓ Ciclo de trabalho
 - dois tempos; e,
 - quatro tempos.
- ✓ Combustível
 - motores com combustíveis leves (querosene, gasolina e álcool);
 - motores com combustíveis pesados (diesel, óleos minerais);
 - motores com combustão a gás; e,
 - motores bicombustíveis – gás e combustível líquido. (GUPTA, 2012)

Na indústria de ferramentas à combustão são utilizados motores de combustão interna, comumente de combustíveis leves. Para esses modelos os cilindros são normalmente fabricados com ligas de alumínio pelo processo de fundição sob pressão ou por

gravidade. Por questões geométricas, os cilindros por fundição sob pressão são produzidos em duas partes, cilindro e tampa, onde os canais de transferência de ar são formados ao ser unidas as duas partes. Na

Figura 2.1-1 estão demonstrados alguns modelos de cilindros produzidos. Em (a) tem-se um cilindro com canais de transferência produzido na fundição por gravidade, em (b) um cilindro com canais de transferência formados por tampa aparafusadas, e em (c) cilindro com canais de transferência formados pela selagem da tampa.

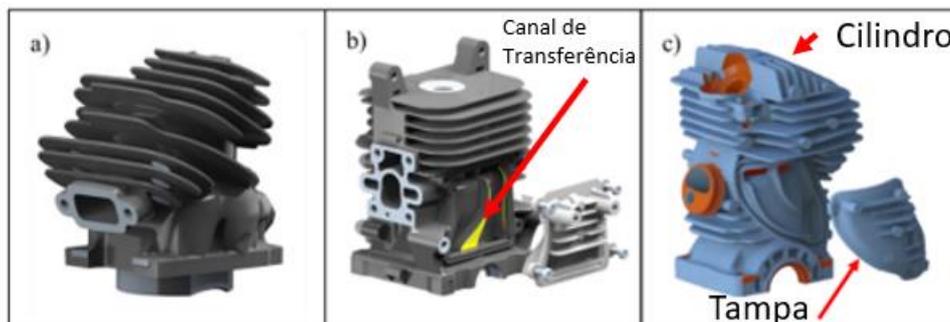


Figura 2.1-1 Exemplos de cilindros com canais de transferência de ar

Fonte: Elaborado pelo Autor

2.2 Processo de união da tampa do cilindro por selagem

O processo atual de união da tampa do cilindro consiste em aplicar o selante em canais especiais para o posterior encaixe da tampa. O selante, ademais da função de unir a tampa ao cilindro para formar o canal de escape de gases, deve garantir a estanqueidade do cilindro para evitar vazamentos e não reduzir o rendimento do motor. A utilização de selante é um processo consolidado e tem como vantagem não afetar as propriedades mecânicas do material da tampa e do cilindro. Como desvantagem, esse processo requer várias etapas conforme a

Figura 2.2-1, e demais fatores tais como:

- selantes de alto valor agregado;
- armazenamento das colas sob refrigeração;
- necessidade uma sala refrigerada a 21°C para aplicação;
- superfície de aplicação de cola é necessária estar limpa e seca; e,
- é necessário ensaios para verificação de estanqueidade.



Figura 2.2-1 Diagrama de processos de união de tampas ao cilindro

Fonte: Elaborada pelo autor

2.3 Alumínio

O alumínio é o segundo material metálico mais utilizado na indústria e é um metal economicamente importante em aplicações de engenharia. Sua versatilidade mecânica, química e física transformou esse metal e suas ligas altamente atrativos para a indústria. As principais propriedades que fazem o alumínio ganhar uma importância em processos industriais são: sua baixa densidade, resistência mecânica, reciclabilidade, resistência a corrosão, durabilidade, ductibilidade, conformabilidade e condutividade. (DAVIS, 1993).

O alumínio é encontrado combinado em mais de 270 diferentes minerais na natureza devido a sua alta reatividade química. A principal fonte de alumínio é o minério de bauxita. Sua baixa densidade de 2.7 kg/dm^3 é cerca de um terço das ligas de aço e possui boa resistência a atmosferas corrosivas decorrente de uma fina e transparente camada passivadora de óxido de alumina que se forma instantaneamente protegendo o metal de maiores oxidações. O alumínio é resistente ao intemperismo mesmo em atmosferas industriais (TOTTEN & MACKENZIE, 2003). Na Tabela 2.3-1 estão demonstradas algumas propriedades físico-químicas de alumínios de alta pureza.

O alumínio comercial em seu estado puro possui baixa resistência mecânica. Um elevado aumento de resistência pode ser obtido através da adição de elementos de liga, como magnésio, manganês, silício, cobre, gálio ou zinco. A baixa densidade comparada com outros materiais metálicos combinada com elevada resistência mecânica tornaram essas ligas importantes para a indústria aeroespacial e automobilística, como por exemplos no uso de bloco de motores e cilindros (TOTTEN; MACKENZIE, 2003)(BEER, 2012).

Tabela 2.3-1 Propriedades do alumínio alta pureza.

Propriedades do Alumínio	Valor	
Pureza (%)	99,990	99,000
Ponto de Fusão (°C)	660,2	657,0
Ponto de Ebulição(°C)	2480	-
Calor Latente de Fusão (cal/g)	94,6	93,0
Calor Específico a 100°C (cal/g)	0,2226	0,2297
Densidade a 20°C (g /cm ³)	2,7	-
Resistividade Elétrica 20°C(μΩ/cm)	2,68	2,87
Coefficiente de Expansão Térmica 10 ³ (20 -100°C)	23,86	23,5
Condutividade Térmica e.g. unidades a 100°C	0,57	0,54
Refletividade (total) %	90	
Modulo de Elasticidade (MPa)	70	

Fonte: (TOTTEN & MACKENZIE, 2003)

2.3.1 Alumínio fundido Al-Si

De acordo com a Associação Brasileira do Alumínio (ABAL) o consumo de alumínio fundido está crescendo no Brasil devido as suas propriedades mecânicas e químicas, onde obteve um crescimento de 16,7% em comparação a 2020 (ABAL, 2022). As ligas de alumínio fundido Al-Si são as mais importantes entre as ligas fundidas comerciais por apresentarem propriedades com excelente fluidez, baixo ponto de fusão, alta resistência a corrosão e resistência ao desgaste.(HEGDE; PRABHU, 2008).

No diagrama binário de fases Al-Si, Figura 2.3-1, está demonstrada as proporção de Si e Al para ligas comerciais que se encontram entre os campos hipoeutético e eutético, 5 e 13% Si respectivamente (FUOCO, 2017).

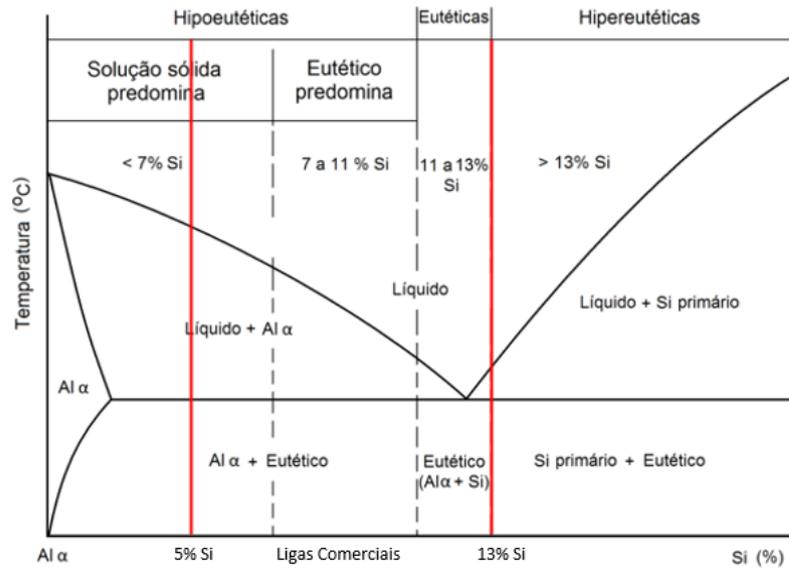


Figura 2.3-1 Diagrama de equilíbrio Al-Si (adaptado pelo autor)

Fonte: (DUARTE, 2014)

A microestrutura de ligas Al-Si é formada principalmente por duas fases. Uma matriz de fase α , que tem alumínio com aproximadamente 1,5% Si solubilizado, e silício eutético na forma lamelar. Além dessas duas fases, outros componentes intermetálicos também podem ser encontrados devido a impurezas presentes no banho (FUOCO, 2017). Sua morfologia formada pela fase α é geralmente dendrítica, cor clara, com porções de eutético onde contém as fases α e silício eutético, fase escura (GRUZLESKI, 1990), conforme demonstrado na Figura 2.3-2.

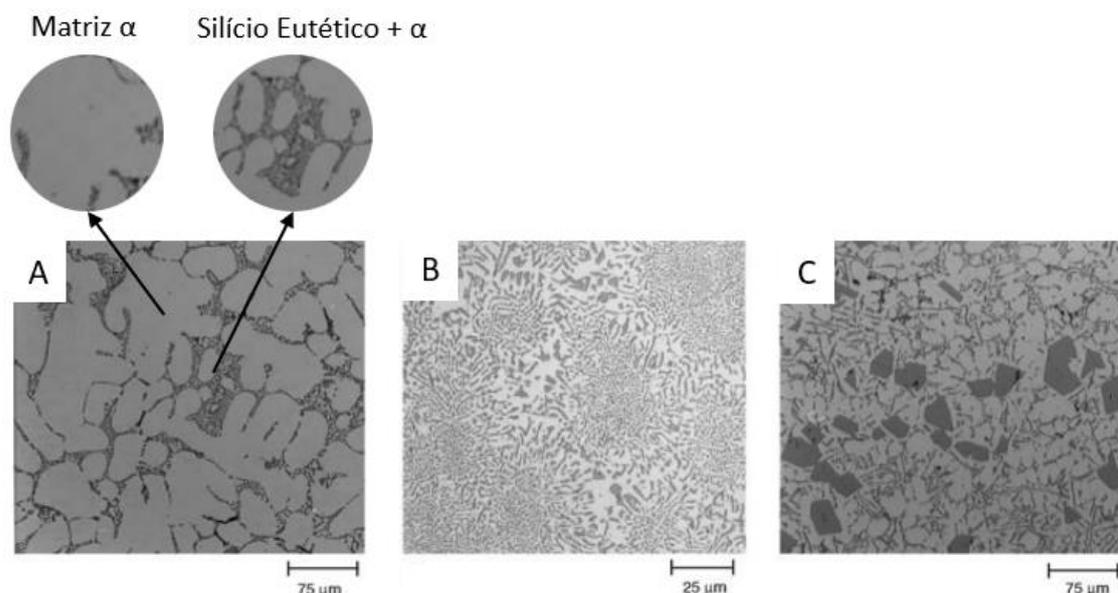


Figura 2.3-2 A) Microestrutura da liga Hipoeutética, B) Microestrutura Eutética c) microestrutura hipereutética (adaptado pelo autor).

Fonte: (ASM, 2004)

Outra característica das ligas fundidas de Al-Si é a adição de elementos como cobre e magnésio para ativar o mecanismo de endurecimento por precipitação (ERVINA EFZAN; KONG; KOK, 2014). Esses elementos precipitam compostos intermetálicos insolúveis com alta dureza, aumentando a resistência mecânica da liga.

Na indústria automobilística, estudos da utilização de ligas de alumínio fundido para construção de cilindros de blocos de motor iniciaram em 1970 visando principalmente a redução de peso. Estes estudos foram importantes para o desenvolvimento de ligas com boas propriedades de fundição, boa usinabilidade, resistência à fadiga em elevadas temperaturas e baixo custo de produção. Com essas características as ligas de alumínio fundido que se destacaram foram AlSi8Cu3, AlSi6Cu4, AlSi7Mg0,3, AlSi7Mg e AlSi9Cu3 (ASSOCIATION, 2011).

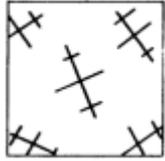
2.3.2 Liga de AlSi9Cu3

A liga AlSi9Cu3 é uma liga hipoeutética geralmente com uma matriz de fase α com plaquetas de silício eutéticas e várias fases intermetálicas, demonstrada na Tabela 2.3-2 (PANUŠKOVÁ; TILLOVÁ; CHALUPOVÁ, 2008). A fase α é responsável pela ductibilidade da liga. Por outro lado, o silício, cobre e os compostos intermetálicos são responsáveis pelo aumento de dureza e ganho de resistência mecânica. Na Figura 2.3-3 está demonstrada uma microestrutura típica de AlSi9Cu3 atacada com solução de 1% HF

(48%) e 200 ml H₂O. O cobre é adicionado nessa liga com a função de aumentar a resistência mecânica da matriz, gerando precipitados dispersos na matriz e nos contornos grãos que diminui a ductibilidade da mesma (PUGA *et al.*, 2011).

Outros elementos, como o ferro, formam intermetálicos que afetam diretamente na morfologia da fase Al₅FeSi. Com o acréscimo de ferro e silício, a fase é modificada para um formato de agulhas com uma distribuição interdentrítica em espaços intergranulares. Conforme diversos estudos, essa morfologia atua como nucleadores de trincas (ZOVKO BRODARAC; DOLIĆ; UNKIĆ, 2014).

Tabela 2.3-2 Reações durante a solidificação da AlSi9Cu3 (adaptado pelo autor)

Temperatura (°C)	Reação	Descrição	Representação Solidificação
1 609	$L \rightarrow \alpha_{Al}$	Desenvolvimento de redes de dendritas	
2 590	$L \rightarrow \alpha_{Al} + Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2 + Al_5FeSi$	Precipitação da fase AlMnFe	
3 575	$L \rightarrow \alpha_{Al} + \beta_{Si} + Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2 + Al_5FeSi$	Precipitação de fases intermetálicas	
4 554	$L \rightarrow \alpha_{Al} + \beta_{Si} + Mg_2Si + Al_8Mg_3FeSi_2$	Precipitação de fases intermetálicas	
5 525	$L \rightarrow \alpha_{Al} + \beta_{Si} + Al_2Cu + Al_5FeSi$	Precipitação da fase Al ₂ Cu	
6 507	$L \rightarrow \alpha_{Al} + \beta_{Si} + Al_2Cu + Al_5Mg_8Si_6Cu_2$	Precipitação de uma fase complexa eutética consiste em fase Al ₂ Cu e Al ₅ Mg ₈ Si ₆ Cu ₂	

Fonte: (ZOVKO BRODARAC; DOLIĆ; UNKIĆ, 2014)

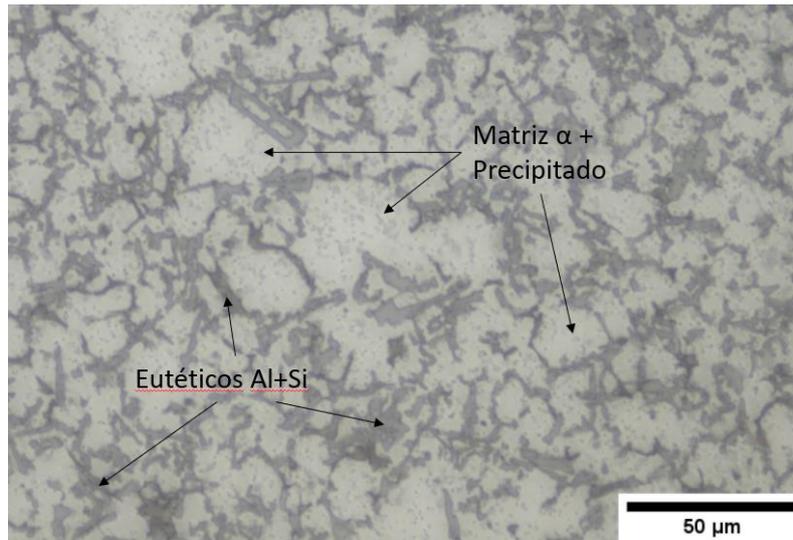


Figura 2.3-3 Microestrutura AlSi9Cu3 bruto de fundição atacado com HF1 2%, aumento de 500x

Fonte: Elaborado pelo autor

2.4 Processos de união

2.4.1 Soldagem por ultrassom

A soldagem por ultrassom é uma vertente de soldagem por fricção. O método consiste em aplicar uma alta frequência de vibração mecânica transferida para a junta sob pressão. Essa vibração causa o deslizamento entre as partes a ser soldada ocasionando um aquecimento, demonstrado na Figura 2.4-1. Dessa forma dois materiais são unido pela intensa deformação plástica gerada pelo sistema (THAPLIYAL, 2021). Esse processo é vastamente utilizado na soldagem de componentes eletrônicos, chapas e folhas de alumínio e componentes estruturais automobilísticos (ASM, 2000).

Os equipamentos de soldagem por ultrassom são compostos principalmente por: uma fonte de energia, que geram usualmente entre 15 quilohertz e 40 quilohertz; um transdutor, que transforma elevada frequência elétrica em vibração mecânica; um amplificador, que aumenta a intensidade da vibração; um sonotrodo, que é a parte que encosta no material a ser soldado e transfere a energia de vibração para a peça; e, uma bancada rígida, onde é fixada a junta (ASM, 2000).

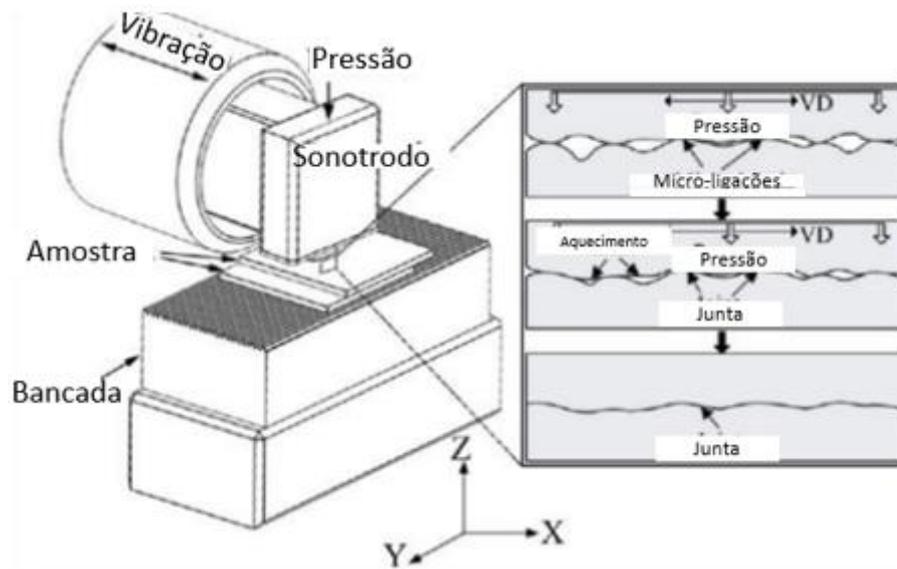


Figura 2.4-1 Desenho esquemático do método de soldagem por ultrassom (adaptado pelo autor)

Fonte: (ZHANG *et al.*, 2022)

O processo de soldagem por ultrassom possui muitas vantagens sobre outros modos de união por estado sólido. Sua velocidade de soldagem é de 1 segundo, consome pouca energia e não produz fumos, sendo considerada uma tecnologia sustentável. Na Figura 2.4-2 está demonstrada uma típica junta soldada por processo de soldagem por ultrassom (ZHANG *et al.*, 2022).

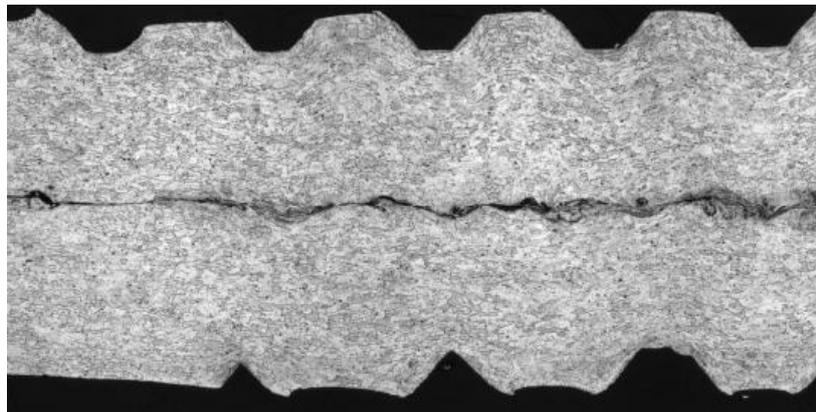


Figura 2.4-2 Característica de uma junta de alumínio AA5754 unidas por soldagem por ultrassom

Fonte: (WALSH; DEVINE, 2010)

2.4.2 Soldagem laser

A solda laser é vastamente utilizada na indústria automobilística para a união de ligas de alumínio forjadas (ZHAO; WHITE; DEBROY, 1999). O método consiste em aplicar um feixe de luz com grande densidade de energia sobre o material a ser soldado. Essa taxa de energia eleva o material até a temperatura de fusão, coalescendo e fazendo a união da junta. Os processos de soldagem laser podem ser contínuos, em pulsos ou de modo mistos. A soldagem laser é utilizada na indústria automobilística na união de tetos, ar condicionados e transmissões automotivas (O'BRIEN; SOCIETY, 2010). Basicamente, os equipamentos necessários para o uso desse método são: um robô, sistema de controle, sistema de resfriamento, sistema de emissão de gases de proteção, sala especial para a proteção contra radiação e fonte laser. Atualmente estes equipamentos podem ser encontrados com variados tipos de fontes de laser, tais como:

- CO₂ laser;
- lamp-pumped YAG laser;
- laser diode;
- Ld-pumped laser de estado solido;
- *disk laser*;
- *fiber laser*;

O Nd:YAG laser no estado sólido e o CO₂ lasers são o mais utilizado na união de alumínio forjado. Os dois tipos de laser também podem ser utilizados em modo de pulsos, contínuo ou misto. O laser ND:YAG tem uma grande variabilidade na potência que pode ser utilizado em comparação ao CO₂ laser. Outra vantagem do laser ND:YAG é o comprimento de onda de 1,06 µm facilitando o alcance para a realização da soldagem, sendo facilmente aplicado em braços robótico (WALSH, 2002).

O laser ND:YAG é composto por 3 partes principal: uma fonte de energia, um meio ativo e o ressonador óptico, demonstrado na Figura 2.4-3. A fonte de energia tem função de ativar o cristal. O meio ativo é formado por um cristal sintético (Yttrium Aluminum Garnet) dopado com neodímio. Quando a energia passa pelo cristal os íons de Neodímio são ativados resultando no laser. O ressonador óptico é um dispositivo compostos por dois espelhos revestidos de alta refletividade colocados adequadamente em ambas as extremidades.

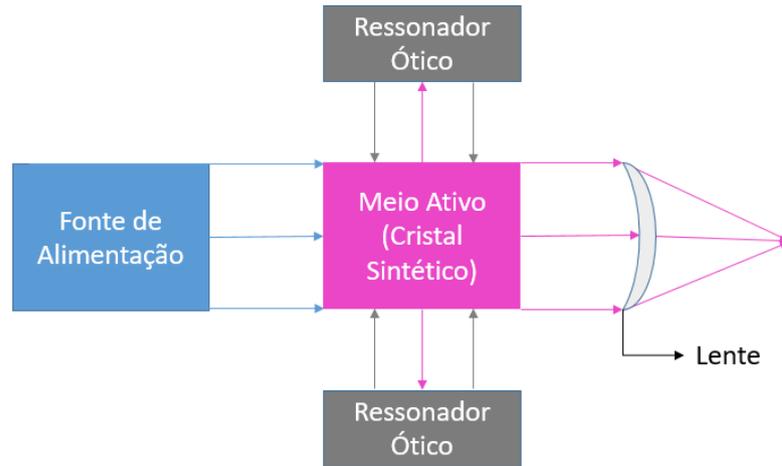


Figura 2.4-3 Desenho esquemático funcionamento de laser ND-YAG
 Fonte: Elaborado pelo autor

As principais vantagens desse processo são: a velocidade de soldagem alta, uma zona afetada pelo calor (ZAC) pequena e a baixa distorção da junta. A principal desvantagem desse método são problemas de soldabilidade da liga de alumínio fundida. Por ser um método de fusão, problemas inerentes a soldagem por fusão em ligas de alumínio ocorrem, como, porosidade, vazios e trincas são frequentes (SVENUNGSSON; CHOQUET; KAPLAN, 2015). Desta forma um aprofundado estudo de parâmetros deve ser desenvolvido. Na Figura 2.4-4 está demonstrada uma típica junta soldada por laser.

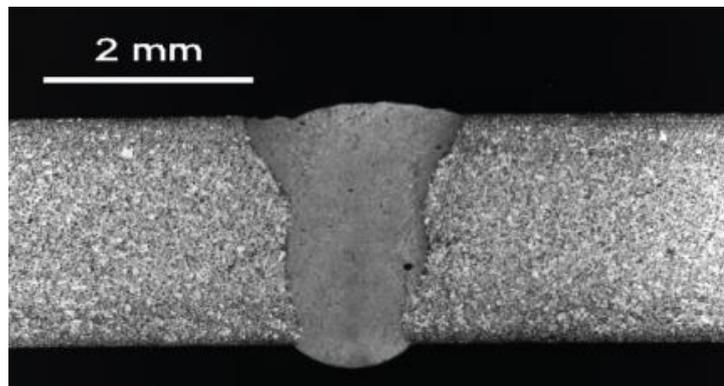


Figura 2.4-4 Típica macroestrutura de uma junta soldada por laser
 Fonte: (GOMES, 2017)

2.4.3 União por difusão

União por difusão (*Diffusion Bonding*) é um método de união no estado sólido. A junta a ser soldada pode ser aquecida por radiação, indução ou resistência elétrica em uma atmosfera controlada ou em vácuo (STEPHENSON, 1991). Após o aquecimento,

é aplicada uma pressão constante até unir as juntas. O princípio do mecanismo de união da junta desse processo é a difusão do material. Esse método é utilizado na indústria nuclear e aeroespacial (STEPHENSON, 1991).

Na Figura 2.4-5 está demonstrada as etapas de união do material, onde em:

- a) representa o início do processo quando as faces das juntas entram em contato;
- b) tem-se o aquecimento e a pressão causando uma deformação plástica do material, reduzindo os vazios interfaciais;
- c) o início do processo de difusão atômica entre os materiais;
- d) o processo de difusão intenso para a formação da junta; e,
- e) o final do processo. (O'BRIEN; SOCIETY, 2010).

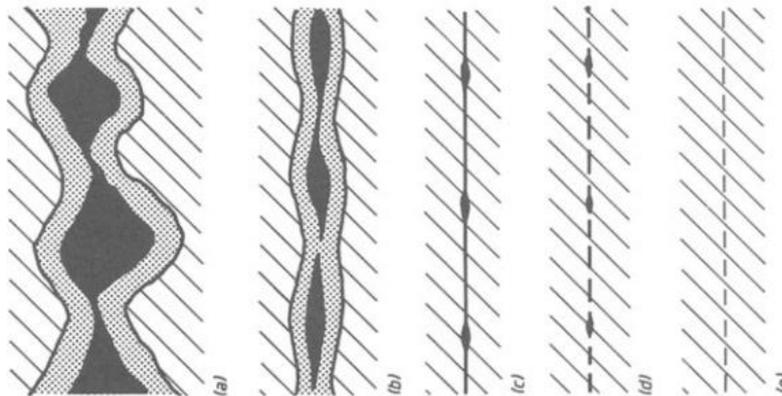


Figura 2.4-5 Mecanismo de união por difusão
Fonte: (STEPHENSON, 1991)

O equipamento para a realização da solda por difusão tem que garantir uma temperatura sobre uma determinada pressão em uma atmosfera controlada. Para esse tipo de união normalmente são utilizados fornos adaptados com prensas interna, demonstrado na Figura 2.4-6.



Figura 2.4-6 Exemplos de fornos para soldagem por difusão
Fonte: (GIETZELT; TOTH; HUELL, 2016)

Esse processo tem como vantagens a possibilidade de soldar vários tipos de materiais dissimilares e não causar distorção na junta. Outras características positivas são: possibilidades unir geometrias extremamente complexas e a resistência mecânica da solda é próxima do material base (STEPHENSON, 1991) (O'BRIEN; SOCIETY, 2010). As principais desvantagens desse processo estão relacionadas com custo e preparação da solda onde necessita uma superfície limpa e com uma rugosidade controlada. Esse fator torna o processo mais oneroso ao ser aplicado em um meio fabril (O'BRIEN; SOCIETY, 2010).

Na Figura 2.4-7 está demonstrada uma união de alumínio AA7075 unida por difusão. A linha de união é pouco perceptível além de não apresentarem zona afetada pelo calor e zona termomecânica afetada.

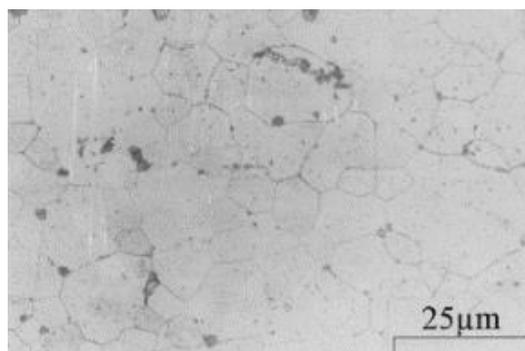


Figura 2.4-7 Microestrutura da liga de alumínio AA7075 de uma junta soldada por difusão
Fonte:(HUANG *et al.*, 1999)

2.4.4 Soldagem por fricção e mistura mecânica

Soldagem por fricção e mistura mecânica (*Friction Stir Welding*) é um processo de soldagem no estado sólido, onde uma ferramenta rotatória com movimento de translação se movimenta diante da junta realizando o cordão de solda. O aquecimento localizado pela fricção e a deformação plástica coalesce o material base permitindo que a ferramenta faça sua mistura e consolide a solda (COLLIGAN, 2009). Na Figura 2.4-8 está demonstrado os aspectos da solda por fricção e mistura mecânica.

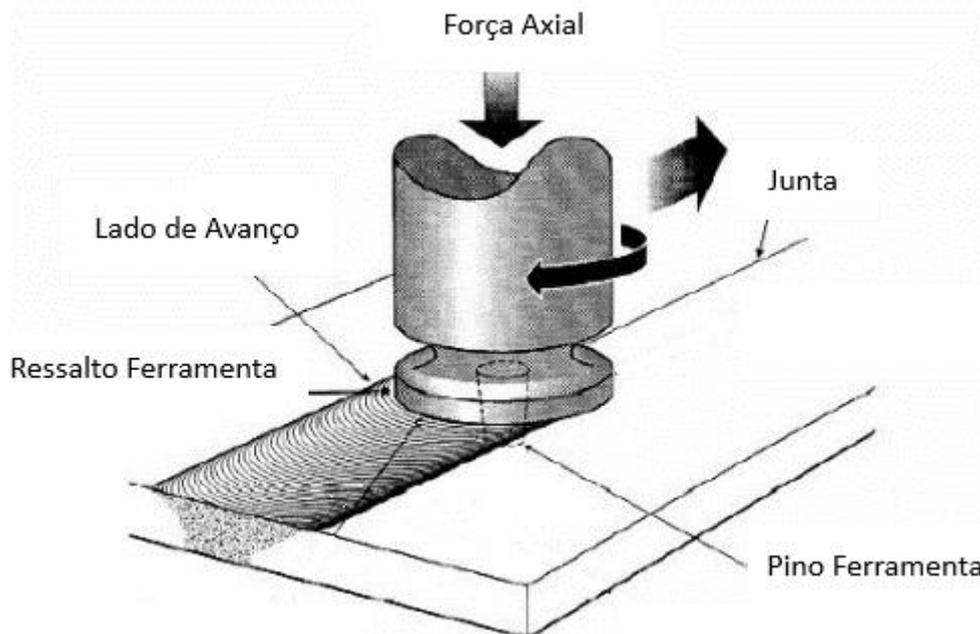


Figura 2.4-8 Desenho esquemático de processo soldagem por mistura mecânica por fricção (adaptado pelo autor)

Fonte: (Thomas et al., 2006)

Esse método apresenta como vantagens uniões com resistência mecânica próxima a do material base, alta reprodutibilidade, não emite radiação e não estão suscetíveis a defeitos relacionados a solidificação, como porosidades e trincas. Além disso, é um processo sustentável pois tem baixo consumo de energia para realização da união da junta (MISHRA; MA, 2005). As desvantagens do processo são: desgaste de ferramental, altas forças axiais e baixas velocidades de soldagem (O'BRIEN; SOCIETY, 2010). Atualmente se encontra no mercado além dos equipamentos de FSW, cabeçotes de adaptação para fresadoras CNC, reduzindo o investimento inicial (STIRWELD, [s. d.]). Devido suas características, esse método está sendo amplamente utilizado pela indústria aeroespacial, marinha e ferroviária (MISHRA; KUMAR, 2014).

Nesse processo as juntas são produzidas por um complexo fluxo de material e calor de fricção, deste modo a escolha dos parâmetros é determinante para uma solda de qualidade. Os parâmetros de soldagem por fricção e mistura mecânica são:

- velocidade de avanço;
- rotação;
- força vertical de forjamento;
- ângulo de inclinação da ferramenta;
- penetração da ferramenta; e,
- geometria de ferramenta.

A velocidade de avanço é a distância percorrida pela solda em um determinado período. Esse parâmetro está diretamente relacionado com a produtividade do processo, sendo um fator relevante nas aplicações industriais. A velocidade de avanço influencia no fluxo do material processado para a frente da ferramenta e também está implicada no aporte térmico da solda. Conforme observado em estudos, quanto maior a velocidade menor será a taxa de aquecimento (MISHRA; MA, 2005; OLIVIECKI; BESKOW, 2013). A velocidade de rotação da ferramenta é o principal parâmetro para a geração de calor da solda e é responsável pela mistura do material. A força vertical de forjamento tem influências no aporte térmico do processo na qual elevadas forças podem causar rebarba e perda de espessura na junta (OLIVIECKI; BESKOW, 2013). Na Tabela 2.4-1 estão demonstrados alguns resultados obtidos em trabalhos realizados com ligas de alumínio fundido, onde se pode destacar a velocidade de avanço de 500 mm/min com uma liga de alumínio similar a AlSi9Cu3, apresentada por (KIM, 2006).

Tabela 2.4-1 Parâmetros apresentados pela literatura para alumínio fundido

Referência	Liga	Espessura		Rotação (RPM)	Velocidade (mm/min)
		Chapa (mm)			
(MARICHAMY; BABU, 2021)	A319	6		1000	22
				1200	40
				1400	75
(PAVOL; MARTIN; PETER, 2020)	EM 573-3	3		1500	1000
				1500	1400
(PIETRAS; RAMS, 2016)	AK9	6		224	450
				224	900
(KIM, 2006)	ADC12	3,5		1500	500
(KUMAR MAURYA <i>et al.</i> , 2022)	A319	6		1000	48
				1200	48
				1200	72
				1200	96
(PAN; LADOS, 2017)	A356	18		1000	120
				800	180
	A319			1000	120
				800	120
	A390			1000	10,2
				1000	15

Fonte: Elaborado pelo autor

Outro fator relevante para a produção por soldagem por fricção e mistura mecânica está relacionado com as características da ferramenta de fricção. Essas ferramentas consistem basicamente em duas partes: pino e ombro.

O pino tem a função de penetrar o material, realizar a “mistura” e gerar um fluxo de material na direção transversal. Com esse princípio se desenvolveram vários tipos de geometrias de pinos para melhorar o fluxo, na qual podem ser destacados:

- a. Pino cilíndrico com fundo redondo, onde pode diminuir o desgaste da ferramenta e melhora a qualidade da solda;

- b. Pino cilíndrico com fundo plano, que é um modelo de fácil produção; e,
- c. Cone truncado, que é utilizado para juntas com maior espessura pois as forças transversais são menores quando comparado com pino cilíndrico. (MEILINGER; TOROK, 2013)

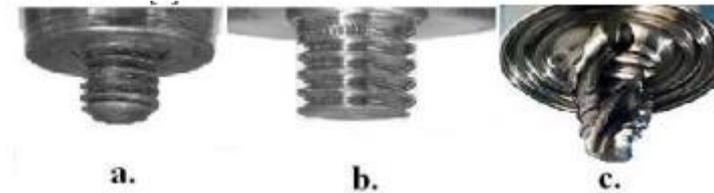


Figura 2.4-9 Alguns tipos de pino de ferramenta FSW (adaptado pelo autor)
 Fonte: (MEILINGER; TOROK, 2013)

O ombro é desenvolvido focado no fluxo de material na superfície da junta e, principalmente, no aporte térmico da solda. Normalmente apresenta 3 tipos de geometrias: côncavo, convexo e plano. O ombro concavo tem como característica alojar o material deformado na parte concava na penetração, para ser usado durante o processo. No caso do ombro convexo o material é deslocado para fora do pino, e é mais utilizado quando tem diferença de espessura entre as chapas a ser soldadas. Os ombros planos tem suas características de acordo com as ranhuras ou roscas, que podem aumentar o atrito da ferramenta com a superfície de contato (MEILINGER; TOROK, 2013), conforme Figura 2.4-10.

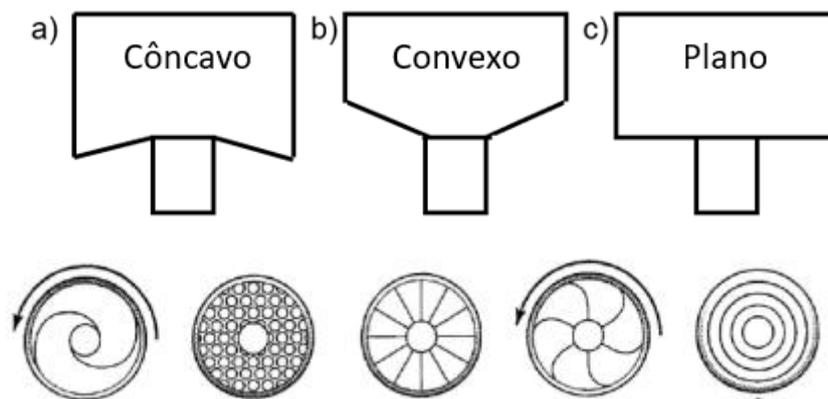


Figura 2.4-10 Desenho esquemático geometria de ombros e diferentes ranhuras na base do mesmo (adaptado pelo autor).
 Fonte: (MISHRA; KUMAR, 2014).

A Figura 2.4-11 mostra uma típica junta soldada pelo método de soldagem por fricção e mistura mecânica. A zona de soldagem pode ser dividida em 4 zonas microestruturais, distinguidas pelos seus ciclos termomecânicos ocorridos durante

processo de soldagem. A denominação dessas regiões são zona de mistura (ZM), zona térmica mecânica afetada (ZTMA), zona afetada pelo calor (ZAC) e material base (MB) (DOS SANTOS, 2009).

A ZM é a região onde passa o pino da ferramenta de soldagem, onde encontra-se os maiores picos de taxa de deformação e temperatura. Nos estudos de (HEIDARZADEH, 2021) a temperatura nessa região pode até chegar 90% da temperatura de fusão da liga e as taxas de deformação maiores 10^{-2} s. Com esse regime agressivo de temperatura e taxas de deformação, ocorre a recristalização dinâmica do material, modo dominante do desenvolvimento da nova microestrutura durante o processo de soldagem, produzindo uma microestrutura com grãos refinados, comparado com o material base, e equiaxiais. Tem indícios desse fenômeno, de recristalização dinâmica, nos estudos de (MISHRA, MA, 2005), demonstrou uma redução considerada nos deslocamentos de densidades de discordâncias na ZM. Os níveis de dureza do material endurecido por precipitação são geralmente menores do que o material base (DOS SANTOS, 2009).

A TMAZ é a região adjacente a ZM, onde ocorre uma deformação menos severa do que ZM e temperaturas menores. A temperatura nessa região pode chegar a 70% da temperatura de fusão do material base e mesmo com taxas deformações menores muda a microestrutura da região (HEIDARZADEH, 2021). Essa região é caracterizada por uma microestrutura parcialmente recristalizada, devido ao menor temperatura e taxa de deformação gera-se duas frentes de recristalização nucleação de novos grãos e crescimento de grãos (HEIDARZADEH, 2021) (DOS SANTOS, 2009). Para ligas de alumínio endurecidas por precipitação essa região é que obtém menores níveis de dureza, pois ocorre a dissolução dos precipitados (DOS SANTOS, 2009).

A ZAC é a região que apenas o ciclo térmico influencia na microestrutura e propriedades mecânica da soldagem. A microestrutura resultante é parecida com o a material base. Essa região geralmente ocorre um crescimento de precipitados em ligas endurecidas por precipitação (DOS SANTOS, 2009).

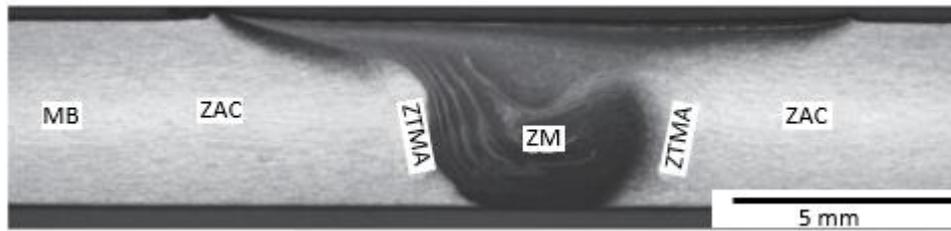


Figura 2.4-11 Típica macroestrutura de uma junta de uma liga alumínio AlMgSc soldada por fricção (adaptado pelo autor)
Fonte: (DOS SANTOS, 2009)

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foram avaliados qualitativamente 4 métodos de união buscando um processo com as melhores características para substituir o método de selagem. Com o resultado do melhor processo, foram realizados testes de bancada onde contou com a preparação dos dispositivos necessários e o processamento de uniões. A liga estudada nesse trabalho é AlSi9Cu3, pois é a liga de fabricação dos cilindros. As uniões foram submetidas a inspeção visual, análise macroscópica e microscópica. A melhor união foi submetida ao teste de microdureza Vickers. Na Figura 3.1 está demonstrado o fluxograma predefinido.

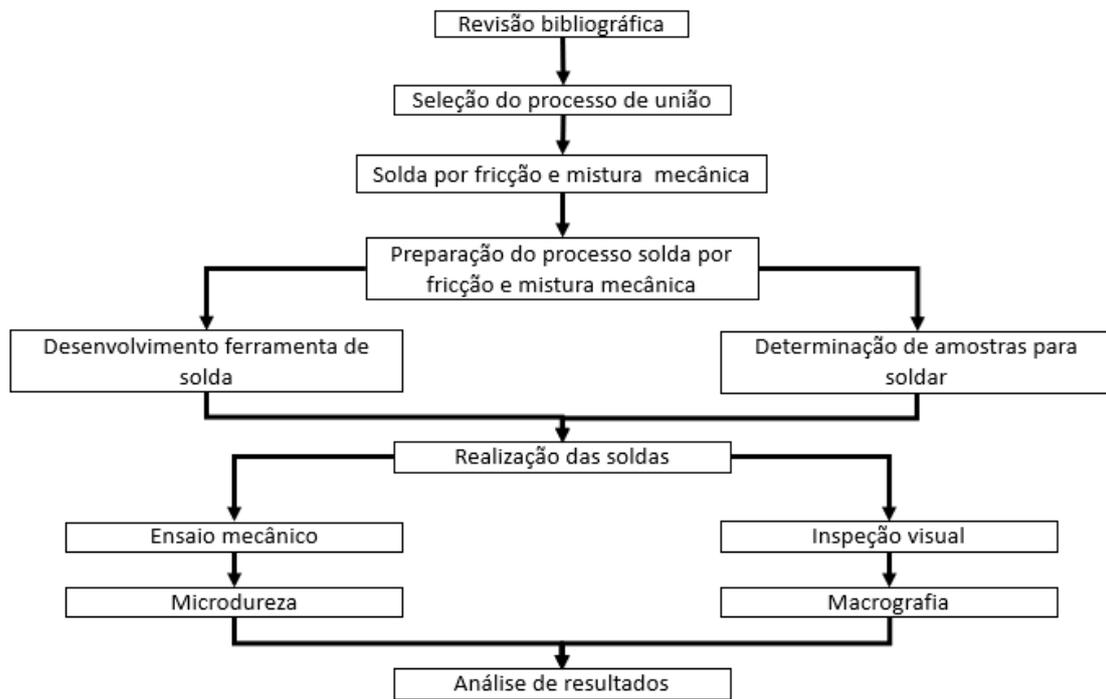


Figura 3.1 Fluxograma do estudo
Fonte: Elaborado pelo autor

3.1 Materiais

Neste trabalho foram utilizadas chapas fundidas com dimensões de 100 mm de comprimento, 25 mm de largura e 3,5 mm de espessura da liga de alumínio AlSi9Cu3, sua composição química e dimensões podem ser observadas na Tabela 3.1-1 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** **Erro! Fonte de referência não encontrada.** **Erro! Fonte de referência não encontrada.** respectivamente. As juntas foram produzidas com extensão de linha de solda de 50 mm.

Tabela 3.1-1 Composição química AlSi9Cu3

Elemento	Si	Cu	Mn	Fe	Mg	Ni	Zn	Al
%Massa	11,50	3,310	0,192	0,830	0,146	0,207	0,860	Residual

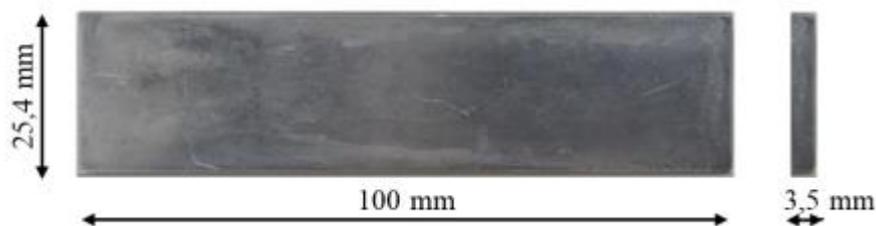


Figura 3.1-1 Chapas de alumínio AlSi9Cu3

3.2 Método qualitativo de comparação entre os processos

Nesta pesquisa utilizou-se um método qualitativo para comparar os processos elegidos. Foram avaliados quatro processos de soldagem:

- soldagem por fricção e mistura mecânica;
- soldagem por ultrassom;
- soldagem laser; e,
- união por difusão.

Para cada processo forma avaliados seis temas de maior relevância com pontuação de 1 a 5, considerando 1 como a melhor situação e 5 a pior. Como resultado, foi realizada a média aritmética de cada processo sendo a menor média o critério de escolha. Os seis temas foram:

- investimento inicial;

- sustentabilidade;
- custo por união de tampa;
- velocidade do processo de união;
- geometrias complexas, e;
- soldabilidade alumínio.

O critério de avaliação foi direcionado para substituir o método de selagem usado na união da tampa de cilindro de motores de combustão interna produzidos em alumínio fundido da liga AlSi9Cu3 com um comprimento de união tem 500 mm, conforme Figura 3.2-1.

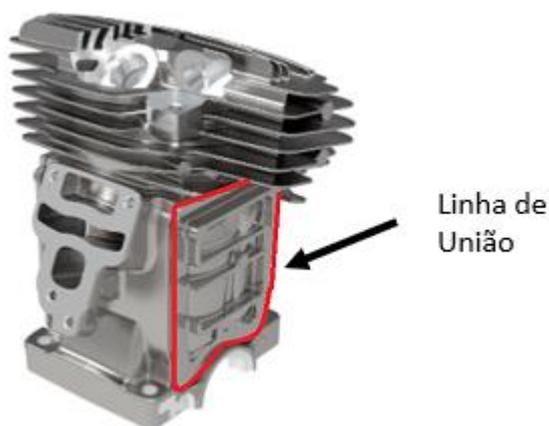


Figura 3.2-1 Cilindro utilizado para avaliar os processos de união

3.3 Análise de redução de custo

O método para avaliar uma possível redução de custo no processo de união de tampas pelo método de selagem baseou-se numa estimativa do consumo total de selante para a produção de 2023. Esse valor foi comparado com uma estimativa do custo total para um mesmo volume de produção usando o processo de solda por fricção e mistura mecânica, onde os principais custos variáveis diretos foram: número de ferramentas e energia elétrica de consumo.

3.4 Ferramenta de soldagem por fricção

Para a produção da ferramenta utilizou-se um perfil cilíndrico de aço AISI H13 de composição química, conforme a Tabela 3.4-1. Foi usinado um pino de geometria lisa

de formato cilíndrico de diâmetro 3 mm e um ressalto de 12 mm de diâmetro com ombro plano, conforme a Figura 3.4-1.

O tratamento térmico realizado na ferramenta foi de têmpera e revenido. Foi realizado um patamar de 500 °C por 30 min seguido de um aumento à temperatura de 1020 °C. Após 1 hora de patamar a ferramenta foi resfriada ao ar forçado até a temperatura de 100 °C. Após isso foram realizados dois tratamentos de revenimentos por 1,5 h à temperatura de 550 °C.

Tabela 3.4-1 Composição química aço H13

Elemento	Cr	Mo	Si	V	C	Ni	Cu	Fe
%Massa	4,75- 5,50	1,10- 1,75	0,80- 1,20	0,80- 1,20	0,32- 0,45	0,30	0,25	Residual

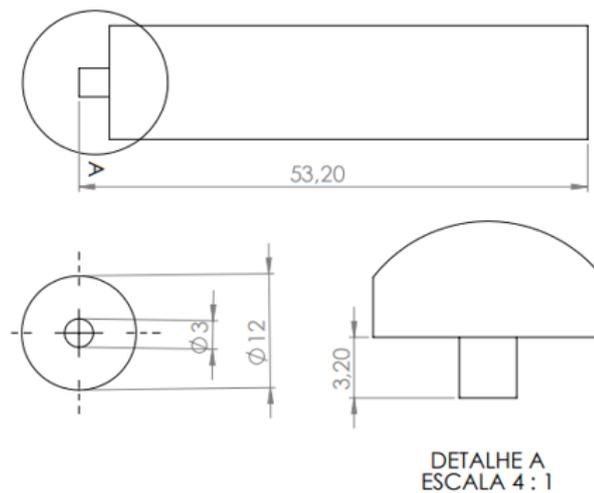


Figura 3.4-1 Desenho CAD ferramenta de soldagem

3.5 Procedimento de soldagem

As soldas foram realizadas em uma fresadora com liberdade em 3 eixos com sistema automático de velocidade de avanço e monitoramento de rotação, com máximas de 700 mm/min e 3000 RPM respectivamente. Para a fixação das chapas foi usado sistema mecânico por parafusos. Na Figura 3.5-1 Figura 3.5-1 está demonstrada a ferramenta e o sistema de fixação das chapas.



Figura 3.5-1 Sistema de fixação e bancada de soldagem

3.6 Parâmetros de processo

Os parâmetros de soldas utilizados estão demonstrados na Tabela 3.6-1, baseados no estudo de (KIM, 2006).

Tabela 3.6-1 Parâmetros de soldagem

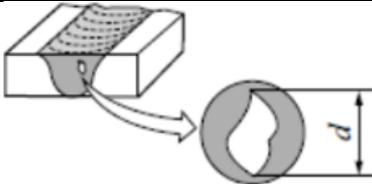
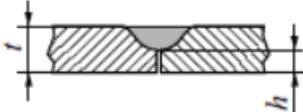
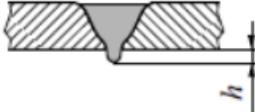
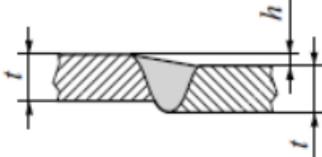
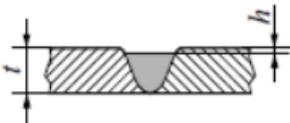
Amostra	Velocidade de Avanço (mm/min)	RPM	Penetração (mm)
SC-04	90	1800	3
SC-05	120	1800	3
SC-06	250	1800	3
SC-07	600	1800	3
SC-08	640	1000	3
SC-09	270	1000	3
SC-10	445	1000	3
SC-11	120	1000	3
SC-12	225	1500	3
SC-13	243	1500	3,3
SC-14	400	1500	3,3

SC-15	230	1000	3,3
SC-16	410	1000	3,3

3.7 Inspeção visual

A inspeção visual foi realizada em todas as soldas avaliando a presença de defeitos seguindo a ISO 25239-5 (STANDARD, 2020) conforme a Tabela 2.3-1 Tabela 3.7-1.

Tabela 3.7-1 Defeitos conforme ISO 25239-4

Defeito	Imagem	Teste conforme a ISO 25239-4	Aceitável
Cavidade		Avaliação Macroscópico	$d \leq 0,2s^*$ ou 4mm, qual for menor
Falta de penetração		Avaliação Macroscópico	Não permitido
Excesso de Penetração		Avaliação Macroscópico	$h \leq 3 \text{ mm}$
Rebarba		Avaliação Macroscópico	Conforme o projeto
Desalinhamento		Avaliação Macroscópico	$h \leq 0,2t$ ou 2mm, qual for menor
Falta de Preenchimento		Avaliação Macroscópico	$h \leq 0,2\text{mm} + 0,1t$ para $t \geq 2\text{mm}$ 2mm: $h \leq 0,15t$ para $t < 2\text{mm}$

*s = a espessura da chapa na solda.

3.8 Análise microestrutura

A análise microestrutura foi realizada a 25 mm do início da solda. Os corpos de provas foram preparados com lixas d'água de granulometria de 220, 400, 600, 1200 e

2500 grãos por polegada. Após isso, foram polidos com alumina 1 μm e atacados em solução de ácido fluorídrico de 2 % por 10 segundo.

3.9 Microscopia ótica

Os corpos de provas foram analisados por microscopia ótica usando as recomendações técnicas da ISO 25239-5 (STANDARD, 2020) para procedimentos de confecções de amostra e análise. Utilizou-se microscópio digital para identificar as regiões de interesse e o software de processamento de imagem *Image J* para as análises das imagens.

3.10 Ensaio de microdureza

As medições de microdureza foram realizadas usando endentações Vickers de 0,2 Kgf de carregamento. Como procedimento adotado, foi realizado um perfil a 1,75 mm da superfície da chapa e com endentações distanciadas 0,5 mm entre si. Esse teste foi aplicado na melhor união produzida.

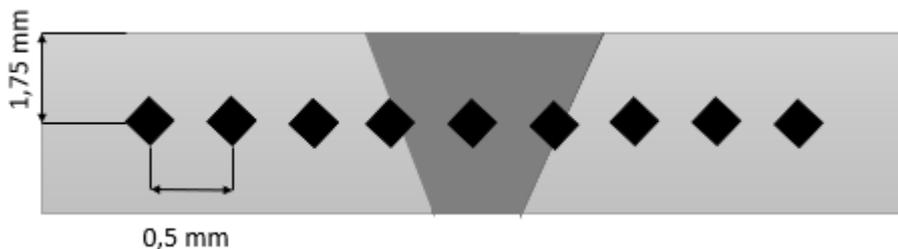


Figura 3.10-1 Posições de endentações de microdureza

Fonte: Elaborado pelo autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resultado qualitativo dos métodos de união

Conforme os estudos realizados com base em referências bibliográficas e critérios dos processos, cada tema foi qualificado conforme o descrito abaixo e sua devida pontuação está demonstrada na Tabela 4.1-1.

Investimento inicial: Para processo de soldagem por fricção e mistura mecânica, a empresa *Stirweld* oferece máquinas de FSW com um valor entre R\$ 3.400.000,00 e R\$ 56.000.000,00. Outra tecnologia oferecida pela *Stirweld* é um cabeçote para fresadoras, que possibilita uma fresadora com controle CNC para realizar as soldas, com um valor a partir de R\$ 560.000,00 (STIRWELD, [s. d.]), sendo está uma possibilidade mais econômica para introduzir este método. O investimento inicial para aquisição do equipamento para a realização da união pelo processo de soldagem por ultrassom é entre R\$ 92.000,00 a R\$ 231.000,00 para equipamentos de soldagem para plásticos e folhas de alumínio segundo (WEBER, 2003). O processo de soldagem a laser conforme o trabalho de (JUNIOR; RAMAHLO, 2018) o investimento para a compra de uma máquina é próximo de R\$ 20.500.000,00.

Com base nessas informações, a soldagem por ultrassom tem o menor investimento inicial, com uma menor pontuação, estimado em 1, seguido pela soldagem por fricção e mistura mecânica, pontuação de 2, e soldagem laser com pontuação de 3. Não foi encontrado valores de equipamentos para o método de união por difusão, por esse motivo recebeu a nota mais alta 5.

Sustentabilidade: A soldagem por fricção e mistura mecânica e soldagem por ultrassom comparando com outros métodos de soldagem são considerados processos sustentáveis, pois o consumo de energia elétrica para realizar uniões é relativamente baixo. Diferente dos processos de soldagem laser que necessita uma alta densidade de energia, além disso o processo de soldagem a laser emite fumos e radiação que são prejudiciais ao meio ambiente e ao operador. Além disso, o método de união por difusão tem uma demanda de um alto consumo de energia elétrica para manter os fornos aquecidos e com a atmosfera controlada (SHIRZADI, 2005).

Desta forma os processos de soldagem por fricção e mistura mecânica e soldagem por ultrassom foram pontuados com o valor mínimo. O processo de soldagem laser foi pontuado com 3 e a soldagem por difusão com 4.

Custo por União: Os processos de soldagem por fricção e mistura mecânica e soldagem por ultrassom têm o custo por união menores, pois o consumo de energia para a realização da soldagem é relativamente baixo e teoricamente não tem itens consumíveis no processo, diminuindo o custo da junta. No entanto, é necessário mais tempo para realizar a soldagem por fricção e mistura mecânica do que a soldagem por ultrassom, aumentando o custo de união pela mão de obra. O custo da união da soldagem laser é composto, pelo consumo de energia e gases de proteção utilizados na soldagem que elevam o valor do custo (JUNIOR; RAMAHLO, 2018). O processo de união por difusão tem o custo mais elevado por união, demanda energética alta para manter os fornos em temperaturas elevadas e atmosfera controlada, por tempo de 1h até 2h (SHIRZADI, 2005).

Concluiu-se que os valores do processo de soldagem por fricção e mistura mecânica e soldagem por ultrassom têm os menores valores por custo por junta, com uma pontuação de 2 e 1 respectivamente. A soldagem laser entre os métodos pesquisados está na média obtendo a pontuação de 3 e o processo de união por difusão obteve a nota máxima elegida como o processo mais oneroso.

Produtividade: O principal parâmetro para a produtividade do método seria a velocidade que é realizada a união. Na soldagem por fricção e mistura mecânica, a velocidade de avanço é ajustável. No estudo do (PAVOL; MARTIN; PETER, 2020) a velocidade máxima alcançada foi de 1400 mm/min. Nesse caso, para produzir 500 mm de cordão de soldagem por fricção seria necessário 22 segundo. A soldagem por ultrassom a ordem de velocidade é de 1s para a realização da soldagem, sendo o método mais rápido de todos para a produção das uniões (O'BRIEN; SOCIETY, 2010). Já a soldagem a laser, experimentos mostraram que é possível unir com velocidade de 127 mm/min (WALSH, 2002). Desse modo, a velocidade é relativamente menor do que pelo processo de soldagem por fricção e mistura mecânica. O método de soldagem por difusão o tempo de soldagem é de 1 hora até 2 horas conforme o (O'BRIEN; SOCIETY, 2010).

Dessa maneira, a soldagem que obteria a maior produtividade seria a soldagem por ultrassom, considerando apenas o tempo para união das juntas, assim sua pontuação foi de 1, seguido pela soldagem por fricção e mistura mecânica que também pode produzir estas juntas na ordem dos segundos. Já a soldagem laser é mais lenta podendo variar minutos, dessa maneira recebendo a pontuação 3. E o método mais lento é a soldagem por difusão que está na ordem de horas, recebendo a nota 5.

Geometria Complexa: A união do cilindro com a tampa é uma geometria complexa de soldagem, por não ser uma soldagem linear tem que fazer mudanças de direções para realizar o contorno da tampa. Neste caso, o método de soldagem por fricção e mistura mecânica, soldagem por ultrassom e soldagem laser necessitam de uma ferramenta de soldagem para acessar a região da junta. Já o método de união por difusão tem maior facilidade no acesso para realizar a junta pois não necessita de uma ferramenta de soldagem. Entre esses três processos, a soldagem laser tem vantagem pois o laser não necessita fazer contato com a junta, conseguindo ter um acesso mais fácil a mesma. No entanto, o método de soldagem por fricção e mistura mecânica e soldagem por ultrassom, a ferramenta de soldagem e o sonotrodo necessitam encostar na região da junta, dessa maneira, geometrias complexas podem dificultar o acesso das ferramentas a junta. Contudo, a soldagem por fricção e mistura mecânica têm vantagem, quando comparado com soldagem por ultrassom, pois tem uma ferramenta menos robusta, facilitando o acesso a junta.

Baseado nessas condições a soldagem por fricção e mistura mecânica foi eligida com a pontuação 3, devido ao acesso da ferramenta mais difícil, porém tem a versatilidade de testar ombros com diâmetros menores adequando-o a geometria da ferramenta para a realização da soldagem. A soldagem por ultrassom obteve a pontuação máxima devido a necessidade uma ferramenta muito robusta para realizar a união, dessa maneira dificultando o acesso recebendo a nota 5, isso ocorre pois é necessário um sonotrodo robusto que suporte a vibração e não fracture. A soldagem laser tem maior facilidade para realizar a junta por questões de processo, foi eligida como nota 2. O método que tem melhor pontuação é soldagem por difusão pois não é necessário a utilização de ferramenta, dessa maneira sua nota foi 1.

Soldabilidade alumínio: A soldagem por fricção e mistura mecânica, soldagem por ultrassom e união por difusão são métodos de união por estado sólido. Para a união de alumínio a união por estado sólido tem vantagem, pois não geram defeitos inerentes a fusão, por exemplo, porosidade e trincas (HAN et al., 2020). Diferente da soldagem a laser que é um método que funde o alumínio para realizar a união. Soldagem por ultrassom possui uma desvantagem neste aspecto, pois não tem estudos sobre chapas com espessura mais de 3mm. Nesse caso as soldas frias têm a melhor nota, pontuando 1, pois não tem defeitos inerentes a fusão. A soldagem por ultrassom recebe o ponto 3, pois não

sabe se é possível soldar espessuras maior que 3 mm. E o caso da soldagem laser obteve a nota 5 pois tem os problemas inerentes a fusão.

A comparação qualitativa resultou que o melhor método é o de soldagem por fricção e mistura mecânica que obteve a menor média dentre os processos escolhidos. No entanto, soldagem por ultrassom mostra ser uma tecnologia interessante para a união de tampas, pois atingiu uma pontuação próxima a processo soldagem por fricção.

Tabela 4.1-1 Quadro comparativo entre os métodos

	Soldagem por fricção e mistura mecânica	Soldagem por ultrassom	Soldagem laser	Soldagem por difusão
Investimento Inicial	2	1	3	5
Sustentabilidade	1	1	3	4
Custo por União	2	1	3	5
Produtividade	2	1	4	5
Geometria Complexa	3	5	2	1
Soldabilidade Alumínio	1	3	5	1
Média	1,8	2	3,3	3,3

4.2 Ferramenta de soldagem

A ferramenta de soldagem suportou os esforços impostos pela realização da solda, onde na **Erro! Fonte de referência não encontrada. Erro! Fonte de referência não encontrada.** está demonstrada a ferramenta fabricada e utilizada para as soldas. As dimensões de resalto reduzidos conseguiu inserir a taxa de aquecimento necessária para ocorrer a solda. O perfil do pino cilíndrico proporcionou o fluxo de material adequado sem a necessidade de uma geometria especial.

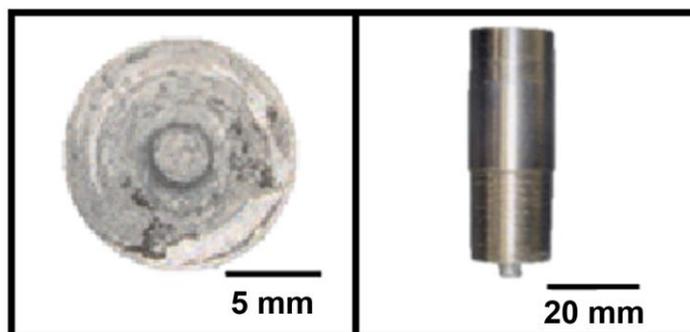


Figura 4.2-1 Ferramenta de soldagem desenvolvida após soldagem das amostras

4.3 Avaliação superficial

Os resultados da avaliação superficial de cada união estão demonstrados na Tabela 4.3-1. As soldas SC-13 a SC-16 apresentaram preenchimento completo, no entanto, demonstraram mais rebarba devido a maior penetração e deslocamento de material. Além disso foi evidenciado que rotações baixas, 1000 RPM, os parâmetros são mais suscetíveis a falta de preenchimento.

Tabela 4.3-1 Parâmetros de soldagem

Amostra	Velocidade Avanço (mm/min)	Rotação (RPM)	Penetração (mm)	Defeito
SC-04	90	1800	3	Rebarba
SC-05	120	1800	3	Rebarba
SC-06	250	1800	3	Rebarba
SC-07	600	1800	3	Falta de preenchimento
SC-08	640	1000	3	Falta de preenchimento
SC-09	270	1000	3	Falta de preenchimento
SC-10	445	1000	3	Falta de preenchimento
SC-11	120	1000	3	Falta de preenchimento
SC-12	225	1500	3	Falta de preenchimento
SC-13	243	1500	3,3	Rebarba
SC-14	400	1500	3,3	Rebarba
SC-15	230	1000	3,3	Rebarba
SC-16	410	1000	3,3	Rebarba

Com os parâmetros aplicados na produção da amostra SC-16 foi gerado uma qualidade superficial desejável para ser aplicado na união da tampa podendo ser usada como acabamento final do produto. Na Figura 4.3-1 está demonstrada a união SC-16 onde o lado de avanço não gerou rebarba na solda e o lado de retorno gerou uma pequena rebarba, porém, aceitável para o projeto que está sendo avaliado.

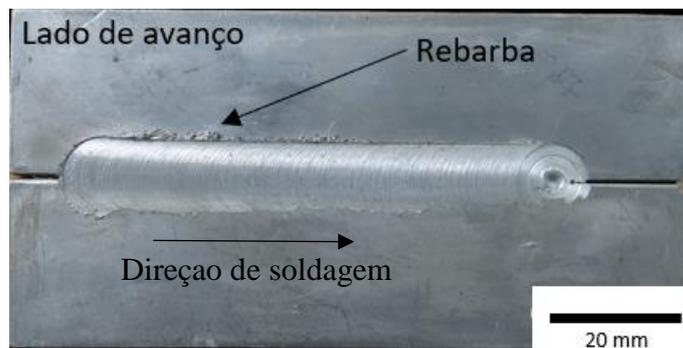


Figura 4.3-1 Superfície da amostra SC-16

4.4 Análise macroestrutural e microestrutural

A seção transversal da junta soldada está demonstrada na Figura 4.4-1 onde é possível identificar as regiões característica da soldagem por mistura mecânica por fricção. A ZM é a região onde o pino realiza a mistura do material. As amostras SC-7 e SC-10 não apresentaram formação de rebarba, no entanto, a amostra SC-7 mostra um desnivelamento na superfície. Nas amostras SC-15 e SC-16 lado de recuo da ferramenta obteve maior geração de rebarba. As avaliações da macroestrutura mostraram uma falta de nivelamento na força de forjamento na soldagem, gerando uma maior quantidade de cavaco no lado de recuo. As amostras SC-15 e SC-16 demonstram uma perda de espessura na região soldada de 0,25 mm e 0,24 mm respectivamente, assim mesmo estão dentro do aceitável conforme o recomendado pela norma (STANDARD, 2020).

As amostras SC-7 e SC-10, na Figura 4.4-1, apresentaram dois tipos de defeitos na ZM. O primeiro defeito é a falta de preenchimento de solda, não tendo profundidade suficiente para abranger toda a espessura da chapa. O segundo defeito é a formação de um túnel de vazio no lado de retrocesso. As amostras SC-15 e SC-16, respectivamente, mostraram que estes parâmetros produzem uniões de melhor qualidade de solda, com total união das juntas e sem a presença de túneis de vazios. No entanto, no centro da ZM foram encontradas cavidades. Na SC-15 a cavidade foi maior que o permitido especificado pela norma e na solda SC-16 está cavidade estava dentro do recomendado pela (STANDARD, 2020).

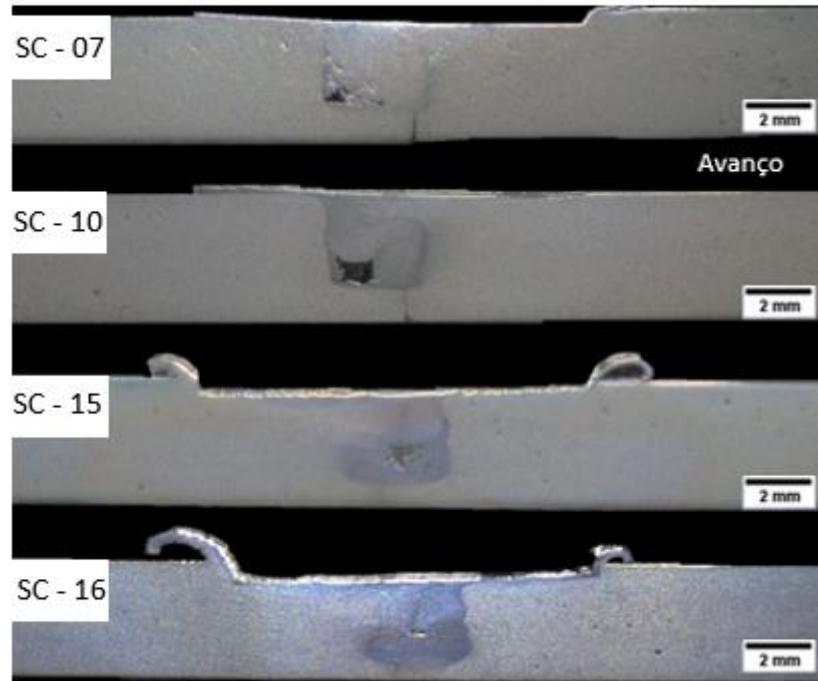


Figura 4.4-1 Macrografias da seção transversal das amostras: SC-07, SC-10, SC-15 e SC-16

A Figura 4.4-2, demonstra a microestrutura resultante na ZM. A amostra SC-7 soldada com velocidade de rotação 1800 RPM apresentando menor proporção de silício eutético (fase escura) disperso na matriz α quando comparada com as demais amostras processadas com 1000 RPM, mostrando o efeito da sobre a dispersão do silício eutético na matriz. O processo de fricção “quebra” as agulhas de dendritas de silício oriundas do processo de fundição, esferoidizando-as, e reorganiza os grãos de silício uniformemente na matriz. No estudo de (ALIDOKHT *et al.*, 2012) obteve o mesmo resultado na caracterização microestrutura da solda. Outra característica observada, foi a recuperação dinâmica do material. A grande energia de deformação imposta pela ferramenta promoveu a presença de grãos recristalizados de silício na ZM. Este efeito também foi observado no trabalho desenvolvido por (KIM, 2006).

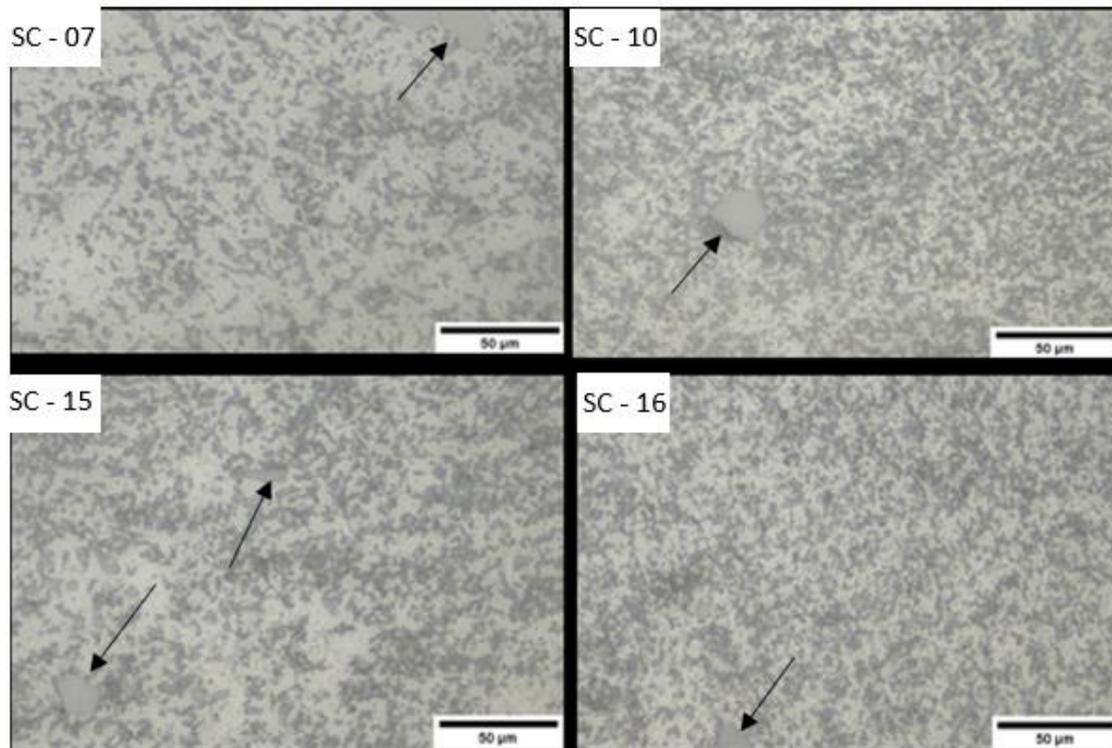


Figura 4.4-2 – Microestrutura da zona de mistura SC-7 SC-10 SC-15 e SC-16

Todas as uniões apresentaram uma redução na porosidade devido ao efeito do processo de fricção, conforme observado (MA; SHARMA; MISHRA, 2006). Na Figura 4.4-3, demonstra uma metalografia da amostra SC-16, que está a interface da ZM e do MB, onde é perceptível a redução da porosidade. Esse efeito é importante para um aumento na vida em fadiga pela diminuindo regiões com propensão a nucleação de trincas (JANA *et al.*, 2010).

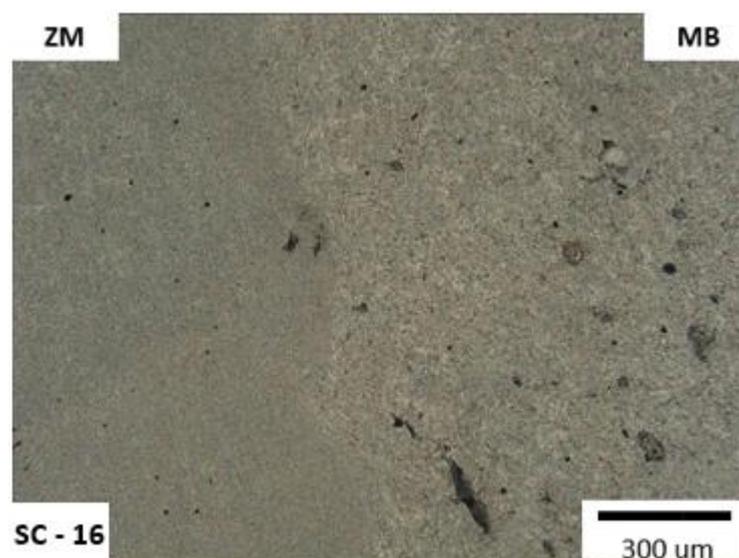


Figura 4.4-3 – Interface entre a ZM e MB da amostra SC-16

Na Figura 4.4-4 está demonstrada a interface entre a zona afetada pelo calor e a ZM. Quando compara as duas zonas é perceptível a mudança da morfologia do silício eutético, sendo a zona de mistura com grãos eferoidizados e disperso na matriz de alumínio α , e a zona afetada pelo calor o silício eutético com grãos maiores em formas de placas. No entanto, quando se compara as quatro amostras entre elas não é perceptível a diferença de morfologia da zona afetada pelo calor.

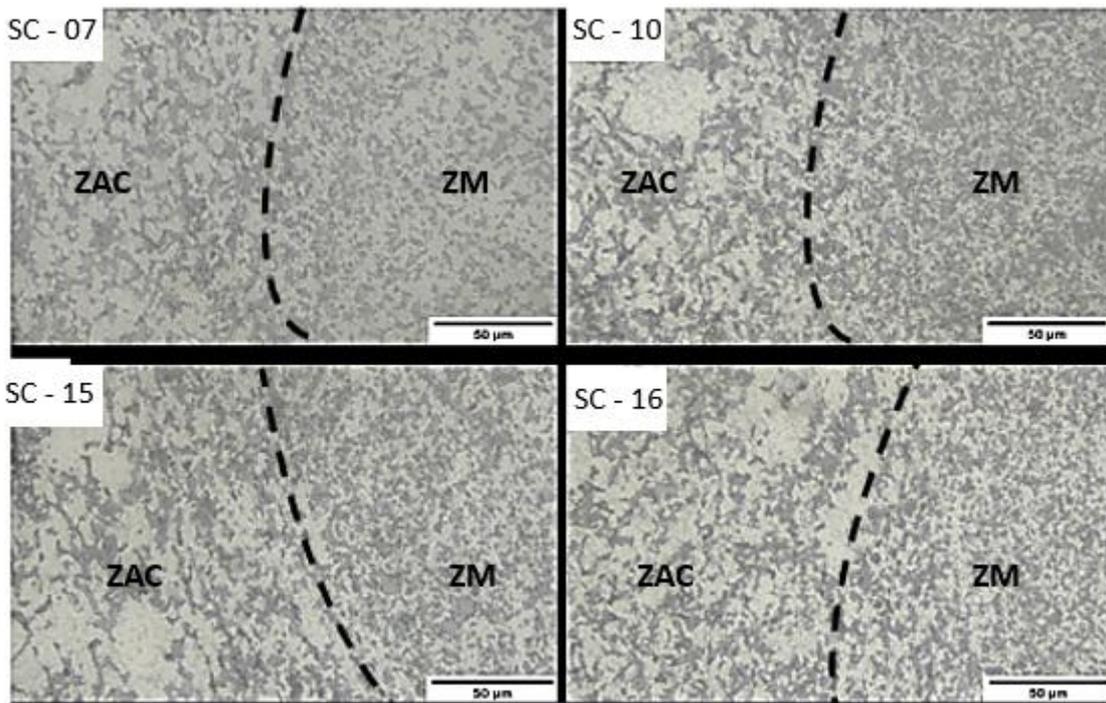


Figura 4.4-4 – Interface entre a zona afetada pelo calor e zona de mistura SC-07, SC-10, SC-15, SC-16

4.5 Ensaio de microdureza

O perfil de dureza da solda SC-16, demonstrado na Figura 4-5.1, demonstra uma dureza máxima de 118 $HV_{0,1}$ na zona de mistura e dureza mínima de 95 $HV_{0,1}$, na ZAC e no MB. Quando comparado esses resultados com o material base, onde a dureza máxima indicada foi de 109 $HV_{0,1}$, a zona de mistura teve um aumento de 15% com relação ao máximo de dureza encontrado no MB. A ZAC, identificou um patamar adjacente a zona de mistura onde obteve a dureza mínima 95 $HV_{0,1}$, contudo, quando se compara com o material base que, a dureza mínima identificada foi de 95 $HV_{0,1}$ não há diferença entre elas. O patamar de dureza identificado na ZAC ocorre porque o calor transferido para

aquela região coalesceu grãos e houve um crescimento de grão e um crescimento de precipitado.

O aumento da dureza da liga AlSi9Cu3 na zona de mistura ocorre devido uma distribuição mais uniforme e uma mudança na morfologia das partículas de silício. A distribuição dispersa e uniforme em pequenos grãos aumenta a dureza do material pelo mecanismo de endurecimento de solução sólida. Esse fenômeno ocorre pela deformação e aquecimento gerado pela ferramenta, ocasionando um rearranjo na microestrutura (MISHRA; KUMAR, 2014).

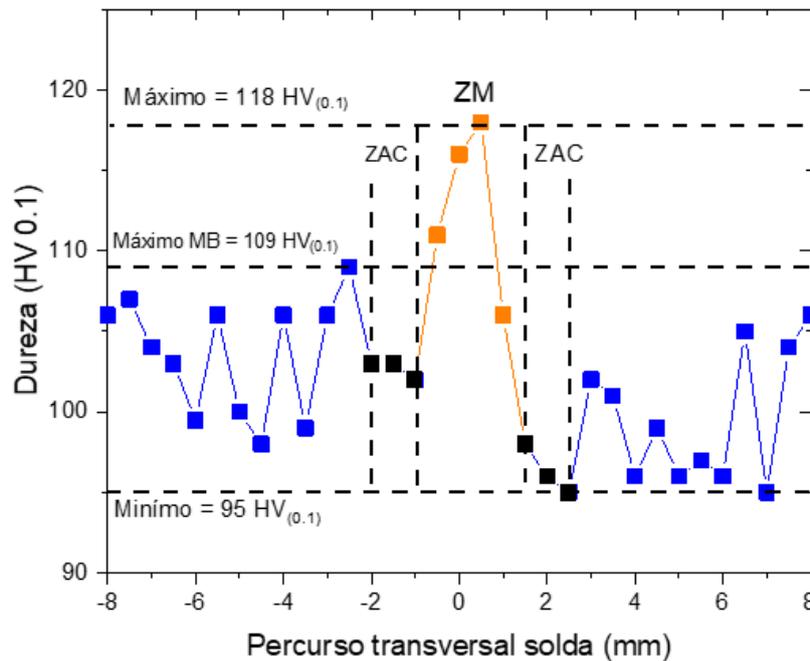


Figura 4.5-1 – Perfil de dureza da amostra SC-16

4.6 Redução de custo

Com a aplicação do método de soldagem por fricção e mistura mecânica na produção da união de cilindro com tampa foi demonstrado que é possível obter a mesma produtividade ou, até mesmo, ampliá-la com os parâmetros desenvolvidos e apresentados nesse trabalho. Sabe-se que para a aplicação industrial em grande escala esse fator é importante que proporcionar a viabilidade dessa inovação tecnológica.

Estimando o custo do selante baseado nos últimos anos de produção, e considerando os gastos com estocagem para a produção de 2023. Foi comparado com o custo variável usando o processo de soldagem por fricção e mistura mecânica estimando o consumo de 100 ferramentas para produção anual e gasto de energia baseado no estudo

do (BUFFA, 2017) que obteve uma potência 4000 Watt para a soldagem da liga de alumínio AA2024-T4, com chapa de 3 mm 1000 RPM velocidade de avanço 200 mm/min.

Pelo método de avaliação de custos variáveis diretos a redução de custo é expressiva, ao comparar o custo do processo de colagem com o custo do processo de soldagem por fricção e mistura mecânica estima-se uma redução de 97,51% nos custos variáveis diretos de produção. Essa avaliação é importante para viabilidade econômica e rentabilidade do processo, demonstrando que é uma tecnologia econômica e compatível com a produção atual dos cilindros.

5 CONCLUSÕES

Dentre os métodos pesquisados a soldagem por mistura mecânica por fricção obteve melhor viabilidade técnica e econômica para uma nova tecnologia de união de tampa de cilindros.

O estudo realizado demonstrou resultados satisfatórios para o processo de soldagem por mistura mecânica por fricção para a liga de alumínio fundida AlSi9Cu3. Essa afirmação é fundamentada a partir dos resultados de macrografia, ensaios mecânicos e inspeções visuais baseados na norma ISO 25239-4.

A partir das soldas realizadas mostrou que a ferramenta fabricada obteve a resistência mecânica necessária para realizar a solda. O diâmetro do ombro da ferramenta, para essa liga conseguiu alcançar o aporte térmico necessário para realizar a solda e a geometria do pino performou a função de misturar material.

As macrografias obtidas identificou na região da zona de mistura comparando a com material base, a diminuição da porosidade da liga. Outra característica identificada foi a quebra das placas de silício. Esses efeitos do processo de soldagem aumentam a resistência mecânica do material. S

O ensaio mecânico de dureza demonstrou que a liga de alumínio fundida teve um máximo de dureza de na região de mistura 118 HV_(0.1) devido ao rearranjo metalúrgico, diminuição da porosidade e quebra das placas de silício.

Quando comparado o custo do processo de soldagem por fricção e mistura mecânica com o processo atual de união de tampas. Com esse método se estima uma redução de custo variáveis diretos de 97,52%, sendo uma estratégia viável para a diminuição de custo.

Por conseguinte, a liga de AlSi9Cu3 ao ser unida pelo método de FSW obtém um ganho de resistência mecânica. Além de uma redução de custos variáveis diretos do processo. Desta forma, os resultados obtidos sustentam fortes indícios para substituição do processo de selagem pelo método de soldagem por fricção e mistura mecânica de tampas de cilindro.

6 TRABALHOS FUTUROS

O trabalho preliminar demonstrou que a solda por fricção e mistura mecânica é uma tecnologia promissora para união de tampa no cilindro. Para a implementação em escala industrial, os trabalhos futuros são a realização de solda em cilindros, testes de estanqueidade, estudo de otimização de parâmetros e ensaios mecânicos dinâmicos nos cilindros.

7 REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Anuário Estatístico Alumínio**. Associação Brasileira do Alumínio, 2022.
- ALIDOKHT, Sima Ahmad *et al.* **Evaluation of Microstructure and Wear Behavior of Friction Stir Processed Cast Aluminum Alloy**. *Materials Characterization*, p. 90–97, 2012
- AMERICAN SOCIETY METALS. **ASM Handbook Welding, Brazing and Soldering - Vol 6**. 6. ed. Ohio: 2000.
- AMERICAN SOCIETY METALS. **Introduction to Aluminum-Silicon**. 2004. v. 2, p. 1–10.
- ASSOCIATION EUROPEAN ALUMINIUM. **Aluminium Alloy Cylinder Blocks**. 2011.
- BEER, Stephan. **Alumínio é Tendência Para a Produção de Blocos de Motor nos Próximos Anos**. Fundação e Serviços, 2012.
- BRUNETTI, Franco. **Motores de Combustão Interna**. 2ª Ediçãoed. São Paulo: 2018.
- BUFFA, Gianluca; CAMPANELLA, Davide; DI LORENZO, Rosa, FRATINI, Livan; INGARAO, Giuseppe; **Analysis of electrical energy demands in friction stir welding of aluminum alloys**, *Procedia Engineering*, p 206-212, Palermo, Italy, 2017
- COLLIGAN, K. J. **The Friction Stir Welding Process: An Overview**. Woodhead Publishing Limited, 2009.
- DOS SANTOS , J. F.; OLEA, C.A.W; COELHO, R.S; KOTSKA A. **Metallurgy and weld performance in friction stir welding**. *Welding and Other Joining Technologies*, p. 314-410, 2009
- DUARTE, Iberê. **Processamento de Ligas de Alumínio Sílicio Fundida**. Joinville, 2014.
- ERVINA Efzan, M. N.; KONG, H. J.; KOK, C. K. **Review: Effect of Alloying Element on Al-Si Alloys**. *Advanced Materials Research*, p. 355–359, 2014.
- FUOCO, Ricardo. **Propriedades Mecânicas de Peças Fundidas em Ligas Al-Si**. p. 1–31, 2017.
- GIETZELT, Thomas; TOTH, Volker; HUELL, Andreas. **Diffusion Bonding: Influence of Process Parameters and Material Microstructure**. *Joining Technologies*, 2016.
- GOMES, Davi Pegado. **Estudo de um Procedimento de Soldagem para liga de Alumínio**. 2017.

GRUZLESKI, J. **The Treatment of Liquid Aluminium-Silicon Alloys**. Des Plaines, Illinois: American Foundrymen's Society, 1990.

GUPTA, H. N. **Fundamentals of Internal Combustion Engines**. 2012.

HAN, Yilong *et al.* **Influence of Hydrogen Embrittlement of Impact Property and Microstructural Characteristics in Aluminum Alloy Weld**, 2019,

HEGDE, Sathyapal; PRABHU, A K Narayan. **Modification of eutectic silicon in Al – Si alloys**, p. 3009–3027, 2008.

HEIDARZADEH, A; *et al.* **Friction stir welding/processing of metals and alloys: A comprehensive review on microstructural evolution**. Progress in Materials Science, Volume 117, 2021

HUANG, Y *et al.* **Diffusion Bonding of Superplastic 7075 Aluminium Alloy**. Materials Science and Engineering: 295–302, 1999.

JANA, S. *et al.* **Effect of Friction Stir Processing on Fatigue Behavior of an Investment Cast Al–7Si–0.6 Mg Alloy**. Acta Materialia, p. 989–1003, 2010.

JUNIOR, Luis Guimenes; RAMAHLO, José Pinto. **Soldagem Laser**. p. 22, 2018.

KIM, Y G. **Effect of Welding Parameters on Microstructure in the Stir Zone of FSW Joints of Aluminum die Casting Alloy**. 3830–3837, 2006.

KUMAR Maurya, Sushil *et al.* **Friction Stir Welding of Cast Aluminum Alloy (A319): Effect of Process Parameters**. Materials Today: Proceedings, p. 1024–1033, 2022.

MA, Z Y; SHARMA, S R; MISHRA, R S. **Microstructural Modification of As-Cast Al-Si-Mg Alloy by Friction Stir Processing**. 3323–3336, 2006.

MAESTRI, Gabriela *et al.* **Revoluções Tecnológicas e a Relação com o Setor Textil: Perspectivas Baseadas em Indústria 3.5, Indústria 4.0 e Indústria 5.0**. p. 149–161, 2021.

MARICHAMY, M.; BABU, S. **Experimental Study and Taguchi Optimization of Process Parameter on Mechanical Properties of A319 Aluminum Alloy Using Friction Stir Welding**. Materials Today: Proceedings, p. 1527–1531, 2021.

MEILINGER, Akos; TOROK, Imre. **The Importance of Friction Stir Welding Tool. Production Processes and Systems**. p. 25–34, 2013.

MISHRA, Rajiv; KUMAR, Nilesh. **Friction Stir Welding and Processing**, 2014.

MISHRA, R. S.; MA, Z. Y. **Friction stir welding and processing**. Materials Science and Engineering R: Reports, p. 1–78, 2005.

O'BRIEN, Annette; SOCIETY, American Welding. **Welding Handbook, Vol 5, Part 2**,

2010.

OLIVIECKI, Neilor; BESKOW, Arthur. **Analysis of the Parameters of Friction Welding Process of an Aluminum Alloy**, p. 15–29, 2013.

PAN, Yi; LADOS, Diana A. **Friction Stir Welding in Wrought and Cast Aluminum Alloys: Heat Transfer Modeling and Thermal History Analysis**. Metallurgical and Materials Transactions, p. 722–734, 2017.

PANUŠKOVÁ, Marta; TILLOVÁ, Eva; CHALUPOVÁ, Maria. **Relation Between Mechanical Properties and Microstructure of Cast Aluminum Alloy AlSi9Cu3**. Strength of Materials, p. 98–101, 2008.

PAVOL, Sejš; MARTIN, Bučány; PETER, Zifčák. **Properties of FSW and MIG Welded Joints of AlSiMg Aluminium Alloy**. Strojnický Casopis, p. 141–152, 2020.

PIETRAS, A.; RAMS, B. **FSW Welding of Aluminium Casting Alloys**. Archives of Foundry Engineering, p. 119–124, 2016.

PUGA, H. *et al.* **Influence of Ultrasonic Melt Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of AlSi9Cu3 Alloy**. Journal of Materials Processing Technology, p. 1729–1735, 2011.

SHIRZADI, Amir. **Diffusion Bonding**.: University of Cambridge, 2005: <<https://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/2005/Amir/bond.html>> Acesso em 15 Jan 2023.

INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 25239-5 Friction Stir Welding - Aluminium - Part 5 - Quality and Inspection Requirements**, 2020.

STEPHENSON, D. J. **Diffusion Bonding 2**. Dordrecht: Springer Netherlands, 1991.

STIRWELD. **Stirweld**. 2023. < <https://stirweld.com/en/fsw-machine-choose-the-best-option>> Acesso em 8 Jan 2023.

SVENUNGSSON, Josefine; CHOQUET, Isabelle; KAPLAN, Alexander F.H. **Laser Welding Process – A Review of Keyhole Welding Modelling**. Physics Procedia. p. 182–191, 2015.

THAPLIYAL, Shivraman. **Ultrasonic Welding: A Modern Welding Technology for Metals and Plastics**. Advanced Welding and Deforming: Elsevier, 2021. p. 1–22.

THOMAS, W M *et al.* **Friction Stir Welding - Process Variants and Developments in the Automotive Industry**. TWI Ltd, 2006.

TOTTEN, George E.; MACKENZIE, D. Scott. **Handbook of Aluminum Volume 1 , Physical Metallurgy and Processes**. New York, 2003.

WALSH, C A. **Laser Welding - Literature Review**, July, 2002.

WALSH, Joe; DEVINE, Janet. **Ultrasonic Welding of Aluminum Sheet National Institute of Standard Thnology**. 2010.

WEBER, Austin. **The Economics of Ultrasonics**. 2003.
<<https://www.assemblymag.com/articles/83104-the-economics-of-ultrasonics>> Acesso em 12 Jan 2023 .

ZHANG, Changxin *et al.* **Ultrasonic Welding of Aluminum to Steel: A Review**. *Metals*, p. 29, 2022.

ZHAO, H.; WHITE, D.R.; DEBROY, T. **Current Issues and Problems in Laser Welding of Automotive Aluminium Alloys**. *International Materials Reviews*, p. 238–266, 1999.

ZOVKO BRODARAC, Z.; DOLIĆ, N.; UNKIĆ, F. **Influence of Copper Content on Microstructure Development of AlSi9Cu3 Alloy**. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*, p. 53–60, 2014.