

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

FERNANDO HENDGES LOPES

**ANÁLISE DE UMA SOLDA LINEAR DE TOPO POR FRICÇÃO (FSW) ENTRE
ALUMÍNIO (6060 T5) E COBRE (C110)**

**Alegrete-RS
2017**

FERNANDO HENDGES LOPES

**ANÁLISE DE UMA SOLDA LINEAR DE TOPO POR FRICÇÃO (FSW) ENTRE
ALUMÍNIO (6060 T5) E COBRE (C110)**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Mecânica da Universidade Federal do
Pampa, como requisito parcial para
obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia Mecânica

Orientador: Aldoni Gabriel Wiedenhof

**Alegrete
2017**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

L864a Lopes, Fernando Hendges

Análise de uma solda linear de topo por fricção
(FSW) entre alumínio (6060 T5) e cobre (C110) /
Fernando Hendges Lopes.

58 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) --
Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA MECÂNICA,
2017.

"Orientação: Aldoni Gabriel Wiedenhofst".

1. Solda. 2. Alumínio e cobre. 3. Friction Stir
Welding. I. Título.

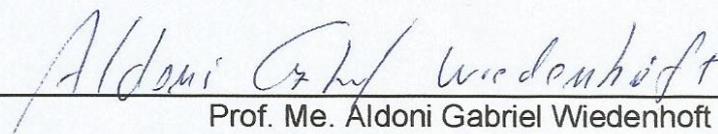
FERNANDO HENDGES LOPES

**ANÁLISE DE UMA SOLDA LINEAR DE TOPO POR FRICÇÃO (FSW) ENTRE
ALUMÍNIO (6060 T5) E COBRE (C110)**

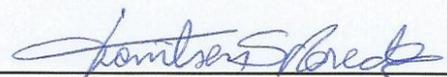
Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Mecânica da Universidade Federal do
Pampa, como requisito parcial para
obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 30/11/2017.

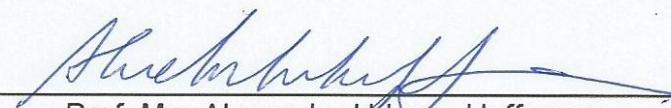
Banca examinadora:



Prof. Me. Aldoni Gabriel Wiedenhof
Orientador
(UNIPAMPA)



Prof. Dr. Tonilson de Souza Rosendo
Avaliador
(UNIPAMPA)



Prof. Me. Alexandre Urbano Hoffmann
Avaliador
(UNIPAMPA)

Dedico este trabalho a meus pais Flavio Humberto Zacharias Lopes e Rosangela Maria Hendges Lopes e também a minha namorada Cindhya Medeiros que nunca deixaram desistir do meu sonho.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus por tudo que aconteceu na minha vida, aos meus pais, Rosangela Maria Hendges Lopes e Flavio Humberto Zacharias Lopes, meu irmão Leandro Hendges Lopes e minha namorada Cindhya Medeiros, por todo apoio e por acreditarem em meu potencial.

Aos meus tios, Terezinha Rosana Hendges Klein e Celso José Klein que desde de o início estão sempre me apoiando e também acreditaram em mim, de que eu era capaz.

Ao Professor Me. Aldoni Gabriel Wiedenhof, pelo apoio desde o começo deste projeto e pela ajuda na realização no Trabalho de Conclusão de Curso (TCC).

Aos meus amigos, Anderson Lixinski Dalenogare, Alan Vergutz, Ismael Tonello e Alexandre Vasconcellos dos Reis, pelas horas de estudos e pela ajuda nos conteúdos.

Aos meus amigos e colegas em geral, que, de alguma forma, sempre me ajudaram, tanto nos grupos de trabalhos, quanto para o estudo das provas.

Aos professores da Engenharia Mecânica da UNIPAMPA, por todo conhecimento ensinado.

“O insucesso é apenas uma oportunidade
para recomeçar com mais inteligência. ”

Henry Ford

RESUMO

A união entre diferentes materiais está cada vez mais tendo uma maior importância, pois ajuda na diminuição do peso dos componentes. Neste contexto, surgiu a solda por fricção *Friction Stir Welding* (FSW), onde foi desenvolvido e patentado no *The Welding Institute* (TWI) no Reino Unido em 1991 (THOMAS et al., 1991), que consiste na união dos materiais no estado sólido por deformação plástica através de uma ferramenta não consumível. Os principais parâmetros para obter uma junta de qualidade neste processo são a geometria da ferramenta, velocidade de rotação, velocidade de avanço e ângulo inclinação. O presente trabalho tem como objetivo principal a análise de uma solda por fricção FSW entre o alumínio (6060 T5) e o cobre (C110) variando a velocidade de rotação em 1000, 1500 e 2000 rpm e a velocidade de avanço em 10 e 20 mm/min, tendo assim como finalidade a obtenção de uma junta de qualidade, e como objetivo específico, a análise dos resultados através de inspeção visual, ensaio de tração e macrografia. Obtendo uma combinação dos parâmetros, foram feitos seis parâmetros de soldagem, onde foi utilizado um centro de usinagem para a realização do mesmo. A ferramenta utilizada foi fabricada com um aço SAE H13 e aplicado têmpera e revenido, obtendo assim uma dureza de aproximadamente 54 HRC. Com os resultados, foi realizado uma inspeção visual, que detectou alguns defeitos, já no ensaio de tração foi possível analisar o melhor parâmetro de soldagem, através de gráficos de tensão e alongamento e dados estatísticos e para a macrografia foram detectados defeitos no qual não eram visíveis a olho nu. Com estas análises, chegou-se ao melhor parâmetro de soldagem para esta união, sendo assim, os objetivos propostos desde trabalho foram alcançados.

Palavras-chave: Friction Sitr Welding; Alumínio; Cobre; Parâmetros.

ABSTRACT

The union between different materials is increasingly having a greater importance, as it helps in reducing the weight of the components. In this context, Friction Stir Welding (FSW) friction welding was developed, where it was developed and patented at The Welding Institute (TWI) in the United Kingdom in 1991 (THOMAS et al., 1991), which consists of joining the materials in the solid state by plastic deformation through a non-consumable tool. The main parameters to obtain a quality joint in this process are the tool geometry, speed of rotation, feed rate and slope angle. The main objective of the present work is the analysis of an FSW friction weld between the aluminum (6060 T5) and the copper (C110) varying the speed of rotation in 1000, 1500 and 2000 rpm and the speed of advance in 10 and 20 mm / min, with the purpose of obtaining a quality joint, and as a specific objective, the analysis of the results through visual inspection, traction test and macrography. By obtaining a combination of the parameters, six welding parameters were made, where a machining center was used to perform the same. The tool used was manufactured with a SAE H13 steel and applied quenching and tempering, thus obtaining a hardness of approximately 54 HRC. With the results, a visual inspection was performed, which detected some defects, and in the tensile test it was possible to analyze the best welding parameter, through voltage and elongation graphs and statistical data, and for the macrography defects were detected in which were not visible to the naked eye. With these analyzes, we reached the best welding parameter for this union, and thus, the objectives proposed since work were achieved.

Keywords: Friction Sitr Welding; Aluminum; Copper; Parameters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Solda por fricção (FSW)	18
Figura 2 – Tipos de geometria de ombro.....	19
Figura 3 – Geometria dos pinos de penetração	20
Figura 4 – Regiões da solda.....	21
Figura 5 – Máquina dedicadas ao processo Friction Stir Welding.....	23
Figura 6 – Ferramenta de solda	28
Figura 7 – Dimensões da ferramenta	29
Figura 8 – Material base da solda	30
Figura 9 – Dispositivo de fixação das chapas	30
Figura 10 – Fresadora CNC ROMI D800	31
Figura 11 – Offset da ferramenta de soldagem	32
Figura 12 – Sentido de rotação e avanço da ferramenta	32
Figura 13 – Corpo de prova para ensaio de tração	34
Figura 14 – Equipamento para ensaio de tração.....	35
Figura 15 – Resultado obtido para rotação 1000 rpm e avanço 10 mm/min	36
Figura 16 – Resultado obtido para rotação 1000 rpm e avanço 20 mm/min	36
Figura 17 – Resultado obtido para rotação 1500 rpm e avanço 10 mm/min	37
Figura 18 – Resultado obtido para rotação 1500 rpm e avanço 20 mm/min	37
Figura 19 – Resultado obtido para rotação 2000 rpm e avanço 10 mm/min	38
Figura 20 – Resultado obtido para rotação 2000 rpm e avanço 20 mm/min	38
Figura 21 – Amostras do ensaio de tração para 1000 rpm e 10 mm/min	39
Figura 22 – Gráfico tensão alongamento para 1000 rpm e 10 mm/min	40
Figura 23 – Amostras do ensaio de tração para 1000 rpm e 20 mm/min	41
Figura 24 – Gráfico de tensão alongamento para 1000 rpm e 20 mm/min.....	41
Figura 25 – Amostras do ensaio de tração para 1500 rpm e 10 mm/min	42
Figura 26 – Gráfico de tensão alongamento para 1500 rpm e 10 mm/min.....	43
Figura 27 – Amostras do ensaio de tração para 1500 rpm e 20 mm/min	43
Figura 28 – Gráfico de tensão alongamento para 1500 rpm e 20 mm/min.....	44
Figura 29 – Amostras do ensaio de tração para 2000 rpm e 10 mm/min	45
Figura 30 – Gráfico de tensão alongamento para 2000 rpm e 10 mm/min.....	45
Figura 31 – Amostras do ensaio de tração para 2000 rpm e 20 mm/min	46
Figura 32 – Gráfico de tensão alongamento para 2000 rpm e 20 mm/min.....	47

Figura 33 – Macrografia para rotação de 1000 rpm e avanço 10 mm/min	49
Figura 34 – Macrografia para rotação de 1000 rpm e avanço 20 mm/min	50
Figura 35 – Macrografia para rotação de 1500 rpm e avanço 10 mm/min	50
Figura 36 – Macrografia para rotação de 1500 rpm e avanço 20 mm/mn	51
Figura 37 – Macrografia para rotação de 2000 rpm e avanço 10 mm/min	52
Figura 38 – Macrografia para rotação de 2000 rpm e avanço 20 mm/min	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades das ligas de alumínio.....	23
Tabela 2 – Disposições das ligas e seus elementos	24
Tabela 3 – Propriedades do alumínio 6060 T5.....	26
Tabela 4 – Propriedades das ligas de cobre	26
Tabela 5 – Classificação das ligas de cobre	27
Tabela 6 – Características da liga de cobre C110.....	27
Tabela 7 – Parâmetros de soldagem	33
Tabela 8 – Comparação dos dados estatísticos de cada parâmetro.....	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

(A) – Corte longitudinal para o lado do cobre

(B) – Corte longitudinal para o lado do alumínio

(C) – Corte transversal

Al – Alumínio

Cu – Cobre

FSW – Friction Stir Welding

ZM – Zona de mistura

TWI – The Welding Institute

ZAT – Zona afetada termicamente

ZATM – Zona afetada termo-mecanicamente

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivos	17
2	CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1	Friction stir welding (FSW)	17
2.1.1	Geometria da ferramenta.....	19
2.1.2	Parâmetros de soldagem	20
2.1.3	Regiões da solda.....	21
2.1.4	Equipamento	22
2.2	Ligas de alumínio	23
2.2.1	Liga de alumínio 6060 T5.....	25
2.3	Ligas de cobre	26
2.3.1	Cobre eletrolítico C110	27
3	METODOLOGIA	28
3.1	Materiais e equipamentos.....	28
3.1.1	Ferramenta.....	28
3.1.2	Material base	29
3.1.3	Dispositivo de fixação	30
3.1.4	Equipamento	30
3.2	Procedimentos experimentais.....	31
3.2.1	Posição e sentido de giro da ferramenta	31
3.2.2	Escolha dos parâmetros de soldagem.....	33
3.2.3	Relação dos parâmetros	33
3.2.4	Ensaio	33
3.2.4.1	Inspeção visual	34
3.2.4.2	Ensaio de tração	34
3.2.4.3	Macrografia.....	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
4.1	Inspeção visual	36
4.2	Ensaio de tração	38
4.3	Macrografia	48
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
	REFERÊNCIAS	55

ANEXO – DESIGNAÇÃO DAS TÊMPERAS DO ALUMÍNIO	58
--	-----------

1 INTRODUÇÃO

Para suprir a necessidade do mercado atual em diminuir o peso dos componentes e não alterar sua resistência mecânica, foi preciso buscar materiais que atendam estes requisitos, assim, a utilização do alumínio nas indústrias foi fundamental.

O alumínio (Al) e o cobre (Cu) são materiais que possuem uma ampla gama de aplicações, onde são bastante utilizados em indústrias aeroespaciais, automotivas, indústrias de energia elétrica, entre outras. Por este motivo, a união entre diferentes materiais está cada vez mais tendo uma maior significância, pois este permite a redução do peso dos componentes e traz benefícios técnicos e econômicos.

Com o intuito de unir materiais que contém um baixo ponto de fusão, principalmente o Alumínio, surgiu o processo de *Friction Stir Welding* (FSW), no qual, este método em relação a um processo de fusão, diminui defeitos que possam vir a ocorrer durante a soldagem (HASSAN *et al.* 2003^a; GENEVOIS *et al.* 2005).

Com o surgimento do FSW, percebeu-se que além de unir materiais de baixo ponto de fusão, ainda possui potencial para diferentes tipos de materiais, tais como o alumínio e o cobre.

O processo *Friction Stir Welding* (FSW) foi desenvolvido e patenteado no *The Welding Institute* (TWI) em 1991 no Reino Unido (THOMAS *et al.*, 1991). A união destes materiais ocorre por deformação plástica causada por uma ferramenta não consumível, onde esta possui um pino de penetração e um ombro. Neste método, a união ocorre no estado sólido da peça, por esta razão, é possível obter uma junta de qualidade entre diferentes materiais.

A união destes materiais depende muito dos parâmetros utilizados e da geometria da ferramenta, pois são estes fatores que vão dar os melhores resultados. Os principais parâmetros de soldagem são a velocidade de rotação (rpm), velocidade de avanço (mm/min) e ângulo de inclinação da ferramenta.

Desta forma, justifica-se este trabalho devido a este tipo de união não possuir muitos estudos, onde a maior parte de juntas por este processo é entre alumínio. Com isso, este trabalho sugere aprimorar os conceitos existentes aplicando alguns métodos na confecção da junta. Para aperfeiçoar este processo, o trabalho busca analisar a combinação de parâmetros de soldagem com a utilização de uma ferramenta confeccionada adaptando este processo a um centro de usinagem.

1.1 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo principal analisar uma solda linear de topo pelo processo de *Friction Stir Welding* (FSW) entre alumínio (6060 T5) e cobre (C110) utilizando seis relações de parâmetros entre velocidade de rotação e de avanço com um ângulo estabelecido com a finalidade de se obter uma junta satisfatória. Este trabalho possui como objetivo específico a avaliação da junta a partir da realização de:

- Avaliação de defeitos através de uma inspeção visual.
- Ensaio de tração com a avaliação de gráficos de tensão alongamento e dados estatísticos;
- Avaliação das amostras a partir de uma macrografia com corte transversal e longitudinal;

2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

Nesta seção será feita uma revisão dos conceitos utilizados para a realização deste trabalho, afim de entender como funciona o processo de Friction Stir Welding.

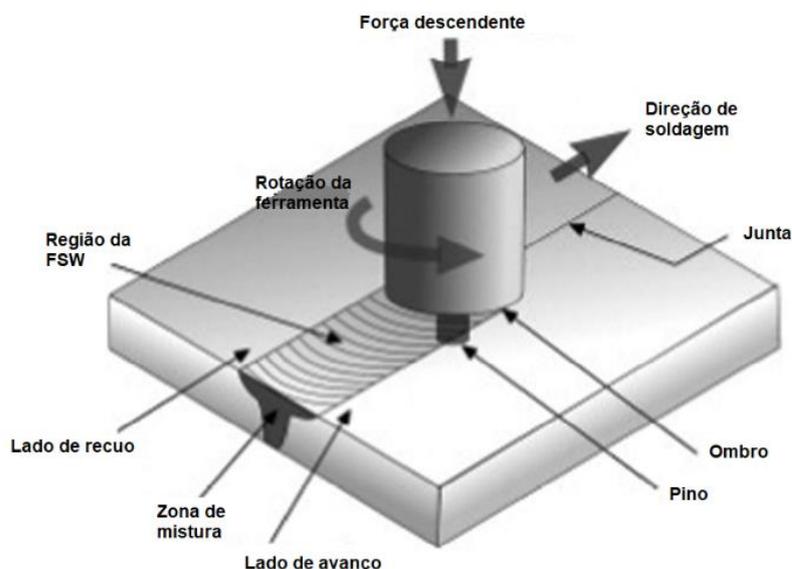
2.1 Friction stir welding (FSW)

A solda por fricção *Friction Stir Welding* (FSW) é um processo de soldagem que ocorre no estado sólido do material, onde foi desenvolvido e patenteado no *The Welding Institute* (TWI) no Reino Unido em 1991 (THOMAS et al., 1991). De modo que, esse processo é bastante utilizado na união de materiais como alumínio, cobre, aço, entre outros e possui um grande potencial para a solda entre materiais diferentes, tais como Al e Cu. Esta ainda tem como vantagem a flexibilidade e a alta qualidade (TAN et al., 2013).

A partir da década de 90, a solda (FSW) foi considerada um dos desenvolvimentos mais importantes para união de metais. Ao qual esse procedimento possui os mais rigorosos requisitos ambientais, devido a sua versatilidade, não deixa resíduos e o principal fator é a sua eficiência energética (FIORAVANTI, 2008).

No processo (FSW), uma ferramenta não consumível, de aço temperado com um ombro e um pino, é inserida na peça para que ocorra a união da junta, como mostra a Figura 1 (GEMME et al., 2010).

Figura 1 – Solda por fricção (FSW)



Fonte: Adaptado de Gemme, 2010.

A união ocorre devido ao aquecimento da ferramenta em contato com a peça ocasionando uma fricção entre o ombro e a peça, ou seja, esse aquecimento provoca uma deformação plástica da peça e com uma combinação de rotação e translação da ferramenta, o material se desloca da frente do pino para trás e assim ocorrendo a mistura destes materiais no estado sólido da peça (MISHRA et al., 2005).

Os tipos de soldas por fricção (FSW) mais comuns são juntas de topo ou sobrepostas. Para as soldas de topo, as chapas ficam uma do lado da outra com a lateral encostada, onde forma um cordão de solda linear, já para as soldas sobrepostas, as chapas ficam uma em cima da outra é a solda ocorre por um ponto com penetração nas duas chapas (CRUZ et al., 2009).

2.1.1 Geometria da ferramenta

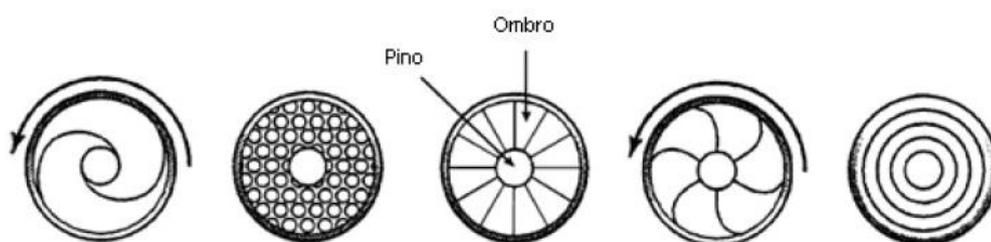
A geometria da ferramenta de solda é a chave principal para se obter sucesso em FSW, onde as características principais para esta ferramenta são o tamanho do ombro e o formato do pino de penetração (HE et al., 2014).

Segundo Guerra (2003), o pino de penetração deve ser décimos de milímetros de comprimento menor que a espessura das chapas assim como o diâmetro do pino deve ser aproximadamente o mesmo que a espessura das chapas e o tamanho do ombro deve ser aproximadamente três vezes maior que o diâmetro do pino.

O pino é o responsável pela deformação plástica e pela mistura dos materiais e possui uma pequena parcela na geração de calor total do processo (GUERRA, 2003).

O ombro da ferramenta é encarregado de segurar o material para que não ocorra a expulsão e também favorece o escoamento do material ao redor do pino de penetração, além disso, o atrito do ombro apresenta uma maior parte do calor gerado (MISHRA et al., 2005). A geometria no ombro possui vários formatos, onde a Figura 2 mostra alguns deles.

Figura 2 – Tipos de geometria de ombro



Fonte: Adaptado de Mishra et al., 2005.

Existem muitos modelos de ferramentas atualmente, principalmente a geometria do pino, onde esta pode ser com pino liso, pino roscado, helicoidal, reto ou cônico, entre outros. A Figura 3 mostra quatro tipos de ferramentas adotadas por Zhao et al., 2005, no estudo da geometria da ferramenta e parâmetros do processo na soldagem da liga de alumínio AA 2014.

Figura 3 – Geometria dos pinos de penetração



Fonte: Zhao et al., 2005.

2.1.2 Parâmetros de soldagem

Após a ferramenta, os parâmetros de soldagens são um fator importante que antecede a realização deste processo, onde estes são a velocidade de rotação da ferramenta (rpm), a velocidade de avanço (mm/min) e o ângulo de inclinação da ferramenta (MISHRA et al., 2005).

Segundo He et al. (2014), a velocidade de rotação e de avanço, são os principais fatores, pois a rotação ocasiona o agito e a mistura dos materiais através do pino e o avanço move o material agitado.

A velocidade de rotação está diretamente relacionada com a geração de calor, pois quando maior a velocidade de rotação, maior será o aquecimento, e com isso maior será a movimentação do material plastificado. Esse aquecimento contribui na mistura do cordão de solda. (MISHRA et al., 2005). Porém, segundo Tang et al. (1998), a velocidade de rotação possui um valor máximo, pois ao ultrapassar este valor a temperatura começa a diminuir devido a mudança no coeficiente de atrito.

Para Peel et al., (2003), a velocidade de avanço está relacionada com as propriedades mecânicas, a microestrutura e o tamanho do nugget resultante do processo. A velocidade de avanço é inversamente proporcional a geração de calor, pois quanto maior o avanço, menor será o aquecimento, em contrapartida, com um avanço menor, maior será a geração de calor (RANCK, 2005).

Segundo Saeid et al., (2010), velocidade de avanço muito baixa ou muito alta está propicio a ocorrer defeitos, tais como micro trincas, vazios e cavidades. Portanto, o avanço possui uma margem de velocidade para que não ocorra estes defeitos.

A inclinação da ferramenta, segundo Capelari, (2006), facilita a deslocação do material da frente para trás do pino e provoca uma compressão maior na parte de trás, assim, ajudando na união e evitando possíveis vazios ou cavidades.

2.1.3 Regiões da solda

A microestrutura formada pela união por FSW pode ser dividida em quatro regiões, onde estas são: Material base (MB), zona afetada termicamente (ZAT), zona afetada termo-mecanicamente (ZATM) e zona de mistura (ZM) (ROSALES et al., 2010). A Figura 4 mostra uma microestrutura identificando as regiões da solda.

Figura 4 – Regiões da solda



Fonte: Adaptado de Santos (2010).

Para cada região de soldagem mostrada na Figura 4, Fratini et al. (2005) descreve os seguintes padrões:

- Metal base (MB): região que não é afetada pelo aquecimento e deformação ocasionada pela ferramenta de soldagem.
- Zona afetada termicamente (ZAT): região afetada somente pelo aquecimento da peça, não ocasionando deformação plástica. O calor provoca uma modificação na microestrutura e nas propriedades mecânicas da peça.
- Zona afetada termo-mecanicamente (ZATM): região afetada por uma deformação plástica ocasionada pela ferramenta de soldagem e também pelo calor gerado, tendo assim modificação na microestrutura. Com o aquecimento, poderá ocorrer o aumento da dureza das peças.

- Zona de mistura (ZM): Também chamada de nugget para ligas de alumínio, esta região é onde ocorre a recristalização dos grãos, no qual possui grãos equiaxiais e finos. A ferramenta está ligada diretamente com o tamanho desta região, onde a largura será pouco maior que o diâmetro do pino e pouco menor que o do ombro.

2.1.4 Equipamento

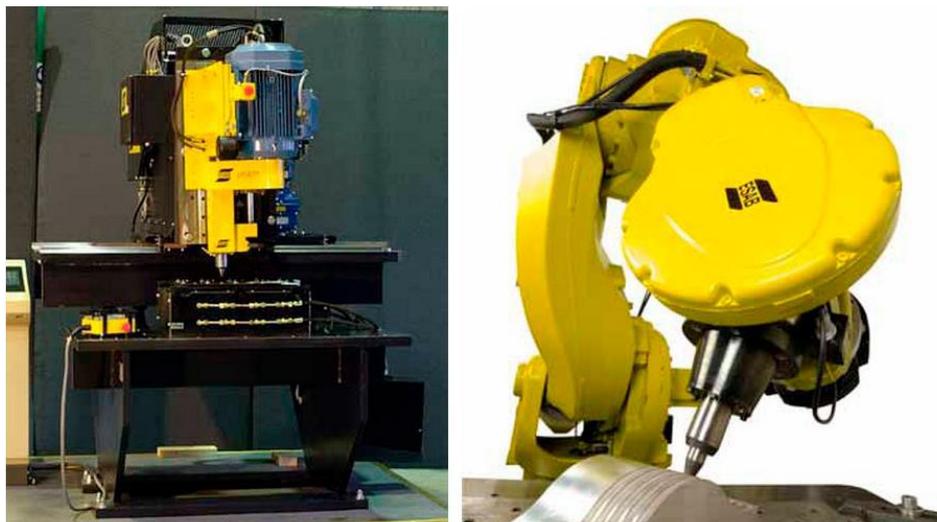
Os equipamentos para a realização da solda podem ser máquinas apropriadas para este tipo de solda ou fresadoras tanto manual como computadorizada, porém as fresadoras possuem limitações, tanto nas forças axiais como o tamanho.

As máquinas utilizadas neste processo devem suportar altas cargas aplicadas verticalmente sendo necessário o uso de grandes máquinas. Além disso, o equipamento para FSW precisa ter ajuste de inclinação do cabeçote e uma ampla faixa de velocidades de rotação e avanço, pois estes são os parâmetros importantes (COOK et al., 2003).

As fresadoras computadorizadas ou centro de usinagem, são mais utilizadas quando não se tem uma máquina dedicada, onde esta atende bem o que necessita para a realização da solda, tanto a junta de topo quanto a sobreposta. Esta máquina é composta com os eixos (x, y e z) e possui um comando computadorizado para o controle desta (GIBSON, 2014).

Os equipamentos dedicados para FSW são mais robustos, onde estes possuem um controle das forças aplicadas, posicionamento e temperatura. Quando não se consegue uma rigidez suficiente para o sistema, o uso de robôs garante o controle da força aplicada durante a soldagem (ALMEIDA, 2013). A Figura 5 ilustra os dois modelos de equipamento dedicado.

Figura 5 – Máquina dedicadas ao processo *Friction Stir Welding*



Fonte: Adaptado de ESAB (2014).

2.2 Ligas de alumínio

O alumínio é um metal não ferroso, onde é bastante conhecido pela sua resistência a corrosão e densidade muito baixa, com isso é bastante utilizado em aplicações industriais devido a estas características (SHACKELFORD, 2008; MARTINS, 2008).

O alumínio puro possui baixa resistência mecânica e é bastante dúctil, devido a isso foi necessário a adição de alguns elementos de liga para contornar este problema. Estes elementos de ligas podem ser o Cobre (Cu), Manganês (Mn), Silício (Si), Magnésio (Mg) e Zinco (Zn) (SANTOS, 2009). A Tabela 1 mostra as propriedades das ligas de alumínio.

Tabela 1 – Propriedades das ligas de alumínio

Propriedade	Valor
Densidade	2700 Kg/m ³
Condutividade elétrica	62 %I.A.C.S
Módulo de elasticidade	68 Gpa
Temperatura de fusão	660 °C

Fonte: Adaptado de Alcan (1993).

A nomenclatura das ligas de alumínio é composta por quatro dígitos, onde cada valor inicial determina o elemento de liga que contém deste material. A Tabela 2 mostra as ligas de alumínio com seus respectivamente elementos de liga.

Tabela 2 – Disposições das ligas e seus elementos

Ligas	Principais elementos de liga
1XXX	Nenhum ($\geq 99,00\%$ Al)
2XXX	Cu
3XXX	Mn
4XXX	Si
5XXX	Mg
6XXX	Mg e Si
7XXX	Zn
8XXX	Outros elementos

Fonte: Adaptado Santos (2009).

O segundo dígito das ligas de alumínio mostra que para qualquer valor diferente de zero a mesma é derivada desta liga, como por exemplo 6061 e 6161. Para a liga de alumínio 1XXX, os dois últimos dígitos configuram a porcentagem de alumínio nesta liga acima de 99%, para as outras ligas, os dois últimos dígitos diferenciam ligas do mesmo grupo (SANTOS, 2009).

Os alumínios possuem também classificação quanto ao processo termomecânicos, também chamado de têmpera, aplicados nos materiais. Esta identificação é realizada atrás de dois ou três dígitos, onde o primeiro designa o processo e os outros a maneira que foi feito (DAVIS, 1990).

Segundo Capelari, (2006), os significados das têmperas são:

- F: Como fabricado. Não foi realizado nenhum processo além do que é necessário para a fabricação do mesmo.
- O: Recozido. A aplicação deste tratamento é realizada quando necessita uma redução da resistência mecânica do material e para materiais fundidos aumenta sua ductilidade e estabilidade.

- H: Endurecido por deformação. Esta designação mostra que o material teve sua resistência mecânica aumentada através do processo de encruamento, utilizando ou não tratamento térmico posterior. A classificação H possui um ou dois dígitos após, ao qual indicam se ocorreu ou não alívio de tensões.
- W: Tratamento térmico de solubilização. A aplicação desta têmpera é realizada somente em ligas cuja sua resistência se modifica em temperatura ambiente com o passar do tempo, em meses ou anos, após tratamento térmico de solubilização.
- T: Tratamento térmico de solubilização. Este tratamento só é aplicável em ligas onde a resistência mecânica se estabiliza em semanas, diferente da têmpera W, após o tratamento de solubilização. Os dígitos seguintes para este tratamento vão de 1 a 10, onde estas especificam o tipo de tratamento termomecânico realizado.

A designação de cada tratamento termomecânico e suas têmperas está ilustrado no ANEXO.

2.2.1 Liga de alumínio 6060 T5

A liga de alumínio AA6060 é formada de alumínio, magnésio e silício forjado da série 6XXX como mostra a Tabela 2. Este material pode ser produzido por forjamento ou extrusão e não é indicado para a fundição e possui uma boa resistência a corrosão e boas características de soldabilidade (ALCOA, 2010). A Tabela 3 mostra as propriedades deste material.

Tabela 3 – Propriedades do alumínio 6060 T5

Propriedade	Valor
Limite de resistência a tração (MPa)	145
Limite de escoamento (MPa)	105
Alongamento mínimo (%)	8
Dureza Brinel (HB)	66

Fonte: Adaptado de Alumiplast [200-?].

2.3 Ligas de cobre

As ligas de cobre estão entre as mais utilizadas no mundo, perdendo apenas para aços e alumínio devido ao custo e tendo como vantagem uma fácil fabricação, boa resistência a corrosão e elevada condutividade elétrica e térmica (INFOMET, [200-?]). A Tabela 4 mostra as propriedades das ligas de cobre.

Tabela 4 – Propriedades das ligas de cobre

Propriedades	Valores
Densidade	8,96 g/cm ³
Temperatura de fusão	1083 °C
Condutibilidade elétrica	100% IACS
Módulo de elasticidade	130 Gpa

Fonte: Adaptado de Infomet [200-?].

As ligas de cobre possuem algumas séries para identificação de cada tipo de liga do cobre. O sistema da Copper Development Association (CDA) é responsável pela divisão das ligas de cobre que também a ASTM adota. A Tabela 5 mostra as classificações de cada liga (INFOMET, [200-?]).

Tabela 5 – Classificação das ligas de cobre

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

Fonte: Adaptado de Infomet [200-?].

Na Tabela 5, cada série possui três algarismos, onde o primeiro significa a qual série pertence o cobre e o restante dos algarismos identifica uma determinada liga especificamente (INFOMET, [200-?]).

2.3.1 Cobre eletrolítico C110

O cobre eletrolítico C110 é uma liga que apresenta um teor de Oxigênio entre 0,02% e 0,07% e 99,95% de cobre puro. Esse material é pouco dúctil garantindo uma boa trabalhabilidade durante os processos de fabricação (INFOMET, [200-?]).

Essa liga possui um amplo campo de aplicação, mas é mais usualmente nas indústrias elétricas, pois possui uma excelente condutibilidade, mas também é usado em processos de soldagem e brasagem. As características apresentadas pela COPPERMETAL (2009), estão ilustradas na Tabela 6.

Tabela 6 – Características da liga de cobre C110

Propriedades	Valor
Faixa de temperatura de recozimento	475-750 °C
Faixa de temperatura para trabalho a quente	750-875 °C
Conformabilidade a quente	Excelente
Conformabilidade a frio	Excelente
Resistência a tração	220 MPa

Fonte: Adaptado de Coppermetal, 2009.

3 METODOLOGIA

Nesta seção será mostrado e explicado a utilização dos métodos para a realização do processo de soldagem, tendo como finalidade a obtenção dos resultados.

3.1 Materiais e equipamentos

Os materiais utilizados são de suma importância, sendo a parte inicial para obtenção dos resultados. Neste trabalho foram empregados alguns equipamentos e materiais, ao qual estão descritos a seguir.

3.1.1 Ferramenta

Para o processo de soldagem foi fabricada uma ferramenta de solda, onde foi desenvolvida tendo como critério alguns parâmetros de geometria. Os principais pontos relevantes para esta fabricação foi o formato do pino de penetração e o tamanho do ombro. A Figura 6 mostra a ferramenta utilizada neste projeto.

Figura 6 – Ferramenta de solda

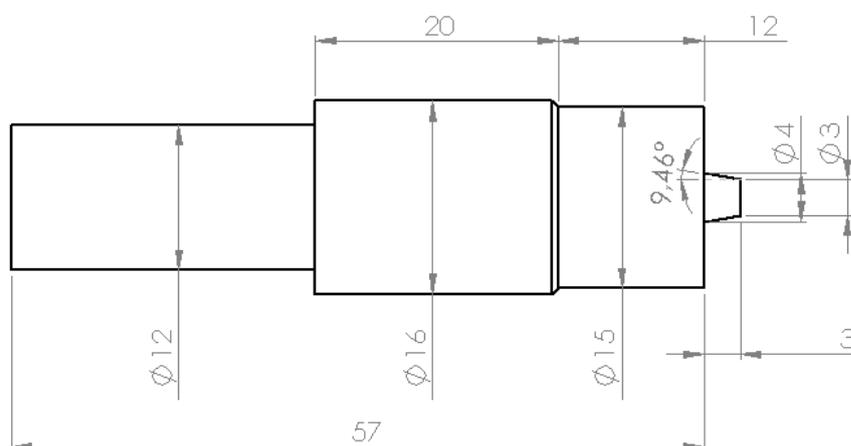


Fonte: Próprio autor.

Esta ferramenta foi fabricada utilizando um material de aço ferramenta ABNT H13, onde posteriormente foi feito têmpera e revenido, ao qual ocasionou uma dureza de aproximadamente 54 HRC.

As dimensões de fabricação da ferramenta estão mostradas na Figura 7.

Figura 7 – Dimensões da ferramenta



Fonte: Próprio autor.

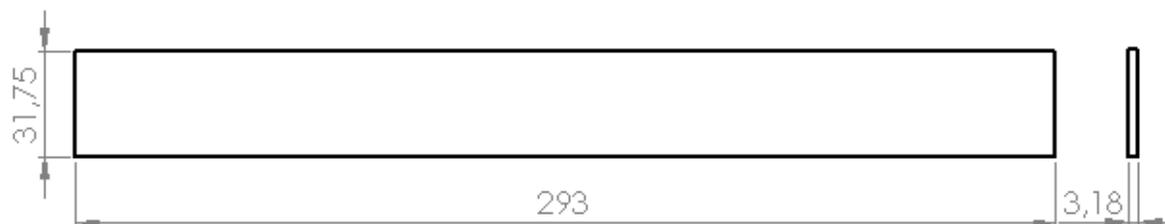
A ferramenta possui um diâmetro de ombro de 15mm, o pino de penetração tem o menor diâmetro de 3mm e o maior com 4mm, formando assim um ângulo de 9.46°. A profundidade de penetração do pino é de 3mm.

Como citado na seção 2.1.1, o diâmetro do ombro deveria ser três vezes a do pino, porém neste caso foram feitos testes preliminares ao qual chegou a esta geometria da ferramenta, pois esta apresentou melhores resultados.

3.1.2 Material base

Como material base para realizar a junta de topo, foi utilizado uma chapa de alumínio 6060 T5 e uma chapa de cobre C110 onde as duas tem as mesmas dimensões. A Figura 8 mostra as dimensões destas chapas.

Figura 8 – Material base da solda



Fonte: Próprio autor.

3.1.3 Dispositivo de fixação

O dispositivo de fixação utilizado foi projetado conforme a necessidade e disposições das chapas, onde este já possui um ângulo de inclinação, pois o equipamento utilizado não possui uma regulagem de ângulo, tanto na ferramenta, quanto na mesa. Como este dispositivo foi feito para utilizar chapas de maiores larguras, para a confecção desta união foi necessária uma adaptação das chapas, para que assim a solda ocorresse sem imperfeições. A Figura 9 mostra o dispositivo de fixação utilizado para este processo.

Figura 9 – Dispositivo de fixação das chapas



Fonte: Próprio autor

3.1.4 Equipamento

Como não foi possível ter acesso a uma máquina dedicada para este tipo de solda, foi utilizado um centro de usinagem CNC, onde este possui regulagem de

posicionamento, velocidade de rotação e avanço. Para a utilização do equipamento na realização da solda, foi feito um programa com os parâmetros desejados. A Figura 10 mostra o equipamento utilizado.

Figura 10 – Fresadora CNC ROMI D800



Fonte: Próprio autor.

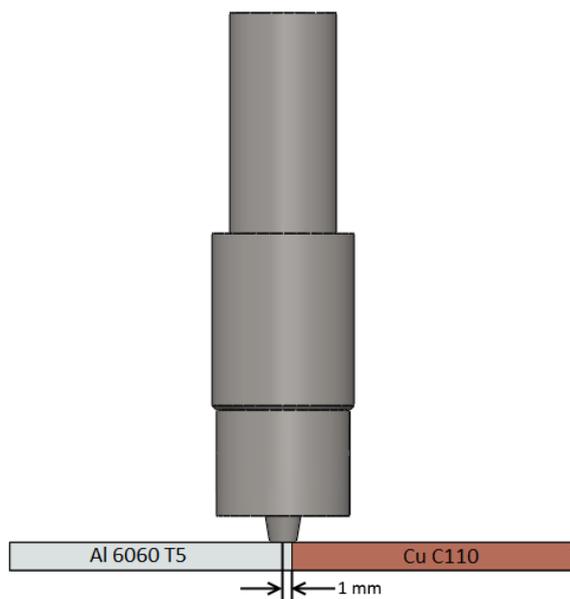
3.2 Procedimentos experimentais

Nesta seção serão mostrados todos os procedimentos realizados para se chegar aos resultados desejados.

3.2.1 Posição e sentido de giro da ferramenta

Foram feitos alguns testes preliminares para obter uma posição ideal para a ferramenta, onde a Figura 11 mostra a posição que gerou melhores resultados. Com isso para este trabalho, foi aplicado um offset de 1mm para dentro do alumínio em relação ao centro da ferramenta e das chapas.

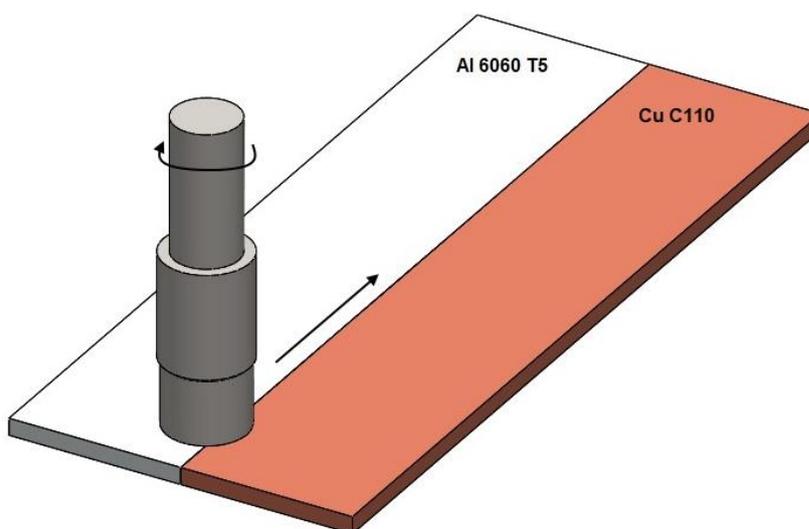
Figura 11 – Offset da ferramenta de soldagem



Fonte: Próprio autor.

A ferramenta gira no sentido horário, no qual, analisando a Figura 12, é possível notar que a mistura dos metais de base durante da soldagem será do alumínio para o cobre e o translado também está indicado na Figura 12.

Figura 12 – Sentido de rotação e avanço da ferramenta



Fonte: Próprio autor.

A penetração da ferramenta foi de 3 mm, o mesmo comprimento do pino, pois o ombro precisa estar em contato com o material para que ocorra a mistura.

3.2.2 Escolha dos parâmetros de soldagem

A rotação e o avanço são parâmetros que possuem maior influência na qualidade da junta soldada, portanto, a escolha destes devem ser bem selecionados.

Para obter uma melhor avaliação das uniões soldadas, foram utilizadas três velocidades de rotações sendo elas de 1000, 1500 e 2000 rpm, duas velocidades de avanço, 10 e 20 mm/min e um ângulo de inclinação de 3°.

3.2.3 Relação dos parâmetros

Para a realização destas juntas, foram relacionadas as velocidades de rotação e de avanço, assim proporcionando um total de seis cordões de solda. A Tabela 7, mostra como será separado estes parâmetros.

Tabela 7 – Parâmetros de soldagem

Parâmetros	Rotação (RPM)	Velocidade de avanço (mm/min)
1	1000	10
2	1000	20
3	1500	10
4	1500	20
5	2000	10
6	2000	20

Fonte: Próprio autor.

De cada parâmetro de soldagem mostrado na Tabela 7, foram produzidos cinco corpos de prova para o ensaio de tração e mais dois para obter o corte transversal e longitudinal da macrografia.

3.2.4 Ensaio

Os ensaios são importantes tanto para a classificação de um processo se é bem executado ou não quanto para avaliar a qualidade do resultado obtido. Com estes

ensaios é possível comprovar se este processo é eficiente para a união dos materiais selecionados.

Neste trabalho os ensaios realizados serão por inspeção visual, ensaio de tração e macrografia.

3.2.4.1 Inspeção visual

A inspeção visual se dá no momento em que é realizado a união dos materiais, onde este ensaio serve para analisar se o cordão de solda possui trincas, vazios, cavidades, entre outros defeitos.

Esta inspeção serve também para classificar os corpos de provas, onde os melhores serão escolhidos para os outros tipos de ensaios, e as outras uniões serão descartadas.

3.2.4.2 Ensaio de tração

O teste de tração consiste na aplicação de uma carga uniaxial em um corpo de prova até que ocorra a ruptura do mesmo. Este ensaio serve para qualificar e verificar a qualidade do processo. A Figura 13 ilustra o formato do corpo de prova para a realização do mesmo.

Figura 13 – Corpo de prova para ensaio de tração



Fonte: Próprio autor.

A confecção destes corpos de prova foi feita no centro de usinagem CNC mostrado na Figura 10. Neste ensaio foram feitas cinco amostras de cada relação de parâmetro de modo que obtenha um resultado mais preciso. A análise foi realizada a

partir de gráficos de tensão e deformação, dados estatísticos das amostras e visualização das rupturas obtidas do ensaio.

Para este ensaio foi utilizado o equipamento de ensaios estáticos SHIMADZU Autograph AGS-X, onde a Figura 14 mostra o mesmo.

Figura 14 – Equipamento para ensaio de tração



Fonte: Próprio autor.

3.2.4.3 Macrografia

Na macrografia é possível analisar como ocorreu a misturas dos materiais através das zonas de soldagem na peça e ainda, busca avaliar possíveis defeitos que ocorreram no momento da soldagem, tais como, vazios ou túneis.

Neste trabalho foram feitas três seções para cada relação de parâmetros, onde uma seção é um corte transversal que busca avaliar o cordão de solda formado entre o alumínio e o cobre. Para as outras duas seções, foi feito um longitudinal, onde esta busca analisar o cordão no alumínio e no cobre.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção será mostrado os resultados obtidos para cada cordão de solda em relação aos parâmetros. Com estes resultados foi feito uma avaliação dos cordões de solda com ensaio de tração, macrografia inspeção visual.

4.1 Inspeção visual

Os resultados das soldagens foram satisfatórios em uma análise visual, porém a diferença entre cada cordão de solda foi significativa nesta avaliação. Em alguns casos ocorreram defeitos visuais no momento da soldagem, tais como rebarbas, trincas e também a mistura dos materiais não ocorreu corretamente.

Estes defeitos ocorreram devido a ferramenta de solda, pois esta teve um desgaste do pino de penetração ao decorrer das soldagens, e devido a velocidade de rotação e avanço.

As peças soldadas estão mostras a seguir, onde cada cordão possui um comprimento de 250 mm e a solda ocorreu da direita para a esquerda. Para obter uma melhor aparência, as rebarbas foram retiradas, como pode-se observar nas imagens.

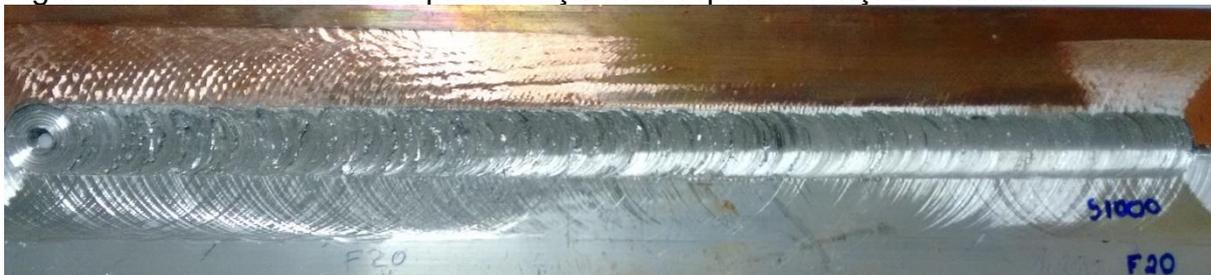
Figura 15 – Resultado obtido para rotação 1000 rpm e avanço 10 mm/min



Fonte: Próprio autor.

A Figura 15 mostra o cordão de solda resultante para o primeiro parâmetro, onde mostrou-se satisfatório, no qual não evidenciou nenhuma imperfeição visualmente.

Figura 16 – Resultado obtido para rotação 1000 rpm e avanço 20 mm/min



Fonte: Próprio autor.

O cordão resultante do segundo parâmetro, onde mostra a Figura 16, apresentou também uma união satisfatório, pois visualmente não se detectou nenhuma imperfeição na junta.

Figura 17 – Resultado obtido para rotação 1500 rpm e avanço 10 mm/min



Fonte: Próprio autor.

Para o terceiro parâmetro, como mostra a Figura 17, já apareceu algumas imperfeições no final do cordão de solda, no entanto, esta ainda mostra-se satisfatória, pois este ocorreu devido ao desgaste da ferramenta.

Figura 18 – Resultado obtido para rotação 1500 rpm e avanço 20 mm/min



Fonte: Próprio autor.

A partir do quarto parâmetro mostrou-se um cordão com bastante imperfeições, onde a Figura 18 mostra o resultado obtido. Pode-se notar trincas que ocorreram no momento da soldagem, este ocorreu devido a velocidade de avanço maior, e também ao desgaste da ferramenta.

Figura 19 – Resultado obtido para rotação 2000 rpm e avanço 10 mm/min



Fonte: Próprio autor.

A Figura 19 mostra o resultado obtido para o quinto parâmetro, onde este não se mostrou muito satisfatório, pois no cordão de solda ocorreu trincas e a união do material não ocorreu corretamente, pois este ficou com maior profundidade em relação aos outros.

Figura 20 – Resultado obtido para rotação 2000 rpm e avanço 20 mm/min



Fonte: Próprio autor.

O sexto parâmetro foi o que apresentou o pior resultado como pode-se observar na Figura 20, onde o cordão de solda não se mostrou satisfatório. Os defeitos ocorridos foram trincas e a mistura dos materiais não ocorreram corretamente.

Os parâmetros que apresentaram melhor resultados foram os três primeiros, onde estes se mostraram satisfatórios em uma análise visual. Na maior parte dos resultados, o desgaste da ferramenta ocasionou algum defeito, onde para resolver este empecilho, precisou realizar a fabricação de mais de uma ferramenta.

4.2 Ensaio de tração

Os resultados para o ensaio de tração foram bastantes distintos, pois neste ensaio foi possível analisar qual cordão suporta maior carga axial. Dos seis

parâmetros de solda, quatro obtiveram melhores resultados, onde estes são os de menores velocidades de rotação. Para a velocidade de 2000rpm e avanço de 10 e 20 mm/min, os resultados não foram muito satisfatórios, pois nestes parâmetros ocorreu vazios e a mistura do material não foi suficiente.

Para uma melhor visualização dos dados obtidos, foram feitos gráficos de tensão e alongamento para cada relação de parâmetro mostrado na Tabela 7. A partir das tensões máximas de cada amostra, foi possível obter dados estatísticos, no qual mostram qual obteve um menor desvio padrão. No ensaio de tração em alguns casos ocorreu o escorregamento das amostras, onde pode-se observar nos gráficos.

A ruptura das amostras ocorreu na maioria dos casos no alumínio, pois este material utilizado possui uma tensão mínima de tração de aproximadamente 145 MPa onde está ilustrada na Tabela 3.

Foi adotada uma nomenclatura para identificação das relações de parâmetros nos resultados do ensaio de tração, onde a primeira letra, A, quer dizer amostra, o primeiro número é a relação de parâmetro que está mostrada na Tabela 7 e o último número é a variação das cinco amostras deste ensaio.

A Figura 21 mostra os corpos de provas após a realização do ensaio.

Figura 21 – Amostras do ensaio de tração para 1000 rpm e 10 mm/min

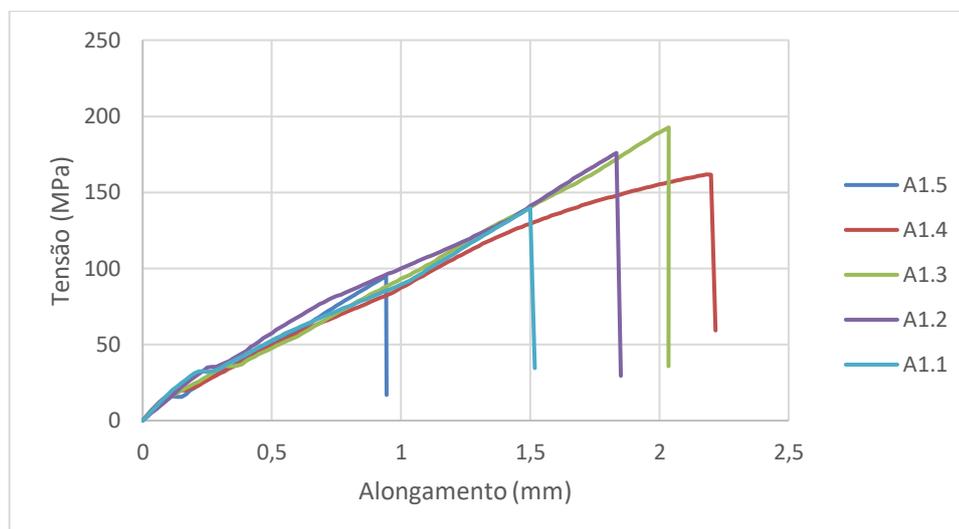


Fonte: Próprio autor.

Como pode-se observar, em alguns corpos de prova o rompimento ocorreu no alumínio e em todos os casos a ruptura foi frágil.

Com os dados obtidos no ensaio de tração, a Figura 22 mostra um gráfico de tensão e alongamento do primeiro parâmetro, onde este expressa as curvas de cada amostra solicitada com carga axial.

Figura 22 – Gráfico tensão alongamento para 1000 rpm e 10 mm/min

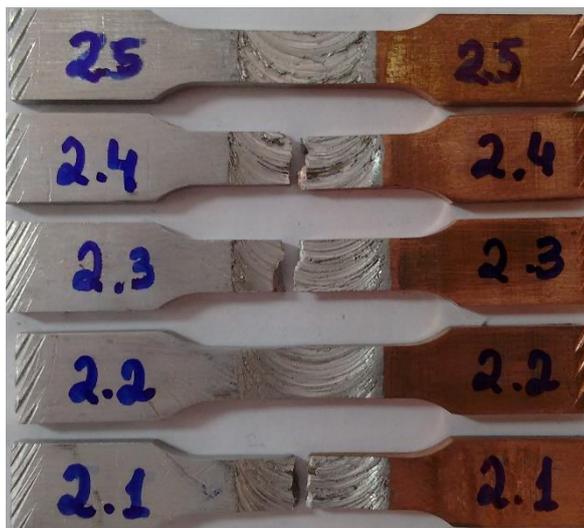


Fonte: Próprio autor.

Analisando a Figura 22, pode-se observar a discrepância da tensão máxima das amostras, onde obteve uma tensão média de aproximadamente 152,91 MPa e um desvio padrão de 37,9. Somente a amostra 1.4 não mostrou a mesma inclinação no gráfico, onde esta obteve uma maior deformação para uma menor tensão de ruptura, ou seja, a amostra 1.4 possui maior ductilidade, quanto a 1.1 é menos dúctil.

As amostras após a realização do ensaio do segundo parâmetro estão mostradas na Figura 23.

Figura 23 – Amostras do ensaio de tração para 1000 rpm e 20 mm/min

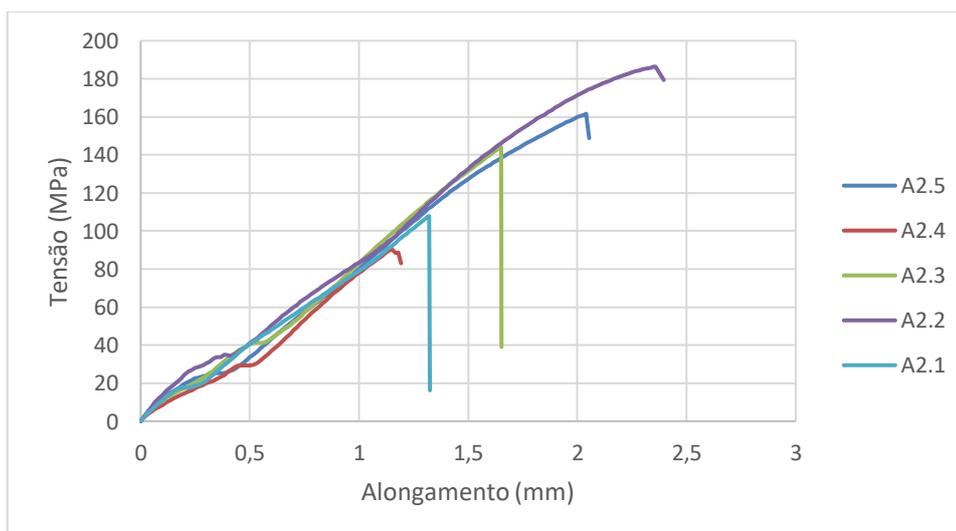


Fonte: Próprio autor.

Neste ensaio, nas amostras 2.2 e 2.5 não ocorreram a ruptura da união, pois o equipamento atingiu a força máxima para integridade da junta e começou a diminuir. As amostras 2.1 e 2.4 romperam de forma frágil, bem no cordão da solda.

Os resultados obtidos para o segundo parâmetro de soldagem estão dispostos na Figura 24 ilustrados por gráficos de tensão alongamento.

Figura 24 – Gráfico de tensão alongamento para 1000 rpm e 20 mm/min



Fonte: Próprio autor.

O segundo parâmetro obteve uma maior discrepância na tensão máxima tendo um desvio padrão de 39,58. A tensão média máxima diminuiu em relação ao primeiro

parâmetro, onde estas variam apenas a velocidade de avanço, no qual a tensão ficou de aproximadamente 137,74 MPa. As curvas neste caso ficaram praticamente com a mesma inclinação, não ocorreu uma variação significativa no momento do ensaio. As amostras 2.2 e 2.5 que não ocorreram a ruptura obtiveram as maiores tensões.

Os corpos de provas do terceiro parâmetro após a realização do ensaio estão mostrados na Figura 25.

Figura 25 – Amostras do ensaio de tração para 1500 rpm e 10 mm/min

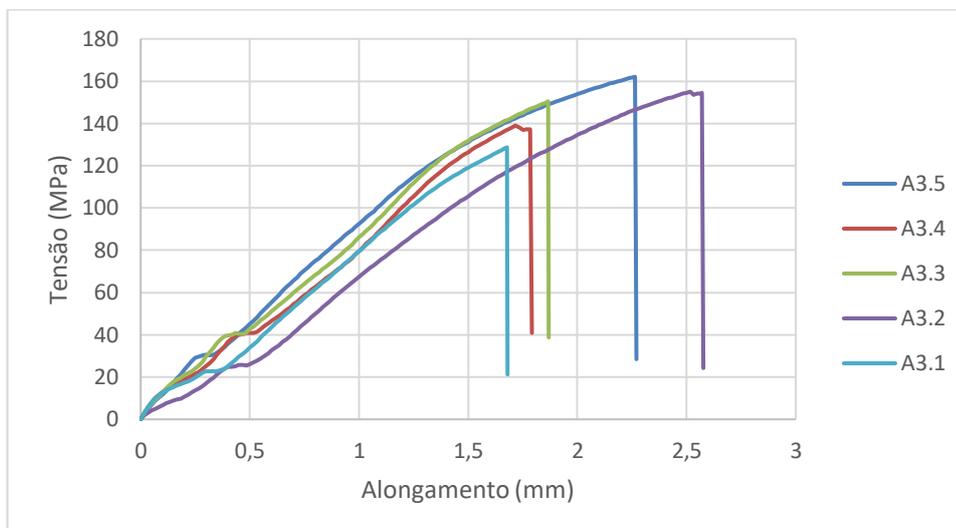


Fonte: Próprio autor.

Como pode-se observar, em todos os casos a ruptura foi frágil e somente a amostra 3.1 o rompimento ocorreu na união, nas outras amostras ocorreu no alumínio.

Com os dados obtidos do terceiro parâmetro, a Figura 26 ilustra através do gráfico de tensão alongamento.

Figura 26 – Gráfico de tensão alongamento para 1500 rpm e 10 mm/min



Fonte: Próprio autor.

Analisando a Figura 26, pode-se observar uma menor discrepância entre as tensões máximas, assim como um menor desvio padrão de aproximadamente 13,43. A tensão média máxima, comparada com os parâmetros anteriores, não apresentou uma mudança significativa, sendo que esta atingiu uma tensão de 146,56 MPa. Pelo gráfico, a união menos frágil foi a 3.2 e a mais frágil 3.1.

As amostras do quarto parâmetro após realização do ensaio de tração estão mostradas na Figura 27.

Figura 27 – Amostras do ensaio de tração para 1500 rpm e 20 mm/min

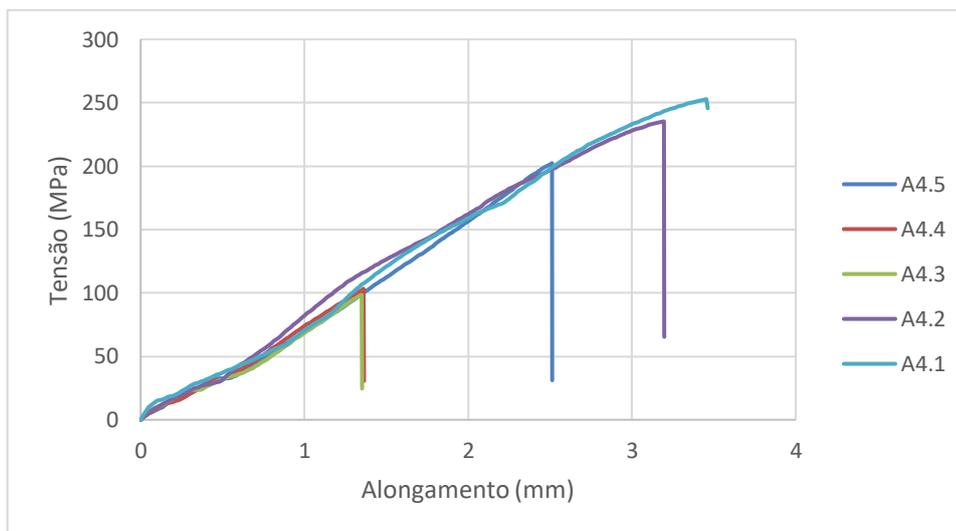


Fonte: Próprio autor.

Neste ensaio não ocorreu a ruptura da amostra 4.1, mesmo caso do segundo parâmetro. O rompimento da amostra 4.2 ocorreu na união e as outras no alumínio e para as amostras 4.3 e 4.3 a ruptura foi de forma frágil, quanto a 4.2 e 4.5 de forma dúctil.

Para um melhor entendimento dos resultados, a Figura 28 mostras dados obtidos do quarto parâmetro através de gráfico de tensão alongamento.

Figura 28 – Gráfico de tensão alongamento para 1500 rpm e 20 mm/min



Fonte: Próprio autor.

Os dados obtidos do quarto parâmetro obtiveram uma grande discrepância, ao qual resultou em um desvio padrão de aproximadamente 73,08. Esse valor demonstra a diferença de carga máxima de cada amostra, pois neste caso foi muito alto. A tensão média máxima obtida neste ensaio foi de aproximadamente 178,48 MPa. Pelo gráfico, pode-se observar a diferença entre estes, onde as amostras 4.3 e 4.4 ficaram frágeis e a amostra 4.1 foi a que não ocorreu a ruptura, sendo esta a de maior tensão.

A Figura 29 ilustra as amostras do quinto parâmetro após a realização do ensaio de tração.

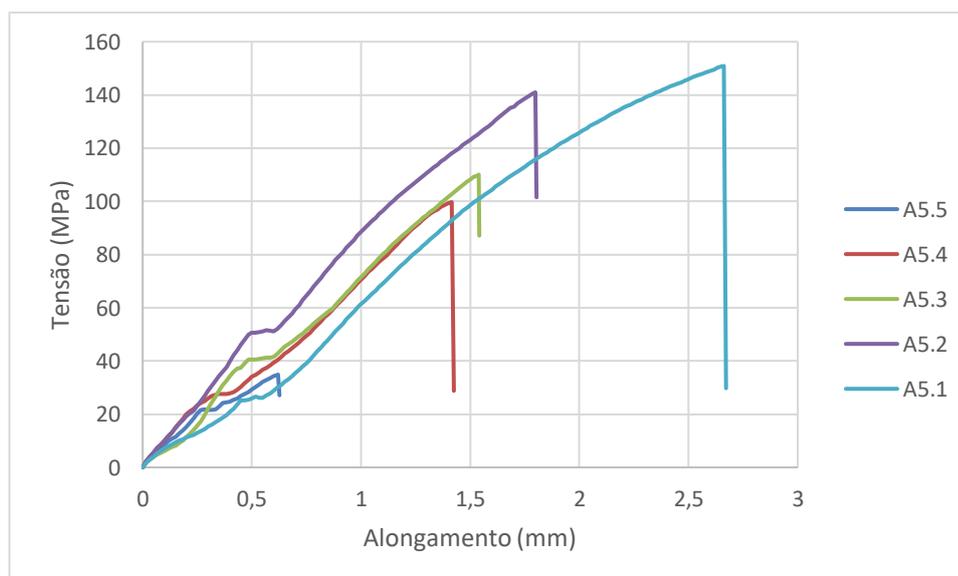
Figura 29 – Amostras do ensaio de tração para 2000 rpm e 10 mm/min



Fonte: Próprio autor.

Neste ensaio todos corpos de prova romperam na união, sendo maior parte de forma frágil, pois somente as amostras 5.1 e 5.2 ocorreu a ruptura de forma dúctil. Para um melhor entendimento, a Figura 30 mostra os dados obtidos deste ensaio através de gráfico de tensão alongamento para o quinto parâmetro.

Figura 30 – Gráfico de tensão alongamento para 2000 rpm e 10 mm/min



Fonte: Próprio autor.

Os resultados obtidos do quinto parâmetro não foram muitos satisfatórios, pois resultou em uma tensão média máxima de aproximadamente 107,3 MPa, bem inferior

aos resultados anteriores. Neste ensaio ocorreu também uma alta discrepância dos dados tendo um desvio padrão de aproximadamente 45,67. O pior resultado foi da amostra 5.5, onde esta se mostrou muito frágil, ou seja, é evidente que tenha ocorrido algum defeito na união, como vazio ou trinca.

A Figura 31 mostra os corpos de prova do sexto parâmetro após a realização do ensaio de tração.

Figura 31 – Amostras do ensaio de tração para 2000 rpm e 20 mm/min

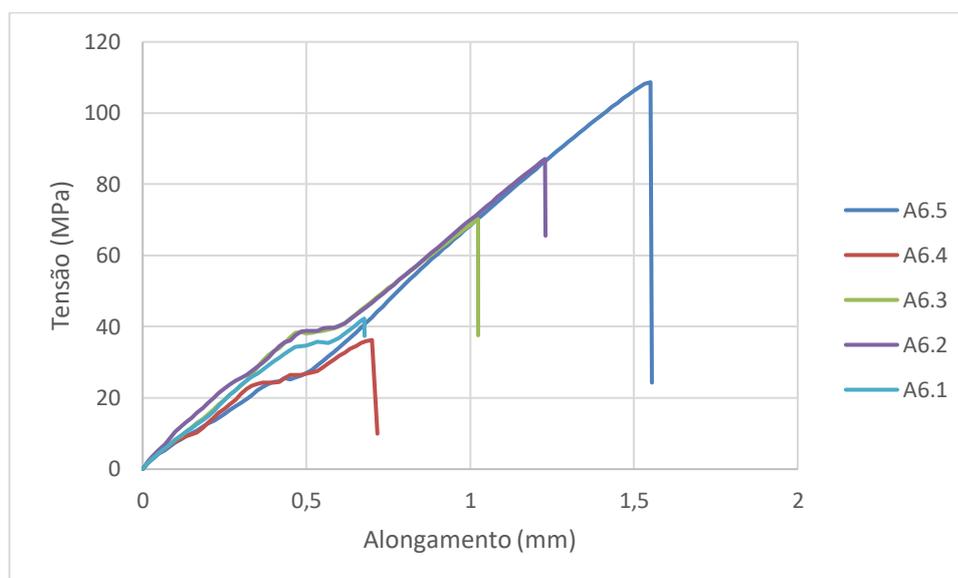


Fonte: Próprio autor.

As amostras, ilustrada na Figura 31, apresentaram vazios, e por este motivo, os resultados obtidos não foram satisfatórios. Em todos os casos, a ruptura ocorreu na união e somente a amostra 6.1 rompeu de forma menos frágil.

Com os dados obtidos no ensaio do sexto parâmetro, a Figura 32 mostra os resultados através do gráfico de tensão alongamento.

Figura 32 – Gráfico de tensão alongamento para 2000 rpm e 20 mm/min



Fonte: Próprio autor.

Neste parâmetro foram obtidos os piores resultados, pois este foi o que apresentou maiores defeitos na soldagem. A tensão média máxima obtida foi de aproximadamente 68,91 MPa, onde, em relação aos outros parâmetros, ficou muito baixa. O desvio padrão obtido foi de aproximadamente 30,37, porém neste caso, a qualidade da solda foi avaliada pela tensão média.

Para uma melhor comparação entre os parâmetros de soldagem utilizado, a Tabela 8 mostra os dados estatísticos para cada relação de parâmetro. Com a intenção de obter um melhor entendimento da Tabela 8, foi adotada a seguinte nomenclatura:

1000/10

Onde, o primeiro número indica a velocidade de rotação em rpm e o segundo número, após a barra, indica a velocidade de avanço em mm/min.

Tabela 8 – Comparação dos dados estatísticos de cada parâmetro

	1000/10	1000/20	1500/10	1500/20	2000/10	2000/20
Tensão média (MPa)	152,91	137,74	146,56	178,48	107,30	68,91
Erro padrão	16,95	17,70	6,01	32,68	20,42	13,58
Mediana (MPa)	161,69	144,06	150,45	202,42	110,05	70,23
Desvio padrão	37,9	39,58	13,43	73,08	46,67	30,37
Variância da amostra	1436,59	1566,46	180,33	5340,56	2085,64	922,11
Tensão mínima (MPa)	94,73	88,74	128,70	98,47	34,89	36,26
Tensão máxima(MPa)	192,63	186,37	162,04	252,80	150,88	108,66

Fonte: Próprio autor.

Analisando a Tabela 8, o terceiro parâmetro foi o que obteve o menor desvio padrão e conseqüentemente o menor erro padrão, isto é, foi o que apresentou os resultados mais próximos das cinco amostras ensaiadas. Para a tensão média, o quarto parâmetro obteve o maior valor, porém neste ensaio o desvio padrão ficou muito alto.

Os três primeiros parâmetros foram os que obtiveram maior proximidade dos resultados, sendo estes com velocidades de rotação de 1000 e 1500 rpm. Para a velocidade de 2000 rpm, pode-se notar que os resultados obtidos não foram satisfatórios, pois a tensão média ficou baixa.

Portanto, os dados que apresentaram os melhores resultados no ensaio de tração foram para uma velocidade de rotação de 1500 rpm e velocidade de avanço de 10 mm/min.

4.3 Macrografia

A partir das amostras obtidas pelo processo de FSW, foram feitos cortes transversais para analisar a mistura dos materiais e longitudinais, para o lado do alumínio e do cobre, afim de obter uma avaliação por macrografia.

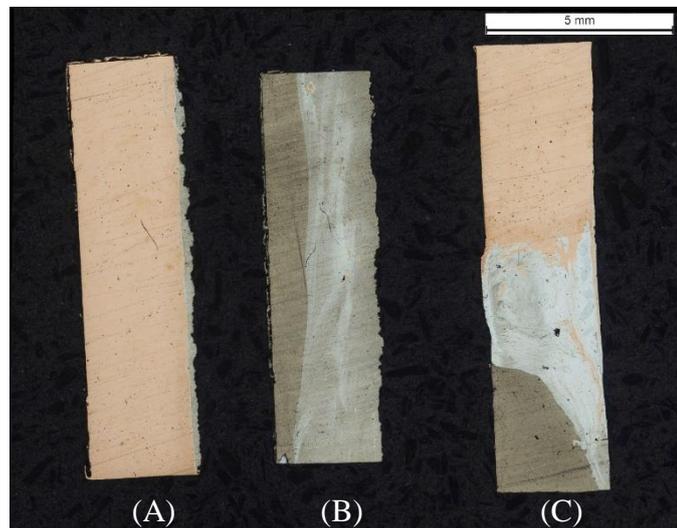
A maior parte das imagens apresentaram defeitos do tipo vazios, onde a mistura dos materiais não ocorreu de forma correta devido ao desgaste da ferramenta ou ao parâmetro utilizado.

Para um melhor entendimento das imagens, foi empregado as seguintes legendas:

- (A): Corte longitudinal para o lado do cobre;
- (B): Corte longitudinal para o lado do alumínio;
- (C): Corte transversal.

Com as amostras da macrografia finalizadas, a Figura 33 mostra o resultado para o primeiro parâmetro.

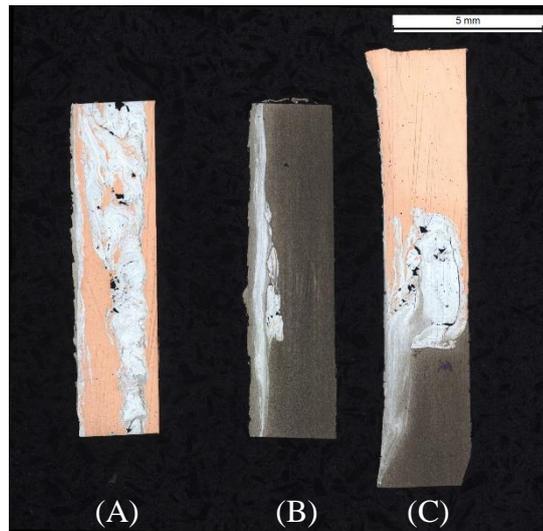
Figura 33 – Macrografia para rotação de 1000 rpm e avanço 10 mm/min



Fonte: Próprio autor.

Analisando a Figura 33, nota-se que a mistura dos materiais no corte C ocorreu de forma correta, aparecendo apenas um pequeno vazio na união. No corte B, pode-se observar a região no qual foi afetada termicamente pelo processo FSW, já o corte A, somente se consegue visualizar a região do cordão da solda. Para o segundo parâmetro a macrografia resultante é exibida na Figura 34.

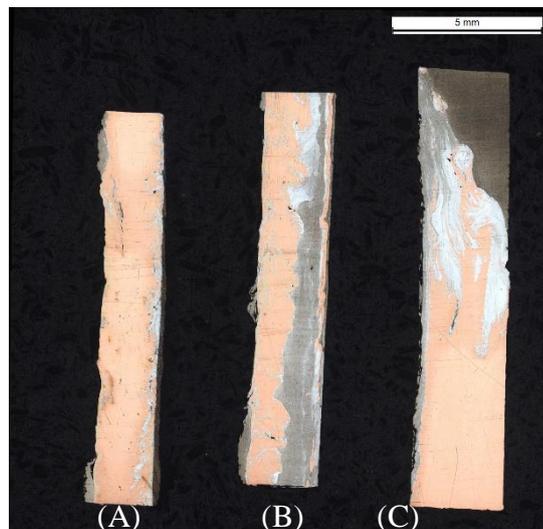
Figura 34 – Macrografia para rotação de 1000 rpm e avanço 20 mm/min



Fonte: Próprio autor.

Com uma velocidade de avanço maior e mesma rotação, a macrografia apresentou maior quantidade de vazios, em relação ao primeiro parâmetro, apesar de obter uma boa mistura dos materiais no corte C. O corte A também apresentou alguns vazios, onde pode-se observar na Figura 34 e neste é possível observar uma parte da mistura dos materiais no cobre e o cordão de solda, já para o corte B, não apresentou nenhum defeito. A macrografia obtida do terceiro parâmetro está ilustrada na Figura 35.

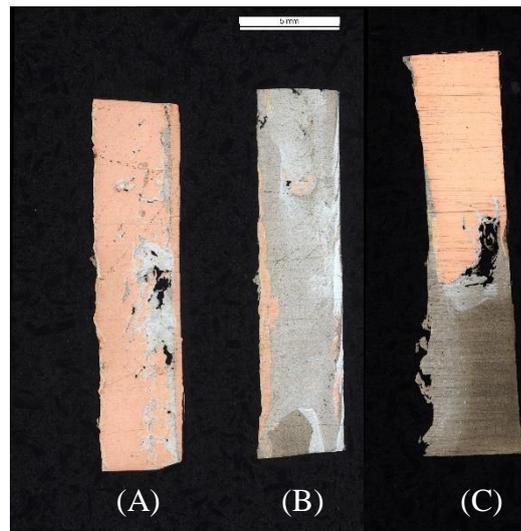
Figura 35 – Macrografia para rotação de 1500 rpm e avanço 10 mm/min



Fonte: Próprio autor.

Os resultados do terceiro parâmetro para o corte C foram satisfatórios, pois a mistura dos materiais ocorreu da forma certa e não apresentou nenhum vazio. Os cortes A e B não apresentaram nenhum defeito e somente no corte B apresentou parte do cobre devido a mistura. A macrografia obtida do quarto parâmetro está mostrada na Figura 36.

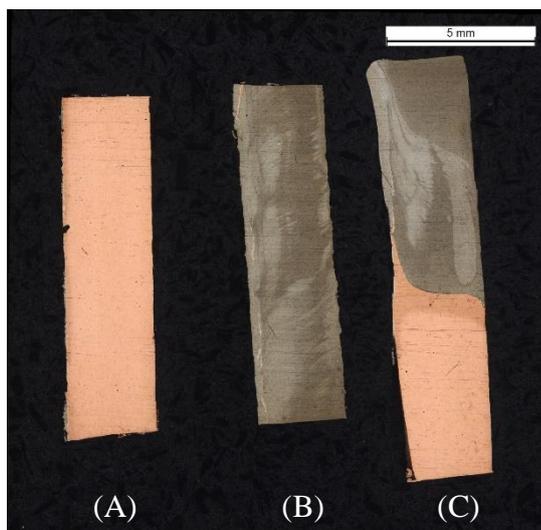
Figura 36 – Macrografia para rotação de 1500 rpm e avanço 20 mm/mn



Fonte: Próprio autor

O corte C deste parâmetro foi que apresentou o maior vazio em relação aos outros e a mistura dos materiais não aconteceu de forma correta como se pode observar. Os cortes A e B também apresentaram vazios, porém no B apareceu apenas um pequeno vazio. A macrografia do quinto parâmetro está exibida na Figura 37.

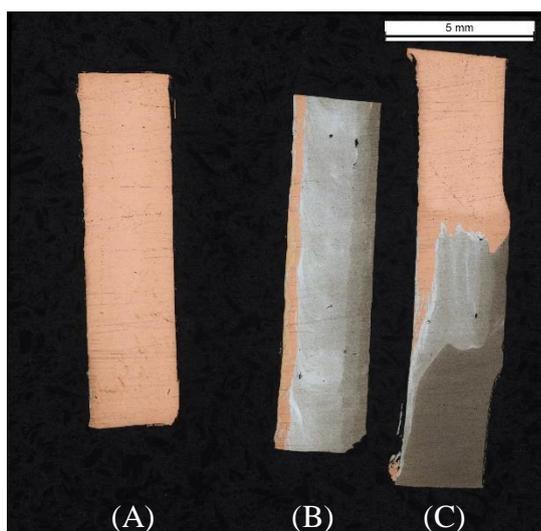
Figura 37 – Macrografia para rotação de 2000 rpm e avanço 10 mm/min



Fonte: Próprio autor.

No corte C a mistura não aconteceu da forma correta comparado aos parâmetros anteriores, pois a região da mistura não aparece nesta macrografia, tendo apenas a região afetada termicamente. Nenhum dos cortes apresentaram vazios como se pode observar. A macrografia obtida para o sexto parâmetro está mostrada na Figura 38.

Figura 38 – Macrografia para rotação de 2000 rpm e avanço 20 mm/min



Fonte: Próprio autor.

Analisando a Figura 38, pode-se observar que no corte C apareceu alguns pequenos vazios, porém a mistura dos materiais ficou satisfatória. O corte B

apresentou alguns vazios e resquícios da mistura. O corte A nada apresentou nesta macrografia.

Tendo como comparação a análise das macrografia das amostras, o parâmetro que apresentou melhores resultado foi para uma velocidade de rotação de 1500 rpm e avanço de 10 mm/min.

Pode-se observar também que em todos os casos em que a velocidade de avanço era 20 mm/min apresentou algum vazio, mesmo este sendo pequeno. O pior caso deste defeito apareceu para uma velocidade de rotação de 1500 rpm e velocidade de avanço de 20 mm/min.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na inspeção visual, os parâmetros que apresentaram melhores resultados foram os quatros primeiros, onde este tem velocidade de rotação 1000 e 1500 rpm e avanço de 10 e 20 mm/min, já para o ensaio de tração, somente um parâmetro se destacou, sendo este com rotação de 1500 rpm e avanço 10 mm/min, no qual obteve o menor desvio padrão, conseqüentemente o menor erro padrão.

A macrografia revelou alguns defeitos no qual não se conseguia visualizar anteriormente e deu para perceber que, na velocidade de avanço de 20 mm/min, todas as amostras apresentaram vazios de tamanhos diferentes. Neste caso, a única amostra que obteve uma mistura boa dos materiais e não apresentou nenhum defeito foi para velocidade de rotação de 1500 rpm e avanço de 10 mm/min.

A partir das análises, é possível observar defeitos que ocorreram nas uniões, no qual uma possível justificativa para o alto desvio padrão obtido no ensaio de tração, para rotação de 1500 rpm e avanço 20 mm/min, o aparecimento de vazios e também como influência, o cálculo da tensão, pois a área de cada corpo de prova pode variar. Além disso, muitos defeitos ocorreram devido ao desgaste do pino de penetração da ferramenta, ocasionado defeitos na mistura dos materiais, no qual estes são vazios e trincas.

Sendo assim, é possível afirmar que o objetivo principal e específico foram alcançados, pois o processo realizado neste trabalho obteve uma união de qualidade. O parâmetro que apresentou melhores resultados nas análises foi para velocidade de rotação de 1500 rpm e avanço de 10 mm/min. Além disso, pode-se dizer que os

parâmetros de soldagem possuem uma faixa de velocidades de rotação no qual se obtém uma junta de qualidade.

Como trabalhos futuros, necessita de um estudo mais aprofundado na ferramenta de soldagem utilizada neste processo, pois apresentou muito desgaste mesmo obtendo uma dureza alta. Para melhorar estes resultados, é preciso fazer uma análise, utilizando estes parâmetros, através de ensaio de dureza da união e a realização de uma micrografia, onde poderá se visualizar melhor a qualidade da junta.

REFERÊNCIAS

ALCAN. **Manual de Soldagem**. 1ª Ed. São Paulo: ALCAN Alumínio do Brasil, 1993. 141p.

ALCOA – **Ligas e têmperas de extrusão**. ALCOA Alumínio e Cia, 2010, 52p. Banco de dados disponível em: <https://www.alcoa.com/brasil/pt/resources/pdf/industria/catalogo_ligas_temperas_2010.pdf>. Acesso em 16 de junho de 2017.

ALMEIDA, D. T. d. **Estudo dos Parâmetros no Processo de Soldagem de Mistura por Atrito (fsw) da Liga de Alumínio 5083-O**. Panambi: [s.n.], 2013. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Graduação.

ALUMIPLAST. **Especificações técnicas: Propriedades mecânicas**. 200-?. Banco de Dados disponível em: <http://www.alumiplast.com.br/documentos/propriedades_mecanicas.pdf>. Acesso em 16 de novembro de 2017.

CAPELARI, T.V. **Avaliação da Geometria de Ferramenta e Parâmetros do Processo FSW na Soldagem da Liga de Alumínio AA 5052**. 2006. 69f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2006.

COOK, G.E. et al., Controlling Robotic Friction Stir Welding. **Welding Journal**, vol. 82, nº6, 2003, p. 28-34.

CRUZ, Marcio F., NETO, Carlos M. **Friction stir welding – Review: Potencial de aplicação na indústria aeroespacial**. XI simpósio de aplicações operacionais em áreas de defesa. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, p. 1-5, 2009.

DAVIS, J. R.. ASM International (Ed). **ASM Handbook V.2: Properties and Selection Nonferrous alloys and Special-Purpose materials**. 10th ed., Metals Park, Ohio, 1990.

FIARAVANTI, A.S. **Soldagem por FSW de Ligas de Alumínio ALCLAD AA2024-T3 e AA7075-T6**. 2008. 78f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008

FRATINI, L. et al. CDRX modelling in friction stir welding os aluminium alloys. **International jornal of machine tools & manufacture**, 45, p. 1188-1194, 2005.

GEMME, F. et al. Numerical analysis of the dwell phase in friction stir welding and comparison with experimental data. **Materials Science and Engineering A**, 527, p. 4152-4160, 2010.

GENEVOIS, C.; Deschamps, A.; Denquin, A.; Doisneau-cottignies, B.. “Quantitative investigation of precipitation and mechanical behaviour for AA2024 friction stir welds”. **Acta Materialia**, vol. 53, pp. 2447–2458, 2005.

GUERRA, M.; SCHMIDT, C.; MCCLURE, J.C.; MURR, L.E.; NUNESB, A.C. **Flow patterns during friction stir welding**. *Materials Characterization*, 49, p. 95– 101, 2003.

HASSAN, Kh. A. A.; NORMAN, A. F.; PRICE, D. A.; PRANGNELL, P. B.. “Stability of nugget zone grain structures in high strength Al-alloy friction stir welds during solution treatment”. **Acta Materialia**, vol. 51, pp. 1923–1936, 2003.

HE, Xiacong et al. A review of numerical analysis of friction stir welding. **Progress in Materials Science**, 65, p. 1-66, 2014.

INFOMET. **Hanbook: Metais e Ligas**. 200-?. Banco de Dados disponível em: <<http://www.infomet.com.br/site/metais-e-ligas-conteudo-ler.php?codAssunto=109>>. Acesso em 17 de junho de 2017.

MARTINS, Margarida M. M. **Estudo do comportamento das ligas de alumínio 6061 e 6080**. São Tiago: Universidade de Aveiro, 2008.

MISHRA, R.S., MA, Z.Y. Friction Stir Welding and Processing. **Materials Science and Engineering**, v. 50, p. 1-78, 2005.

PEEL, M., et al., Microstructure, mechanical properties and residual stresses as a function of welding speed in aluminium AA5083 friction stir welds. **Acta Materialia**, 51, p. 4791-4801, 2003.

ROSALES, Marcio J. C. et al. Friction Stir Welding em ligas de alumínio. **Intellectus Revista Acadêmica Digital**, Jaguariúna, v. 6, n. 11, p. 46-53, jul./set. 2010.

SAEID, T.; ABDOLLAH-ZADEH, A.; SAZGARI, B. Weldability and Mechanical Properties of Dissimilar Aluminum-Copper Lap Joints Made by Friction Stir Welding. **Journal of Alloys and Compounds**, 490, p.652-655, 2010.

SANTOS, Flávio J. **Soldagem de alumínio**: Influência dos parâmetros de pulso na distorção angular. São Paulo: Livro grátis, 2009.

SANTOS, J.F. et al. Metallurgy and weld performance in friction stir welding. In: LOHWASSER, D.; CHEN, Z. Friction Stir Welding: **From Basics to Applications**. Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, p.317-319, 2010.

SHACKELFORD, James F. **Introdução à ciência dos materiais para engenheiros**. 6 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

TAN, C. W. et al. Microstructural evolution and mechanical properties of dissimilar Al-Cu joints produced by friction stir welding. **Materials and Design**, 51, p. 466-473, 2013.

THOMAS, W. M. et al. "**Friction Stir Butt Welding**" International patent application No.PCT/GB92/02203 and GB patent application No.9125978.8, 6 Dezembro, 1991.

TANG, W et al. Heat Input and Temperature Distribution in Friction Stir Welding, . **Process. Manuf. Sci.**, Vol 7, 1998, p 163-172.

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

ANEXO – Designação das têmperas do alumínio

Têmpera	Definição
F	Conforme fabricado
O	Recozido
H1	Apenas endurecido por encruamento
H2	Endurecido por encruamento e parcialmente recozido
H3	Endurecido por encruamento e estabilizado
T1	Resfriado a partir de um processo de moldagem e temperatura elevada e naturalmente envelhecido para uma condição substancialmente estável
T2	Resfriado a partir de um processo de moldagem e temperatura elevada, trabalhado a frio e naturalmente envelhecido para uma condição substancialmente estável
T3	Tratamento térmico para solubilização, trabalhado a frio e naturalmente envelhecido para uma condição substancialmente estável
T4	Tratamento térmico para solubilização e naturalmente envelhecido para uma condição substancialmente estável
T5	Resfriado a partir de um processo de moldagem em temperatura elevada e envelhecido artificialmente
T6	Tratamento térmico para solubilização e envelhecimento artificialmente
T7	Tratamento térmico para solubilização e estabilizado
T8	Tratamento térmico para solubilização, trabalhado a frio e envelhecimento artificialmente
T9	Tratamento térmico para solubilização, envelhecimento artificialmente e trabalhado a frio
T10	Resfriado a partir de um processo de moldagem em temperatura elevada, trabalhado a frio e envelhecido artificialmente

Fonte: Adaptado de Shackelford (2008).