

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA
CAMPUS ALEGRETE
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESTUDOS PRELIMINARES PARA O DESENVOLVIMENTO DE
UM CONECTOR BIMETÁLICO DE COBRE E ALUMÍNIO
PELA SOLDAGEM POR FRICÇÃO CONVENCIONAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

JOÃO RAFAEL DORNELES ENDERLE

**Alegrete, RS, Brasil
2023**

JOÃO RAFAEL DORNELES ENDERLE

**ESTUDOS PRELIMINARES PARA O DESENVOLVIMENTO DE UM CONECTOR
BIMETÁLICO DE COBRE E ALUMÍNIO PELA SOLDAGEM POR
FRICÇÃO CONVENCIONAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Mecânica na
Universidade Federal do Pampa.

Orientador: Aldoni Gabriel Wiedenhof

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) .

E56e Enderle, João Rafael Dorneles
ESTUDOS PRELIMINARES PARA O DESENVOLVIMENTO DE UM
CONECTOR BIMETÁLICO DE COBRE E ALUMÍNIO PELA
SOLDAGEM POR FRICÇÃO CONVENCIONAL / João Rafael
Dorneles Enderle.
41 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) --
Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA MECÂNICA,
2023.

"Orientação: Aldoni Gabriel Wiedenhof".

1. Soldagem por fricção convencional. I. Título.

JOÃO RAFAEL DORNELES ENDERLE

ESTUDOS PRELIMINARES PARA O DESENVOLVIMENTO DE UM CONECTOR BIMETÁLICO DE COBRE E ALUMÍNIO POR SOLDAGEM POR FRICÇÃO CONVENCIONAL.

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.

Dissertação defendida e aprovada em: 30, janeiro de 2023.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Aldoni Gabriel Wiedenhoft
Orientador
Unipampa

Prof. Dr. Tonilson de Souza Rosendo
Unipampa

Prof. Dr. Cristian Pohl Meinhardt
Unipampa



Assinado eletronicamente por **CRISTIAN POHL MEINHARDT, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 07/02/2023, às 14:47, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **ALDONI GABRIEL WIEDENHOFT, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 07/02/2023, às 14:53, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **TONILSON DE SOUZA ROSENDO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 07/02/2023, às 15:39, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1037696** e o código CRC **9825569E**.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha avó Vera Maria Dorneles, minha mãe Lidiani Dorneles, meu pai Eliandro Becon e a minha irmã Rafaela Dorneles que sempre estiveram ao meu lado, apoiando, incentivando e acreditando no meu potencial.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar ao Senhor por toda graça, benção e oportunidades que tive ao decorrer da minha vida, aos meus familiares supra citados e os demais, que me proporcionaram tudo o possível para que eu estivesse aqui realizando este objetivo.

Aos meus tios-avós Débora Dorneles e Lélío Rodrigues, que acreditaram nesse sonho e deram total suporte para que eu o alcançasse.

A minha madrinha Roberta Dorneles, que por mais que a distância nos afastasse, sempre foi uma referência no que diz respeito aos estudos, conhecimentos e a vida acadêmica.

Ao proferssor Dr. Aldoni Gabriel Wiedenhof, por ter aceito a orientação, sendo muito participativo e colaborativo com o desenvolvimento desse trabalho.

Aos amigos e colegas que estiveram juntos durante essa jornada, dentre eles Alan Almeida, Alexandre Vasconcellos, Dionathan Alves, Frederico Temp e Lucas Dias.

Aos demais professores, técnicos e funcinários da Unipampa, pelos conhecimentos, auxílios e serviços prestados.

ESTUDOS PRELIMINARES PARA O DESENVOLVIMENTO DE UM CONECTOR BIMETÁLICO DE COBRE E ALUMÍNIO PELA SOLDAGEM POR FRICÇÃO CONVENCIONAL

Autor: João Rafael Dorneles Enderle

Orientador: Aldoni Gabriel Wiedenhof

Local e data: Alegrete, 20 de Janeiro de 2023.

A soldagem por fricção e mistura mecânica quando comparada com os demais métodos de soldagem no estado sólido é uma das mais recentes, porém já existem muitos estudos e aplicações para ela. Essa técnica consiste na união de dois materiais difíceis de soldar por técnicas convencionais. O método da soldagem por fricção que une os materiais no estado sólido sem que ocorra o fusão dos mesmos. A qualidade dessa solda depende de diversos fatores como: velocidade de rotação, avanço e o tempo de contato. O presente trabalho tem como objetivo desenvolver um conector bimetálico entre o cobre (C110) e o alumínio (6060 T5). Para tal foram propostos três casos diferentes: o primeiro e o segundo utilizaram um avanço contínuo de 100 mm/min, com rotações de 3000, 5000 e 7000 RPM para os corpos de prova cônicos e com furo, no caso 1 o alumínio possuindo o furo cônico e o cobre com o formato cônico, no caso 2 as geometrias entre os materiais são invertidas, já no terceiro caso os corpos de prova possuíam ambas as extremidades planas e as velocidades adotadas foram de 1000, 2000 e 3000 RPM, mantendo o mesmo avanço dos casos anteriores. Os objetivos consistem na análise visual e também no ensaio de tração para determinar os melhores parâmetros. De acordo com essa análise, as demais fases do estudo, comparando com a bibliografia e outros trabalhos, percebeu-se que mesmo nas melhores situações os resultados não podem ser considerados satisfatórios, por exemplo, temos que a maior força resistida foi de 2949,03 N e uma resistência média a tração de 21,01 Mpa, valores encontrados no caso 3 à 1000 RPM, evidenciando a baixa resistência em relação aos materiais de base. Porém esse estudo serve de base e como pré-teste na comparação e desenvolvimento de novas geometrias com diferentes parâmetros.

Palavras-chave: **Soldagem por fricção, conector bimetálico, cobre, alumínio.**

ABSTRACT

PRELIMINARY STUDIES FOR THE DEVELOPMENT OF A BIMETALIC COOPER AND ALUMINIUM CONNECTOR BY THE CONVENTIONAL FRICTION WELDING

Author: João Rafael Dorneles Enderle

Advisor: Aldoni Gabriel Wiedenhof

Data: Alegrete, January 20, 2023.

Friction welding and mechanical mixing, when compared to other solid state welding methods, is one of more recent, but there are already many studies and applications for it. This technique consists of joining two materials that are difficult to weld using conventional techniques. The friction welding method that joins materials in a solid state without melting them. The quality of this weld depends on several factors such as: rotation speed, feed and contact time. The present work aims to develop a bimetallic connector between copper (C110) and aluminum (6060 T5). For this, three different cases were proposed: the first and the second used a continuous advance of 100 mm/min, with rotations of 3000, 5000 and 7000 RPM for the conical proof bodies and with hole, in case 1 the aluminum having the hole conical and copper with conical shape, in case 2 the geometries between the materials are inverted, in the third case, the proof bodies had both ends flat and the speeds adopted were 1000, 2000 and 3000 RPM, maintaining the same advance of the previous cases. The objectives consist of the visual analysis and also the tensile test to determine the best parameters. According to this analysis, the other phases of the study, comparing with the bibliography and other studies, it was noticed that even in the best situations the results cannot be considered satisfactory, for example, it has been that the greatest resisted force was 2943,03 N and an average tensile strength of 21,01 MPa, values found in case 3 at 1000 RPM, evidencing the low resistance in relation to the base materials. However, this study serves as a basis and as a pre-tests in the comparison and development of new geometries with different parameters.

Keywords: Friction Welding, bimetallic connector, copper, aluminum.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Tipos de juntas para soldagem por atrito	17
Figura 2: Etapas da soldagem	17
Figura 3: Esquema microscópico das superfícies em atrito	18
Figura 4: Equipamento de soldagem	18
Figura 5: Variáveis do sistema convencional	19
Figura 6: Influência da velocidade de soldagem no tempo de aquecimento das peças com pressão constante	20
Figura 7: Influência da pressão de soldagem no tempo de aquecimento com velocidade de soldagem constante.....	21
Figura 8: Efeitos das variáveis do processo de soldagem por atrito.....	22
Figura 9: Exemplos de conectores bimetálicos	25
Figura 10: Cortadora metalográfica.....	26
Figura 11: Corpos de prova com 40 mm	26
Figura 12: Torno Mecânico Toptech	27
Figura 13: Dimensões em milímetros para os corpos de prova cônicos	27
Figura 14: Dimensões em milímetros para os corpos de prova com furo	28
Figura 15: torno mecânico Clark BV20B-L x 550	28
Figura 16: Corpos de prova de cobre cônicos.	29
Figura 17: Corpos de prova de cobre com furo	29
Figura 18: Corpos de prova de alumínio cônicos	29
Figura 19: Corpos de prova de alumínio com furo.....	30
Figura 20: Centro de usinagem CNC ROMI D 800	30
Figura 21: Código da soldagem caso 1	30
Figura 22: Código da soldagem caso 2.....	31
Figura 23: Código da soldagem caso 3.....	31
Figura 24: Corpos de porva soldados caso 1	32
Figura 25: Corpos de porva soldados caso 2	32
Figura 26: Corpos de porva soldados caso 3	32
Figura 27: EMIC DL 30000	33
Figura 28: Dispositivo de acoplamento da célula de carga	33
Figura 29: Corpos de prova caso 1 soldados em detalhe à 3000, 5000 e 7000 RPM.....	34
Figura 30: Corpos de prova caso 2 soldados em detalhe à 3000, 5000 e 7000 RPM.....	35

LISTA DE FIGURAS

Figura 31: Corpos de prova caso 3 soldados em detalhe à 3000, 5000 e 7000 RPM.....	35
Figura 32: Limite de resistência no caso 1	36
Figura 33: Limite de resistência médio no caso 1	36
Figura 34: Corpos de prova rompidos caso 2 em detalhe à 3000, 5000 e 7000 RPM.....	37
Figura 35: Limite de resistência no caso 2	37
Figura 36: Limite de resistência médio no caso 2	38
Figura 37: Corpos de prova rompidos caso 3 em detalhe à 1000, 2000 e 3000 RPM.....	38
Figura 38: Limite de resistência no caso 3	39
Figura 39: Limite de resistência médio no caso 3	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Particularidades do processo de soldagem	19
Tabela 2: Valores da força e velocidade crítica mínima de soldagem.	20
Tabela 3: Valores de algumas variáveis do processo	22
Tabela 4: Combinações de materias soldáveis por fricção	22
Tabela 5: Classificação das ligas de cobre	23
Tabela 6: Características do cobre eletrolítico C110.....	23
Tabela 7: Elementos das ligas de alumínio	24
Tabela 8: Propriedades do alumínio 6060 T5.....	24
Tabela 9: Relação desvio padrão x tensão média	41
Tabela 10: Eficiência das propriedades mecânicas obtidas.....	42

LISTA DE SIGLAS

INPE – Instituto Nacional de Pesquisa e Extensão

mm – milímetro

MPa – Mega Pascal

RPM – Rotações por minuto

UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais

ZTA – Zona termicamente afetada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 REVISÃO DO TEMA.....	16
2.1 COBRE ELETROLÍTICO C110.....	23
2.2 LIGA DE ALUMÍNIO 6060 T5.....	24
2.3 CONECTORES BIMETÁLICOS	25
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS.....	26
3.2 PARÂMETROS DE SOLDAGEM.....	31
3.3 INSPEÇÃO VISUAL E ENSAIO.....	33
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
4.1 ANÁLISE VISUAL	34
4.2 ENSAIO DE TRAÇÃO.....	36
5 CONCLUSÕES	41
6 REFERÊNCIAS	42

1 INTRODUÇÃO

A fim de cumprir com as altas exigências e demandas do mercado, os processos de soldagem vêm sendo mais estudados e aperfeiçoados. Um exemplo disso é a união de materiais no estado sólido, como é o caso da solda por fricção. Processo esse, que não envolve a fusão dos metais de base, pois o atrito gerado entre as partes metálicas controla a geração de calor e o aporte térmico. Pelo fato de não haver fusão é possível unir materiais de baixa soldabilidade, o que não seria viável em processos de soldagem convencionais.

Segundo ALVES, 2016, no Brasil, este processo é utilizado na fabricação de peças do setor automotivo, como na produção de válvulas para motores a combustão, fabricação de *drill pipes* na indústria de petróleo e têm sido usado para fabricação de conectores para cabos de alumínio.

Com o intuito de obter maior desempenho e melhores qualidades, sendo as principais a alta resistência mecânica e o baixo peso, este estudo investigará a união de ligas de alumínio e cobre.

O processo utilizado na união desses metais será a soldagem por fricção convencional, onde o aquecimento responsável por unir os materiais é decorrente do atrito entre as duas superfícies. Esse método baseia-se numa peça em rotação se aproximar de outra fixa, tendo início o atrito, assim as peças aquecem, se deformam e juntamente com a pressão realizam a solda, MAALEKIAN, 2007.

Com isso justifica-se esse trabalho que busca construir um conector bimetálico para ligar cabos de alumínio em barramentos de cobre.

1.1 Objetivos gerais

O principal objetivo do trabalho é realizar o desenvolvimento de um conector bimetálico pelo processo de soldagem por fricção convencional entre alumínio (6060 T5) e o cobre eletrolítico C110.

1.2 Objetivos específicos

Como objetivo específico têm-se por analisar e interpretar os resultados, utilizando da análise visual e o ensaio de tração da junta. Visando avaliar os resultados de maneira que seja possível determinar a qualidade da junta e satisfatoriedade da união soldada.

2 REVISÃO DO TEMA

Segundo a *American Welding Society* (AWS, 1991) a soldagem por fricção é um processo de união no estado sólido na qual a ligação é realizada com temperaturas menores do que as de fusão dos materiais. O calor necessário é produzido pelo atrito gerado no movimento relativo entre as superfícies metálicas em contato. A região da junta soldada é aquecida e amolecida, assim a pressão exercida pela máquina de soldagem, conforma a junta soldada pela conversão direta de energia mecânica em energia térmica.

Esse processo de soldagem possibilita combinar um número de materiais maior quando comparado ao processo por fusão. Pode-se citar os materiais como aços de médio e alto teor de carbono que possuem difícil soldabilidade por fusão, são unidos através da solda por fricção, DONOHUE, 2001. E conforme KOU, 2003, assim como os similares é permitido unir materiais pensados incompatíveis, com grande diferença na temperatura de fusão, como é o caso do aço com cobre, alumínio com magnésio, ligas de níquel com aço e titânio com cobre.

A primeira patente relacionada ao processo de fricção está ligada a J. H Bevington do ano de 1891, trazendo a ideia de que o calor poderia ser gerado entre uma matriz rotativa e uma peça fixa, CROSSLAND, 1971. Já em 1924 Ritcher patenteou a soldagem por fricção na Inglaterra e posteriormente na Alemanha em 1929, RITCHER, 1929. Ainda de acordo com CROSSLAND, 1971, o uso em larga escala da solda por fricção está associado ao russo A.J Churikov, que realizou estudos científicos e obteve sucesso soldando hastes de metal, patenteando o processo em 1956. O instituto de investigação científica da União Soviética foi responsável pela fabricação do primeiro equipamento de soldagem por fricção, VILL, 1962. Segundo WANG et al, 1974, quem levou o processo para os Estados Unidos foi a Caterpillar, que desenvolveu um método derivado da solda por fricção convencional, sendo ele a solda por fricção inercial.

O processo de soldagem por fricção convencional ocorre através de duas peças onde uma rotaciona e a outra se mantém fixa. A parte móvel está presa com uma pinça a um motor, já a parte fixa é levada ao encontro da outra, promovendo o atrito e gerando calor suficiente para atingir a temperatura necessária de união das superfícies, assim que é alcançada essa temperatura a rotação é suspensa, porém a pressão continua até que a união seja soldada por completo, GEARY, 2013.

Segundo WAINER et al, 1992, as soldas realizadas por fricção convencional são

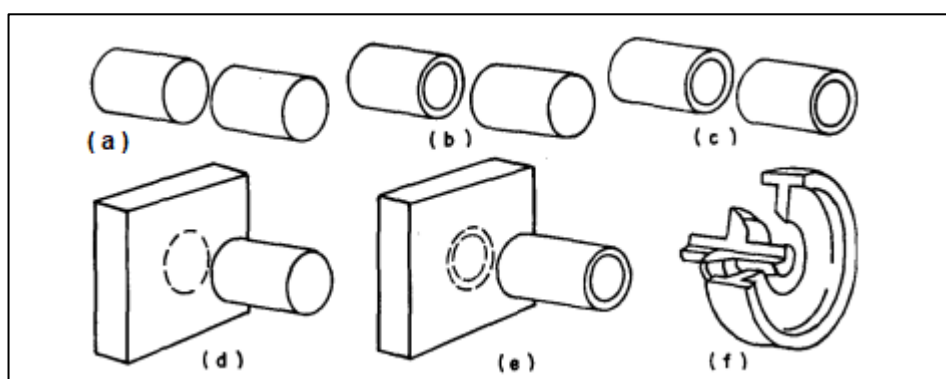
de alta resistência e possuem uma zona termicamente afetada estreita. Além de serem realizadas em poucos segundos.

Pelo fato de o tempo ser curto e da rápida dispersão de calor o material não é fundido, visto que não são alcançadas as temperaturas de fusão dos metais. As impurezas se formam radialmente dando origem a escória, que deve ser removida após o fim da soldagem.

Esse processo torna-se bastante eficiente, pois quase toda a energia cinética é convertida em calor. Seu uso é indicado para barras e tubos de mesmo diâmetro ou em peças com superfícies planas.

Na figura 1 são demonstrados alguns tipos de juntas comuns na soldagem por atrito- (a) barra com barra; (b) barra com tubo; (c) tubo com tubo; (d) barra com placa; (e) tubo com placa e (f) junta angular.

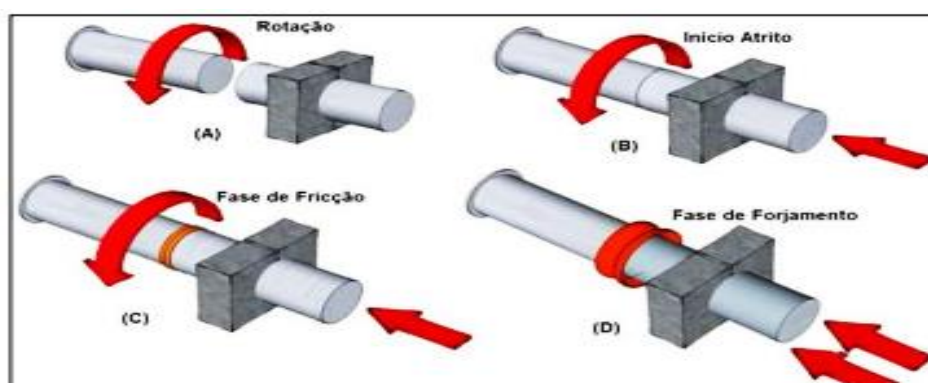
Figura 1: Tipos de juntas para soldagem por atrito.



Fonte: WAINER et al, 1992.

Na figura 2 pode ser observada as quatro etapas principais do processo de soldagem por fricção convencional, numa junta barra com barra.

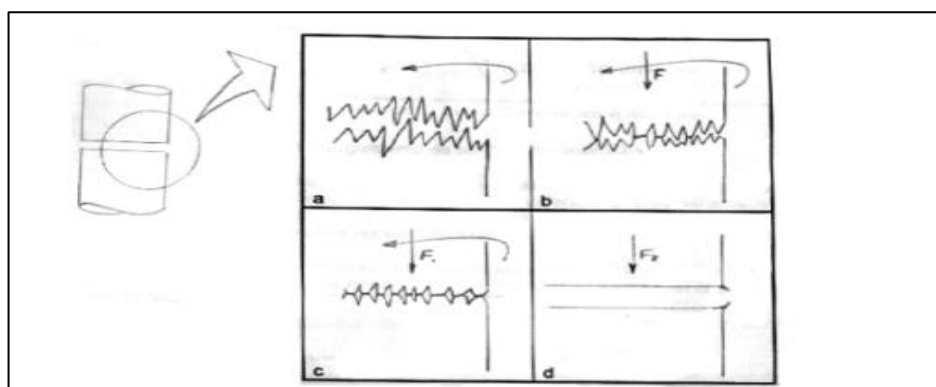
Figura 2: Etapas da soldagem.



Fonte: MATTEI, 2011.

Segundo MARQUES, 2011, em (a) existe a rotação de uma das peças; (b) aplicação da pressão; (c) ocorre a deformação plástica e em (d) finalização do processo. Com a aproximação das superfícies há um aquecimento localizado que a princípio só ocorre nas partes salientes das superfícies (fig. 3), onde há o atrito e temperaturas elevadas para gerar a união e no momento seguinte são cisalhados devido ao movimento da peça, SILVA, 2011.

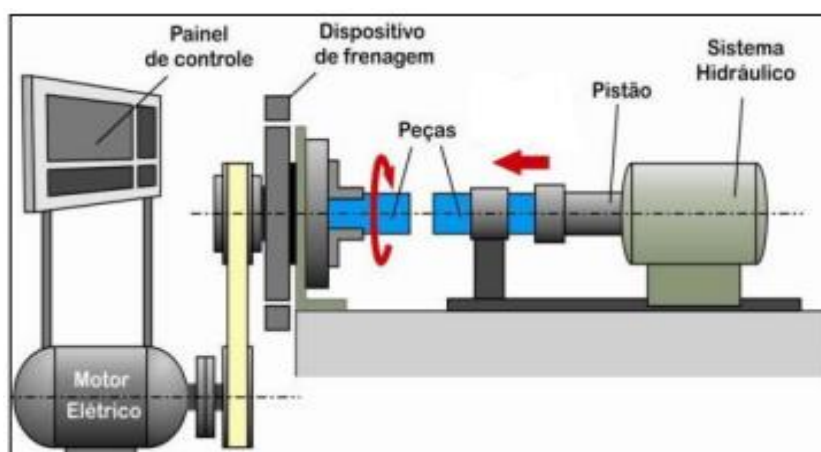
Figura 3: Esquema microscópico das superfícies em atrito.



Fonte: SILVA, 2011.

Na figura 4, tem-se o equipamento de soldagem, onde o motor gira com uma velocidade pré-determinada e constante com uma peça e a outra permanece estacionária.

Figura 4: Equipamento de soldagem.



Fonte: ALVES, 2010.

Na tabela 1 são listados os passos básicos para a realização do processo de soldagem por atrito convencional.

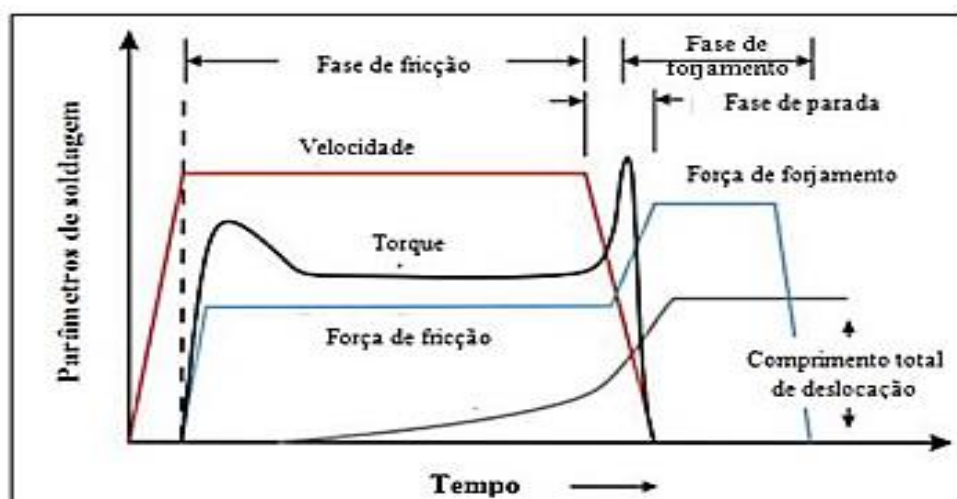
Tabela 1: Etapas do processo de soldagem.

Soldagem por atrito convencional
1. Fixação das partes a serem soldadas no mandril e no cabeçote.
2. Colocação do mandril na rotação adequada.
3. Manutenção da rotação do mandril enquanto o cabeçote avança aplicando pressão entre as superfícies.
4. Manutenção da rotação e da pressão para que as superfícies atinjam a temperatura adequada de soldagem.
5. A rotação é interrompida drasticamente por meio de um freio. A pressão pode ser aumentada para completar a soldagem.

Fonte: Adaptado WAINER et al, 1992.

De acordo com AWS, 1991, SPINDLER, 1994 E GREWE, 1997, as variáveis do processo podem ser definidas como: velocidade relativa das peças; pressão normal ou axial; tempo de aquecimento; comprimento de queima; temperatura das superfícies; tipo de material e duração do tempo de forjamento. A figura 5 demonstra o comportamento das variáveis durante a soldagem.

Figura 5: Variáveis do sistema convencional.



Fonte: Adaptado de ASM HANDBOOK, 1993.

Sabendo que a força é resultante do torque e da velocidade de soldagem, através de relações empíricas chegou-se na tabela 2, que trás as forças necessárias e as velocidades mínimas em (mm/s), para que sejam realizadas as soldas em diferentes materiais.

Tabela 2: Valores da força e velocidade crítica mínima de soldagem.

Material	Força (10^4 N)	Velocidade crítica mínima
Chumbo	50	0,25
Aço inoxidável	260	1,00
Alumínio	380	1,25
Aço-ferramenta	430	1,40
Aço de baixo carbono	470	1,75
Níquel	650	3,25
Titânio	800	3,75
Cobre	950	9,00
Molibdênio	1250	10,00
Tungstênio	1750	12,50

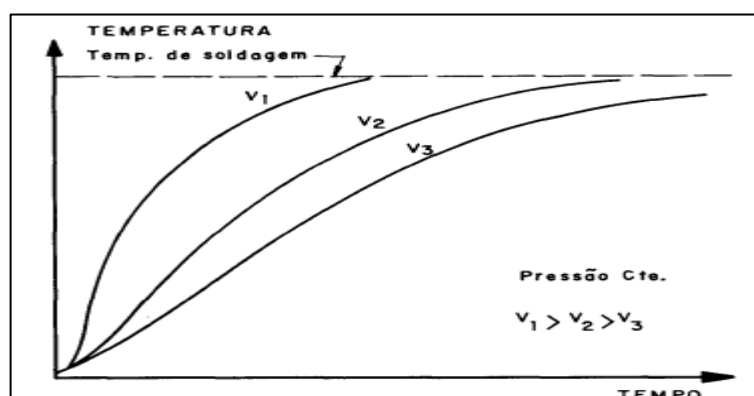
Fonte: WAINER et al, 1992.

Segundo WAINER et al, 1992, por mais que a velocidade de rotação do equipamento de soldagem seja bem abrangente, junto com a pressão e o tempo, tem-se os fatores determinantes na qualidade estrutural da junta.

Existem velocidades de rotação específicas para cada tipo de materiais a serem unidos assim como as suas aplicações, VILL, 1962.

De acordo com ELLIS, 1972, quanto maior a velocidade de rotação, menor é o resfriamento, pois a temperatura será maior e conseqüentemente levará mais tempo para resfriar, maior será a zona termicamente afetada e menor a dureza no contorno da junta soldada. Já com baixas velocidades, são necessárias forças axiais maiores assim como mais torque do equipamento, também tem maiores taxas de resfriamento, menor zona termicamente afetada, apresentando alta dureza e baixa tenacidade na região soldada. Características essas apresentadas de maneira geral para todos metais soldados por fricção convencional.

Figura 6: Influência da velocidade de soldagem no tempo de aquecimento das peças com pressão constante.



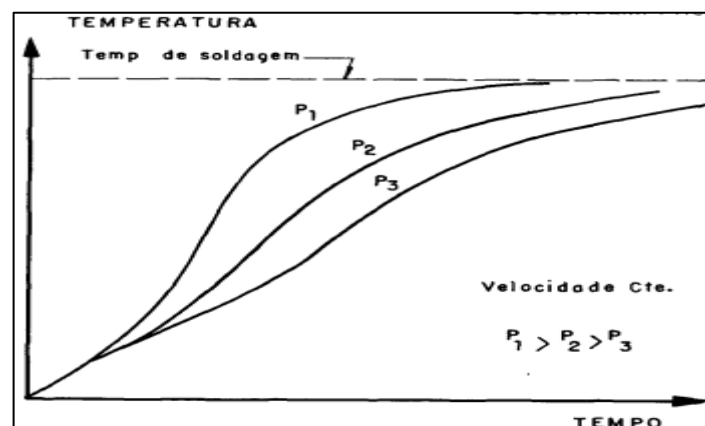
Fonte: WAINER et al, 1992.

Segundo BASHER, 2013, a pressão axial é um dos fatores de maior importância na determinação da qualidade da solda, ela é responsável pelo gradiente de temperatura na interface de ligação, na potência requerida e na redução axial. A pressão axial deve ser suficiente para manter as superfícies em contato o tempo todo e também expulsar as impurezas e óxidos, AWS, 1991.

Por ELLIS, 1992, a pressão influencia na largura e características da zona termicamente afetada, elevadas pressões causam um estreitamento da ZTA e menor dureza na região, ocorre excesso de calor o que fragiliza a ZTA e gera defeitos na solda. No caso de pressões baixas o aquecimento na interface é baixo, fazendo com que a solda seja incompleta e com falhas.

O resultado da interferência da pressão no aquecimento das peças está demonstrado na figura 7.

Figura 7: Influência da pressão de soldagem no tempo de aquecimento com velocidade de soldagem constante.



Fonte: WAINER et al, 1992.

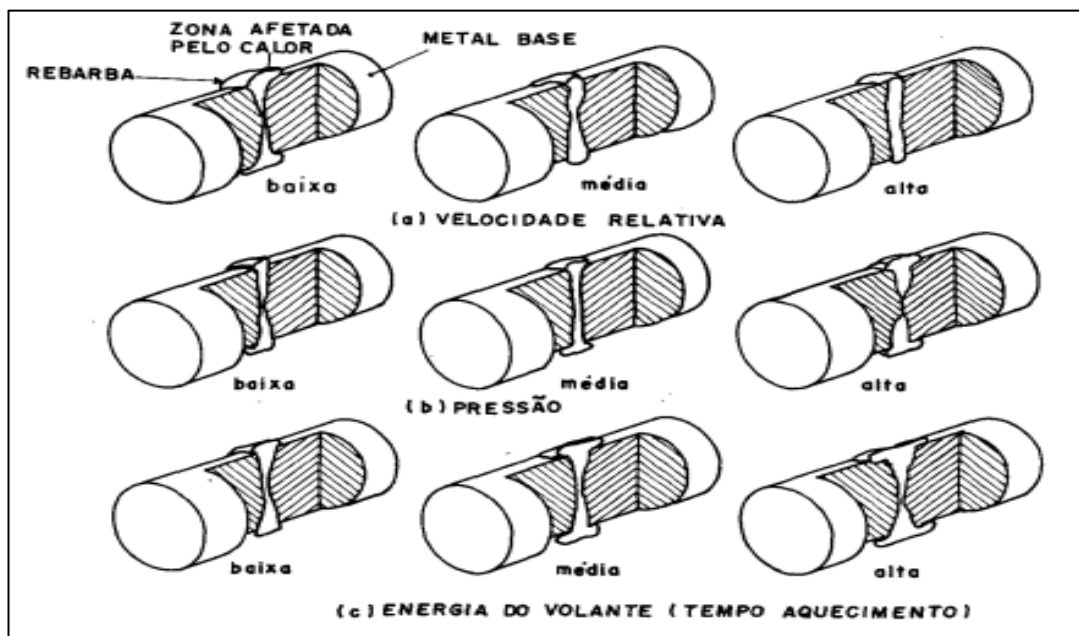
De acordo com VILL, 1962, tempo de aquecimento é o período entre o contato inicial entre as superfícies e após o término da frenagem. Ele sofre influência da velocidade de rotação e da pressão axial. O tempo diminui conforme o aumento da pressão e da velocidade.

Esse fator é responsável pela microestrutura da interface de ligação, profundidade de aquecimento na peça e a largura da ZTA, ELISS, 1972. Para se obter uma boa qualidade de solda é aconselhado um baixo tempo de aquecimento e pouca formação de rebarba, com isso a taxa de resfriamento será maior e se terá boas propriedades mecânicas. Caso se deseje maior tenacidade é indicado aquecimentos mais longos com

taxas de resfriamento menores, EICHHORN, 1963.

Segundo UDAY et al, 2010, se o tempo de aquecimento for insuficiente haverá o surgimento de óxidos aprisionados e regiões não soldadas na interface. Alguns dos efeitos das variáveis são demonstrados na figura 8.

Figura 8: Efeitos das variáveis do processo de soldagem por atrito.



Fonte: WAINER et al, 1992.

A tabela 3 apresenta alguns valores das variáveis da soldagem por atrito convencional.

Tabela 3: Valores de algumas variáveis do processo.

Material	Diâmetro (mm)	Rotação (rpm)	Pressão (kg/mm ²)		Tempo total (s)
			Fase de aquecimento	Fase de forjamento	
Aço-carbono	12,5	3000	34,5	34,5	7
	25,0	1500	52,0	52,0	15
Aço inox (300 e 400)	25,0	3000	83,0	110,5	7
	137,5 (exter.) 112,5 (int.)	800	138,0	138,0	35
Aço inox c/ aço-carbono	18,7	3000	52,0	103,5	10
Aço ferramenta (tipo T-1)	18,7	4000	103,5	138,0	10 ⁽²⁾
Cobre ⁽¹⁾	25,0	6000	34,5	69,0	18
Alumínio com. puro ⁽¹⁾	18,7	3800	27,5	45,0	6
Aços-liga ⁽³⁾	9,4	5000	172,5 ⁽⁴⁾	276,0	10 ⁽²⁾
Aço-liga com aço-carbono ⁽⁵⁾	43,7 (exter.)	6800	17,0 ⁽⁶⁾	41,5	42 ⁽²⁾
	31,2 (int.)	3000	38,0 ⁽⁷⁾	110,5	26 ⁽²⁾
	112,5 (exter.) 81,2 (int.)				

Fonte: WAINER et al, 1992.

Na tabela 4 pode ser observado as possíveis combinações de soldagem por atrito entre diversos materiais e os resultados que podem ser obtidos. Onde (B) significa boa soldabilidade e (X) não soldável.

Tabela 4: Combinações de materias soldáveis por fricção.

	Al	Bronze	Cu	Cu-Ni	Mg	Ni	Aço baixa liga	Aço C	Aço Inox	Aço ferramenta
Al	B	X	B	X	B	B	B	B	B	X
Bronze	X	B	X	X	X	X	X	B		X
Cu	B	X	B	X	X	X	X	B	B	X
Cu-Ni	X	X	X	B	X	X	X	B	B	X
Mg	B	X	X	X	B	X	X			X
Ni	B	X	X	X	X	B	B	B	B	B
Aço baixa liga	B	X	X	X	X	B	B	X	B	B
Aço C	B	X	B	B	X	B	B	B	B	B
Aço Inox	B	X	B	B	X	B	B	B	B	X
Aço ferramenta	X	X	X	X	X	B	B	B	B	B

Fonte: adaptado de SILVA, 2011.

Como o objetivo do trabalho é realizar a união entre o alumínio e o cobre, a seguir serão abordadas algumas informações pertinentes de ambos os materiais.

2.1 Cobre eletrolítico C110

As ligas de cobre são muito utilizadas nas indústrias da linha branca, de eletroeletrônicos, hidráulicas e de gás. Entre suas principais características, destaca-se a fácil fabricação, elevada condutividade térmica e elétrica, boa resistência à corrosão, além da elevada resistência mecânica e a fadiga, INFOMET 1998.

Tabela 5: Classificação das ligas de cobre.

Sério CDA/ASTM	Tipo de liga
C 1XX	Cobre 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 e cobre silício
C 7XX	Cuproníquel e alpaca

Fonte: Adaptado de INFOMET, 1998.

A liga escolhida foi a do cobre eletrolítico C110, com 99.95% de cobre na composição química, possui alta ductilidade, facilitando os processos de fabricação. Além disso e pela excelente condutividade ele se torna bastante usado na soldagem e brasagem.

Tabela 6: Características do cobre eletrolítico 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 à tração	220 MPa

Fonte: Adaptado de INFOMET, 1998.

2.2 Liga de alumínio 6060 T5

O alumínio e suas ligas são as mais utilizadas nos setores industriais, tem como característica a resistência à corrosão e uma baixa densidade. O alumínio puro possui baixa resistência mecânica, porém é muito dúctil. Com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas foram adicionados elementos de liga, como vistos na tabela 7.

Tabela 7: Elementos das ligas de alumínio.

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

Fonte: Adaptado de Santos, 2009.

Segundo SANTOS, 2009, a liga de alumínio 6060, composta por alumínio, magnésio e silício forjado, que será usada nesse trabalho, possui boas características de soldabilidade, mas não se indica para a fundição.

Tabela 8: Propriedades do alumínio 6060 T5.

Propriedades	Valor
Limite de resistência a tração	145 MPa
Limite de escoamento	105 MPa
Alongamento mínimo (%)	8

Dureza Brinel (HB)	66
--------------------	----

Fonte: Adaptado de ALCOA, 2010.

2.3 Conectores bimetálicos

Conectores elétricos são comumente usados desde residências até nas indústrias, servindo para unir e garantir a passagem de corrente elétrica entre os cabos, através deles também se torna muito mais fácil e prática a montagem e instalação de componentes elétricos.

Os conectores bimetálicos surgiram da necessidade de unir cabos de alumínio a barramentos de cobre, impedindo assim o efeito galvânico ocasionado pela diferença de rigidez dielétrica entre os materiais.

Para um conector ser seguro e de qualidade pelas normas, ele deve ter uma pureza igual ou maior a 99,5%, caso seja menor pode por em risco a condutibilidade da conexão, podendo causar superaquecimentos e risco de acidentes.

Além da ligação de cabos aos barramentos esse tipo de conector, apresenta uma vantagem econômica, visto que o alumínio tem um custo mais baixo quando comparado ao cobre.

E o motivo por se usar o método de solda por fricção é relativo ao fato de não ser necessário usar qualquer outro tipo de material para realizar a união e também por não haver fusão entre os materiais, garantindo assim a boa condutibilidade exigida pela conexão.

Figura 9: Exemplos de conectores bimetálicos.



Fonte: Amperi soluções industriais.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nessa seção será descrito, demonstrado e explicado todos os procedimentos envolvidos na realização da parte prática desse estudo, com o objetivo de verificar a influência de três tipos de geometria diferentes das peças a serem soldadas em variadas velocidades de rotação e posteriormente a análise superficial e ensaios de tração para validação dos resultados.

3.1 Materiais e equipamentos

Primeiramente foram adquiridas barras de alumínio e de cobre, ambas com o diâmetro de $\frac{1}{2}$ " (12,7 mm), estas foram seccionadas com o auxílio da cortadora metalográfica de disco fino (fig. 10) em corpos de prova menores com aproximadamente 40 mm de comprimento, mostrados na figura 11.

Figura 10: Cortadora metalográfica.



Fonte: Fortel equipamentos metalográficos.

Figura 11: Corpos de prova com 40 mm.



Fonte: Próprio autor.

Para deixar as superfícies mais planas, foi utilizado o torno mecânico Toptech Turner 180X300, representado na figura 12.

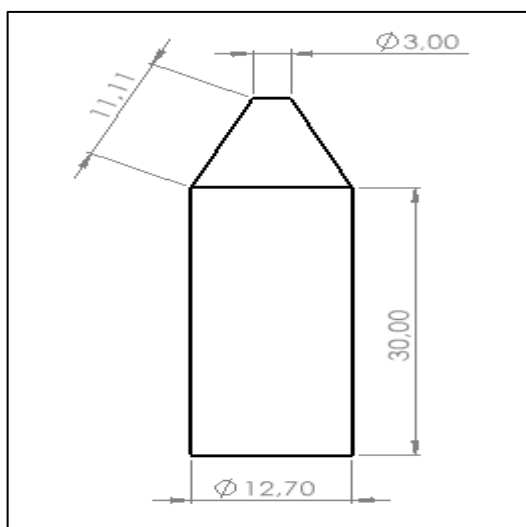
Figura 12: Torno Mecânico Toptech.



Fonte: Próprio autor.

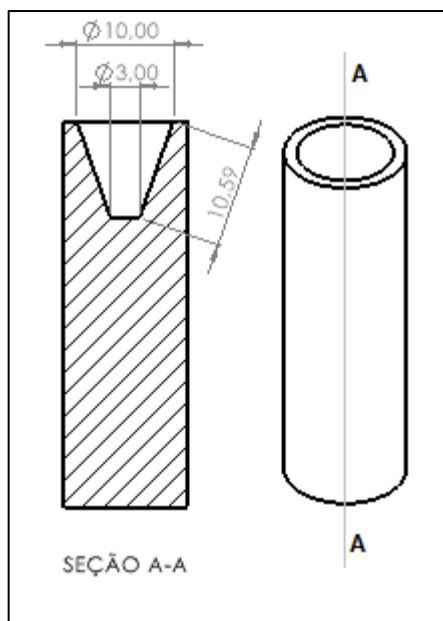
Foi adotada uma geometria diferente para cada material, visando aumentar a área de contato e assim ter uma solda mais eficiente. As geometrias ficaram definidas em: Caso 1 sendo as peças de cobre tendo um perfil cônico representado na figura 13 e as peças de alumínio possuindo um furo cônico como mostra a figura 14; Caso 2 fez-se exatamente o inverso, o alumínio com a extremidade cônica e o cobre apresentando o furo. Também foi analisada a solda de topo feita pelos corpos de prova com as extremidades planas, caso 3.

Figura 13: Dimensões em milímetros para os corpos de prova cônico.



Fonte: Próprio autor.

Figura 14: Dimensões em milímetros para os corpos de prova com furo.



Fonte: Próprio autor.

Para usinar os corpos de prova foi utilizado o torno mecânico Clark BV20B-L x 550. Este permite girar o carrinho porta ferramenta, assim podem ser feitos os cones com os ângulos aproximados. Já os furos foram realizados com uma broca afiada exclusivamente nas dimensões desejadas.

Figura 15: torno mecânico Clark BV20B-L x 550.



Fonte: Próprio autor.

Após ser feito esse processo es todas as peças ficaram da forma mostrada nas figuras 16 a 19.

Figura 16: Corpos de prova de cobre cônicos.



Fonte: Próprio autor.

Figura 17: Corpos de prova de cobre com furo.



Fonte: Próprio autor.

Figura 18: Corpos de prova de alumínio cônicos.



Fonte: Próprio autor.

Figura 19: Corpos de prova de alumínio com furo.



Fonte: Próprio autor.

Com os corpos de prova preparados, deu início a realização das soldas no centro de usinagem CNC ROMI D 800. Esse possui funções como regulagem de posição, velocidade de rotação e avanço. Foi escrito um programa com as variáveis e parâmetros desejados, mostrados nas figuras 21 a 23.

Figura 20: Centro de usinagem CNC ROMI D 800.



Fonte: Próprio autor.

Figura 21: Código da soldagem caso 1.

```
Código CNC
G91; ``sistema de coordenadas incrementais``
S5000 M3 F10; ``velocidade de rotação rpm`` ``liga eixo da árvore sentido horário`` ``velocidade de avanço da ferramenta``
G01 Z-0.5; ``usinagem com avanço programado`` ``desce 0.5 mm no eixo Z``
G04 U3; ``tempo de permanência`` ``3 segundos``
G01 Z-0.5; ``usinagem com avanço programado`` ``desce 0.5 mm no eixo Z``
M50; ``retrai leitor de posição de ferramenta``
M30; ``fim do programa``
```

Fonte: Próprio autor.

Figura 22: Código da soldagem caso 2.

```

Código CNC
G91; ``sistema de coordenadas incrementais``
S3000 M3 F10; ``velocidade de rotação rpm`` ``liga eixo da árvore sentido horário`` ``velocidade de avanço da ferramenta``
G01 Z-0.5; ``usinagem com avanço programado`` ``desce 0.5 mm no eixo Z``
G04 P5000; ``tempo de permanência`` ``5 segundos``
G01 Z-1; ``usinagem com avanço programado`` ``desce 1 mm no eixo Z``
M50; ``retrai leitor de posição de ferramenta``
M30; ``fim do programa``

```

Fonte: Próprio autor.

Figura 23: Código da soldagem caso 3.

```

Código CNC
G91; ``sistema de coordenadas incrementais``
S1000 M3 F10; ``velocidade de rotação rpm`` ``liga eixo da árvore sentido horário`` ``velocidade de avanço da ferramenta``
G01 Z-0.5; ``usinagem com avanço programado`` ``desce 0.5 mm no eixo Z``
G04 P5000; ``tempo de permanência`` ``5 segundos``
G01 Z-1 F100; ``usinagem com avanço programado`` ``desce 1 mm no eixo Z`` ``velocidade de avanço da ferramenta``
M50; ``retrai leitor de posição de ferramenta``
M30; ``fim do programa``

```

Fonte: Próprio autor.

3.2 Parâmetros de soldagem

Tendo por base estudos de Alana Boaventura e Edinelson Reis, em que foi realizado o procedimento de soldagem por fricção convencional. Os corpos de prova tinham as faces planas e foram utilizados avanço de 100 mm/min e rotações de 3000, 5000 e 7000 RPM.

No estudo relatado, a melhor combinação de parâmetros para a soldagem foi a rotação de 5000 RPM. Nesta condição se obteve os melhores resultados no ensaio de tração e melhor mistura dos materiais soldados.

Nesse trabalho manteve-se os mesmo parâmetros de avanço e rotações, mudando apenas as geometrias dos corpos de prova. Para cada rotação foram fabricados no mínimo 3 corpos de prova soldados.

Já no caso das peças planas foram adotadas velocidades de rotação diferentes, sendo elas de 1000, 2000 e 3000 RPM, mantendo o mesmo avanço de 100 mm/min.

No momento da solda, sempre a peça cônica foi rotacionada na velocidade estipulada e a peça furada permaneceu estática. Quando ambas as peças foram planas a peça de alumínio ficou parada. As figuras 24 a 26 mostram os corpos de prova já soldados.

Figura 24: Corpos de porva soldados caso 1.



Fonte: Próprio autor.

Figura 25: Corpos de porva soldados caso 2.



Fonte: Próprio autor.

Figura 26: Corpos de porva soldados caso 3.



Fonte: Próprio autor.

3.3 Inspeção visual e ensaio

Ensaio tem por finalidade garantir a eficiência ou não do processo, além de avaliar quantitativamente a qualidade e assim dando respaldo para determinar a satisfatoriedade da união.

Primeiramente existe a inspeção visual, onde foram identificados alguns aspectos da qualidade do acabamento superficial. Após essa etapa, partiu-se para o ensaio de tração, para qualificar e comprovar o sucesso ou não da solda. O processo consiste em aplicar uma carga ao corpo de prova até sua ruptura.

O ensaio ocorreu utilizando o equipamento EMIC DL 30000, representado na figura 27.

Figura 27: EMIC DL 30000.



Fonte: Próprio autor.

Utilizou-se uma célula de carga menor de 20 kN mostrada na figura 28.

Figura 28: Célula de carga.



Fonte: Próprio autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão mostrados e discutidos alguns pontos referentes aos resultados obtidos das juntas soldadas nas três configurações propostas.

4.1 Análise visual

Caso 1: No aspecto visual os corpos de prova soldados apresentaram condições satisfatórias, com indícios de uma solda eficaz. Quando se compara as velocidades utilizadas, percebe-se que com rotação de 3000 RPM teve um acabamento melhor, menos escória e também expulsou menos material da zona de contato da soldagem. Com rotação de 5000 RPM é possível observar que o acabamento fica intermediário e o alumínio se expande mais, expulsando um pouco de material. Com a rotação de 7000 RPM, têm-se o pior acabamento superficial com muito material despreendido do corpo de prova devido a alta velocidade. A figura 29 mostra os corpos de prova.

Figura 29: Corpos de prova caso 1 soldados em detalhe a 3000, 5000 e 7000 RPM.



Fonte: Próprio autor.

Caso 2: O alumínio, por ter menor resistência é o que se deforma mais, porém sendo o cone, ele não consegue se expandir para os lados. Mas sim para cima em direção à base do corpo de prova. Quanto ao acabamento pode-se notar que novamente com rotação de 3000 RPM tem-se melhor qualidade, com rotação de 5000 RPM o efeito do alumínio querer se desprender começa a ser notado e com 7000 RPM, por causa da elevada rotação a parte do cone e furo se soldam e o resto do corpo de prova parece ter uma resistência menor se tornando evidente que a falha irá ocorrer na seção logo

após a junta soldada. A figura 30 mostra os corpos de prova soldados.

Figura 30: Corpos de prova soldados caso 2 em detalhe a 3000, 5000 e 7000 RPM.



Fonte: Próprio autor.

Caso 3: Como notado nos demais casos aqui os acabamentos são melhores em rotações menores, tendo assim qualidades melhores em 1000 RPM, intermediárias em 2000 RPM e as piores em 3000 RPM. Os efeitos são similares aos corpos de prova cônicos, com o aumento da velocidade o alumínio começa a sair da zona de contato indo em direção periférica devido o movimento circular, por influência da rotação a temperatura também aumenta tornando ainda mais evidente esse efeito. A figura 31 mostra os corpos de prova.

Figura 31: Corpos de prova soldados caso 3 em detalhe a 1000, 2000 e 3000 RPM.



Fonte: Próprio autor.

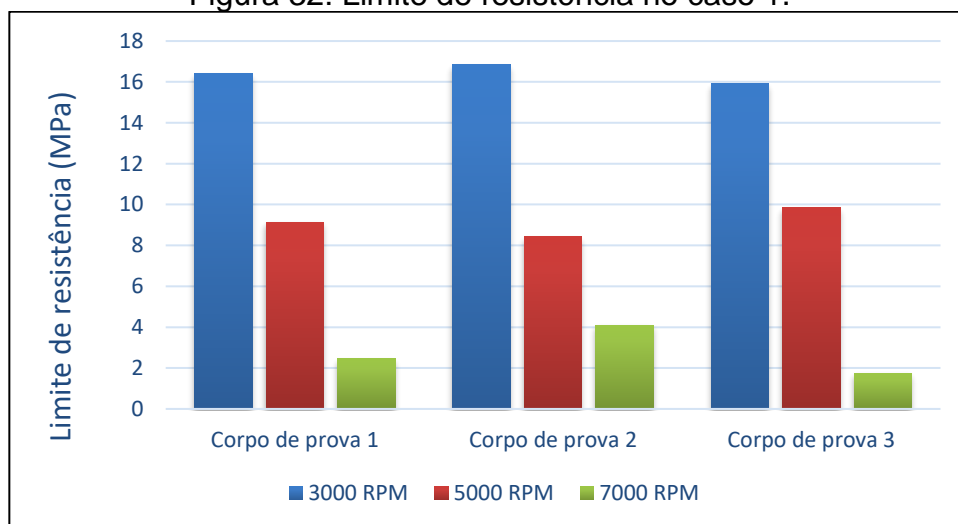
4.2 Ensaio de tração

Aqui serão apresentados os resultados e os gráficos referentes aos limites de resistência dos ensaios de tração para cada caso, cada um contendo três corpos de prova para cada uma das velocidades estipuladas e também a média dos seus valores.

Durante o ensaio pode-se identificar que a ruptura dos corpos de prova, ocorreram na maioria das vezes, na seção do alumínio, que apresenta menor tensão de escoamento em relação ao cobre.

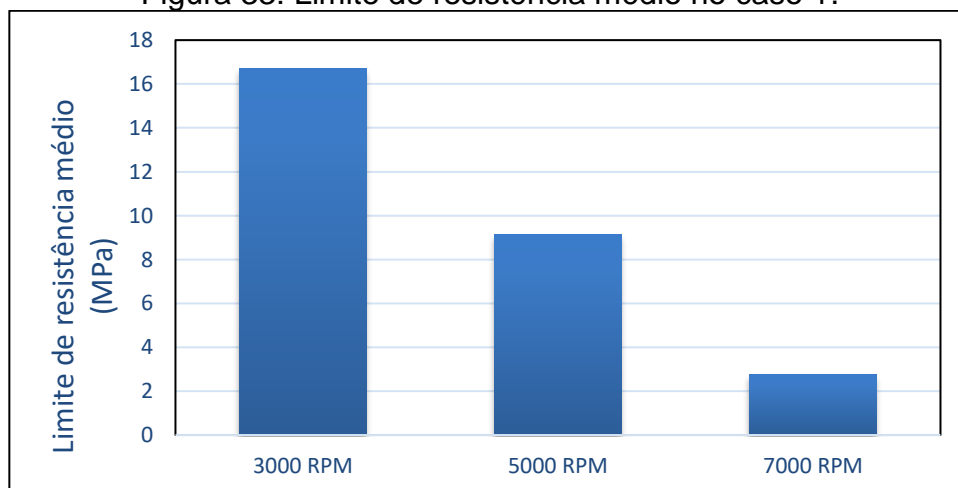
Caso 1: para a situação cobre cônico e alumínio com furo, os melhores valores foram obtidos com rotação de 3000 RPM com um limite de resistência médio de 16,72 MPa, os valores diminuem com o aumento das rotações sendo de 9,14 MPa para 5000 RPM e 2,77 Mpa para 7000 RPM. A figura 32 mostra os limites obtidos para todos os corpos de prova e a figura 33 os valores médios obtidos.

Figura 32: Limite de resistência no caso 1.



Fonte: Próprio autor.

Figura 33: Limite de resistência médio no caso 1.



Fonte: Próprio autor.

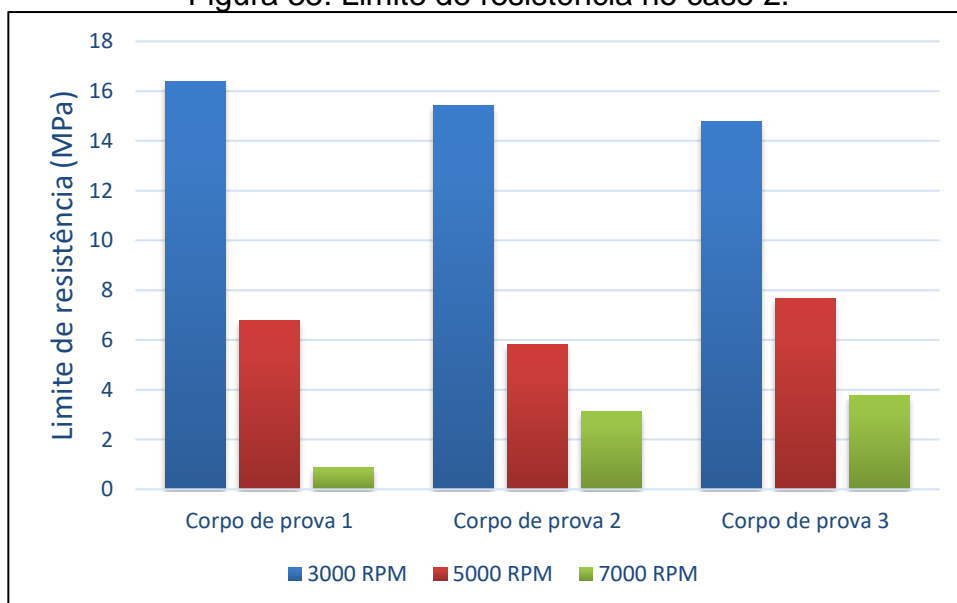
Caso 2: aqui na situação inversa do caso anterior, alumínio cônico e cobre com furo, temos uma situação muito parecida com o caso 1, onde os maiores valores foram verificados nas soldas com menor rotação, sendo os valores médios os seguintes de 15,53 MPa, 6,76 MPa e 2,59 MPa para as rotações de 3000, 5000 e 7000 RPM respectivamente. A figura 34 mostra os corpos de prova rompidos, na fig. 35 o limite de resistência de cada corpo de prova e na fig. 36 as médias das resistências.

Figura 34: Corpos de prova rompidos caso 2 em detalhe a 3000, 5000 e 7000 RPM.



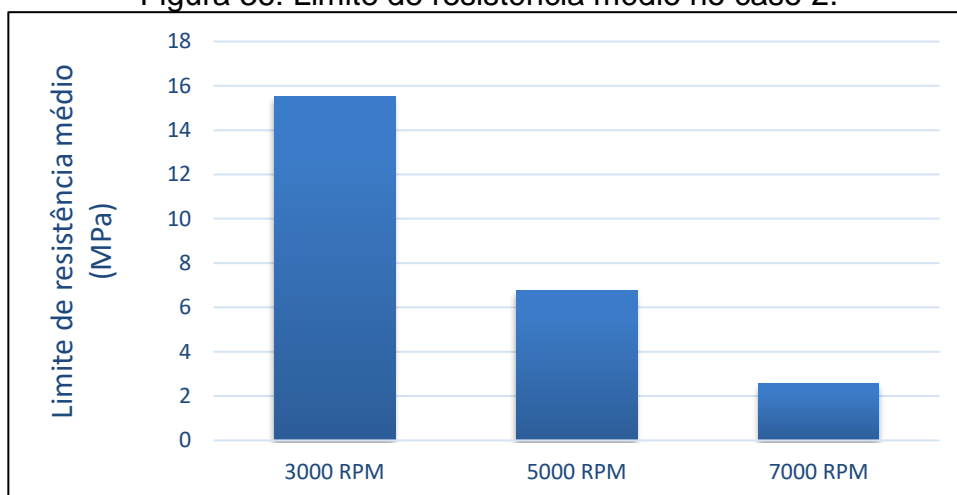
Fonte: Próprio autor.

Figura 35: Limite de resistência no caso 2.



Fonte: Próprio autor.

Figura 36: Limite de resistência médio no caso 2.



Fonte: Próprio autor.

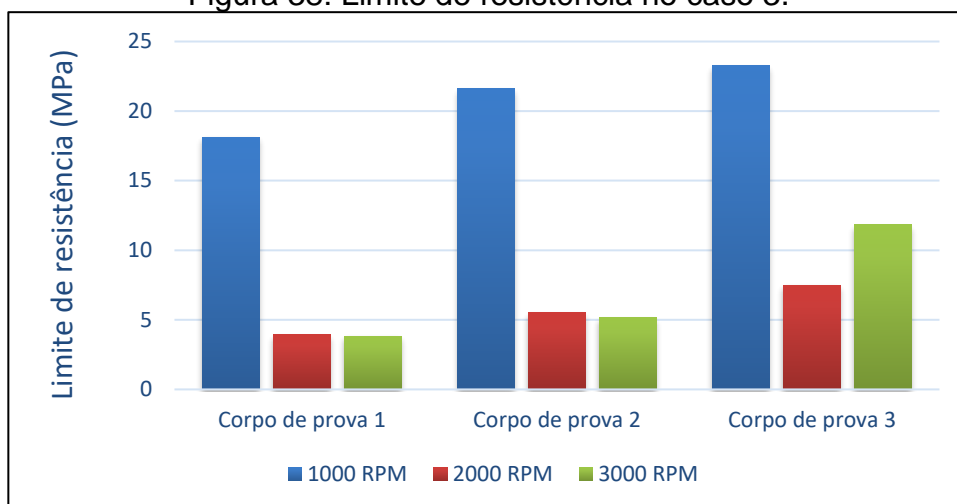
Caso 3: agora para os corpos de prova com as superfícies planas, novamente a rotação menor verificou-se melhores resultados, tendo a rotação de 1000 RPM um limite médio de resistência igual a 21,01 MPa, já com 2000 RPM o valor foi de 6,65 MPa e por 6,94 MPa para a rotação de 3000 RPM. A figura 37 mostra os corpos de prova rompidos, a fig. 38 o limite de resistência de cara corpo de prova e a fig. 39 a média da resistência.

Figura 37: Corpos de prova rompidos caso 3 em detalhe a 1000, 2000 e 3000 RPM.



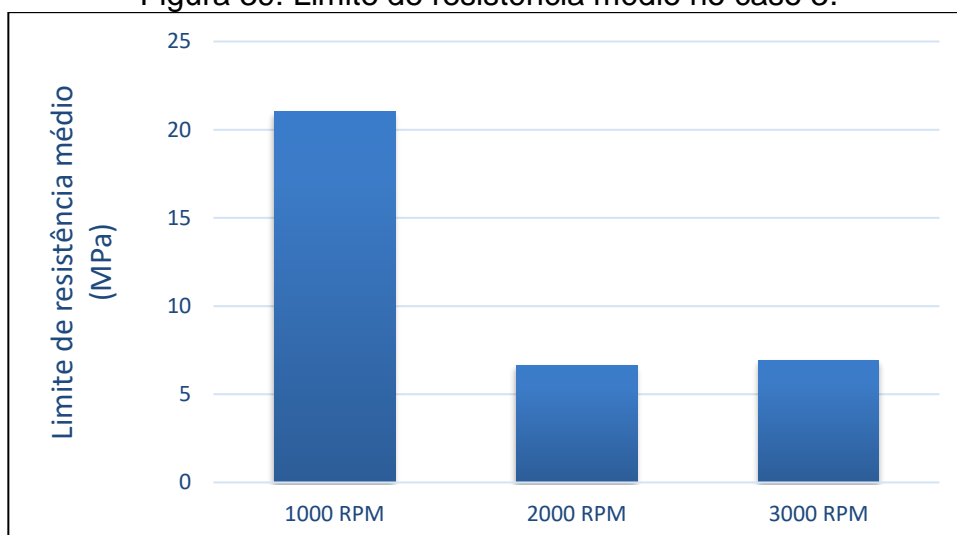
Fonte: Próprio autor.

Figura 38: Limite de resistência no caso 3.



Fonte: Próprio autor.

Figura 39: Limite de resistência médio no caso 3.



Fonte: Próprio autor.

Realizados os ensaios de tração, obtidos os valores de cargas axiais suportadas e as tensões admitidas de todos os casos. A tabela 9 mostra um comparativo geral entre eles.

Tabela 9: Relação desvio padrão x tensão média.

		Tensão mínima (MPa)	Tensão máxima (MPa)	Tensão média (MPa)	Variância	Desvio padrão
Caso 1	3000 RPM	15,92	18,85	16,72	0,4	0,63
	5000 RPM	14,78	16,39	9,14	0,51	0,71
	7000 RPM	1,75	4,1	2,77	1,45	1,2
Caso 2	3000 RPM	14,78	16,39	15,53	0,65	0,81
	5000 RPM	5,82	7,67	6,76	0,86	0,93
	7000 RPM	0,89	3,75	2,59	2,26	1,5

Caso 3	1000 RPM	18,13	23,28	21,01	6,91	2,63
	2000 RPM	3,93	7,5	6,65	4,69	2,16
	3000 RPM	3,83	11,85	6,94	18,51	4,3

Fonte: Próprio autor.

De acordo com a tabela anterior é possível constatar que os valores dos ensaios se mantêm próximos uns dos outros, não existindo discrepâncias tão significativas entre as amostras de cada caso. Destaca-se o caso 3 com rotação de 3000 RPM o qual apresentou os maiores valores na variância e no desvio padrão, por causa da diferença de quase quatro vezes entre o limite de resistência mínimo e o máximo.

Para uma comparação com os materiais base originais, foi feita uma proporção da tensão média obtida em cada cenário com os materiais no seu estado independente, mostrado na tabela 10. A resistência a tração do cobre é de 220 MPa e a resistência a tração do alumínio é de 145 MPa.

Tabela 10: Eficiência das propriedades mecânicas obtidas.

		Tensão média (MPa)	Eficiência mecânica em relação ao Alumínio (%)	Eficiência mecânica em relação ao Cobre (%)
Caso 1	3000 RPM	16,72	11,53	7,6
	5000 RPM	9,14	6,3	4,15
	7000 RPM	2,77	1,91	1,26
Caso 2	3000 RPM	15,53	10,71	7,06
	5000 RPM	6,76	4,66	3,07
	7000 RPM	2,59	1,79	1,18
Caso 3	1000 RPM	21,01	14,49	9,55
	2000 RPM	6,65	4,59	3,02
	3000 RPM	6,94	4,79	3,15

Fonte: Próprio autor.

Conforme a tabela acima pode-se ter uma maior percepção de quão pequenos foram os resultados obtidos nos três casos estudados, apesar de na inspeção visual aparentemente estar tudo certo e regular, no momento dos ensaios de tração acontece a constatação de que as soldas não ocorreram da forma que se imaginava, ficaram muito frágeis, não chegando nem perto do limite de tração mínimo do alumínio, e a expectativa inicial era de ao menos superar esse valor e ficar num nível intermediário entre os dois materiais, pelo fato do cobre possuir uma resistência maior a tração.

5 CONCLUSÕES

O objetivo do trabalho foi desenvolver um conector bimetálico entre cobre e alumínio, que unisse as boas características de ambos os materiais como a elevada condutividade térmica, elétrica e a boa resistência à corrosão do Cu com a ductilidade, resistência a corrosão e baixa densidade do Al. Foram estudados três tipos de geometrias com variadas velocidades de rotação a fim de determinar qual seria um bom exemplo de ser empregado na prática.

No aspecto visual, as soldas apresentaram qualidade de acabamento. Os melhores acabamentos foram encontrados sempre com as menores rotações. Em maiores rotações o alumínio, por ter menor resistência, tem a tendência de querer escapar e se desprender periféricamente da região de solda.

Os resultados de tração foram determinantes, demonstrando que as soldas não se mostraram eficientes para os parâmetros estudados. As maiores forças axiais foram de 2134,5 N, (cerca de 217,58 Kg) do caso 1 em 3000 RPM. No caso 2 também em 3000 RPM foi de 2076,23 N, (aproximadamente 211,64 Kg). No caso 3 em 1000 RPM foi 2949,03 N (em torno de 300,61 Kg), sendo essa a maior resistência encontrada em todo o estudo.

O objetivo geral do trabalho foi alcançado, pois foram elaborados e testados três tipos de possíveis conectores, que com as variáveis utilizadas não apresentaram boa resistência mecânica. Portanto esse trabalho serve como base pra outros estudos nessa mesma área, tendo como as geometrias, velocidades e resultados aqui demonstrados como pré-testes para o desenvolvimento final de um conector bimetálico entre o cobre e o alumínio.

6 REFERÊNCIAS

ALCOA – Ligas e têmperas de extrusão. ALCOA Alumínio e Cia, 2010, 52p. Disponível em:https://www.alcoa.com/brasil/pt/resources/pdf/industria/catalogo_ligas_temperas_2010.pdf

ALVES, E. P. Caracterização mecânica e estudo do perfil térmico na soldagem por fricção rotativa de materiais dissimilares. 126 p. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) - INPE, São José dos Campos/SP, 2010.

ALVES, E. P. Junções de materiais dissimilares utilizando o processo de soldagem por fricção rotativa. 210 p. 2016. Tese (Doutorado) Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) - INPE, São José dos Campos/SP, 2016.

ASM. Metals handbook: Welding, Brazing and Soldering. vol.6, Metals Park, Ohio, USA: Fundamentals of Friction Welding, 1993.

AWS – American Welding Society – Welding Handbook Vol 2 – Welding Processes. 8 ed., 1991.

BANKER, John; NOBILI, Antony. Aluminum-Steel Electric Transition Joints, Effects of Temperature and Time upon Mechanical Properties. Draft 131st Annual Meeting, Seattle, WA, USA, February 17-21, 2002.

BASHER, U. M. Friction Welding of 6061 Aluminum Alloy with Alumina Composite for Improved Mechanical and Thermal Properties. Thesis (Doctor) - University Sains Malaysia, Malaysia, 2013.

BOAVENTURA, A. I.; REIS, E. C; TIER, M. A. D.; WIEDENHÖFT, A. Estudo do Processo de Solda por Fricção Aplicado a Ligas de Alumínio e Cobre. Bagé, 2013.

CROSSLAND, B., "Friction Welding - Recommended practices for friction welding". In Contemporary Physics, 1971. 12(6): p. 559-574.

DONOHUE, J.; J.; The friction welding advantage. Disponível em: <http://app.aws.org/wj/2001/05/0027>. Acesso em 06/2022.

EICHHORN, F., "Beitrag zu den Vorgängen an der Verbindungsstelle beim konventionellen Reibschweißen von Stahl. in Schweißen und Schneiden, 1968. 20(11): p. 563-570.

ELLIS, C. R. G. Continuous drive friction welding of mild steel. Welding Research Supplement, v. 169, p. 183–197, 1972.

GARBRECHT. A.M.; CAMARGO, E.B.; LERMEN. R.T.; MOLIN. A.D. – Effect of the Welding Parameters During Friction Sitr Welding Of Overlay Acryllic Sheets. Horizontina, RS. 2015.

GEARY, DE.; MILLER, R. - Soldagem - 2ª Edição – 2013.

GREWE, K.J., Friction welding takes on new applications. in Welding Journal. Sep: p. 39-40, 1997.

KOU, S. Welding Metallurgy. 2ed. Published by: John Wiley & Sons, 2003.480p. ISBN: 978-0-471-46093-0.

MAALEKIAN, M.; Friction welding – critical assessment of literature. Science and Technology of Welding and Joining 2007, vol 12, no 8, 2007.

MATTEI, F.; Desenvolvimento de equipamento para estudo de soldagem por fricção. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

MARQUES. P.V.; MODENESI. P.J.; BRACARENSE. A. Q. - Soldagem - Fundamentos e Tecnologia. 3ª ed. 2011.

MESSLER, R. W – Principles of Welding, 1999

RICHTER, W: 'Herbeifuehrung einer haftverbindung zwischen plaettchen aus werkzeugstahl und deren traegern nach art einer schweissung oder loetung', Patent:

DE477084, 1929

SILVA. F.L; JUNIOR. L.G. – Soldagem por Fricção – Disponível em:
www.infosolda.com.br/download/61den.pdf - Acesso em 06/2022

SILVA. F.L; JUNIOR. L.G. – Soldagem por Fricção – Disponível em
www.infosolda.com.br/artigos/prosol03.pdf - Acesso em 06/2022

SPINDLER, D.E., What Industry Needs to Know about Friction Welding. in *Welding Journal*, p. 37-42. March 1994.