

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E MECÂNICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**Henrique Ayres de Oliveira**

**Projeto Mecânico de Alicates de Bancada para a Brasagem de Serras de Fita  
Bimetálicas e Proposta de Planejamento de Ensaios Experimentais pelo  
Método de Taguchi**

Juiz de Fora

2021

**Henrique Ayres de Oliveira**

**Projeto Mecânico de Alicates de Bancada para a Brasagem de Serras de Fita  
Bimetálicas e Proposta de Planejamento de Ensaios Experimentais pelo  
Método de Taguchi**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
à Faculdade de Engenharia da Universidade  
Federal de Juiz de Fora, como requisito par-  
cial para a obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Mecânica.

Orientador: Moisés Luiz Lagares Júnior

Juiz de Fora  
2021

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Ayres de Oliveira, Henrique.

Projeto Mecânico de Alicates de Bancada para a Brasagem de Serras de Fita Bimetálicas e Proposta de Planejamento de Ensaios Experimentais pelo Método de Taguchi / Henrique Ayres de Oliveira. -- 2021.

61 f.

Orientador: Moisés Luiz Lagares Júnior

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2021.

1. Brasagem. 2. Brasagem por Resistência Elétrica. 3. Serras de Fita Bimetálicas. 4. Método de Taguchi. I. Lagares Júnior, Moisés Luiz, orient. II. Título.

Henrique Ayres de Oliveira

**Projeto Mecânico de Alicates de Bancada para a Brasagem de Serras de Fita  
Bimetálicas e Proposta de Planejamento de Ensaios Experimentais pelo  
Método de Taguchi**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
à Faculdade de Engenharia da Universidade  
Federal de Juiz de Fora, como requisito par-  
cial para a obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Mecânica.

Aprovada em 5 de Março de 2021.

BANCA EXAMINADORA

---

Moisés Luiz Lagares Júnior - Orientador  
Universidade Federal de Juiz de Fora

---

Vitor Mainenti Leal Lopes - Professor  
Universidade Federal de Juiz de Fora

---

Marcos Vinícius Rodrigues - Professor  
Universidade Federal de Juiz de Fora

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente queria agradecer aos meus pais, Fatima e Elcio, e meu irmão, Gabriel pelo amor, pela paciência e pelo apoio que sempre me deram, principalmente durante meus anos como aluno da Universidade Federal de Juiz de Fora e durante a realização deste trabalho durante uma pandemia.

Agradeço também aos meus amigos por terem me ajudado e alegrado durante esse período, mas também por terem escutado minhas frequentes indagações e reclamações, em especial, eu destaco: Mariana, Arthur, Lucas, Alexandre, Cayo, Beatriz, Daniel e muitos outros.

Agradeço o professor Moisés pela atenção e orientação durante o tempo de realização deste trabalho.

Por fim, agradeço ao meu grande amigo e parceiro, meu cachorro Bob, por ter me aliviado do estresse e me alegrado quando eu estava pra baixo e querendo desistir.

"Nós podemos saber apenas que nada sabemos. E esse é o mais alto grau de sabedoria humana" (Liev Tolstói)

## RESUMO

As serras de fita bimetálicas são umas das ferramentas mais utilizadas para processos de corte devido à sua versatilidade, durabilidade e baixo custo quando comparadas à outras ferramentas. Para sua utilização, é necessário que suas extremidades sejam unidas, normalmente por um processo de soldagem, que necessita de um maquinário próprio para o processo e resulta, muitas vezes, em uma resistência da junta inadequada. A brasagem é o objeto de estudo deste trabalho, sendo um processo mais simples e barato, podendo servir de alternativa aos processos de solda na união das extremidades de serras de fita. Para realização dessa operação, é proposto um mecanismo base para o processo, além da matriz de experimentos para otimização dos parâmetros de entrada pelo Método de Taguchi.

Palavras-chave: Brasagem, Brasagem por Resistência Elétrica, Serras de Fita Bimetálicas, Método de Taguchi.

## **ABSTRACT**

Bimetallic band saws are one of the most used tools for cutting processes due to their versatility, durability and low cost when compared to other tools. For its use, it is necessary that its ends are joined, usually by a welding process, which requires a proper machinery for the process and often results in an inadequate joint strength. Brazing is the object of study in this work, being a simpler and cheaper process, which can serve as an alternative to welding processes in the union of the ends of band saws. To perform this operation, a base mechanism for the process is proposed, in addition to the experiments matrix for optimization of the input parameters by the Taguchi Method.

Keywords: Brazing, Resistance Brazing, Bimetallic Band Saw, Taguchi Method.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Ilustração esquemática de uma junta brasada . . . . .	13
Figura 2 – Diagrama mostrando a relação entre as três tensões superficiais para uma gota de líquido repousando sobre um substrato sólido no ponto trifásico . . . . .	14
Figura 3 – Demonstração da ZAC no processo de união em uma serra de fita . . .	16
Figura 4 – Espaçamento Recomendado da Junta Para Diferentes Grupos de Metais de Adição . . . . .	17
Figura 5 – Tipos de Juntas para um Processo de Brasagem . . . . .	18
Figura 6 – Representação Esquemática da Sobreposição de Juntas . . . . .	19
Figura 7 – Faixa de Temperatura de Brasagem Para Diferentes Metais de Adição .	20
Figura 8 – Representação Esquemática do Processo de Brasagem por Resistência Elétrica . . . . .	22
Figura 9 – Diferentes Tipos de Metais de Adição e Suas Características . . . . .	26
Figura 10 – Combinações Sugeridas Entre os Metais de Base e Metais de Adição em um Processo de Brasagem . . . . .	27
Figura 11 – Composição de Algumas Ligas de Adição do Grupo BAg . . . . .	28
Figura 12 – Exemplo de Serra de Fita Bimetálica . . . . .	31
Figura 13 – Diagrama Esquemático de Uma Serra de Fita Bimetálica e o Processo de Fabricação Envolvido . . . . .	31
Figura 14 – Diferentes Classificações de Lâminas de Serra de Fita Por Tipo de Dentes	32
Figura 15 – Exemplos de Conjuntos de Dentes para Lâminas de Serra de Fita . . .	33
Figura 16 – Exemplos de Máquinas de Serra de Fita, à Direita, Horizontal, à Esquerda, Vertical . . . . .	34
Figura 17 – Layout de um Arranjo Ortogonal L9 (Fonte: Autoria Própria) . . . . .	36
Figura 18 – Parâmetros e Níveis Escolhidos para os Experimentos . . . . .	37
Figura 19 – Desenho da Matriz Ortogonal de Experimentos . . . . .	39
Figura 20 – Desenho com Níveis da Matriz Ortogonal de Experimentos . . . . .	39
Figura 21 – Modelo de razão S/N para cada experimento . . . . .	40
Figura 22 – Média de Razão S/N Para Cada Variável . . . . .	40
Figura 23 – Visão Geral do Mecanismo Proposto . . . . .	41
Figura 24 – Proposta de Eletrodos de Cobre Para o Mecanismo . . . . .	42
Figura 25 – Braços de Alavanca Formados Durante a Utilização do Mecanismo . . .	43

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASME	American Society of Mechanical Engineers
AWS	American Welding Society
S/N	Relação Sinal-Ruído
ZAC	Zona Afetada por Calor

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>11</b>
1.1	Motivação . . . . .	11
1.2	Objetivos . . . . .	11
<b>2</b>	<b>Revisão Bibliográfica . . . . .</b>	<b>12</b>
2.1	Processo de Brasagem . . . . .	12
2.1.1	Princípios Físicos . . . . .	13
2.1.1.1	Molhabilidade . . . . .	14
2.1.1.2	Capilaridade . . . . .	15
2.1.2	Soldabilidade . . . . .	15
2.1.3	Zona Afetada por Calor (ZAC) . . . . .	16
2.1.4	Estabelecimento da Junta para Brasagem . . . . .	17
2.1.5	Temperatura de Brasagem . . . . .	19
2.1.6	Fluxo de Proteção . . . . .	20
2.1.7	Limpeza e Preparação dos Materiais . . . . .	21
2.1.8	Brasagem por Resistência Elétrica . . . . .	22
2.1.9	Possíveis Defeitos na Junta . . . . .	23
2.1.9.1	Descontinuidades . . . . .	24
2.1.9.2	Aprisionamento do Fluxo de Proteção . . . . .	24
2.1.9.3	Erosão do Metal de Base . . . . .	24
2.1.9.4	Trincas . . . . .	24
2.1.9.5	Condições Insatisfatórias da Superfície . . . . .	25
2.2	Metais de Adição . . . . .	25
2.2.1	Escolha do Metal de Adição . . . . .	26
2.2.1.1	Ligas de Prata (Grupo BAg) . . . . .	28
2.2.2	Ligas de Cobre (Grupo BCu) . . . . .	29
2.2.3	Ligas de Latão (Grupo RBCu-Zn) . . . . .	29
2.3	Serras de Fita Bimetálicas . . . . .	30
2.4	Método de Taguchi . . . . .	34
<b>3</b>	<b>Proposta de Planejamento Experimental Utilizando o Método de Taguchi . . . . .</b>	<b>37</b>
<b>4</b>	<b>Proposta de Projeto Mecânico de Alicates de Mesa Para Brasagem de Serras de Fita Bimetálicas . . . . .</b>	<b>41</b>
<b>5</b>	<b>Considerações Finais . . . . .</b>	<b>45</b>

5.1	Sugestões para Trabalhos Futuros . . . . .	46
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>47</b>
	<b>ANEXO A – TERMO DE AUTENTICIDADE . . . . .</b>	<b>49</b>
	<b>ANEXO B – DESENHO DE CONJUNTO E DESENHOS DE DETALHES . . . . .</b>	<b>50</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Realizar cortes em materiais de forma rápida, simples e com um baixo custo é uma necessidade para muitas empresas de diferentes portes e dos mais diversos processos de engenharia e manufatura. Para isso, as serras de fita bimetálicas são frequentemente utilizadas dado a sua versatilidade, a possibilidade de cortar perfis de formatos diversos, seu baixo custo de aquisição e sua vida útil em fadiga. Para seu uso, é necessário que seja realizada a união das suas extremidades, normalmente isso é feito por um processo de soldagem que, além de exigir um maquinário específico para tal operação, muitas vezes resulta em juntas com baixa resistência mecânica e que falham devido a ação da temperatura na microestrutura do metal de base (FILHO; DUARTE, 2007). Dado esse panorama, este trabalho tem como finalidade viabilizar a realização de brasagem para união das serras de fita como substituto do processo de solda.

## 1.1 Motivação

Na maioria das vezes, as serras de fita são utilizadas em trabalhos não-automatizados e em pequenas oficinas mecânicas. Com isso, o custo final da operação de corte é de grande relevância, tanto para as empresas quanto para os clientes finais. Pensando nisso, o presente trabalho visa buscar formas para que a união das serras de fita bimetálicas seja feita por um processo de brasagem, que é menos complexo e, ao mesmo tempo, mais barato que os processos de solda, uma vez que não utiliza maquinário específico e há maior disponibilidade de metais de adição de brasagem no mercado.

Uma segunda motivação para este trabalho é a geração de material acadêmico acima do tópico de brasagem, uma vez que a literatura é relativamente escassa quando comparada aos processos de solda.

## 1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo viabilizar o processo de brasagem como alternativa para união das extremidades de serras de fita bimetálicas e, para isso, seus objetivos específicos são:

- Desenvolvimento de um mecanismo para portar os eletrodos e realizar o processo de brasagem, com a possibilidade de controle da pressão de aperto nos eletrodos durante o processo;
- Definição do planejamento experimental pelo Método de Taguchi para otimização dos parâmetros de entrada e identificação da influência de cada um deles na qualidade da junta;

## 2 Revisão Bibliográfica

Nesse capítulo, será apresentada a revisão bibliográfica dos principais conceitos usados para o desenvolvimento desse trabalho. Essa revisão apresenta os conceitos envolvidos nos processos de brasagem, além de contextualizar o processo com as serras de fita bimetálicas e o Método de Taguchi. Os tópicos estudados foram:

- Processo de Brasagem;
- Metal de Adição;
- Serras de Fita Bimetálicas;
- Método de Taguchi;

### 2.1 Processo de Brasagem

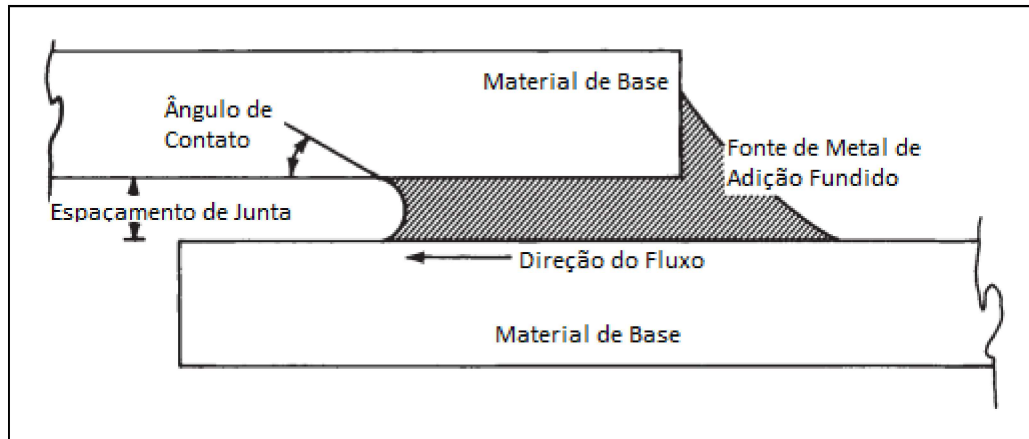
Segundo a AWS (Sociedade Americana de Soldagem, do inglês American Welding Society), brasagem é definida por um grupo de processos de união que produzem a coalescência de materiais, aquecendo-os até a temperatura de brasagem na presença de um metal de adição de brasagem que tem uma temperatura líquida acima de  $450^{\circ}\text{C}$  e abaixo da temperatura sólida dos materiais de base. Essa temperatura de fusão do metal de adição é o que difere a brasagem da soldagem, onde temperaturas muito altas são utilizadas para fundir e unir os metais de base. Comparando com os processos de soldagem, na brasagem não há a fundição do metal de base, temperaturas menores são atingidas durante do processo, há presença de um metal de adição e num geral, é um processo mais simples e barato.

Os processos de brasagem podem ser divididos em dois tipos: brasagem forte (brazing) e brasagem fraca (soldering). A principal diferença entre os dois processos é o ponto de fusão do metal de adição. Na brasagem forte, utilizam-se metais de adição com ponto de fusão acima de  $450^{\circ}\text{C}$ , enquanto na brasagem fraca utiliza-se metal de adição acima de  $450^{\circ}\text{C}$  e abaixo do ponto de fusão do material base. (MARQUES; JOSE.; BRACARENSE, 2011)

O material de base e os consumíveis podem interagir das seguintes formas: difusão do metal de adição no metal de base, difusão do metal de base no metal de adição, formação de compostos intermetálicos, formação de uma terceira liga entre o metal de adição e o metal de base e penetração do metal de adição nos contornos dos grãos do metal de base.

Tais interações podem ser reduzidas da seguinte forma: mantendo a temperatura de brasagem mais baixa possível (ainda alta suficiente para ocorrer o preenchimento da junta), realizando o processo no menor período de tempo possível, resfriando a junta o mais rápido possível e selecionando corretamente o metal de adição. (MACHADO, 1996)

Figura 1 – Ilustração esquemática de uma junta brasada



Fonte: AWS

Historicamente, o processo de brasagem pode ser considerado uma das formas mais antigas de união de materiais, sendo utilizada para fabricação de joias e artefatos em ouro. Durante a década de 1950, a brasagem começa a ser amplamente aplicada na indústria aeronáutica no reparo de partes de aeronaves, câmaras de combustão e dutos. Atualmente, a brasagem ainda é amplamente utilizada devido à capacidade de unir materiais de natureza muito distinta e com pequenas seções transversais, podendo ser utilizada em refrigeradores, trocadores de calor, componentes aeronáuticos, componentes eletrônicos e etc.

De forma geral, as vantagens do processo de brasagem são:

- Possibilidade de união de materiais diferentes, tais como metais e cerâmicas;
- Manutenção das características metalúrgicas do metal de base;
- Possibilidade de união de materiais com espessuras muito pequenas;
- Boas propriedades de transferência de calor e distribuição de tensões;
- Possibilidade de trabalhar com pequenas tolerâncias;
- Processo mais simples e barato em relação a outros processos de união;

### 2.1.1 Princípios Físicos

Durante a realização da brasagem, processos metalúrgicos e químicos complexos ocorrem dentro da junta e nas superfícies dos materiais envolvidos. É necessário o entendimento da complexidade do processo para projetar e produzir juntas brasadas com propriedades físicas e químicas rigorosamente controladas. Dentre os princípios físicos relacionados ao processo de brasagem, é importante destacar a molhabilidade, a capilaridade e a soldabilidade.

### 2.1.1.1 Molhabilidade

A molhabilidade é definida como a capacidade de uma fase líquida espalhar-se sobre um substrato sólido, podendo fluir sobre o mesmo e formar uma película. Num processo de brasagem, esse efeito é identificado como a fluidez do metal de adição sobre a superfície aquecida. Nesse processo de união, pressupõe-se a formação de uma fase líquida que molhe as superfícies a serem unidas e, quando solidificada, atua como elo.

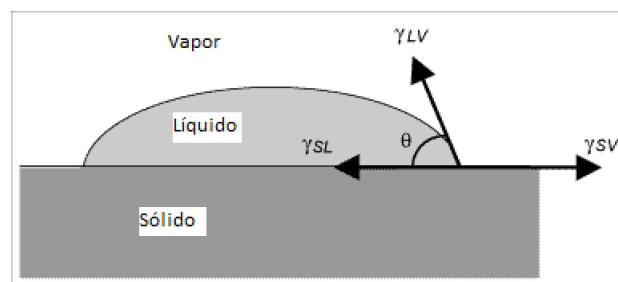
Num caso ideal, no qual não acontece nenhuma reação química entre as fases sólidas, líquidas e de vapor do metal, além de desconsiderar a ação da gravidade, uma gota de metal líquido assume uma configuração de equilíbrio ditada por considerações de energia livre de superfície (TWI, 2017). A forma da gota é caracterizada por  $\theta$ , seu ângulo de contato como mostrado na Figura 2. Considerando um equilíbrio das tensões superficiais na direção horizontal, chegamos na Equação 2.1:

$$\cos\theta = \frac{(\gamma_{SV} - \gamma_{SL})}{\gamma_{LV}} \quad (2.1)$$

Sendo:

- $\gamma_{LV}$ : tensão superficial do metal de adição líquido sob atmosfera de brasagem (líquido-vapor);
- $\gamma_{SL}$ : tensão superficial do metal base sólido sob atmosfera de brasagem (sólido-líquido)
- $\gamma_{SV}$ : tensão superficial na interface metal base-metal de adição (sólido-vapor)

Figura 2 – Diagrama mostrando a relação entre as três tensões superficiais para uma gota de líquido repousando sobre um substrato sólido no ponto trifásico



Fonte: TWI (The Welding Institute)

O limite entre as condições de molhamento e não-molhamento é geralmente considerado como  $\theta = 90^\circ$ . Para  $\theta < 90^\circ$ , ocorre molhamento, enquanto  $\theta > 90^\circ$  representa uma condição de não molhamento. O termo espalhamento é definido como a condição na qual o líquido cobre completamente as superfícies sólidas. Esta condição ocorre quando  $\theta$  se aproxima do valor de  $0^\circ$ .



Na brasagem, pode-se concluir que molhamento é a capacidade do metal de adição fundido aderir à superfície de um metal no estado sólido e, quando resfriado abaixo da temperatura do solidus, criar uma forte ligação com esse metal. Para um sistema de brasagem, o valor ótimo para  $\theta$  está entre  $10^\circ$  e  $45^\circ$ . O ângulo é determinado pelo espaçamento ou espessura da junta.

#### 2.1.1.2 Capilaridade

A capilaridade pode ser definida como um conjunto de fenômenos físicos que promovem pressão sobre líquidos, fazendo com que penetrem entre duas superfícies muito próximas. A ação de ambos os fenômenos, molhabilidade e capilaridade, estão presentes na brasagem e influenciam diretamente nos resultados obtidos. (MACHADO, 1996)

No processo de brasagem, a capilaridade faz com que o metal de adição fundido penetre a junta entre os dois metais de base. Em uma junta adequadamente projetada, o metal de adição fundido é normalmente puxado completamente através da área da junta, sem vazios ou lacunas, e as juntas soldadas permanecem estanques a líquidos e gases sob fortes pressões, mesmo quando a junta é submetida a tipos de choque ou vibração.

A capilaridade é resultado da tensão superficial entre os metais de base, metal de adição, fluxo ou atmosfera e o ângulo de contato entre o metal de base e o metal de adição. Na prática, as características do fluxo de metal de adição também são influenciadas por considerações dinâmicas envolvendo viscosidade, pressão de vapor, gravidade e reações metalúrgicas entre o metal de adição e o metal de base.

Na brasagem, a capilaridade é obtida através da folga entre as peças a serem unidas, a qual o metal de adição deverá preencher. Esta folga deve estar entre 0,05 mm e 0,20 mm para processo de brasagem manual.

#### 2.1.2 Soldabilidade

A AWS define soldabilidade como a capacidade de um metal ser soldado nas condições de fabricação impostas a uma estrutura específica e adequadamente projetada e ter desempenho satisfatório no serviço pretendido. Em outras palavras, soldabilidade é a facilidade com que os metais podem ser fundidos sem produzir defeitos no produto acabado.

De forma geral, a maioria das ligas metálicas são soldáveis, sendo algumas mais difíceis de serem unidas utilizando um certo processo do que um outro. Assim, é importante estudar o material a ser unido, o projeto da solda e da estrutura e também a finalidade e utilização do produto final.

Soldabilidade é uma propriedade que não é definida de forma precisa, uma vez que varia de acordo com o processo empregado e como esse é utilizado. Materiais com baixa soldabilidade, por exemplo, podem ser soldados com resultados satisfatórios, desde que

o consumível seja selecionado cuidadosamente e haja atenção no controle da soldagem e na inspeção final. Por outro lado, a realização de tais etapas frequentemente resulta na necessidade de execução de muitos testes antes da produção, impactando diretamente no custo final do processo. (ESAB, 2004)

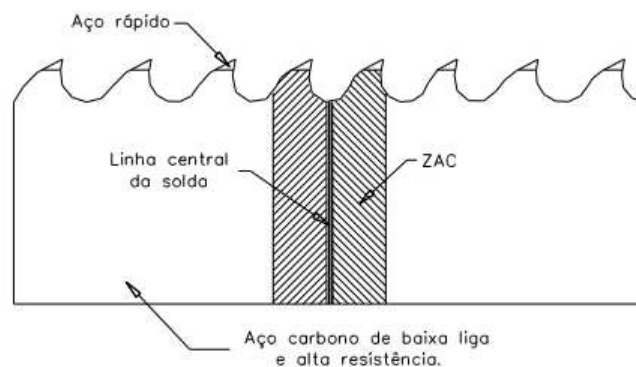
### 2.1.3 Zona Afetada por Calor (ZAC)

Também conhecida por Zona Termicamente Afetada, a ZAC refere-se à área do metal de base não-fundida que experienciou mudanças nas suas propriedades físicas resultante da exposição à altas temperaturas, no caso, provinda de um processo de brasagem ou solda. É normalmente identificada como a área entre a solda ou corte e o metal base. Essas áreas podem variar em tamanho e gravidade, dependendo das propriedades dos materiais envolvidos, da intensidade e concentração de calor e do processo empregado. (FILHO; DUARTE, 2007)

Durante as operações de soldagem, a ZAC pode variar de pequena a grande, dependendo da taxa de entrada de calor. Os processos de união com aquecimento rápido têm taxas de resfriamento mais rápidas em comparação com os processos de soldagem com baixas taxas de entrada de calor (ou seja, aquecimento lento) e, portanto, têm ZAC's menores. O tamanho de uma ZAC também aumenta à medida que a velocidade do processo de soldagem diminui.

Como a ZAC recebe calor suficiente por um período de tempo suficientemente longo, a zona sofre alterações na microestrutura e nas propriedades que diferem do metal original. O rápido aumento da temperatura aliado com um resfriamento rápido produz um efeito como de têmpera no metal de base. Essas alterações de propriedade geralmente são indesejáveis e, na maioria dos casos, resulta na ZAC ser a parte mais fraca do componente. Por exemplo, as alterações microestruturais podem levar a tensões residuais, resistência reduzida do material, maior fragilidade e menor resistência à corrosão e/ou rachaduras. Como resultado, muitas falhas ocorrem principalmente na ZAC.

Figura 3 – Demonstração da ZAC no processo de união em uma serra de fita



Fonte: (FILHO; DUARTE, 2007)

### 2.1.4 Estabelecimento da Junta para Brasagem

A brasagem, como visto anteriormente, usa o princípio da ação capilar para distribuir o metal de adição fundido entre as superfícies dos metais de base. Portanto, durante o processo de brasagem, é necessário que exista uma folga entre os metais de base para permitir que a ação capilar funcione com mais eficiência.

Geralmente, as juntas mais fortes são feitas apenas permitindo um espaço suficiente para o metal de enchimento fluir para a área da junta. A partir de experimentos, passou-se a utilizar folgas com dimensões entre 0,02 a 0,08 mm, obtendo-se, muitas vezes, resultados satisfatórios com folgas de 0,07 mm. Porém, como visto na tabela abaixo, o valor do espaçamento da junta pode variar em função do tipo de metal de adição e método de brasagem: (AWS, 2007)

Figura 4 – Espaçamento Recomendado da Junta Para Diferentes Grupos de Metais de Adição

Classificação AWS para metais de adição	Espaçamento da junta (mm)
Grupo BAISI	0.051 - 0.2 para juntas sobrepostas com comprimento menor que 6.35mm
	0.20 - 0.25 para juntas sobrepostas com comprimento maior que 6.35mm
Grupo BCuP	0.03 - 0.12
Grupo BAg	0.025 - 0.127 para brasagem com fluxo
	0.00 - 0.05 para brasagem com atmosfera protetora
Grupo BAu	0.051 - 0.127 para brasagem com fluxo
	0.00 - 0.05 para brasagem com atmosfera protetora
Grupo Bcu	0.00 - 0.05 para brasagem com atmosfera protetora
Grupo BCuZn	0.025-0.127 para brasagem com fluxo
Grupo BMg	0.102 - 0.254 para brasagem com fluxo
Grupo Bni	0.051 - 0.127 para aplicações gerais (fluxo/atmosfera)
	0.00 - 0.05 para tipos de fluxo livre, brasagem em atmosfera

Fonte: Adaptado de AWS

Na fase do projeto de determinação da junta, deve-se considerar possíveis concentrações de tensões na junta, que na maioria das vezes acontecem devido à geometria da junta e tensões térmicas.

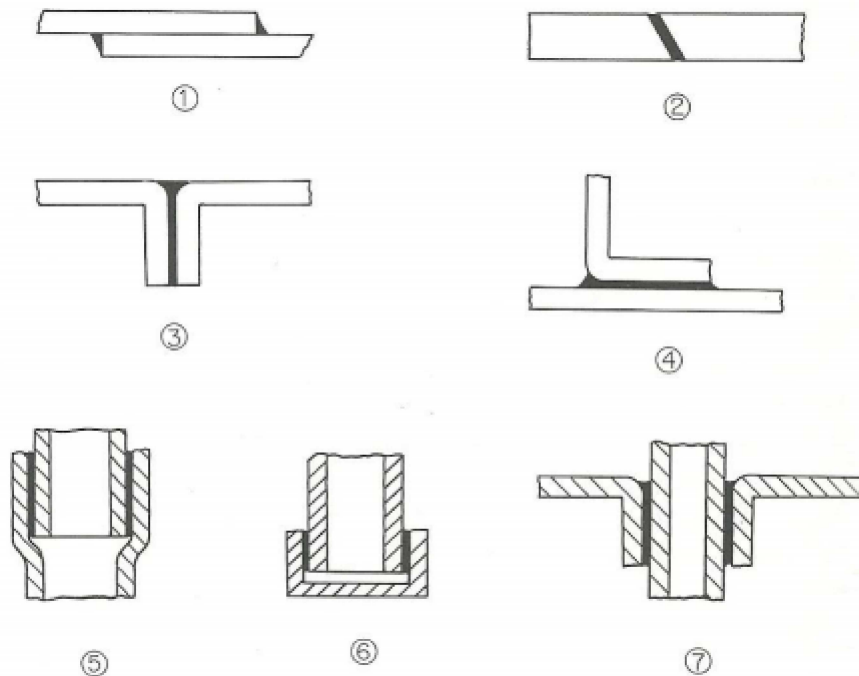
A junta poderá falhar prematuramente em função de deformações ou fadiga quando é escolhido um formato de forma equivocada (MACHADO, 1996). Para evitar tais efeitos, algumas regras fundamentais deverão ser seguidas durante a escolha da geometria da junta:

- Posicionar a junta na região do componente onde ocorrerá a mínima tensão;

- Evitar que a borda da junta seja tensionada, ao mesmo tempo, em tração e flexão;
- Orientar a junta para que a mesma suporte compressão, cisalhamento puro e tração pura, nesta ordem de preferência;
- Desviar o esforço de carregamentos cíclicos por meio da inserção de partes mecânicamente fixas à estrutura principal;

Algumas das geometrias mais comuns nos processos de brasagem podem ser observados na Figura 7, sendo elas: 1- Junta sobreposta; 2- Junta de topo em ângulo; 3- Junta flangeada; 4-Junta em T; 5- Junta na forma de luva; 6- Junta tampão; 7- Junta de tubo com chapa.

Figura 5 – Tipos de Juntas para um Processo de Brasagem



Fonte: (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992)

Ao resfriar os componentes desde a temperatura de brasagem até a temperatura ambiente, algumas tensões internas podem desenvolver-se durante o processo, principalmente quando une-se materiais com coeficientes de expansão térmica muito distintos ou quando os componentes apresentam geometrias complexas. Por exemplo, em juntas tubulares, sempre que possível, o "macho" (componente que ocupa a parte interna) deve ser o material com menor coeficiente de expansão térmica, pois, dessa forma, a folga aumenta na temperatura de brasagem e, quando o conjunto resfria, ocorre contração e o metal de adição é comprimido, não ocorrendo um tensionamento em tração ou cisalhamento. (AWS, 2007)

Para os casos em que a brasagem acontece numa junta sobreposta, sua resistência não aumenta indiscriminadamente conforme aumenta-se a área de contato entre os dois

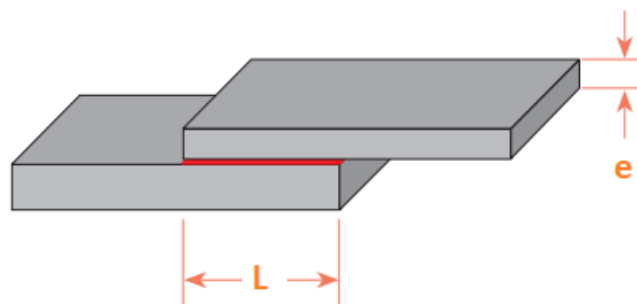
materiais de base. Segundo Machado (1996), experimentalmente, a máxima resistência é alcançada quando o comprimento de sobreposição é cerca de 3 ou 4 vezes a espessura do componente mais fino. Isso se deve à constatação de que a tensão de cisalhamento é máxima no final da junta e, conseqüentemente, caso haja uma sobreposição excessiva, a parte central da mesma não suporta nenhuma carga. Para calcular o comprimento de sobreposição, utiliza-se a Equação 2.2:

$$L = \frac{(F \cdot \sigma \cdot e)}{\tau_b} \quad (2.2)$$

Onde:

- L: Comprimento de Sobreposição (mm)
- F: Fator de Segurança
- $\sigma$ : Resistência a tração do membro mais fino (Pa)
- e: Espessura do membro mais fino (mm)
- $\tau_b$ : Resistência ao cisalhamento do metal de adição (Pa)

Figura 6 – Representação Esquemática da Sobreposição de Juntas

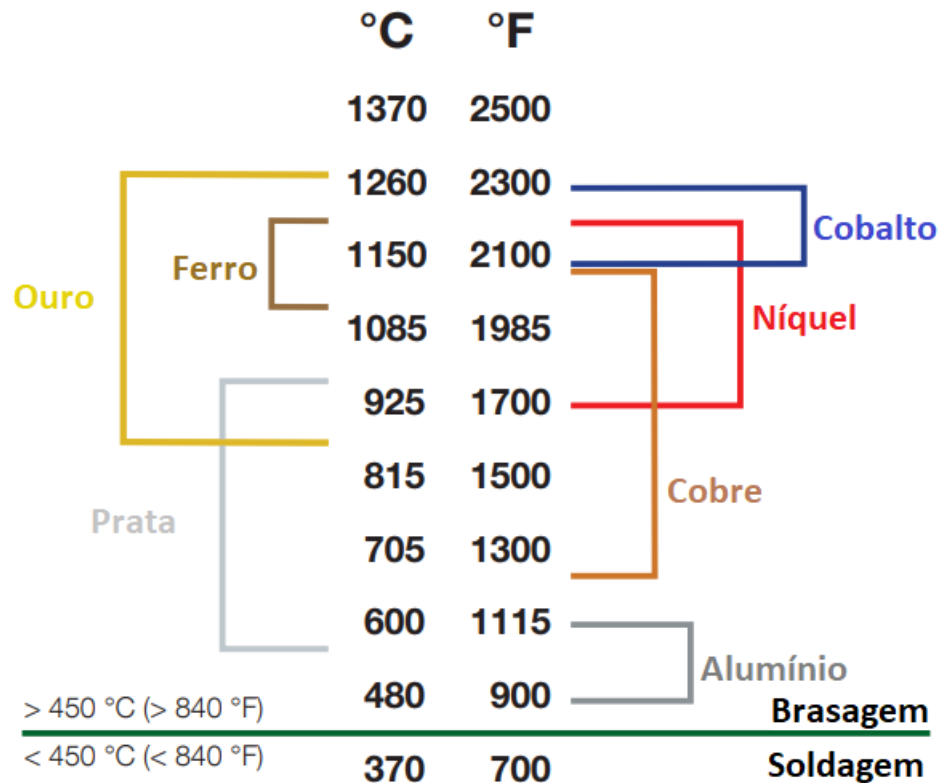


Fonte: Adaptado de Oerlikon

### 2.1.5 Temperatura de Brasagem

Por definição, brasagem é um processo de união em que os metais são ligados juntos usando um metal de adição com uma temperatura de fusão (líquido) superior a 450 °C. Para cada uma das diferentes aplicações, utiliza-se diferentes grupos de metais de adição, cada um com uma faixa de temperatura para brasagem, como mostrado na imagem abaixo:

Figura 7 – Faixa de Temperatura de Brasagem Para Diferentes Metais de Adição



Fonte: Adaptado de Oerlikon

Os metais de adição para brasagem geralmente são completamente fundidos antes de fluírem para a junta e serem distribuídos por ação capilar. Portanto, a temperatura "liquidus" é considerada a temperatura mais baixa que deve ser usada para brasagem e todas as seções da junta devem ser aquecidas a essa temperatura ou mais. No entanto, várias ligas usadas como metais de adição para brasagem tornam-se suficientemente fluidas abaixo da temperatura liquidus e ainda sim formam boas juntas. Com esses metais de adição, uma brasagem bem-sucedida pode ser realizada mesmo que a temperatura de liquidus não seja atingida. (AWS, 2007)

A seleção da temperatura da brasagem depende, então, dos materiais que estão sendo unidos, do metal de adição, do processo de brasagem e do design da junta. Usualmente, determina-se que seja usada a temperatura mais baixa dentro da faixa recomendada para garantir o fluxo completo do metal de adição através da junta.

#### 2.1.6 Fluxo de Proteção

O fluxo de proteção é um material não metálico usado para remover óxidos nas superfícies a serem soldadas e impedir uma nova formação de óxidos. O fluxo molha os óxidos metálicos, dissolve-os e os elimina da superfície do metal. Ao removê-los da superfície, o fluxo de brasagem reduz a tensão superficial e promove o fluxo livre do metal de adição. Ele também protege a superfície do metal contra os efeitos do oxigênio e

deve ser totalmente removido da superfície quando o metal de adição derretido atingir a temperatura de brasagem.

Os fluxos minerais fundem a uma temperatura abaixo do metal de adição e fluem para a junta, preparando-a para a entrada do metal de adição. Esse, ao fundir, deve forçar a saída do fluxo à medida que penetra a junta por ação capilar. Quando o espaçamento dos materiais de base é muito pequeno, o fluxo é retido na junta com tanta firmeza que o deslocamento do metal de adição fundido pode ser difícil ou impossível e, assim, descontinuidades na junta podem ser produzidas. Quando a folga é muito grande, o metal de adição fundido percorre ao redor de bolsões de fluxo, gerando inclusões de fluxo excessivas.

### 2.1.7 Limpeza e Preparação dos Materiais

A limpeza das peças a serem brasadas é extremamente importante para obter juntas de alta qualidade. Antes do processo de brasagem, é essencial que as peças sejam limpas para remover óxidos, óleos, graxas e outros contaminantes da superfície. Muitos métodos de limpeza estão disponíveis, incluindo limpeza mecânica, limpeza química, tratamentos térmicos e pré-revestimentos.

Segundo AWS (2007), alguns tipos de resíduos são mais difíceis de serem removidos do que outros e podem necessitar de vários passos de limpeza. Por exemplo, compostos pigmentados, bem como alguns óleos de corte e usinagem, são difíceis de remover, podendo exigir o uso de múltiplos métodos de limpeza, envolvendo solventes, sprays de emulsão quente, banhos alcalinos quentes e enxaguamentos quentes. A escolha do processo de limpeza deve levar em consideração os seguintes fatores:

- A natureza do contaminante;
- A natureza do material de base a ser limpo;
- O grau de limpeza necessário para o processo de brasagem escolhido;
- A configuração da junta a ser brasada.

Dentre as diferentes classificações dos processos de limpeza, pode-se destacar:

- **Limpeza química:** Limpeza por solvente, desengraxamento por vapor, emulsão de limpeza, limpeza e decapagem ácida, limpeza eletrolítica e outros;
- **Limpeza mecânica:** Usinagem, jateamento, abrasão e escovação com cerdas de metal;
- **Tratamento térmico:** As juntas a serem unidas são termicamente submetidas a temperaturas próximas ou acima da temperatura final de brasagem para reduzir os óxidos e remover os contaminantes através da eliminação de gases;

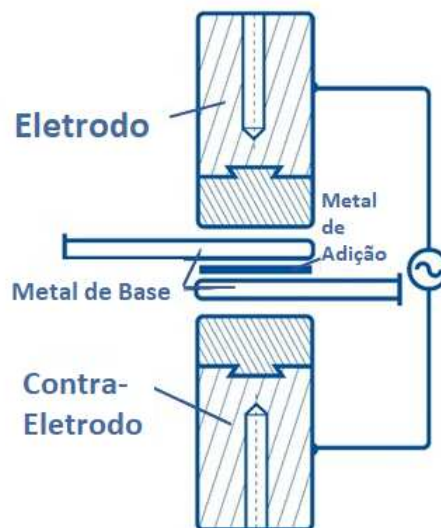
- **Pré-revestimento:** Métodos de eletrodeposição, revestimento por imersão a quente, pulverização térmica ou *cladding* (revestimento por fusão ou sinterização para fundir ou sinterizar o material de liga no substrato).

### 2.1.8 Brasagem por Resistência Elétrica

A brasagem por resistência elétrica é um processo no qual o calor é gerado na junta de brasagem por meio da resistência a uma corrente elétrica que flui em um circuito que inclui os componentes a serem unidos. O calor da brasagem por resistência é desenvolvido nos componentes, nos eletrodos que entram em contato com os componentes ou em ambos quando a corrente elétrica passa por eles.

De acordo com AWS (2007), a brasagem por resistência elétrica é adequada para aplicações nas quais é necessário aquecimento rápido e localizado e a junta de brasagem pode ser projetada para fazer parte de um circuito elétrico. O processo pode ser realizado manualmente ou usando a automação. Tende a ser um processo de baixa temperatura, isto é, usa metais de adição de brasagem principalmente das classificações prata e cobre-fósforo. A brasagem por resistência elétrica é mais útil para juntas que requerem uma fonte de calor altamente localizada, sem chama, sem contaminação, rápida e controlada de perto.

Figura 8 – Representação Esquemática do Processo de Brasagem por Resistência Elétrica



Fonte: Adaptado de Schmoor Brazing

Os principais componentes de um sistema de brasagem por resistência elétrica são o transformador, os eletrodos e a fonte de pressão que será utilizada para pressionar os eletrodos nos componentes a serem brasados. Enquanto o equipamento para brasagem por resistência pode ser utilizado para processos de soldagem, os parâmetros desses são diferentes. Geralmente, os tempos de aquecimento e resfriamento num processo de brasagem por resistência são maiores que no processo de soldagem, enquanto a pressão nos eletrodos tende a ser menor.



Durante a escolha do material dos eletrodos, os critérios principais são a condutividade elétrica do material de base a ser unido e o design da junta na qual os eletrodos serão utilizados. Outros fatores importantes são a quantidade de juntas que serão produzidas, a aparência superficial necessária do produto final nas posições em que o eletrodo estará em contato, a pressão requerida e o preço de reposição dos eletrodos. No geral, a condutividade elétrica do material do eletrodo será o oposto da condutividade elétrica do material de base, ou seja, se caso o material de base tiver uma baixa condutividade, será necessária a utilização de eletrodos com alta condutividade elétrica.

O processo de brasagem por resistência elétrica começa depois que os componentes são montados na posição adequada, com o metal de adição e fluxo em posição e os eletrodos são apertados. A pressão de aperto é controlada pelo operador ou por meio de sensores no caso do processo automatizado. Após o aquecimento do metal de base por meio da corrente elétrica, o operador começa a adicionar o metal de adição, que irá fundir e preencher a junta. Assim que a junta é completamente preenchida, o fluxo de corrente elétrica é interrompido, porém a pressão nos eletrodos é mantida até que o metal solidifique e desenvolva força suficiente para que os materiais unidos se auto-suportem. (SCHMOOR, 2015)

O controle da taxa de aquecimento durante o processo é crítico, uma vez que uma taxa muito alta pode ser ruim para o fluxo de metal de adição, além de possivelmente danificar o metal de base e de adição. A taxa de aquecimento é limitada pela fonte de energia e a quantidade de metal que necessita ser aquecida. No geral, o objetivo é prover um aquecimento uniforme durante todo o processo de brasagem.

O uso da brasagem por resistência elétrica, apesar de suas vantagens, apresenta algumas ponderações em relação à segurança, uma vez que, durante o processo, metal quente é gerado, fumos são emitidos e compostos químicos são utilizados. Além disso, diferente de outros processos de brasagem, há a possibilidade de choques elétricos caso a fonte apresente falhas ou não receba manutenção de forma rotineira. Antes da brasagem, o operador deve certificar-se de que os subconjuntos estejam limpos e livres de todos os materiais estranhos. Roupas, proteção ocular e equipamento respiratório adequados, se necessário, devem ser usados e não devem estar em contato com nenhum objeto de metal aterrado.

### 2.1.9 Possíveis Defeitos na Junta

A inspeção da junta brasada é o passo final da operação de brasagem e é essencial para assegurar que a qualidade da junta é satisfatória e uniforme, além de revelar quão bem sucedidos foram os processos anteriores no que diz respeito à integridade da junta brasada. Durante a inspeção, é possível identificar alguns defeitos, sendo mais comuns:

#### 2.1.9.1 Descontinuidades

Conforme AWS (2007), os espaços vazios ou fluxo incompleto do metal de adição na junta brasada podem ser resultantes de um ou mais fatores como:

- Limpeza incorreta ou insuficiente;
- Espaçamento incorreto da junta;
- Quantidade insuficiente de metal de adição;
- Gases aprisionados no metal solidificado;
- Movimento do material de base durante o processo enquanto o metal de adição ainda estava fundido;

Tais descontinuidades podem causar redução na resistência da junta, uma vez que diminuem a área onde cargas serão aplicadas, além de frequentemente servirem de canais em casos de vazamento.

#### 2.1.9.2 Aprisionamento do Fluxo de Proteção

Fluxo de proteção aprisionado pode ser encontrado em uma junta no qual o fluxo foi adicionado para prevenir ou minimizar oxidação durante a fase de aquecimento. Isso ocorre quando não há aberturas suficientes no design da junta para que o fluxo flua para fora da junta.

O fluxo aprisionado previne que o metal de adição flua nessa área em particular, resultando na diminuição da robustez da junta, além de poder levar a falhas durante testes de vazamentos e, caso o fluxo seja corrosivo, diminuir drasticamente a resistência da junta.

#### 2.1.9.3 Erosão do Metal de Base

A erosão do metal de base é causada quando o metal de adição se liga ao metal de base durante o processo de brasagem. O processo de erosão envolve a dissolução do material de base e um fluxo do metal de adição. Na secção onde acontece o fenômeno, a penetração do metal de adição no metal de base pode ser parcial ou completa, resultando na diminuição da área da secção transversal da junta e podendo diminuir a resistência e a capacidade de suportar cargas da junta.

#### 2.1.9.4 Trincas

O surgimento de trincas reduz não só a rigidez da junta, mas também diminui sua vida útil. As trincas agem como ampliadores de tensões que podem diminuir a resistência estática da junta ou causar falhas prematuras de tração.

Trincas em filetes grandes com metal de adição de brasagem excessivo podem não ser prejudiciais se não se propagarem para a junta. No entanto, rachaduras em pequenos filetes podem se propagar para a junta. Comumente, rachaduras também podem estar presentes em metais de base como resultado de fragilização por metais líquidos.

#### 2.1.9.5 Condições Insatisfatórias da Superfície

Condições insatisfatórias da superfície, como metal de adição de brasagem excessivo, superfícies rugosas e fluxo do metal de adição de brasagem no metal base podem ser prejudiciais por várias razões. Além de considerações estéticas, essas condições podem atuar como concentrações de tensão, locais de corrosão ou ambos.

## 2.2 Metais de Adição

No processo de brasagem, os metais de adição são os componentes responsáveis por preencher as juntas para que, após resfriados, os materiais de base sejam unidos. Por definição, na brasagem, a temperatura líquidus do metal de adição deve ser maior do que 450°C, porém deve ser menor que aquela do metal de base. Segundo AWS (2005), para ser utilizado como material de adição, o metal ou liga metálica deve ter as seguintes características:

- A habilidade de espalhar-se e aderir-se ao material de base (molhabilidade);
- Uma temperatura (ou faixa de temperatura) líquidus adequada para permitir a ação da capilaridade na junta;
- Sua composição deve ser suficientemente estável e homogênea para minimizar a separação dos seus constituintes quando estiver fundido durante o processo de brasagem;
- A habilidade de formar juntas brasadas que possuem as propriedades físicas e mecânicas para a utilização pretendida;
- A habilidade de produzir ou evitar interações entre o metal de adição e o metal de base, dependendo do objetivo final do processo;

Para que a junta brasada seja sólida e confiável, a brasagem deve ocorrer sem que haja difusão indesejada do metal de adição no metal de base e também diluição, erosão e formação de componentes frágeis no metal de base. Alguns dos fatores que podem influenciar nas interações entre os metais podem ser a solubilidade mútua entre os metais, a quantidade de metal de adição presente no processo, a temperatura de brasagem na qual os metais estão expostos, o tempo do ciclo de brasagem e a geometria da junta.

Diferentes composições do metal de adição são formuladas para que os fatores anteriormente citados aconteçam durante o processo de brasagem. Ligas de alumínio-cobre, por exemplo, tem propriedades de molhabilidade limitadas quando o metal de base é ferroso, porém, com adição de zinco ou latão, a capacidade de molhamento é aumentada. (AWS, 2007)

### 2.2.1 Escolha do Metal de Adição

A escolha do metal de adição adequado é fundamental para garantir a qualidade e resistência da junta. Conforme Machado (1996), a seleção do metal é baseada em diversos fatores, sendo alguns deles:

- As possibilidades de interação e a compatibilidade com o metal de base;
- A finalidade da junta;
- O ambiente de trabalho;
- O método de brasagem;
- A temperatura de brasagem;
- O tamanho e geometria da folga;
- A estética da peça final;
- Considerações de segurança;

Num geral, cobre, níquel e prata são os metais de adição mais utilizados, enquanto alumínio e ouro são utilizados em operações especiais. A tabela abaixo compara características importantes e as vantagens dos metais de adição mais comuns:

Figura 9 – Diferentes Tipos de Metais de Adição e Suas Características

<b>Metal/Liga Metálica</b>	<b>Temperatura de Brasagem</b>	<b>Espaçamento da Junta (mm)</b>	<b>Vantagens</b>
Cobre	1100°C	0.00 – 0.05	Resistência da junta, baixo custo
Prata	700°C	0.05 – 0.13	Baixa temperatura
Prata com Lítio	700°C	0.05 – 0.13	Baixa temperatura, Auto-fluxo
Níquel	1050°C	0.05 – 0.20	Resistência da junta, resistência à corrosão
Alumínio	585°C	0.05 – 0.25	Único metal de adição para brasagem do alumínio
Ouro	980°C	0.05 – 0.20	Resistência à oxidação e corrosão

Fonte: Adaptado de GH Induction

Os metais de adição podem ser adquiridos de várias formas, possibilitando que os operadores e projetistas escolham aquela mais conveniente e eficiente para suas necessidades de produção específicas. (GH-INDUCTION, 2010) Alguns tipos mais populares são: pastas, varetas, pós, folhas, fios e fitas, cada um deles com suas características especiais. Por exemplo, as fitas de brasagem são fabricadas moldando uma camada uniforme de liga de brasagem e um aglutinante enrolado em rolos para facilitar o manuseio. As fitas são feitas sob encomenda com espessura e largura especificadas, adequadas para o componente a ser soldado. Um adesivo pode ser aplicado a um ou ambos os lados da fita.

Para cada metal de adição, diferentes composições de liga estão disponíveis. Os metais adicionados determinam a compatibilidade da liga para uso na união de metais específicos e requisitos de processos individuais. Por exemplo, a brasagem a vácuo requer uma liga livre de elementos voláteis, como o cádmio. As ligas de prata-cobre, por exemplo, que têm capacidade de umedecimento limitada em metais básicos ferrosos, exibem umedecimento aprimorado com a adição de zinco ou estanho.

Num geral, a compatibilidade do metal de base ao metal de adição é o principal fator na escolha do metal de adição. Alguns exemplos das principais ligas e materiais a serem unidos por um processo de brasagem podem ser observados na figura abaixo:

Figura 10 – Combinações Sugeridas Entre os Metais de Base e Metais de Adição em um Processo de Brasagem

	Al*	Mg*	Cu*	Aços ao C e Baixa Liga	Ferros Fundidos
<b>Al*</b>	BAISi		-	-	-
<b>Mg*</b>	N	BMg	-	-	-
<b>Cu*</b>	N	N	-	BAG, BAu, BCuP, RBCuZn	-
<b>Aços ao carbono e Baixa Liga</b>	BAISi	N	BAG, BAu, RBCuZn	BAG, BAu, BCu, RBCuZn, BNi	-
<b>Ferros Fundidos</b>	N	N	BAG, BAu, RBCuZn	BAG, RBCuZn	BAG, RBCuZn, BNi
<b>Aços Inoxidáveis</b>	BAISi	N	BAG, BAu, BCu, BNi	BAG, BAu, BCu, BNi	BAG, BAu, BCu, BNi
<b>Ni*</b>	N	N	BAG, BAu, RBCuZn	BAG, BAu, BCu, RBCuZn, BNi	BAG, BCu, RBCuZn
<b>Ti*</b>	BAISi	N	BAG	BAG	BAG
<b>Be, Zr, V*†</b>	BAISi(Be)	N	BAG	BAG, BNi	BAG, BNi
<b>W, Mo, Ta, Nb*‡</b>	N	N	BAG	BAG, BCu, BNi	BAG, BCu, BNi
<b>Aços Ferramenta</b>	N	N	BAG, BAu, RBCuZn, BNi	BAG, BAu, BCu, RBCuZn, BNi	BAG, BAu, RBCuZn, BNi

\* E suas ligas; † Materiais Reativos; ‡ Materiais refratários; (N) Não recomendado, mas técnicas especiais podem viabilizar a união.

Fonte: (MACHADO, 1996)

Considerações de segurança são também de extrema importância na seleção de um metal de adição de brasagem. Ingredientes perigosos ou irritantes podem estar presentes nos metais de adição para brasagem, bem como nos fluxos e gases utilizados na brasagem. Os vapores e gases produzidos durante o aquecimento e a fusão de metais e dos fluxos de

brasagem são a principal preocupação, tornando necessária a ventilação adequada. Por exemplo, vários BAg contêm cádmio, conhecido por efeitos adversos à saúde, incluindo câncer de pulmão e próstata e danos nos rins.

#### 2.2.1.1 Ligas de Prata (Grupo BAg)

Segundo AWS (2007), os 39 metais de adição de prata, classificados pelo grupo BAg, são conhecidos pelas suas diversas aplicações, sendo utilizados para unir a maioria dos metais ferrosos e não ferrosos, exceto pelo alumínio e magnésio.

Tais metais de adição são essencialmente ligas de prata com outros metais como o bronze, Zn, Cd, Sn, Mn, Ni e Li, que dão ao metal de adição importantes características. O zinco, por exemplo, melhora a molhabilidade da prata, uma vez que reduz a temperatura de fusão das ligas binárias de prata-cobre e ajuda a liga à molhar metais de ferro, cobalto e níquel. O cádmio também tem efeitos semelhantes no metal de adição de prata, porém, como citado anteriormente, o óxido de cádmio presente nos vapores durante a brasagem é tóxico, então procura-se utilizar ligas livres de cádmio, como as ligas de Ag-Cu. As ligas de brasagem contendo níquel são especialmente recomendadas para a união de aços inoxidáveis, pois reduzem a suscetibilidade à corrosão da interface.

Para que a ação capilar seja adequada, recomenda-se que o espaçamento da junta esteja entre 0.05mm e 0.13mm e, a menos que seja indicado o contrário, o uso de fluxo de proteção nas operações de brasagem é recomendado na maioria das aplicações.

Conforme Machado (1996), dado o seu custo de mercado, a tendência é a utilização de ligas com menores conteúdos de prata. Entretanto, a redução do teor de prata resulta na redução das propriedades mecânicas da junta. Sob ponto de vista operacional, ao reduzir o conteúdo de prata de 50% para 20%, a ductilidade do metal de adição diminui de 35% para 10%, recomendando-se que o conteúdo de prata não seja menor que 34%.

Figura 11 – Composição de Algumas Ligas de Adição do Grupo BAg

#### Composição Química, Porcentagem do Peso Total

Classificação AWS	Número UNS	Ag	Cu	Zn	Cd	Ni	Sn
BÁg-1	P07450	44.0–46.0	14.0–16.0	14.0–18.0	23.0–25.0	—	—
BÁg-1a	P07500	49.0–51.0	14.5–16.5	14.5–18.5	17.0–19.0	—	—
BÁg-2	P07350	34.0–36.0	25.0–27.0	19.0–23.0	17.0–19.0	—	—
BÁg-2a	P07300	29.0–31.0	26.0–28.0	21.0–25.0	19.0–21.0	—	—
BÁg-3	P07501	49.0–51.0	14.5–16.5	13.5–17.5	15.0–17.0	2.5–3.5	—
BÁg-4	P07400	39.0–41.0	29.0–31.0	26.0–30.0	—	1.5–2.5	—
BÁg-5	P07453	44.0–46.0	29.0–31.0	23.0–27.0	—	—	—
BÁg-6	P07503	49.0–51.0	33.0–35.0	14.0–18.0	—	—	—
BÁg-7	P07563	55.0–57.0	21.0–23.0	15.0–19.0	—	—	4.5–5.5

Fonte: (AWS, 2007)

### 2.2.2 Ligas de Cobre (Grupo BCu)

As ligas de brasagem de cobre são conhecidas pela excelente resistência à corrosão, alta condutividade elétrica, alta condutividade térmica e são geralmente usadas para brasagem de aços carbono e ligas, aço inoxidável, níquel e cobre-níquel. Tem normalmente intervalo de brasagem entre 1093°C e 1149°C, com temperatura de solidificação de 1083°C.

O cobre puro e as ligas Cu-Sn podem ser utilizadas para a brasagem de aço carbono, por exemplo, em temperaturas entre 1000°C a 1150°C, com custo relativamente baixo devido à ausência de prata em sua composição (OKIMOTO, 2005). As ligas de cobre são dúcteis, possuem boa molhabilidade em ferro e exibem excelente penetração nas juntas. Pode ser necessário fluxo para brasagem de metais que possuem constituintes com óxidos difíceis de reduzir.

Os metais de adição para brasagem à base de cobre tendem a se ligar rapidamente com as ligas à base de Ni, aumentando o líquido e reduzindo a fluidez. Portanto, eles devem ser colocados o mais próximo possível da junta e o conjunto deve ser aquecido rapidamente até a temperatura de brasagem. Conforme AWS (2005), os metais de adição de brasagem à base de cobre são sugeridos apenas para unir componentes a serem usados em temperaturas de serviço abaixo de 510°C. O cobre é muito fluido quando derretido e, ao brasar aço carbono, é necessário o ajuste das juntas do tipo de interferência. Para brasagem de juntas de aço inoxidável são recomendados intervalos de 0,025 a 0,076 mm.

Podemos destacar as seguintes ligas do grupo BCu:

- **BCu-1:** é usado para a união de metais ferrosos, ligas à base de níquel e ligas de cobre-níquel. É frequentemente usado na brasagem em fornos;
- **BCu-2:** é fornecido como uma suspensão de óxido de cobre em um veículo orgânico. Suas aplicações são semelhantes às da BCu-1;
- **BCu-3:** é semelhante ao BCu-1 e pode ser usado para a união de metais ferrosos, ligas à base de níquel e ligas de cobre-níquel. Em metais que possuem constituintes com óxidos difíceis de reduzir (cromo, manganês, silício, titânio, vanádio e alumínio), pode ser necessário um fluxo;

### 2.2.3 Ligas de Latão (Grupo RBCu-Zn)

Segundo AWS (2007), as ligas de latão são hoje muito utilizadas, principalmente, pelo fato de poderem substituir ligas de prata como metal de adição, sendo mais baratas e não-tóxicas, uma vez que não possuem cádmio em sua composição. Elas também são conhecidas como o grupo RBCuZn, sendo a letra B indicativa que a liga pode ser usada para brasagem, e a letra R, para solda-brasagem.

As ligas de Cu-Zn tem como característica temperaturas de brasagem muito maior que as ligas contendo prata, geralmente acima de 900°C. Entretanto, é sabido que o Zn tende a volatilizar devido à sua elevada pressão de vapor, então, durante a utilização destas ligas, é recomendada a brasagem com fluxo, atuando como uma barreira contra a formação de vapores.

A brasagem com esses metais de adição pode ser realizada usando os métodos de tocha, de forno ou de indução. Ao usar os metais de adição de brasagem de cobre-zinco, é importante evitar o superaquecimento, que pode vaporizar o zinco, deixando vazios na junta.

Como os latões tem pontos e fusão próximos da maioria das ligas de cobre, eles não são usados para brasagem dessas ligas, uma vez que apresentam menor resistência a corrosão e há a possibilidade de emissão de vapores de zinco. (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992)

As principais ligas de latão em metais de adição são:

- **RBCuZn-A e RBCuZn-C:** Usadas para unir aços, cobre e suas ligas, níquel e suas ligas e alguns tipos de aço inoxidável. Espaçamento de junta entre 0.05mm e 0.13mm é recomendado;
- **RBCuZn-B:** Utilizada para brasagem e solda-brasagem de aço e aço inoxidável, ferro fundido, cobre e suas ligas e ligas de níquel. Contém ferro e manganês para aumentar sua resistência de dureza e pequenas quantidades de silício para controlar a vaporização do Zn;
- **RBCuZn-D:** É frequentemente usada na brasagem de carboneto de tungstênio. Também é usada com aço, níquel e ligas à base de níquel. Pode ser empregada em todos os processos de brasagem, exceto na brasagem de fornos com atmosfera de proteção;

### 2.3 Serras de Fita Bimetálicas

As serras de fita bimetálicas possuem ampla gama de aplicações e também são conhecidas popularmente como M42. As serras bimetálicas são econômicas, de alto desempenho e têm excelente vida útil à fadiga. Tais serras são projetadas para cortar uma ampla variedade de materiais ferrosos ou não, incluindo, entre outros: aço carbono, aço inoxidável, aço ferramenta, cobre, latão, bronze, magnésio, alumínio, nos mais diversos formatos, como chapas, barras e tubos.



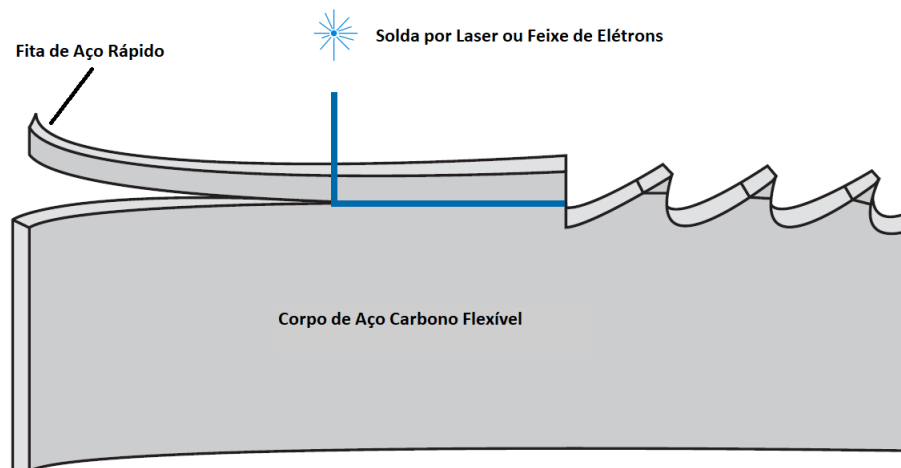
Figura 12 – Exemplo de Serra de Fita Bimetálica



Fonte: GasWeld

As fitas bimetálicas são constituídas por uma fita estreita de aço rápido soldado à extremidade de uma outra fita de aço carbono de baixa liga e alta resistência denominada corpo. A fita de aço rápido proporciona alta dureza e alta resistência ao calor e desgaste, enquanto o corpo de aço carbono ligado possui elevada resistência à fadiga e à tração. (FILHO; DUARTE, 2007)

Figura 13 – Diagrama Esquemático de Uma Serra de Fita Bimetálica e o Processo de Fabricação Envolvido



Fonte: Adaptado de Pilana Metal

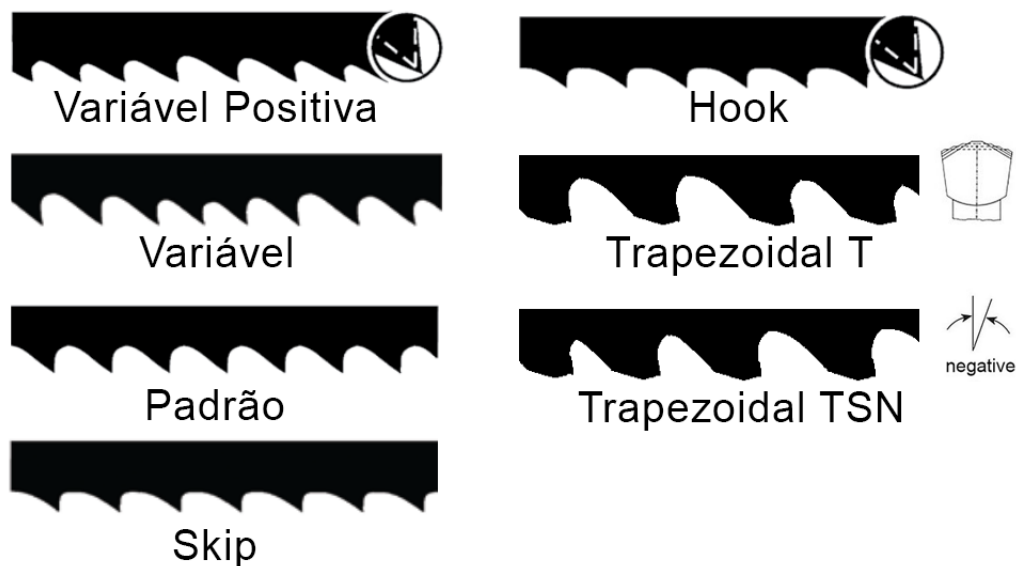
A fabricação das serras de fita bimetálicas envolve uma série etapas, sendo elas:

- **Usinagem:** A geometria especial dos dentes da ferramenta de fresagem é transferida para a bobina bimetálica criando um passo do dente claramente definido (número de dentes por polegada e formato do dente);
- **Travamento:** Após o processo de travamento, os dentes são projetados alternadamente para a esquerda e para a direita sobre o nível do corpo da fita e asseguram que a lâmina da serra de fita possa cortar livremente;

- **Tratamento Térmico:** O processo de tratamento térmico inclui um processo de endurecimento e vários processos de têmpera sequencial. Isso confere à fita seu alto nível de flexibilidade e à aresta de corte, a dureza e resistência ao desgaste necessárias;
- **Acabamento:** Rebarba da base do dente para evitar pontos de interrupção nominais após o processamento mecânico, compactação da superfície para melhorar as propriedades de operação contínua e fornecer uma superfície de alta qualidade para a lâmina de serra de fita;
- **Revestimento:** Aplicação de vários revestimentos rígidos para aumentar a vida útil e, possivelmente, reduzir os tempos de corte e as emissões de ruído.

O formato da aresta de corte do dente afeta a eficiência da lâmina, considerando fatores como sua vida útil, nível de ruído, suavidade do corte e capacidade de transporte de cavacos. A imagem abaixo mostra as diferentes classificações das serras a partir do formato dos dentes.

Figura 14 – Diferentes Classificações de Lâminas de Serra de Fita Por Tipo de Dentes



Fonte: Autoria Própria

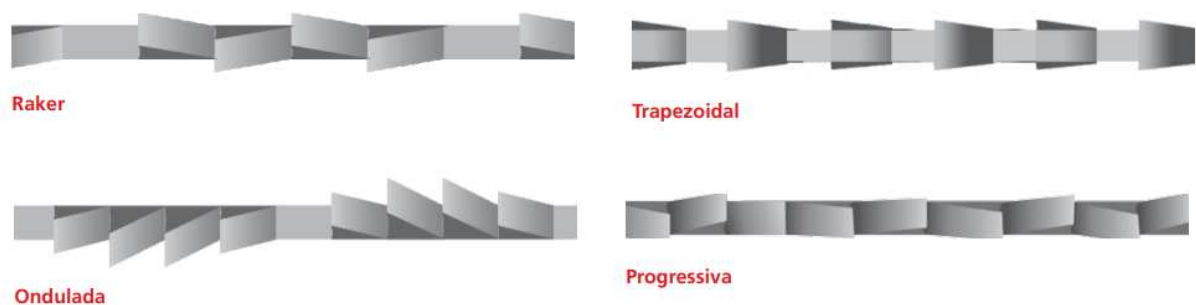
As características de cada uma das lâminas são:

- **Variável Positiva:** O espaçamento variável dos dentes reduz o ruído e a vibração, permitindo taxas de corte mais rápidas, uma maior vida útil e cortes suaves. Ângulo de inclinação maior que  $0^\circ$ ;
- **Variável:** Um design com benefícios semelhantes à forma positiva variável para uso em taxas de corte mais lentas;

- **Padrão:** Resulta em cavacos curtos, podendo ser utilizada em aços com alto teor de carbono, aço ferramenta e ferro fundido. Também usada para materiais com pequenas seções transversais ou perfis de paredes finas. Ângulo de inclinação de  $0^\circ$ ;
- **Skip:** O design amplo do gargalo torna essa lâmina adequada para aplicações não metálicas, como madeira, cortiça, plásticos e materiais de composição. Ângulo de inclinação de  $0^\circ$ ;
- **Hook:** De design semelhante ao da forma Skip, esta lâmina de alta inclinação pode ser usada em materiais que produzem cavaco descontínuo (como ferro fundido), bem como para materiais não metálicos. Ângulo de inclinação maior que  $0^\circ$ ;
- **Trapezoidal T:** Caracterizada por sua ótima performance e ótimo acabamento superficial após o corte. Ângulo de inclinação maior que  $0^\circ$ ;
- **Trapezoidal TSN:** Recomendado para eixos endurecidos à superfície, aços endurecidos até 65 HRC, aços duros com manganês, peças de trabalho cromadas com diâmetros de até 200 mm. Ângulo de inclinação menor que  $0^\circ$ ;

O número de dentes e o ângulo em que são deslocados é chamado de "conjunto de dentes". Ele afeta a eficiência do corte e a capacidade de transporte de cavacos. A ação de corte livre da lâmina de serra de fita é alcançada por meio do conjunto de dentes, onde esses se projetam alternadamente para a esquerda e para a direita além do corpo da lâmina (STARRETT, 2019). Algumas das classificações dos conjuntos de dentes estão expostos na imagem abaixo.

Figura 15 – Exemplos de Conjuntos de Dentes para Lâminas de Serra de Fita



Fonte: Starrett

Cada um dos conjuntos de dentes tem características singulares, sendo elas:

- **Raker:** Sequência de dentes travados para a direita e para a esquerda, seguidos de um dente reto;
- **Ondulada:** Grupo de dentes travados para a esquerda, seguido de outro grupo travados para a direita;

- **Trapezoidal:** Cilindro de metal duro soldado na ponta do dente, com espessura ligeiramente maior que a espessura da serra e com afiação múltipla;
- **Progressiva:** Sequência de dentes travados para a direita e para a esquerda com inclinação progressiva, que geram ação pulsante, seguidos de um dente reto;

Existem vários fatores que afetam a eficiência da serra de fita: projeto do dente, velocidade da fita, taxas de avanço, lubrificação, capacidade e condição da máquina e o material que está sendo cortado. Em resumo, a escolha da lâmina depende do material e da geometria da peça a ser cortada, o que influenciará na escolha dos tipos, conjuntos e número de dentes e na largura e espessura da lâmina.

As serras de fita são utilizadas por um maquinário próprio também chamado de serra-fita. Independente do seu formato, vertical ou horizontal, o funcionamento dessas máquinas é baseado em uma banda de aço com dentes (lâmina) girando sobre duas rodas e passando por uma mesa. Guias e rolamentos localizados acima e abaixo da lâmina mantêm-na em posição enquanto corta, podendo fazer todos os tipos de cortes em praticamente todo tipo de material, o que as torna ferramentas essenciais para quem precisa de cortes de variados tipos e tamanhos.

Figura 16 – Exemplos de Máquinas de Serra de Fita, à Direita, Horizontal, à Esquerda, Vertical



Fonte: Dutra Máquinas

## 2.4 Método de Taguchi

O Método de Taguchi é um método estatístico desenvolvido por Taguchi e Konishi. Inicialmente, foi desenvolvido para melhorar a qualidade dos produtos fabricados (desenvolvimento do processo de manufatura) e posteriormente sua aplicação foi expandida

para muitos outros campos da engenharia. O Método de Taguchi envolve a redução da variação em um processo por meio de projetos robustos de experimentos. O objetivo geral do método é produzir produtos de alta qualidade e com baixo custo para o fabricante e consumidor final. Taguchi desenvolveu um método para projetar experimentos para investigar como diferentes parâmetros de entrada afetam a média e a variância de uma característica de desempenho de um processo, definindo o quão bem ele está funcionando.

O desenho experimental proposto envolve o uso de matrizes ortogonais para organizar os parâmetros que afetam o processo e os níveis em que estarão variando. Ao invés de testar todas as combinações possíveis, como o planejamento fatorial, o método Taguchi testa pares de combinações. Isso permite a coleta dos dados necessários para determinar quais fatores mais afetam a qualidade do produto com um mínimo de experimentação, economizando tempo e recursos. A metodologia funciona melhor quando há um número intermediário de variáveis, poucas interações entre essas e quando apenas algumas contribuem significativamente no resultado final. (NELLIAN, 1996)

O desenho de experimentos pelo Método de Taguchi é dado pelas seguintes etapas:

- Identificar a função principal e seus efeitos;
- Identificar os fatores de ruído, as condições de teste e as características de qualidade;
- Identificar a característica final a ser otimizada;
- Identificar os fatores de controle e seus níveis;
- Selecionar o arranjo ortogonal e montar a matriz;
- Conduzir os experimentos da matriz;
- Examinar os dados, prever os níveis de fator de controle ideais e seu desempenho.
- Conduzir a verificação do experimento;

Embora existam muitas matrizes ortogonais padrão disponíveis, cada uma é destinada a um número específico de variáveis e níveis de projeto independentes. Por exemplo, se alguém deseja conduzir um experimento para entender a influência de 4 variáveis independentes diferentes, com cada variável tendo 3 valores definidos (valores de nível), então uma matriz ortogonal L9 pode ser a escolha certa. Este arranjo assume que não há interação entre dois fatores. Embora em muitos casos nenhuma suposição de modelo de interação seja válida, há alguns casos em que há uma evidência clara de interação. Um caso típico de interação seria a interação entre as propriedades do material e a temperatura.

Figura 17 – Layout de um Arranjo Ortogonal L9 (Fonte: Autoria Própria)

Arranjo Ortogonal L9 (3 <sup>4</sup> )					
Número do Experimento	Variáveis Independentes				Valor do parâmetro de desempenho
	Variável 1	Variável 2	Variável 3	Variável 4	
1	1	1	1	1	p1
2	1	2	2	2	p2
3	1	3	3	3	p3
4	2	1	2	3	p4
5	2	2	3	1	p5
6	2	3	1	2	p6
7	3	1	3	2	p7
8	3	2	1	3	p8
9	3	3	2	1	p9

Fonte: Autoria Própria

É recomendado pelo Dr. Taguchi usar a função de perda de qualidade para medir as características de desempenho. Ela é dada por uma função contínua que é definida em termos do desvio de um parâmetro de projeto de um valor ideal. O valor desta função de perda é posteriormente transformado em relação sinal-ruído (S/N). A razão sinal-ruído mede a sensibilidade da característica de qualidade estudada (rugosidade, vida útil da ferramenta e taxa de produção, por exemplo) de uma maneira controlada relativamente aos fatores não controláveis (fatores de ruído). Para isso, do ponto de vista da qualidade, existem três categorias típicas de características de qualidade, dependendo do objetivo pretendido, e são: “nominal é o melhor”, “maior é o melhor” e “menor é o melhor”, cada uma delas com suas respectivas equações para determinação de S/N. (PEREIRA; RIBEIRO; QUEIJO, 2018)

### 3 Proposta de Planejamento Experimental Utilizando o Método de Taguchi

Como visto anteriormente, Taguchi imaginou um novo método de conduzir o planejamento de experimentos baseado em diretrizes bem definidas. Este método usa um conjunto especial de matrizes, denominado matrizes ortogonais. Essas matrizes padrão estipulam a forma de conduzir o número mínimo de experimentos que podem fornecer a informação completa de todos os fatores que afetam o parâmetros, como rugosidade superficial ou resistência mecânica. (NELLIAN, 1996)

Na primeira etapa do processo experimental, é necessário listar todos os fatores que irão afetar ou influenciar o processo de brasagem e, a partir desses fatores, deve-se identificar aqueles de controle e ruído. Depois da identificação e listagem, as decisões sobre os fatores que afetam significativamente o desempenho terão que ser verificadas e apenas esses devem ser levados em consideração na construção da matriz para experimentação. Uma vez que as variáveis independentes são decididas, o número de níveis para cada variável é decidido. A seleção do número de níveis depende de como o parâmetro de desempenho é afetado devido às diferentes configurações de nível. Para o processo de brasagem de serras de fita bimetálica foram escolhidos os seguintes parâmetros e níveis para os experimentos:

Figura 18 – Parâmetros e Níveis Escolhidos para os Experimentos

<b>Parâmetros</b>	<b>Nível 1</b>	<b>Nível 2</b>	<b>Nível 3</b>
<b>Tipo de Metal de Adição</b>	<b>Cobre</b>	<b>Latão</b>	<b>Prata s/Cd</b>
<b>Pressão de Aperto (Pa)</b>	<b>Baixo</b>	<b>Médio</b>	<b>Alto</b>
<b>Corrente (A)</b>	<b>Baixo</b>	<b>Médio</b>	<b>Alto</b>
<b>Tempo de Brasagem (s)</b>	<b>Baixo</b>	<b>Médio</b>	<b>Alto</b>

Fonte: Autoria Própria

O metal de adição é um parâmetro fundamental para a realização da brasagem, sendo diretamente ligado à qualidade, resistência mecânica e custo do produto final. As serras de fita bimetálicas são normalmente compostas por uma fita de aço carbono ligada à uma outra fita de aço rápido contendo os dentes da serra e, a partir dessa construção, é necessário que os metais de adição sejam compatíveis com os metais de base e com a operação de brasagem por resistência elétrica. A escolha das ligas de prata como um dos níveis se justifica pela grande disponibilidade desse metal de adição no mercado e também sua baixa temperatura de brasagem. Ao mesmo tempo, a escolha do cobre e latão se justifica pelo baixo custo de aquisição, pela resistência final da junta e por suas ligas não possuírem adição de cádmio.

Um segundo importante parâmetro é a pressão/força de aperto da junta durante o processo de brasagem. A pressão de aperto influencia o processo de brasagem por resistência elétrica por seu efeito na resistência de contato das interfaces e na área de

contato devido à deformação dos materiais. Na brasagem por resistência, não se está soldando por pontos, mas ainda estão sendo aplicadas correntes modestas, portanto, uma força adequada é necessária para evitar a formação de arco. Além disso, a pressão de aperto tem como objetivo manter as peças juntas para o fluxo da corrente. É imperativo que a força seja adequada para manter as peças juntas sem forçar o material de brasagem para fora da junta. Uma maior pressão de aperto, por exemplo, pode resultar em menos respingos e um aumento da temperatura mais lento, mas, ao mesmo tempo, resultar em uma resistência à tração menor em certas aplicações.

Como citado anteriormente, processo de brasagem por resistência elétrica envolve o envio de corrente contínua através dos eletrodos e dos materiais de base. A resistência à esta corrente pelos eletrodos, materiais de base e sua interface pode fazer com que os materiais de base aqueçam a uma temperatura mais alta do que a temperatura líquida do metal de adição, podendo modificar a microestrutura do metal de base. A importância do controle da corrente durante os experimentos é também ligada à taxa de aquecimento do metal de adição, que afeta diretamente na sua difusão na junta brasada. (KIM et al., 2016)

O tempo de brasagem também deverá ser analisado ao fim dos experimentos. Quando um curto tempo de aperto é aplicado, o processo de difusão do elemento de liga é incompleto, resultando em uma junta com características mecânicas inadequadas e possíveis descontinuidades. Ao mesmo tempo, um tempo de aperto muito longo pode afetar na taxa de resfriamento da junta e, conseqüentemente, haver modificações na microestrutura do metal de base e de adição na junta. (JIANG et al., 2016)

Os níveis arbitrários "alto", "médio" e "baixo" foram utilizados uma vez que valores específicos serão empregados uma vez que os experimentos forem sendo definidos numa aplicação prática.

Após a seleção das variáveis a serem controladas e os níveis de cada uma delas, é necessário selecionar os parâmetros de saída que serão analisados e o tipo de arranjo ortogonal para os experimentos. Para a operação de corte utilizando uma serra de fita bimetálica, será importante a resistência à tração da junta, medido em MPa, representada respectivamente pelos resultados "r" na tabela abaixo. A partir da combinação de quatro fatores de entrada, cada um deles com três níveis diferentes, o arranjo ortogonal mais adequado é o L9, uma vez que não há interação entre os fatores de entrada. Assim, foi construída a matriz de experimentos para definição dos parâmetros ótimos de entrada para a brasagem de serras de fita bimetálicas:



Figura 19 – Desenho da Matriz Ortogonal de Experimentos

Número do Experimento	Metal de Adição	Pressão de Aperto	Corrente	Tempo de Brasagem	Resistência à tração (MPa)
1	1	1	1	1	r1
2	1	2	2	2	r2
3	1	3	3	3	r3
4	2	1	2	3	r4
5	2	2	3	1	r5
6	2	3	1	2	r6
7	3	1	3	2	r7
8	3	2	1	3	r8
9	3	3	2	1	r9

Fonte: Autoria Própria

A mesma matriz pode ser observada com o detalhamento de cada um dos parâmetros de entrada citados anteriormente:

Figura 20 – Desenho com Níveis da Matriz Ortogonal de Experimentos

Número do Experimento	Metal de Adição	Pressão de Aperto	Corrente	Tempo de Brasagem	Resistência à tração (MPa)
1	Cobre	Baixo	Baixo	Baixo	r1
2	Cobre	Médio	Médio	Médio	r2
3	Cobre	Alto	Alto	Alto	r3
4	Latão	Baixo	Médio	Alto	r4
5	Latão	Médio	Alto	Baixo	r5
6	Latão	Alto	Baixo	Médio	r6
7	Prata	Baixo	Alto	Médio	r7
8	Prata	Médio	Baixo	Alto	r8
9	Prata	Alto	Médio	Baixo	r9

Fonte: Autoria Própria

Após os experimentos, é necessária a análise dos dados e, diferentemente de uma análise "fatorial completo", também a definição da relação sinal-ruído (S/N) para resistência à tração para cada um dos experimentos. Num processo de corte, os operadores buscam um quadro em que a serra tenha a maior resistência à tração possível e, por isso, o S/N deve ser calculado seguindo o modelo "maior é o melhor", a partir da equação 3.1 (ATHREYA; VENKATESH, 2012):

$$S/N_s = -10 \times \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2}\right) \quad (3.1)$$

Onde "Y" são os dados observados e "n" representa o número de observações. Para essa aplicação, os valores de "Y" serão substituídos para os valores de "r" (Resistência à tração).

A partir dos cálculos de S/N, são construídas tabelas e gráficos para análise pontual do sinal-ruído de cada um dos parâmetros de entrada. O modelo para os experimentos em questão e análise da resistência à tração é apresentado abaixo:

Figura 21 – Modelo de razão S/N para cada experimento

Número do Experimento	Razão S/N
1	k1
2	k2
3	k3
4	k4
5	k5
6	k6
7	k7
8	k8
9	k9

Fonte: Autoria Própria

A partir dos valores da razão S/N de cada experimento, é possível compilar os valores somados e médios do sinal-ruído para cada um dos níveis dos parâmetros de entrada em uma tabela, como mostrado abaixo:

Figura 22 – Média de Razão S/N Para Cada Variável

Nível	Tipo de Metal de Adição		Pressão de Aperto		Corrente		Tempo de Brasagem	
	Soma (Sm)	Média S/N	Soma (Sp)	Média S/N	Soma (Sc)	Média S/N	Soma (St)	Média S/N
1	Sm1	(Sm1)/3	Sp1	(Sp1)/3	Sc1	(Sc1)/3	St1	(St1)/3
2	Sm2	(Sm2)/3	Sp2	(Sp2)/3	Sc2	(Sc2)/3	St2	(St2)/3
3	Sm3	(Sm3)/3	Sp3	(Sp3)/3	Sc3	(Sc3)/3	St3	(St3)/3

Fonte: Autoria Própria

Onde tem-se que:

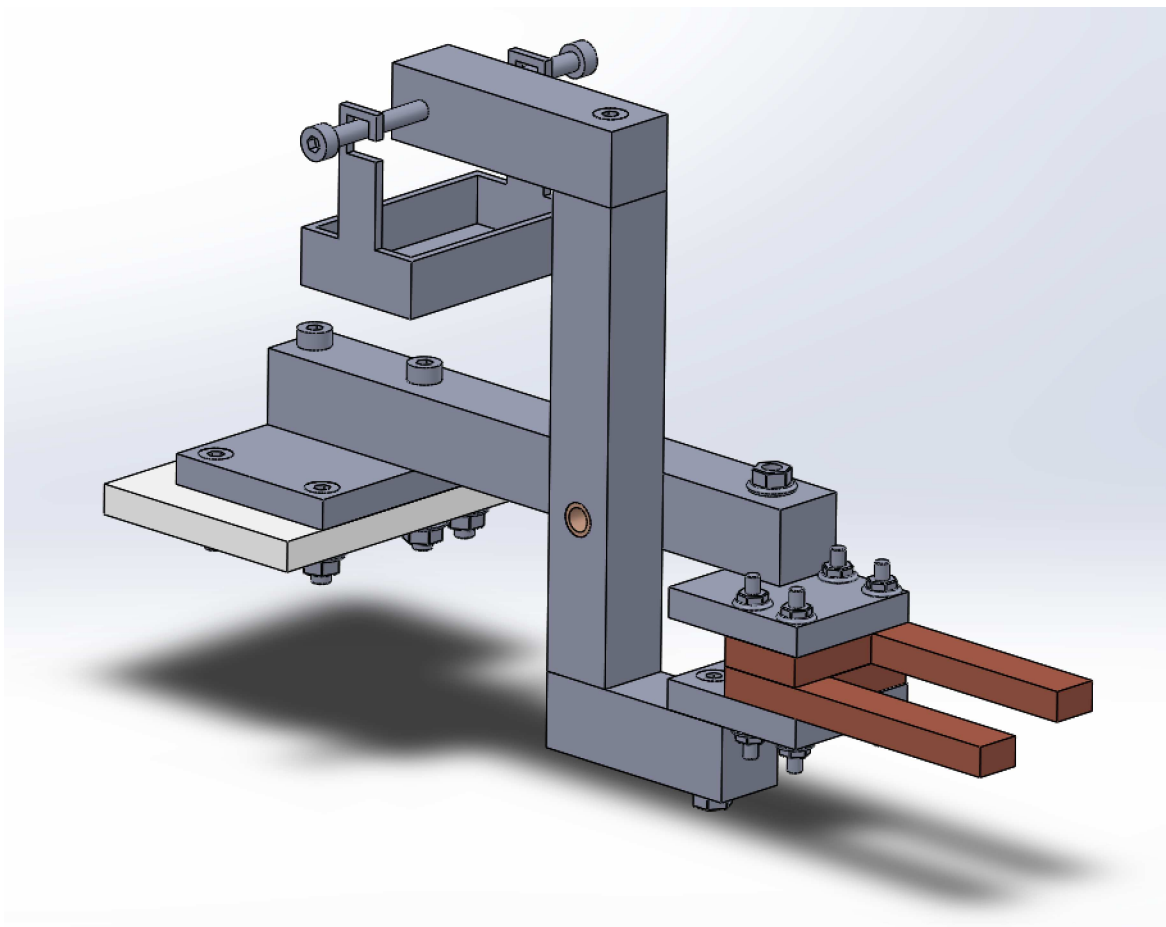
- $Sm1 = k1+k2+k3$ ,  $Sm2 = k4+k5+k6$  e  $Sm3 = k7+k8+k9$ ;
- $Sp1 = k1+k4+k7$ ,  $Sp2 = k2+k5+k8$  e  $Sp3 = k3+k6+k9$ ;
- $Sc1 = k1+k6+k8$ ,  $Sc2 = k2+k4+k9$  e  $Sc3 = k3+k5+k7$ ;
- $St1 = k1+k5+k9$ ,  $St2 = k2+k6+k7$  e  $St3 = k3+k4+k8$ ;

Para seleção da combinação ótima de variáveis de entrada no modelo "maior é melhor", é necessário escolher o nível com a maior média S/N para cada uma das variáveis na realização do processo de brasagem. (ATHREYA; VENKATESH, 2012)

#### 4 Proposta de Projeto Mecânico de Alicates de Mesa Para Brasagem de Serras de Fita Bimetálicas

Para a realização da brasagem de serras de fita bimetálicas por meio da brasagem de resistência elétrica, faz-se necessário um mecanismo que seja capaz de alojar o eletrodo e contra-eletrodo e, ao mesmo tempo, aplicar a pressão de aperto na junta a ser unida. Para tais finalidades, o presente trabalho propõe o seguinte projeto para um alicate de mesa para brasagem de serras de fita bimetálicas, utilizando o software SolidWorks para isso:

Figura 23 – Visão Geral do Mecanismo Proposto



Fonte: Autoria Própria

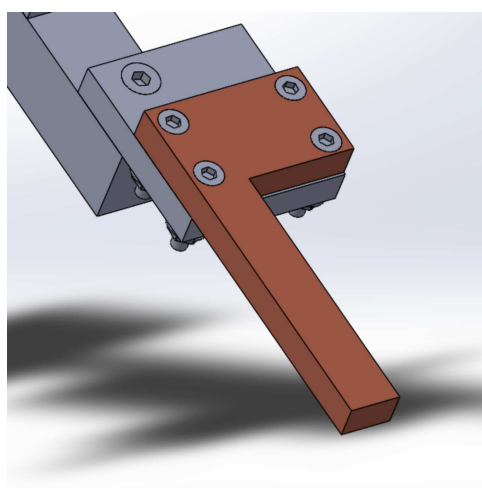
Para o mecanismo, a escolha dos materiais foi baseada na disponibilidade e preço de cada um dos componentes. Para isso, foram utilizadas barras quadradas de aço 1045 com 5/8" de dimensão, chapas do mesmo aço com espessura de 1/4", chapas de cobre também com espessura de 1/4" para os eletrodos, parafusos e porcas nos padrões M3, M4 e M5, além de uma bucha de bronze para união dos braços do alicate e, ao mesmo tempo, garantia do deslizamento e rotação dos alicates. A escolha de tais materiais também foi influenciada pelo processo de construção do mecanismo, que requer apenas processos relativamente simples de furação e corte e montagem por meio de parafusos e porcas. Para

a idealização do mecanismo, foi utilizada como base a Serra de Fita Bimetálica Classic LENOX - (4-6D) 2,37 m, com espessura de 0.9 mm e altura de 3/4" (19,05 mm).

Para o processo de brasagem da serra de fita, é necessário que haja a sobreposição das extremidades da fita à serem unidas com o metal de adição e, para o perfeito funcionamento em uma máquina de serra de fita, é importante que a espessura da serra seja uniforme por todo o seu comprimento. Para isso, as extremidades a serem unidas devem passar por um processo de retífica para reduzir a espessura de cada uma delas e ainda permitir um espaçamento de junta suficiente para penetração do metal de adição. Para calcular o comprimento da sobreposição da junta, utiliza-se a equação 2.2. O fator de segurança escolhido foi de 2 e o valor da resistência à tração do membro mais fino utilizado foi de 30000 psi (206,84 MPa), segundo a ficha técnica da serra. Levando em consideração que diferentes metais de adição poderão ser utilizados no mecanismo, utilizou-se o valor médio de 172,4 MPa para a resistência ao cisalhamento do metal de adição. (OERLIKON-METCO, 2014). Com o processo de retífica, a espessura do membro mais fino na equação é de 0.4 mm, referente à metade da espessura original da extremidade subtraída de 0.05 mm para um espaçamento final de junta de 0,1 mm, podendo ser adequado para metais de adição de cobre, prata e latão. Por fim, a sobreposição da junta para a referente aplicação e garantia da resistência final da união é de 0.96 mm.

Os eletrodos de cobre são partes fundamentais para bom funcionamento do mecanismo e qualidade da junta brasada. O formato em L em lados opostos foi escolhido para possibilitar a alimentação por meio de, por exemplo, uma garra "jacaré" em cada um dos lados sem que estas tivessem contato entre em si ou com a serra de fita, evitando possíveis curtos circuitos. A largura da parte útil do eletrodo é exatamente a altura da fita (3/4") e o espaçamento dos parafusos na sua montagem é suficiente para que a junta sobreposta seja posicionada de forma que toque apenas a parte de cobre do eletrodo e não os parafusos.

Figura 24 – Proposta de Eletrodos de Cobre Para o Mecanismo



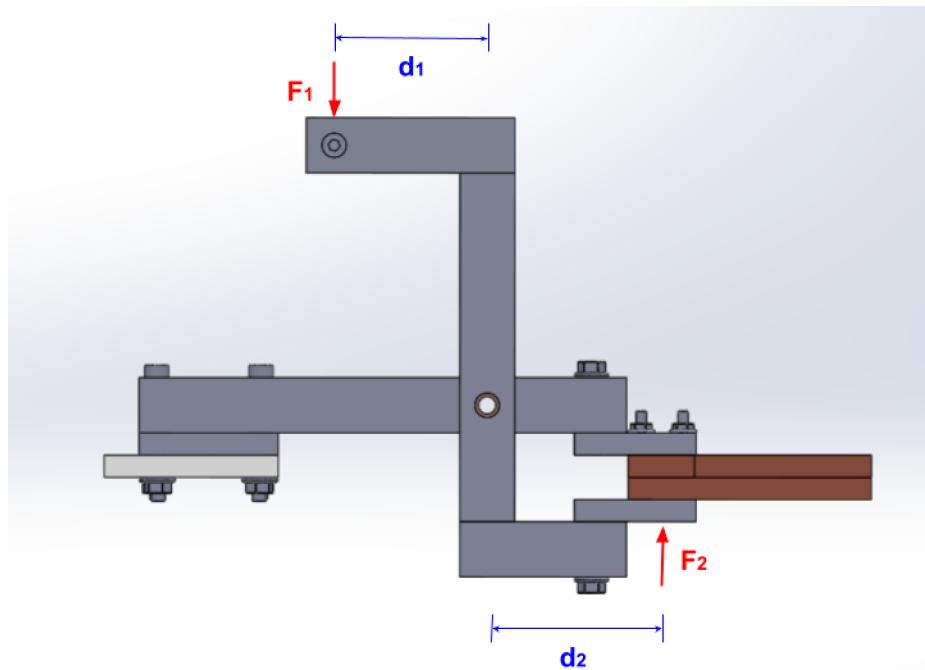
Fonte: Autoria Própria

Um dos principais parâmetros a serem controlados durante o experimento é a força e pressão de aperto do alicate. Para isso, o operador deverá aplicar uma força em uma das extremidades do braço do alicate e essa força será transferida para a outra extremidade por meio do torque. A partir deste conceito, é possível calcular a força sendo aplicada na serra de fita durante o processo por meio da equação 4.1:

$$F_2 = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)F_1 \quad (4.1)$$

Onde  $F_2$  é a força no eletrodo,  $F_1$  é a força aplicada no braço do alicate e  $d_1$  e  $d_2$  são as distâncias entre a posição de aplicação da força e o eixo de rotação. Conhecida a força sendo aplicada no eletrodo e a sua área, pode-se encontrar a pressão de aperto na serra de fita durante o processo de brasagem.

Figura 25 – Braços de Alavanca Formados Durante a Utilização do Mecanismo



Fonte: Autoria Própria

No mancal de deslizamento constituído pela bucha e as interfaces dos braços de alavanca deverão, a bucha e o furo deverão ter um ajuste de folga H7/g6, que corresponde em um ajuste deslizante, onde as peças não são destinadas a correr livremente, mas sim a mover-se e girar livremente, bem como a se posicionar com precisão.

Para a aplicação de força na extremidade do braço superior do alicate, é proposta uma "bandeja" para alojar os elementos de massa. A precisão do valor da força sendo utilizada durante o processo de brasagem pode ser garantida por meio de pesos padrão de balança ou pode-se usar uma célula de carga para possibilitar o uso de areia ou objetos com massa desconhecida. Ao mesmo tempo, fatores importantes como a corrente elétrica

e o tempo de brasagem serão controlados por meio da fonte inversora e um cronômetro, respectivamente.

## 5 Considerações Finais

O projeto mecânico do alicate de bancada para realização de processos de brasagem de serras de fita bimetálicas proposto neste trabalho mostra-se viável e completo para tal operação. Levando em consideração a disponibilidade de material e tempo em uma empresa ou laboratório, a construção do mecanismo poderá contar com elementos de dimensões e materiais diferentes do proposto, por exemplo, nos braços do alicate, sem que haja diferenças significativas na utilização do mecanismo e na qualidade final da junta brasada. Para ilustração e fabricação do modelo proposto, os desenhos técnicos de conjunto e dos componentes encontram-se no Anexo B deste trabalho.

Para a aplicação do Método de Taguchi, como apresentado anteriormente, é necessário escolher os parâmetros de saída que serão comparados após o fim de cada experimento. Para este trabalho, a resistência à tração da junta foi escolhida após pesquisa na literatura e avaliação da viabilidade da análise de alguns parâmetros na junta brasada.

Para uma serra de fita bimetálica, um dos parâmetros de saída propostos no início do estudo seria a sua vida útil. Utilizando maquinário presente nos laboratórios da Faculdade de Engenharia da UFJF, a avaliação da vida útil seria realizada pelo corte contínuo de, por exemplo, tubos e barras de aço até o desprendimento da junta. Entretanto, tal experimento é inviável dado a grande quantidade de material que precisaria ser cortada e a possibilidade do desgaste dos dentes da serra antes que a junta brasada em si falhasse. Devido a influência da temperatura de trabalho na resistência da junta, não seria válido medir a vida útil da serra apenas girando nos rolamentos de uma máquina de serra de fita, sem um material sendo cortado. O mesmo pode ser dito para análise de fadiga, que é inviável pelos mesmos motivos e também pela grande quantidade de tempo necessária para realização de cada um dos experimentos.

Uma outra proposta de análise da junta seria a examinação metalográfica. Métodos não-destrutivos de análise são hoje técnicas modernas de imagem por meio da aplicação de ultrassom e raios-x para revelar informações sobre a qualidade da solda, podendo ser observados, por exemplo: descontinuidades, poros, inclusões de material e trincas. Entretanto, estes testes dependem de uma geometria adequada da junta, sendo necessário um estudo aprofundado para seleção do método de testes para a presente aplicação.(NEUENSCHWANDER et al., 1997). A ASME (Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos, do inglês: American Society of Mechanical Engineers) propõe como um teste padrão de juntas por meio de descolamento/arrancamento ("peel test"). Nele, um dos membros da junta brasada é presa em uma morsa e o outro é puxado de forma perpendicular à ela e a superfície é analisada. Neste teste, para ser considerada com aceitável, a junta deve apresentar uma área de defeitos menor que 25% da sua área total.(ASME, 1968). A examinação metalográfica é importante para definição da qualidade da junta, mas, dado os diferentes tipos e dimensões de defeitos que podem ser encontrados, esta

análise se mostra demasiadamente subjetiva para ser utilizada no Método de Taguchi.

Muito utilizada para avaliação de qualidade de juntas soldadas, a dureza também foi considerada como parâmetro de saída no Método de Taguchi a ser analisado. Entretanto, pela geometria e espessura da junta brasada na serra de fita bimetálica, esse parâmetro é inviável de ser devidamente medido e aplicado nos arranjos ortogonais.

### 5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

A partir da proposição do projeto do alicate de mesa para brasagem de serra de fita bimetálicas e do planejamento experimental utilizando o Método de Taguchi, é sugerido para trabalhos futuros:

- Construção do alicate de mesa e aplicação prática do mesmo em processos de brasagem de serra de fita;
- Utilização do planejamento experimental para definição de parâmetros de entrada ótimos para o processo de brasagem de serras de fita;
- Complementação da matriz ortogonal do Método de Taguchi a partir da seleção e análise de outros parâmetros de saída, diferentes da resistência à tração;
- Comparação dos resultados experimentais utilizando diferentes ligas de um mesmo grupo, por exemplo, prata BAg;
- Buscar novas utilizações, além da brasagem de serra de fita, para o mecanismo proposto;



## REFERÊNCIAS

- ASME, A. S. o. M. E. *Qualification Standard for Welding and Brazing Procedures, Welders, Brazers, and Welding and Brazing Operators: ASME Boiler and Pressure Vessel Code. Section IX*. [S.l.: s.n.], 1968. 187 p. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=2BaloAEACAAJ>>, Acesso em 03/09/2020.
- ATHREYA, S.; VENKATESH, Y. D. Application Of Taguchi Method For Optimization Of Process Parameters In Improving The Surface Roughness Of Lathe Facing Operation. v. 1, n. 3, p. 13–19, 2012.
- AWS, A. W. S. *Brazing Handbook*. 5th edition. ed. [S.l.]: American Welding Society, 2007.
- DUTRAMAQUINAS, n. . D. <https://www.dutramaquinas.com.br/p/serra-de-fita-horizontal-vertical-com-capacidade-de-corte-ate-250-mm-fm500-fm500>. 2020.
- ESAB. *Apostila de Metalurgia da Soldagem*. [S.l.]: ESAB BR, 2004.
- FILHO, O. G.; DUARTE, B. S. *Influencia da corrente eletrica, da forza de recalque e do tratamento termico de revenimento na soldagem topo-a-topo por centelhamento de serras de fita bimetalica*. 5–6 p. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2007.
- GASWELD. *Bandsaw Blade Assorted Sizes (Special Offer)*. 2020. Disponível em: <<https://www.gasweld.ie/product/bandsaw-blade-assorted-sizes-special-offer-20>>, Acesso em 16/05/2020.
- GH-INDUCTION. *Brazing Guide*. 2010. Disponível em: <<https://www.ghinduction.com/wp-content/uploads/2011/09/GH-Brazing-Guide1.pdf>>, Acesso em 15/05/2020.
- JIANG, C. et al. Effect of brazing temperature and holding time on joint properties of induction brazed wc-co/carbon steel using ag-based alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 229, p. 562 – 569, 2016. ISSN 0924-0136. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013615301503>>, Acesso em 10/12/2020.
- KIM, J.-T. et al. Effect of heating rates on microstructures in brazing joints of STS 304 compact heat exchanger using MBF 20. *Journal of Welding and Joining*, v. 34, 04 2016.
- MACHADO, I. G. *Soldagem amp; Técnicas Conexas: Processos*. [S.l.]: Ed. do Autor, 1996.
- MARQUES, P. V.; JOSE., M. P.; BRACARENSE, A. Q. *Soldagem: fundamentos e tecnologia*. 3ª ed.. ed. [S.l.]: Ed. UFMG, 2011.
- NELLIAN, S. *Integration Of Taguchi Design Of Experiments And Finite Element Method For Robust Design*. Dissertação (Mestrado), 1996. Disponível em: <<http://www.ecs.umass.edu/mie/labs/mda/fea/sankar/int.html>>, Acesso em 11/11/2020.
- NEUENSCHWANDER, J. et al. Nondestructive testing of brazed joints. In: . [S.l.: s.n.], 1997.

OERLIKON-METCO. *Introduction to Brazing*. 2014. Disponível em: <[https://www.oerlikon.com/ecomaXL/files/metco/oerlikon\\_BRO\\_0010.4\\_introduction\\_oBrazing\\_EN.pdf](https://www.oerlikon.com/ecomaXL/files/metco/oerlikon_BRO_0010.4_introduction_oBrazing_EN.pdf)>, Acesso em 17/04/2020.

OKIMOTO, P. C. [S.l.]: Universidade Federal do Paraná, 2005. Disponível em: <<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM254/Prof-Okimoto/Aula3.pdf>>, Acesso em 26/04/2020.

PEREIRA, D.; RIBEIRO, J.; QUEIJO, L. Otimização de parâmetros de fresagem usando o método de taguchi com a análise relacional de grey. *Iberoamerican Journal of Industrial Engineering*, 2018.

PILANAMETAL. *Band Saw Blades*. 2013. Disponível em: <<https://www.pilanametal.com/band-saw-blades.html>>, Acesso em 16/04/2020.

SCHMOOR, S. B. *Brazing Processes - Resistance Brazing*. 2015. Disponível em: <<https://www.schmoor-brazing.com/en/brazing-processes.html>>, Acesso em 12/05/2020.

STARRETT. *Catálogo - Lâminas de Serra de Fita/Metais*. 2019. Disponível em: <<https://www.starrett.com.br/catalogo-de-laminas-de-serra-de-fita/files/assets/common/downloads/catalogo-laminas-serra-fita-metais.pdf>>, Acesso em 11/06/2020.

TWI, T. W. I. *What is meant by wetting and how can it be used?* 2017. Disponível em: <<https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-meant-by-wetting-and-how-can-it-be-used>>, Acesso em 05/05/2020.

WAINER, E.; BRANDI, S.; MELLO, F. de. *Soldagem: Processos e Metalurgia*. Edgard Blücher, 1992. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=qiUjPwAACAAJ>>, Acesso em 06/04/2020. ISBN 9788521202387. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=qiUjPwAACAAJ>>.

## ANEXO A – TERMO DE AUTENTICIDADE



UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
FACULDADE DE ENGENHARIA

### Termo de Declaração de Autenticidade de Autoria

Declaro, sob as penas da lei e para os devidos fins, junto à Universidade Federal de Juiz de Fora, que meu Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica é original, de minha única e exclusiva autoria. E não se trata de cópia integral ou parcial de textos e trabalhos de autoria de outrem, seja em formato de papel, eletrônico, digital, áudio-visual ou qualquer outro meio.

Declaro ainda ter total conhecimento e compreensão do que é considerado plágio, não apenas a cópia integral do trabalho, mas também de parte dele, inclusive de artigos e/ou parágrafos, sem citação do autor ou de sua fonte.

Declaro, por fim, ter total conhecimento e compreensão das punições decorrentes da prática de plágio, através das sanções civis previstas na lei do direito autoral<sup>1</sup> e criminais previstas no Código Penal<sup>2</sup>, além das cominações administrativas e acadêmicas que poderão resultar em reprovação no Trabalho de Conclusão de Curso.

Juiz de Fora, 05 de Março de 2021.

Henrique Ayres de Oliveira  
NOME LEGÍVEL DO ALUNO (A)

201571006  
Matrícula

Henrique Ayres de Oliveira  
ASSINATURA

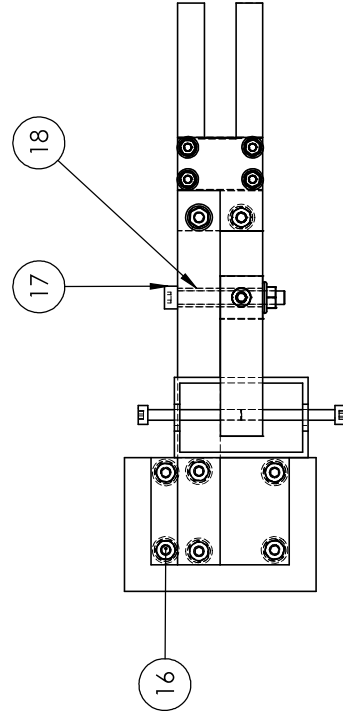
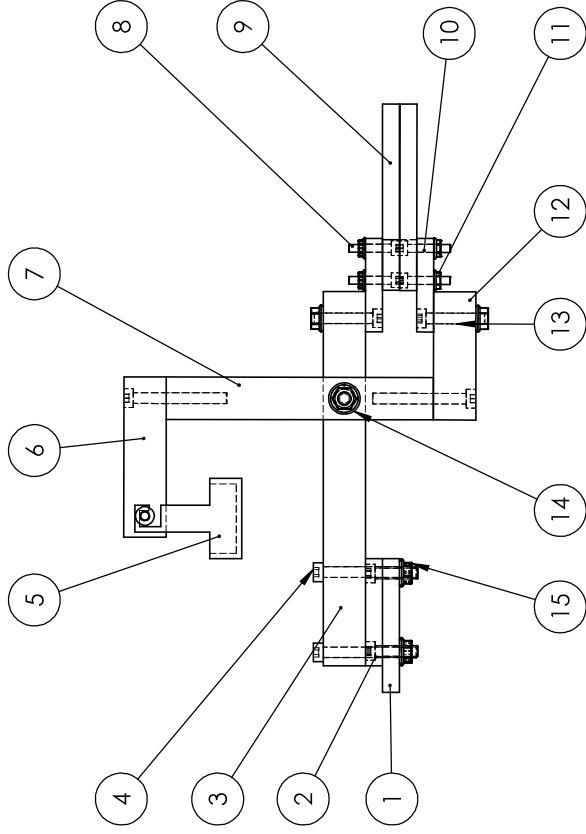
115.376.966-29  
CPF


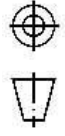
<sup>1</sup> LEI N° 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998. Altera, atualiza e consolida a legislação sobre direitos autorais e dá outras providências.

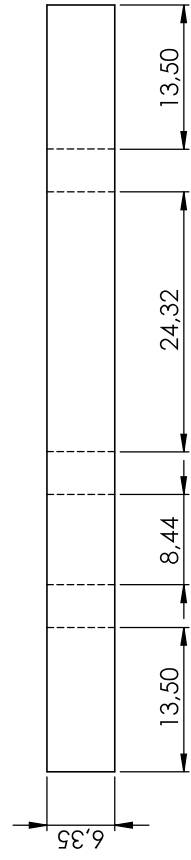
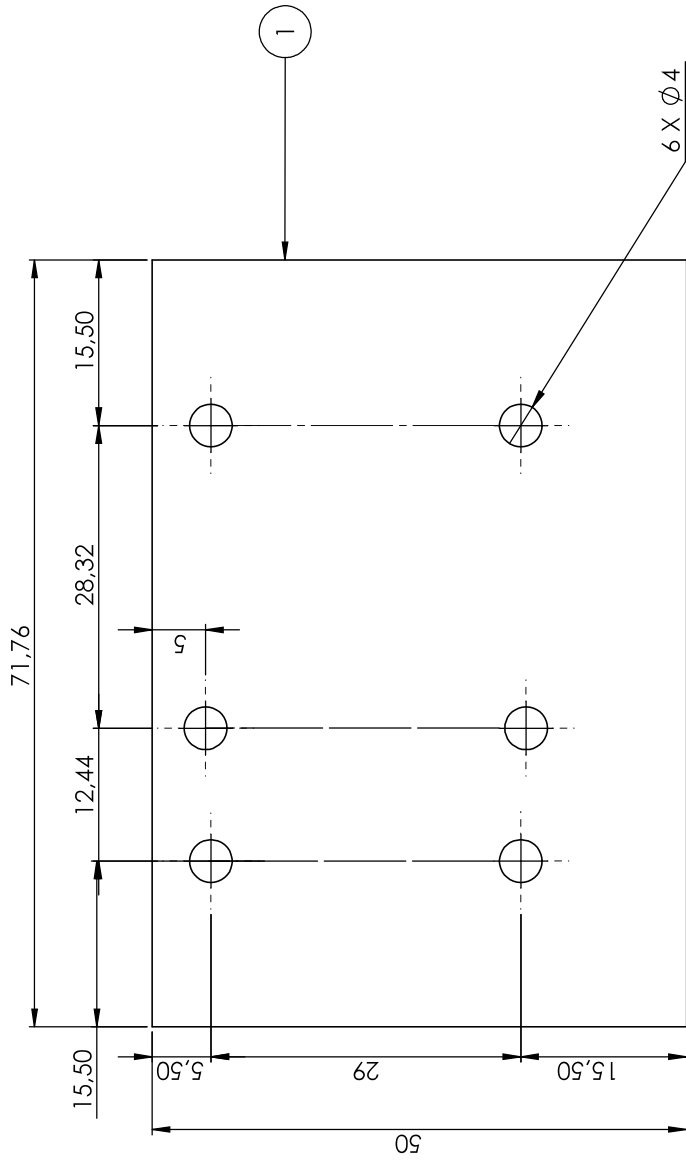
<sup>2</sup> Art. 184. Violar direitos de autor e os que lhe são conexos: Pena - detenção, de 3 (três) meses a 1 (um) ano, ou multa.


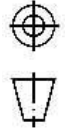
## **ANEXO B – DESENHO DE CONJUNTO E DESENHOS DE DETALHES**

Nas próximas páginas encontram-se o desenho de conjunto e os desenhos de detalhes referentes ao projeto mecânico do alicate de mesa para brasagem de serras de fita bimetálicas proposto neste trabalho.

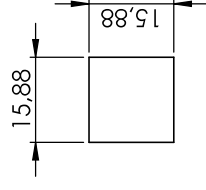
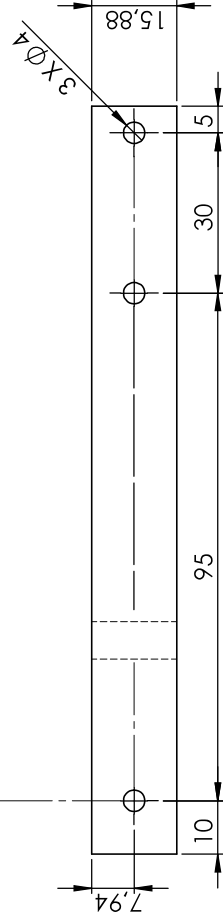
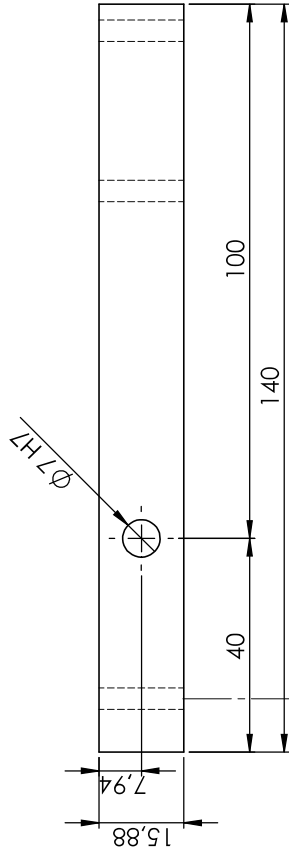



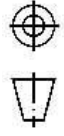
18	BUCHA	1	BRONZE EXT. M7 INT. M5
17	PARAFUSO CABEÇA DE SOQUETE	1	M5 X 40
16	PARAFUSO CABEÇA DE SOQUETE	4	M4 X 22
15	PORCA SEXTAVADA FLANGELADA	8	M4
14	PORCA SEXTAVADA FLANGELADA	1	M5
13	PARAFUSO CABEÇA DE SOQUETE	2	M4 X 22
12	BRAÇO HORIZONTAL INFERIOR	1	BARRA AÇO 1045 5/8"
11	PORCA SEXTAVADA FLANGELADA	8	M3
10	PORTA-ELETRODO	2	CHAPA AÇO 1045 1/4"
9	ELETRODO	2	CHAPA COBRE 1/4"
8	PARAFUSO CABEÇA DE SOQUETE	8	M3 X 16
7	BRACO VERTICAL DE ALAVANCA	1	BARRA AÇO 1045 5/8"
6	BRAÇO HORIZONTAL SUPERIOR	1	BARRA AÇO 1045 5/8"
5	BANDEJA PORTA-PESO	1	LATÃO
4	PARAFUSO CABEÇA DE SOQUETE	6	M4 X 35
3	BRAÇO HORIZONTAL DE ALAVANCA	1	BARRA AÇO 1045 5/8"
2	BASE ENGASTADA	1	CHAPA AÇO 1045 1/4"
1	MESA	1	MADERA
ITEM	DENOMINAÇÕES	QUANT.	MATERIAL E DIMENSÕES
	RESPONSÁVEL: HENRIQUE AYRES DE OLIVEIRA	ASSINATURA:	
	CONTEÚDO: DESENHO DE CONJUNTO		
ESCALA: 1:2	PROJETO: TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO	UNIDADE: mm	
	LOCAL: JUIZ DE FORA - MG	DATA: 23/02/21	DESENHO: 1
			REVISÃO: 0

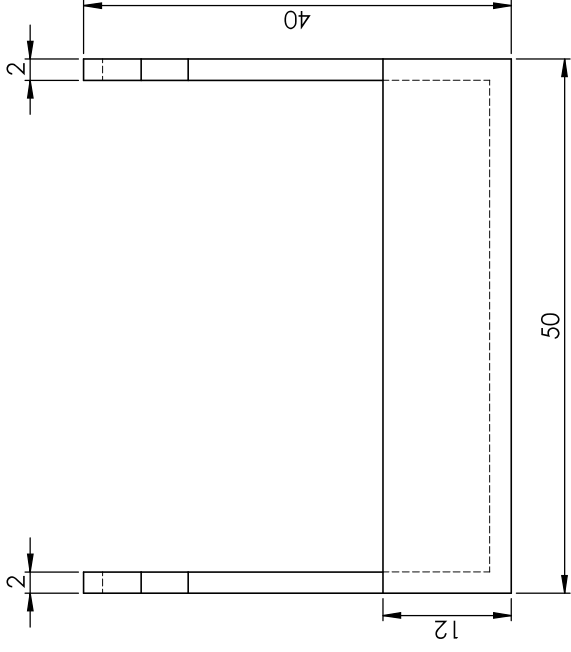


	<b>RESPONSÁVEL:</b> HENRIQUE AYRES DE OLIVEIRA		<b>ASSINATURA:</b>	
	<b>CONTEÚDO:</b> MESA			
<b>PROJETO:</b> TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO		<b>UNIDADE:</b> mm		<b>REVISÃO:</b> 0
<b>LOCAL:</b> JUIZ DE FORA - MG		<b>DATA:</b> 23/02/21	<b>DESENHO:</b> 2	<b>REVISÃO:</b> 0
<b>ESCALA:</b> 1:1				

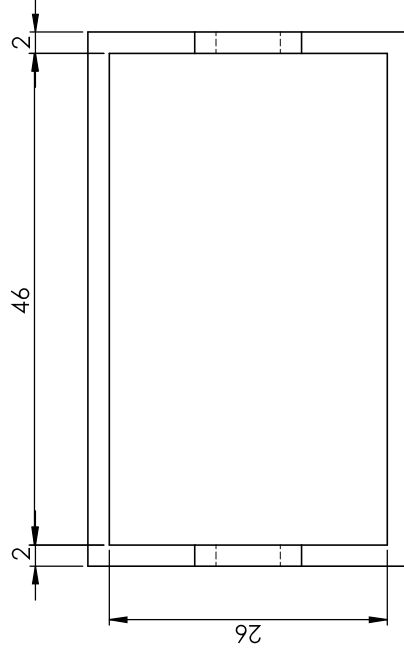
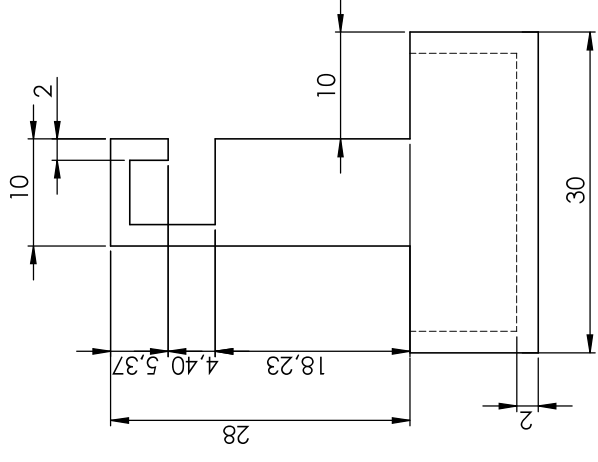
3


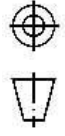


	<b>RESPONSÁVEL:</b> HENRIQUE AYRES DE OLIVEIRA	<b>ASSINATURA:</b>	<b>REVISÃO:</b> 0	
			<b>DESENHO:</b> 3	<b>DATA:</b> 23/02/21
<b>ESCALA:</b> 1:2	<b>PROJETO:</b> TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO		<b>UNIDADE:</b> mm	
			<b>LOCAL:</b> JUIZ DE FORA - MG	<b>DATA:</b> 23/02/21



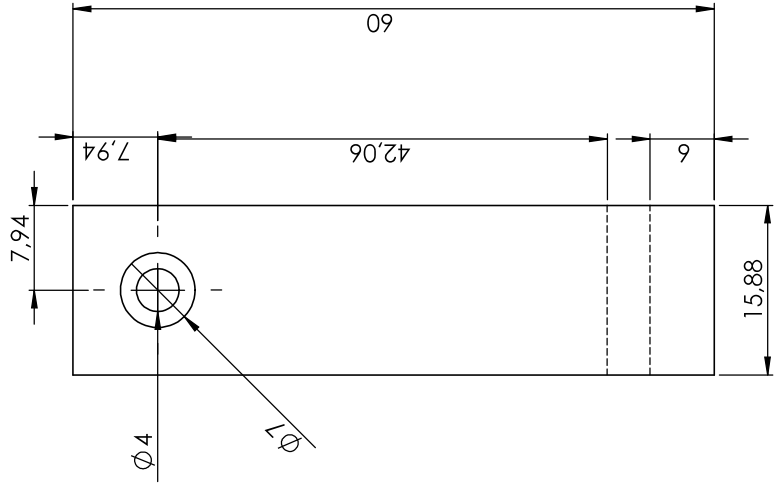
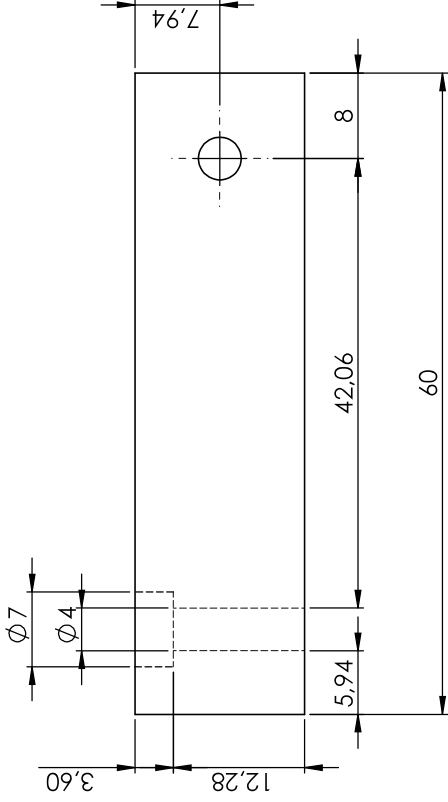
5


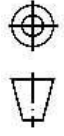


	<b>RESPONSÁVEL:</b> HENRIQUE AYRES DE OLIVEIRA		<b>ASSINATURA:</b>	
	<b>CONTEÚDO:</b> BANDEJA PORTA-PESO			
<b>ESCALA:</b> 1:1	<b>PROJETO:</b> TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO		<b>UNIDADE:</b> mm	
<b>LOCAL:</b> JUIZ DE FORA - MG	<b>DATA:</b> 23/02/21	<b>DESENHO:</b> 4	<b>REVISÃO:</b> 0	

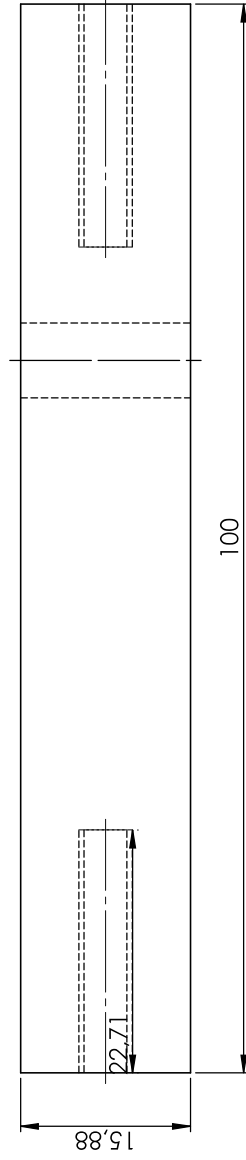
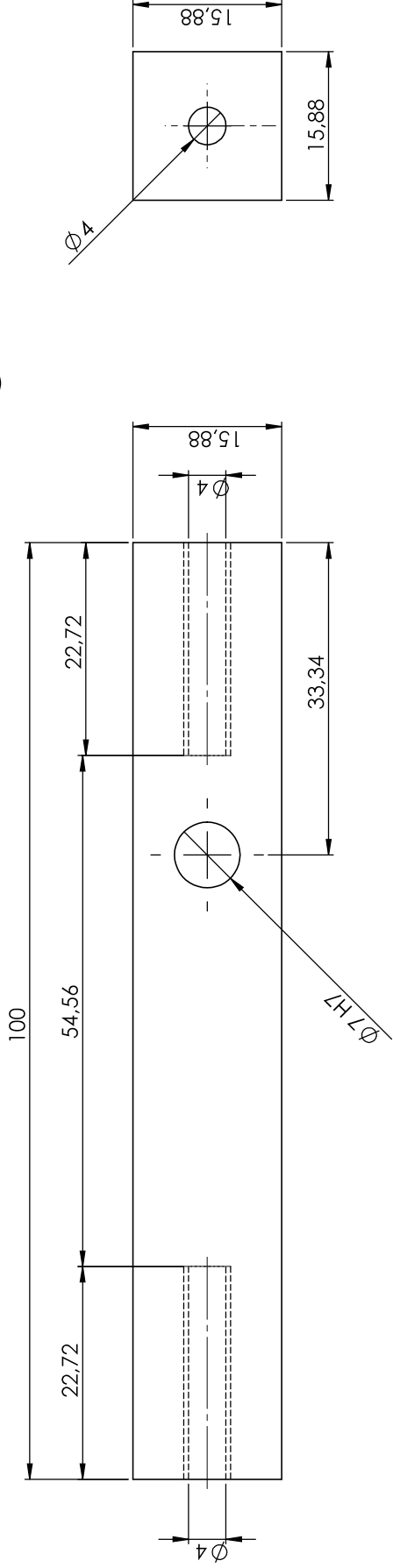




6



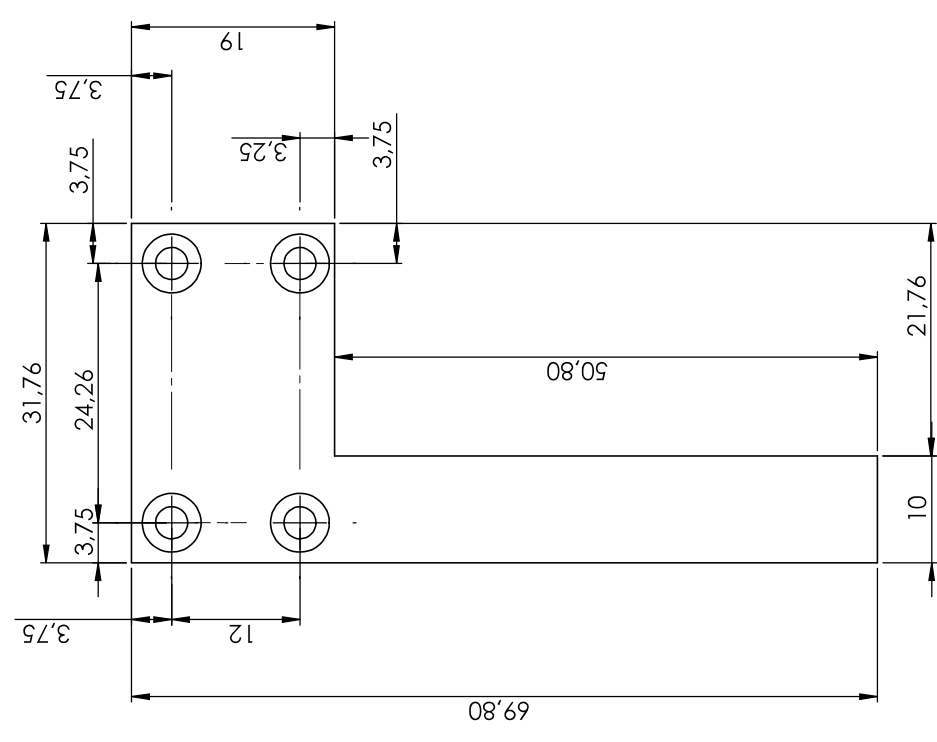
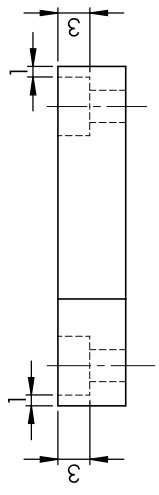
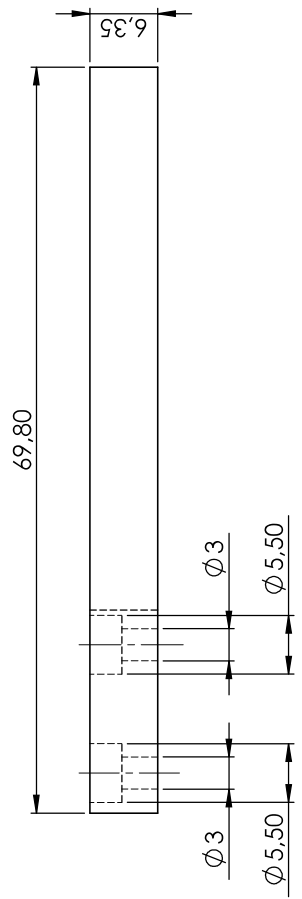
	<b>RESPONSÁVEL:</b> HENRIQUE AYRES DE OLIVEIRA	<b>ASSINATURA:</b>
	<b>CONTEÚDO:</b> BRAÇO HORIZONTAL SUPERIOR	
<b>ESCALA:</b> 1:1	<b>PROJETO:</b> TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO	<b>UNIDADE:</b> mm
<b>LOCAL:</b> JUIZ DE FORA - MG	<b>DATA:</b> 23/02/21	<b>DESENHO:</b> 5
		<b>REVISÃO:</b> 0

7



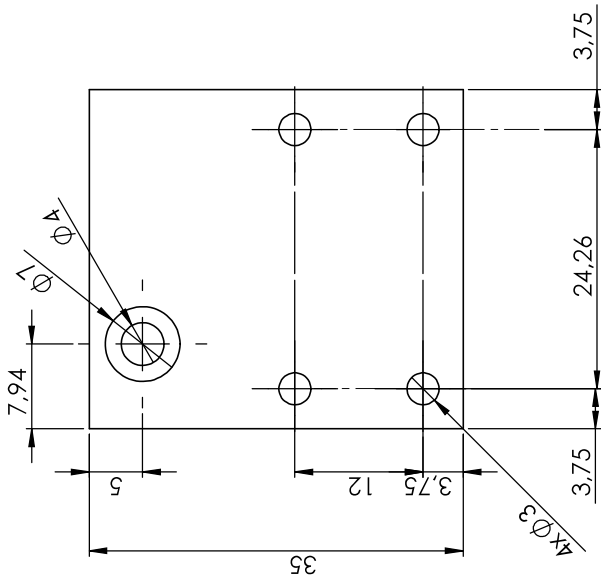
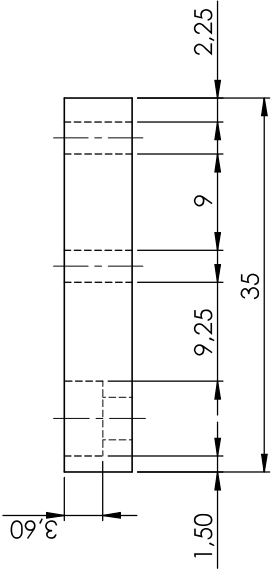
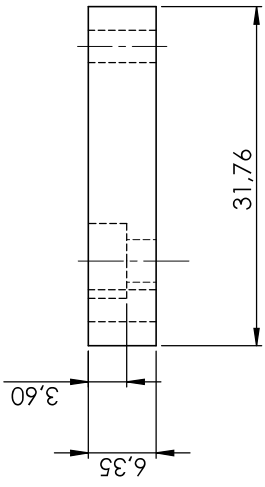
	<b>RESPONSÁVEL:</b> HENRIQUE AYRES DE OLIVEIRA	<b>ASSINATURA:</b>
	<b>CONTEÚDO:</b> BRAÇO VERTICAL DE ALAVANCA	
<b>ESCALA:</b> 1:1	<b>PROJETO:</b> TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO	<b>UNIDADE:</b> mm
<b>LOCAL:</b> JUIZ DE FORA - MG	<b>DATA:</b> 23/02/21	<b>DESENHO:</b> 6
		<b>REVISÃO:</b> 0

9



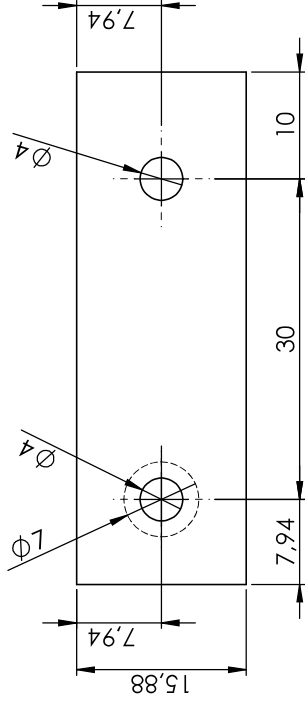
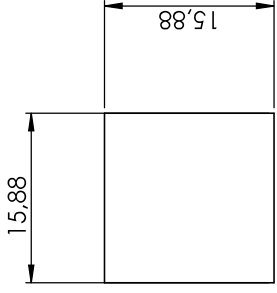
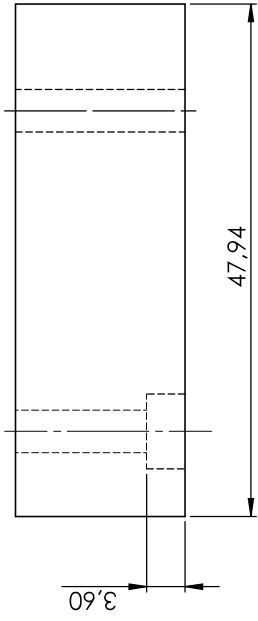
	<b>RESPONSÁVEL:</b> HENRIQUE AYRES DE OLIVEIRA	<b>ASSINATURA:</b>	
	<b>CONTEÚDO:</b> ELETRODO		
<b>PROJETO:</b> TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO	<b>UNIDADE:</b> mm		
<b>ESCALA:</b> 1:1	<b>LOCAL:</b> JUIZ DE FORA - MG	<b>DESENHO:</b> 7	<b>REVISÃO:</b> 0
	<b>DATA:</b> 23/02/21		


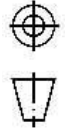
10



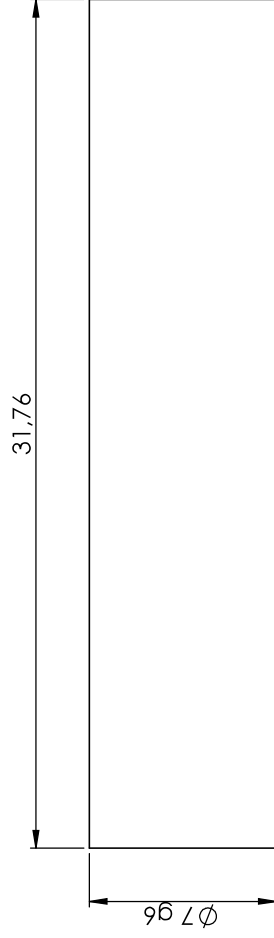
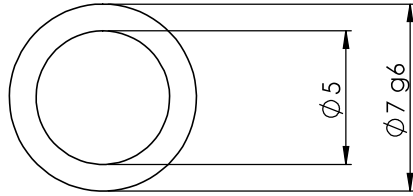
	<b>RESPONSÁVEL:</b> HENRIQUE AYRES DE OLIVEIRA	<b>ASSINATURA:</b>
	<b>CONTEÚDO:</b> PORTA-ELETRODO	
<b>ESCALA:</b> 1:1	<b>PROJETO:</b> TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO	<b>UNIDADE:</b> mm
	<b>LOCAL:</b> JUIZ DE FORA - MG	<b>DESENHO:</b> 8
	<b>DATA:</b> 23/02/21	<b>REVISÃO:</b> 0


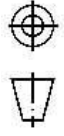
11



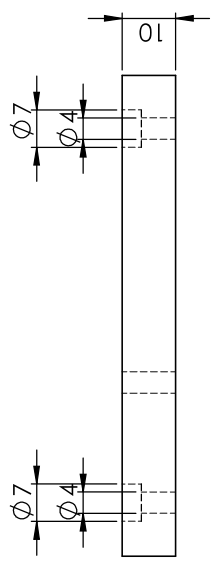
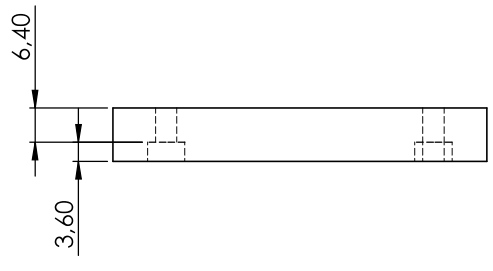
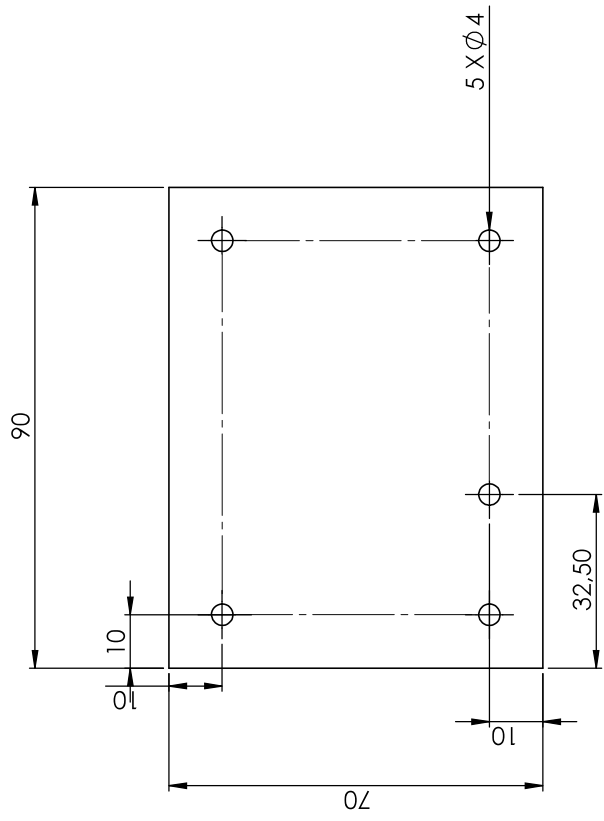
	<b>RESPONSÁVEL:</b> HENRIQUE AYRES DE OLIVEIRA	<b>ASSINATURA:</b>
	<b>CONTEÚDO:</b> BRAÇO HORIZONTAL INFERIOR	
<b>ESCALA:</b> 1:1	<b>PROJETO:</b> TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO	<b>UNIDADE:</b> mm
<b>LOCAL:</b> JUIZ DE FORA - MG	<b>DATA:</b> 23/02/21	<b>DESENHO:</b> 9
		<b>REVISÃO:</b> 0


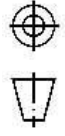
18



	<b>RESPONSÁVEL:</b> HENRIQUE AYRES DE OLIVEIRA		<b>ASSINATURA:</b>	
	<b>CONTEÚDO:</b> BUCHA			
<b>ESCALA:</b> 2:1	<b>PROJETO:</b> TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO		<b>UNIDADE:</b> mm	
	<b>LOCAL:</b> JUIZ DE FORA - MG	<b>DATA:</b> 23/02/21	<b>DESENHO:</b> 10	<b>REVISÃO:</b> 0

2



	<b>RESPONSÁVEL:</b> HENRIQUE AYRES DE OLIVEIRA	<b>ASSINATURA:</b>	
	<b>CONTEÚDO:</b> BASE ENGASTADA		
<b>ESCALA:</b> 1:2	<b>PROJETO:</b> TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO	<b>UNIDADE:</b> mm	
	<b>LOCAL:</b> JUIZ DE FORA - MG	<b>DATA:</b> 23/02/21	<b>DESENHO:</b> 11