



Ministério da Educação  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
Campus Ponta Grossa



Coordenação de Engenharia Mecânica

---

MÁRCIO LUIS VOZNIAKI

**ESTUDO COMPARATIVO DA BRASAGEM DE ALUMÍNIO COM  
DIFERENTES MEIOS DE ADIÇÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2014

MÁRCIO LUIS VOZNIAKI

**ESTUDO COMPARATIVO DA BRASAGEM DE ALUMÍNIO COM  
DIFERENTES MEIOS DE ADIÇÃO**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado à disciplina de Trabalho de conclusão de curso II, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Anderson G. M. Pukasiewicz.

PONTA GROSSA

2014



Ministério da Educação  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
Campus Ponta Grossa  
Diretoria de Graduação e Educação  
Profissional  
Departamento Acadêmico de Mecânica  
Bacharelado em Engenharia Mecânica



---

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

**ESTUDO COMPARATIVO DA BRASAGEM DE ALUMÍNIO COM DIFERENTES  
MEIOS DE ADIÇÃO**

por

**MÁRCIO LUIS VOZNIAKI**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 5 de fevereiro de 2014 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Dr. Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz  
Orientador

---

Prof. Dr. Luciano Augusto Lourençato  
Membro Titular

---

Prof. Dr. Oscar Régis Junior  
Membro Titular

---

Prof. Dr. Luiz Eduardo Melo Lima  
Responsável pelos Trabalhos  
de Conclusão de Curso

---

Prof. Dr. Thiago Antonini Alves  
Coordenador do Curso de  
Engenharia Mecânica

– O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso –

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que participaram desse importante fase de minha vida, de forma direta ou indireta, cada um contribuiu para a realização desse projeto.

Ao Prof. Dr. Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz pelo tempo dedicado à orientação e aos conselhos durante todo esse processo.

Aos amigos que participaram de todo esse processo, pelo companheirismo e pelo apoio motivacional.

Agradeço à empresa Continental do Brasil Produtos Automotivos Ltda. pela oportunidade de desenvolver o trabalho e o fornecimento das amostras utilizadas como objeto de estudo.

Agradeço também aos colegas de trabalho do setor de engenharia da empresa Continental pela ajuda na preparação das amostras e pelo companheirismo durante todo o período de estágio na empresa.

Aos professores participantes da banca examinadora, Prof. Dr. Luciano Augusto Lourençato e Prof. Dr. Oscar Régis Júnior pelo tempo e dedicação à avaliação deste trabalho.

Agradeço especialmente a minha família pelo suporte incondicional e constante durante todo o período de minha vida acadêmica e por serem exemplos de dedicação e perseverança.

## EPÍGRAFE

*Thinking is the hardest work there is, which is probably the reason so few engage in it* (FORD, Henry).

Pensar é o trabalho mais difícil que existe, talvez por isso tão poucos se dediquem a ele (FORD, Henry).

## RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo comparativo das características de produtos de alumínio brasados com diferentes meios de adição. O trabalho foi desenvolvido junto à empresa Continental do Brasil Produtos Automotivos Ltda., com filial na cidade de Ponta Grossa – Paraná. Os objetivos foram avaliar o preenchimento de junta e as características metalúrgicas e mecânicas das juntas brasadas com três diferentes métodos de adição. Foram utilizados anéis de arame do tipo Filalu 1192 com adição de fluxo manual; anéis com fluxo de proteção interno do tipo AISi12 e pasta para brasagem de alumínio NPA 1070-400.

As amostras de cada método de adição de material foram brasadas na empresa e submetidas a ensaios metalográficos e de microdureza Vickers para avaliar as características mecânicas e metalúrgicas resultantes. Foram feitas análises de preenchimento de junta, metalográficas e de microdureza para as comparações dos resultados obtidos.

Os resultados indicaram que os três métodos de adição podem produzir juntas brasadas conformes. O anel sem fluxo apresentou os maiores valores de microdureza na região brasada e o menor consumo de material de adição. O anel com fluxo interno apresentou maior preenchimento da junta e valores de microdureza adequados. A pasta de brasagem apresentou o maior preenchimento de junta, um consumo maior de material de adição e uma microestrutura eutética modificada, entretanto sem modificações significativas em sua dureza.

## ABSTRACT

This paper presents a comparative study about the characteristics of brazed aluminum products with different addition modes. The study was conducted with the Continental do Brasil Produtos Automotivos Ltd. company with a branch in Ponta Grossa – Paraná. The objectives were to evaluate the joint fill, mechanical and metallurgical properties of brazed joints with three different methods of addition. Wire rings of Filalu 1192 were used with manual protection flow addition; wire rings of AlSi12 with internal protection flow and aluminum brazing paste NPA 1070-400.

Samples of each method were brazed in the company and undergo metallographic and microhardness tests to evaluate mechanical and metallurgical characteristics results. Fill joint, metallographic and microhardness analysis were realized for results comparisons.

The results indicated that the three methods of addition can produce brazed joints conforming. The ring without internal flow showed the highest values of microhardness in the brazed region and lower intake of added material. The ring with internal flow showed higher joint fill and appropriate values of microhardness. The folder had the highest brazing filler gasket, a higher consumption of added material and a modified eutectic microstructure, however no significant changes in hardness.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de equilíbrio de fases Al-Si.....	16
Figura 2 - Ângulo de contato. ....	19
Figura 3 - Capilaridade. ....	19
Figura 4 - Tipos de juntas para brasagem. ....	22
Figura 5 - Fluxos para brasagem.....	24
Figura 6 - Temperaturas de fusão dos metais base e de adição para brasagem com alumínio.....	26
Figura 7 – Amostras de flanges brasadas ao tubos. ....	30
Figura 8 - Representação em corte da posição do anel de metal de adição na flange. ....	32
Figura 10 – Flange cortada na vertical. ....	35
Figura 11 - Região da análise da junta. ....	36
Figura 12 – Exemplo das disposição dos ensaios de microdureza. ....	37
Figura 13 – Preenchimento de junta, aumento 5x. ....	39
Figura 14 – Micrografia região brasada com anel sem fluxo interno, aumento 50x. ....	42
Figura 15 – Micrografia região brasada com anel com fluxo interno, aumento 50x. ....	43
Figura 16 – Micrografia região brasada com pasta de brasagem, aumento 50x. ....	44
Figura 17 – Ensaio de dureza anel sem fluxo interno, aumento 10x. ....	46
Figura 18 – Ensaio de dureza anel com fluxo interno, aumento 10x. ....	47
Figura 19 – Ensaio de dureza pasta de brasagem, aumento 10x. ....	48



## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Valores médios de microdureza da região brasada dos três métodos de adição.

..... 49

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Nomenclatura das ligas forjadas de alumínio.....	15
Quadro 2 - Faixas de temperatura de fusão das ligas de alumínio mais comumente brasadas.....	21
Quadro 3 - Composições químicas dos componentes.....	30
Quadro 4 - Composição químicas dos materiais de adição. ....	31
Quadro 5 - Medidas da junta brasada com anel sem fluxo interno. ....	40
Quadro 6 - Resultados de preenchimento da junta com os diferentes métodos de adição.....	40
Quadro 7 – Dureza da região brasada com arame sem fluxo interno. ....	46
Quadro 8 – Dureza da região brasada com arame com fluxo interno. ....	47
Quadro 9 – Dureza da região brasada com pasta de brasagem.....	48

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	12
2. REFERENCIAL TEÓRICO .....	14
2.1 Ligas de alumínio .....	14
2.2 Brasagem.....	17
2.2.1 Princípios físicos .....	18
2.2.2 Brasagem de ligas de alumínio .....	20
2.2.3 Estabelecimento da folga para brasagem .....	21
2.2.4 Limpeza.....	22
2.2.5 Fluxo de proteção.....	23
2.2.6 Metal de adição .....	25
2.2.7 Diferentes métodos de aquecimento .....	27
2.3 Brasagem na indústria automotiva .....	28
3.1 Confeção da amostras.....	29
3.2 Ensaio.....	34
3.2.1 Inspeção Visual .....	34
3.2.2 Análise metalográfica .....	34
3.2.3 Análise de preenchimento de junta .....	36
3.2.4 Microdureza.....	37
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	38
4.1 Inspeção Visual .....	38
4.2 Quantidade de material de adição.....	38
4.3 Análise do preenchimento da junta .....	39
4.4 Análise microestrutural .....	41

4.4.1 Anel sem fluxo interno .....	42
4.4.2 Anel com fluxo interno .....	43
4.4.3 Pasta de brasagem .....	44
4.4.4 Comparação entre os resultados da análise microestrutural.....	45
4.5 Ensaio de microdureza.....	45
4.5.1 Anel sem fluxo interno .....	45
4.5.2 Anel com fluxo interno .....	46
4.5.3 Pasta de brasagem .....	48
4.5.4 Comparação entre os resultados de microdureza .....	49
5. CONCLUSÕES .....	51
REFERÊNCIAS.....	52

## 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a indústria automobilística tem aumentado os padrões de produção de seus produtos para garantir que seus produtos sejam de qualidade. Os circuitos de ar condicionado estão entre os componentes que atualmente requerem um elevado padrão de qualidade, garantindo o conforto dos usuários.

Esse trabalho tem como objetivos avaliar as características mecânicas e físicas encontradas na brasagem de componentes de alumínio da indústria automobilística utilizando-se diferentes meios de adição. O método atualmente utilizado, onde o fluxo é aplicado manualmente, e dois métodos alternativos onde não há necessidade de adição manual do fluxo.

O estudo foi realizado a partir de um componente da linha de produtos da empresa ContiTech – Continental do Brasil Produtos Automotivos Ltda. filial Ponta Grossa – Paraná que disponibilizou as amostras e os equipamentos necessários para o desenvolvimento do processo de brasagem das mesmas.

O método de adição do material atualmente na brasagem desse componente consiste no posicionamento do arame de metal de adição, que vem em forma de anel para facilitar o processo, e a aplicação manual do fluxo de proteção pelo operador.

A segunda opção escolhida para o processo foi a utilização de um arame, também em forma de anel, que contém o fluxo de proteção em seu interior. Dessa maneira elimina-se a necessidade da aplicação manual do fluxo pelo operador.

Uma terceira alternativa é a utilização da pasta de brasagem de alumínio, onde o material de adição encontra-se na forma de pequenas partículas junto ao fluxo de proteção.

Os três metais de adição seguem os padrões estabelecidos pela norma AWS A5.8 BAISi-4, indicados para a brasagem de componentes de alumínio entre si, porém são produzidas por empresas diferentes.

Após a brasagem das amostras, foram conduzidas as análises das características mecânicas e metalúrgicas da região brasada no laboratório de materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa. Desenvolveu-se a análise visual das juntas brasadas, análise do preenchimento da

junta, microscopia óptica para a análise das microestruturas e fases presentes e o ensaio de microdureza da junta brasada.

Esses estudos serviram de base para a comparação dos três métodos de adição de material na brasagem de componentes de alumínio e para as considerações finais do trabalho.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Ligas de alumínio

As ligas de alumínio são amplamente utilizadas na indústria atualmente, com aplicações que vão de latas de refrigerante e embalagens de alimentos até fuselagem de aviões. São ligas muito versáteis, de baixa densidade comparada à do aço, condutividade térmica e elétrica elevada e boa resistência à corrosão.

As ligas de alumínio são facilmente trabalhadas em processos como fundição, rolagem, estampagem, torneamento, forjamento e extrusão nas mais diversas formas.

O alumínio puro funde-se a uma temperatura de aproximadamente 660 °C, enquanto que as ligas de alumínio fundem-se em temperaturas entre 482 e 660 °C, dependendo de sua composição. Devido a sua condutividade térmica elevada, comparada à do aço, necessita-se de uma elevada taxa de aquecimento para fundir a liga em processos de união por fusão como a soldagem e a brasagem (AWS Welding Handbook, 1991).

A resistência mecânica do alumínio, um dos pontos fracos do material, pode ser aumentada com trabalho a frio e alteração da composição de suas ligas. O aumento da resistência mecânica pode ser obtido pelo endurecimento por solução sólida, para ligas não tratáveis termicamente e pelo processo de precipitação para às ditas tratáveis termicamente.

Os principais elementos de liga utilizados são o cobre, o magnésio, o silício, o manganês e o zinco.

O manganês é necessário para o fortalecimento por dispersão, enquanto cobre e magnésio são adicionados para fortalecimento por solução sólida. O cobre também é importante para elevar a resistência à corrosão da liga (MARSHALL; BOLINGBROKE; GRAY, 1993).

A classificação das ligas de alumínio é dividida em ligas fundidas e forjadas e ambas recebem um número de quatro dígitos que identifica as principais impurezas (elementos de liga) encontradas. A nomenclatura das ligas fundidas recebe um

ponto decimal entre os dois últimos números. Após os dois últimos dígitos adiciona-se um hífen, indicação de revenido, seguido de uma letra F, H, O ou T, que representam, respectivamente, os estados “como fabricado”, “encruado”, “recozido” e “tratado termicamente” (ASM, 1993).

<b>Liga</b>	<b>Designação de série</b>
Alumínio, 99% de pureza mínima	1XXX
Alumínio-cobre	2XXX
Alumínio-manganês	3XXX
Alumínio-silício	4XXX
Alumínio-magnésio	5XXX
Alumínio-magnésio-silício	6XXX
Alumínio-zinco	7XXX
Outros	8XXX

**Quadro 1 - Nomenclatura das ligas forjadas de alumínio.**  
**Fonte: Fonte: AWS Handbook (1991).**

Pode-se observar no Quadro 1, o primeiro dígito designa o principal elemento de liga encontrado na liga. Por exemplo, a série 3XXX tem como principal elemento de liga o Manganês (Mn) e assim por diante.

Quanto às características de soldagem e brasagem das ligas de alumínio, pode-se destacar pontos positivos e pontos negativos, como acontece com todos os materiais. Por exemplo, o alumínio tem um ponto de fusão relativamente baixo se comparado ao do aço, pode-se então unir componentes fabricados em alumínio com uma quantidade de calor muito menor do que se fossem componentes em aço, resultando em economia de energia.

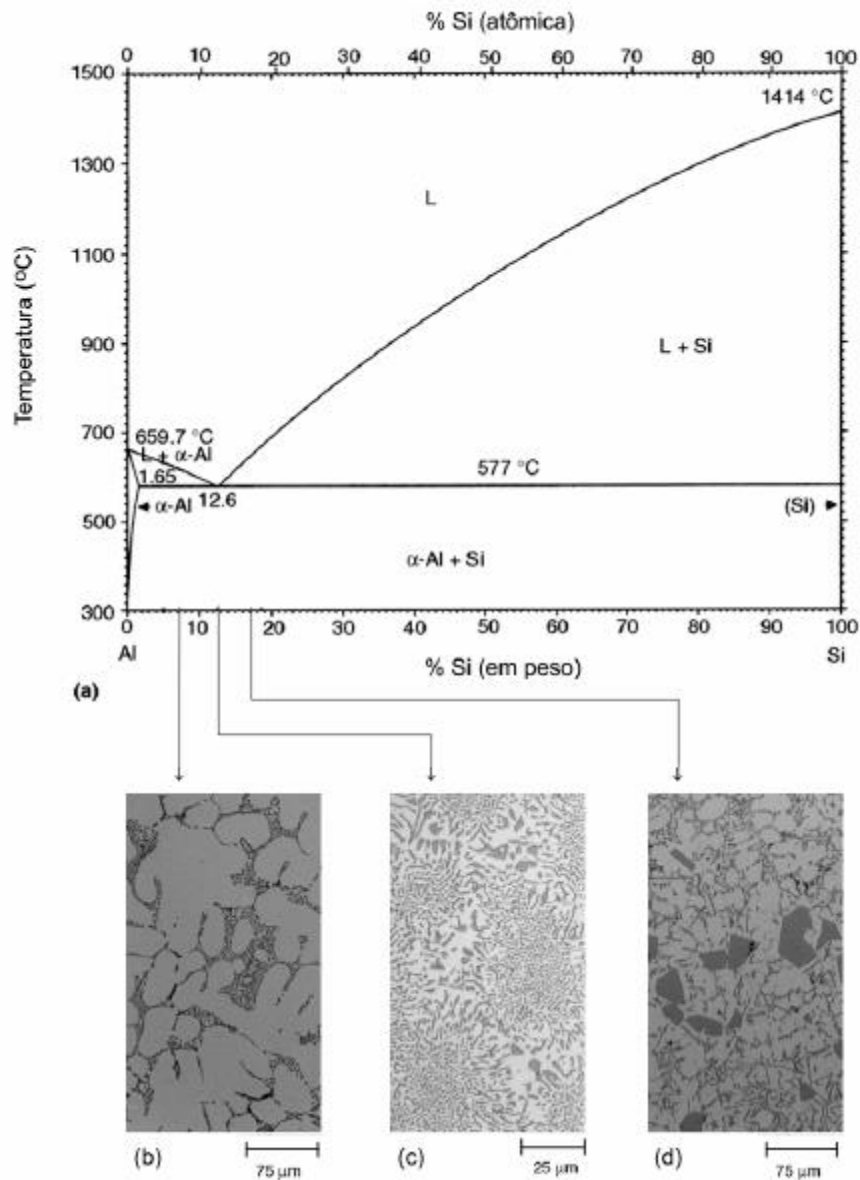
Quando a liga de alumínio é exposta à altas temperaturas de tratamentos térmicos ou à ambientes úmidos faz com que a camada de óxido, que se forma naturalmente sobre sua superfície, fique maior. Geralmente essa camada de óxido é benéfica, pois atua como proteção contra a corrosão do componente. No processo de soldagem ou brasagem isso se torna uma dificuldade já que o ponto de fusão do óxido de alumínio é de aproximadamente 2037 °C, valor muito superior ao do material em si (entre 482 a 660 °C) (AWS HANDBOOK, 1991).

Na Figura 1, pode-se observar o diagrama de fases do sistema binário Al-Si. As ligas Al-Si são divididas em: ligas hipoeutéticas, com concentração de silício



entre 5 e 10%; ligas eutéticas, com concentração de silício entre 11 e 13% e ligas hipereutéticas, com concentrações de silício entre 14 e 20% (FERRARINI, 2005).

As microestruturas encontradas nos três tipos de ligas de Al-Si podem ser observadas na Figura 1, onde, b) liga hipoeutética, c) liga eutética e d) liga hipereutética.



**Figura 1 - Diagrama de equilíbrio de fases Al-Si.  
Fonte: MONDOLFO *apud* FERRARINI (2005, P.14)**

O ponto eutético do sistema Al-Si encontra-se em uma concentração de aproximadamente 12,6% de Si em peso e à uma temperatura de 577°C.

## 2.2 Brasagem

A brasagem, embora muitas vezes confundida com os processos de soldagem, possui características singulares que a definem como um processo de junção de materiais único. Diferentemente dos processos de soldagem por fusão, onde há fusão do material base e do metal de adição, na brasagem ocorre somente a fusão do metal de adição, devido ao menor ponto de fusão do metal de adição.

Os processos de brasagem podem ser divididos em dois tipos: Brasagem e Soldagem branca. A principal diferença entre os dois processos é o ponto de fusão do metal de adição. Na soldagem branca utilizam-se metais de adição com ponto de fusão abaixo de 400°C enquanto na brasagem utiliza-se metal de adição acima de 400° e abaixo do ponto de fusão do material base (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

Segundo a ASM – American Society for Metals, brasagem é um processo utilizado para unir dois metais sólidos próximos por meio da adição de um metal que se funde a uma temperatura abaixo de 450°C.

Para Davies (1993) a brasagem pode ser definida como um processo de junção de metais no qual, durante ou após o aquecimento, metal de adição fundido é puxado por atração de capilaridade no espaço entre superfícies muito próximas dos materiais a serem unidos. Em geral a temperatura de fusão do metal de adição ocorre acima de 500°C, porém sempre abaixo da temperatura de fusão do metal base.

São muitas as vantagens da utilização da brasagem, quanto a características metalúrgicas do produto final, econômicas e de processo. Segundo a ASM – American Society for Metals podem-se destacar vantagens como:

- Excelente distribuição de tensões;
- Excelentes propriedades de transferência de calor;
- Possibilidade de unirem-se materiais metálicos com não metálicos;
- Possibilidade de unirem-se materiais porosos;
- Possibilidade de unirem-se materiais com espessuras muito pequenas;
- Preservação de características especiais do metal base, como tratamentos térmicos;

- Capacidade de trabalhar com pequenas tolerâncias;
- Técnicas de controle de qualidade reproduzíveis e confiáveis.

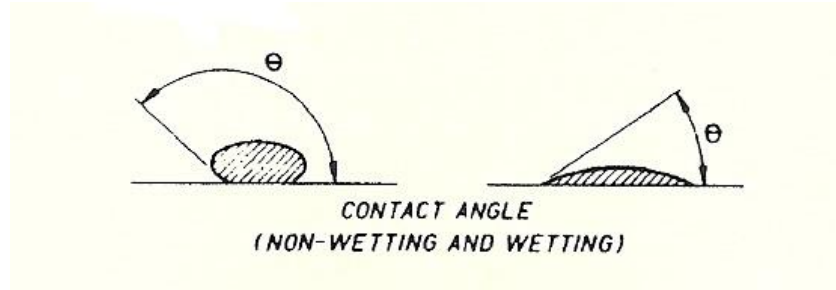
Além dessas vantagens, podem-se obter juntas com uniformidade, estanqueidade e resistência de forma rápida, com custos baixos e até mesmo de forma simultânea.

### 2.2.1 Princípios físicos

Assim como os processos de soldagem a brasagem envolve diversos processos físico-químicos, no entanto a molhabilidade dos metais e o efeito da capilaridade na junta são de extrema importância para obter-se uma união brasada de qualidade.

A molhabilidade está diretamente relacionada ao ângulo de contato formado entre um líquido e um sólido. Este é definido como o ângulo formado entre a reta tangente a superfície do líquido no ponto de contato e a superfície do sólido (DAVIES, 1993).

A molhabilidade dos materiais é definida como a capacidade de um metal em sua fase líquida espalhar-se ou aderir a uma superfície sólida. Aplicando-se o conceito da molhabilidade na brasagem, mais especificamente no metal de adição, pode-se concluir que o metal de adição deve apresentar uma boa molhabilidade no metal base. Caso o metal de adição apresente baixa molhabilidade, não haverá preenchimento por completo a junta. Resultando em uma junta brasada com pouca aderência, conseqüentemente com baixa resistência mecânica (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

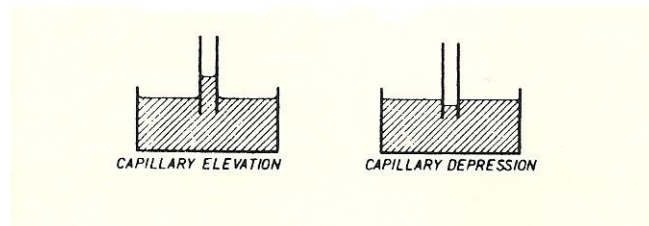


**Figura 2 - Ângulo de contato.**  
**Fonte: DAVIES (1993, P.318).**

Como se pode observar na Figura 2, à esquerda o líquido não molha o material base, portanto seu ângulo de contato é significativamente maior que o da direita, onde o líquido espalha-se sobre a superfície do material base.

Segundo a definição da ASM (1993), capilaridade é o fenômeno físico que governa a ação de líquidos confinados em pequenos espaços contra superfícies sólidas. Desse modo a capilaridade está diretamente relacionada à molhabilidade dos metais. Aplicada a brasagem, a capilaridade influencia diretamente na dimensão da junta, uma vez que, quanto menor a junta, maior será a influência da capilaridade no metal de adição.

Como se pode observar na Figura 3, a capilaridade tem uma relação direta com a molhabilidade do líquido. Se há a molhabilidade do líquido na superfície interna do tubo, há a elevação do nível de líquido dentro do tubo, como na representação à esquerda na Figura 5. Caso contrário há uma depressão no nível do líquido.



**Figura 3 - Capilaridade.**  
**Fonte: DAVIES (1993, P.319).**

No processo de brasagem, o metal de adição que está fundido será “puxado” para dentro da junta por capilaridade, assim, se a molhabilidade do metal fundido for baixa, haverá preenchimento parcial da junta.

A ação de ambos os fenômenos, molhabilidade e capilaridade estão presentes na brasagem e influenciam diretamente nos resultados obtidos.

### 2.2.2 Brasagem de ligas de alumínio

As ligas de alumínio são muito utilizadas em diversos ramos da indústria devido à diversidade de processos em que pode ser empregada, resultando nos mais diversos tipos de produtos acabados. Podem ser facilmente empregadas em processos como torneamento, fresamento, conformação e na brasagem por exemplo.

O emprego de ligas de alumínio na brasagem requer atenção a duas características: a rápida formação de óxido em sua superfície sempre que uma forma de oxigênio reativa esteja presente, como ar ou água, e sua temperatura de brasagem, sempre muito próxima do seu ponto de fusão (ASM, 1993).

Segundo a AWS (1991), as ligas de alumínio que apresentam melhores resultados no processo de brasagem são as da série ASTM 1XXX e 3XXX e as ligas com baixo teor de magnésio da série 5XXX. As séries 2XXX e 7XXX têm baixo ponto de fusão, por isso são pouco utilizadas, com exceção das ligas 7072 e 7005.

No Quadro 2, pode-se observar uma lista das ligas de alumínio mais empregadas no processo de brasagem, com suas respectivas composições e faixas de temperatura de fusão.

Nome da liga	Composição nominal						Temperatura de fusão (°C)
	Cu	Si	Mn	Mg	Zn	Cr	
1100	Al 99% min						643-657
3003	--	--	1,20	--	--	--	643-654
3004	--	--	1,20	1,00	--	--	629-651
3005	0,30	0,6	1,20	0,40	0,25	0,10	638-657
5005	--	--	--	0,80	--	--	632-654
5050	--	--	--	1,20	--	--	588-649
6151	--	1,00	--	0,60	--	0,25	643-649
6053	--	0,70	--	1,30	--	--	596-651
6061	0,25	0,60	--	1,00	--	0,25	593-651
6063	--	0,40	--	0,70	--	--	615-651
7005	0,10	0,35	0,45	1,40	4,50	0,13	607-646

**Quadro 2 - Faixas de temperatura de fusão das ligas de alumínio mais comumente brasadas.**

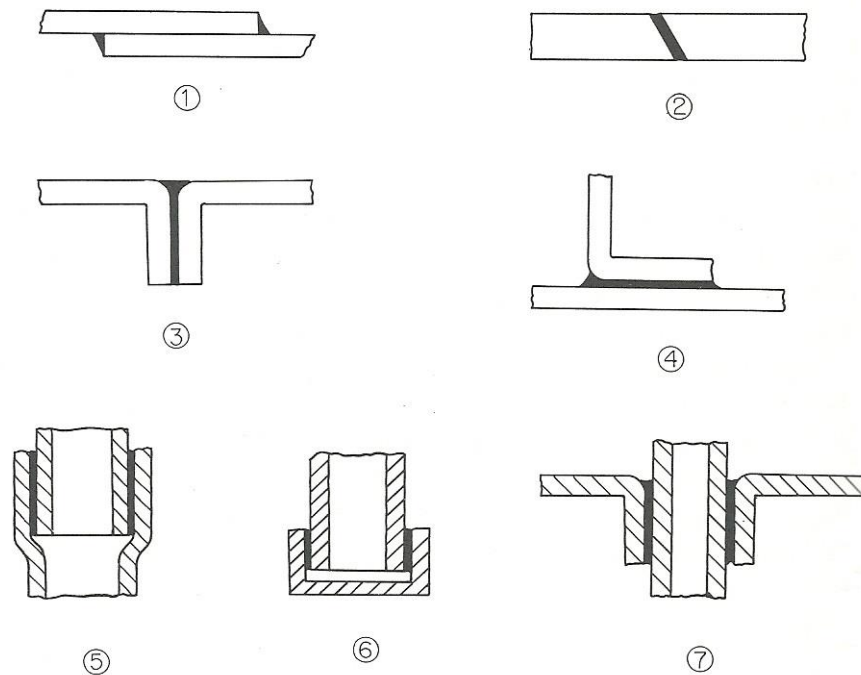
**Fonte: AWS Welding Handbook (1991, p.397)**

### 2.2.3 Estabelecimento da folga para brasagem

A folga deve ser do tamanho necessário para que o metal de adição preencha a junta por completo, sem deixar nenhum vazio. Folgas maiores ou menores que o necessário implicará em diminuição da resistência da junta brasada.

Os limites são determinados experimentalmente, sendo usualmente utilizadas folgas com dimensões entre 0,02 a 0,08 mm, obtendo-se muitas vezes resultados satisfatórios com folgas de 0,07 mm. Como a temperatura de trabalho da junta não é ambiente deve-se levar em conta o aumento da folga devido à dilatação térmica dos materiais, especialmente quando os materiais base forem de metais diferentes (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

Existem vários tipos e juntas usadas no processo de brasagem, entretanto as mais comuns estão representadas na Figura 4, sendo eles: 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 4 - Tipos de juntas para brasagem.**  
**Fonte: WAINER; BRANDI; MELLO (1992, P.25).**

#### 2.2.4 Limpeza

A etapa de limpeza é de extrema importância no processo, para que o material de adição preencha a junta de maneira uniforme e rápida. A junta deve estar isenta de graxas, óleos, tintas e outros materiais utilizados em processos anteriores.

A remoção de óxidos ou carepas existentes nas peças, também conhecido como processo de decapagem, pode ser feito mecanicamente, com lixamento ou quimicamente com a imersão em soluções ácidas compatíveis com o material base. O processo de jato de areia pode ser utilizado para remoção de sujeiras difíceis de retirar com os métodos citados anteriormente (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

Segundo a AWS (1991), o desengraxamento das peças geralmente é a primeira etapa da limpeza, e pode ser obtida com os seguintes métodos:

- Limpeza com solvente: solventes de petróleo e hidrocarbonetos clorados;
- Desengraxamento por vapor: tricloroetileno estabilizado ou percloroetileno estabilizado;
- Limpeza alcalina: misturas comerciais de silicatos, fosfatos, carbonatos, detergentes, sabões, agentes molhantes, e em alguns casos hidróxidos;
- Emulsão de limpeza: mistura de hidrocarbonetos, ácidos graxos, agentes molhantes e ativadores de superfície;
- Limpeza eletrolítica: tanto catódica quanto anódica;
- Pode-se potencializar o desengraxamento agitando o banho mecanicamente ou por vibrações ultrassônicas;
- A remoção de carepas e de óxidos, também conhecida como decapagem, pode ser feita com os seguintes métodos, após a remoção das graxas;
- Limpeza ácida: produtos de limpeza à base de fosfato;
- Decapagem ácida: ácido sulfúrico, nítrico e clorídrico;
- Decapagem em banho salino: eletrolítico e não eletrolítico.

A seleção do método mais adequado para a limpeza dependerá do tipo de sujeiras encontradas nos componentes e do material do mesmo. Por exemplo, metais base contendo cobre e prata não devem ser limpos por decapagem com ácido nítrico, pois este atacará esses metais base.

### 2.2.5 Fluxo de proteção

O uso do fluxo de proteção no processo de brasagem é feito logo após a etapa de limpeza. Pode ser encontrado na forma líquida onde a peça é imersa no fluxo e na forma de pasta onde ele é pincelado sobre a superfície das partes que irão ser brasadas.

Para Wainer, Brandi e Mello (1992) o fluxo utilizado na brasagem tem como objetivo remover óxidos restantes do processo anterior e principalmente os óxidos formados durante o aquecimento do material base, além de evitar a presença do oxigênio na região adjacente à junta.



De maneira similar, Davies (1993), diz que o fluxo utilizado na brasagem molha a superfície do metal base, remove o filme de óxido e promove uma superfície limpa, facilitando a molhabilidade do metal de adição.

A utilização do fluxo de proteção é imprescindível para obtenção de uma junta brasada de qualidade. Embora o fluxo ajude a remover a camada de óxido superficial, sua utilização não elimina a necessidade do processo de limpeza antes da brasagem, como citado no tópico anterior.

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2005) os fluxos de um modo geral são constituídos de cloretos, fluoretos, fluoboratos, boratos, bórax, ácido bórico, agentes umectantes e água. Sendo empregados em diferentes proporções e combinações para cada situação.

Na escolha do fluxo de brasagem devem-se levar em conta a temperatura de fusão do material base tendo em vista que ele deve manter-se ativo em uma temperatura abaixo do ponto de fusão do material base e na temperatura de fusão do metal de adição.

Pode-se observar a relação do fluxo com as características citadas anteriormente no Quadro 7

<b>Classe AWS</b>	<b>Metal de base</b>	<b>Metal de adição recomendado</b>	<b>Faixa de temperatura recomendada (°C)</b>	<b>Forma de fornecimento</b>
FB1	Ligas de Al	BAISi	540-615	Pó
FB2	Ligas de Mg	BMg	480-620	Pó
FB3	Aço carbono e aço inoxidável	Bag, BCuP, Bcu, Bni, Bau, RBCuZn	565-1205	Pó, Pasta e líquido
FB4	Alumínio-Bronze	Bag e BCuP	595-870	Pasta

**Figura 5 - Fluxos para brasagem.**  
**Fonte: MARQUES; MODENESI; BRACARENSE (2005).**

Segundo a ASM, os fluxos utilizados no processo de brasagem por tocha devem possuir determinadas características como:

- Começar a fundir-se em uma temperatura baixa o suficiente para minimizar a oxidação das partes.
- Estar essencialmente fundido quando o metal de adição for fundido.
- Fluir sobre a junta e o metal de adição para protegê-los da oxidação.
- Diminuir a tensão superficial, facilitando a molhabilidade do metal de adição.

- Ser relativamente fácil de remover após a brasagem.

O emprego de fluxos que se fundem em temperatura logo abaixo da temperatura de fusão do metal de adição pode ser de grande importância principalmente quando se está utilizando a brasagem com chama. A fusão do fluxo atua como um indicador de temperatura, evitando a fusão do metal base.

### 2.2.6 Metal de adição

A etapa de seleção dos metais de adição leva em conta três características principais: natureza do metal base, forma da junta e método de aquecimento.

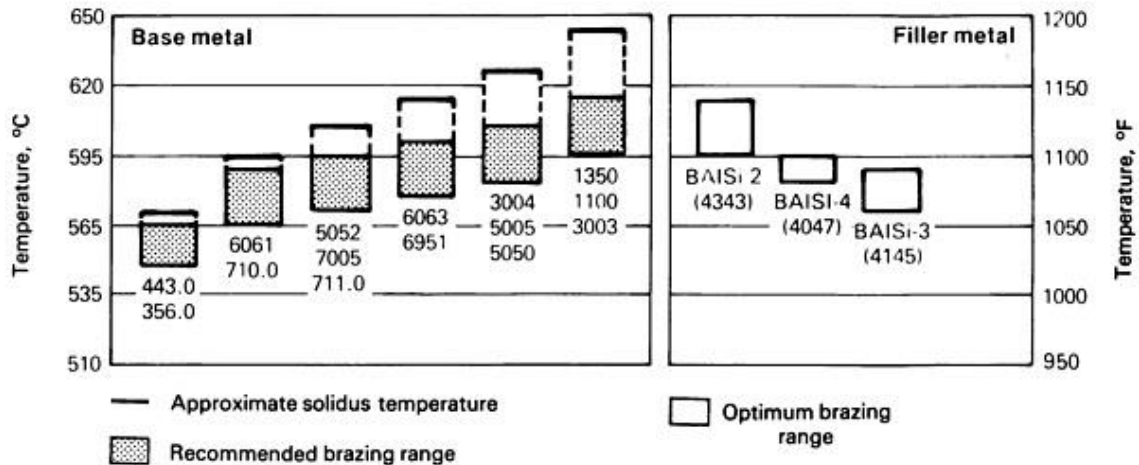
No processo de brasagem com chama, deve-se procurar um metal de adição com ponto na linha *líquidus* o mais baixo possível, assim distanciando-se da temperatura de fusão do metal base. Isso se deve principalmente a dificuldade em controlar o aquecimento da peça com a chama (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

A faixa de solidificação da liga utilizada como metal de adição tem influência direta na qualidade final da junta brasada. Quanto menor a faixa de solidificação, ou seja, mais próximo da composição eutética da liga, menor será a temperatura e o tempo que o metal base estará sujeito ao aquecimento, evitando alterações de propriedades indesejadas no mesmo.

Segundo a AWS (1991), os metais de adição devem ter as seguintes características:

- Habilidade de formar juntas com propriedades mecânicas e físicas compatíveis com as necessárias à sua aplicação.
- Ponto de fusão ou faixa de fusão compatível com a do metal base e fluidez suficiente à temperatura de brasagem para promover uma distribuição adequada na junta.
- Composição com suficiente homogeneidade e estabilidade para minimizar a separação de constituintes durante a brasagem.
- Habilidade de molhar a superfície do material base e promover uma junta forte.
- Dependendo da finalidade, habilidade de interagir ou não com o metal base.

Na brasagem de ligas de alumínio, o metal de adição mais utilizado são as ligas de alumínio, que contêm entre 7 e 12% de silício e níveis de outros metais abaixo de 0,2% (ASM, 1993).



**Figura 6 - Temperaturas de fusão dos metais base e de adição para brasagem com alumínio.**

Fonte: ASM Handbook (1993).

Na Figura 6 pode-se observar as faixas de temperatura das ligas de alumínio mais comuns de metal base à esquerda e faixa de temperatura de utilização das ligas de alumínio como metal de adição à direita.

O silício é o principal elemento de liga adicionado nas ligas dos metais de adição de alumínio, pois ele diminui a sua temperatura de fusão. Ele é adicionado em teores que variam entre 6,8 e 13%. Teores de silício acima de 13% diminuem a ductilidade da junta, o que limita sua adição. O cobre e o zinco também diminuem o ponto de fusão do alumínio, porém em teores elevados reduzem a resistência à corrosão da junta (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

Os metais de adição podem ser encontrados na forma de anéis, arruelas, pastas, pó ou ainda pode ser alimentado manualmente, geralmente em forma de arame ou vareta (AWS, 1991).

Independente do tipo de metal de adição escolhido, a limpeza prévia da junta e a correta aplicação do fluxo são essenciais para uma boa brasagem.

## 2.2.7 Diferentes métodos de aquecimento

Existem diversos tipos de se fornecer o calor necessário para o processo de brasagem, dentre eles estão a brasagem em forno, brasagem por imersão, brasagem por indução, brasagem por resistência elétrica e a brasagem por chama, sendo esta última o método utilizado no desenvolvimento do trabalho.

A brasagem por chama é muito utilizada devido à sua acessibilidade, baixo custo e relativa facilidade de controle de parâmetros de processo.

A brasagem com chama assemelha-se a soldagem oxcombustível, onde há um combustível (acetileno, propano, gás natural, entre outros.) e um comburente, o qual pode ser ar, ar comprimido ou oxigênio. As tochas utilizadas com oxigênio e gás natural, ou outros gases como acetileno e butano produzem chamas com alto poder calorífico. Quando são utilizadas com chama neutra ou levemente redutora, obtêm-se ótimos resultados em várias aplicações de brasagem (AWS Welding Handbook, 1991).

No processo de brasagem automatizado, onde é necessário um grande volume de peças a serem brasadas, utiliza-se uma ou várias tochas com ponteiros simples ou múltiplas. A máquina pode ser do tipo em que as peças são movidas para serem brasadas, do tipo em que as tochas movem-se até as peças ou ainda das duas maneiras, dependendo do tipo de peças a se brasar e do tipo de processo produtivo empregado.

Durante o aquecimento do componente a ser brasado deve-se tomar alguns cuidados importantes, segundo Wainer, Brandi e Mello (1992), se as peças forem pequenas o aquecimento deve ser feito por toda a sua extensão. O aquecimento deve ser o mais uniforme possível, em caso de materiais diferentes, deve-se compensar a diferença da condutibilidade térmica aquecendo o material com maior condutibilidade por mais tempo. Peças com tamanhos diferentes seguem o mesmo princípio, as maiores devem ser aquecidas por um tempo maior, pois possuem maior massa.

Segundo a AWS (1991), o material de adição pode ser posicionado antes ou pode ser adicionado quando o metal base estiver próximo de sua temperatura de fusão. O aquecimento é empregado até a fusão do fluxo e continua-se até que o

metal de adição funda-se e escoar para dentro da junta. Apesar do processo de brasagem ser muito parecido com o processo de soldagem oxicomustível, as técnicas empregadas na brasagem são diferentes. Por exemplo, deve-se evitar o contato do cone interno da chama com a junta, exceto durante o pré-aquecimento, pois a fusão do metal base e a diluição do metal de adição podem aumentar a temperatura *liquidus* e fazer com que o escoamento do metal de adição torne-se lento. Além disso, o fluxo pode ser superaquecido, perdendo sua capacidade de promover o escoamento por capilaridade, e os componentes com baixo ponto de fusão do metal de adição podem evaporar-se.

### 2.3 Brasagem na indústria automotiva

Versatilidade e economia são as palavras chaves nos processos de fabricação mecânica dos componentes automobilísticos em larga escala atualmente. A concorrência é acirrada e pequenas diferenças de custo na produção pode ser a diferença entre o sucesso ou o fracasso de um novo modelo.

Os processos de fabricação tendem a ficar mais versáteis, para atender à demanda das montadoras de automóveis, que agregam um portfólio cada vez mais diversificado de produtos. Uma mesma montadora produz diversos modelos de automóveis, que em sua maioria têm componentes únicos. Se o processo de fabricação é versátil, pode-se fabricar diversos componentes utilizando-se os mesmos equipamentos ou mudando apenas ferramentas e/ou acessórios.

A brasagem é um processo versátil de fabricação, pode ser realizada em diversos componentes com poucas alterações de equipamento.

É uma alternativa com ótima relação custo/benefício do processo, pode-se fazer uniões de componentes com custos relativamente menores que processos de solda por fusão e com ótimas propriedades mecânicas e estruturais da junta.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Confeção da amostras

Para o desenvolvimento do trabalho foram analisadas 3 séries de peças brasadas utilizadas em circuitos de ar condicionado da indústria automobilística. As peças são compostas por uma flange brasada em um tubo, com uma junta do tipo luva. Três amostras das peças brasadas estão ilustrada na Figura 9.

Foram variados os consumíveis do processo de brasagem, metal de adição e fluxo, sendo os 3 tipos de amostras compostas por:

- Flange brasada no tubo utilizando-se anel de arame como metal de adição e aplicação de fluxo manualmente.
- Flange brasada no tubo utilizando-se anel de arame com fluxo interno.
- Flange brasada no tubo utilizando-se pasta de brasagem.

As quantidades de materiais de adição utilizados foram determinadas testando-se quantidades diferentes de material até a obtenção de uma junta brasada uniforme e de acordo com a inspeção visual realizada pela produção.

Na amostra que utilizava-se anel com fluxo interno, foram utilizados dois anéis para a obtenção de uma amostra conforme os padrões de produção, como as mostradas na Figura 9.

As amostras foram brasadas conforme os procedimentos adotados pela produção. O processo foi conduzido da mesma maneira para as três formas de união, e de acordo com o procedimento adotado pela empresa, finalizando-se o fornecimento de calor quando o metal de adição fundia-se e com o resfriamento por ducha de água em seguida.



**Figura 7 – Amostras de flanges brasadas ao tubos.**  
**Fonte: Aatoria própria.**

As flanges utilizadas são feitas da liga EN AW 6082 [AlSi1MgMn] – T61, sendo uma liga da série 6XXX que têm como principais elementos de liga o Magnésio (Mg) e o Silício (Si).

Os tubos são feitos da liga EN AW 3103 [AlMn1] – H14, liga da série 3XXX que tem como principal elemento de liga o Manganês (Mn).

Suas composições químicas estão representadas no Quadro 3.

		<b>Componente</b>	
		<b>Flange</b>	<b>Tubo</b>
	<b>Liga</b>	EN AW-6082	EN AW-3103
<b>Composição química (%)</b>	<b>Mn</b>	0,40-1,00	0,90-1,50
	<b>Fe</b>	0,0-0,50	0,0-0,70
	<b>Cu</b>	0,0-0,10	0,0-0,10
	<b>Mg</b>	0,60-1,20	0,0-0,05
	<b>Si</b>	0,70-1,30	0,0-0,50
	<b>Zi</b>	0,0-0,20	0,0-0,20
	<b>Cr</b>	0,0-0,25	0,0-0,10
	<b>Ti+Zr</b>	0,0-0,10	0,0-0,10
	<b>Outros</b>	0,0-0,15	0,0-0,15
	<b>Al</b>	Bal.	Bal.

**Quadro 3 - Composições químicas dos componentes.**  
**Fonte: Fornecedores.**

Foram utilizados 3 tipos de metais de adição para a comparação do resultado final de brasagem:

- Anel com fluxo interno Filalu 1192
- Anel sem fluxo interno AlSi12 com adição de fluxo externo.
- Pasta de brasagem NPA 1070-400.

As composições químicas dos materiais de adição utilizados podem ser observadas no Quadro 4.

	Método de adição	Pasta	Anel com fluxo	Anel sem fluxo
Composição química (%)	Al	Bal.	Bal.	Bal.
	Si	11,0-13,0	12,0	12,0
	Cu	0,0-0,30	0,15 máx.	0,15 máx.
	Zn	0,0-0,20		
	Cd	0,0-0,010		
	Mn	0,0-0,15		
	Pb	0,0-0,05		
	Fe	0,0-0,8		
	Mg	0,0-0,10		
	Outros	0,0-0,15		

**Quadro 4 - Composição químicas dos materiais de adição.**  
**Fonte: Fornecedores.**

Ambos os arames, com fluxo e sem fluxo interno, têm a mesma composição para o metal de adição. É uma liga indicada principalmente para a brasagem de entre componentes de alumínio em casos como trocadores de calor, circuitos de ar condicionado e condensadores automotivos. Sua faixa de temperatura de fusão está entre 573 e 585 °C (Stella Welding Alloys,2013).

A pasta de brasagem utilizada tem como metal de adição é chamada de NPA-1070-400 e apresenta uma liga de alumínio semelhante em sua composição às ligas encontradas nos arames, entretanto há algumas variações na composição dos constituintes devido à sua característica de ser utilizada na forma de pasta, com fluxo agregado ao metal de adição.

Para a utilização do anel sem fluxo interno, a flange e o tubo foram colocados na posição de brasagem, o anel foi posicionado no tubo junto a flange e o fluxo de



proteção foi espalhado sobre o mesmo. Pode-se observar a posição do anel de brasagem em volta do tubo na Figura 10.



**Figura 8 - Representação em corte da posição do anel de metal de adição na flange.  
Fonte: Autoria própria.**

A aplicação da pasta de brasagem foi feita utilizando-se uma seringa para controle da quantidade de pasta adicionada. Com o auxílio de uma balança de precisão e da seringa, foi calculado a densidade da pasta, aproximadamente 1,1g/ml. Desta maneira foi possível mensurar a quantidade de pasta de brasagem adicionada, aproximadamente 1,98g por amostra.

O método que utiliza-se o anel com fluxo interno e o método com pasta de brasagem não necessitam de adição manual do fluxo de proteção, reduzindo uma etapa no processo. Esses métodos ainda evitam o desperdício de fluxo de proteção, pois já são adquiridos com a quantidade necessária.

Para realizar a brasagem, utilizou-se equipamento de brasagem manual, e o procedimento foi conduzido pelo operador do posto de trabalho. A tocha é alimentada com gás natural, o aquecimento da peça foi feito em diferentes direções

visando-se um aquecimento uniforme e constante na região de brasagem. Após o ciclo de aquecimento e fusão do material de adição. Em seguida as amostras foram colocadas em uma ducha de água para resfriamento por 7 segundos.

## 3.2 Ensaaios

Os ensaios realizados nas amostras de brasagem têm como objetivo encontrar possíveis defeitos relacionados à escolha dos materiais utilizados, dos parâmetros de processo empregados e da técnica utilizada.

### 3.2.1 Inspeção Visual

Esse tipo de ensaio é básico em qualquer tipo de inspeção de solda, principalmente por sua simplicidade e de ser um ensaio não destrutivo, da mesma maneira é essencial na inspeção de produtos brasados.

A inspeção visual mostra defeitos na região brasada como falta ou excesso de material de adição, desalinhamento e montagem errada das partes, erros dimensionais, escoamento inadequado do metal de adição, vazios externos na junta, falhas superficiais como trincas e porosidade e danos causados pelo calor ao metal base.

### 3.2.2 Análise metalográfica

Para a realização da análise metalográfica com o auxílio de microscópio deve-se preparar as amostras seguindo determinadas etapas que irão resultar em uma superfície polida e de fácil análise.

As amostras foram cortadas, utilizando-se disco de corte específico para metais mais moles em uma máquina de cut-off. Em seguida os cantos da superfície foram limados cuidadosamente, para retirar as rebarbas mais grosseiras. Na Figura 12 pode-se observar a secção cortada da amostra da flange brasada no tubo.



**Figura 9 – Flange cortada na vertical.**  
**Fonte: Autoria própria.**

No lixamento da superfície, utilizaram-se lixas das seguintes granulometrias: 320, 400, 600 e 1200. Ao fim dessa etapa a superfície da amostra ainda apresenta riscos, mesmo que muito finos, que foram retirados com o polimento.

A etapa de polimento é de grande importância, pois se não for realizada da maneira correta irá prejudicar as micrografias obtidas, conseqüentemente prejudicando na qualidade dos resultados obtidos.

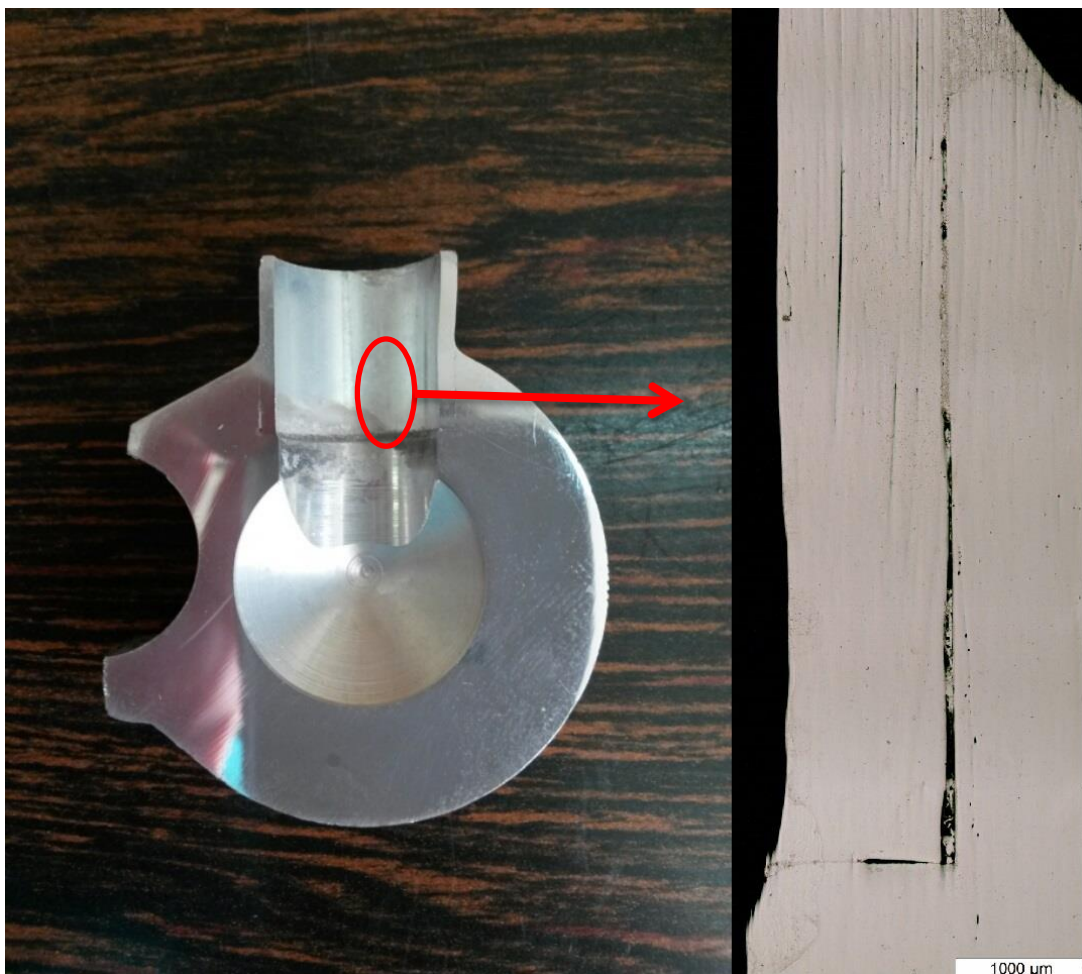
As amostras foram polidas utilizando-se suspensão de diamante com granulometrias de 9; 3; e 0,25  $\mu\text{m}$ .

A última etapa de preparação antes da análise ao microscópio é o ataque com reagente químico. O reagente utilizado nas amostras foi uma solução de ácido fluorídrico com concentração de 0,5%, indicado para ataque químico de metais como o alumínio e suas ligas.

Após as preparações analisou-se o preenchimento da união e os aspectos metalúrgicos da região brasada, como refinamento da microestrutura e formação de estrutura eutética.

### 3.2.3 Análise de preenchimento de junta

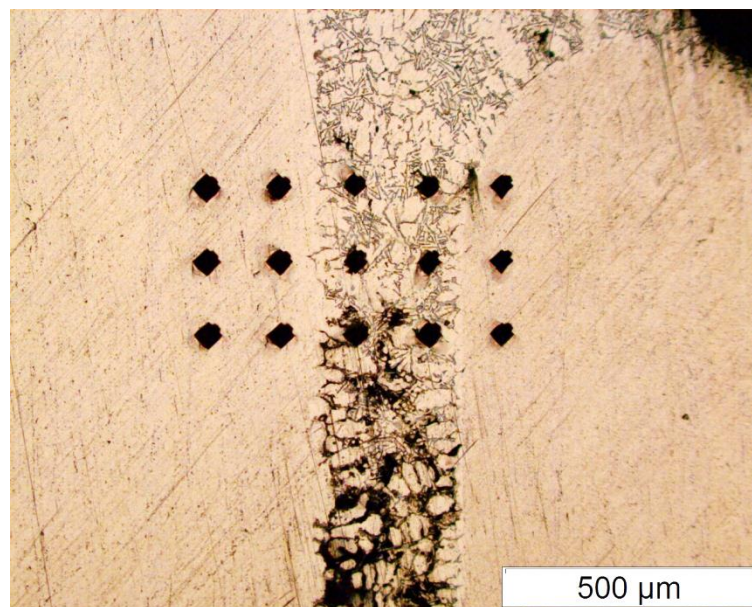
Para mensurar a quantidade real de junta preenchida foi considerado um comprimento efetivo total de junta (CET), que consiste no comprimento total de junta, altura e largura, da região mostrada na Figura 11. Descontou-se então o comprimento dos vazios e obteve-se assim o percentual de junta preenchida com cada tipo de material de adição. Anel sem fluxo interno, anel com fluxo interno e pasta de brasagem.



**Figura 10 - Região da análise da junta.  
Fonte: Autoria própria.**

### 3.2.4 Microdureza

Os ensaios de microdureza Vickers foram realizados segundo a norma ASTM E384, Standard Test Method for microindentation Hardness of Materials. As medições formam uma malha de 3 linhas por 5 colunas, espaçadas 150  $\mu\text{m}$  na horizontal e 150  $\mu\text{m}$  na vertical, resultando em 15 medições para cada amostra. A disposição dos ensaios de dureza está exemplificada na Figura 12.



**Figura 11 – Exemplo das disposição dos ensaios de microdureza.  
Fonte: AWS Handbook (1991).**

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Inspeção Visual

A inspeção visual foi realizada logo após a brasagem das amostras, utilizando-se os mesmos critérios de avaliação da fábrica. Não foram encontrados defeitos como falta de preenchimento da junta aparente, incrustações, superaquecimento dos metais bases ou materiais de adição parcialmente fundidos nos três métodos utilizados.

### 4.2 Quantidade de material de adição

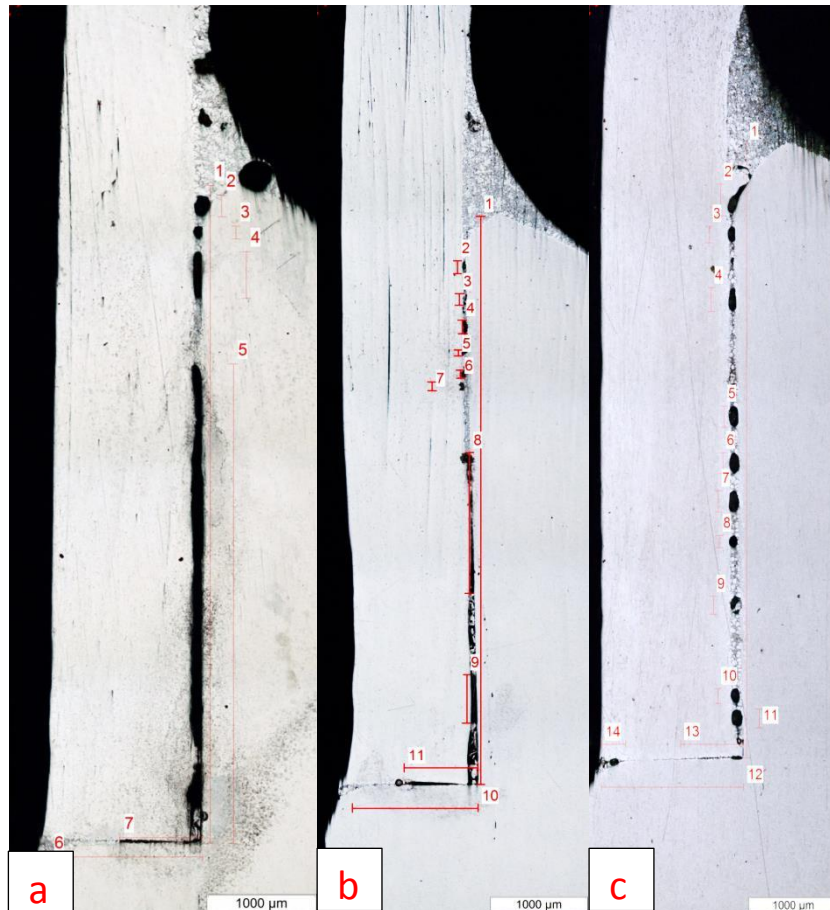
Para obtenção de uma junta brasada de acordo com os requisitos da fábrica para a inspeção visual, foram variadas as quantidades de cada metal de adição até que se obtivesse uma junta brasada adequada.

As variações de material mostraram que para a obtenção de uma junta com características adequadas aos padrões exigidos pela fábrica, e com os métodos de adição de material disponíveis, foram necessários:

- Um anel de arame, com aproximadamente 0,3g, para brasagem com adição de fluxo manualmente;
- Dois anéis de arame com fluxo interno, com aproximadamente 0,4g cada, para brasagem com o mesmo;
- 1,98g de pasta para brasagem de alumínio no método utilizando-se pasta.

### 4.3 Análise do preenchimento da junta

Pode-se observar na Figura 13 as juntas brasadas utilizando-se os diferentes métodos de adição de material.



**Figura 12 – Preenchimento de junta, aumento 5x.**  
 a) Anel sem fluxo interno; b) Anel com fluxo interno; c) Pasta de brasagem.  
 Fonte: Autoria própria.

Na Figura 13-a, pode-se observar o preenchimento ocorre principalmente no topo da junta, onde o anel fica posicionado. Apenas uma pequena porção da junta é preenchida pelo material de adição.

No Quadro 5 a seguir, pode-se observar os valores das medidas obtidas das juntas na Figura 13.



Índice	Comprimento ( $\mu\text{m}$ )		
	a	b	c
1	6216,9	6145,8	6505,9
2	201,4	142,2	334,1
3	120,8	123,2	177,7
4	443,0	142,2	251,1
5	4530,0	64,0	225,1
6	1435,8	85,3	222,7
7	772,4	92,4	227,4
8	-	1523,4	132,7
9	-	521,2	189,5
10	-	1331,5	161,1
11	-	781,9	199,0
12	-	-	1656,1
13	-	-	734,5
14	-	-	281,9

**Quadro 5 - Medidas da junta brasada com anel sem fluxo interno.**  
a) Anel sem fluxo interno; b) Anel com fluxo interno; c) Pasta de brasagem  
Fonte: Autoria própria.

Com os valores obtidos calculou-se o Comprimento Efetivo Total (CET) da junta, que estão apresentados no Quadro 6. As medidas dos vazios foram somadas e descontadas do comprimento total, obtendo-se assim o comprimento de junta que foi realmente preenchido.

	Anel sem fluxo interno	Anel com fluxo interno	Pasta
<b>Total</b>	7652,653443	7477,329494	8162,040591
<b>Preenchida</b>	1585,023267	4001,65067	5025,163453
<b>% Preenchida</b>	20,7	53,5	61,6

**Quadro 6 - Resultados de preenchimento da junta com os diferentes métodos de adição.**  
Fonte: Autoria própria.

Como pode-se observar pelos valores encontrados na análise de preenchimento da junta no Quadro 6, com o anel sem fluxo interno, o preenchimento da junta foi de aproximadamente 20%. O percentual de preenchimento da junta não foi grande, mas o reforço, parte superior onde há

grande quantidade de material de adição acumulada, garante a estanqueidade da junta quando completamente preenchido.

Os resultados de preenchimento da brasagem com anel com fluxo interno mostram que a junta foi preenchida aproximadamente 54% em sua extensão, dessa maneira a estanqueidade da junta é assegurada já que o risco de se ter um espaço sem preenchimento é diminuído. Outro ponto favorável é o aumento da rigidez na junção entre o tubo e flange, assegurada por uma maior área brasada.

A pasta de brasagem apresentou um preenchimento de junta elevado e em toda sua extensão. As chances de o componente apresentar um vazamento são muito reduzidas, além da junção entre tubo e flange apresentar uma elevada rigidez.

A pasta de brasagem apresenta vantagem no preenchimento da junta, assegurando uma maior área de contato entre os componentes, traduzindo-se em maior resistência mecânica da junta e menor possibilidade de vazamentos devidos à falta de preenchimento, embora seja necessária uma quantidade maior de material para obtenção de uma junta adequada aos padrões de fábrica.

O anel com fluxo interno também apresenta um preenchimento de junta bom, porém também são necessários dois anéis de arame com fluxo para obtenção de uma junta conforme.

O anel sem fluxo interno, embora tenha um preenchimento de junta bem menor, aumentando o risco de um vazamento, produz uma junta brasada com características externas conforme requisitos da fábrica com menos material.

#### 4.4 Análise microestrutural

Para a análise microestrutural da região brasada das amostras utilizou-se as micrografias obtidas com o auxílio do microscópio óptico.

#### 4.4.1 Anel sem fluxo interno

A análise micrográfica da brasagem com anel sem fluxo interno nos permite identificar as fases presentes como pode ser observado na Figura 14.

A fase clara é formada pela matriz de Al- $\alpha$  e por um eutético binário Al-Si entre os ramos dendríticos contendo Si em forma acicular (fase escura).

A região à esquerda, com contornos de grão definidos, pertence ao metal base, que foi apenas termicamente afetado. Não há fusão do material base na brasagem.

Para Peres et al.(2005) esse tipo de microestrutura ocorre por não haver um arranjo ordenado das fases e por elas terem diferentes taxas de crescimento. Essa estrutura irregular está relacionada a fatores como a grande diferença dos pontos de fusão do Al e do Si.

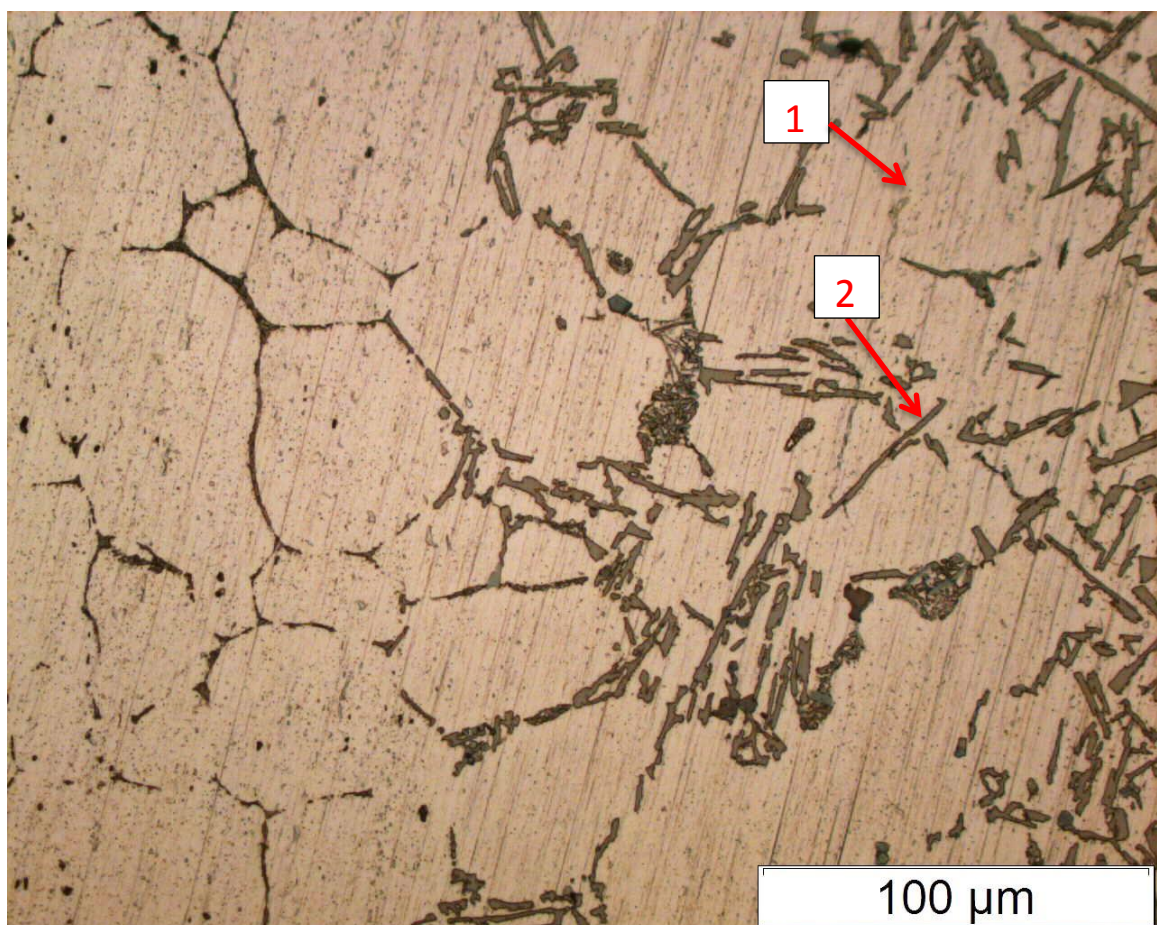
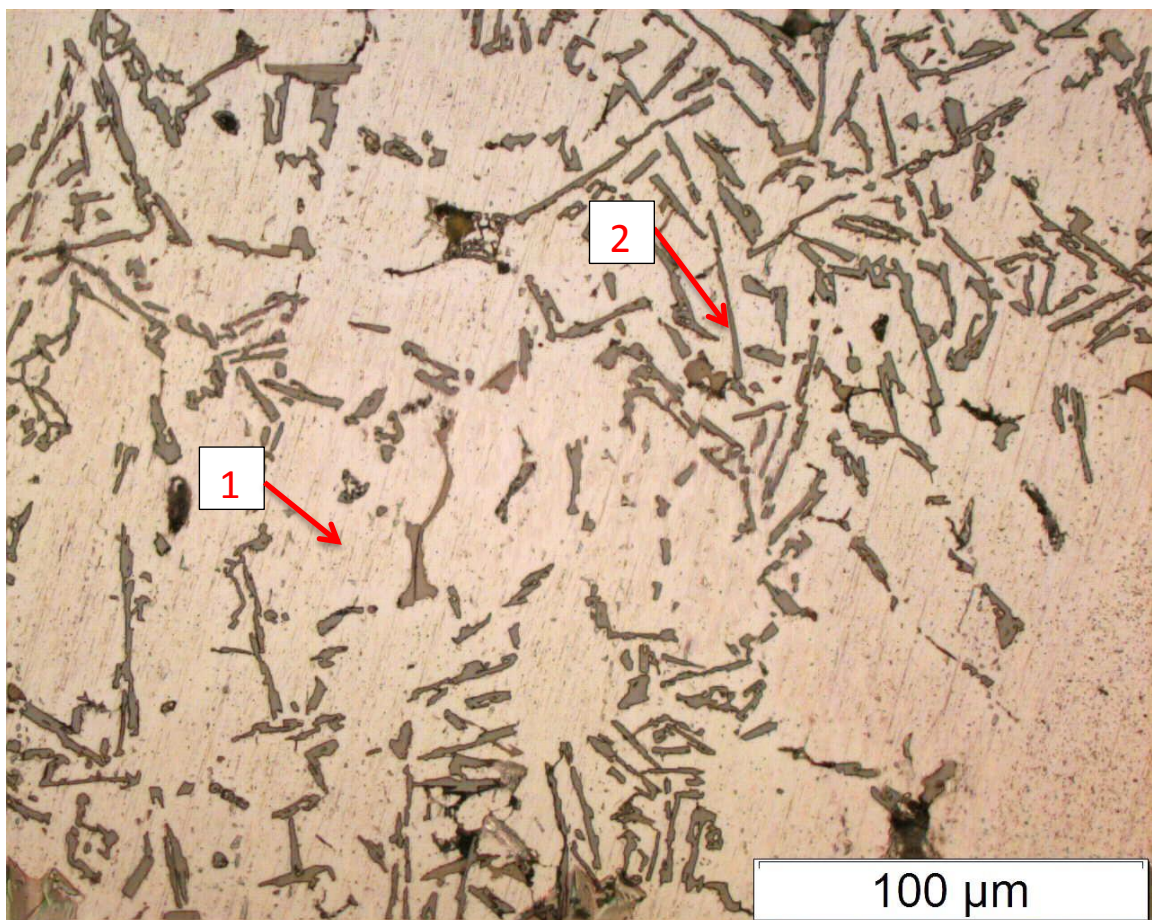


Figura 13 – Micrografia região brasada com anel sem fluxo interno, aumento 50x.  
1) Al- $\alpha$ ; 2) Si acicular.  
Fonte: Autoria própria

#### 4.4.2 Anel com fluxo interno

A micrografia da amostra que utilizou-se anel com fluxo interno é muito semelhante à amostra anterior, sem fluxo interno, e pode ser observada na Figura 15.

A matriz é formada por Al- $\alpha$  e no espaço interdendrítico apresenta-se a estrutura eutética com Si na forma acicular.



**Figura 14 – Micrografia região brasada com anel com fluxo interno, aumento 50x.  
1) Al- $\alpha$ ; 2) Si acicular.  
Fonte: Autoria própria.**

#### 4.4.3 Pasta de brasagem

A microestrutura presente na amostra brasada com a pasta de brasagem apresentou uma mudança significativa em relação às anteriores. Como pode-se observar na Fig. 16, há um grande refinamento na estrutura interdendrítica do material, essa estrutura é conhecida como estrutura fibrosa.

Segundo Peres et al. (2005), a estrutura do tipo fibrosa é favorecida quando há uma redução da tensão superficial do alumínio, alterando a energia superficial interfacial entre o Al e o Si e influencia a nucleação e o crescimento das estruturas.

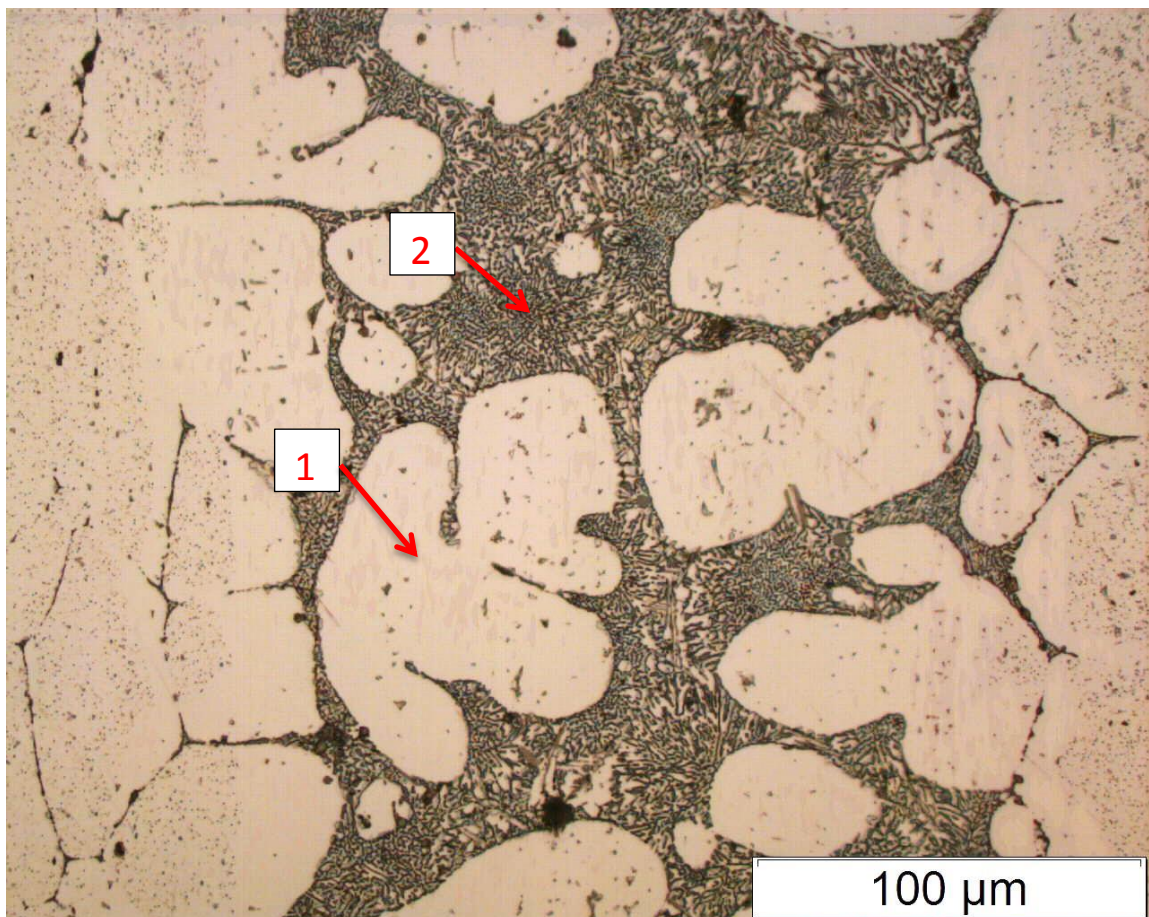


Figura 15 – Micrografia região brasada com pasta de brasagem, aumento 50x.  
1) Al- $\alpha$ ; 2) Estrutura fibrosa  
Fonte: Autoria própria.

#### 4.4.4 Comparação entre os resultados da análise microestrutural

As análises das micrografias das amostras mostraram que as estruturas encontradas nas amostras brasadas utilizando anel com fluxo e anel sem fluxo são muito parecidas. São compostas basicamente de uma matriz dendrítica de alumínio de fase alfa com os espaços entre os braços dendríticos preenchidos por uma fase eutética binária Al-Si com presença de Si em forma acicular.

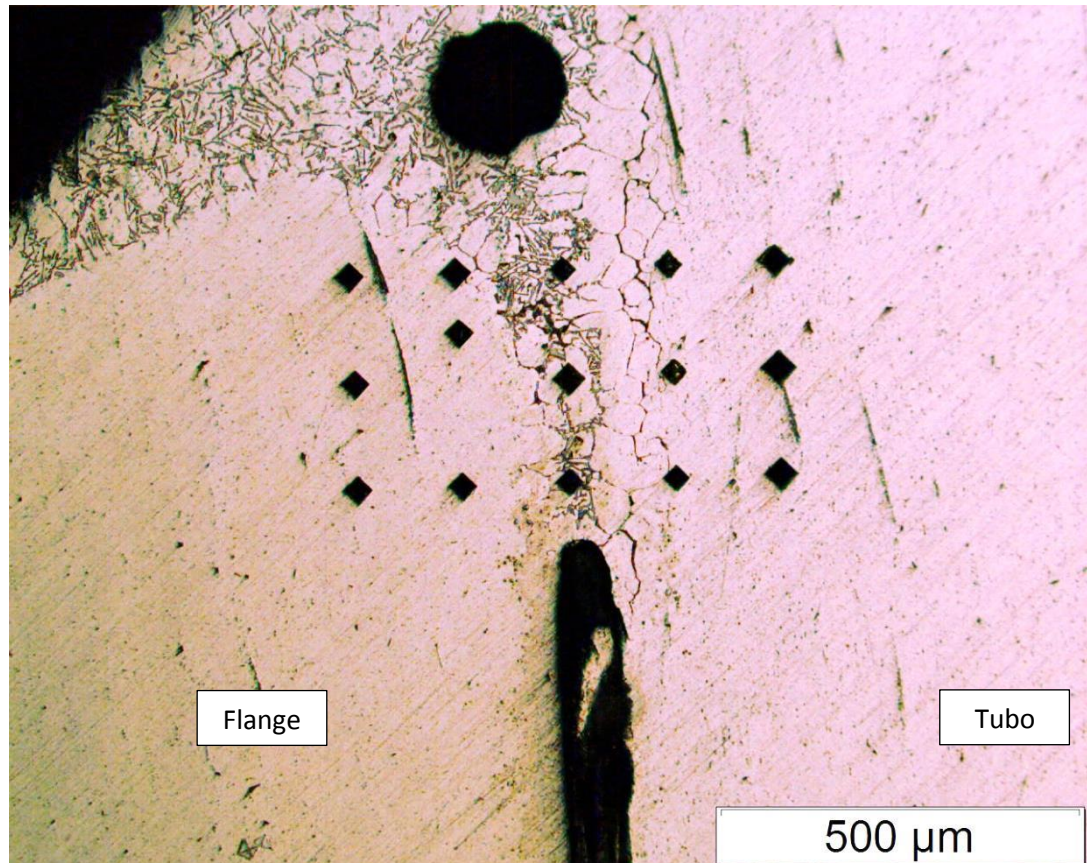
A análise da amostra da pasta de brasagem revelou uma estrutura interessante, caracterizada pelo refinamento das estruturas do eutético, também chamada de estrutura fibrosa. As estruturas aciculares de Silício, elementos fragilizantes no material, tiveram suas dimensões reduzidas significativamente.

### 4.5 Ensaio de microdureza

Foram realizados ensaios de microdureza Vickers, segundo a norma ASTM E384, na região brasada e em suas adjacências para as três variações de metal de adição.

#### 4.5.1 Anel sem fluxo interno

A Figura 17 mostra as indentações realizadas na amostra brasada com material de adição de arame sem fluxo interno. Do lado esquerdo temos a flange e do lado direito da imagem temos o tubo que foi unido pelo processo de brasagem.



**Figura 16 – Ensaio de dureza anel sem fluxo interno, aumento 10x.  
Fonte: Aatoria própria.**

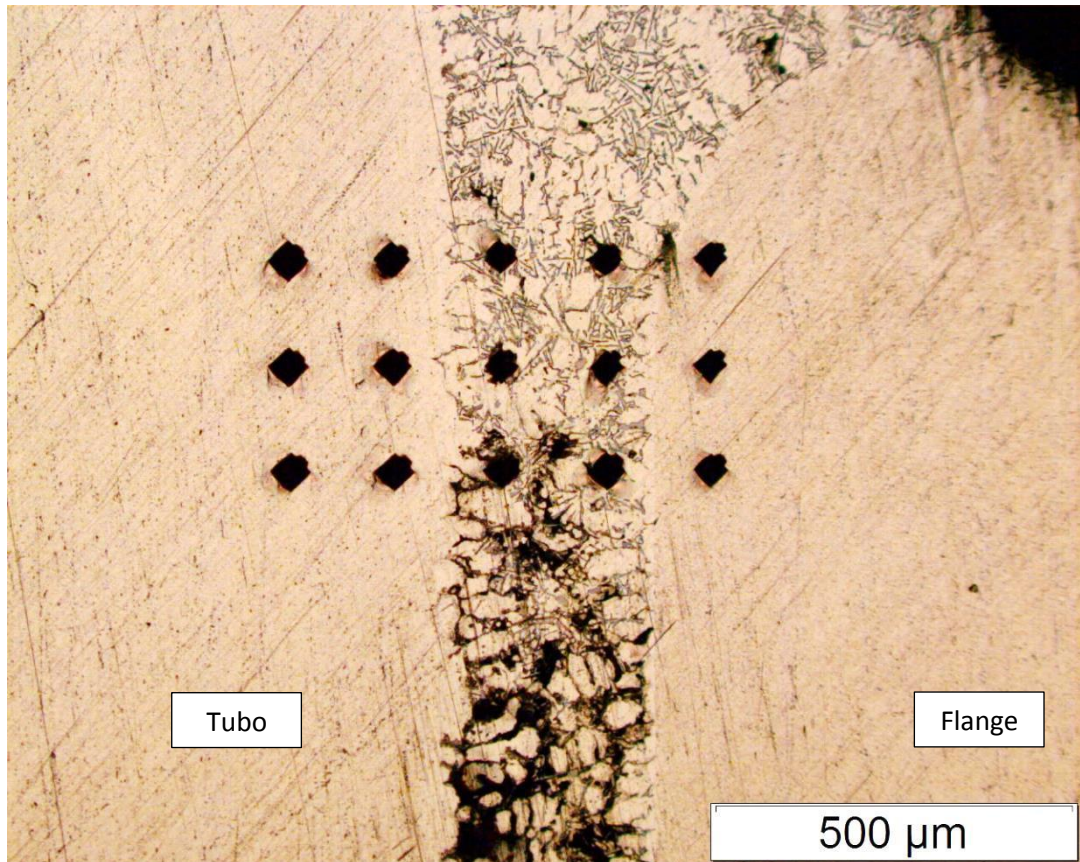
Os valores obtidos para o ensaio de dureza são apresentados no Quadro 12.

	HV <sub>100gf</sub>				
<b>Linha 1</b>	86,0	82,6	101,0	100,0	62,0
<b>Linha 2</b>	85,4	82,7	73,4	108,0	56,4
<b>Linha 3</b>	80,3	74,0	103,0	94,2	76,3

**Quadro 7 – Dureza da região brasada com arame sem fluxo interno.  
Fonte: Aatoria própria.**

#### 4.5.2 Anel com fluxo interno

A Figura 18 mostra as indentações feitas no ensaio de dureza da amostra brasada com anel que possui fluxo interno. Do lado esquerdo está o tubo e no lado direito da figura está a flange que foram unidos no processo de brasagem.



**Figura 17 – Ensaio de dureza anel com fluxo interno, aumento 10x.  
Fonte: Autoria própria.**

Os resultados obtidos no ensaio de dureza são apresentados no Quadro 13.

	<b>HV<sub>100gf</sub></b>				
<b>Linha 1</b>	54,0	57,8	78,4	67,7	73,9
<b>Linha 2</b>	53,2	58,2	72,6	71,5	71,7
<b>Linha 3</b>	52,4	66,1	85,0	90,6	74,8

**Quadro 8 – Dureza da região brasada com arame com fluxo interno.  
Fonte: Autoria própria.**



### 4.5.3 Pasta de brasagem

A Figura 19 mostra a região brasada onde foram feitas as indentações do ensaio de dureza da amostra utilizando-se a pasta para brasagem. Do lado esquerdo da imagem está a flange e do lado direito o tubo que foram brasados.

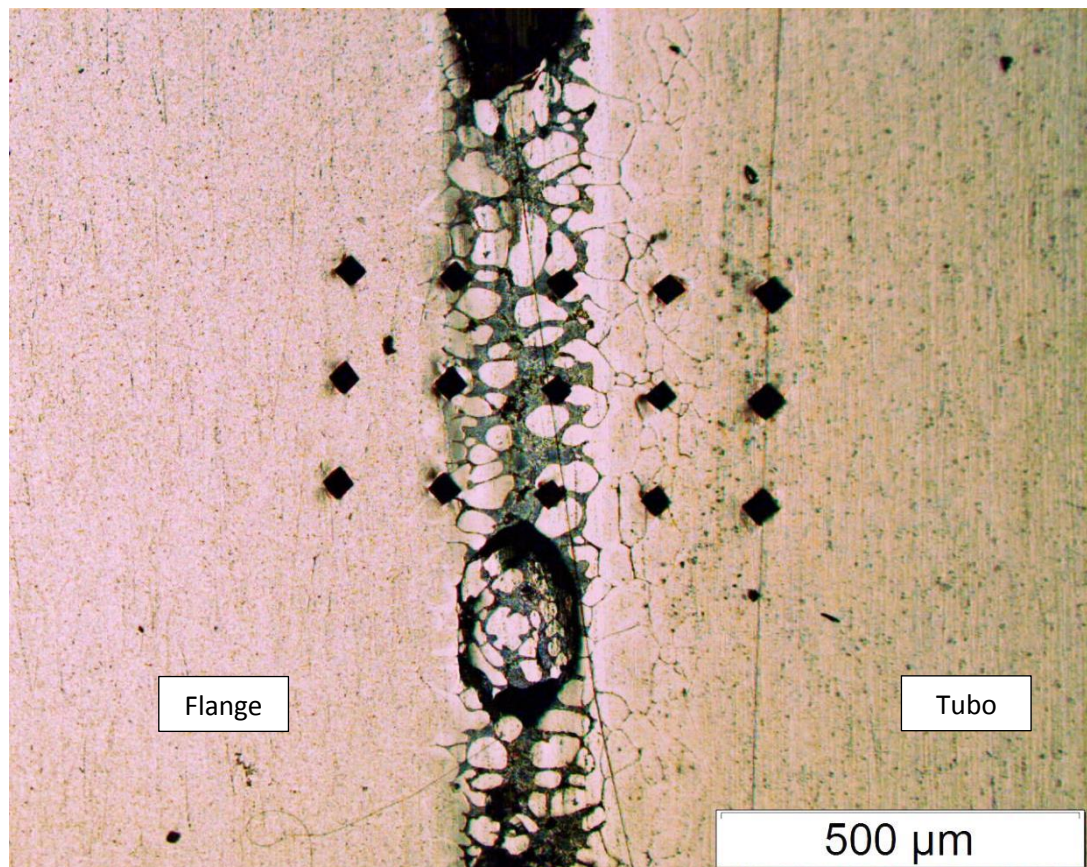


Figura 18 – Ensaio de dureza pasta de brasagem, aumento 10x.  
Fonte: Autoria própria.

Os resultados obtidos no ensaio de microdureza são apresentados no Quadro 9.

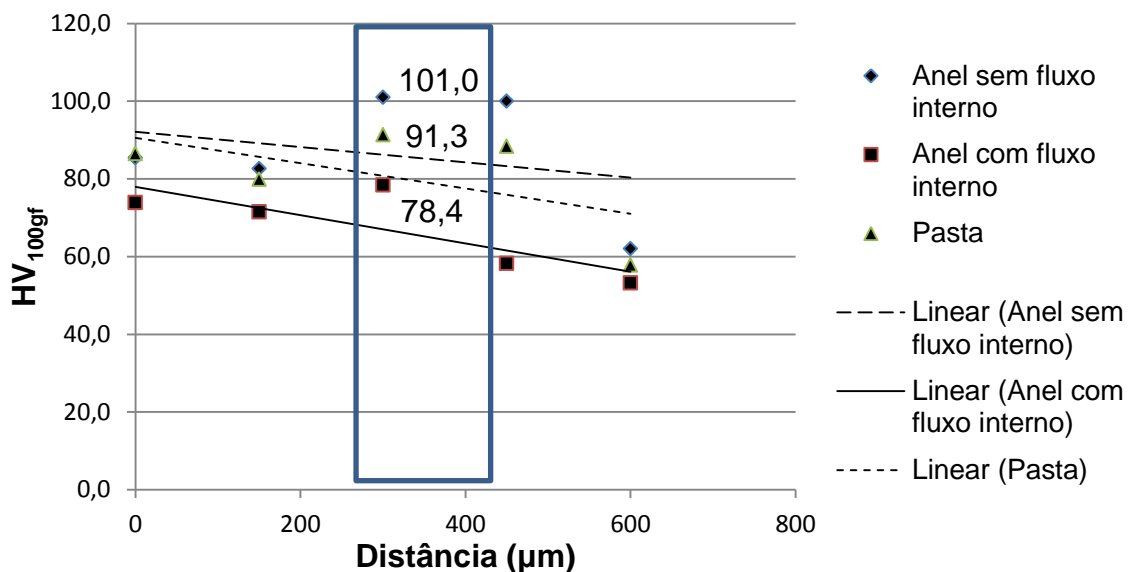
	HV <sub>100gf</sub>				
<b>Linha 1</b>	86,5	77,4	94,4	92,3	57,8
<b>Linha 2</b>	85,0	79,9	91,3	84,5	59,9
<b>Linha 3</b>	87,9	83,3	86,1	88,4	56,2

Quadro 9 – Dureza da região brasada com pasta de brasagem.  
Fonte: Autoria própria

#### 4.5.4 Comparação entre os resultados de microdureza

Para visualizar os resultados obtidos com os ensaios de microdureza realizados de forma mais clara, os resultados foram transformados em um gráfico. Utilizaram-se os valores médios de dureza encontrados nas regiões da junta brasada dos três métodos de adição utilizados.

A região em que o ensaio de microdureza realmente combina com a área de material de adição está a 300 $\mu$ m de distância. Nesse ponto as três amostras coincidem com endentações sobre o metal de adição depositado. Os resultados podem ser observados no Gráfico 1.



**Gráfico 1 – Valores médios de microdureza da região brasada dos três métodos de adição.**  
Fonte: Autoria própria.

Pode-se observar que o maior valor médio de microdureza encontrado foi da brasagem com anel e aplicação de fluxo manual (101,0 HV<sub>100gf</sub>). As amostras utilizando-se pasta apresentou valor médio pouco abaixo (91,3 HV<sub>100gf</sub>) e as amostras de anel com fluxo interno o menor valor médio (78,4 HV<sub>100gf</sub>).

Os resultados dos ensaios de microdureza mostraram que apesar dos materiais de adição possuírem composições e indicações semelhantes, há uma variação entre as durezas da junta soldada. O anel de arame sem fluxo interno

apresentou o maior valor de dureza médio e o anel de arame com fluxo interno o menor. A pasta de brasagem fica em um meio termo entre os dois outros materiais. Embora haja uma diferença entre as durezas encontradas nos três materiais não houve resultados extremos, onde a dureza fosse tão elevada que deixasse a junta frágil e nem tão dúctil que prejudicasse a resistência da mesma.

## 5. CONCLUSÕES

Analisando as características dos métodos de adição e dos resultados finais da brasagem, pode-se chegar a algumas conclusões.

O anel sem fluxo interno apresentou um baixo volume de preenchimento, porém com um consumo de material. Devido ao baixo índice de preenchimento da junta, a mesma pode apresentar maior potencial de apresentar falhas e conseqüentemente vazamentos. A região brasada com este método apresentou o maior valor de dureza entre os métodos ensaiados.

O anel com fluxo interno apresentou um bom preenchimento de junta, melhor que do anel sem fluxo, porém com um consumo de material maior. Os valores de dureza encontrados estão próximos dos valores dos componentes brasados, garantindo uma uniformidade da propriedade. O ponto positivo à utilização do anel com fluxo está no fato de não necessitar a aplicação manual do fluxo de proteção, reduzindo tempo e evitando possíveis desperdícios de material.

A pasta para brasagem de alumínio apresentou o maior índice de preenchimento de junta, desta maneira reduzindo a possibilidade de falhas e possíveis vazamentos. O consumo de material também foi maior para obtenção de uma junta conforme. Esse método de adição mostrou uma peculiaridade em sua análise metalográfica, um refinamento das estruturas eutéicas, gerando uma estrutura chamada fibrosa, porém não foram encontradas mudanças significativas nas propriedades mecânicas finais. Os valores de dureza encontrados são compatíveis com os valores dos componentes brasados.

Considerando-se os resultados obtidos, pode-se concluir que os métodos de adição com pasta de brasagem e anel com fluxo interno produzem componentes brasados com melhores características mecânicas e melhor preenchimento de junta, resultando em menor probabilidade de vazamentos.

## REFERÊNCIAS

ASM. **Metals Handbook**. v. 6, Welding, Brazing and Soldering. 10. ed. N.Y.,1993.

AWS. **Welding Handbook**. v.2, Welding Processes. 8. Ed. Miami, 1991.

DAVIES, Arthur C. **The Science and practice of welding**. 10 ed. Cambridge: University Press, 1993.

FERRARINI, Cleyton F. **Microestruturas e propriedades mecânicas de ligas Al-Si hipoeutéticas conformadas por spray**. 2005. 108 f. Tese (Engenharia de materiais) – Departamento de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

MALEKAN, Amad et al. Effect of Isothermal Holding on Semisolid Microstructure of Al–Mg<sub>2</sub>Si Composites. **ISRN Metallurgy**. v. 2012, 7 pag., abril 2012.

MARQUES, Paulo V.; MODENESI, Paulo J.; BRACARENSE, Alexandre Q. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 2.ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.

MARSHALL, G. J.; BOLINGBROKE, R. K.; GRAY, A. Microstructural control in an aluminum core alloy for brazing sheet applications. **Metallurgical Transactions A**. v.24, n.9, p. 1935-1942, set 1993.

PERES, Maurício M.; PINTO, Cássia P.; RIOS, Carlos T. et al. Caracterização da liga de alumínio A356 solidificada rapidamente por centrifugação e fundida em areia. **Projeções**. Bragança Paulista, v. 23, p. 55-62, jan./dez. 2005.

SHUKLA, Adarsh; PELTON, Arthur D. Thermodynamic Assessment of the Al-Mn and Mg-Al-Mn Systems. **Journal of Phase Equilibria and Diffusion**. v.30, n.1, p. 28-39 jul 2008.

STELLA WELDING ALLOYS. **Brazing – Filler metals and fluxes catalogue**. Disponível em: < <http://www.stella-welding.com/wp-content/uploads/BRAZING.pdf> >. Acesso em: 02 de Janeiro de 2014.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio D.; MELLO, Fábio D. H. M. **Soldagem: Processos e Metalurgia**. 8ª reimpressão. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1992.