

Taubaté, 12/09/16 a 09/12/16

TTEM 015/16

PROCESSO DE SOLDA POR BRASAGEM PROCESS WELDING BRAZING

Signatários:

- Sandro Robson de Carvalho¹
- Stephany de Barros Camargo²
- Prof. Dr. José Rubens de Camargo – Universidade de Taubaté
- Prof. Dr. Wendell de Queiroz Lamas – Universidade de São Paulo/USP
- Prof. Dr. Francisco José Grandinetti – Universidade de Taubaté/FEG-UNESP

Finalidade: Aplicação do processo de soldagem por brasagem em trocadores de calor

Duração: 3 meses.

1 – Aluno do curso de Mestrado em Engenharia Mecânica_Projetos da Universidade de Taubaté (UNITAU/SP) - carvalhosandro@ig.com.br

2 - Aluna do curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté – (UNITAU/SP) - stephanycamargo@live.com

Palavras chave: Brasagem, Juntas, Soldagem Branda, Capilaridade.

Resumo. O presente trabalho técnico pretende abordar conceitos e aplicações da solda por brasagem no geral e especificamente em trocadores de calor, como: aquecedores, evaporadores, radiadores e condensadores para a indústria automobilística. Processo que exige somente a fusão do metal de adição, não ocorrendo à fusão do metal base, mantendo a natureza estrutural do material e suas propriedades mecânicas originais. Para se realizar o processo de brasagem, são necessários um material base e um material de adição, que submetidos a alta temperatura tendem a preencher a folga existente entre os materiais a serem unidos pelo efeito de capilaridade, quanto menor esta folga melhor este efeito. Os resultados esperados são o total preenchimento da folga com o material de adição, garantindo a qualidade de um produto estanque.

1. INTRODUÇÃO

A grande evolução da indústria automobilística tem exigido cada dia mais o desenvolvimento da indústria de auto-peças. Motores cada vez mais potentes, exigem da indústria de arrefecimento de motores, sistemas de arrefecimento cada vez menores e capazes de atender os requisitos de troca térmica. Por outro lado à exigência de níveis de economia e poluição mais severos exigem componentes cada vez mais leves. Estas exigências de mercado, para o setor de auto-peças tem dedicado ao ramo de arrefecimento desenvolver técnicas, materiais e meio de brasagem em fornos para trocadores de calor em alumínio.

2. BRASAGEM

Brasagem é a mais antiga técnica para unir materiais. Antigamente utilizava-se, por exemplo, a brasagem na confecção de artefatos em ouro (jóias), como mostrada na figura 1. Trata-se de uma fivela de ouro com pequenos filigramas brasados sobre um disco detalhado em pedras preciosas. Na parte posterior observa-se outras partes brasadas. Esta fivela é originário da França, datado aproximadamente de 700 DC. Literaturas apontam jóias brasadas datadas de 1500 a 4000 AC.



Figura 1: Fivela em ouro com partes brasadas, datado de 700 DC
Museu de Colônia - Alemanha.

Apesar de ser uma técnica muito antiga, a brasagem é até hoje amplamente utilizada em inúmeras aplicações devido à capacidade de unir materiais de natureza muito distinta e com pequenas seções transversais, utilizados em autopeças, refrigeradores, trocadores de calor, componentes aeronáuticos e aeroespaciais, componentes eletrônicos, etc. Tem ainda a grande vantagem de permitir a união de materiais diferentes, tais como metais e cerâmicas, de difícil execução por outra técnica de soldagem. Alguns exemplos

podem ser vistos nas figuras 2, 3, 4 e 5. Na figura 2 é mostrada a união entre componentes tubulares de cobre e aço, com aplicações típicas de componentes para indústria de refrigeração e autopeças. Na figura 3 são mostradas a brasagem de trocadores de calor de alumínio utilizado em sistemas de refrigeração de carros de passeio. Na figura 4 é mostrada a brasagem entre a cerâmica alumina – Al_2O_3 - e um material metálico de liga Fe-Ni-Co. Na figura 5 são mostradas a brasagem entre cobre e grafite, com aplicações na indústria nuclear.

Na figura 6 são mostradas a brasagem entre tubos e aletas de um evaporador realizada em um forno, podendo ser notado o material de enchimento ou material de adição.



BRASAGEM
TUBO DE COBRE
E ANEL DE AÇO



BRASAGEM
TUBO DE COBRE
EM CHAPA

Figura 2: Brasagem entre componentes tubulares de cobre e aço.



Figura 3: Brasagem de condensadores de ar condicionado automotivo.



Figura 4: Brasagem entre cerâmica alumina e liga Fe-Ni-Co

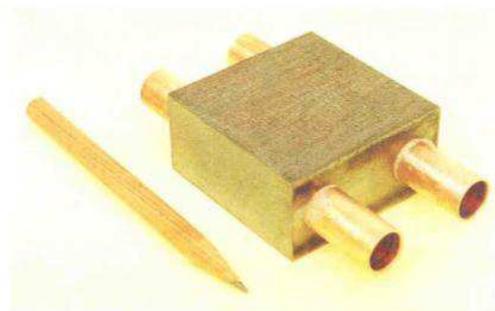


Figura 5: Brasagem entre grafite e cobre.

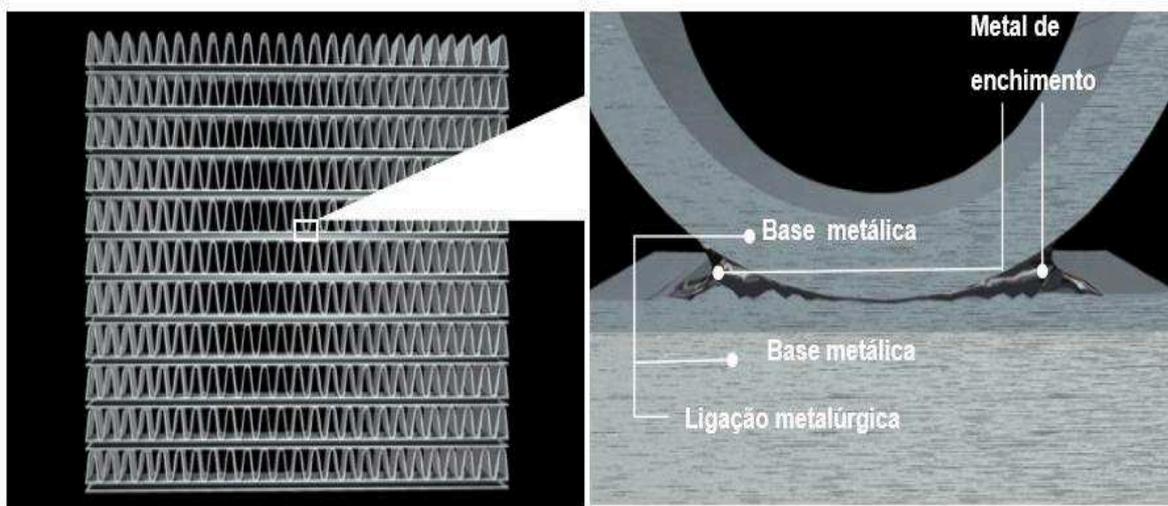


Figura 6: Brasagem entre tubos e aletas de um evaporador em forno.

2.1 DEFINIÇÕES

Existem várias definições para brasagem, sendo que duas são mais conhecidas: a oriunda dos Estados Unidos através da AWS (American Welding Society - Sociedade Americana de Soldagem), e da Alemanha através da norma DIN. Segundo a AWS, define-se brasagem como "processo de união de materiais com adequado aquecimento, sendo utilizado um metal de adição cuja temperatura de fusão é superior a 450 °C e inferior a $T_{solidus}$ dos materiais base. O metal de adição preenche a folga entre os materiais base por efeito capilar". Os materiais de adição da brasagem são sempre constituídos de metais puros ou ligas. Formas comerciais comuns são arames, varetas, chapas, fitas, barras, pós, pastas ou peças conformadas. A norma DIN 8505 define Brasagem como um processo térmico para preenchimento de juntas e revestimento de materiais, onde ocorre uma fase fluida, obtida pela fusão de um metal de adição (brasagem por fusão) ou por difusão na superfície de união (brasagem por difusão). A temperatura de início de fusão ($T_{solidus}$) dos materiais de base não é atingida.

- Materiais base: são os materiais a serem unidos. Por exemplo: tubo de alumínio com cabeceira de alumínio.
- Metal de adição: metal puro ou liga metálica apropriada para a brasagem.
- Temperatura de brasagem: temperatura em que estão submetidos os materiais na brasagem.
- Folga: distancia que separa os materiais a serem unidos, conforme mostrado na figura 6. Esta folga no processo de brasagem de trocadores de calor, não deve ser $> 0,15$ mm.

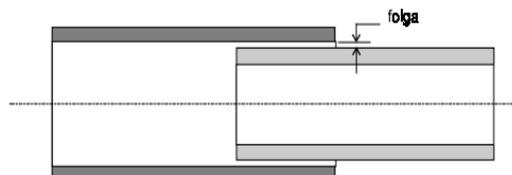


Figura 6 : ilustração da folga de brasagem.

- Tipos de juntas brasadas: são as configurações em que os materiais base serão brasadas. Pode-se verificar alguns tipos de juntas brasadas na figura 7.

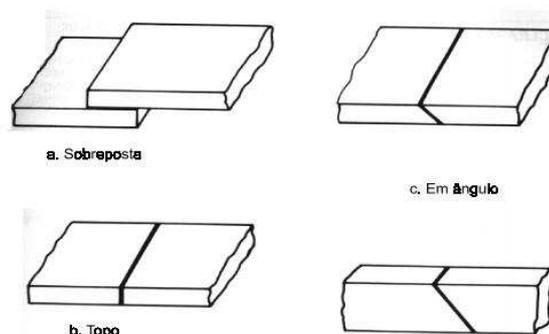


Figura 7: tipos de juntas brasadas.

2.2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

2.3 Molhabilidade- capacidade de uma fase líquida espalhar-se sobre um substrato sólido. Na brasagem esta fase líquida é definida pelo material de adição e o substrato sólido pelo material base. Na figura 8, pode-se verificar 3 casos diferentes de molhabilidade, onde no 1º caso o metal de adição não tem nenhuma tendência de espalhamento sobre o material base, não ocorrendo a brasagem. No 2º caso o metal de adição se espalha limitadamente sobre o material base, permitindo-se a união dos materiais e no 3º caso o metal de adição espalha-se em toda a superfície do material base, tendo um excelente processo de união entre os materiais.

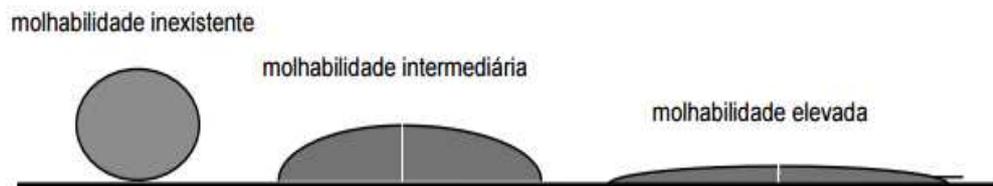


Figura 8: casos de molhabilidade.

2.4 Capilaridade - é a propriedade dos fluidos de subir ou descer em determinadas folgas. Ela determina a distância a ser percorrida pelo líquido ao longo da junta, ou seja, descreve o escoamento do metal de adição no processo de brasagem. Um exemplo que permite consolidar o entendimento sobre o efeito de capilaridade está mostrada na figura 9, pois devido a não molhabilidade do material B, não ocorreu o fenômeno do efeito capilar e consequentemente não ocorreu a brasagem.

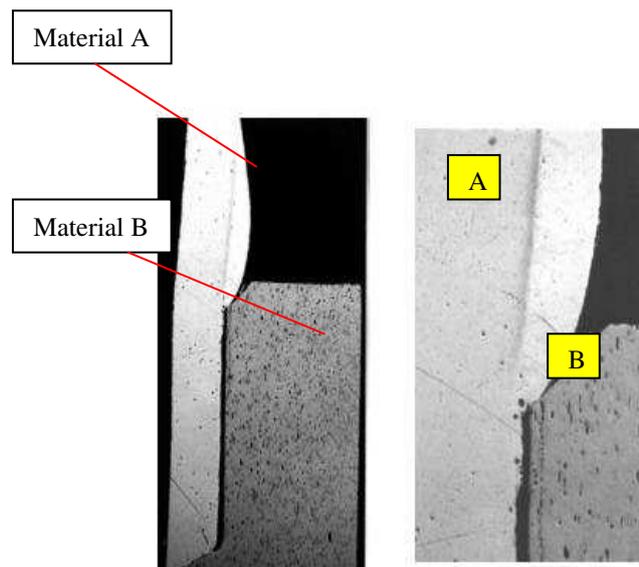


Figura 9: exemplo de caso que não ocorreu o efeito capilar.



2.5 Folga na brasagem - o enchimento da folga entre os materiais dependem da capacidade do material de adição em molhar o material base. Esse enchimento ocorre facilmente quanto menor a folga existente entre os materiais, portanto a folga a ser utilizada deve estar dentro de uma faixa de especificação, onde o fluxo atuará adequadamente garantindo o perfeito enchimento da folga. As folgas geralmente utilizadas devem estar entre 0,05 a 0,20 mm, dependendo do material de adição, do tipo de fluxo e do tipo de junta a ser utilizada. No caso da brasagem de trocadores de calor o utilizado é 0,15 mm de folgas para uma boa brasagem. Na tabela 1, estão indicadas as folgas recomendadas para alguns tipos de materiais de adição, variando de acordo com o tipo de fluxo e do tipo de junta brasada.

Tabela 1 : Folgas recomendadas na temperatura de brasagem

Metal de adição Classificação segundo AWS	Folga recomendada [mm]	Fluxo utilizado e configuração da junta brasada
BCuP - ligas contendo cobre, fósforo e prata	0,025 - 0,125	com e sem fluxo mineral e junta brasada de comprimento inferior a 25mm
	0,175 - 0,375	com e sem fluxo mineral e junta brasada de comprimento superior a 25mm
BAg - Ligas contendo prata, cobre, cádmio, zinco (níquel, estanho)	0,05 - 0,125	com fluxo mineral
	0.0 - 0,05	atmosfera de brasagem

3. CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE BRASAGEM

Os processos de brasagem podem ser classificados de acordo com os métodos de aquecimento utilizados. Nas indústrias, os mais importantes são brasagem por chama, por indução, em forno, por resistência, por imersão e por infravermelho.

3.1 Brasagem por Chama

O aquecimento é feito por uma ou mais tochas, dependendo da temperatura e da quantidade de calor exigido, o gás combustível pode ser o acetileno, propano, etc. O metal de adição pode ser colocado direto na junta. Para este processo o uso de fluxo é essencial. Na figura 7, mostra um exemplo de brasagem por chama, onde é utilizado o gás acetileno e o metal de adição é feito através da vareta de solda.

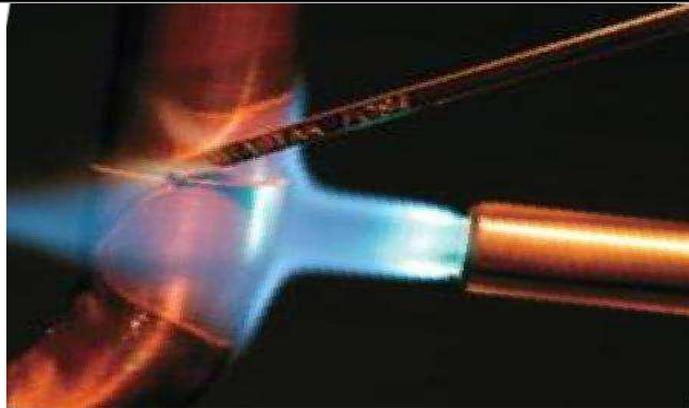


Figura 7: Brasagem por chama em tubo de cobre.

3.2 Brasagem por Indução

O calor é obtido por uma corrente induzida nas peças a se unir. As peças são colocadas no interior de uma bobina, onde circula uma corrente alternada. O metal de adição é colocado com antecedência na junta, protegida por um fluxo. Na figura 8, mostra a brasagem por indução, onde pode-se notar que a peça a ser unida fica no interior da bobina.

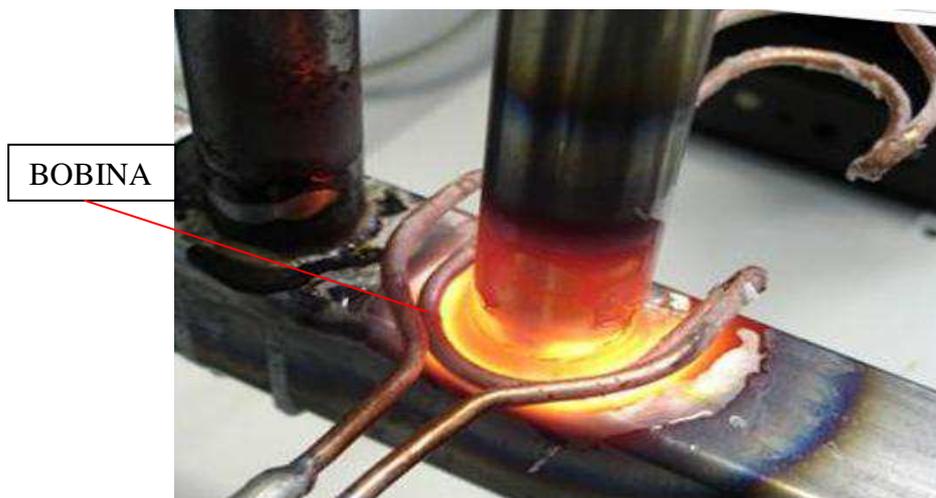


Figura 8: Brasagem por indução.

3.3 Brasagem em Forno

É muito utilizada quando o metal de adição pode ser colocado previamente na junta. É um processo usado em produção em série e em grande escala. A brasagem é protegida por fluxo e atmosfera controlada.

3.4 Brasagem por Resistência

O calor é obtido por efeito Joule. O metal de adição é colocado previamente na junta, é protegida por fluxo ou atmosfera controlada.

3.5 Brasagem por Imersão

Pode ser realizada através de banho químico ou em metal fundido. No banho químico, o metal de adição é colocado previamente na junta e o conjunto é imerso em um banho de fluxo fundido, aquecido por resistência elétrica. A proteção pode ser feita pelo próprio banho ou por um fluxo adicional. Na brasagem por imersão em metal fundido, as peças a serem unidas são imersas em banho fundido do metal de adição em um recipiente adequado. A proteção é feita pelo próprio banho.

3.6 Brasagem por Infravermelho

É o processo de brasagem que utiliza o calor emitido por fontes de calor infravermelha, em geral lâmpadas de quartzo (até 5.000 W) e a proteção é feita por fluxo.

4.0 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Os equipamentos usados na brasagem variam, dependendo do método de aquecimento a que se deseja utilizar.

- Brasagem por Chama: são usados maçaricos oxigás (acetileno, propano, etc.)
- Brasagem em Forno: são usados fornos a gás, a óleo, elétrico.
- Brasagem por Indução: fonte de energia elétrica e bobina de indução.
- Brasagem por Resistência: utiliza-se eletrodos de carvão e corrente elétrica.
- Brasagem por Imersão: usado forno de pré-aquecimento e cadinho,

5. PROCESSO DE BRASAGEM EM FORNO

5.1 Desengraxe

No processo de fabricação de aletas e tubos, componentes que fazem parte de um trocador de calor é utilizado um óleo para a lubrificação destes componentes, pois estes passam por um processo de conformação. O desengraxe é de extrema necessidade, pois elimina o óleo depositado nestes componentes, não deixando contaminar o fluxo, ambiente do forno, por fim garante a qualidade de uma junta bem brasada. Na figura 10, mostra o setor de desengraxe de um forno de brasagem, onde o mesmo atinge uma temperatura de 230 °C, fazendo com que o óleo contido nas aletas e tubos venham a se evaporar.

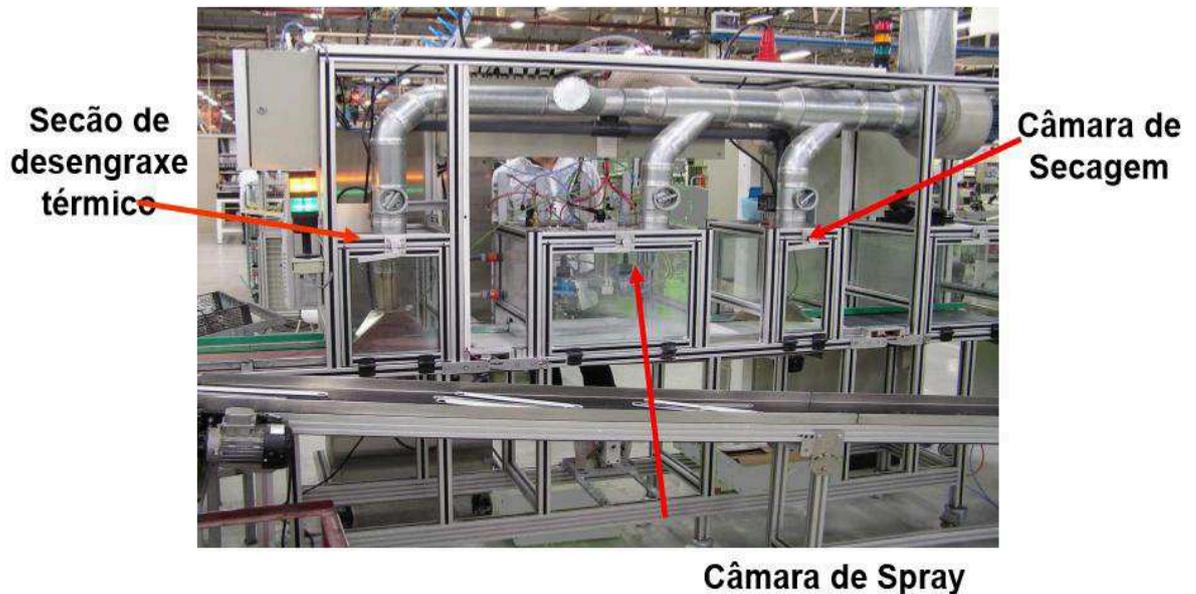


Figura 10: Representação do setor de desengraxe de um forno de brasagem.

5.2 Fluxagem

Neste processo, os produtos: radiadores, condensadores, aquecedores passam por um banho de fluoreto de potássio, alumínio e água desmineralizada e após por um processo de secagem. Um aumento na quantidade de fluxo, melhora a qualidade da junta brasada, tendo em vista que o fluxo tem a função de desoxidar e limpar a região da união. Na figura 11, mostra o processo de fluxagem onde é composta por bombas pneumáticas de alta pressão, reservatório, misturador, manômetros de controle .

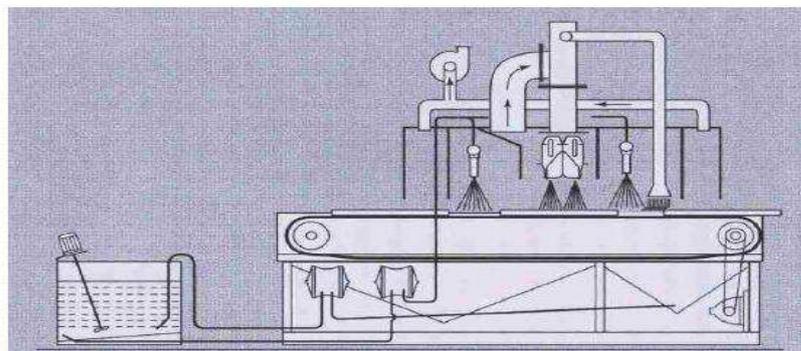


Figura 11: representação de um processo de fluxagem.

Na figura 12, mostra o detalhe de dentro da cabine de fluxagem, podemos verificar um radiador sofrendo o banho de jato de fluxagem.

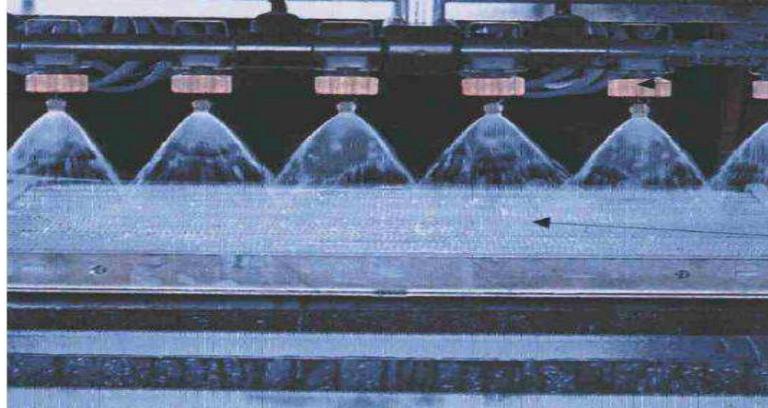


Figura 12: detalhe do jato de fluxo dentro da cabine de fluxagem.

Na figura 13, pode-se verificar as diferenças de juntas brasadas com diferentes porcentagens de fluxo aplicado.

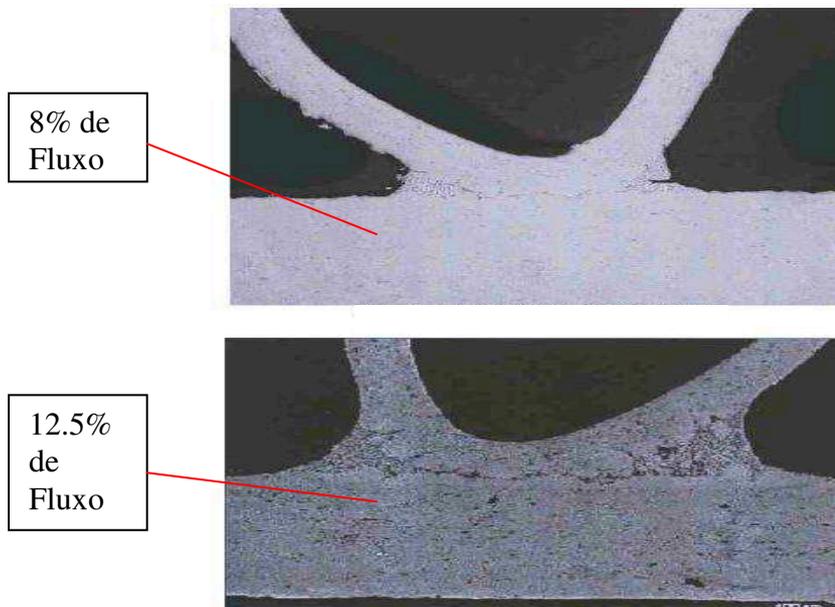


Figura 13: diferentes quantidades de fluxo aplicado.

5.3 Aquecimento

O processo de brasagem do alumínio inicia-se a 560° C, chegando a uma temperatura final próxima dos 600° C, iniciando-se o resfriamento. A partir dos 560° C o fluxo começa a fundir-se, até 575° o fluxo dissolveu completamente a camada de óxido existente, a partir de 577° C a liga de brasagem começa a fundir. O silício existente na liga de brasagem começa a difundir-se no metal de base e alcançando 600 ° C o processo está completo. O material de adição utilizado no processo de brasagem denomina-se Clad e está presente na caixa superior e inferior de um evaporador, na proporção de 8% da espessura da sua caixa. Na figura 14 pode-se verificar os vários estágios de um forno de brasagem de alumínio. O forno tem aproximadamente 50 metros de comprimento entre a entrada até a saída do material.

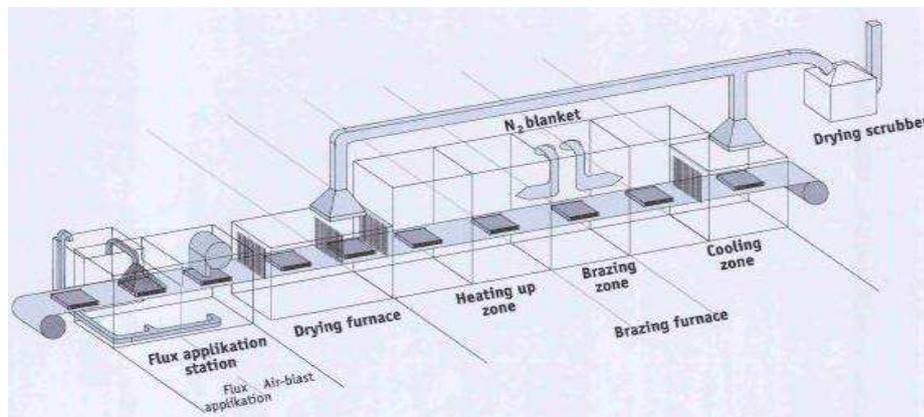


Figura 14: representação esquemática de um forno de brasagem.

5.4 Temperatura X Tempo de Brasagem

Na tabela 1 pode-se verificar diferentes temperaturas de brasagem e o tempo máximo de brasagem.

Tabela 1 – Temperatura (°C) X tempo (min) de brasagem.

Temperatura de brasagem (°C)	Tempo de brasagem: Temperatura > 577 °C (min)
585	2,0 – 7,0
590	2,0 – 6,5
595	2,0 – 6,0
600	2,0 – 5,5
605	2,0 – 5,0

6. BRASAGEM DE TROCADORES DE CALOR

Na figura 15 mostra o primeiro processo do forno de brasagem onde as peças (heater, condensadores, evaporadores e radiadores) ficam alojadas em cima de uma grelha para brasagem e passam no termodesengraxe. A grelha para brasagem obrigatoriamente é construída em material inox e recebe um banho de nitretação, que tem como finalidade não deixar que a peça se adere a grelha, consequentemente aumentando a vida útil da grelha.



Figura 15: trocadores de calor em processo de desengraxe.

Na figura 16 mostra diversos modelos de radiadores na esteira do forno, que serão submetidos ao processo de desengraxe.



Figura 16: radiadores no processo de desengraxe.

Na figura 17 mostra a cabine de fluxagem onde os trocadores de calor são submetidos a um banho de fluxo através de bicos direcionadores, este jato de fluxo tem uma pressão controlada. Logo a frente pode-se observar o pré-aquecimento do forno de brasagem, este processo é onde se inicia as várias fases de elevação de temperatura, alcançando na fase de brasagem aproximadamente 600° C.

CABINE
DE FLUXAGEM



PRÉ-
AQUECIMENTO

Figura 17: Cabine de fluxagem e pré-aquecimento.

Na Figura 18 os trocadores de calor são submetidos ao processo de resfriamento no forno. Nesta fase os trocadores de calor já estão brasados.



Figura 18: processo de resfriamento na saída do forno de brasagem.

6.1 Modelos de trocadores de calor

Na Figura 19 mostra vários modelos de trocadores de calor possíveis de serem brasados em um forno de brasagem.



Figura 19: Modelos de trocadores de calor

7. Ensaios utilizados após o processo de brasagem

- Teste de Estanqueidade a Hélio 100% (evaporadores, condensadores e aquecedores).
- Teste de Estanqueidade a Seco 100% e tanque de água (radiadores).

8. VANTAGENS E DESVANTAGENS DO PROCESSO DE BRASAGEM

8.1 Vantagens

- O metal de adição apresenta baixa tensão residual, permitindo a usinagem.
- As uniões apresentam resistência mecânica para várias aplicações.
- Equipamento de fácil manuseio.
- Requer menor calor, a soldagem é mais rápida.

8.2 Desvantagens

- Resistência da união está limitada a resistência do metal de adição.
- Temperatura de trabalho limitada ao ponto de fusão do metal de adição.
- Todo o conjunto a ser brasado deve ser aquecido.
- Possibilidade de corrosão na junta.

9. CONCLUSÃO

Devido a grande exigência da indústria automobilística atrelada a alta demanda solicitada, o processo de brasagem em forno é o mais adequado para se produzir trocadores de calor na indústria de auto-peças.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Brazing Handbook - AWS - 1991.
- Delphi, Treinamento de Brasagem 2015.
- OKIMOTO, Apostila Soldagem - 2011.
- BATALHA, G.F (2003). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

11. Comunicado de responsabilidade

O autor é o único responsável pelo material pesquisado.

Abstract. The current technical paper intends to approach concepts and applications of brazing in general and specifically in heat exchangers like: heaters, evaporators, radiators and condensers for the automobile industry. Process which demands only the fusion of the filler metal, not occurring the fusion of the base metal, maintaining the structural nature of the material as well as its original mechanical properties. To carry out the brazing process a base material and filler material are necessary, that when submitted to high temperatures tend to fulfill the existing gap between the materials to be united by the capillarity effect, the smaller the gap, the better this effect. The expected results are the total fulfillment of the gap with the filler material, ensuring the quality of a watertight product.