

## 1. Diferença entre soldagem e brasagem

É muito comum ler e ouvir que brasagem é um tipo de soldagem. Essa afirmativa está errada. Brasagem, assim como soldagem, é um tipo de processo de união. Além desses, pode-se citar: colagem, parafusagem, rebiteagem e união por dobra. Estes 3 últimos são processos de união cuja resistência da junta é a resistência do parafuso, do rebite ou da região de dobra, respectivamente. A união é obtida por forças macroscópicas. Os processos soldagem, brasagem e colagem são processos cuja união é obtida por forças microscópicas e ocorre ligação química na união.

Na colagem é necessário um material adesivo (a cola) que seja compatível quimicamente com as partes a serem unidas. É necessário um tempo de cura para a união se concretizar. Na brasagem também é obrigatório a presença de um material adicional para que a união entre as partes ocorra: metal de adição. Obrigatoriamente é necessário que ocorra a fusão (transformação de fase, sólido para líquido e posterior solidificação) do material de adição e não ocorre a fusão dos materiais de base. Na soldagem não é obrigatório a presença de um material de adição e se existir, tanto o material de adição quanto os materiais de base fundem, se misturam, ocorre obrigatoriamente a diluição dos materiais envolvidos na união.

A técnica de união por brasagem é muito antiga. Há relatos de jóias brasadas datadas de 1500 a 4000 anos AC. A brasagem é bastante difundida até hoje devido a sua capacidade de unir materiais de natureza muito distinta (como metais e cerâmicos) e com pequenas seções transversais. As técnicas de brasagem são muito aplicadas na produção de componentes para autopeças, refrigeradores, trocadores de calor, indústria aeronáutica, aeroespacial, eletrônica etc.

## 2. Conceitos fundamentais para conceituar brasagem

As definições mais apresentadas para o que é brasagem são as definidas pela AWS (American Welding Society - Sociedade Americana de Soldagem) nos Estados Unidos e a definida pela norma DIN (Deutsches Institut für Normung) da Alemanha.

Segundo a AWS (2007) 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"*.

A norma DIN 8505 (1979) 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"*.

Alguns conceitos são necessários para uma apresentação mais completa do que é brasagem e esses conceitos são:

- **Material de base:** materiais a serem unidos. Solda-se metais (metais de base) e polímeros. Brasa-se metais e cerâmicos.
- **Material de adição:** material utilizado para preenchimento da junta soldada ou brasada. Quando metal, fala-se em metal de adição. Para a brasagem, tem-se metal puro ou liga metálica, como cobre puro ou ligas contendo prata-cobre-zinco.
- **Temperatura de fusão (ponto de fusão):** temperatura na qual um material funde (transformação sólido-líquido).
- **Temperatura solidus,  $T_{solidus}$ :** temperatura abaixo da qual o material é completamente sólido. Temperatura a partir da qual inicia a fusão (a transformação de fase do sólido para o líquido) de um material.
- **Temperatura liquidus,  $T_{liquidus}$ :** temperatura acima da qual o material é completamente líquido. Temperatura na qual termina a fusão de um material.
- **Temperatura de brasagem (ou de trabalho):** temperatura na qual os materiais de base ficam submetidos durante a operação de brasagem.

O ponto de fusão (temperatura de fusão) dos materiais de adição (metais) utilizados na brasagem é menor que a  $T_{solidus}$  do material de base. Por isso que na brasagem os materiais de base não fundem: não é fornecido calor suficiente para fundir o material de base, funde somente o metal de adição.

Geralmente, os materiais são classificados em metais e não metais. Estes são classificados em naturais e sintéticos. Por sua vez, os sintéticos são subdivididos em cerâmicos e polímeros. Em suma, tem-se os metais, os cerâmicos e os polímeros.

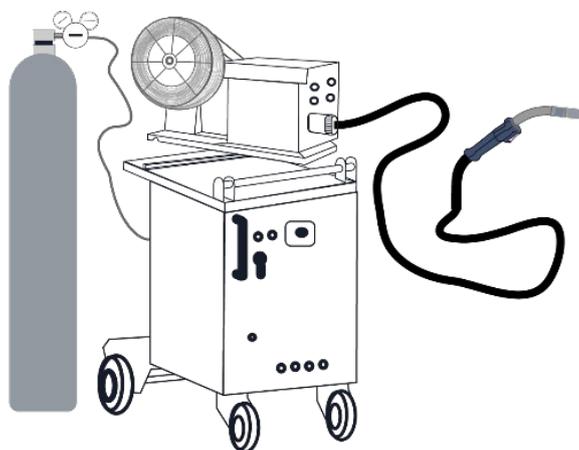
Existe uma particularidade ao utilizar calor para a união de polímeros: o material de adição precisa ser similar ao material de base. Isso significa que as temperaturas de fusão dos materiais de base e dos de adição são muito próximas. Sendo inviável fundir um sem fundir o outro. Portanto, ao utilizar calor na união de polímeros, esses são unidos por soldagem (ocorre a fusão tanto dos materiais de base quanto do material de adição).

Entre materiais cerâmicos, utiliza-se materiais de adição metálicos. E entre materiais metálicos, utiliza-se também metais como material de adição, porém estes possuem temperatura de fusão inferior à  $T_{solidus}$  do metal de base. É possível brasar materiais metálicos e materiais cerâmicos e utiliza-se metais como material de adição em ambas as aplicações. Os metais de adição mais comuns são: alumínio, cobre, prata, bronze, ouro e suas ligas.

É interessante destacar que o termo soldagem em inglês é *welding*. No Brasil, quando se trata da brasagem é comum a utilização dos seguintes termos em inglês: *brazing* e *soldering*. Utiliza-se *brazing* quando o metal de adição funde acima de 450 °C e *soldering*, quando o metal de adição funde abaixo de 450 °C. É interessante que a palavra *soldering* parece mais com a palavra soldagem que a palavra *welding*. Talvez, isso explique a insistência de tantos referenciar a brasagem como um tipo de soldagem. Reforçando, essa afirmativa está errada.

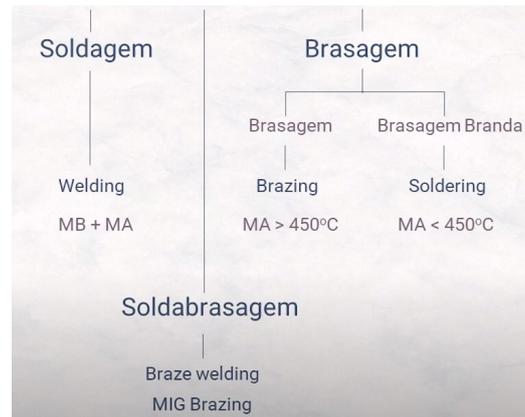
Ao unir duas peças utilizando material de adição e fornecimento de calor, se os materiais de base e de adição fundem, foram aquecidos até suas temperaturas de fusão, passando para o estado líquido, o processo de união é por soldagem - *welding*. Tem aquecimento, mas não o suficiente para a fusão do material de base, fundi apenas o metal de adição, o processo de união é por brasagem. Se a temperatura necessária para a fusão do metal de adição foi acima de 450 °C, *brazing*, brasagem. Se a fusão do metal de adição foi com temperatura inferior a 450 °C, é *soldering*, que é traduzido, muitas vezes como solda branda, mas o correto, deveria ser brasagem branda.

Existe também o termo de soldabrasagem, *brazing welding*, *braze welding*, sendo que a técnica mais utilizada é o *MIG-brazing*. Trata-se de uma técnica de união que utiliza o equipamento de soldagem GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), com arame de metal utilizado em brasagem. A fonte de calor é o arco elétrico, podendo ou não ocorrer a fusão do material de base, que depende muito do aporte térmico utilizado, por isso, soldabrasagem, Figura 1. E o fluxograma apresentado na Figura 2 sumaria a diferença entre soldagem, brasagem e soldabrasagem.



**Figura 1** – Equipamento GMAW – arame de brasagem – processo Soldabrasagem.

Fonte: elaborado pelo autor, 2022.



**Figura 2** – Fluxograma apresentando as diferenças entre soldagem, brasagem e soldabrasagem.

Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

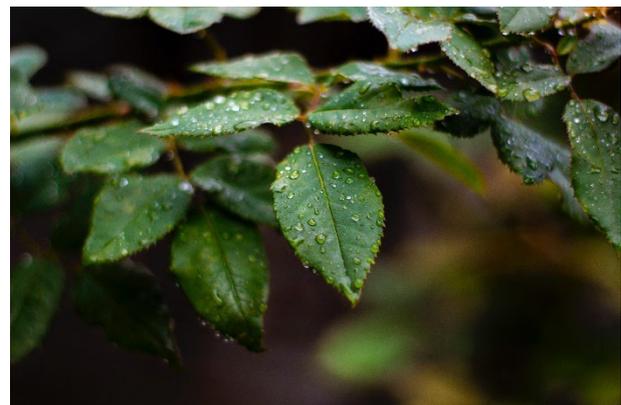
**Difusão atômica:** Difusão é o ato ou efeito de difundir, espalhar, movimentar. Difusão é um mecanismo pelo qual a matéria é transportada através da matéria. Toda matéria é composta por átomos e para existir movimento é preciso existir movimentação atômica. Esta movimentação para ocorrer no material sólido é preciso o fornecimento de calor, fazendo com que o material expanda, favorecendo a movimentação atômica que ocorre por vibrações de origem térmica.

**Tensão superficial:** efeito físico que ocorre na interface entre duas fases químicas. É devido a tensão superficial que a superfície de um líquido funciona como uma membrana elástica. É devido a tensão superficial que insetos, por exemplo, podem pousar sobre um líquido parecendo que estão sobre uma cama elástica, Figura 3(a). É devido a tensão superficial que se formam as gotas d'água sobre superfícies, Figura 3(b). A tensão superficial também é responsável pelo efeito de capilaridade.



(a) Inseto e água

Fonte: pexels-alexandre-cruz-4019920



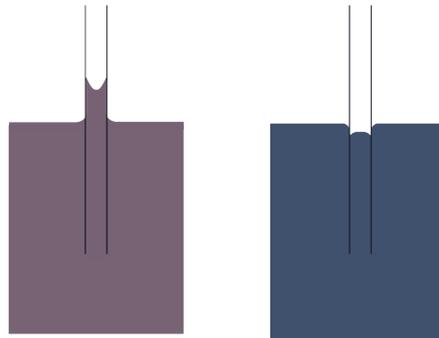
(b) Gota d'água e uma folha

Fonte: pexels-tanguy-sauvin-10460

**Figura 3** – Exemplos da atuação da tensão superficial entre duas fases químicas.

**Capilaridade:** É uma propriedade fluidodinâmica. A palavra fluido refere-se ao líquido e a palavra dinâmico refere-se à movimentação. É uma propriedade relacionada ao líquido, à movimentação do líquido. A capilaridade permite a movimentação de líquidos por aberturas tubulares ou porosas. Um exemplo prático da ação da capilaridade é encostar a ponta de um guardanapo de papel na superfície da água. A água passa a ser absorvida pelo papel, a água molha o papel, mesmo o papel estando na vertical. A água sobe através do papel e isso ocorre devido ao efeito da capilaridade. Outro exemplo pode ser observado na Figura 4: dois

recipientes com líquido A e B; tubos capilares (longo e estreito) são colocados nos recipientes; o líquido A sobe pelo tubo capilar, enquanto o líquido B desce; força de adesão em A e força de coesão em B.



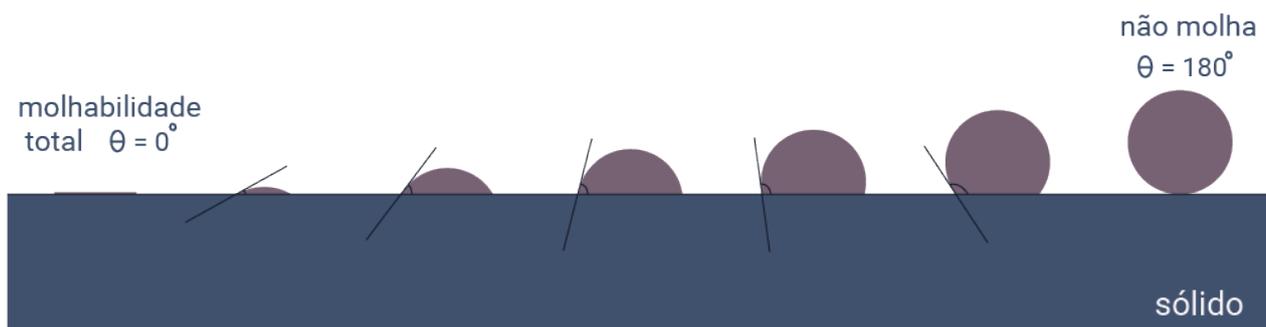
(a) Força de adesão (b) Força de coesão

**Figura 4** – Exemplo da ação da capilaridade.

Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

A força de adesão refere-se à afinidade entre o líquido e a superfície sólida, o tanto que o líquido é capaz de aderir a superfície, molha-la. A força de coesão refere-se à capacidade do líquido se manter unido. Há líquidos que tem uma grande capacidade de coesão, conseguem formar uma película resistente na superfície. Essa película é a tensão superficial, Figura 3(b).

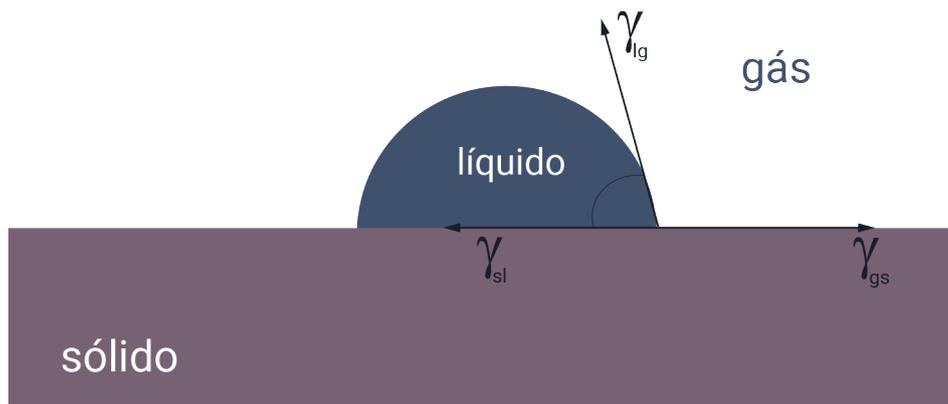
A relação de coesão, adesão e tensão, explica a capilaridade. Quando a força de coesão prevalece, o líquido se uni mais, formando a película elástica, as gotas. Quando a força de adesão prevalece, o líquido adere mais a superfície, molhando-a mais. Tem-se uma boa **molhabilidade**, que é a capacidade de um determinado líquido espalhar-se sobre um substrato sólido. É comum em brasagem, referir-se à molhabilidade como o ângulo de contato entre o líquido e um substrato sólido. Quanto mais o líquido se espalha, menor o ângulo de contato, melhor a molhabilidade do metal de adição fundido sobre o material de base sólido, Figura 5.



**Figura 5** – Molhabilidade de um líquido sobre um substrato sólido.

Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

A molhabilidade depende das tensões superficiais atuantes no sistema, Figura 6. A tensão da interface sólido-líquido (SL), depende da afinidade entre o material sólido e o metal líquido. A tensão da interface líquido-gás (LG) depende da composição química do metal de adição líquido e da atmosfera gasosa de brasagem. A tensão da interface gás-sólido (GS), arrasta a gota para fora (reduz o ângulo  $\theta$ ) e as tensões combinadas Sólido-Líquido e Líquido-Gás arrastam a gota para dentro (aumenta o ângulo  $\theta$ , reduz a molhabilidade). A tensão Gás-Sólido é fortemente reduzida pela presença de impurezas e óxidos superficiais. Por isso, a importância da limpeza superficial, da remoção de óxidos que é função exercida pelos fluxos de brasagem.



**Figura 6** – Tensões superficiais atuantes no sistema.

Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

Pode-se quantificar a molhabilidade de um metal de adição sobre um material base por duas maneiras bem simples. A primeira é medindo o ângulo de contato  $\theta$  formado entre o substrato e a tangente à fase líquida no ponto de contato. Neste caso, quanto menor o ângulo  $\theta$ , maior a molhabilidade. A medida deste ângulo pode ser feita na temperatura ambiente, utilizando metalografia. A segunda maneira é padronizar um teste fundindo-se sempre a mesma quantidade de metal de adição sobre diferentes materiais base. Mede-se então a área ocupada pelo metal de adição. Quanto maior a área ocupada, maior o espalhamento, e, conseqüentemente, maior a molhabilidade.

Com base nos conceitos supracitados, apresenta-se brasagem como:

**Brasagem** é um processo de união de materiais, onde a coalescência (união intensa) é obtida pelo aquecimento a uma temperatura adequada e suficiente para fundir o material de adição, que é metálico, e que tem temperatura de fusão abaixo da  $T_{solidus}$  do material de base (que pode ser metálico ou cerâmico). Na brasagem, apenas o metal de adição funde e é necessária uma boa molhabilidade do metal líquido na superfície sólida do material de base. A molhabilidade depende das tensões superficiais atuantes no sistema que é fortemente influenciada pela presença de impurezas e óxidos superficiais. A aderência na brasagem é obtida pela combinação da ação capilar (movimento do líquido) e da difusão atômica (movimentação no sólido). Devido ao aquecimento, o material de base expande e o metal de adição funde. Devido à ação capilar (capilaridade), o metal fundido se espalha e molha o material de base (molhabilidade). O aquecimento também produz vibrações atômicas que favorecem a difusão atômica, a movimentação dos átomos no material sólido. A molhabilidade do metal de adição fundido depende das condições superficiais do material de base. Quanto mais limpa a superfície, melhor a molhabilidade.

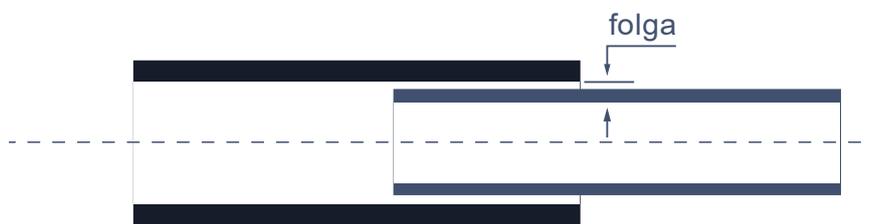
Para uma brasagem de qualidade é imprescindível que o material de base esteja quimicamente limpo. Que a superfície esteja completamente isenta de óxidos e graxas e isso é assegurado pela **decapagem** química ou mecânica. Mesmo após a limpeza, o simples contato da superfície com o ar, principalmente, durante o aquecimento do material de base, resíduos ou novos óxidos podem ser formados. É fundamental para a qualidade da brasagem que agentes fluxantes atuam. Quando estes agentes são sólidos, líquidos ou pastosos recebem o nome de fluxo e a brasagem é denominada de **brasagem com fluxo**. Quando esses agentes são gasosos, a brasagem é denominada de **brasagem sem fluxo** ou **brasagem com atmosfera controlada**.

**Fluxos** são substâncias de origem mineral, compostos por fluoretos, borax, boretos, fluoboretos. O fluxo não deve reagir com o material de base, portanto, devem ser inertes. Devem desoxidar a superfície do material de base e fazer isso antes da fusão do metal de adição. O fluxo deve espalhar com facilidade sobre o material de base e permitir que o metal de adição também espalhe, ou seja, molhe o material de base. O fluxo deve ser de fácil remoção após a brasagem e existem vantagens e desvantagens da brasagem ser realizada com fluxo. Assim, como existem vantagens e desvantagens da brasagem ser realizada sem fluxo.

### 3. Princípio operacional de uma união por brasagem

Na brasagem, apenas o metal de adição funde e propriedades como molhabilidade, tensão superficial, capilaridade, difusão atômica influenciam fortemente no resultado da brasagem e, conseqüentemente, na qualidade final do produto brasado. É fundamental que as peças a serem unidas estejam livres de impurezas e óxidos superficiais.

Outra questão importante a ser considerado ao brasar peças é o espaçamento entre os materiais de base. Existe uma grande influência dessa folga no preenchimento da junta e, conseqüentemente, na qualidade da união, Figura 7.



**Figura 7** – Folga em juntas brasadas.

Fonte: elaborado pelo autor, 2024.

Folgas excessivamente grandes resultam em baixa ação capilar, podendo levar a falhas no preenchimento. Este fato poderia induzir que quanto menor a folga, melhor o resultado da brasagem. Porém, não é isso que acontece. Folgas muito pequenas, também resultam em falhas, apesar da elevada ação capilar. O valor desta folga depende de vários fatores, como por exemplos: se a brasagem será com ou sem fluxo; da composição química do metal de adição e, claro, do material de base. Se a brasagem for entre materiais de base dissimilares, diferentes, a dilatação destes materiais durante o aquecimento também deve ser considerada.

A folga não deve ser excessivamente pequena e nem excessivamente grande. A folga deve estar dentro de uma faixa, onde o fluxo atua adequadamente e o efeito capilar age garantindo um adequado enchimento da folga. As folgas, na maior parte dos casos, variam de 0,05 a 0,2 mm, dependendo do metal de adição, do tipo de fluxo e do tipo de junta utilizada. Na Tabela 1 estão indicadas as folgas para alguns tipos de metais de adição, onde verifica-se que a mesma varia de acordo com o tipo de fluxo e configuração da junta brasada. A variação da folga em função do tipo de agente fluxante deve-se ao fato das atmosferas de brasagem necessitarem menores espaços que os fluxos.

O tipo de junta é outra questão importante, Figura 8. A junta de topo é a mais simples. A junta do tipo sobreposta possui, normalmente, uma área de contato maior que a área da junta de topo, podendo apresentar juntas mais resistentes. Tem-se ainda a junta topo-sobreposta que é uma combinação dos dois tipos de juntas e traz as vantagens combinadas das duas. Tem-se ainda a configuração de junta em ângulo, conforme apresentado na Figura 9.

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

Fonte: Okimoto, P.C.

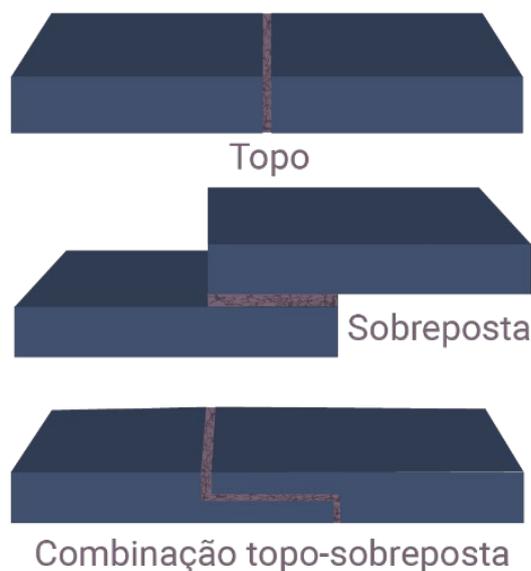


Figura 8 – Tipos de juntas brasadas.

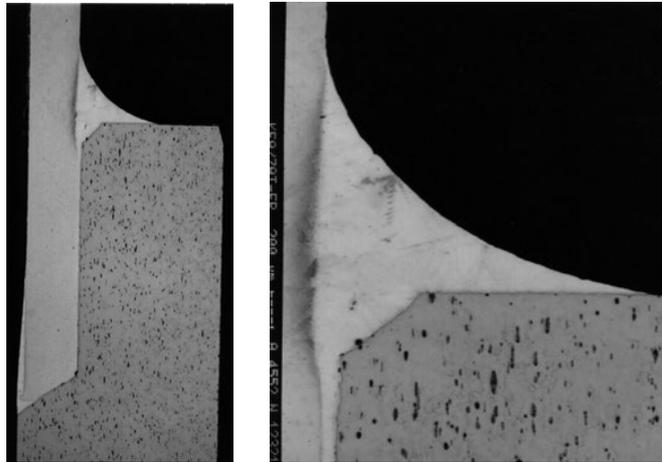
Fonte: elaborado pelo autor, 2022.



Figura 9 – Junta em ângulo.

Fonte: elaborado pelo autor, 2024.

Pode-se dizer que a brasagem é o enchimento de uma folga entre os materiais de base por um metal de adição fundido, que necessariamente apresenta molhabilidade sobre os materiais de base. Um exemplo real de peça brasada pode ser vista na Figura 9 que mostra uma junta brasada cobre-aço carbono, tendo como metal de adição uma liga de prata. Observa-se que o metal de adição apresenta uma boa molhabilidade sobre ambos os materiais de base, uma vez que o ângulo de contato é baixo.



**Figura 9** - Junta brasada cobre-aço carbono.

Fonte: Okimoto, P.C.

#### 4. Agentes fluxantes

Antes da brasagem, é necessário que ocorra a limpeza da superfície dos materiais de base, que devem ficar isentos de óleos ou graxas. Estes produtos, quando aquecidos, produzem resíduos que ficam impregnados na superfície dos materiais, impedindo que o metal de adição molhe os materiais de base e, como consequência, inviabilize a brasagem. Normalmente, tais produtos são eliminados por meio de uma operação de desengraxe, realizada por solventes industriais.

Pode-se dizer que a superfície de um material é composta por uma série de camadas sobre a camada do metal propriamente dita. Tem-se camada de óxidos, de gases e umidades absorvidos, ida e camada de moléculas polarizadas. Estas camadas, com exceção da camada de óxidos, são facilmente removidas durante o aquecimento do metal, não representado qualquer empecilho à brasagem. Para a remoção da camada de óxidos é necessário a ação de um agente, no caso, um agente fluxante. A camada de óxido impede a ocorrência de uma boa molhabilidade.

Durante o aquecimento ao ar de qualquer metal, este tende a oxidar-se devido à presença de oxigênio na atmosfera. Tal oxidação deve igualmente ser evitada, pois caso contrário a brasagem fica comprometida. Esta é a segunda função do agente fluxante: evitar que os materiais de base sofram oxidação durante o aquecimento na brasagem.

Além dos materiais de base, deve-se ainda evitar que ocorra oxidação do próprio metal de adição. Assim, a terceira e última função do agente fluxante é proteger o metal de adição até a sua fusão, permitindo assim que ocorra a molhabilidade.

Os agentes fluxantes podem ser sólidos, líquidos ou gasosos. Quando são sólidos ou líquidos recebem o nome de fluxo. Quando são gasosos geralmente são denominados de atmosferas de brasagem.

#### 5. Fluxos na brasagem

Os fluxos são substâncias de origem mineral, composto de fluoretos, cloretos, boretos, fluoboretos, borax, agentes molhantes, água etc, geralmente na forma de pastas, pós ou líquidos, que são aplicados diretamente sobre as superfícies a serem brasadas para fornecer as condições de molhabilidade

necessárias à brasagem. Devem apresentar as seguintes características: não atacar ou reagir com o material de base; desoxidar a superfície do material de base antes do início da fusão do metal de adição (pelo menos 50 °C abaixo da temperatura de trabalho), mantendo-a desoxidada até o final da brasagem; apresentar boa molhabilidade e fluidez sobre o material de base, espalhando-se adequadamente sobre as superfícies a serem brasadas e ser facilmente removido após a brasagem.

Existem diversos tipos de fluxos que são utilizados em função dos materiais de base e dos metais de adição. Isso se deve ao fato dos diferentes materiais apresentarem diferentes óxidos superficiais. Por exemplo, no aço carbono tem-se principalmente óxido de ferro, enquanto que no aço inoxidável tem-se óxido de cromo.

Os diversos tipos de óxidos diferenciam-se entre si pela maior estabilidade, o que significa que alguns são mais difíceis de serem removidos. A consequência disso é que o fluxo a ser utilizado dependerá do óxido a ser removido. Um fluxo que é adequado para o cobre, não é adequado para o alumínio, por exemplo. Outra característica importante do fluxo é a faixa de temperatura de atuação, ou seja, a faixa de temperatura que o fluxo é eficiente, o que serve para orientar qual o metal de adição é aplicável. O fluxo a ser utilizado na brasagem depende do material de base e do metal de adição. Na Tabela 2 são apresentados alguns tipos de fluxo, segundo a classificação da AWS. Para cada tipo de fluxo, está indicado qual o material de base a ser brasado, bem como os metais de adição aplicáveis, e a respectiva faixa de temperatura de atuação.

**Tabela 2 - Diferentes tipos de fluxos e suas aplicações.**

Classif. AWS	Forma	Conteúdo principal	Faixa de temp. de atuação [°C]	Metal de adição aplicáveis	Materiais base aplicáveis	Característica
FB1-A	Pó	fluoretos e cloretos	560-615	BAISi	ligas de alumínio	Brasagem em forno ou em chama
FB3-A	Pasta	boretos e cloretos	565-870	BAG e BCuP	ligas ferrosas e não ferrosas, exceto Al e Mg. Aplicável para metais duros.	
FB3-C	Pasta	boretos, cloretos e fluoretos	565-925	BAG e BCuP	ligas ferrosas e não ferrosas, exceto Al e Mg. Aplicável para metais duros.	semelhante ao FB3-A, com maior faixa de temperatura de atuação
FB3-K	líquido	boretos	760-1205	BAG, BCuP e RBCuZn	ligas ferrosas e não ferrosas, exceto Al e Mg. Aplicável para metais duros.	utilizado exclusiv.na brasagem por chama, como gasflux

Fonte: Okimoto, P.C.

O fluxo classificado como do tipo FB3-K é um fluxo líquido, composto de boretos. É utilizado exclusivamente na brasagem por chama, sendo incorporado ao gás combustível pela passagem desse por um recipiente contendo o fluxo. Apresenta algumas vantagens: facilita o acesso do fluxo no local da brasagem; melhora a aparência da região brasada, pois evita a oxidação do material de base e quando utilizado em conjunto com fluxo sólido, reduz a quantidade necessária deste fluxo.

## 6. Atmosferas de brasagem

As atmosferas de brasagem são gases contendo hidrogênio (H<sub>2</sub>) ou monóxido de carbono (CO), que atuam de forma a reduzir os óxidos superficiais. Por exemplo, um óxido de ferro pode ser reduzido da seguinte forma:



Atmosferas de brasagem são utilizadas em fornos contínuos de bateladas, sendo que os gases a serem utilizados podem ser oriundos da queima de produtos ou de mistura de gases.

O hidrogênio pode ser injetado diretamente dentro do forno na forma pura ou misturado normalmente com nitrogênio. Nesses casos, os gases são fornecidos pelos fabricantes, devendo apenas serem misturados antes da injeção nos fornos.

## 7. Metais de adição autofluxantes

São metais de adição que dispensam o uso de qualquer tipo de agente fluxante, uma vez que a remoção dos óxidos superficiais do material de base é realizada por elementos que fazem parte do próprio metal de adição. O exemplo mais conhecido e amplamente utilizado é a utilização de ligas de metais de adição da família Cu-P-Ag, contendo entre 5 a 8% de fósforo, na brasagem de cobre e ligas de cobre. O fósforo contido no metal de adição se oxida durante o aquecimento e forma um pentóxido, que reage com o óxido de cobre.



Forma-se um metafosfato de cobre, que cobre o metal de adição e o protege contra a oxidação. Este tipo de metal de adição autofluxante contendo P não atua da mesma forma com outros materiais de base, o que o restringe ao uso do cobre e suas ligas.

## 8. Corrosão provocada pelo fluxo

O resíduo do fluxo após a brasagem deve ser retirado, sempre que possível, para evitar problemas de corrosão. A retirada destes resíduos geralmente é feita por banhos em água quente, preferencialmente logo após a brasagem, quando a peça brasada ainda está relativamente quente. Uma secagem adequada é normalmente requerida. Existem diversos procedimentos de limpeza, que dependem do tipo de fluxo a ser retirado. Não se deve imaginar que somente o banho em água quente seja suficiente para todos os casos.

A tendência maior de corrosão ocorre em fluxos que são higroscópicos, ou seja, absorvem água, o que facilita o processo corrosivo. Deve-se, portanto, selecionar adequadamente o fluxo a ser utilizado, em virtude da possibilidade ou não de limpeza pós-brasagem.

## 9. Metais de adição

A adequada seleção do metal de adição a ser utilizado na brasagem é, muitas vezes, o segredo do sucesso. De uma maneira geral, estes materiais devem apresentar algumas características importantes, para que a brasagem ocorra adequadamente, tais como: apresentar boa molhabilidade sobre os materiais de base; adequada temperatura de fusão (ou intervalo de temperatura de fusão) em relação aos materiais de base e fluidez que permita que o metal fundido penetre adequadamente nas juntas por efeito capilar; apresente as propriedades requeridas ao componente brasado (por exemplo: resistência mecânica

adequada, condutividade elétrica necessária); não reagir excessivamente com o material base, causando erosão ou formando fases frágeis e não apresentar elevada tendência à liquação (fusão parcial).

Costuma-se classificar os metais de adição de acordo com os elementos químicos que o compõem. De maneira geral, existem diferentes famílias de metais de adição, sendo que cada família se caracteriza por conter os mesmos elementos. As principais famílias de metais de adição que normalmente são utilizadas na brasagem de aços e ligas de cobre são:

- 1) ligas contendo prata-cobre-zinco-cádmio (Ag-Cu-Zn-Cd)
- 2) ligas contendo prata-cobre-zinco-estanho (Ag-Cu-Zn-Sn)
- 3) ligas contendo prata-cobre (Ag-Cu)
- 4) ligas contendo prata-cobre-estanho (Ag-Cu-Sn)
- 5) ligas contendo cobre-estanho (Cu-Sn) (bronze)
- 6) ligas contendo cobre-zinco (Cu-Zn) (latões)
- 7) ligas contendo cobre-fósforo-prata (Cu-P-Ag)
- 8) cobre puro (Cu)
- 9) ligas contendo cobre-mangânes-estanho (Cu-Mn-Sn)

As ligas da família Ag-Cu-Zn-Cd são as que apresentam as menores Tliquidus, o que as torna muito interessante para a brasagem. Isto é ocasionado pela presença do cádmio e do zinco, que reduz significativamente a Tliquidus destas ligas comparativamente às ligas da família Ag-Cu. Estes elementos são, entretanto, voláteis e tendem a evaporar durante o aquecimento na brasagem.

A família dos metais de adição Ag-Cu-Zn-Cd é ainda hoje muito utilizada por requerer as menores temperaturas de brasagem. Apresentam excelente fluidez, sendo aplicáveis na brasagem de aço carbono, aço inoxidável, cobre e suas ligas e metais duros. A presença de elementos que tendem a evaporar durante a brasagem é uma desvantagem, que pode ser minimizada pelo aquecimento controlado, uso de fluxo e ventilação adequada do posto de trabalho.

Apesar da excelente qualidade das ligas Ag-Cu-Zn-Cd para brasagem, elas vêm sendo substituídas pelas ligas da família Ag-Cu-Zn-Sn, que requerem uma maior temperatura de brasagem. Isso tem ocorrido devido ao interesse em eliminar o uso de ligas contendo cádmio, que é considerado um elemento tóxico e muito prejudicial à saúde humana. As aplicações das ligas sem Cd são as mesmas daquelas contendo este elemento.

As ligas Ag-Cu são muito utilizadas, apesar de caras. Possuem a grande vantagem de não apresentar evaporação durante a brasagem, pois são isentas de Cd e Zn. A liga mais utilizada desta família até hoje é a liga eutética, contendo 72%Ag e 28%Cu, sendo aplicada na brasagem de aços carbono e inoxidável, cobre, etc. Sua grande desvantagem é o elevado custo, além da temperatura de brasagem situar-se próximo ou acima de 800 °C.

As ligas da família Ag-Cu-Sn em verdade se resumem a apenas uma liga contendo 60%Ag-30%Cu e 10%Sn, cuja Tliquidus situa-se próxima a 720 °C. Também não tende a apresentar evaporação de elementos durante a brasagem. Entretanto, sua molhabilidade e fluidez não é tão boa quanto as das ligas das famílias Ag-Cu, Ag-Cu-Zn e Ag-Cu-Zn-Cd.

As ligas Cu-P e Cu-P-Ag são utilizadas basicamente na brasagem de cobre e suas ligas, sendo consideradas autofluxantes para estas aplicações. No sistema Cu-P está previsto a presença de um eutético com cerca de 8,3%P a 714 °C. Este eutético é, entretanto, muito frágil, pois as fases que o compõem são uma solução sólida rica em cobre e um composto intermetálico do tipo Cu<sub>3</sub>P. A fragilidade pode ser reduzida diminuindo-se o teor de P, o que permite sua fabricação na forma de varetas. São extensivamente utilizados na indústria de refrigeração, na brasagem dos compressores e tubos de cobre.

Ligas contendo P não devem ser utilizadas na brasagem de aço carbono, pois o P tende a formar compostos intermetálicos com o Fe. Com estes compostos tendem a ficar alinhados na interface entre o aço e o metal de adição, há uma fragilização acentuada da junta brasada.

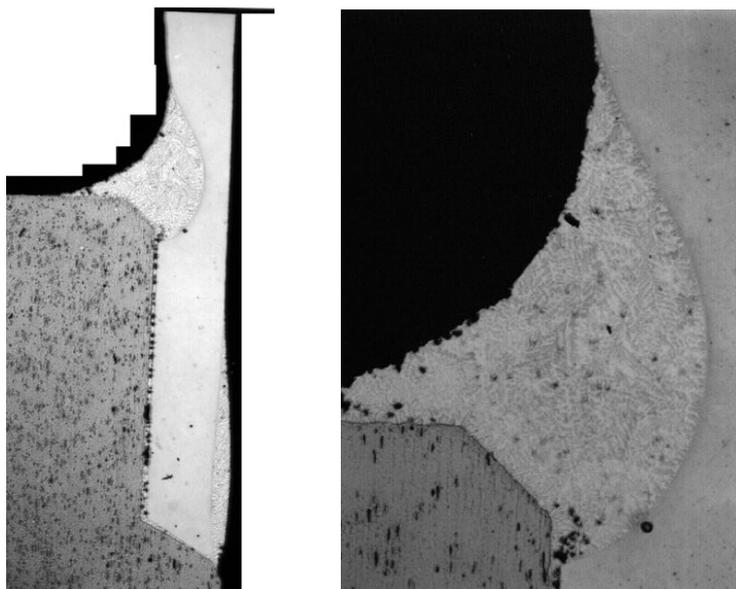
O cobre puro e as ligas Cu-Sn são utilizadas na brasagem de aço carbono, em temperaturas entre 1000 a 1150 °C, sendo extremamente baratas devido à ausência de prata em sua composição. São normalmente aplicadas na brasagem em forno, por não formarem vapores metálicos devido à ausência de Zn e Cd. Em relação ao sistema Cu-Sn, o teor de Sn deve ser controlado, pois acima de 12% Sn (em peso) passam a aparecer compostos intermetálicos que fragilizam o material.

As ligas da família Cu-Zn requerem temperaturas de brasagem normalmente acima de 900 °C. A presença do Zn impede a brasagem em fornos, devido à intensa formação de vapores metálicos. São, portanto, utilizados como varetas na brasagem oxiacetilênica de peças de aço. Mesmo neste caso, deve-se ter o cuidado de utilizar uma chama levemente oxidante, para evitar a formação de vapor.

### 9.1. Interação Metal de adição - Material base

A princípio, na brasagem é desejável que ocorra pouca ou nenhuma interação entre o metal de adição e o material de base. Muitas vezes isso não acontece, uma vez que a própria molhabilidade é um sinal de que alguma afinidade existe entre o metal de adição e o material de base. Considerando que a interação exista, deve-se evitar casos extremos, onde tal interação comprometa seriamente a qualidade da junta brasada.

Apresenta-se na Figura 10, uma amostra de uma junta brasada cobre-aço carbono, tendo-se utilizado a liga eutética da família Ag-Cu. O que se observa é uma acentuada erosão provocada pelo metal de adição no cobre. Esta erosão é tanto mais acentuada quanto maior a temperatura, sendo impossível eliminá-la. Na verdade, quase todas as ligas utilizadas na brasagem do cobre tendem a provocar erosão, devendo-se, portanto, evitar aquecimentos desnecessários. Quando se aquece o material acima da temperatura de fusão da liga eutética (780 °C), a fase líquida formada admite maior quantidade de Cu em solução. Como existe Cu no estado sólido disponível do tubo de Cu, este passa a se solubilizar na fase líquida que se encontra em contato, promovendo a chamada erosão.



**Figura 10** - Exemplo da erosão provocada pela interação metal de adição-material base.

Fonte: Okimoto, P.C.

## 10. Brasagem metal-cerâmica

Entre as aplicações da brasagem entre materiais metálicos e cerâmicos é muito conhecida a fabricação de componentes de eletrônica de potência (diodos e tiristores). Esta união diferencia-se da brasagem metal-metal, pois no caso da cerâmica alumina tem-se um óxido ( $Al_2O_3$ ), o que contrariaria o conceito da remoção da camada de óxidos superficiais.

Para brasar a cerâmica alumina com algum metal foram desenvolvidas várias técnicas, destacando-se 3: técnica da metalização; técnica do metal ativo e metalização mecânica.

Na técnica da metalização utilizam-se diversas etapas que envolvem a aplicação de pastas a base de Mo e placas de Ni, seguidas de sinterização sob atmosfera de  $H_2$ , de forma a obter uma camada metalizada sobre a cerâmica alumina. Na brasagem utiliza-se um metal de adição eutético Ag-Cu, e o outro metal de base era o Kovar, por possuir um coeficiente de dilatação próximo ao da alumina, a fim de evitar o aparecimento de tensões residuais durante o resfriamento.

Na década de 80, surgiu o processo conhecido como brasagem com metal ativo, onde se substituíam todas as etapas do processo de metalização pelo uso de um metal de adição ativo, contendo Ti. O Ti possibilitava a ocorrência de molhabilidade do metal de adição diretamente sobre a cerâmica, sem a necessidade do substrato metálico. O maior problema desta técnica passou a ser o custo do metal de adição contendo Ti, que ficou muito mais caro que a liga Ag-Cu convencional utilizada anteriormente.

Na década de 90 pesquisadores alemães desenvolveram uma nova técnica para a brasagem alumina-metal. Ao invés de utilizarem metal ativo, lançaram mão de uma metalização mecânica da cerâmica com Ti. Esta operação, muitas vezes mais barata que a metalização original, possibilitou a brasagem com metal de adição convencional, o que barateou o custo do processo.

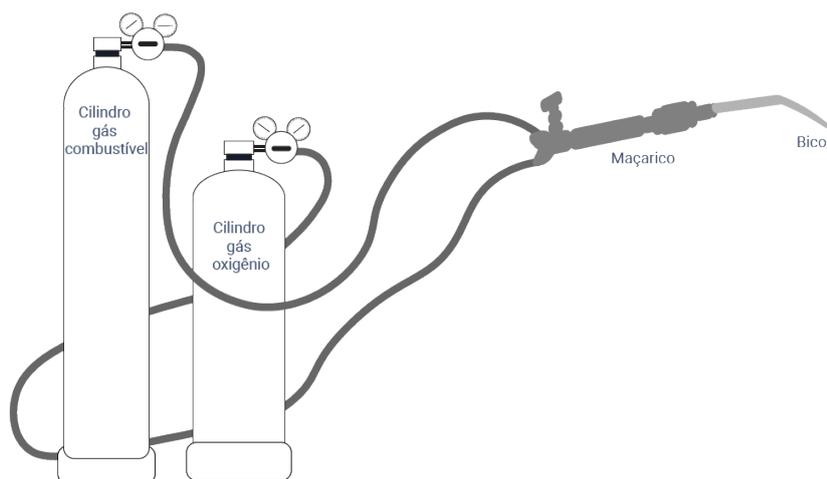
Outro aspecto que deve ser levado em conta na brasagem entre a cerâmica e os materiais metálicos é o coeficiente de dilatação térmica dos materiais envolvidos. Na brasagem, durante o aquecimento não há problema, pois os materiais ainda não estão unidos. Após a brasagem existe a união e no resfriamento os diferentes materiais passam a se contrair de forma diferenciada, gerando tensões que podem acarretar na ruptura da cerâmica. Para evitar este problema, muitas vezes tem sido utilizados metais com coeficiente de dilatação próximo ao da cerâmica a ser brasada. Por exemplo, para a união com cerâmica alumina ( $Al_2O_3$ ) pode-se utilizar as ligas contendo Fe, Ni e Co, que possuem características de dilatação térmica semelhante à da cerâmica.

## 11. Processos de brasagem

Uma das maneiras de diferenciar os tipos de processos de brasagem é em função do método de aquecimento utilizado, ou seja: brasagem por tocha (Torch Brasing – TB), brasagem no forno (Furnace Brasing FB), brasagem por indução (Induction Brasing – IB), brasagem por imersão (Dip Brasing – DB) e brasagem por infravermelho (Infrared Brasing – IR). Tem-se ainda a brasagem por resistência elétrica, muito utilizada para realizar a brasagem branda. O equipamento comumente utilizado é conhecido como ferro de solda. O curioso desta nomenclatura é que o equipamento não é de ferro e o produto resultante do processo não é a solda.

### 11.1 Brasagem com tocha

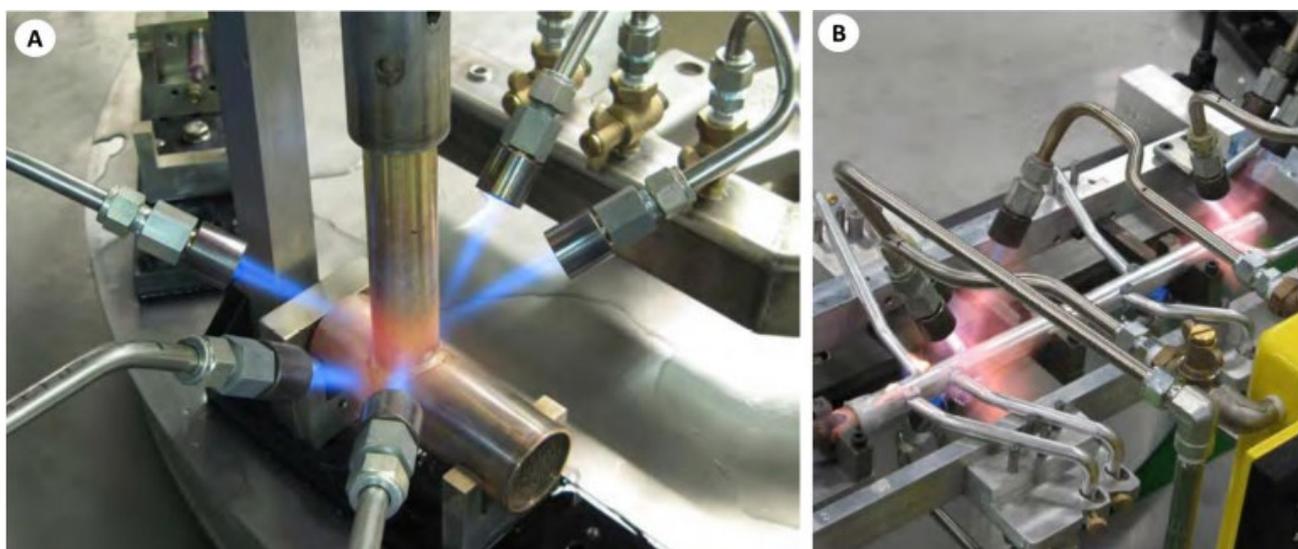
Na brasagem com tocha, o equipamento comumente utilizado é o da soldagem oxigás, Figura 11. Por esse motivo, muitas vezes esse processo é referenciado como brasagem por maçarico. O gás combustível mais utilizado é o acetileno, podendo utilizar o propano ou outros, enquanto o gás comburente mais utilizado é o oxigênio, podendo utilizar também ar comprimido. Este tem a vantagem de ser mais barato, mas fornece chama de menor temperatura; o oxigênio, apesar de ser mais caro, fornece maior temperatura para a chama.



**Figura 11** – Desenho esquemático do equipamento oxigás que pode ser utilizado tanto para a soldagem quanto para a brasagem.

Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

Projetos especiais de maçaricos podem ter múltiplos bicos, com a vantagem de aumentar a área aquecida e cuidados devem ser tomados para evitar um super-aquecimento localizado. Exemplifica-se na Figura 12(a) múltiplos maçaricos executando a brasagem por chama de tubos de cobre e na Figura 12(b) a brasagem de liga de alumínio para a indústria de trocadores de calor.



**Figura 12** – (a) Brasagem de tubo de cobre e (b) brasagem em tubos de liga de alumínio

Fonte: Tecnologia fabricante FUSION Inc.

## 11.2 Brasagem por forno

A brasagem por forno utiliza fornos a gás, a óleo ou elétricos. Esta técnica é bastante utilizada quando as peças brasadas podem ser pré-montadas na posição correta e o metal de adição pode ser colocado previamente na junta. A brasagem em forno é indicada para formas complexas que precisam de ser aquecidas uniformemente para prevenir distorções e no caso de ter muitas peças ou conjuntos pequenos

de peças que podem ou precisam ser unidos ao mesmo tempo (produção em série e em grande escala). Um exemplo típico da aplicação da brasagem em forno é na montagem de aletas em trocadores de calor.

A proteção na brasagem em forno é feita por fluxo, por atmosfera controlada ou a vácuo. Os fornos devem permitir um bom controle de temperatura e uma distribuição homogênea de calor em seu interior. Podem ainda ser contínuos ou intermitentes e terem atmosfera controlada ou operarem com vácuo.

### 11.3 Brasagem por indução

A brasagem por indução é um processo que utiliza o campo magnético gerado por um indutor ou bobina para a união dos materiais. O aquecimento dos materiais envolvidos no processo é obtido pela dissipação de calor provocadas por correntes elétricas induzidas por bobinas conectadas a uma fonte de calor de energia elétrica de corrente do tipo alternada.

Na brasagem por indução, o aquecimento é restrito a uma pequena área e o calor se propaga às áreas restantes da peça por condução ou pelo deslocamento da peça em relação à bobina. O metal de adição é previamente colocado na junta e a proteção quanto à oxidação do metal de adição é feita por fluxo ou atmosfera controlada.

A brasagem por indução se caracteriza por um aquecimento rápido e localizado. O princípio operacional da brasagem por indução pode ser observado na Figura 13. A peça e o metal de adição são posicionados junto a bobina; ocorre o aquecimento indutivo pela bobina e o resfriamento e solidificação do metal de adição. A principal vantagem da indução com atmosfera controlada é não precisar de fluxo para remoção dos óxidos superficiais antes do início do ciclo termodinâmico.

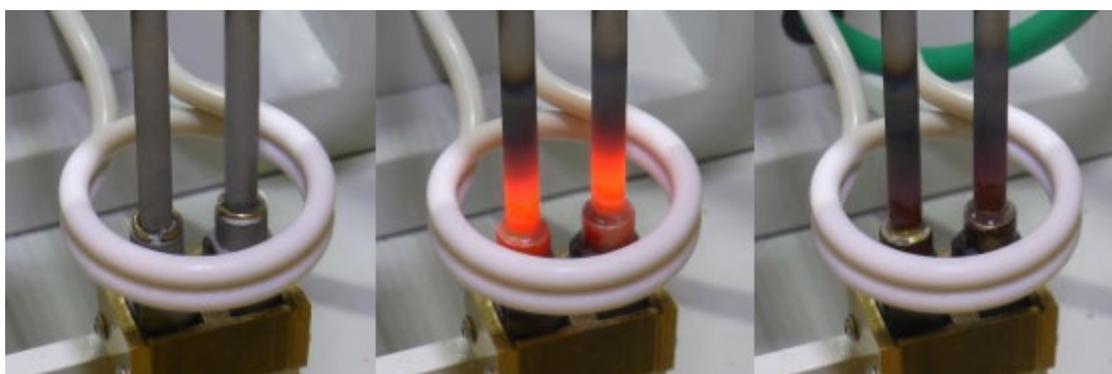


Figura 12 – Representação das etapas da brasagem por indução

Fonte: <https://www.jamo.ind.br/brasagem-3>.

### 11.4 - Brasagem por imersão

A brasagem por imersão pode ser feita em banho de metal fundido ou banho químico. Este requer um recipiente metálico ou cerâmico para o fluxo e um método de aquecimento para elevar a temperatura do fluxo à temperatura de brasagem. Este aquecimento pode ser externo, utilizando maçarico ou indução ou pode ser interno, utilizando resistência elétrica. Para manter o fluxo dentro da faixa de temperatura são necessários controles.

O banho de metal fundido é mais aplicado quando se necessita brasar conjunto de peças menores. Geralmente, utiliza-se um cadinho de grafite de dimensões adequadas, aquecido externamente para que o metal de adição fique no estado líquido, mesmo após as peças a serem brasadas sejam introduzidas no banho. Muitas vezes, uma cobertura de fluxo é mantida sobre este banho. Quando as peças são retiradas do banho, é importante deixar o metal de adição se solidificar completamente.

## 11.5 Brasagem por infravermelho

A brasagem por infravermelho pode ser considerada uma forma de brasagem no forno. Neste caso, o calor é gerado por radiação de alta intensidade provenientes de lâmpadas de quartzo capazes de produzir energia radiante de até 5.000 watts que utilizando refletores é possível concentrar o calor na região que se deseja brasar.

### Bibliografia

American Welding Society (AWS). Brazing Handbook, 5th ed.; American Welding Society: Miami, FL, USA, 2007.

Okimoto, P.C. Apostila de aula, disciplina TM254. Universidade Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Mecânica. Acessado em abril de 2024. [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM254/Prof\\_Okimoto/Aula3.pdf](chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM254/Prof_Okimoto/Aula3.pdf)

OKIMOTO, Paulo C. Brasagem sem fluxo entre aço carbono e cobre com metais de adição convencionais à base de Ag e com revestimento metálico de Sn. Tese Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1999.

Felizardo, I. Apostila de aula, Tecnologia da Soldagem. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, CEFET-MG, Departamento de Engenharia Mecânica. Prof. Ivanilza Felizardo. Acessado em abril de 2024. [ApostilaTecnologiaSoldagemIvanilzaFelizardo2024.pdf \(soldagemplay.com.br\)](#)

Felizardo, I. Vídeo aula sobre Brasagem. [C0015 YT ABR24 \(youtube.com\)](#)

Felizardo, I. Apostila – Termos Técnicos. Site Soldagem Play. Prof. Ivanilza Felizardo. Acessado em abril de 2024. [Termos-tecnicos.pdf \(soldagemplay.com.br\)](#)

Manual técnico-corporativo: Paste Brazing & Soldering Alloys - FUSION INCORPORATED, Bulletin A-101/ENG, 2020 Willoughby, Ohio USA. Disponível em [www.fusion-inc.com](http://www.fusion-inc.com)

Diniz, A.A.S.; Santos, S.C.; Felizardo, I. União de tubos e conexões óleo-hidráulicas pelos processos de brasagem por indução e brasagem por forno contínuo: estudo de caso comparativo. Diamantina-MG Publicado em 22/08/2023 - ISSN: 2764-0582 - DOI: 10.29327/1298891. Anais do Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia. Anais Online, 2023. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/cobicet2023/668867-UNIAO-DE-TUBOS-E-CONEXOES-OLEO-HIDRAULICAS-PELOS-PROCESSOS-DEBRASAGEM-POR-INDUCAO-E-BRASAGEM-POR-FORNO-CONTINUO>.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. Soldagem: Fundamentos e tecnologia. 3 ed. Belo Horizonte: UFMG, 2009.

Brazing Handbook. Höganäs AB, SE-263 83 Höganäs, Suécia, 2018. Disponível em: <https://www.hoganas.com/pt-br/powder-technologies/brazing/>