

BRASAGEM

1. INTRODUÇÃO

É comum encontrar a afirmativa de que a brasagem é um tipo de soldagem. Tal afirmativa, entretanto, é incorreta. A brasagem, assim como a soldagem, é um processo de união. Além desses, pode-se citar outros processos de união de metais, como a colagem, parafusagem, rebiteagem e união por dobra (conformação mecânica). A resistência da junta nos três últimos processos é a resistência ao cisalhamento do elemento de fixação (parafuso, rebite ou dobra), sendo, portanto, processos cuja união se dá por ligações macroscópicas. A soldagem, a brasagem e a colagem são processos em que a união resulta de forças microscópicas, com formação de ligação química entre as superfícies envolvidas.

Na colagem, utiliza-se um material adesivo (cola) quimicamente compatível com os substratos (partes a serem unidas). A união requer um tempo de cura da cola para que se consolide. Na brasagem, também é obrigatória a utilização de um material adicional — o metal de adição — para promover a união entre as partes. Ocorre, nesse caso, a fusão do material de adição (transformação de fase do estado sólido para o líquido, seguida de solidificação), sem 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 bastante antiga, com registros de sua utilização na confecção de joias datados entre 1.500 e 4.000 anos a.C. A brasagem é amplamente difundida devido à sua capacidade de unir materiais de naturezas distintas — como metais e cerâmicos — e de seções transversais reduzidas. A aplicação das técnicas de brasagem é frequente na fabricação de componentes de autopeças, sistemas de refrigeração, trocadores de calor e em setores como a indústria aeronáutica, aeroespacial e eletrônica.

2. CONCEITOS ESSENCIAIS PARA O ENTENDIMENTO DA BRASAGEM

As definições mais recorrentes para o processo de brasagem são aquelas estabelecidas pela AWS (*American Welding Society* – Sociedade Americana de Soldagem), nos Estados Unidos, e pela norma DIN (*Deutsches Institut für Normung*), da Alemanha.

Segundo a AWS (2007), brasagem é definida como: Processo de união de materiais por meio de aquecimento adequado, utilizando um metal de adição cuja temperatura de fusão é superior a 450 °C e inferior à temperatura solidus dos materiais de base. O metal de adição preenche a folga entre os materiais de base por efeito capilar.

A norma DIN 8505 (1979) define brasagem como: Processo térmico para preenchimento de juntas e revestimento de materiais, em que ocorre a formação de 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 essenciais para uma compreensão mais precisa do que é a brasagem:

- **Material de base:** são os materiais que se pretende unir. É possível soldar metais e polímeros e brasar metais e materiais cerâmicos.
- **Material de adição:** material utilizado para preencher a junta, seja soldada ou brasada. Quando metálico, denomina-se metal de adição. Na brasagem, utiliza-se metal puro ou ligas metálicas, como, por exemplo, cobre puro ou ligas contendo prata, cobre e zinco.
- **Temperatura de fusão (ponto de fusão):** corresponde à temperatura na qual um material passa do estado sólido para o líquido (transformação de fase).
- **Temperatura solidus, $T_{solidus}$:** é a temperatura abaixo da qual o material permanece completamente sólido. Trata-se da temperatura a partir da qual se inicia a fusão do material (início da transformação sólido-líquido).
- **Temperatura liquidus, $T_{liquidus}$:** é a temperatura acima da qual o material encontra-se totalmente no estado líquido, marcando o fim do processo de fusão.
- **Temperatura de brasagem (ou de trabalho):** é a temperatura à qual os materiais de base ficam submetidos durante a realização do processo de brasagem.

O ponto de fusão (temperatura de fusão) dos metais de adição utilizados na brasagem é inferior à $T_{solidus}$ do material de base e superior a 450 °C. Dessa forma, os materiais de base não sofrem fusão, pois o calor aplicado não é suficiente para fundi-los. Apenas o metal de adição funde e, ao solidificar-se, promove a união entre as partes.

De modo geral, os materiais podem ser classificados em metálicos e não metálicos. Os não metálicos subdividem-se em naturais e sintéticos. E estes últimos, em materiais cerâmicos e os polímeros. De forma abrangente, os materiais podem ser agrupados em metais, cerâmicos e polímeros.

No caso dos polímeros, há uma particularidade importante quando se utiliza calor para promover a união: o material de adição precisa ser quimicamente e termicamente similar ao material de base, o que implica em temperaturas de fusão muito próximas. Como consequência, torna-se inviável fundir o material de adição sem fundir simultaneamente o material de base. Assim, a união térmica de polímeros ocorre por soldagem, com fusão de ambos os materiais envolvidos.

É possível brasar materiais metálicos e materiais cerâmicos, empregando-se metais como material de adição em ambas as situações. Os metais de adição mais utilizados na brasagem incluem alumínio, cobre, prata, bronze, ouro e suas respectivas ligas.

É importante destacar que o termo soldagem, em inglês, corresponde a *welding*. De acordo com a literatura técnica internacional, os termos em inglês *brazing* e *soldering* são utilizados para diferenciar processos de união com base na temperatura de fusão do metal de adição.

- *Brazing*: utilizado quando o metal de adição funde a uma temperatura superior a 450 °C e inferior à temperatura $T_{solidus}$ dos materiais de base.
- *Soldering*: usado quando o metal de adição funde abaixo de 450 °C, também sem fusão dos materiais de base.

Curiosamente, o termo *soldering* se assemelha graficamente e foneticamente à palavra “soldagem” — muito mais do que *welding* — o que pode levar a interpretações equivocadas. Talvez isso explique a recorrente, porém incorreta, associação entre brasagem e soldagem, como a ideia de que *brazing* ou *soldering* seriam tipos de soldagem. Esse entendimento está errado.

A distinção entre esses processos reside nos fundamentos físicos da união:

- *Welding* (soldagem): ocorre a fusão dos materiais de base, com ou sem a presença de material de adição. Forma-se uma zona fundida e obrigatoriamente ocorre mistura e diluição dos materiais envolvidos.
- *Brazing* (brasagem): apenas o metal de adição funde; os materiais de base não atingem a T_{solidus} . A união ocorre por molhabilidade, capilaridade e tensão superficial, sem fusão dos materiais de base.
- *Soldering*: apresenta o mesmo princípio físico da brasagem, porém o metal de adição funde a uma temperatura inferior a $450\text{ }^{\circ}\text{C}$. É amplamente utilizado em componentes eletrônicos e conexões sensíveis ao calor.

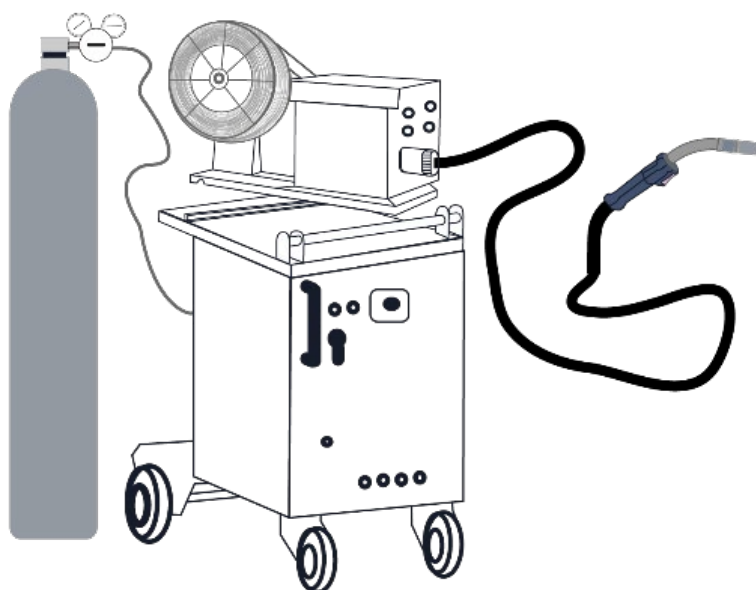
A expressão “solda branda”, frequentemente utilizada como tradução de *soldering*, é conceitualmente inadequada. Isso porque transmite a ideia de uma forma de soldagem, quando na verdade o *soldering* compartilha os mesmos princípios físicos da brasagem. O termo mais apropriado seria “brasagem branda”, pois preserva a lógica classificatória dos processos de união baseada no estado físico dos materiais durante a operação.

Resumindo, processos de união de peças com fornecimento de calor e uso de material de adição:

- Se há fusão dos materiais de base, trata-se de soldagem (*welding*);
- Se apenas o metal de adição funde, com temperatura superior a $450\text{ }^{\circ}\text{C}$, trata-se de brasagem (*brazing*);
- Se apenas o material de adição funde, com temperatura inferior a $450\text{ }^{\circ}\text{C}$, trata-se de *soldering* – “brasagem branda” – termo em português mais conceitualmente adequado.

Existe também o processo denominado soldabrasagem, conhecido na literatura internacional como *brazing welding* ou, em sua variante mais comum, *MIG brazing*. Trata-se de uma técnica de união térmica que utiliza o equipamento de soldagem GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), Figura 1, aplicando como metal de adição uma liga típica de brasagem, geralmente à base de cobre-silício.

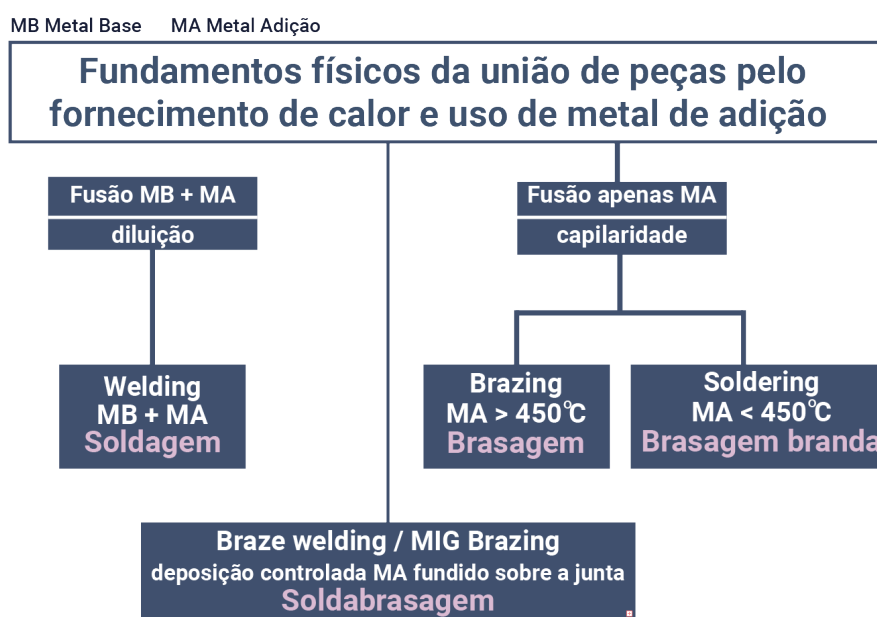
Figura 1 – Equipamento GMAW – arame de brasagem – processo soldabrasagem. Fonte: Autoria própria.



A fonte de calor do processo é o arco elétrico. No entanto, diferentemente da soldagem convencional, na soldabrasagem não há necessariamente fusão dos materiais de base. A fusão pode ocorrer parcialmente e de forma localizada, dependendo do aporte térmico aplicado. Essa característica é justamente o que confere ao processo seu caráter híbrido: situa-se entre a brasagem (sem fusão do metal de base) e a soldagem (com fusão plena do metal de adição e de uma parte do metal de base).

Uma distinção fundamental entre a soldabrasagem e a brasagem tradicional é a ausência do mecanismo de capilaridade. Na soldabrasagem, o metal de adição fundido não se espalha por ação capilar, mas pela deposição direta do metal de adição fundido sobre a junta de forma controlada, promovendo a aderência do metal fundido à superfície aquecida do material de base. O processo é especialmente indicado para a união de chapas metálicas com revestimentos sensíveis (como o galvanizado), onde se deseja limitar a fusão dos materiais de base e, assim, minimizar alterações metalúrgicas e deformações térmicas. Seu uso é frequente na indústria automotiva, em aplicações estruturais e de carroceria. A Figura 2 sumaria a diferença entre *welding*, *brazing*, *soldering* e *braze welding*.

Figura 2 – Diferenças entre processos térmicos de união de metais. Fonte: Autoria própria.



Outros conceitos fundamentais para o entendimento sobre brasagem.

Difusão atômica: Difusão é o ato ou efeito de difundir, espalhar ou movimentar. Trata-se de um mecanismo pelo qual a matéria é transportada através da matéria. Toda matéria é composta por átomos e, para que ocorra movimentação, é necessário que haja deslocamento atômico. No estado sólido, essa movimentação depende do fornecimento de calor, o qual promove a expansão do material e favorece a agitação térmica dos átomos, permitindo que a difusão ocorra por meio de vibrações de origem térmica.

Tensão superficial: é um efeito físico que ocorre na interface entre duas fases químicas. É esse fenômeno que faz com que a superfície de um líquido se comporte como uma membrana elástica. Graças à tensão superficial, por exemplo, certos insetos conseguem pousar sobre líquidos como se estivessem sobre uma “cama elástica”, Figura 3(a), e gotas d’água se mantêm coesas sobre superfícies sólidas, Figura 3(b). A tensão superficial também é um dos principais fatores

responsáveis pelo fenômeno da capilaridade, que desempenha papel fundamental em processos como a brasagem.

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



(a) Inseto e água (fonte: pexels-alexandre-cruz-4019920)



(b) Gota d'água e folha (Fonte: pexels-tanguy-sauvin-10460)

Capilaridade: É uma propriedade fluidodinâmica. O termo *fluido* refere-se ao estado físico do líquido, enquanto *dinâmica* está relacionada ao movimento. Trata-se, portanto, da capacidade de um líquido se movimentar espontaneamente através de canais estreitos, fendas ou materiais porosos – mesmo contra a ação da gravidade.

Esse fenômeno ocorre devido à atuação conjunta de duas forças:

- Força de adesão: atração entre as moléculas do líquido e as paredes do tubo ou material poroso.
- Força de coesão: atração entre as próprias moléculas do líquido.

Um exemplo prático de capilaridade: ao encostar a ponta de um guardanapo de papel na água, o líquido sobe e molha o papel, mesmo o papel estando na vertical. Isso ocorre pela capilaridade: a água é puxada para cima pelas forças de adesão entre o líquido e as fibras do papel.

Outro exemplo pode ser observado na Figura 4. Dois tubos capilares foram inseridos em recipientes com líquidos distintos:

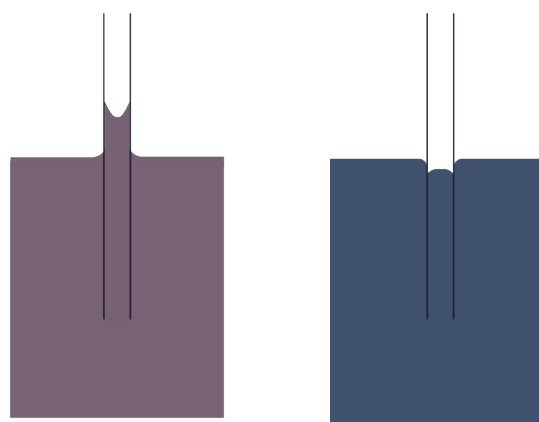
- No líquido A, observa-se a subida do fluido no tubo, caracterizando predominância da força de adesão.
- No líquido B, nota-se a depressão do nível, indicando que a força de coesão é superior à de adesão.

A capilaridade é um princípio fundamental no processo de brasagem, pois a capilaridade promove a movimentação do metal de adição fundido pelas fendas entre os materiais de base, garantindo preenchimento uniforme da junta.

A força de adesão refere-se à afinidade entre o líquido e a superfície sólida (parede do tubo), o quanto o líquido é capaz de aderir à superfície, molhá-la, Figura 4(b). A força de coesão está relacionada à capacidade do líquido de manter suas moléculas unidas. Existem líquidos com alta coesão, capazes de formar uma película resistente em sua superfície. Essa película é resultado da **tensão superficial**, como ilustrado na Figura 3(b), da gota sobre a folha.

A relação entre coesão, adesão e tensão superficial explica o fenômeno da capilaridade.

Figura 4 – Exemplo da ação da capilaridade. Fonte: Autoria própria.

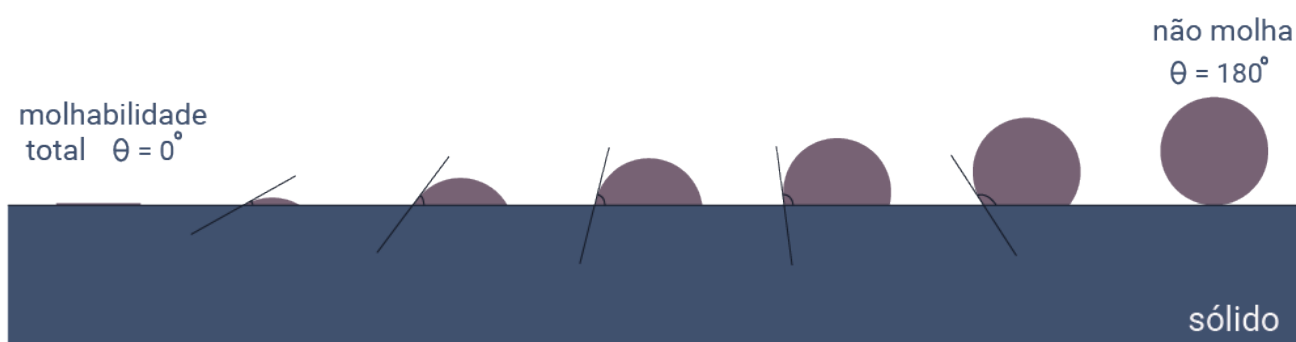


(a) Força de adesão (b) Força de coesão

Quando a força de coesão predomina, as moléculas do líquido tendem a se manter unidas, formando uma película elástica – como nas gotas ou na tensão superficial visível em certos líquidos. Quando a força de adesão prevalece, o líquido adere mais facilmente à superfície sólida, molhando-a com maior intensidade. Esse comportamento está diretamente relacionado à **molhabilidade**, que é a capacidade de um líquido se espalhar sobre um substrato sólido.

Na brasagem, a molhabilidade é frequentemente expressa por meio do ângulo de contato entre o metal de adição fundido e a superfície do metal de base. Quanto menor o ângulo de contato, Figura 5, maior a área molhada e, portanto, melhor a molhabilidade – condição essencial para a eficácia do processo. 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.

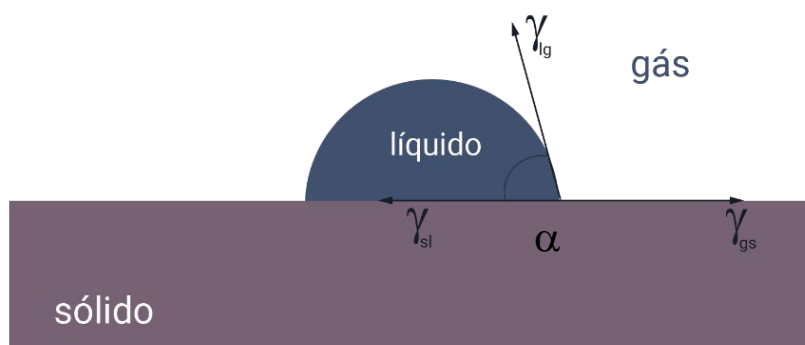
Figura 5 – Molhabilidade de um líquido sobre um substrato sólido. Fonte: Autoria própria.



A molhabilidade depende diretamente das tensões superficiais atuantes no sistema, conforme ilustrado na Figura 6.

A tensão da interface sólido-líquido (g_{sl}) está relacionada à afinidade entre o material sólido e o metal líquido. A tensão da interface líquido-gás (g_{lg}) depende da composição química do metal de adição no estado líquido e da atmosfera gasosa presente durante o processo de brasagem.

Figura 6 – Tensões superficiais atuantes no sistema. Fonte: Autoria própria.



A tensão da interface gás-sólido (γ_{gs}) atua puxando a gota para fora, contribuindo para a redução do ângulo de contato (α) e favorecendo a molhabilidade. Por outro lado, as tensões sólido-líquido (γ_{sl}) e líquido-gás (γ_{lg}) tendem a puxar a gota para dentro, o que aumenta o ângulo de contato e reduz a molhabilidade.

A tensão gás-sólido (γ_{gs}) é particularmente sensível à presença de óxidos e impurezas superficiais, os quais reduzem significativamente a energia interfacial. Por esse motivo, a limpeza da superfície do material de base é essencial, e é exatamente essa a função dos **fluxos de brasagem**: remover contaminantes e óxidos, promovendo a molhabilidade adequada para que o metal de adição fundido se espalhe de maneira eficiente sobre a junta.

A molhabilidade de um metal de adição sobre um material de base pode ser quantificada de duas maneiras simples:

1. Medida do ângulo de contato (α): consiste em medir o ângulo formado entre o substrato sólido e a tangente à superfície do líquido no ponto de contato. Quanto menor o ângulo de contato, maior a molhabilidade. Essa medição pode ser realizada à temperatura ambiente, por meio de técnicas de metalografia.
2. Avaliação da área de espalhamento: funde-se uma mesma quantidade de metal de adição sobre diferentes materiais de base, mantendo-se as condições padronizadas. Mede-se então a área ocupada pelo metal fundido após sua solidificação. Quanto maior a área de espalhamento, maior a molhabilidade.

As principais técnicas que podem ser empregadas para medir o ângulo de contato (α) são:

1. Microscopia óptica com corte transversal (seção polida): após a solidificação da gota de metal de adição sobre o substrato, a amostra é embutida, seccionada transversalmente, lixada e polida. A interface entre o metal de adição e o material de base é então observada ao microscópio. Com o auxílio de um software de medição de imagem, pode-se traçar a tangente à curva da gota e medir o ângulo de contato formado com o substrato. Essa técnica é aplicada em estudos comparativos entre ligas e substratos.
2. Análise por microscopia de campo claro com fotografia lateral da gota (drop shape analysis): a gota de metal de adição é solidificada sobre o substrato, e a amostra é fotografada de perfil antes de ser cortada. Pode-se usar câmera digital acoplada ao microscópio ou sistema de macrofotografia. Softwares como ImageJ, ToupView ou DropSnake permitem traçar o contorno da gota e calcular o ângulo de contato com alta precisão. Trata-se de um método não destrutivo, aplicado em estudos de molhabilidade comparativa e testes com diferentes

atmosferas de brasagem.

3. Goniometria óptica (técnica não metalográfica, mas complementar): embora não seja uma técnica tradicionalmente metalográfica, é amplamente usada para medir ângulo de contato em materiais metálicos ou revestidos. Um goniômetro óptico permite registrar o perfil da gota em tempo real (estado líquido ou solidificado) e calcular automaticamente o ângulo. Aplicado na análise de molhabilidade em controle de qualidade de ligas de brasagem

A **brasagem** é um processo de união de materiais (metais e cerâmicos) no qual a coalescência (união intensa) é obtida por aquecimento a uma temperatura suficiente para fundir o material de adição, que é metálico e possui temperatura de fusão superior a 450 °C e inferior à T_{solidus} do material de base (que pode ser metálico ou cerâmico). Na brasagem, apenas o metal de adição funde, e a união só é possível quando há boa molhabilidade do metal líquido sobre a superfície sólida do material de base. A molhabilidade depende das tensões superficiais atuantes no sistema, as quais são fortemente influenciadas pela presença de impurezas e óxidos superficiais.

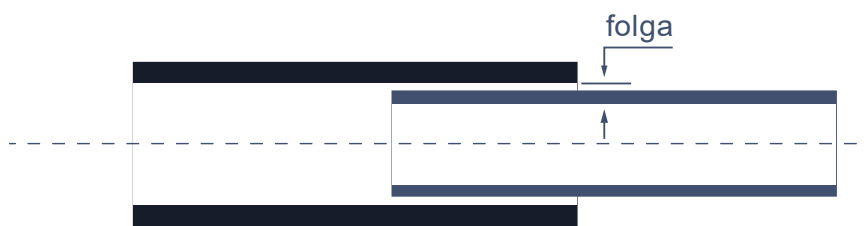
A aderência na brasagem é obtida pela combinação entre a ação capilar (movimentação do metal líquido entre as superfícies por diferença de energia interfacial) e a difusão atômica (movimentação dos átomos no sólido). Com o aquecimento, o material de base se expande e o metal de adição funde. A capilaridade promove o espalhamento do metal fundido, que molha a superfície sólida. O aquecimento induz vibrações atômicas no material sólido, favorecendo a difusão atômica e contribuindo para a formação da junta. A molhabilidade do metal de adição fundido está diretamente relacionada às condições superficiais do material de base: quanto mais limpa a superfície, melhor a molhabilidade e, conseqüentemente, mais eficiente será a brasagem.

Portanto, para que a brasagem seja realizada com qualidade, é imprescindível que o material de base esteja quimicamente limpo, com a superfície completamente isenta de óxidos, graxas e contaminantes. Essa condição é assegurada por meio de **decapagem** química ou mecânica, realizada antes do processo. Mesmo após a limpeza, o simples contato da superfície com o ar, especialmente durante o aquecimento, pode favorecer a formação de novos óxidos ou a recontaminação da superfície. Por isso, é fundamental a atuação de **agentes fluxantes** no processo. Quando esses agentes são sólidos, líquidos ou pastosos, recebem o nome de fluxo, e a brasagem é denominada **brasagem com fluxo**. Quando os agentes fluxantes são gasosos, a brasagem é caracterizada como **brasagem sem fluxo**, ou, mais tecnicamente, brasagem com atmosfera controlada.

3. ASPECTOS OPERACIONAIS DA BRASAGEM

Na brasagem, apenas o metal de adição funde, e propriedades como molhabilidade, tensão superficial, capilaridade, difusão atômica influenciam diretamente no desempenho do processo e, conseqüentemente, na qualidade final do produto brasado. É fundamental que as peças a serem unidas estejam livres de impurezas e óxidos superficiais, garantindo a eficiência da molhabilidade e da aderência do metal fundido à superfície do material de base.

Outro aspecto crítico a ser considerado durante a brasagem é o espaçamento (**folga**) entre os materiais de base, Figura 7. Essa folga exerce grande influência no preenchimento da junta e, por conseqüência, na resistência e integridade da união formada.

Figura 7 – Folga em juntas brasadas. Fonte: Autoria própria.

Folgas excessivamente grandes resultam em baixa ação capilar, o que pode levar a falhas no preenchimento da junta. Esse fato poderia induzir à ideia de que, quanto menor a folga, melhor o resultado da brasagem. No entanto, isso não é verdade. Folgas muito pequenas também podem comprometer a qualidade da junta, mesmo havendo alta ação capilar. Nesses casos, o preenchimento pode ser incompleto, devido à restrição de fluxo do metal de adição fundido.

O valor ideal da folga depende de vários fatores, como:

- Se a brasagem será realizada com ou sem fluxo;
- A composição química do metal de adição;
- O tipo e a composição dos materiais de base.

Quando se trata de materiais dissimilares, com diferentes coeficientes de dilatação térmica, é necessário considerar a variação dimensional durante o aquecimento, o que também influencia o espaçamento efetivo durante a brasagem. Assim, a folga não deve ser nem excessivamente pequena, nem excessivamente grande. Deve estar dentro de uma faixa adequada, que permita tanto a atuação eficiente do fluxo quanto o efeito capilar necessário ao preenchimento da junta. Na maioria dos casos, as folgas recomendadas variam de 0,05 a 0,2 mm, dependendo do metal de adição, do tipo de fluxo e da geometria da junta brasada.

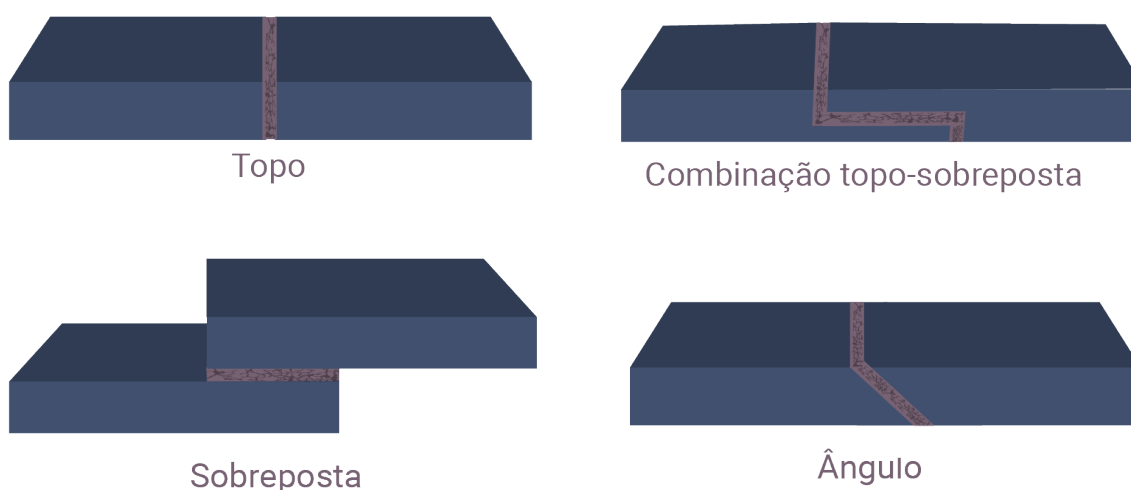
Na Tabela 1 estão indicadas as folgas recomendadas para alguns tipos de metais de adição, demonstrando que esses valores variam conforme o tipo de fluxo utilizado e a configuração da junta brasada. A variação da folga em função do agente fluxante está relacionada ao fato de que as atmosferas de brasagem (brasagem sem fluxo) requerem, em geral, espaçamentos menores do que os processos com fluxos sólidos ou pastosos. Isso se deve à natureza dos gases, que têm maior facilidade de penetração em folgas reduzidas, garantindo a proteção adequada da superfície durante o aquecimento.

Tabela 1 – Folgas recomendadas na temperatura de brasagem (Fonte: Okimoto, P.C.)

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

O **tipo de junta** é outro fator importante a ser considerado no desempenho da brasagem (Figura 8). A junta de topo é a mais simples em termos de geometria, porém é a menos recomendada para brasagem, pois apresenta menor área de contato, o que limita a ação capilar e reduz a resistência mecânica da união. Além disso, exige controle rigoroso da preparação das superfícies e alinhamento preciso, sendo mais propensa a falhas estruturais.

Figura 8 – Juntas brasadas. Fonte: Autoria própria.



A junta sobreposta, por sua vez, é a mais utilizada no processo de brasagem. Ela oferece maior área de contato entre os materiais de base, o que favorece a ação capilar, melhora a penetração do metal de adição e resulta em juntas mais resistentes, principalmente a esforços de cisalhamento. Também apresenta boa estabilidade dimensional durante o aquecimento e é de execução mais simples.

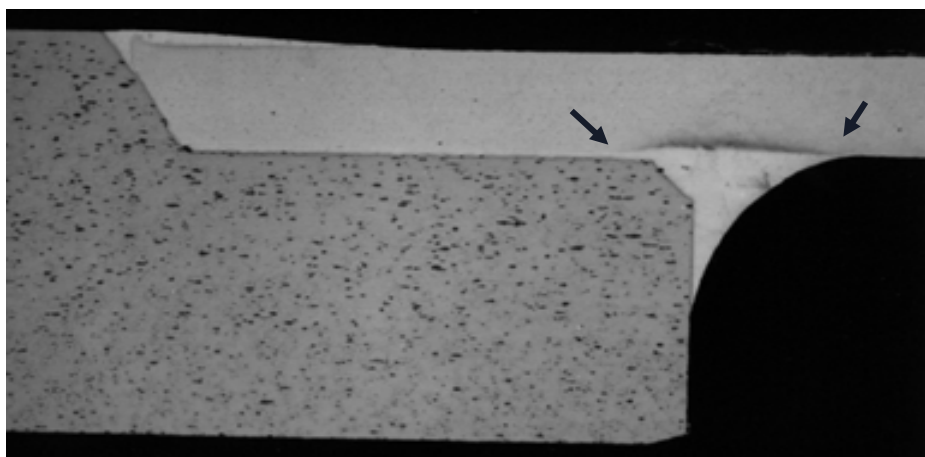
Existe ainda a junta topo-sobreposta, que combina características das duas anteriores, reunindo as vantagens estruturais de ambas, sendo utilizada quando se deseja melhorar a resistência mecânica mantendo uma geometria simplificada.

Outro tipo comum é a junta em ângulo, geralmente empregada em geometrias específicas, como conexões de tubos, e que permite bom aproveitamento da ação capilar quando corretamente posicionada em relação à gravidade.

A Figura 9 apresenta uma junta brasada entre cobre e aço carbono, utilizando uma liga de prata como metal de adição. Nota-se que o metal de adição demonstra boa molhabilidade sobre ambos os materiais de base, evidenciada pelo baixo ângulo de contato entre o metal fundido e as superfícies sólidas.

Antes da brasagem, é essencial realizar a **limpeza da superfície dos materiais de base**, que devem estar isentos de óleos, graxas e contaminantes orgânicos. Essas substâncias, quando submetidas ao aquecimento, produzem resíduos que se impregnados na superfície, impedem que o metal de adição molhe adequadamente os materiais de base, comprometendo a formação da junta. Normalmente, essa etapa é realizada por meio de desengraxe químico, utilizando solventes industriais adequados.

Figura 9 - Junta brasada cobre-aço carbono. Fonte: Okimoto, P.C.



A superfície de um material metálico é composta por diversas camadas além do próprio metal. É possível identificar camadas de óxidos, de gases e umidades adsorvidas e camada de moléculas polarizadas. Com exceção da camada de óxidos, as demais costumam ser removidas naturalmente durante o aquecimento do metal, não representando barreira crítica para a brasagem. No entanto, a camada de óxido dificulta a molhabilidade e precisa ser eliminada por meio da ação química de um **agente fluxante**.

Além da remoção de óxidos pré-existentes, o agente fluxante também atua para prevenir a formação de novos óxidos durante o aquecimento. Isso porque qualquer metal aquecido ao ar tende a se oxidar devido à presença de oxigênio atmosférico, e essa nova oxidação pode comprometer a qualidade da junta brasada. Por fim, o agente fluxante também desempenha um papel importante na proteção do próprio metal de adição, evitando sua oxidação antes da fusão. Esse cuidado é essencial para garantir que o metal fundido apresente boa molhabilidade e se espalhe corretamente sobre o material de base.

Os agentes fluxantes podem ser sólidos, líquidos ou gasosos. Quando são sólidos ou líquidos, recebem o nome genérico de fluxos. E quando são gasosos, geralmente se referem às chamadas atmosferas de brasagem.

Os **fluxos** são substâncias de origem mineral, compostas por fluoretos, bórax, boretos e fluoboretos. Para serem eficazes no processo de brasagem, os fluxos não devem reagir com o material de base: serem quimicamente inertes. Sua principal função é desoxidar a superfície do material de base, e isso deve ocorrer antes da fusão do metal de adição. O fluxo precisa se espalhar com facilidade sobre o material de base e permitir que o metal de adição fundido também espalhe, não comprometendo a molhabilidade. Outro requisito importante é que o fluxo seja facilmente removido após a brasagem, evitando resíduos que possam comprometer a integridade da junta ou provocar corrosão. Tanto a brasagem com fluxo quanto a brasagem sem fluxo (com atmosfera controlada) apresentam vantagens e desvantagens, a serem consideradas conforme o tipo de aplicação, os materiais envolvidos e as condições de processo.

Existem diversos tipos de fluxos utilizados na brasagem, cuja escolha depende diretamente dos materiais de base e dos metais de adição empregados. Isso se deve ao fato de que diferentes materiais apresentam diferentes tipos de óxidos superficiais, com características químicas e térmicas distintas. Por exemplo, no aço carbono, forma-se predominantemente óxido de ferro e no aço inoxidável, o principal contaminante superficial é o óxido de cromo.

Esses óxidos variam entre si quanto à estabilidade química: alguns são mais difíceis de serem removidos do que outros. Como consequência, o fluxo adequado dependerá da natureza do óxido a ser removido. Um fluxo eficiente para óxidos de cobre, por exemplo, não será eficaz para remoção de óxidos de alumínio, que são mais estáveis e exigem agentes químicos mais agressivos.

Outro fator importante na seleção do fluxo é a sua faixa de temperatura de atuação, que é a faixa na qual o fluxo permanece quimicamente ativo e capaz de cumprir sua função durante o ciclo térmico da brasagem. Essa faixa também serve como critério de compatibilidade com o metal de adição, que deve fundir dentro da mesma janela térmica de atuação do fluxo. Portanto, o fluxo adequado deve ser selecionado com base no tipo de material de base, no metal de adição utilizado e na temperatura operacional do processo.

Na Tabela 2, são apresentados alguns tipos de fluxo segundo a classificação da AWS. Para cada tipo, estão indicados o material de base a ser brasado, os metais de adição aplicáveis, e a respectiva faixa de temperatura de atuação.

Tabela 2 – Diferentes tipos de fluxos e suas aplicações. Fonte: Okimoto, P.C.

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

Em substituição aos fluxos sólidos ou líquidos (brasagem com fluxo), é possível empregar atmosferas de brasagem, que promovem a proteção da junta por meio de gases com propriedades redutoras (brasagem sem fluxo).

As **atmosferas de brasagem** são, em geral, compostas por gases como o hidrogênio (H₂) ou o monóxido de carbono (CO), que atuam de forma a reduzir os óxidos superficiais presentes nas peças. Por exemplo, um óxido de ferro pode ser reduzido conforme a seguinte reação química:



As atmosferas de brasagem são amplamente utilizadas em fornos contínuos ou de bateladas, sendo compostas por gases redutores que atuam na proteção e na limpeza das superfícies metálicas durante o processo. Esses gases podem ser provenientes da queima controlada de compostos orgânicos ou de misturas específicas de gases industriais. O hidrogênio (H₂), por

exemplo, pode ser injetado diretamente no interior do forno, seja na forma pura ou misturado com nitrogênio (N₂), formando uma atmosfera protetora. Nesses casos, os gases são fornecidos por fabricantes especializados e devem ser adequadamente misturados e regulados antes da injeção nos fornos, garantindo as condições ideais para a brasagem sem fluxo.

É possível utilizar, ainda, **metais de adição autofluxantes** 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 presentes na própria composição do metal de adição. O exemplo mais conhecido e amplamente utilizado é o das ligas da família Cu-P-Ag, que contêm entre 5 e 8% de fósforo, empregadas na brasagem de cobre e suas ligas. Durante o aquecimento, o fósforo presente na liga se oxida e forma pentóxido de fósforo (P₂O₅), que reage com o óxido de cobre (Cu₂O) presente na superfície do material de base, conforme a equação:



Forma-se, então, o metafosfato de cobre (CuPO₂), que recobre o metal de adição e o protege contra a oxidação, possibilitando a brasagem sem o uso de fluxo adicional. Contudo, esse tipo de metal de adição autofluxante contendo fósforo não atua da mesma forma com outros materiais de base, o que limita seu uso ao cobre e às suas ligas.

O resíduo do fluxo após a brasagem deve ser removido sempre que possível, a fim de evitar problemas de corrosão na peça brasada. A remoção desses resíduos é geralmente realizada por meio de banhos em água quente, preferencialmente logo após o término do processo, enquanto a peça ainda se encontra relativamente quente. Após o banho, uma secagem adequada é normalmente necessária para garantir a estabilidade da superfície tratada.

Existem diversos procedimentos de limpeza, que variam de acordo com o tipo de fluxo utilizado. Não se deve assumir que o banho em água quente, isoladamente, seja suficiente em todos os casos, especialmente quando se utilizam fluxos mais agressivos ou de difícil solubilidade. A tendência à corrosão é particularmente elevada em fluxos higroscópicos, ou seja, aqueles que absorvem umidade do ambiente, favorecendo reações corrosivas ao longo do tempo.

Por esse motivo, é fundamental selecionar adequadamente o tipo de fluxo a ser utilizado, considerando não apenas sua eficácia durante a brasagem, mas também a viabilidade da remoção pós-processo e os requisitos de durabilidade da junta.

4. METAIS DE ADIÇÃO

A seleção adequada do metal de adição a ser utilizado na brasagem é, muitas vezes, o fator determinante para o sucesso do processo. De modo geral, os metais de adição devem apresentar características específicas para garantir a eficiência e a qualidade da união brasada. Entre essas características, destacam-se:

- Boa molhabilidade sobre os materiais de base;
- Temperatura de fusão (ou intervalo de fusão) adequada em relação aos materiais de base;
- Boa fluidez, permitindo que o metal fundido penetre corretamente nas juntas por efeito capilar;
- Propriedades compatíveis com a aplicação do componente brasado (por exemplo: resistência mecânica, condutividade elétrica);

- Baixa reatividade com o material de base, evitando erosão ou formação de fases frágeis;
- Baixa tendência à liquação (fusão parcial desequilibrada que pode prejudicar a homogeneidade da junta).

Os metais de adição costumam ser classificados com base nos elementos químicos que os compõem, formando famílias de ligas com comportamentos e aplicações semelhantes.

As principais famílias de metais de adição utilizadas na brasagem de aços e ligas de cobre incluem:

1. Ag-Cu-Zn-Cd – Ligas contendo prata, cobre, zinco e cádmio
2. Ag-Cu-Zn-Sn – Ligas contendo prata, cobre, zinco e estanho
3. Ag-Cu – Ligas de prata e cobre
4. Ag-Cu-Sn – Ligas contendo prata, cobre e estanho
5. Cu-Sn – Ligas de cobre e estanho (bronze)
6. Cu-Zn – Ligas de cobre e zinco (latões)
7. Cu-P-Ag – Ligas contendo cobre, fósforo e prata
8. Cu puro – Cobre metálico puro
9. Cu-Mn-Sn – Ligas contendo cobre, manganês e estanho

As ligas da família Ag-Cu-Zn-Cd são aquelas que apresentam as menores temperaturas liquidus, o que as torna muito interessantes para a brasagem. Essa característica deve-se à presença de cádmio e zinco, que reduzem significativamente a Tliquidus dessas ligas em comparação às ligas da família Ag-Cu. Entretanto, esses elementos são voláteis e tendem a evaporar durante o aquecimento, o que constitui uma limitação importante.

Apesar disso, a família Ag-Cu-Zn-Cd ainda é amplamente utilizada, principalmente por permitir brasagens em temperaturas mais baixas. Essas ligas apresentam excelente fluidez e são aplicáveis na brasagem de aço carbono, aço inoxidável, cobre e suas ligas, além de metais duros. A desvantagem relacionada à evaporação de Cd e Zn pode ser minimizada por meio de aquecimento controlado, uso de fluxo adequado e ventilação eficiente do posto de trabalho.

Apesar da excelente performance, as ligas Ag-Cu-Zn-Cd vêm sendo progressivamente substituídas pelas ligas da família Ag-Cu-Zn-Sn, que, embora requeiram temperaturas de brasagem mais elevadas, não contêm cádmio. Essa substituição está relacionada à necessidade de eliminar o uso de elementos tóxicos, como o Cd, reconhecido por seus efeitos prejudiciais à saúde humana. As aplicações das ligas Ag-Cu-Zn-Sn são equivalentes às das ligas contendo cádmio.

As ligas Ag-Cu também são amplamente utilizadas, embora seu custo seja elevado. Possuem como principal vantagem o fato de não apresentarem evaporação de elementos durante a brasagem, pois são isentas de Cd e Zn. A liga mais comum dessa família é a eutética Ag-72% / Cu-28%, utilizada na brasagem de aços carbono, inoxidáveis, cobre e suas ligas. Sua desvantagem está no alto custo e na temperatura de brasagem mais elevada, geralmente próxima ou superior a 800 °C.

As ligas Ag-Cu-Sn são representadas por uma única composição usual: Ag-60% / Cu-30% / Sn-10%, com temperatura liquidus próxima de 720 °C. Essa liga não apresenta evaporação significativa de elementos, mas sua molhabilidade e fluidez são inferiores às das ligas das famílias Ag-Cu, Ag-Cu-Zn e Ag-Cu-Zn-Cd.

As ligas das famílias Cu-P e Cu-P-Ag são utilizadas especificamente para a brasagem de cobre e suas ligas, sendo consideradas autofluxantes para essas aplicações. O sistema Cu-P possui um eutético com cerca de 8,3% de fósforo a 714 °C. No entanto, esse eutético é muito frágil, pois é constituído por uma solução sólida rica em cobre e por um composto intermetálico Cu_3P . Essa fragilidade pode ser reduzida com a diminuição do teor de fósforo, permitindo inclusive sua fabricação na forma de varetas. Essas ligas são amplamente utilizadas na indústria de refrigeração, em aplicações como brasagem de compressores e tubos de cobre.

Ligas contendo fósforo não devem ser utilizadas na brasagem de aço carbono, pois o fósforo tende a formar compostos intermetálicos com o ferro, como o Fe_3P . Esses compostos se alinham na interface entre o aço e o metal de adição, provocando uma fragilização acentuada da junta brasada.

O cobre puro e as ligas Cu-Sn (bronzes) são utilizados na brasagem de aço carbono, em temperaturas entre 1000 e 1150 °C. Essas ligas são extremamente econômicas, devido à ausência de prata em sua composição, e são normalmente aplicadas em brasagens em forno, que não liberam vapores metálicos, por serem isentas de Zn e Cd. No sistema Cu-Sn, é necessário controlar o teor de estanho, pois acima de 12% em massa há formação de compostos intermetálicos que fragilizam a junta.

As ligas da família Cu-Zn (latões) requerem temperaturas de brasagem acima de 900 °C. A presença do zinco impede a aplicação em fornos, devido à intensa formação de vapores metálicos. Por esse motivo, essas ligas são utilizadas na forma de varetas, especialmente em brasagem oxiacetilênica de peças de aço. Mesmo nesse caso, recomenda-se o uso de chama levemente oxidante, para minimizar a formação de vapores de zinco.

Na Tabela 3, são apresentadas as principais famílias de metais de adição utilizadas em processos de brasagem. Para cada família, estão indicadas a composição típica, a faixa de temperatura de brasagem, as aplicações mais comuns, bem como suas principais vantagens e limitações.

Tabela 3 – Família de metais de adição para brasagem. Fonte: Autoria própria.

Família de ligas	Temperatura de brasagem (°C)	Aplicações Principais	Vantagens	Limitações
Ag-Cu-Zn-Cd	600–700	Aços, cobre, inox, metais duros	Baixa Tliquidus, excelente fluidez	Cd tóxico, evaporação de Zn e Cd
Ag-Cu-Zn-Sn	680–750	Aços, cobre, inox, metais duros	Sem Cd, boa fluidez	Temperatura mais alta que Cd
Ag-Cu	780–800	Aços, cobre, inox (uso amplo)	Alta molhabilidade, sem evaporação	Custo elevado, T alta (~800 °C)
Ag-Cu-Sn	~720	Aplicações gerais com menor custo	Sem evaporação, custo menor	Menor fluidez que outras Ag
Cu-P / Cu-P-Ag	710–750	Cobre e ligas de cobre (refrigeração)	Autofluxante, amplamente disponível	Frágil com Fe (forma Cu_3P)
Cu puro	~1100	Aço carbono (forno)	Custo muito baixo, sem vapores	Alta temperatura de brasagem
Cu-Sn	1000–1150	Aço carbono (forno)	Econômico, aplicável em forno	$\text{Sn} > 12\% \rightarrow$ fragilidade
Cu-Zn	>900	Aço carbono (oxiacetilênica)	Baixo custo, uso direto em vareta	Vapores metálicos; não aplicável em forno

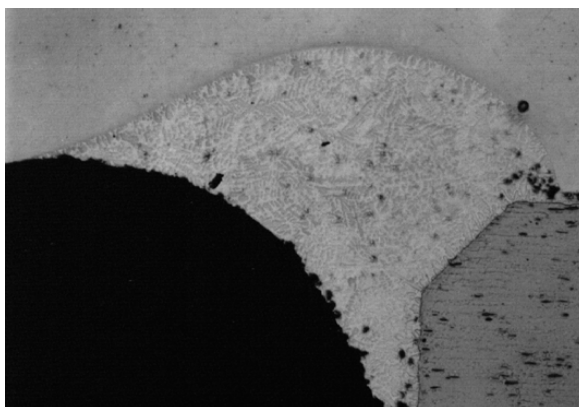
Essas informações são essenciais para a seleção adequada do metal de adição, considerando não apenas o tipo de material de base, mas também os requisitos operacionais e de desempenho da junta brasada.

4.1 Interação Metal de adição - Material base

Em princípio, na brasagem, é desejável que ocorra pouca ou nenhuma interação química entre o metal de adição e o material de base. No entanto, essa condição nem sempre se verifica na prática, uma vez que a própria molhabilidade é um indicativo de afinidade química entre os materiais envolvidos. Quando essa interação ocorre, é necessário garantir que não seja excessiva a ponto de comprometer a qualidade da junta brasada. Casos extremos de interação podem resultar em erosão do material de base, formação de fases frágeis ou empobrecimento localizado, todos eles indesejáveis do ponto de vista da integridade da junta.

Na Figura 10, apresenta-se uma amostra de junta brasada cobre-aço carbono, na qual foi utilizada a liga eutética Ag-Cu (72%Ag – 28%Cu). Observa-se uma acentuada erosão do cobre, provocada pela solubilização do material de base pelo metal de adição em fase líquida.

Figura 10 - Exemplo da erosão provocada pela interação MA-MB. Fonte: Okimoto, P.C.



Esse fenômeno é agravado por temperaturas excessivas: quanto maior o aquecimento, maior a solubilidade do cobre no líquido, e, portanto, maior a erosão. Trata-se de um efeito inevitável, mas que pode ser minimizado por meio do controle da temperatura de brasagem.

Quando a temperatura ultrapassa a temperatura de fusão da liga eutética ($\approx 780^\circ\text{C}$), a fase líquida formada é capaz de dissolver quantidades maiores de cobre. Como há cobre sólido disponível na região da junta (por exemplo, o tubo de cobre), esse cobre passa a ser incorporado à fase líquida, promovendo a erosão local da parede — fenômeno conhecido como erosão por dissolução.

Quase todas as ligas utilizadas na brasagem do cobre tendem a causar esse efeito, ainda que em diferentes intensidades. Por isso, recomenda-se evitar aquecimentos desnecessários e, sempre que possível, trabalhar com temperaturas próximas ao ponto de fusão do metal de adição, sem excedê-lo de forma significativa.

5. BRASAGEM METAL-CERÂMICA

Entre as diversas aplicações da brasagem entre materiais metálicos e cerâmicos, destaca-se a fabricação de componentes para eletrônica de potência, como diodos e tiristores.

Esse tipo de união apresenta características distintas da brasagem metal-metal, especialmente quando se trata da cerâmica alumina (Al_2O_3), um óxido estável. Essa condição contraria o princípio tradicional da brasagem, que exige a remoção da camada de óxidos superficiais para garantir boa molhabilidade.

Para possibilitar a brasagem entre alumina e metais, foram desenvolvidas diferentes abordagens, das quais se destacam três técnicas principais:

1. Técnica da Metalização

Essa técnica envolve múltiplas etapas:

- Aplicação de pastas à base de molibdênio (Mo) sobre a superfície da cerâmica;
- Fixação de placas de níquel (Ni);
- Sinterização em atmosfera de hidrogênio (H_2), formando uma camada metalizada sobre a alumina.

Com a superfície preparada, realiza-se a brasagem com liga eutética Ag-Cu, sendo utilizado como metal de base o Kovar — uma liga Fe-Ni-Co — que apresenta um coeficiente de dilatação térmica compatível com o da alumina, reduzindo o risco de tensões residuais durante o resfriamento.

2. Técnica do Metal Ativo

Desenvolvida na década de 1980, essa técnica substitui as etapas de metalização pelo uso direto de um metal de adição ativo, geralmente uma liga contendo titânio (Ti). O Ti promove molhabilidade direta sobre a cerâmica, dispensando o substrato metálico intermediário. Apesar da eficácia técnica, o custo elevado das ligas com Ti tornou-se uma limitação significativa em comparação às ligas Ag-Cu convencionais.

3. Metalização Mecânica

Na década de 1990, pesquisadores alemães desenvolveram uma alternativa baseada em metalização mecânica da cerâmica com titânio, em substituição ao metal ativo na liga. Essa técnica, muitas vezes mais econômica, permite o uso de metais de adição convencionais, como Ag-Cu, reduzindo o custo total do processo de brasagem.

5.1 Aspectos Críticos na Brasagem Metal-Cerâmica

Diferença de coeficiente de dilatação térmica

Após a brasagem, durante o resfriamento, os materiais metálicos e cerâmicos se contraem de forma diferenciada, devido à diferença em seus coeficientes de dilatação térmica. Isso gera tensões residuais na interface, que podem causar trincas ou ruptura da cerâmica.

Para minimizar esse risco, recomenda-se o uso de metais com dilatação térmica compatível com a da cerâmica. No caso da alumina (Al_2O_3), é comum o uso do Kovar (Fe-Ni-Co), que possui comportamento térmico adequado.

Compatibilidade química na interface

Além da dilatação térmica, deve-se considerar a reatividade química entre o metal de adição e a cerâmica. Mesmo quando há boa molhabilidade, pode ocorrer formação de fases intermetálicas ou reações indesejadas na interface, principalmente em cerâmicas com aditivos, como a ZrO_2 estabilizada. Reações excessivas podem comprometer a durabilidade da junta e devem ser evitadas por meio da seleção criteriosa do metal de adição.

Atmosfera de brasagem

A brasagem metal-cerâmica frequentemente requer atmosferas controladas, como vácuo ou gases inertes (ex: argônio), especialmente em processos com metais ativos. Essas atmosferas evitam a oxidação do Ti e outras reações indesejadas durante o aquecimento.

Geometria e projeto da junta

A geometria da junta deve permitir uma distribuição uniforme das tensões, evitando concentrações localizadas e restrições de dilatação. São recomendadas configurações como juntas cônicas, sobrepostas ou com áreas de transição graduada, que auxiliam na compatibilização mecânica entre os materiais.

Preparação superficial da cerâmica

Embora a presença de metal ativo ou a aplicação de metalização sejam fundamentais, a qualidade da superfície cerâmica também influencia a adesão. Superfícies excessivamente polidas podem dificultar a ancoragem do metal, enquanto superfícies muito rugosas podem reter contaminantes ou dificultar a uniformidade da camada metalizada. A preparação adequada da superfície envolve alcançar um nível controlado de rugosidade, compatível com a técnica adotada, e assegurar a completa remoção de contaminantes.

6. PROCESSOS DE BRASAGEM

Uma das formas mais comuns de classificar os processos de brasagem é com base no método de aquecimento utilizado. Entre os principais, destacam-se:

- Brasagem por tocha (*Torch Brazing – TB*)
- Brasagem em forno (*Furnace Brazing – FB*)
- Brasagem por indução (*Induction Brazing – IB*)
- Brasagem por imersão (*Dip Brazing – DB*)
- Brasagem por infravermelho (*Infrared Brazing – IRB*)

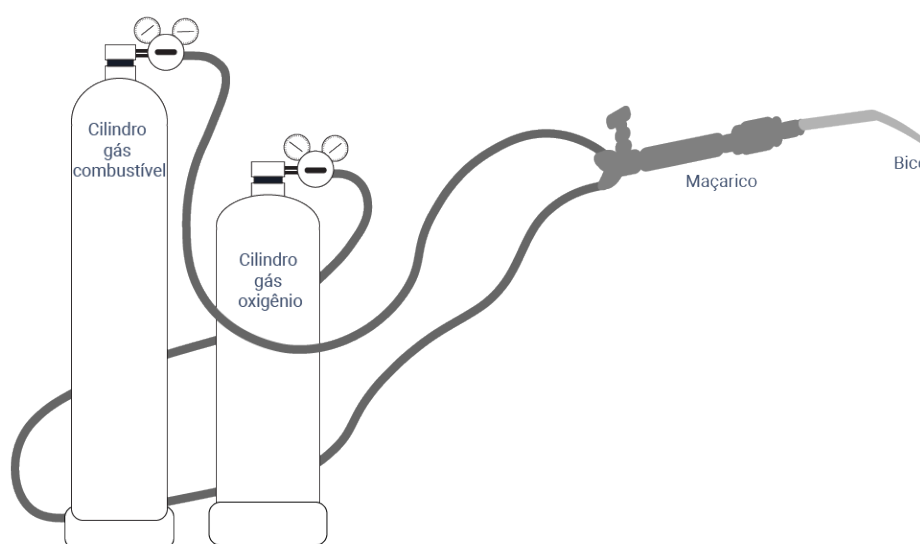
Além desses, existe ainda a brasagem por resistência elétrica, amplamente utilizada em processos de brasagem branda (*soldering*). O equipamento comumente empregado nesse caso é conhecido como ferro de solda.

Curiosamente, a nomenclatura popular "ferro de solda" é imprecisa: o equipamento não é feito de ferro, e o resultado do processo não é uma solda metálica no sentido estrito, mas sim uma junção por brasagem branda.

6.1 Brasagem por Tocha

Na brasagem por tocha, o equipamento comumente utilizado é o mesmo da soldagem oxigás (Figura 11). Por esse motivo, esse processo é frequentemente referido como brasagem por maçarico. O gás combustível mais utilizado é o acetileno, embora também possam ser empregados propano ou outros gases.

Figura 11 – Desenho esquemático do equipamento oxigás. Fonte: Autoria própria.



O gás comburente mais comum é o oxigênio, podendo, em algumas situações, ser substituído por ar comprimido. Este apresenta a vantagem de ser mais barato, porém gera uma chama de menor temperatura. O oxigênio, por outro lado, apesar de ser mais caro, permite alcançar temperaturas mais elevadas, favorecendo a brasagem de materiais com maior exigência térmica. A brasagem por tocha é amplamente utilizada em aplicações manuais ou mecanizadas, com baixo custo inicial e boa flexibilidade de operação.

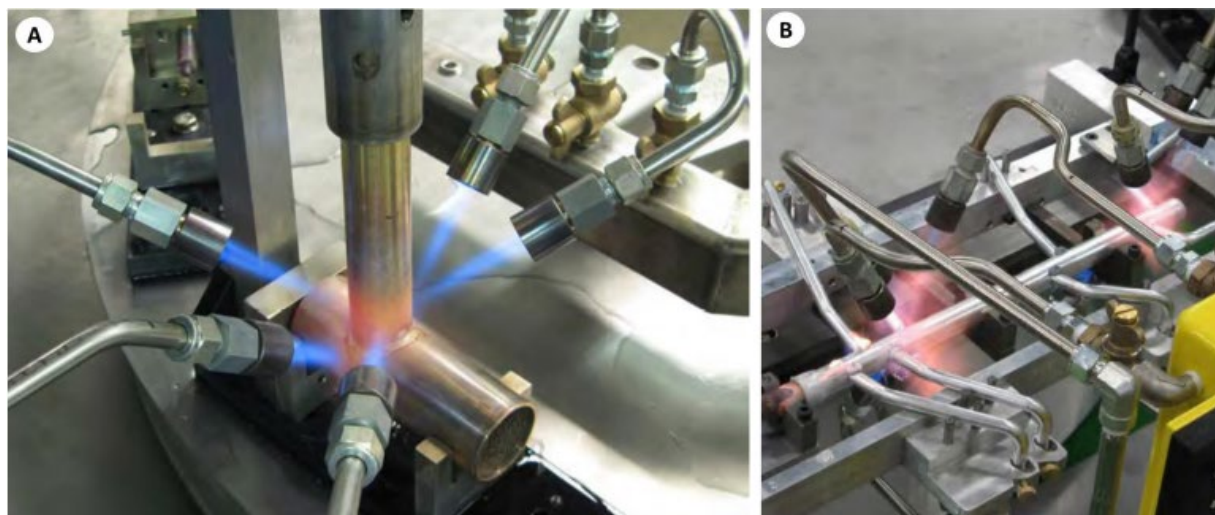
Projetos especiais de maçaricos podem incorporar múltiplos bicos, o que permite aumentar a área aquecida e tornar o processo mais eficiente. No entanto, é necessário adotar cuidados adicionais para evitar superaquecimento localizado, que pode comprometer a qualidade da junta.

Na Figura 12(a), exemplifica-se o uso de múltiplos maçaricos na brasagem por chama de tubos de cobre, e na Figura 12(b), observa-se a aplicação da brasagem por chama em ligas de alumínio, utilizada na indústria de trocadores de calor.

A brasagem por tocha é muito utilizada em operações de manutenção, na produção de pequenos lotes e na brasagem de tubos e conexões, especialmente nos setores de refrigeração e encanamento. Entre suas principais vantagens, destacam-se o baixo custo do equipamento, a mobilidade e a simplicidade de operação.

No entanto, esse processo apresenta limitações relevantes, como a dificuldade de controle térmico, o risco de superaquecimento da junta e a inadequação para aplicações que exigem alto rigor dimensional ou estrutural, como juntas críticas.

Figura 12 – Brasagem de tubo por maçarico (a) cobre e (b) alumínio. Fonte: FUSION Inc.



6.2 Brasagem em Forno

A brasagem em forno pode utilizar fornos a gás, a óleo ou elétricos, sendo amplamente empregada quando as peças podem ser pré-montadas na posição correta e o metal de adição pode ser posicionado previamente na junta. Essa técnica é especialmente indicada para componentes com geometria complexa, que exigem aquecimento uniforme para evitar distorções, bem como para grandes volumes de peças pequenas ou conjuntos múltiplos que possam (ou precisem) ser brasados simultaneamente – o que a torna ideal para produção em série e em larga escala.

Um exemplo clássico de aplicação é a montagem de aletas em trocadores de calor, onde a uniformidade térmica e a repetibilidade do processo são essenciais.

A proteção contra oxidação na brasagem em forno pode ser realizada por meio de fluxo, atmosfera controlada (como gás inerte ou redutor) ou ainda sob vácuo. Os fornos devem oferecer bom controle de temperatura e garantir uma distribuição homogênea de calor em toda a câmara. Podem ser do tipo contínuo (com peças em movimento constante) ou intermitente (lote a lote), com capacidade de operar tanto com atmosfera controlada quanto em vácuo.

A brasagem em forno é amplamente utilizada nas indústrias automotiva, aeroespacial, metalúrgica e em sistemas de refrigeração, devido à sua alta precisão e confiabilidade.

Entre as principais vantagens, destacam-se:

- Aquecimento uniforme das peças;
- Alta repetibilidade do processo;
- Excelente controle de atmosfera;
- Capacidade de brasar múltiplas peças simultaneamente;
- Em alguns casos, a ausência de fluxo, o que reduz a necessidade de limpeza após o processo.

Como limitações, podem ser citados:

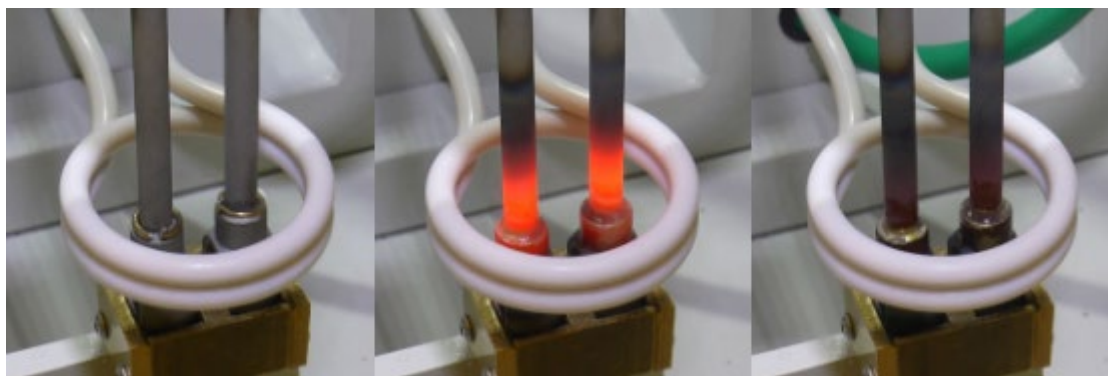
- Alto custo de instalação dos fornos;
- Maior tempo de ciclo em comparação a métodos localizados;
- Necessidade de preparação prévia das juntas;
- Exigência de controle rigoroso dos parâmetros de processo, como temperatura, tempo e atmosfera.

6.3 Brasagem por Indução

A brasagem por indução é um processo que utiliza um campo magnético gerado por um indutor (ou bobina) para promover a união entre os materiais. O aquecimento ocorre por meio da dissipação de calor provocada por correntes elétricas induzidas, geradas por uma fonte de corrente alternada conectada à bobina. Nesse processo, o aquecimento é restrito a uma pequena região da peça, e o calor se propaga para as demais áreas por condução térmica ou pelo deslocamento da peça em relação à bobina. O metal de adição é previamente posicionado na junta, e a proteção contra a oxidação é realizada por meio de fluxo ou atmosfera controlada.

A brasagem por indução se caracteriza por um aquecimento rápido, localizado e altamente eficiente. O princípio operacional está ilustrado na Figura 13: a peça e o metal de adição são posicionados junto à bobina, ocorre o aquecimento indutivo, seguido pelo resfriamento e solidificação da junta.

Figura 13 – Representação das etapas da brasagem por indução. Fonte: jamo.ind.br.



A brasagem por indução é amplamente utilizada na indústria automotiva, aeroespacial, elétrica e em processos automatizados de alta produtividade, especialmente para juntas circulares, peças rotativas ou locais de difícil acesso para aquecimento convencional.

Vantagens:

- Aquecimento rápido e preciso;
- Baixa zona afetada pelo calor;
- Alta repetibilidade;
- Possibilidade de automação;
- Redução ou eliminação do uso de fluxo quando realizada em atmosfera controlada.

Limitações:

- Alto custo de instalação inicial;
- Necessidade de geometria compatível com a bobina;
- Controle rigoroso de posicionamento;
- Pouco adequado para brasagem simultânea de grandes volumes.

6.4 - Brasagem por Imersão

A brasagem por imersão pode ser realizada em banhos de metal fundido ou em banhos químicos. No caso do banho químico, é necessário um recipiente metálico ou cerâmico resistente ao fluxo, além de um sistema de aquecimento para elevar a temperatura do meio à faixa adequada de brasagem. Esse aquecimento pode ser externo, por meio de maçarico ou aquecimento por indução; ou interno, utilizando resistência elétrica imersa no recipiente. Para garantir que o banho permaneça dentro da faixa operacional, são necessários sistemas de controle de temperatura, muitas vezes com precisão elevada.

O banho de metal fundido é mais indicado quando se deseja brasar conjuntos pequenos de peças com geometria regular e de montagem repetitiva. Nesse caso, utiliza-se com frequência um cadinho de grafite com dimensões apropriadas, aquecido externamente, de forma a manter o metal de adição no estado líquido mesmo após a introdução das peças a serem brasadas. É comum manter uma camada de fluxo sobre o banho, protegendo a superfície contra oxidação. Após a imersão, ao retirar as peças do banho, é importante aguardar a completa solidificação do metal de adição, garantindo a integridade da junta formada.

A brasagem por imersão é indicada para componentes eletrônicos, estruturas finas, juntas múltiplas em pequenas peças e cavidades internas, especialmente em processos com necessidade de aquecimento homogêneo e imersivo.

Vantagens:

- Aquecimento uniforme e simultâneo das peças;
- Excelente penetração do metal de adição nas juntas;
- Possibilidade de brasagem de geometrias internas complexas;
- Boa repetibilidade para produção em pequenos lotes;

Limitações:

- Processo pouco flexível – requer preparação específica para cada conjunto;
- Risco de contaminação do banho e necessidade de renovação periódica;
- Pós-processamento necessário para limpeza de resíduos de fluxo;
- Restrito a peças pequenas ou com geometria adequada à imersão.

6.5 Brasagem por Infravermelho

A brasagem por infravermelho pode ser considerada uma variação da brasagem em forno, em que o calor é gerado por radiação eletromagnética de alta intensidade, emitida por lâmpadas de

quartzo. Essas lâmpadas são capazes de produzir até 5.000 watts de energia radiante, que, com o uso de refletores, pode ser concentrada diretamente na região da junta a ser brasada, promovendo um aquecimento rápido e direcionado. O processo permite controle preciso da zona de aquecimento, evitando a exposição desnecessária de áreas adjacentes e reduzindo deformações térmicas.

Esse processo é utilizado principalmente em componentes eletrônicos, microjuntas, sensores, peças sensíveis ao calor, ou em situações que exigem aquecimento localizado com mínima zona termicamente afetada.

Vantagens:

- Aquecimento sem contato físico
- Controle térmico preciso e localizado
- Processo limpo e rápido
- Baixa distorção térmica
- Ideal para materiais sensíveis ou de pequena escala

Limitações:

- Baixa penetração térmica — limitado a geometrias superficiais
- Sensível à cor, forma e emissividade da superfície das peças
- Equipamento com custo elevado
- Pouco indicado para peças de grande massa térmica ou geometrias complexas

7. SELEÇÃO DO PROCESSO DE BRASAGEM

A escolha adequada do processo de brasagem é essencial para garantir a eficiência, a qualidade da junta brasada e a viabilidade econômica da aplicação. Essa seleção deve levar em conta diversos fatores técnicos e operacionais.

A seguir, são apresentados os principais critérios que influenciam a escolha do processo:

- Tipo e geometria da peça: peças pequenas ou delicadas podem exigir aquecimento localizado (ex: indução ou infravermelho); peças grandes ou com geometrias complexas podem se beneficiar do aquecimento uniforme em forno.
- Volume de produção: para pequenos lotes ou manutenção, a brasagem por tocha é mais indicada; para produção seriada, processos automatizados como forno, indução ou imersão são preferíveis.
- Material de base e metal de adição: alguns materiais exigem atmosferas controladas ou proteção especial (ex: cerâmica, ligas com Ti, metais reativos).
- Requisitos de qualidade da junta: peças críticas exigem controle rigoroso de temperatura e atmosfera, favorecendo processos como forno a vácuo ou indução com atmosfera protetora.
- Disponibilidade de equipamentos e infraestrutura: nem todos os processos estão disponíveis em oficinas ou laboratórios; a escolha deve considerar os recursos acessíveis.

- Custo e produtividade: processos como forno contínuo ou indução são mais caros, mas viáveis em produções de grande escala; para baixa produção, a simplicidade operacional pode ser o fator decisivo.

8. CONTROLE DE QUALIDADE NA BRASAGEM

A garantia da qualidade das juntas brasadas é fundamental para assegurar o desempenho mecânico, térmico e funcional dos componentes. Embora a brasagem seja um processo estável quando bem controlado, falhas na preparação, no aquecimento ou na seleção dos materiais podem comprometer a integridade da junta.

8.1 Ensaios de Inspeção Aplicáveis

A avaliação da qualidade pode ser realizada por meio de ensaios destrutivos e não destrutivos, de acordo com o tipo de componente e a aplicação.

Ensaios não destrutivos (END):

- Inspeção visual: primeiro e mais simples método; permite identificar defeitos aparentes como falhas de preenchimento, excesso de fluxo solidificado ou escorrimento de material.
- Líquido penetrante: utilizado para detectar trincas superficiais e descontinuidades não visíveis a olho nu, especialmente em juntas com geometrias abertas.
- Raio-X (radiografia industrial): recomendado para juntas internas ou de difícil acesso, como em tubos ou cavidades; permite avaliar a presença de poros, bolhas ou falta de preenchimento.
- Ultrassom (em casos especiais): pode ser aplicado em peças maiores ou onde se deseja mapear descontinuidades volumétricas.

Ensaios destrutivos (ED):

- Corte transversal e metalografia: permitem verificar a geometria da junta, a penetração do metal de adição e eventuais defeitos internos como porosidade, erosão ou zonas não molhadas.
- Ensaio de tração ou cisalhamento: utilizados para avaliar a resistência mecânica da junta brasada, especialmente em protótipos, testes de desenvolvimento ou validação de processo.

8.2 Defeitos Típicos na Brasagem

Algumas falhas comuns que podem ocorrer no processo incluem:

- Falta de preenchimento da junta: geralmente causada por folga inadequada, baixa fluidez do metal de adição ou falhas no aquecimento.
- Porosidade: pode ser resultado de impurezas, fluxo mal aplicado ou presença de umidade.
- Oxidação interna: ocorre pela ausência de proteção adequada (fluxo ou atmosfera), levando à má molhabilidade.

- Erosão do material de base: especialmente comum no cobre, quando há superaquecimento ou tempo de exposição excessivo à fase líquida.
- Falha de aderência (desmolhabilidade): indicativo de contaminação superficial, óxidos não removidos ou uso incorreto do fluxo.

8.3 Boas Práticas para Evitar Falhas

- Garantir a limpeza rigorosa das superfícies a serem brasadas;
- Selecionar corretamente o metal de adição e o fluxo, compatíveis com os materiais envolvidos;
- Manter o controle preciso da temperatura de brasagem e do tempo de exposição;
- Avaliar cuidadosamente o projeto da junta e a distribuição da folga;
- Aplicar procedimentos de inspeção padronizados, especialmente em ambientes produtivos.

9. SEGURANÇA E MEIO AMBIENTE

A brasagem, apesar de ser um processo relativamente limpo em comparação à soldagem por fusão, envolve riscos ocupacionais e ambientais que devem ser considerados para garantir a integridade dos profissionais e o controle de impactos ao meio ambiente.

9.1 Segurança Ocupacional

Durante o processo de brasagem, especialmente nos métodos com chama (tocha) e metal de adição com elementos voláteis, podem ser gerados vapores metálicos e gases potencialmente tóxicos, como:

- Vapores de cádmio (Cd) e zinco (Zn) – comuns em ligas Ag-Cu-Zn-Cd e Cu-Zn;
- Gases combustíveis ou redutores, como acetileno (C_2H_2), hidrogênio (H_2) e monóxido de carbono (CO).

Riscos associados:

- Inalação de vapores metálicos: pode causar irritação, danos respiratórios ou efeitos crônicos;
- Risco de queimaduras: em superfícies aquecidas ou por respingos de metal fundido;
- Incêndio ou explosão: principalmente em processos com gás combustível mal regulado.

Boas práticas de segurança:

- Trabalhar em ambiente com ventilação adequada ou exaustão local;
- Utilizar equipamentos de proteção individual (EPIs): óculos com proteção térmica, luvas, avental de couro, máscara com filtro adequado;
- Manter controle rigoroso de chamas, gases e temperatura de fornos;
- Evitar o uso de ligas com cádmio, sempre que possível, substituindo por ligas equivalentes livres de Cd.

9.2 Cuidados Ambientais

O processo de brasagem pode gerar resíduos sólidos e líquidos com potencial impacto ambiental:

- Resíduos de fluxo: quando não removidos adequadamente, podem ser higroscópicos e corrosivos;
- Banhos residuais de imersão ou limpeza: contendo metais dissolvidos, fluxo e solventes;
- Descarte de ligas com metais pesados, como Cd e Pb (caso estejam presentes em processos antigos).

Boas práticas ambientais:

- Coletar e descartar resíduos de fluxo e limpeza conforme as normas ambientais (ex: NBR 10004 – resíduos perigosos);
- Utilizar ligas ambientalmente seguras sempre que viável;
- Substituir solventes agressivos por alternativas menos tóxicas e biodegradáveis;
- Monitorar e registrar os resíduos gerados para rastreabilidade.

10. CONSIDERAÇÕES FINAIS: BRASAGEM X SOLDAGEM

Embora frequentemente comparadas ou até confundidas, brasagem e soldagem são processos de união distintos, com fundamentos físicos, aplicações e características bem específicas. Enquanto a soldagem envolve a fusão dos materiais de base, com ou sem a presença de material de adição, a brasagem se caracteriza pela fusão apenas do metal de adição, mantendo os materiais de base íntegros.

Essa diferença não é apenas conceitual, ela impacta diretamente o comportamento térmico, a integridade estrutural e a funcionalidade da junta. A brasagem permite unir materiais dissimilares, realizar uniões em regiões sensíveis ao calor e obter juntas limpas e com ótimo acabamento superficial, desde que seja corretamente planejada e executada.

Mais do que uma técnica complementar à soldagem, a brasagem é um processo completo, com identidade própria, e deve ser compreendida em profundidade para ser corretamente aplicada. Dominar seus princípios, materiais e métodos é essencial para quem atua em engenharia, manutenção, fabricação de componentes de precisão ou em setores onde qualidade e controle térmico são fatores críticos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN WELDING SOCIETY. **Brazing Handbook**. 5th ed. Miami: AWS, 2007.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS C3.2M/C3.2: Standard Method for Evaluating the Strength of Brazed Joints**. Miami: AWS, 2016.

ASM INTERNATIONAL. *ASM Handbook: Volume 6 – Welding, Brazing, and Soldering*. Materials Park, OH: ASM International, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16873:2021 – Brasagem – Terminologia**. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12942:2007 – Consumíveis para soldagem – Classificação dos eletrodos revestidos para aço carbono e aço de baixa liga**. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

AWS C3.2M/C3.2: **Standard Method for Evaluating the Strength of Brazed Joints**. Miami: AWS, 2016.

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**. Anais do Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia. Anais Online, 2023. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/cobicet2023/668867>.

FELIZARDO, I. **Vídeo aula sobre Brasagem**. Disponível em: C0015 YT ABR24 (youtube.com).

FUSION INC. **Brazing Technical Manual**. Chicago: Fusion Incorporated, 2018. Disponível em: www.fusion-inc.com.

FUSION INC. **Paste Brazing & Soldering Alloys** - Bulletin A-101/ENG, Fusion Incorporated, 2020 Willoughby, Ohio USA. Disponível em: www.fusion-inc.com.

HAYNES INTERNATIONAL. **Technical Data: Brazing Alloys and Procedures**. Kokomo: Haynes, 2015.

HOGANAS. **Brasagem** – inovações em juntas pastas e metais de adição. Disponível em: <https://www.hoganas.com/pt-br/powder-technologies/brazing/>, acessado em 10 março 2025.

JAMO Aquecimento Indutivo. **Brasagem**. Disponível em: <https://www.jamo.ind.br/>.

KOU, S. **Welding Metallurgy**. 2nd ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2003.

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

MOURA, W. A. M. **Soldagem: Processos, Métodos e Técnicas**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020.

NBR 10004:2004 – **Resíduos sólidos: classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

OKIMOTO, P.C. **Apostila disciplina TM254**. Universidade Federal do Paraná, Departamento de Eng. Mecânica. Acessado em: http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM254/Prof_Okimoto/Aula3.pdf

OKIMOTO, P.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.