

3ª aula : Brasagem

1. Brevíssimo Histórico

Promover a união entre diferentes peças ou materiais é uma operação realizada desde os tempos pré-históricos, na confecção de pequenos artefatos de pedra e madeira. A união por meios mecânicos (por exemplo, rebiteagem) é realizada há vários séculos em diversas aplicações, como a mostrada na figura 1, onde são observados 3 diferentes capacetes datados de 500 anos antes de Cristo, originários da Itália.



Figura 1 : Capacetes fabricados em metal, com uniões por rebiteagem, datados de 500AC. Museu de Karlsruhe - Alemanha.

A técnica de união por brasagem é, provavelmente, a mais antiga forma de unir os materiais, sem considerar os meios mecânicos. Utilizava-se, por exemplo, a brasagem na confecção de artefatos em ouro (jóias), como a mostrada na figura 2. Trata-se de uma fivela de ouro com pequenos filigramas brasados sobre um disco e detalhes em pedras preciosas. Na parte posterior observa-se ainda outras partes brasadas. Esta fivela é originário da França, datado aproximadamente de 700 DC. Há literaturas que apontam jóias brasadas datadas de 1500 a 4000AC.



Figura 2 : Fivela em ouro com partes brasadas, datado de 700DC.
Museu de Colônia - Alemanha.

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

Alguns exemplos podem ser vistos nas figuras 3, 4, 5 e 6. Na figura 3 é mostrada a união entre componentes tubulares de cobre e aço, com aplicações típicas de componentes para indústria de refrigeração e autopeças. Na figura 4 são mostradas a brasagem de trocadores de calor de alumínio utilizado em sistemas de refrigeração de carros de passeio. Na figura 5 é mostrada a brasagem entre a cerâmica alumina – Al_2O_3 - e um material metálico de liga Fe-Ni-Co. Na figura 6 são mostradas a brasagem entre cobre e grafite, com aplicações na indústria nuclear.



BRASAGEM
TUBO DE COBRE
E ANEL DE AÇO



BRASAGEM
TUBO DE COBRE
EM CHAPA

Figura 3 : Brasagem entre componentes tubulares de cobre e aço.

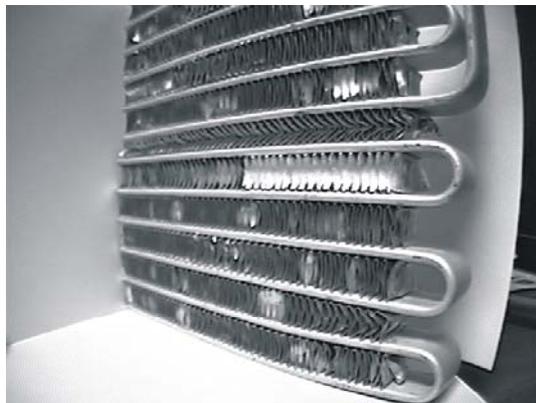


Figura 4 : Brasagem de condensadores de ar condicionado automotivo.



Figura 5 : Brasagem entre cerâmica alumina e liga Fe-Ni-Co.

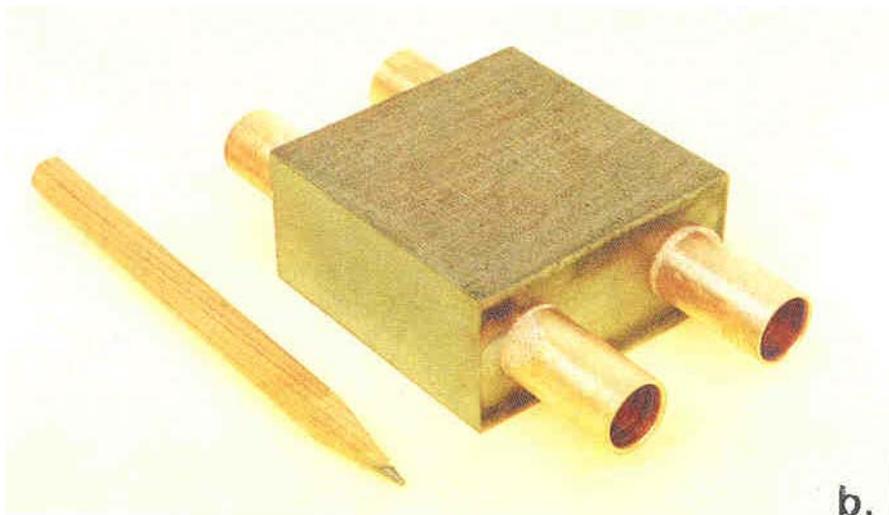


Figura 6 : Brasagem entre grafite e cobre.

2. Definições Básicas

Existem várias definições para Brasagem, sendo que duas são mais conhecidas : a oriunda dos Estados Unidos através da AWS (American Welding Society - Sociedade Americana de Soldagem), e da Alemanha através da norma DIN.

Segundo a AWS, define-se brasagem como *"processo de união de materiais com adequado aquecimento, sendo utilizado um metal de adição cuja temperatura de fusão é superior a 450 C e inferior a $T_{solidus}$ dos materiais base. O metal de adição preenche a folga entre os materiais base por efeito capilar"*.

A norma DIN 8505 define Brasagem como *"um processo térmico para preenchimento de juntas e revestimento de materiais, onde ocorre uma fase fluida, obtida pela fusão de um metal de adição (brasagem por fusão) ou por difusão na superfície de união (brasagem por difusão). A temperatura de início de fusão ($T_{solidus}$) dos materiais de base não é atingida"*.

Uma definição simplificada seria : ***Brasagem é um processo térmico de união de materiais onde se utiliza uma fase líquida obtida, normalmente, pela fusão de um metal de adição, que preenche a folga entre os materiais base por efeito capilar. O metal de adição deve possuir fundir-se em temperaturas abaixo do início da fusão de qualquer dos materiais base envolvidos.***

- Materiais base : são os materiais a serem unidos. Por exemplo : tubo de cobre com tubo de cobre; tubo de aço com tubo de cobre;
- Metal de adição : um metal puro ou liga metálica apropriada para a brasagem. Pó exemplo : cobre puro ou ligas contendo prata-cobre-zinco;
- Temperatura de fusão : é a temperatura na qual um metal puro ou uma liga eutética funde-se;
- $T_{solidus}$: temperatura na qual começa a fusão de uma liga metálica;
- $T_{liquidus}$: temperatura na qual termina a fusão de uma liga metálica;

- Temperatura de brasagem (de trabalho) : é a temperatura a que estão submetidos os materiais base durante a brasagem;
- Folga : distância que separa os materiais a serem unidos conforme mostrado, por exemplo, na figura 7;

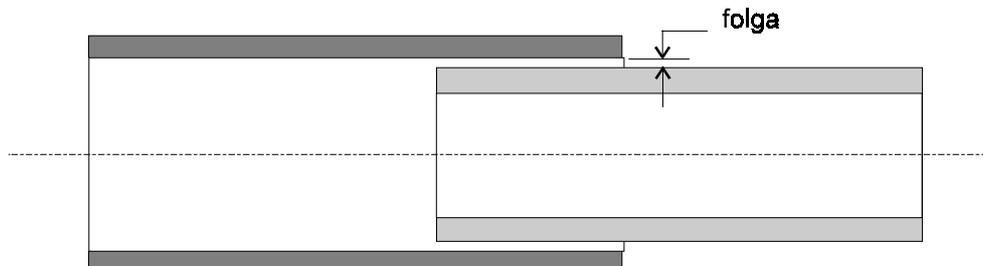
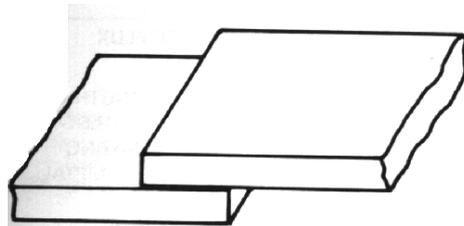
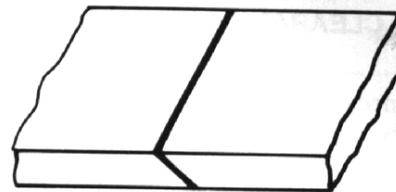


Figura 7 : Ilustração da definição de folga.

- Tipos de juntas brasadas : são as configurações básicas em que os materiais base serão brasadas. Existem 3 tipos de juntas brasadas : sobreposta, de topo e em ângulo, cuja representação esquemática pode ser vista na figura 8.



a. Sobreposta



c. Em ângulo



b. Topo



Figura 8 : Tipos de juntas brasadas.

3. Conceitos fundamentais

3.1. Molhabilidade

Denomina-se molhabilidade a capacidade de uma fase líquida espalhar-se sobre um substrato sólido. Na brasagem, a fase líquida é representada pelo metal de adição fundido e o substrato sólido pelo material base. Uma representação esquemática gráfica deste conceito pode ser visto na figura 9, onde temos 3 casos distintos de molhabilidade.

No 1º caso, o metal de adição não apresenta qualquer tendência ao espalhamento sobre o material base, mantendo-se na forma de uma gota, que não molha a superfície. Neste caso, não há qualquer contato físico entre a fase líquida e o substrato, logo não haverá qualquer possibilidade de ocorrência de união.

No 2º caso, ocorre espalhamento do metal de adição sobre material base, sendo entretanto em nível limitado. Neste caso diz-se que a molhabilidade é moderada, existindo contato físico entre a fase líquida e o substrato, o que permite uni-los.

No 3. caso, o metal de adição espalha-se completamente sobre o material base, formando quase um revestimento. Diz-se então que a molhabilidade é excelente, e o contato físico entre a fase líquida é o maior possível, sendo a união entre estes facilmente obtida.

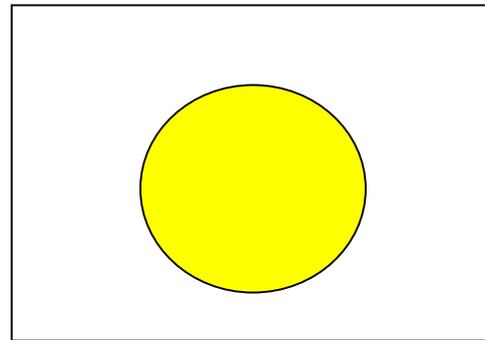
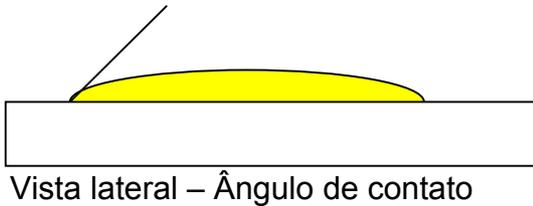
molhabilidade inexistente



Figura 9 : Representação de diferentes condições de molhabilidade

Pode-se quantificar a molhabilidade de um metal de adição sobre um material base através de duas maneiras bastante simples. A primeira é medindo-se o ângulo de contato α formado entre o substrato e a tangente à fase líquida no ponto de contato. Neste caso, quanto menor o ângulo α , maior será a molhabilidade. A medida deste ângulo pode ser feita na temperatura ambiente, através de metalografia. Pode-se, ainda, medir o ângulo α na temperatura de brasagem, através de técnicas especiais a quente.

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. Quando maior a área ocupada, maior o espalhamento, e consequentemente maior a molhabilidade.



A molhabilidade de um metal de adição sobre um material base dependerá de vários fatores, que serão melhor descritos no decorrer deste curso.

2.2. Efeito capilar ou capilaridade

É um fenômeno físico que ocorre quando uma fase líquida molha um substrato, podendo ser melhor compreendida pela observação da figura 10. Existindo molhabilidade, a fase líquida tende a subir acima do nível normal através de efeito capilar, sendo a altura alcançada tanto maior quanto menor a folga. Em contrapartida, quando não existe molhabilidade, a folga sequer é preenchida, ficando o altura da fase líquida abaixo de seu nível normal.

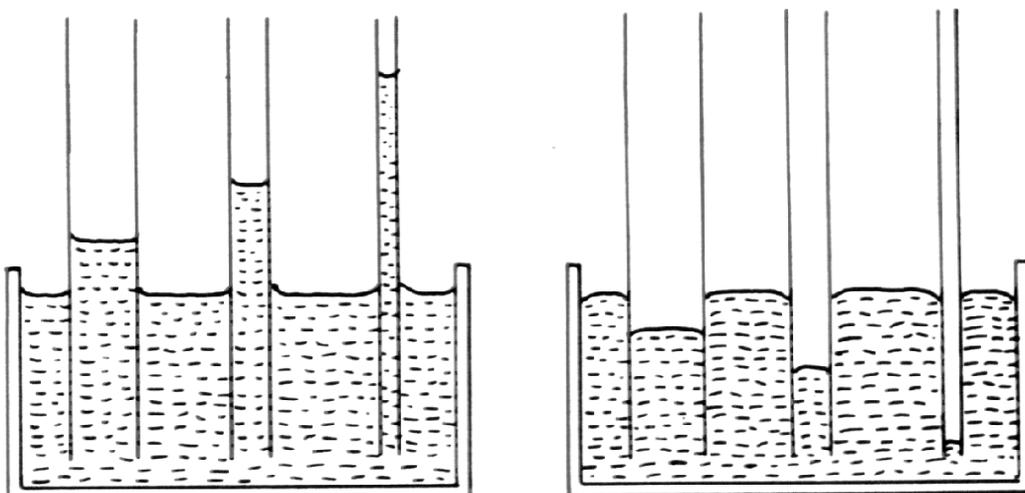


Figura 10 : Efeito capilar ou capilaridade em diferentes folgas. e a influência da molhabilidade.

A figura 10 ilustra muito bem o comportamento que ocorre nas juntas brasadas. Só haverá enchimento da folga quando o metal de adição fundido molhar os materiais base, sendo que o enchimento se dará mais facilmente quanto menor a folga. Havendo molhabilidade, forma-se um menisco conforme mostrado na figura 11, onde :

b : folga

h : altura do menisco formado

α : ângulo de contato

r_1 : raio de curvatura do menisco

r_2 : raio de curvatura do líquido no nível de referência

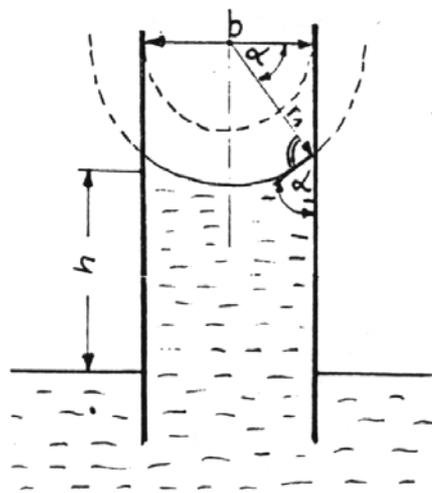


Figura 11 : Menisco que se forma quando existe molhabilidade de um líquido sobre um substrato.

A pressão exercida para formar o menisco P_k - denominada pressão capilar, pode ser calculada através da equação de Laplace por :

$$P_k = \gamma_{GL} (1/r_1 + 1/r_2)$$

Sendo : $r_2 = \text{infinito}$; $r_1 = (b/2) \cdot \cos\alpha$; γ_{GL} : tensão superficial do metal de adição líquido sob atmosfera de brasagem, temos :

$$P_k = (2 \cdot \gamma_{GL} \cdot \cos\alpha) / b \dots\dots\dots [1]$$

A pressão hidrostática - P_h - resultante da altura h do menisco, pode ser calculada pela seguinte expressão :

$$P_h = \sigma_L \cdot g \cdot h \dots\dots\dots [2]$$

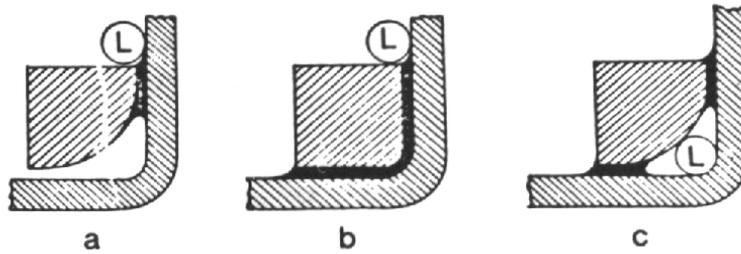
Sendo : σ_L : densidade do líquido ; h : altura do menisco ; g : aceleração da gravidade = $9,81 \text{ m/s}^2$

Igualando-se as equações [1] e [2] e isolando h, temos :

$$h = (2 \cdot \gamma_{GL} \cdot \cos\alpha) / b \cdot g \cdot \sigma_L \dots\dots\dots [3]$$

A altura do menisco será, portanto, tanto maior quanto menores forem o ângulo de contato α (maior molhabilidade), a folga b e a densidade σ_L .

A equação 3 mostra que a folga b é um parâmetro de significativa influência no efeito capilar. Da mesma forma, na brasagem a folga utilizada influi decisivamente no resultado final. Folgas excessivamente elevadas resultam em baixa pressão capilar, o que leva a formação de falhas de enchimento nas juntas brasadas. A figura 12 demonstra as consequências da variação da folga ao longo de uma junta brasada, onde a queda da pressão capilar leva ao não preenchimento da mesma.



a - folga crescente inadequada c - folga decrescente adequada
b - folga constante adequada L - local de posicionamento do metal de adição

Figura 12 : A variação na folga e sua influência no enchimento da junta.

A brasagem, portanto, nada mais é que o enchimento de uma folga entre os materiais base por um metal de adição fundido, que necessariamente apresenta molhabilidade sobre os materiais base. Um representação esquemática da brasagem pode ser vista na figura 13, onde estão mostrados todos os elementos que a compõem.

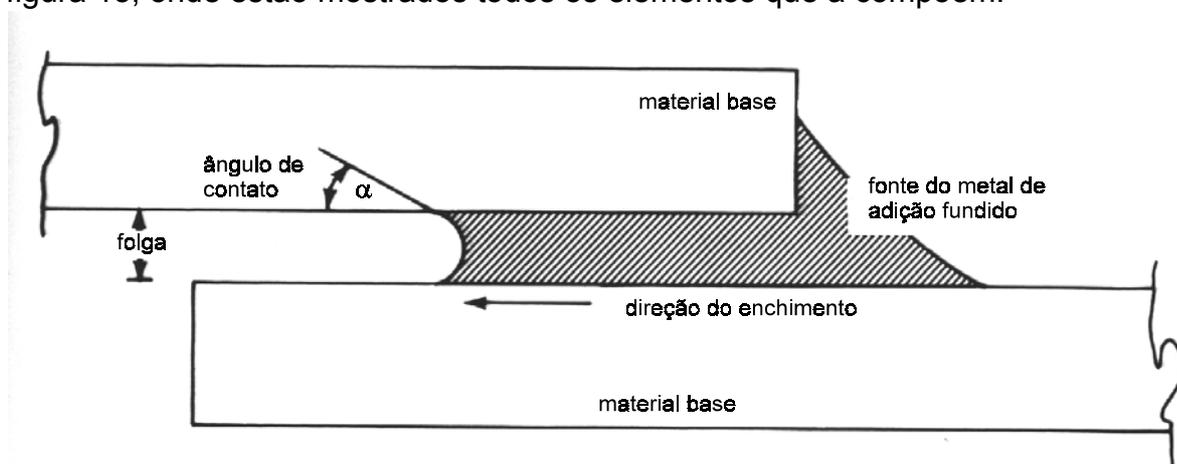


Figura 13 : Representação esquemática da brasagem

Um exemplo real de peça brasada pode ser vista na figura 14, onde é mostrada uma junta brasada cobre-aço carbono, tendo-se como metal de adição uma liga de prata. Observa-se que o metal de adição apresenta uma boa molhabilidade sobre ambos os materiais base, uma vez que o ângulo de contato é baixo. Isto acarretou o enchimento da folga, conforme mostrado esquematicamente na figura 13.

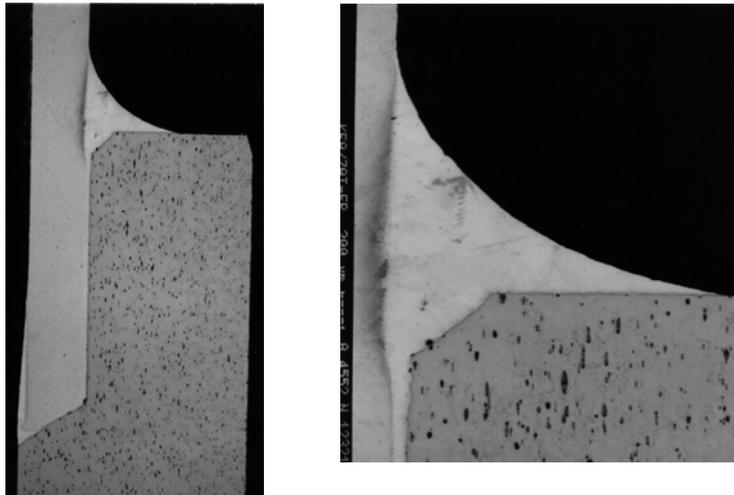


Figura 14 : Exemplo real de uma junta brasada cobre-aço carbono.

Um outro exemplo que permite consolidar a importância da molhabilidade na brasagem pode ser vista na figura 15, onde é mostrada uma junta cobre-aço carbono, tendo-se igualmente utilizado como metal de adição uma liga de prata. Observa-se que a molhabilidade ocorre somente sobre o cobre e não sobre o aço carbono. A consequência desta combinação foi que o metal de adição não penetrou na folga, impossibilitando assim a brasagem.

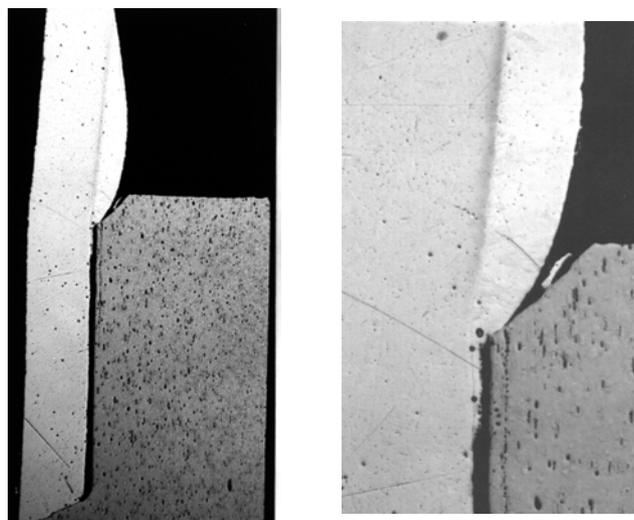


Figura 15 : Exemplo de caso real onde a ausência de molhabilidade não permitiu a ocorrência de efeito capilar, impossibilitando a brasagem.

3.3. Folga na brasagem

Demonstrou-se que o enchimento da folga entre os materiais base depende da capacidade do metal de adição fundido molhar o material base. Além disso, o enchimento ocorre mais facilmente quanto menor a folga. Poderia-se, então, imaginar que a folga a ser utilizada deveria ser a menor possível, pois assim seria facilitado o seu enchimento. Infelizmente este conceito está equivocado, pois a redução excessiva da folga acarreta a dificuldade da atuação do fluxo, que não realiza sua função adequadamente em espaços muito pequenos.

Assim como a folga não deve ser excessivamente pequena, ela também não deve ser excessivamente grande, pois o efeito capilar seria pequeno, o que dificulta o seu enchimento. Conclui-se, portanto, que a folga a ser utilizada deva estar compreendida dentro de uma certa faixa, onde sabidamente o fluxo atuará adequadamente e o efeito capilar seja satisfatório, garantindo assim um adequado enchimento da folga.

As folgas a serem utilizadas **geralmente** estão na faixa de 0,05 a 0,20 mm, dependendo do metal de adição, do tipo de fluxo e do tipo de junta utilizada. Na tabela 1 estão indicados as folgas recomendadas 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 para atuarem satisfatoriamente.

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 |

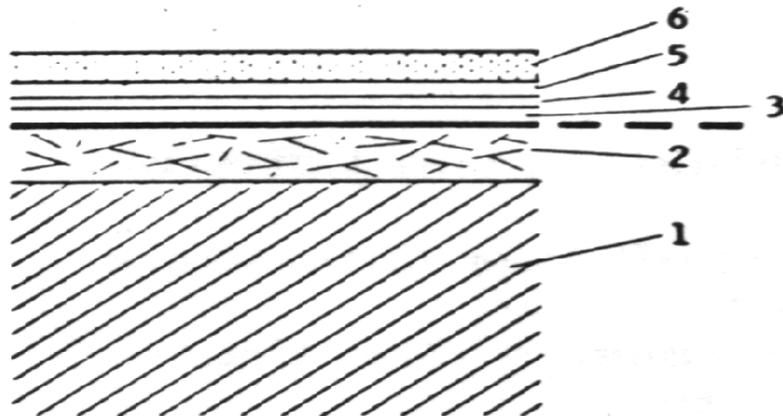
Importante !!

As folgas mostradas na tabela 1 são recomendadas na temperatura de brasagem.

4. Agentes fluxantes

Antes de realizarmos uma brasagem, deve-se proceder a limpeza da superfície dos materiais base, que devem estar isenta de óleos ou graxas. Isto porque o óleo ou graxa, quando aquecidos, produzem resíduos que ficam impregnados na superfície dos materiais, impedindo que o metal de adição molhe os materiais base, e como consequência inviabilize a brasagem. Normalmente tais produtos são eliminados através de uma operação de desengraxe, realizada por solventes industriais.

A superfície dos materiais já desengraxada é composta de uma série de diferentes camadas, praticamente invisíveis, mostradas esquematicamente na figura 16.



1 - metal ; 2 - zona encruada; 3 - camada de óxidos; 4 - camada de gases absorvidos;
5 - camada de umidade adsorvida; 6 - camada de moléculas polarizadas.

Figura 16 : Característica da superfície dos materiais metálicos.

As camadas 1 e 2 representam o metal propriamente dito, onde encontramos os átomos do metal (por exemplo : nos aços podemos ter átomos de ferro, carbono, manganês, enxôfre, etc). As camadas 4, 5 e 6 são facilmente removidas através do aquecimento do metal, não representando portanto qualquer impecilho à brasagem. Já a camada 3 é composta de óxidos, que impedem a ocorrência de molhabilidade, devendo portanto ser removido. Este é a primeira função a ser exercido pelo agente fluxante - Eliminar a camada de óxidos superficiais dos materiais base, viabilizando assim a ocorrência de molhabilidade, e conseqüentemente a brasagem.

Durante o aquecimento ao ar de qualquer metal, este tende a oxidar-se devido a presença de oxigênio na atmosfera. Tal oxidação deve igualmente ser evitada, pois caso contrário a brasagem não seria possível. Eis aí a segunda função do agente fluxante : Evitar que os materiais base sofram oxidação durante o aquecimento na brasagem.

Além dos materiais 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.

4.1. Fluxos

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 brasados para fornecer as condições de molhabilidade necessárias a brasagem.* Devem ainda apresentar as seguintes características :

1. não atacar ou reagir com o material base
2. 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;
3. apresentar boa molhabilidade e fluidez sobre o material base, espalhando-se adequadamente sobre as superfícies a serem brasadas;
4. ser facilmente removido após a brasagem.

Os fluxos atuam diretamente sobre os óxidos superficiais do material base, de modo a removê-los. Um exemplo simples, para entendermos a atuação do fluxo, pode ser dada na brasagem (fraca ou soldagem branca) de cobre, utilizando-se cloreto de zinco e água, que reagem entre si formando óxido de zinco e ácido clorídrico.



O ácido clorídrico reage com o óxido de cobre presente na superfície, promovendo sua redução, através da reação :



O resíduo formado é solúvel em água, sendo portanto facilmente retirado através de um lavagem.

Existem diversos tipos de fluxos, que são utilizados em função dos materiais base e dos metais de adição. Isto se deve ao fato de que os diferentes materiais apresentam diferentes óxido superficiais. Por exemplo, no aço carbono temos principalmente óxido de ferro, enquanto no aço inoxidável temos 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 disto é que o fluxo a ser utilizado dependerá do óxido a ser removido. Assim, um fluxo que é adequado para o cobre, não é adequado para o alumínio, por exemplo.

Outra característica importante do fluxo é a chamada faixa de temperatura de atuação. Isto significa entre quais temperaturas o fluxo é eficiente, o que serve para orientar qual o metal de adição aplicável.

Pelo exposto, conclue-se que o fluxo a ser utilizado em uma brasagem dependerá do material base e do metal de adição. Na tabela 2 são descritos alguns tipos de fluxo, segundo a classificação da AWS. Para cada tipo de fluxo, está indicado qual o material base a ser brasado, bem como os materiais 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 contendo 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 contendo 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 contendo Al e Mg. Aplicável para metais duros. | utilizado exclusiv. na brasagem por chama, como gasflux |

Conforme mostrado na tabela 2, 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 através da passagem deste por um recipiente contendo o fluxo. Apresenta algumas vantagens : 1) facilita o acesso do fluxo no local da brasagem; 2) dá uma melhor aparência a região brasada, pois evita a oxidação do material base; 3) quando utilizado em conjunto com fluxo sólido, reduz a quantidade necessária deste.

4.2. Atmosferas de brasagem

As atmosferas de brasagem são gases contendo hidrogênio (H₂) ou monóxido de carbono (CO), que atuam de forma a reduzir os óxidos superficiais, por reações genéricas do tipo :



Sendo Me o metal em questão. Por exemplo, um óxido de ferro pode ser reduzido através da seguinte reação : $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{H}_2 \rightarrow 2\text{Fe} + 3\text{H}_2\text{O} \dots\dots\dots [8]$

Atmosferas de brasagem são utilizadas em fornos contínuos e 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. Nestes casos, os gases são fornecidos pelos fabricantes, devendo apenas serem misturados antes da injeção nos fornos.

A combustão de hidrocarbonetos, como por exemplo o propano, misturado ao ar atmosférico resulta numa mistura de gases contendo nitrogênio, hidrogênio, monóxido e dióxido de carbono. A quantidade de cada gás obtida da combustão depende da relação de mistura propano/ar atmosférico, dando origem às chamadas atmosferas endotérmicas e exotérmicas. Um resumo dos principais tipos de atmosferas utilizadas em brasagem pode ser vista na tabela 3.

Tabela 3 : Alguns tipos de atmosferas utilizados em brasagem, classificados segundo a AWS.

| Atmosf AWS | Origem | Composição da atmosfera [%] | | | | Ponto Orvalho | Material base | Metal de Adição | Observação |
|------------|---|-----------------------------|----------------|-------|-----------------|------------------|--|------------------------|---------------------------------------|
| | | H ₂ | N ₂ | CO | CO ₂ | | | | |
| 1 | Queima de gases | 1-5 | 87 | 1-5 | 11-12 | Temper. ambiente | cobre e latão | BAg, BCuP, RBCuZn | atmosfera exotérmica |
| 2 | Queima de gases | 14-15 | 70-71 | 9-10 | 5-6 | Temper. ambiente | cobre, latão, aço médio C, monel e liga baixo Ni | BCu, BAg, RBCuZn, BCuP | atmosfera endotérmica descarbonetante |
| 3 | Queima de gases | 15-16 | 73-75 | 10-11 | | -40°C | idem 2 e aços alto C | idem 2 | atmosfera endotérmica |
| 4 | Queima de gases | 38-40 | 41-45 | 17-19 | | -40°C | idem 3 | idem 2 | atmosfera carbonetante |
| 5 | Amônia dissociad | 75 | 25 | - | - | -54°C | idem 3 e ligas contendo Cr | idem 2 e BNi | |
| 6A | Mistura purificada de H ₂ - N ₂ | 1-30 | 70-99 | - | - | -68°C | idem 3 | idem 5 | |

Conforme mostrado na tabela 3, verifica-se que há uma indicação do ponto de orvalho de cada tipo de atmosfera de brasagem. Este ponto, que corresponde a uma temperatura,

indica aproximadamente qual o nível de vapor d'água presente no gás, que pode dificultar a redução, conforme previsto pela equação 6, onde a reação passaria a ocorrer em sentido contrário, oxidando o material base.

4.3. 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 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 base, o restringe seu uso ao cobre e suas ligas.

4.4. Corrosão provocada pelo fluxo

O resíduo do fluxo após a brasagem deve ser retirado, sempre que possível, para evitar problemas quanto a possível corrosão. A retirada destes resíduos geralmente é feita através de 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 devendo-se imaginar que somente o banho em água quente seja suficiente em qualquer caso.

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.

5. Metais de adição

A adequada seleção do metal de adição a ser utilizada em uma 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 :

- 1) apresentar boa molhabilidade sobre os materiais base a serem brasados;
- 2) adequada temperatura de fusão (ou intervalo de temperatura de fusão) em relação aos materiais base e fluidez que permita o metal fundido penetrar adequadamente nas juntas por efeito capilar;
- 3) apresente as propriedades requeridas ao componente brasado. Por exemplo : resistência mecânica adequada, condutividade elétrica necessária, etc;
- 4) não reagir excessivamente com o material base, causando erosão ou formando fases frágeis;
- 5) 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 dizemos que existem diferentes famílias de metais de adição, sendo que cada família caracteriza-se por conter os mesmos (ou quase) elementos. As principais famílias de metais de adição que normalmente são utilizadas na brasagem de aços e ligas de cobre são :

- a) ligas contendo prata-cobre-zinco-cádmio : Ag-Cu-Zn-Cd
- b) ligas contendo prata-cobre-zinco-estanho : Ag-Cu-Zn-Sn
- c) ligas contendo prata-cobre ; Ag-Cu
- d) ligas contendo prata-cobre-estanho : Ag-Cu-Sn
- e) ligas contendo cobre-estanho : Cu-Sn (bronze)
- f) ligas contendo cobre-zinco : Cu-Zn (latões)
- g) ligas contendo cobre-fósforo-prata : Cu-P-Ag
- h) cobre puro : Cu
- i) ligas contendo cobre-mangânes-estanho : Cu-Mn-Sn

Estas famílias de materiais de adição diferenciam-se entre si por apresentarem, principalmente, diferentes temperaturas de fusão. Tal característica é de fundamental importância na brasagem, pois quanto menor a temperatura de fusão, menor será o aquecimento necessário, mais barata e mais rápida será a brasagem. Na figura 13 é

mostrada aproximadamente em que faixa de temperatura de brasagem situam-se cada uma destas famílias.

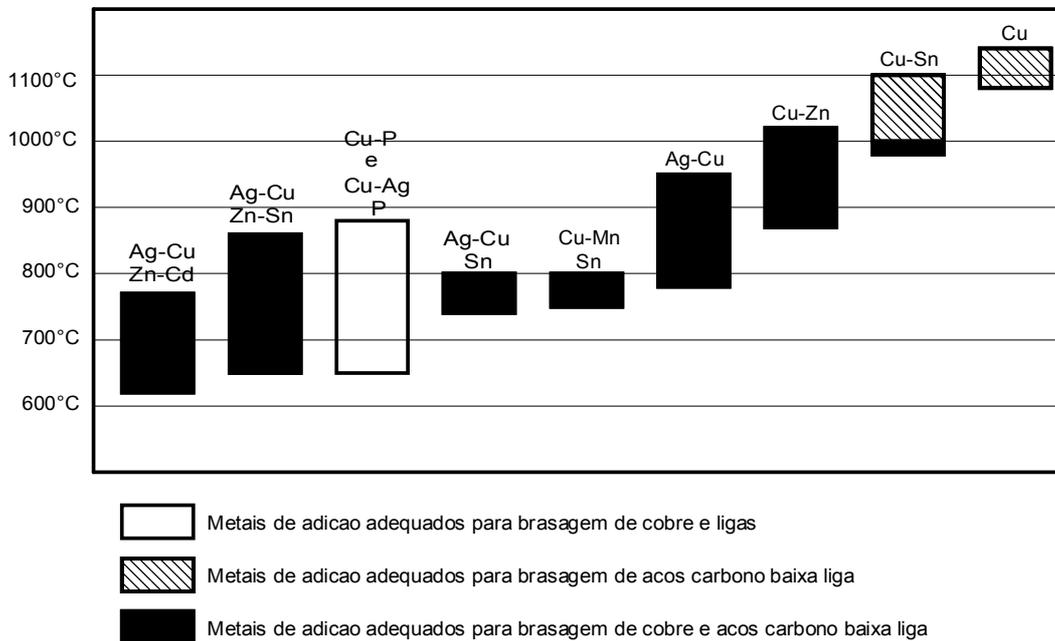


Figura 13 : Temperatura de brasagem aproximada para as diferentes famílias de metais de adição utilizadas na união de cobre e suas ligas e aços carbono.

As famílias de metais de adição mostradas são classificadas segundo a AWS de maneira simplificada, sendo que diversas famílias são agrupadas da seguinte forma :

- BAg - reúne as famílias Ag-Cu-Zn-Cd, Ag-Cu-Zn-Sn, Ag-Cu, Ag-Cu-Sn
- BCuP - família Cu-P-Ag
- BCu - cobre puro
- RBCuZn - família Cu-Zn
- Família Cu-Sn : não classificada segundo AWS – classificada pela norma DIN

Na tabela 4 são mostrados alguns metais de adição segundo a classificação AWS, indicando a temperatura de fusão (solidus e liquidus) e a respectiva composição química. Comparando os diversos metais de adição verifica-se que as ligas da família Ag-Cu-Zn-Cd são as que apresentam as menores temperaturas liquidus, o que as torna muito interessante para a brasagem. Isto é ocasionado pela presença do cádmio e do zinco, que reduz significativamente a temperatura liquidus destas ligas comparativamente às ligas da família Ag-Cu. Estes elementos são, entretanto, voláteis, e tendem a evaporar durante o aquecimento na brasagem.

Tabela 4 : Alguns tipos de metais de adição classificados segundo AWS.

| Classific. AWS | Composição química [% em peso] | | | | | | | T _{solidus} [°C] | T _{liquidus} [°C] |
|------------------------------------|--------------------------------|----------|--------------|---------|-----------|-----------|--------|------------------------------|-------------------------------|
| | Ag | Cu | Zn | Cd | Sn | P | outros | | |
| B _{Ag} -1 | 44 - 46 | 14 -16 | 14 - 18 | 23 - 25 | | | 0,15 | 607 | 618 |
| B _{Ag} -2 | 34 - 36 | 25 - 27 | 19 - 23 | 17 - 19 | | | | 607 | 702 |
| B _{Ag} -5 | 44 - 46 | 29 - 31 | 23 - 27 | | | | | 663 | 743 |
| B _{Ag} -8 | 71 - 73 | restante | | | | | | 779 | 779 |
| B _{Ag} -18 | 59 - 61 | restante | | | 9,5-10,5 | | | 602 | 718 |
| B _{Ag} -28 | 39 - 41 | 29 - 31 | 26 - 30 | | 1,5 - 2,5 | | | 649 | 710 |
| B _{Cu} P-1 | - | restante | | | | 4,5 - 5,2 | | 710 | 924 |
| B _{Cu} P-2 | - | restante | | | | 7,0 - 7,5 | | 710 | 793 |
| B _{Cu} P-4 | 5,8 - 6,2 | restante | | | | 7,0 - 7,5 | | 643 | 718 |
| B _{Cu} -1 | - | 99,9 | | | | 0,075 | 0,10 | 1083 | 1083 |
| R _B C _u Zn-A | | 57 - 61 | restant e | | 0,25-1,0 | | 0,50 | 888 | 899 |
| Metais de adição segundo Norma DIN | | | | | | | | | |
| L-CuSn6 | | 94 | 6 | | | | | | |
| L-CUSn12 | | 88 | 12 | | | | | | |

A família dos metais de adição Ag-Cu-Zn-Cd é a 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 minimizada através do 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 vem sendo substituídas pelas ligas da família Ag-Cu-Zn-Sn, que requerem uma maior temperatura de brasagem. Isto tem ocorrido devido ao interesse em eliminar o uso de ligas contendo cádmio, que é considerado um elemento tóxico e muito prejudicial a 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, conforme pode ser visto na figura 14, onde é mostrado o diagrama de fases Ag-

Cu. O eutético é formado por duas soluções sólidas, o que lhe confere excelentes propriedades mecânicas e elevada ductilidade.

Ag - Cu

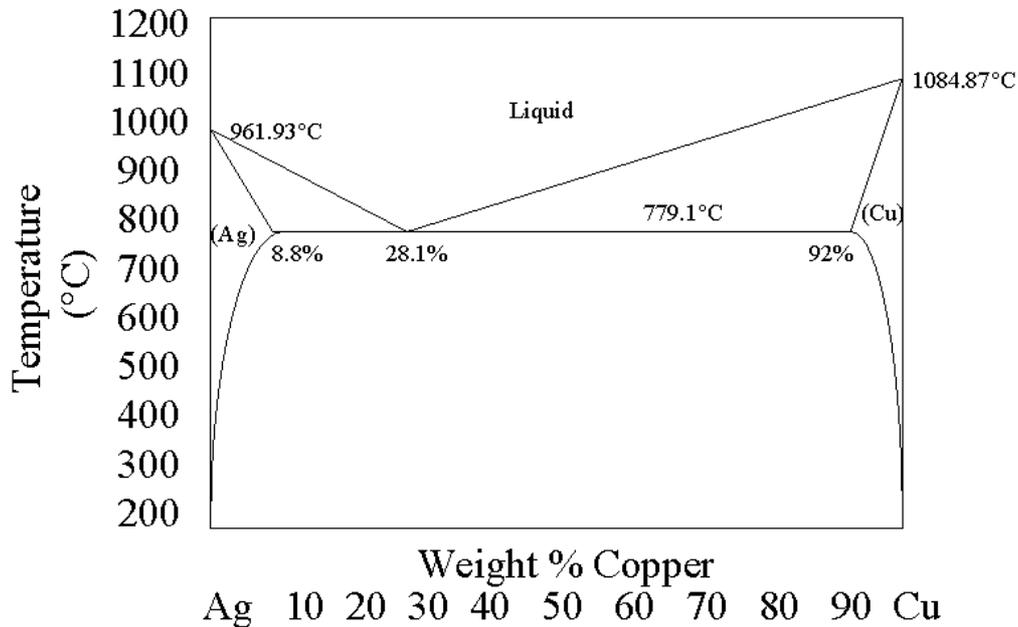


Figura 14 : Diagrama de fases Ag-Cu.

As ligas da família Ag-Cu-Sn em verdade se resumem a apenas uma liga contendo 60%Ag-30%Cu e 10%Sn, cuja temperatura liquidus 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 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. A temperatura de fusão depende do teor de P, conforme mostrado na figura 15. 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_3P . 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, conforme mostrado na figura 16. Com estes compostos tendem a ficar alinhados na interface entre o aço e o metal de adição, conforme mostrado na figura 17, há uma fragilização acentuada da junta brasada.

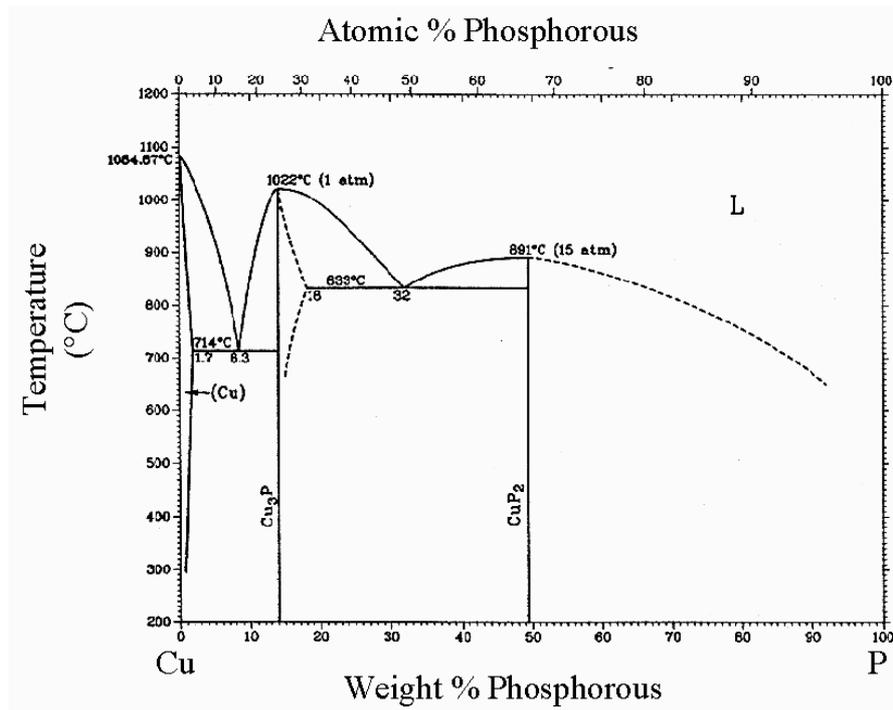


Figura 15 : Diagrama de fases Cu-P.

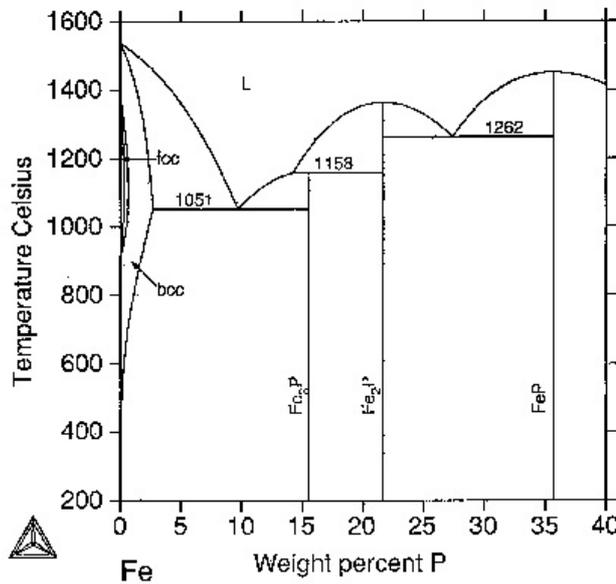


Figura 16 : Diagrama de fases Fe-P.

Fe-P Crystal Structure Data

| Phase | Pearson Symbol | Struktur Bericht | Prototype | Model |
|-------------------|----------------|------------------|-------------------|-------|
| fcc | cF4 | A1 | Cu | RK |
| bcc | cI2 | A2 | W | RK |
| Fe ₃ P | hI32 | DO ₈ | Ni ₃ P | CE |
| Fe ₂ P | hI19 | C22 | Fe ₂ P | CE |
| FeP | oI18 | B31 | MnP | CE |

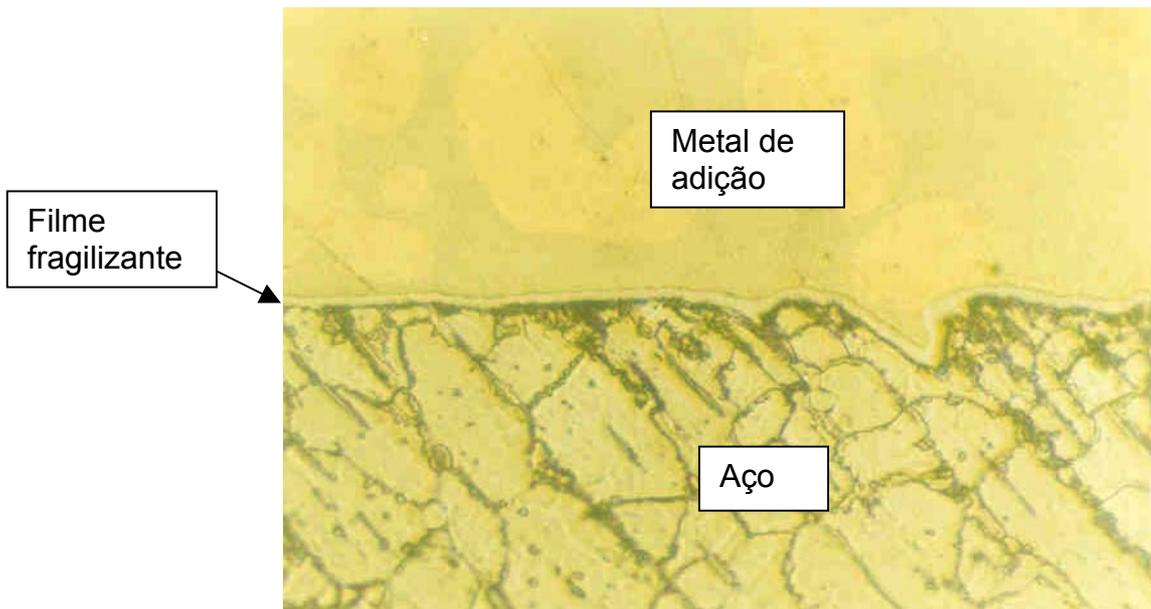


Figura 17 : Formação de um filme de compostos intermetálicos do tipo Fe_2P e Fe_3P na interface entre aço e metal de adição contendo P.

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 a ausência de prata em sua composição. São normalmente aplicadas na brasagem em forno, por não formarem vapores metálicos devido a 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, conforme pode ser observado na figura 18.

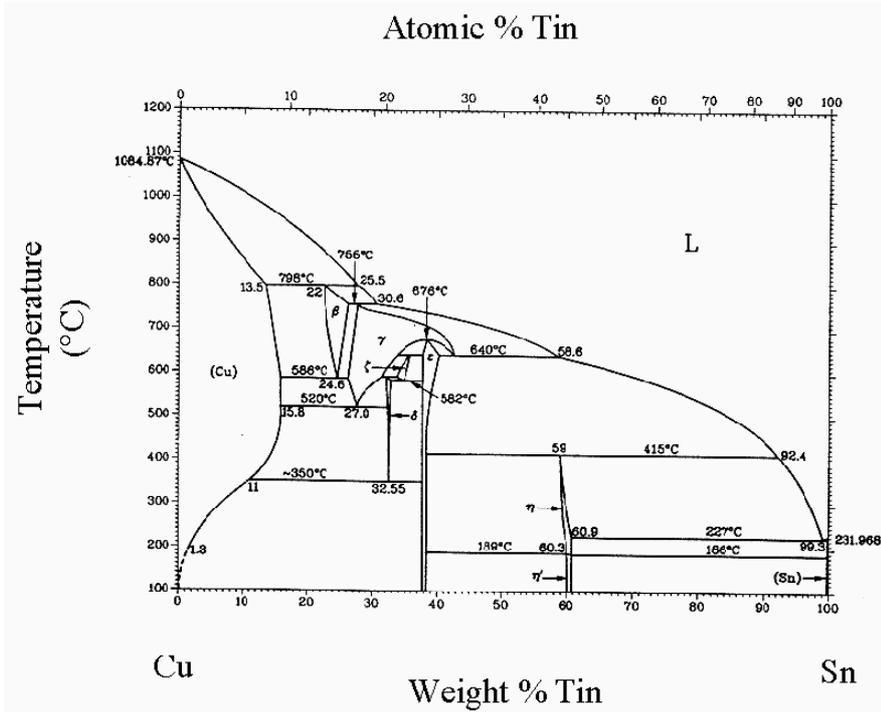


Figura 18 : Diagrama de fases Cu-Sn.

As ligas da família Cu-Zn requerem temperaturas de brasagem normalmente acima de 900°C, conforme mostrado na figura 19. A presença do Zn impede a brasagem em fornos, devido a 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.

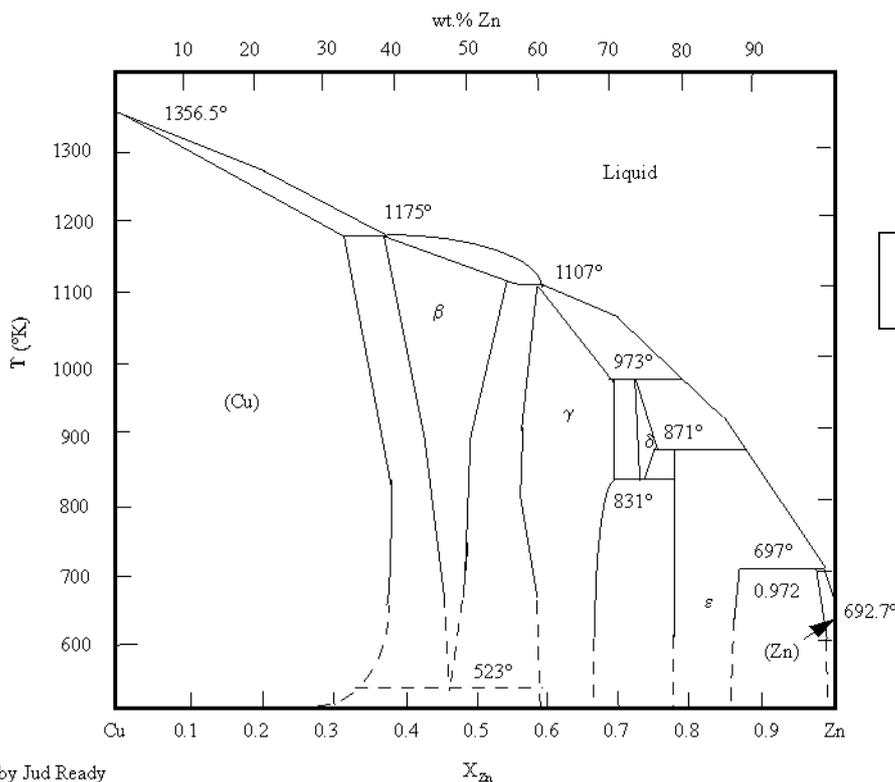


Figura 19 : Diagrama de fases Cu-Zn.

5.1. Interação Metal de adição - Material base

Em princípio, na brasagem é desejável que ocorra pouca ou nenhuma interação entre o metal de adição e o material base. Infelizmente isto não ocorre sempre, uma vez que a própria molhabilidade é um sinal de que alguma afinidade existe entre o metal de adição e o material base. Considerando que a interação exista, deve-se evitar casos extremos, onde tal interação comprometa seriamente a qualidade da junta brasada. Dois exemplos clássicos permitem compreender quão negativo pode ser esta interação, de forma que possamos tomar os cuidados necessários para evitá-la.

O primeiro exemplo pode ser dado pela figura 20, onde é mostrada uma junta brasada cobre - aço carbono, tendo-se utilizado a liga eutética da 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. Em verdade quase todas as ligas utilizadas na brasagem do cobre tendem a provocar erosão, devendo-se portanto evitar aquecimentos desnecessários. A origem desta erosão pode ser explicada pela análise do diagrama de fases Ag-Cu, mostrado na figura 14. Quando aquecemos 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.

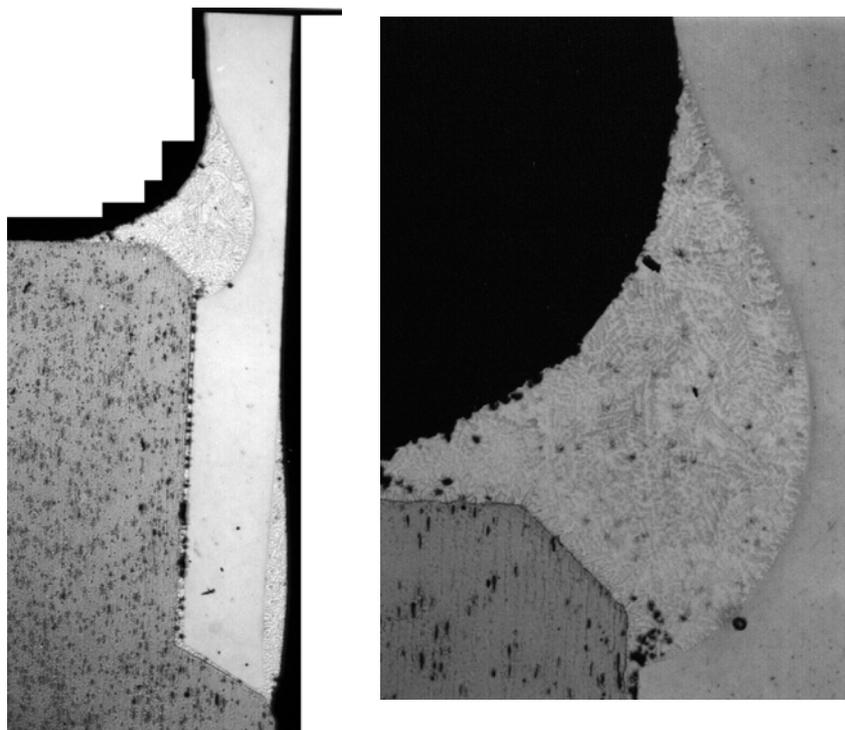


Figura 20 : Exemplo da erosão provocada pela interação metal de adição-material base.

O segundo exemplo ocorre quando elementos presentes no metal de adição formam os chamados compostos intermetálicos com algum elemento do material base. É o caso quando utilizamos metais de adição da família Cu-P-Ag, na brasagem de aços carbono. O fósforo presente no metal de adição tem forte atração pelo ferro presente no aço, de forma que quando efetuamos a brasagem forma-se um composto intermetálico do tipo Fe_2P e Fe_3P . Este composto é muito duro, e forma-se como um filme entre o aço e o metal de adição, causando excessiva fragilidade da junta brasada, conforme mostrado na figura 17. Na aula prática será demonstrada tal fragilização.

6. Brasagem metal-cerâmica

Entre as aplicações da brasagem entre materiais metálicos e cerâmicas 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 temos 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 delas. Duas das mais conhecidas estão representadas na figura 21, sendo uma conhecida como a técnica da metalização e a outra como a técnica do metal ativo. 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 substituía 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. Os 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. Para ler sobre o assunto, veja Soldagem e Inspeção, ano 7, vol 1, setembro de 2002.

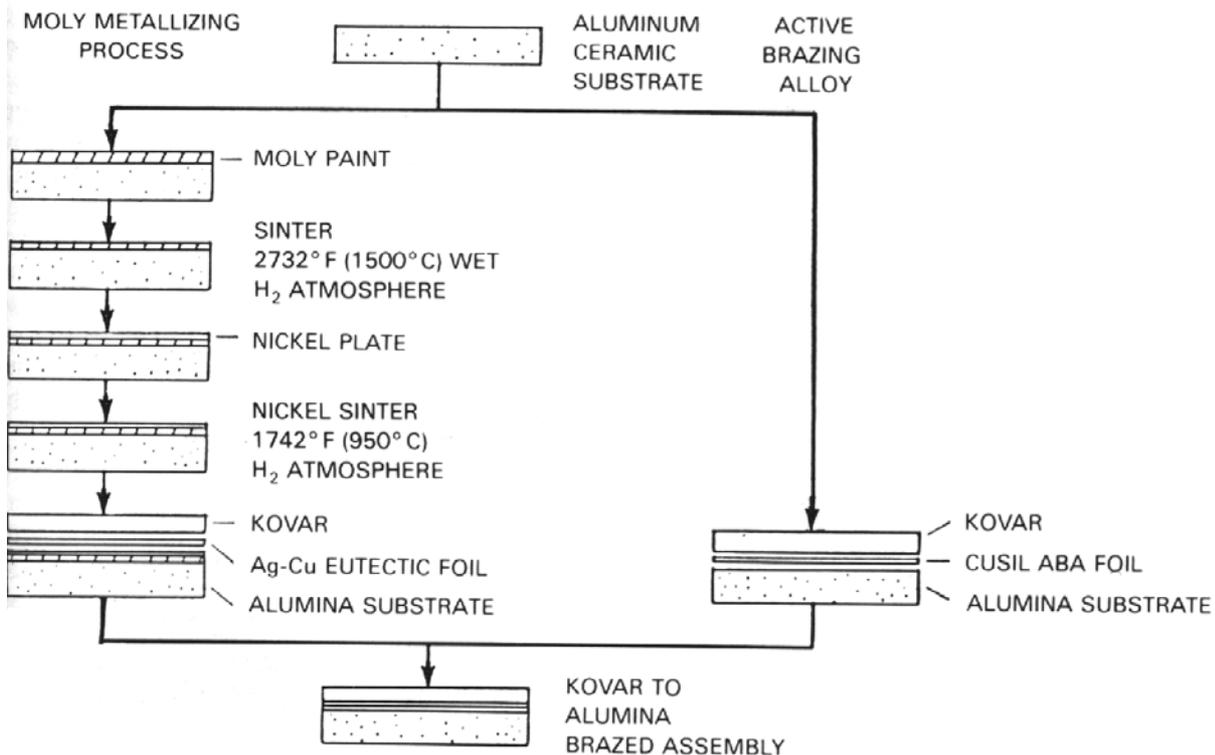
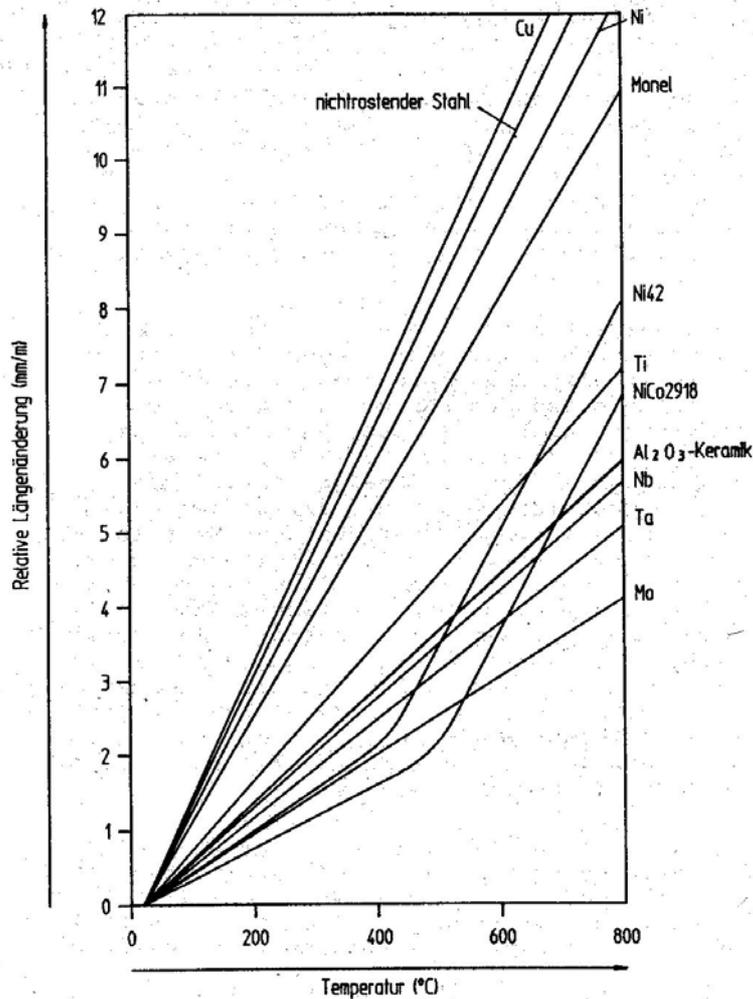


Figura 21 : Comparativo da brasagem entre alumina e a liga Kovar entre a técnica de metalização e a técnica do metal ativo.

Outro aspecto de deve ser levado em conta na brasagem entre a cerâmica e os materiais metálicos e o coeficiente de dilatação térmica dos materiais envolvidos. Na brasagem, durante o aquecimento não há problemas 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 a ruptura da cerâmica. Para evitar este problema muitas vezes tem sido utilizados metais base com coeficiente de dilatação próximo ao da cerâmica a ser brasada. Isto pode ser visto na figura 22, onde são mostrados curvas de dilatação térmica de diversos materiais. 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.



Relative Längeränderung – dilatação relativa (mm/m)

Nichtrostender Stahl – aço inoxidável

Figura 22 : Curvas de dilatação térmica de diferentes materiais.

Bibliografia

1. Brazing Handbook - AWS - 1991
2. Hartlötten Grundlagen und Anwendungen - Lutz Dorn u.a. - Expert Verlag, 1985
3. Pesquisas desenvolvidas durante o Doutorado - UFSC - Florianópolis / JF - Jülich – Alemanha
4. Lison, R : Wege zum Stoffschluss über Schweiss und Lötprozesse. DVS Berichte Band 131, 1998.

Relatório 2 – conteúdo mínimo

- Descrição dos experimentos, considerando :
 - a) Diferença entre molhabilidade e capilaridade e a relação existente entre elas
 - b) Características dos fluxos minerais
 - c) Metais de adição autofluxantes
 - d) Interações entre metal de adição e metal base – Cu e Sn ; aço-metal de adição contendo P
 - e) A relevância da folga