

## 1ª Aula – Conceitos fundamentais e classificação

### 1.1– Alguns exemplos de soldagem



Materiais : \_\_\_\_\_

Processo de soldagem : \_\_\_\_\_



Materiais : \_\_\_\_\_

Processo de soldagem : \_\_\_\_\_



Produto : \_\_\_\_\_

Materiais : \_\_\_\_\_

Processo de soldagem : \_\_\_\_\_



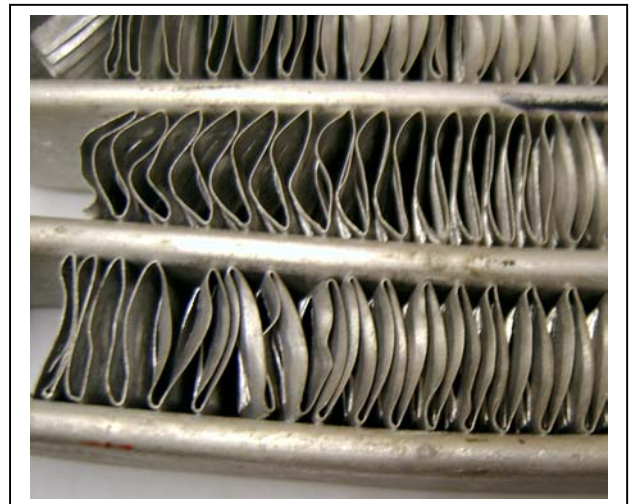
Materiais : \_\_\_\_\_

Processo de soldagem : \_\_\_\_\_



Materiais : \_\_\_\_\_

Processo de soldagem : \_\_\_\_\_



Produto : \_\_\_\_\_

Materiais : \_\_\_\_\_

Processo de soldagem : \_\_\_\_\_



Materiais : \_\_\_\_\_

Processo de soldagem : \_\_\_\_\_



Materiais : \_\_\_\_\_

Processo de soldagem : \_\_\_\_\_



Materiais : \_\_\_\_\_

Processo de soldagem : \_\_\_\_\_



Produto : \_\_\_\_\_

Materiais : \_\_\_\_\_

Processo de soldagem : \_\_\_\_\_



Materiais : \_\_\_\_\_

Processo de soldagem : \_\_\_\_\_



Materiais : \_\_\_\_\_

Processo de soldagem : \_\_\_\_\_



Materiais : \_\_\_\_\_

Processo de soldagem : \_\_\_\_\_

## 1.2 - Introdução

A definição de soldagem é algo bastante simples, se considerarmos a escala microscópica envolvida. Neste nível, entende-se por soldagem de diferentes peças ou materiais como sendo a aproximação de átomos a uma distância de equilíbrio, em que a energia potencial é minimizada. Nesta situação, ao tentarmos aproximar mais ou distanciar estes átomos, surgirão forças que tendem a reestabelecer a distância de equilíbrio (ver teoria de poço de potencial - Callister, cap 1)

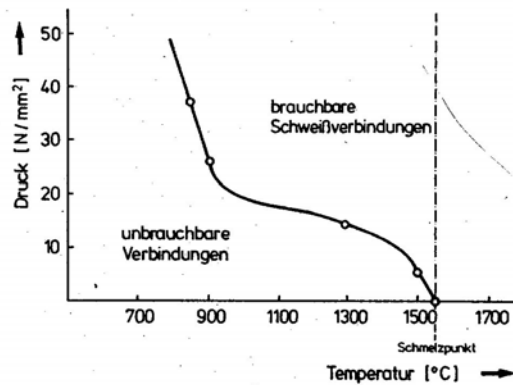
A aproximação dos átomos até a distância de equilíbrio garante a soldagem, e pode ser realizada de diversas formas, que podem ou não requerer a fusão dos materiais envolvidos. A soldagem que envolve a fusão dos materiais é classificada como **soldagem por fusão**, existindo inúmeras técnicas que se utilizam deste preceito. A soldagem que não envolve fusão é denominada **soldagem no estado sólido**, destacando-se neste caso a soldagem por difusão e a soldagem por fricção. Existe ainda uma terceira forma de soldagem onde a união de dois materiais base é realizada pela fusão de um terceiro material, que se adere (mollha) os materiais base sem fundi-los. Neste caso temos a chamada **brasagem**.

A soldagem por fusão nos é intuitivamente compreensível e envolve a fusão e solidificação das partes a serem unidas. Durante a fusão a distância de equilíbrio é quebrada pelo fornecimento de energia (aquecimento), e as ligações se tornam mais flexíveis, permitindo chegar-se a chamada fase líquida. O subsequente resfriamento acarreta a solidificação, onde os átomos se aproximam e se ordenam formando as estruturas cristalinas (CCC, CFC, HC, fases intermetálicas, eutéticos, etc) na distância de equilíbrio. Encerrada a solidificação, a união está completa.

No caso da soldagem no estado sólido deve-se considerar a temperatura e a pressão ser exercida na interface de soldagem. Como sabemos, os materiais apresentam rugosidade superficial, de forma que quando aproximamos as partes a serem unidas no estado sólido, apenas algumas partes se tocam. Para realizar esta aproximação, utiliza-se o aquecimento para facilitar a deformação plástica através da pressão envolvida. Evidentemente o aquecimento acelera ainda a difusão atômica (Callister, cap 5), que favorece a soldagem dos materiais pela troca de posição dos átomos na região da interface de união. Desta forma, a soldagem no estado sólido por ser obtida através a da combinação da aplicação de pressão e aquecimento na interface de união.

Existe uma dependência entre a temperatura e a pressão exercida para obter-se a soldagem no estado sólido. Um exemplo desta dependência pode ser vista na figura 1 (Lison, 1998), válida para a soldagem de ferro puro. Quanto maior a temperatura de soldagem (neste caso, abaixo da temperatura de fusão dos materiais base), menor é a pressão necessária para a obtenção de uniões satisfatórias. Acima da temperatura de fusão não é necessária a aplicação de pressão, pois a fusão e subsequente solidificação se encarrega de aproximar os átomos.

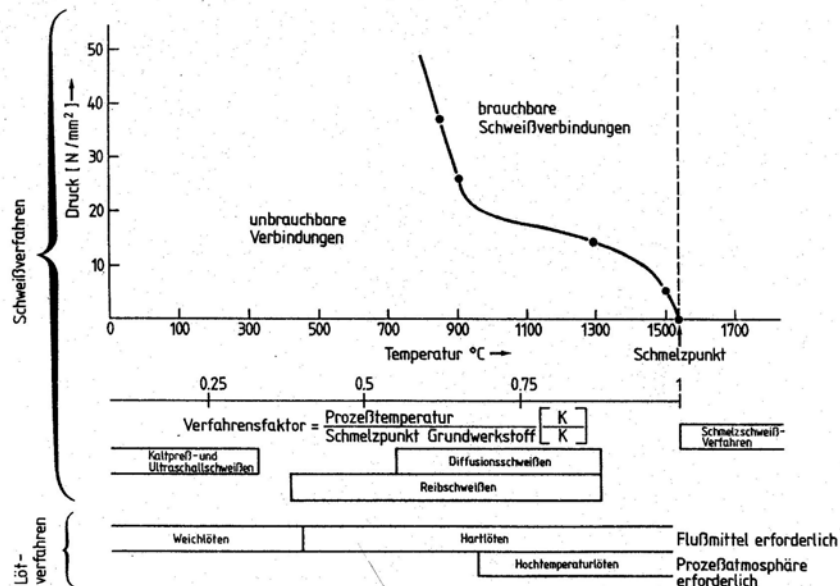




Druck : pressão      Temperatur : temperatura      Schmelzpunkt : temperatura de fusão  
 Brauchbare Schweißverbindungen : uniões por soldagem satisfatórias  
 Unbrauchbare Verbindungen : uniões não satisfatórias

**Figura 1** : Combinações de temperatura e pressão para união de ferro puro (Lison, 1998).

Uma forma mais abrangente de mostrar as alternativas de soldagem do ferro puro (exemplo didático) pode ser visto na figura 2. Além da soldagem no estado sólido estão consideradas a soldagem por fusão e a brasagem. Para baixos fatores de processo são aplicáveis as técnicas conhecidas como soldagem a frio e soldagem por ultra-som (estado sólido) e a brasagem fraca (por utilizar ligas de baixa resistência mecânica). Para fatores médios e altos são aplicáveis a soldagem por fricção e a soldagem por difusão (estado sólido) e a brasagem forte e a brasagem a alta temperatura.



Verfahrensfaktor : fator de processo  
 Schweißverfahren : processo de soldagem  
 Lötverfahren : Processo de brasagem  
 Prozesstemperatur : temperatura do processo  
 Schmelzpunkt Grundwerkstoff : temperatura de fusão do material base  
 Weichlöten : Brasagem fraca      Hartlöten : Brasagem forte      Hochtemperlöten : Brasagem a alta temperatura  
 Kaltpress und Ultraschallschweißen : Soldagem a frio e por ultrassom

**Figura 2** : Faixas de temperatura para soldagem de diferentes processos de soldagem e brasagem do ferro puro (Lison, 1998).

## 1.3 - Classificação dos processos de soldagem

Nas figuras 3 e 4 são mostradas a classificação da AWS para os distintos processos de soldagem e corte, nas versões em inglês e português. Esta apresentação é feita porque no Brasil ainda se utiliza muito a nomenclatura em inglês, o que implica na necessidade de conhecê-la. A classificação faz uma separação básica entre :

- **Soldagem a arco elétrico** : envolve os processos onde o aquecimento é gerado pela abertura de um arco elétrico, obtido pela ionização de um gás. É considerado um processo de soldagem por fusão, sendo extensamente utilizados em metalúrgicas de pequena a grande porte. Os equipamentos são de custo acessível, entretanto alguns processos requerem mão-de-obra treinada, o que encarece os custos. Por promover um aquecimento significativo das peças a serem soldadas, normalmente ocorrem pequenas distorções e geração de tensões residuais;
- **Soldagem no estado sólido** : a união é realizada no estado sólido, sendo aplicada para casos em que se justifique o investimento em equipamentos, para grandes escalas de produção e soldagem de materiais dissimilares (diferentes), devido a problemas metalúrgicos.
- **Brasagem forte e fraca** : a união é realizada por um metal de adição que se funde e une os materiais base (estes não se fundem). A distinção entre forte e fraca está no tipo de metal de adição, sendo que na fraca são utilizadas ligas de baixa temperatura de fusão e baixa resistência mecânica (Exemplo : ligas Pb-Sn) enquanto que na forte são utilizadas ligas de temperatura de fusão acima de 450C e elevada resistência mecânica (Exemplo : ligas Ag-Cu-Zn-Cd). É extensamente utilizada nas indústrias de refrigeração, eletro-eletrônica, autopeças pela versatilidade em soldar diferentes materiais, de pequena espessura (tubos de parede fina por exemplo). É a técnica de soldagem que permite soldar os mais variados tipos de materiais e configurações;
- **Soldagem por resistência** : são processos amplamente utilizados na soldagem de carroceria de automóveis e outras aplicações de soldagem de chapas finas, sendo classificado como processo por fusão. O custo do equipamento é baixo, e por não utilizar metal de adição o custo da soldagem também é baixo. O nível de treinamento do operador é mínimo, e pode ser facilmente automatizado (robôs) Obtem-se uma boa qualidade, com baixa distorção das chapas;
- **Outros** : relaciona processos como laser, feixe de elétrons, eletroescória, etc. O laser está sendo aplicada cada vez mais na indústria automotiva, e sua popularização é dificultada pelo elevadíssimo custo do equipamento. Permite soldar chapas de topo com excelente acabamento sem distorções, sendo aplicado nos chamados taylored-blanks. O feixe de elétrons é bastante interessante, entretanto a soldagem deve ser feita sob vácuo. O custo do equipamento é altíssimo e a produtividade é baixa. Existem pouquíssimas máquinas de soldagem por feixe de elétrons no país. A eletroescória é utilizada somente na indústria realmente pesada, e pode soldar grandes espessuras (por exemplo 200mm). É utilizado na indústria naval e na fabricação de turbinas hidráulicas.

Processos de soldagem e afins, segundo a AWS.

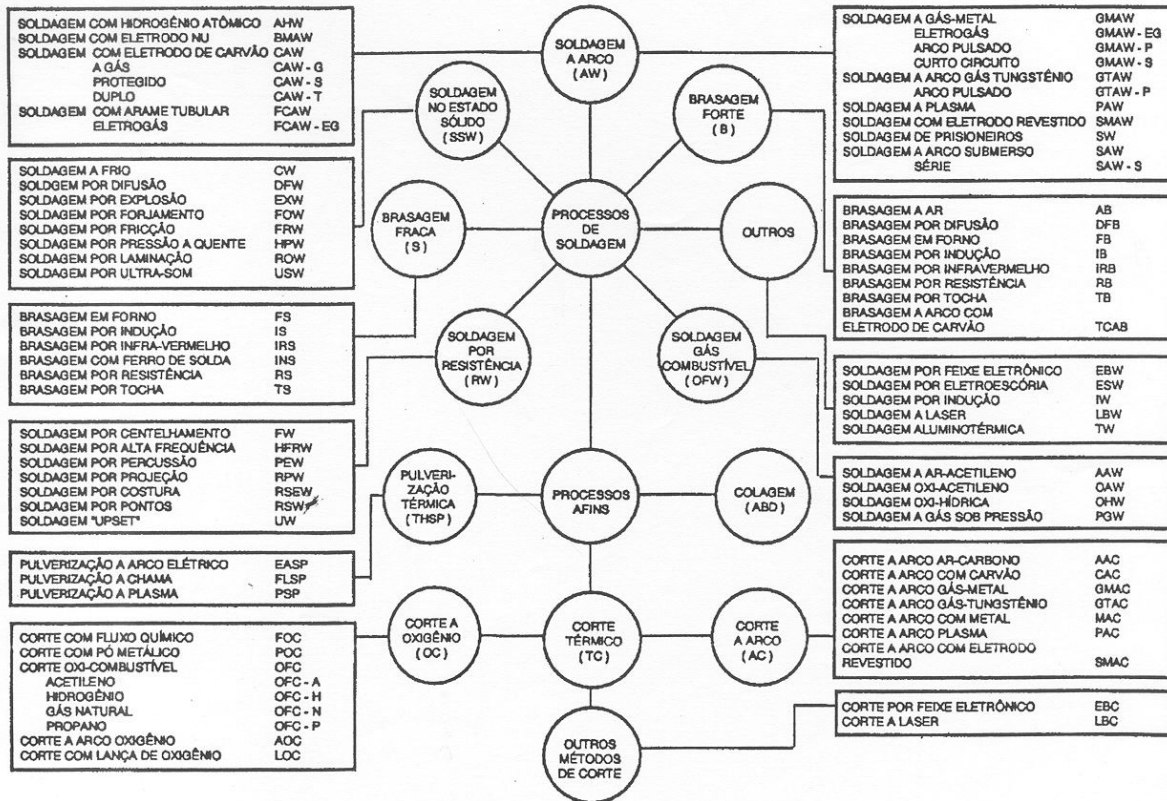


Figura 3 : Classificação dos processos de soldagem segundo a AWS (em português).

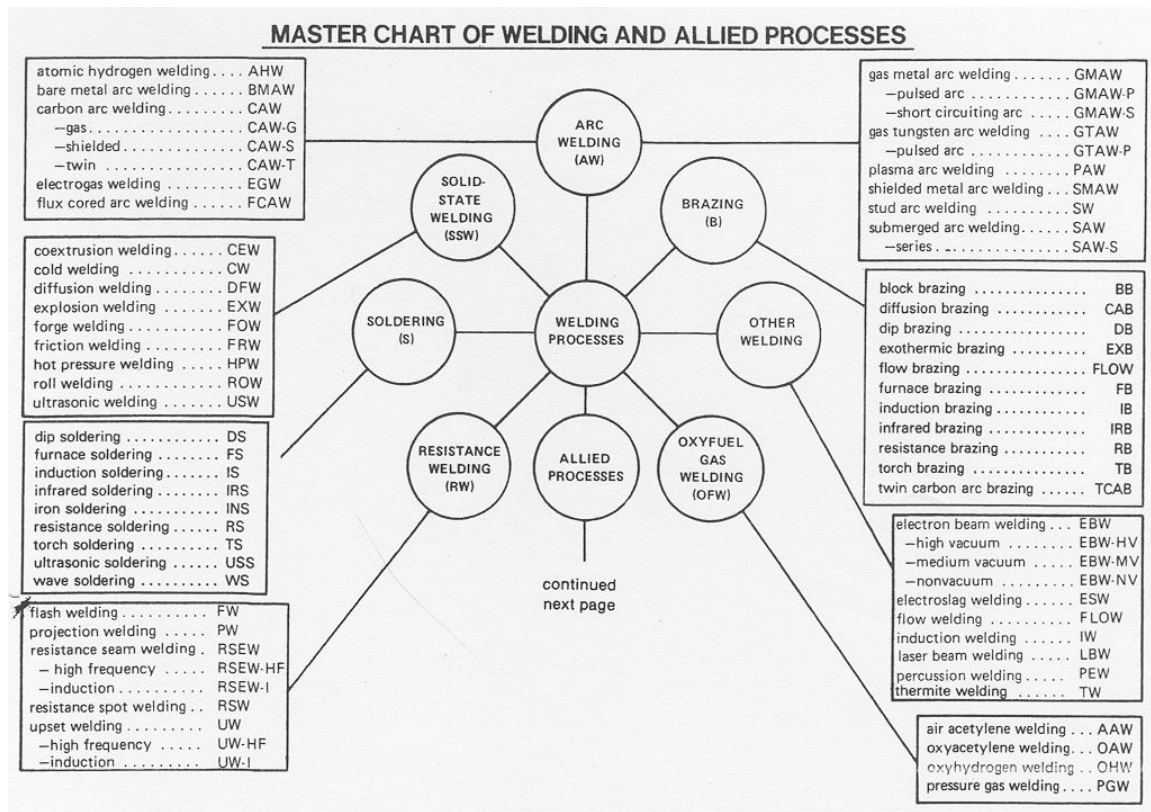


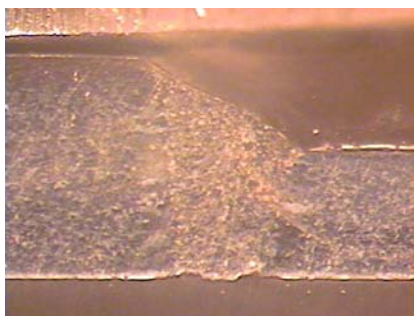
Figura 4 : Classificação dos processos de soldagem segundo a AWS (em inglês).

## 1.4 – Comentários sobre a seleção do processo de soldagem

A seleção de um processo de soldagem leva em conta inúmeros fatores, e uma análise global é bastante delicada. Faz-se necessário inicialmente entender o que ocorre na região da solda, para justificar os critérios de seleção.

Ao soldarmos diferentes peças ou materiais sempre necessitamos de aquecimento, seja localizado ou na peça toda. O aquecimento localizado decorrente da fusão ou mesmo no estado sólido, acarretam :

- Geração de tensões, que podem ocasionar dois problemas : a) [deformações ou empenamentos das peças](#). As deformações ou empenamentos são indesejáveis em algumas aplicações tais como chapas finas automotivas, por ocasionarem aspecto visual ruim. Assim sendo, nos carros são utilizados processos de soldagem que ocasionem aquecimento bem localizado e em pequenas regiões, tais como soldagem por resistência, soldagem a Laser, brasagem a Laser que minimizam as deformações e empenamentos. Nas figuras 5 e 6 são mostradas macrografias de chapas soldadas pelos processos a Laser sem material de adição e brasagem a laser com material de adição, mostrando que a região fundida é bem pequena. b) [tensões residuais nas peças](#). Tensões residuais são preocupantes quando as peças soldadas sofrem esforços mecânicos estáticos ou dinâmicos ou estão sujeitos a meios corrosivos. Os carregamentos mecânicos acrescentam ao valor da tensão residual mais tensões, favorecendo falhas mecânicas por fadiga ou mesmo falhas catastróficas sem esforços cíclicos. Existem ainda fenômenos conhecidos como corrosão sob tensão, que ocorrem quando temos a presença de tensões e um meio corrosivo. Um exemplo de falha deste tipo ocorreu recentemente na região de Curitiba. Os oleodutos da Petrobrás que se romperam na serra do mar no ano de 1999 tiveram como mecanismo inicial de falha a ocorrência de trincas formadas por este mecanismo. Outro exemplo de corrosão sob tensão muito comum ocorre nos aquecedores de água domésticos fabricados em aços inoxidáveis. Quando furam, em muitos casos foram detectados corrosão sob tensão junto aos cordões de solda do tanque de acumulação.

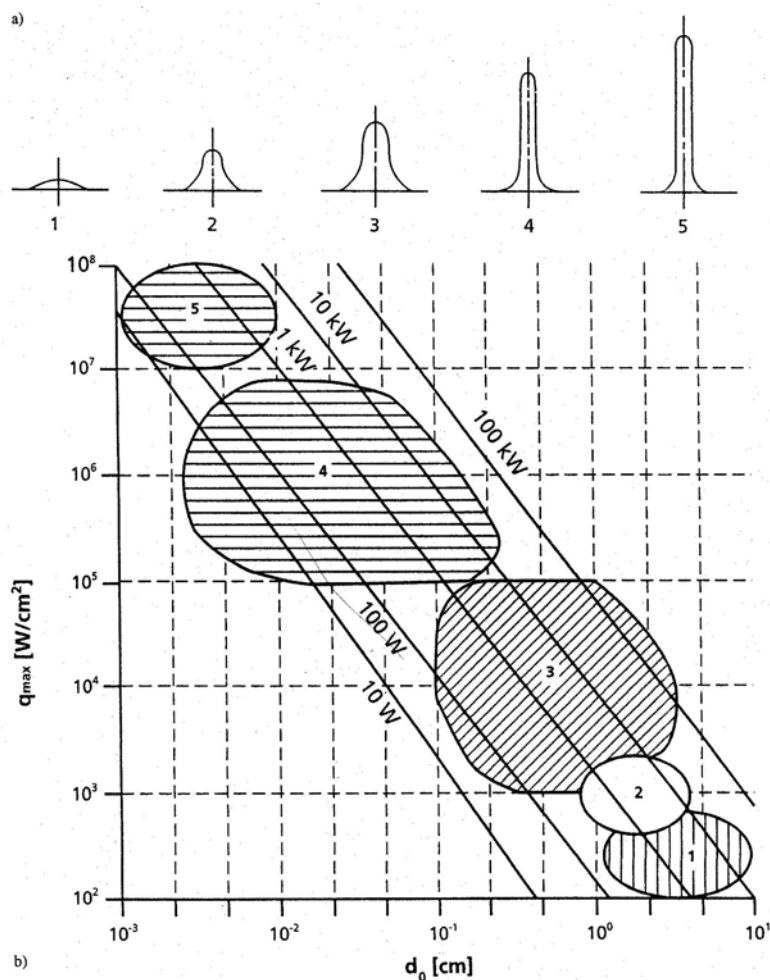


**Figura 5** : Macrografia de solda de topo de chapas automotivas (0,8 –1,4mm) soldadas a laser.



**Figura 6** : Macrografia de solda de chapas automotivas (0,8 mm) brasadas a laser.

- A potência do processo de soldagem é muito importante, pois permite ou não dizer se um processo será capaz de soldar determinadas espessuras de chapas. Associado ao conceito de potência é muito comum utilizar-se o conceito de **Potência Específica**, que relaciona a potência por unidade de área, conforme mostrado na figura 7. Este conceito permite visualizar como os diferentes processos de soldagem conseguem aquecer a peça a ser soldada e sua extensão. Assim, processos como o Laser e feixe de elétrons são capazes de gerar potência localizada, de forma que o material será aquecido numa pequena região e com grande intensidade. Os processos por soldagem elétrica podem gerar grande potência, entretanto o aquecimento tende a ser menos localizado, o que ocasiona maiores distorções. Um processo antigo é o soldagem a gás (oxiacetilênica), que ocasiona o aquecimento de uma grande região sem atingir grande potência na solda. Significa dizer que o aquecimento será demorado, com o calor se distribuindo a longas distâncias da região da solda, acarretando um baixo rendimento térmico do processo e grandes distorções.



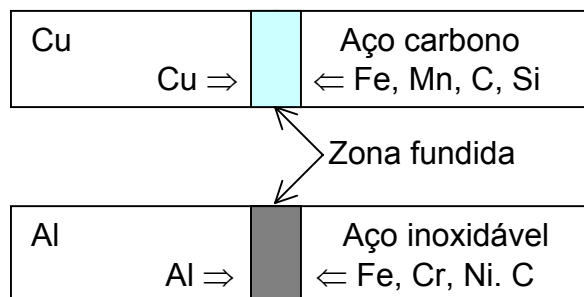
$q_{max}$  [W/cm<sup>2</sup>] : potência específica

$d_0$  [cm] : diâmetro da chama/feixe/arco elétrico

1 – Soldagem a chama    2 – Soldagem por plasma    3 – Soldagem a arco elétrico    4 – Feixe de elétrons    5 - Laser

**Figura 7** : Características dos processos de soldagem com fusão . a) aquecimento no região da chama/feixe/arco elétrico; b) potência transferida ao material.

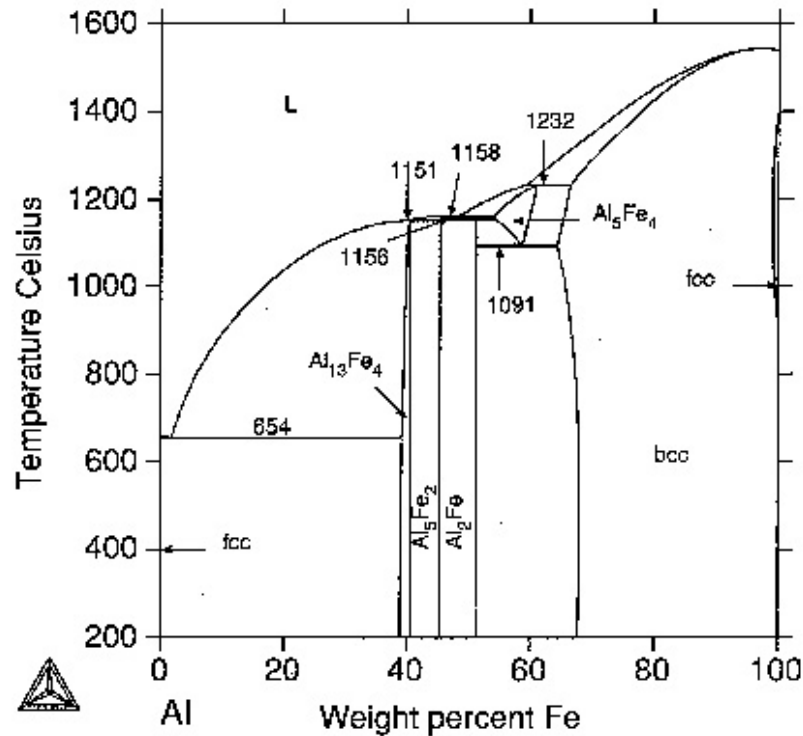
- Reação entre os diferentes átomos : na soldagem de materiais dissimilares (diferentes) colocam-se em contato diferentes átomos. O que ocorre neste caso ? Existe uma regra geral ? Como analisar o que pode ocorrer nesta região ? Considere para tanto dois exemplos : a) soldagem entre aço inoxidável e alumínio; b) soldagem entre aço carbono e cobre. Vamos considerar a hipótese de que realizemos a soldagem com a fusão de partes iguais destas peças, conforme croqui representado na figura 8.



**Figura 8** : Representação esquemática da soldagem de diferentes materiais por fusão.

Nas regiões onde ocorreu a fusão, forma-se uma fase líquida onde convivem diferentes átomos. No caso da união Cu-Aço carbono, misturam-se Cu com Fe, Mn, C e Si e no caso da união Al-Aço inoxidável misturam-se Al com Fe, Cr, Ni, C, etc. O que ocorre nesta região durante a solidificação ? Como sabemos, muitas vezes os átomos são solúveis no estado líquido, entretanto quando ocorre a solidificação, a solubilidade normalmente cai, acarretando a formação de novas fases ou mesmo formando fases líquidas de baixa temperatura de solidificação.

Analisemos inicialmente o caso da união Al-inox. Neste caso, para prever o que ocorre durante a solidificação precisamos analisar os diagramas binários Al-Fe, Al-Cr, Al-Ni, por exemplo, para verificar quais as possíveis interações que poderiam ocorrer. Analisando o diagrama de fases Al-Fe mostrado na figura 9, observamos que existe a tendência de formação de inúmeros compostos intermetálicos, o que fragilizaria a região da zona fundida. Isto já é um indicativo de que esta união, se realizada por fusão, será problemática pois estes compostos se formarão com extrema facilidade, uma vez que a difusão na fase líquida se processa com muita rapidez.



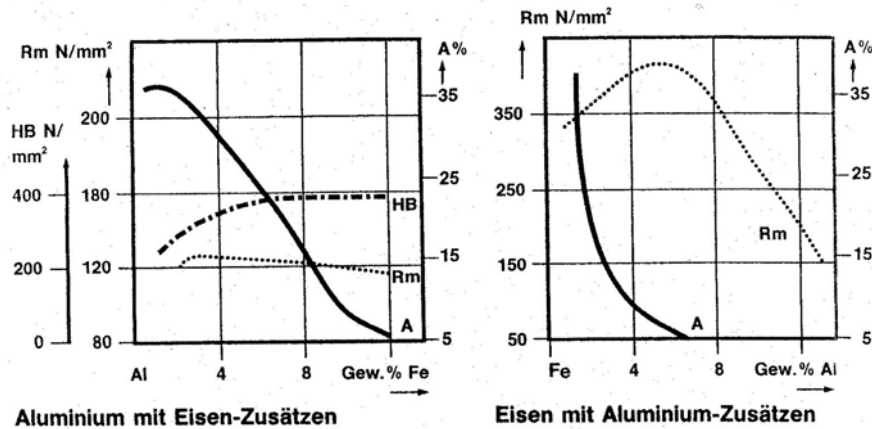
### Al-Fe Crystal Structure Data

Phase	Pearson Symbol	Struktur Bericht	Prototype	Model
$Al_{13}Fe_4$	mC102			CE
$Al_5Fe_2$	oC			CE
$Al_2Fe$	$\alpha$ P18		$Al_2Fe$	CE
$Al_5Fe_4$	cI16?		?	CE
bcc	cI2	A2	W	RK
fcc	cF4	A1	Cu	RK

J. Tibballs and M. Seiersten, unpublished work (1990)

**Figura 9 : Diagrama de Fases Al-Fe.**

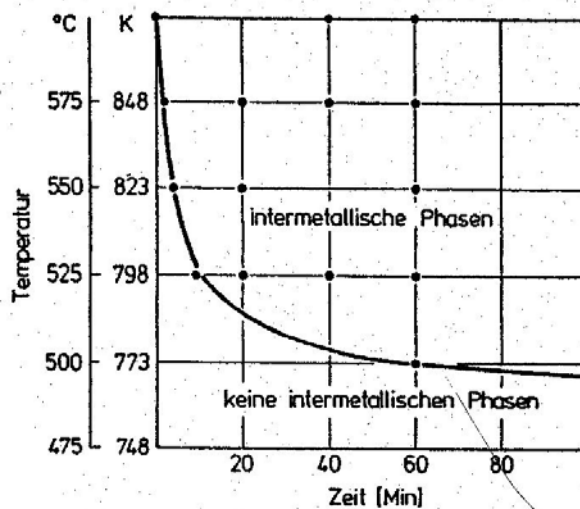
Para entender o que ocorre quando misturamos Fe e Al, são mostradas na figura 10 dois diagramas onde estão indicadas a variação da dureza, resistência mecânica e alongamento quando acrescentamos Fe no Al e vice-versa. Assim, partindo do Fe ou Al puros, o acréscimo do outro elemento em pequenas quantidades pode até resultar em aumento de dureza e resistência mecânica (normal pois ocorre o endurecimento por solução sólida, precipitação ou presença de fases duras), entretanto a ductilidade, representada pelo alongamento cai drasticamente, evidenciando a fragilidade resultante destas mistura. Deve-se, portanto, considerar que ao realizarmos a soldagem entre ligas contendo Fe e Al através de processos envolvendo a fusão, haverá o risco de fragilização da zona fundida.



Aluminium mit Eisen-Zusätzen : alumínio com acréscimo de ferro  
Eisen mit Aluminium-Zusätzen : ferro com acréscimo de alumínio  
Gew.% Fe – percentual em peso de Fe  
HB : dureza Brinell Rm : Resistência mecânica A : alongamento

**Figura 10** : Propriedades mecânicas de ligas Al contendo Fe e vice-versa (Lison, 1998)

Uma excelente alternativa para evitar a formação de compostos intermetálicos neste caso é utilizar um processo de soldagem cause pouco aquecimento, retardando a difusão atômica, o que pode ser conseguido com a soldagem no estado sólido (fricção ou difusão). Na figura 11 são mostrados as condições temperatura X tempo nas quais podem ou não ocorrer a presença de compostos intermetálicos na soldagem por difusão entre um aço inoxidável (X10CrNiTi189) e alumínio. Para elevadas temperaturas (por exemplo – 575C) a presença de compostos intermetálicos ocorre em segundos a minutos, enquanto que a temperaturas mais baixas (por exemplo – 500C) o tempo requerido se eleva para cerca de 60 minutos. Aplicando estas técnicas podem ser obtidas juntas de excelente qualidade, sem risco de fragilização.



Intermetallische Phasen – fase ou composto intermetálico  
Keine intermetallische Phasen : sem fases intermetálicas  
Zeit - tempo

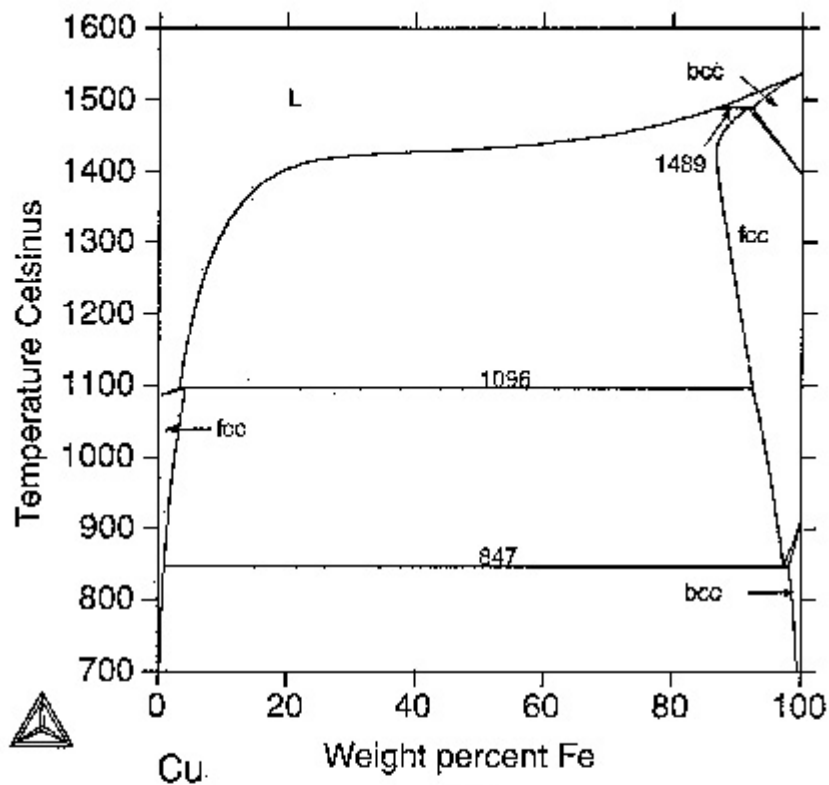
**Figura 11** : Parâmetros de soldagem por difusão para a união entre Al - Aço inox X10CrNiTi189 (Lison, 1998).



Façamos agora a avaliação da soldagem entre Cu e aço carbono. Aplicando a mesma metodologia, qual diagrama de fases deveríamos analisar ? O aço carbono é composto basicamente de Fe, com C na faixa de 0,2%, 1,0%Mn, e resquícios de Si. Assim o lógico seria analisar o diagrama binário Cu-Fe, mostrado na figura 12. Como podemos observar, verifica-se que na fase sólida a solubilidade do Cu no Fe é limitada (6,7% max na fase  $\delta$  a 1489°C, 9,5% Max na fase  $\gamma$  a 1096°C e 2,1% Max na fase  $\alpha$  a 847°C). Da mesma forma, a solubilidade do Fé no Cu é bastante baixa, atingindo um máximo de 4% a 1096°C. Note que não há a formação de compostos intermetálicos, assim não haveria a tendência a fragilização da junta soldada. Afinal qual o problema que seria esperado ?

Analisemos a solidificação de uma liga contendo 50% de cada elemento. Ao atingir a linha liquidus (aproximadamente 1430°C) começa a se formar a fase sólida  $\gamma$  rica em Fe (considere uma solidificação com crescimento dendrítico). Como a solubilidade do Cu no Fe é baixa, este é rejeitado para a fase líquida, aumentando sua concentração nesta fase. O progressivo abaixamento da temperatura acarreta o crescimento da fração volumétrica de fase  $\gamma$ , e decréscimo da fase líquida (que se enriquece de Cu). Esta situação permanece até atingir-se a temperatura de 1096°C, quando a fase líquida remanescente se solidifica como uma fase rica em Cu nas regiões interdendríticas (estabelecemos como sendo a fase  $\eta$ ). Subseqüentes resfriamentos não prevêem a formação de compostos intermetálicos, mas somente a transformação da fase  $\gamma$  em eutetóide contendo as fase  $\alpha$  e  $\eta$  a 851°C).

Afinal qual o problema que ocorre nesta solidificação ? A resposta está na diferença de temperatura entre o início e final da solidificação (1430 a 1096°C respectivamente). Durante este intervalo o material solidificado vai se contraindo a medida que a temperatura cai. Esta contração gera tensões trativas no cordão caso haja restrição a deformação, como no caso da junta em ângulo (junta T a ser mostrada na aula prática). A geração de tensões trativas no cordão e a presença de uma fase líquida na região interdendrítica durante a solidificação acarretam as chamadas trincas de solidificação (trincas a quente), pois a fase líquida não suporta cargas trativas.



### Cu-Fe Crystal Structure Data

Phase	Pearson Symbol	Struktur Bericht	Prototype	Model
fcc	cF4	A1	Cu	RK
bcc	cI2	A2	W	RK

Å. Jansson, Report D 73, Metallograf, KTH, (1986)

**Figura 12 : Diagrama de fases Cu-Fe.**