

BÁSICO DE SOLDAGEM

**material didático
elaborado por
Annelise Zeemann e
Paulo Roberto Oliveira Emygdio**

Abril 2001

ÍNDICE

Introdução	1
Propriedades dos Materiais Metálicos	2
Tipos de Soldagem	12
Metalurgia da Soldagem	21
Soldabilidade	29
Tipos de Juntas	43
Procedimentos de Soldagem	47
Qualificação de Procedimentos	51
Referências	
Anexos	

Esta apostila foi elaborada para fins didáticos utilizando figuras provenientes de catálogos de fabricantes e da literatura básica, que não devem ser reproduzidas em outras publicações que não sejam para fins de aprendizado.

Introdução

A **SOLDAGEM** é um dos processos de fabricação mais utilizados a nível industrial, nas mais *variadas aplicações*, desde a união microscópica de fios em pequenos circuitos eletrônicos até a união de chapas de grande espessura em equipamentos pesados, como em navios ou em turbinas hidráulicas. Desta forma os métodos de soldagem e as características das juntas soldadas podem ser totalmente diferentes para aplicações específicas e dependem basicamente: da **forma**, **espessura** e **geometria** das peças a serem soldadas; do tipo de **material** ou materiais que se pretende unir; do **processo de soldagem** industrialmente utilizado; e do **tipo de performance** esperado para os componentes soldados frente às condições de serviço, que muitas vezes envolvem solicitações estáticas de grande intensidade, solicitações dinâmicas ou cíclicas, calor ou meio corrosivo.

O estudo da adequação de um procedimento de soldagem a uma dada aplicação é complexo e sem dúvida requer experiência do profissional envolvido, embora para a maioria das aplicações industriais existam na literatura básica as referências necessárias para se elaborar procedimentos satisfatórios. Porém, como na prática existem muitas variáveis envolvidas em um procedimento de soldagem – pouco previsíveis ao nível de estudo – antes de efetivamente realizar uma soldagem é importante **qualificar o procedimento de soldagem**, principalmente quando a aplicação envolve risco de vida como em componentes pressurizados.

A qualificação de um procedimento de soldagem é realizada segundo os diferentes códigos de fabricação – ASME, AWS, API – e basicamente significa simular a condição real de soldagem e testar o material através de ensaios que avaliem as propriedades que serão requeridas na aplicação.

Este curso básico de soldagem tem como finalidade apresentar os principais conceitos que orientam a seleção de procedimentos de soldagem, relacionados às características metalúrgicas das juntas – e sua relação com a performance (propriedades mecânicas basicamente) – em função do tipo de junta e dos processos e cuidados adotados na operação de soldagem.

Tipos de Soldagem

A união de materiais por soldagem envolve uma íntima ligação atômica entre as partes a serem unidas, que pode ou não envolver a **fusão** com posterior solidificação. A tabela 1 apresenta os principais tipos de soldagem – no **estado sólido** ou **por fusão** – classificados quanto à natureza da energia utilizada para promover a ligação atômica, ao tipo de processo e com indicações de intensidade de fonte **I** (expressa em $J/s.mm^2$ ou W/cm^2).

O conceito de **intensidade de fonte** de energia (**I**) – quantidade de energia transferida à peça por unidade de tempo e na unidade de área - é muito importante para a compreensão dos fenômenos envolvidos na soldagem. Processos cujas fontes de energia são de alta intensidade tendem a exigir menor tempo de soldagem e minimizam certos efeitos indesejáveis (como distorções por exemplo) devido à pequena área aquecida. Em um processo de alta intensidade a energia é transferida tão rapidamente e através de uma área tão pequena que a fusão ocorre quase instantaneamente, antes que ocorra uma perda significativa de calor por condução.

A **soldagem no estado sólido** envolve basicamente energia mecânica para aproximar a estrutura cristalina dos dois materiais (sem os óxidos superficiais) e desenvolver uma atração atômica, seja através da ação de fricção, impacto ou pressão, realizada segundo processos de *soldagem por fricção* (figura 5), *soldagem por explosão*, *soldagem por difusão* ou ainda *soldagem por laminação*.

A **soldagem por fusão** ocorre com o aumento localizado da temperatura do material até que a temperatura da região onde estão os materiais a serem unidos ultrapasse a temperatura de fusão do metal ou da liga e posteriormente as partes sofram solidificação, mantendo uma continuidade física. A energia para aquecer o material pode ser de natureza **química**, por exemplo reações de oxidação como na soldagem *aluminotérmica* (figura 6), ou na queima de gases como na soldagem *oxi-acetilênica*; a **arco elétrico**, como nos principais processos de soldagem hoje conhecidos – SMAW, SAW, GTAW e GMAW – ou proveniente de efeito Joule em uma **resistência elétrica**, na soldagem por *costura* ou *ponto* (figura 7); ou ainda pode ser de natureza **física** como nas soldagens a *laser* ou *feixe eletrônico*.

Tabela 1 – Tipos de Soldagem.

tipo de soldagem	natureza	ação	processo	I (W/cm ²)
soldagem no estado sólido	energia mecânica	fricção	fricção	
		impacto	explosão	
		pressão	laminação	
			difusão	
soldagem por fusão	química	oxidação	aluminotérmica	-
		queima de gases	oxi-combustível	10 ³
	elétrica		GTAW (eletrodo W)	
			SMAW (eletrodo revestido)	
			GMAW (eletrodo nú + gás)	
		arco elétrico	FCAW (eletrodo tubular)	10 ⁴
			MCAW (eletrodo tubular)	
			SAW (eletrodo nú + fluxo)	
	física	resistência	ponto, costura	10 ⁵
		radiação	feixe eletrônico	10 ⁶
		laser	-	

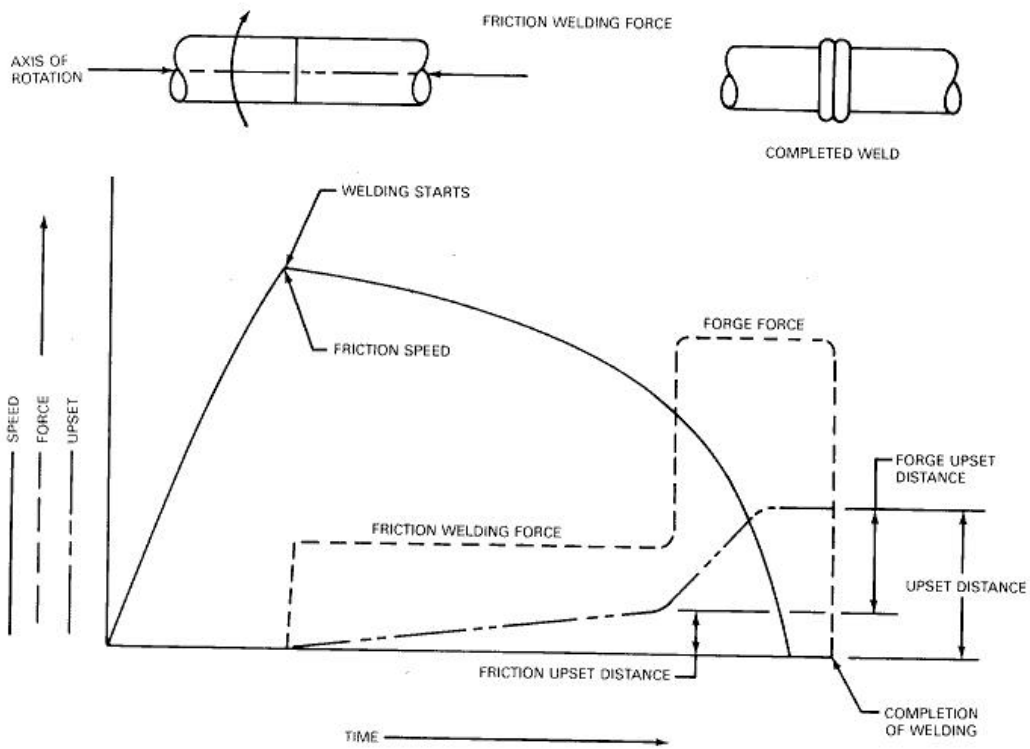


Figura 5 – Processo de soldagem por fricção.

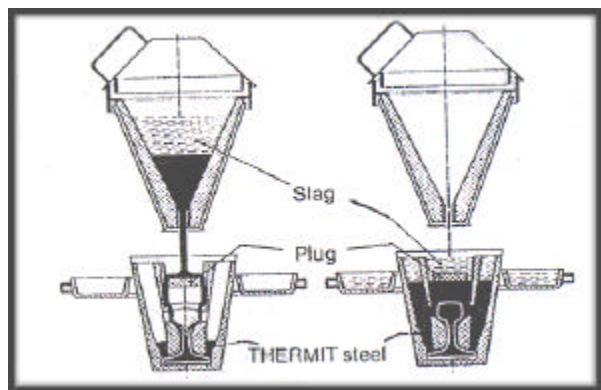


Figura 6 – Processo de soldagem aluminotérmica.

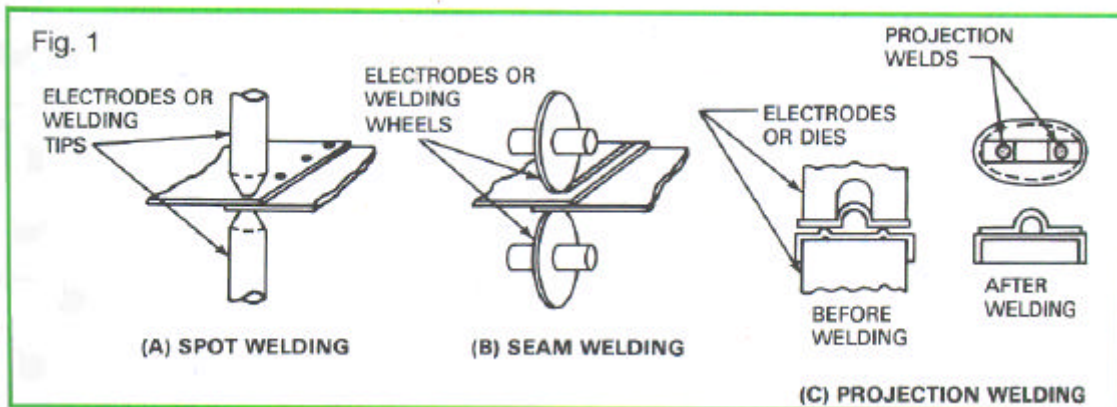
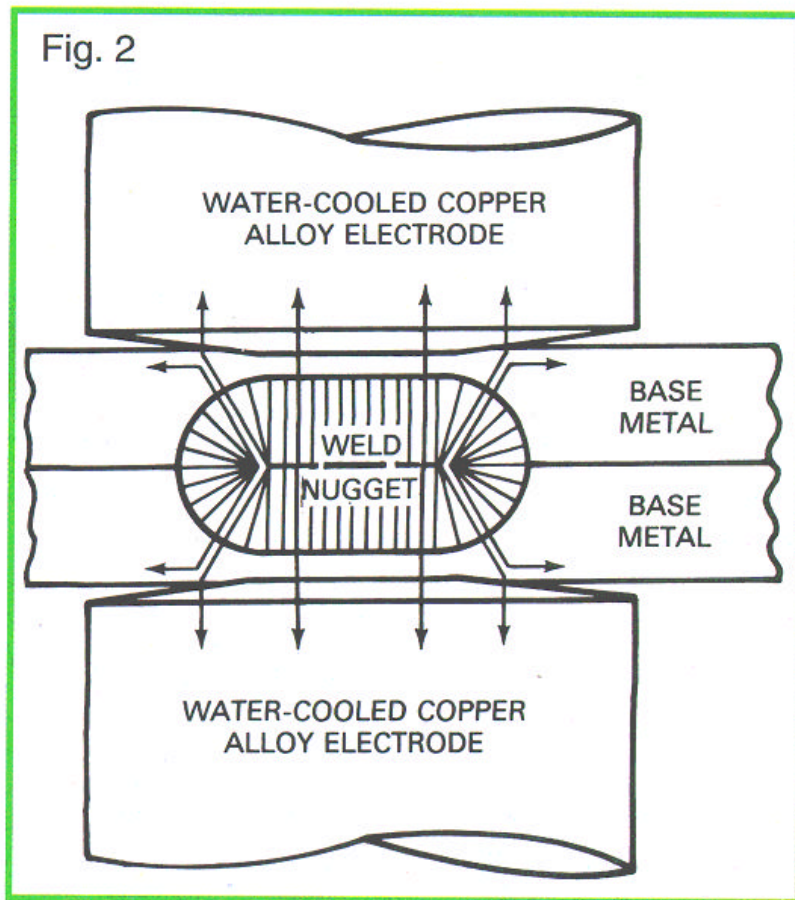


Figura 7 – Processo de soldagem por resistência.

As figuras 8 a 11 ilustram os principais processos a arco elétrico disponíveis industrialmente, cujas principais características dizem respeito a:

- o tipo de eletrodo para abertura do arco (consumível ou não consumível)
- o tipo de proteção gasosa;
- o tipo de transferência metálica;
- as faixas de energia de soldagem;
- a produtividade e a possibilidade de automação.

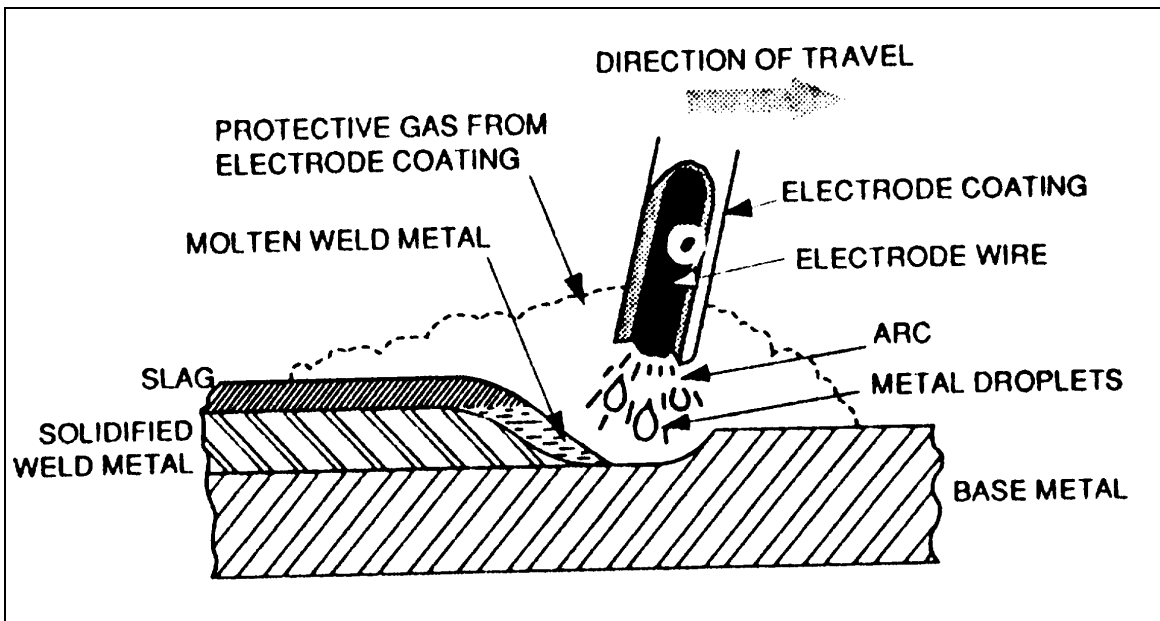


Figura 8 – Processo eletrodo revestido. SMAW.

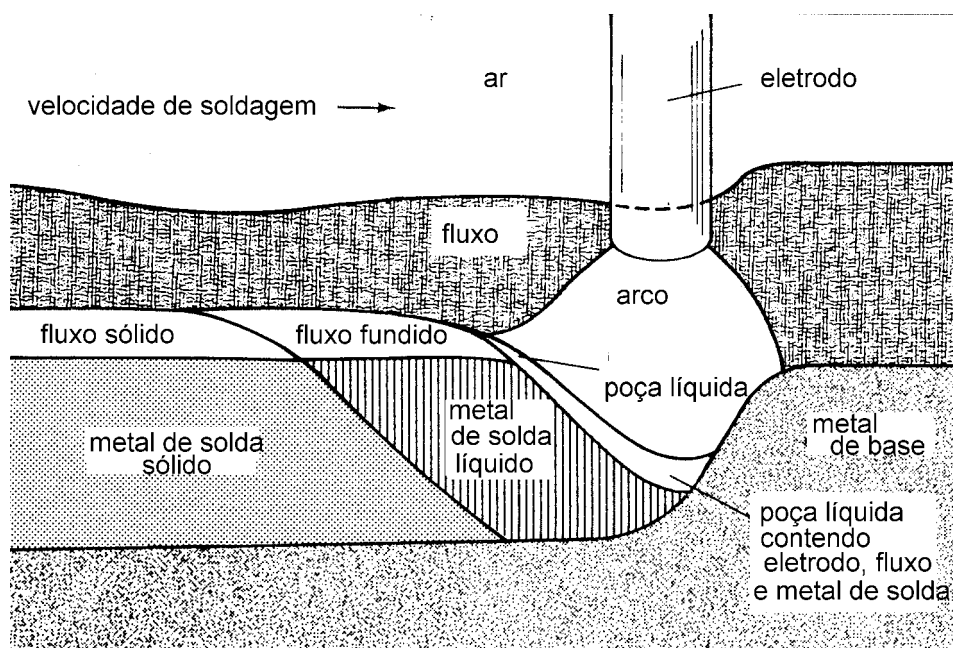


Figura 9 – Processo arco submerso. SAW.

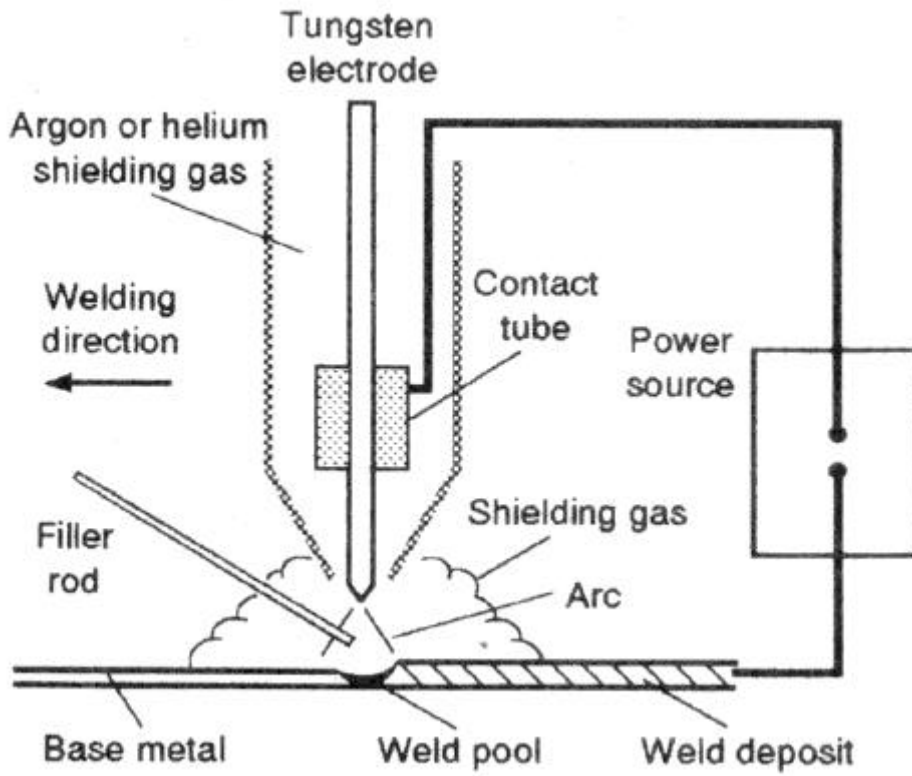


Figura 10 – Processo TIG. GTAW.

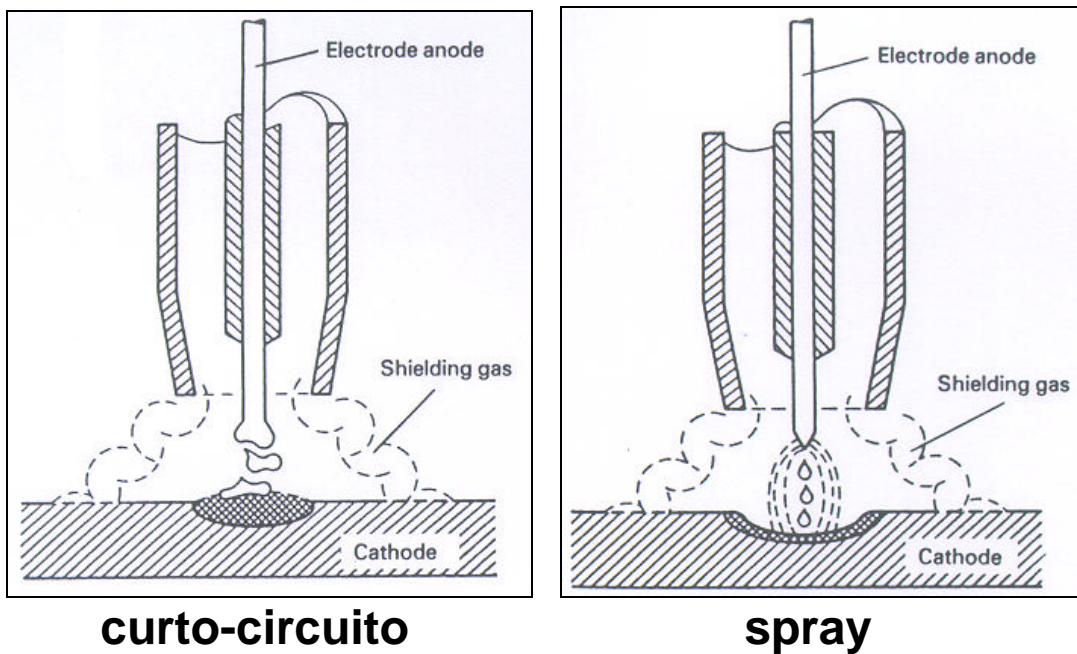


Figura 11 – Processo MIG/MAG. GMAW.

Metalurgia da Soldagem

ENERGIA DE SOLDAGEM

O conceito de energia de soldagem é muito importante no estudo dos aspectos térmicos da soldagem. Define-se a energia de soldagem como a quantidade de energia dispendida na soldagem em uma unidade de comprimento. A energia de soldagem **E** também é conhecida como aporte de calor, ou aporte térmico **H** do inglês “heat input”. O cálculo da energia de soldagem pode ser expresso através da relação:

$$E = f \cdot \frac{p}{v}$$

onde: E - energia de soldagem (J / mm)
 f - eficiência de transmissão de calor (%)
 p - potência dispendida pela fonte de calor na soldagem (W)
 v - velocidade de avanço (mm/s)

Para a soldagem a arco elétrico a energia de soldagem é expressa como:

$$E = f \cdot \frac{V \cdot I}{v}$$

onde: V - tensão (V) dadas pela leitura no equipamento de solda
 I - corrente (A)
 v - velocidade de avanço (mm/s)

A energia de soldagem é uma característica do processo de soldagem e da técnica empregados. Os processos de soldagem do tipo arco submerso ou eletroescória, por exemplo, possuem inerentemente elevada energia de soldagem enquanto processos muito intensos, onde a área de aquecimento para fusão é pequena (como plasma ou TIG), são considerados de baixa energia.

Quanto mais alto for o aporte de calor (energia de soldagem), maior será a quantidade de energia calorífica transferida à peça, maior a poça de fusão, mais larga a zona aquecida e menor o gradiente térmico entre a solda e o metal de base.

A eficiência de transmissão **f** pode ser considerada constante para um mesmo processo pois exprime a parcela de energia efetivamente transferida à peça. Perdas decorrentes do aquecimento de cabos e eletrodos; respingos fora da poça; efeitos de resfriamento pelo meio ambiente; etc, contribuem para diminuir o valor de **f** e conseqüentemente de **E**.

Atuando no mesmo processo de soldagem, a medida de controlar o aporte de calor para evitar aquecimento demasiado é bastante limitada pois:

- f depende basicamente do processo;
- em processos a arco a tensão V varia dentro de intervalos reduzidos (condicionados às características do processo e dos consumíveis);
- a corrente I está igualmente condicionada ao processo e ao consumível (principalmente bitola);
- restando somente à v qualquer variação substancial no aporte de calor, dada principalmente pela técnica adotada.

A velocidade de avanço v exprime o comprimento linear de solda executado em cada passe na unidade de tempo. A técnica de cordões estreitos (filete) assume valores de velocidade de avanço bem mais elevados do que a técnica de cordões trançados (solda com oscilação), com conseqüente menor quantidade de calor adicionada. É importante considerar todavia que podem existir restrições quanto à amplitude de oscilação.

CICLOS TÉRMICOS

Os ciclos térmicos sofridos a cada ponto do material soldado determinam as transformações microestruturais, e conseqüentemente as propriedades esperadas para uma junta.

O calor da operação de soldagem provoca, nos diversos pontos de uma junta, variações de temperatura como indica a figura 12. A variação de temperatura (T) em função do tempo (t) é o ciclo térmico no ponto considerado.

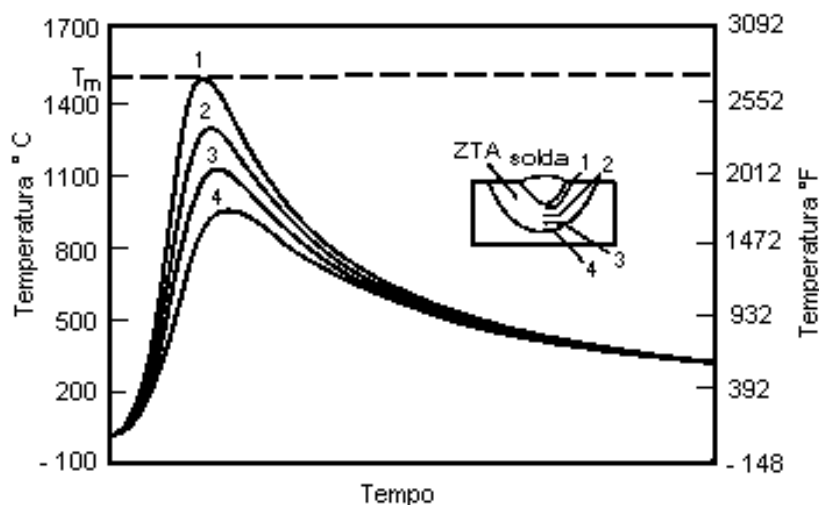


Figura 12 - *Variações de temperatura ao longo de uma junta.*

A partir desta curva T x t pode-se determinar:

T_m - Temperatura máxima atingida;

t_p - Tempo de permanência acima de uma certa temperatura T;

V_t - Velocidade de resfriamento na temperatura T.

A medida que o ponto considerado se afasta da solda, as temperaturas máximas são decrescentes e atingidas com um certo atraso. O tempo de permanência acima de uma dada temperatura decresce no mesmo sentido. Teoricamente as velocidades de resfriamento decrescem à medida que a distância aumenta. Entretanto do ponto de vista prático e para a faixa de temperatura onde ocorrem os principais fenômenos de transformações microestruturais, pode-se considerar a velocidade de resfriamento como constante em toda extensão da zona termicamente afetada.

A forma de dissipação de calor muito influencia o ciclo térmico no que diz respeito ao resfriamento e V_t, que é dada pela tangente à curva T x t , assume seus valores mais elevados quando o componente a ser soldado apresenta dimensões que proporcionem uma troca de calor em regime tridimensional.

Quando se está trabalhando em regime de troca de calor bidimensional denomina-se condição de **chapa fina** e o cálculo de V_t é dado pela expressão:

$$V_t = 2 \kappa \pi \rho c (e/E)^2 (T_c - T_o)^3$$

- onde:
- V_t - velocidade de resfriamento a temperatura T_c(°C/s)
 - κ - condutividade térmica do metal(J/mm . s °C)
 - T_c - temperatura de interesse(°C)
 - T_o - temperatura inicial de peça(°C)
 - e - espessura da peça(mm)
 - ρc - calor específico volumétrico(J/mm³)
 - E - energia de soldagem ou aporte de calor(J/mm)

Quando o regime de troca de calor passa a tridimensional denomina-se condição de **chapa grossa** e a velocidade de resfriamento passa a independer da espessura. Sua expressão é dada por:

$$Vt = \frac{2 \kappa \pi (T_c - T_0)^2}{E}$$

Para definir se o regime de troca de calor é bidimensional ou tridimensional (chapa fina ou chapa grossa) utiliza-se o fator τ , cujo valor superior a 0,9 caracteriza um regime tridimensional, inferior a 0,6 caracteriza um regime bidimensional e entre 0,6 e 0,9 uma condição intermediária, como ilustrado na figura 13.

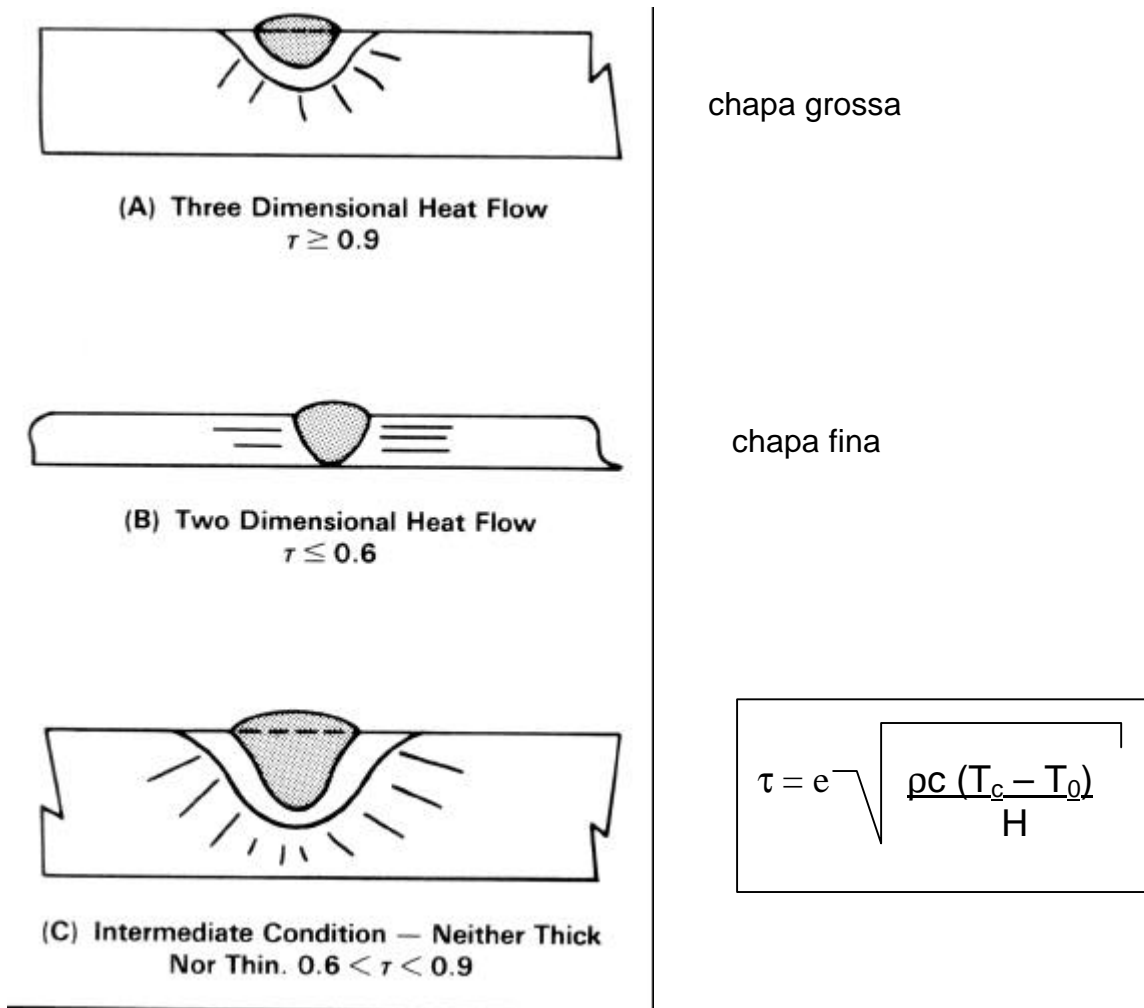


Figura 13 – Efeito da geometria e espessura relativa da chapa no regime de troca de calor.

No caso de cordões de reforço a deposição é sempre superficial e a troca de calor tende a ser tridimensional, com grande troca de calor e elevada velocidade de resfriamento.

Alguns fatores que afetam os **ciclos térmicos** são importantes quando se avaliam as possíveis transformações no material:

- a temperatura máxima atingida a cada ponto e a velocidade de resfriamento dependem de propriedades físicas do material sendo soldado. Ligas com maior condutibilidade térmica, como ligas a base de cobre e de alumínio, apresentam maiores velocidades de resfriamento, o que pode muitas vezes causar problemas de falta de fusão devido ao rápido escoamento de calor ;
- a temperatura máxima atingida varia inversamente com a distância ao centro da solda, isto é, quanto mais afastado da solda estiver o ponto considerado, menor será a temperatura máxima atingida ;
- a velocidade de resfriamento varia inversamente com a temperatura inicial da peça sendo soldada, isto é, quanto maior a temperatura de preaquecimento da peça menor será a velocidade de resfriamento. Pode-se notar que a influência da temperatura inicial é mais significativa em peças de pequena espessura ;
- a velocidade de resfriamento varia diretamente com a espessura da peça sendo soldada, isto é, quanto maior a espessura maior a velocidade de resfriamento. Entretanto, a variação tem um limite. A partir de uma determinada velocidade de resfriamento, por mais que se aumente a espessura, a velocidade de resfriamento não se altera.
- a velocidade de resfriamento varia inversamente com a energia de soldagem, isto é, quanto menor a energia de soldagem maior a velocidade de resfriamento. A influência da energia de soldagem na velocidade de resfriamento é maior em espessura finas.

REPARTIÇÃO TÉRMICA

A partir das curvas de ciclo térmico para todos os pontos ao longo da junta, é possível se obter as temperaturas máximas atingidas em função da distância ao centro de solda. Esta função se chama **repartição térmica** e uma curva levantada para um aço está ilustrada na figura 14. Verifica-se que a partir da repartição pode-se avaliar as transformações ocorridas no aquecimento pois esta pode ser associada ao diagrama de equilíbrio do material.

Esta curva de temperaturas máximas x distâncias não permite entretanto prever transformações ocorridas no resfriamento, por efeito cinético.

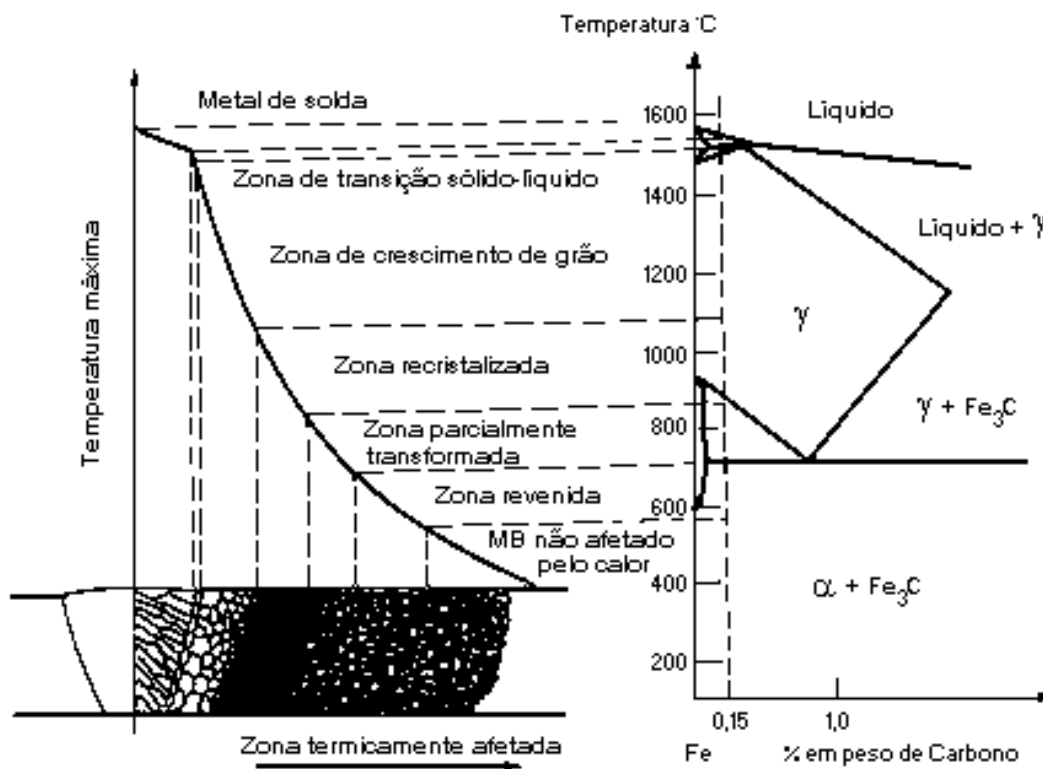


Figura 14 - Repartição térmica para uma junta de aço ao carbono.

Com as duas funções, **ciclo térmico e repartição térmica**, torna-se viável o estudo das transformações metalúrgicas no estado sólido para uma junta soldada. O ciclo térmico possibilita a interpretação ou previsão das transformações no resfriamento enquanto a repartição térmica permite determinar a extensão das zonas onde se passam tais fenômenos.

TENSÕES RESIDUAIS

A operação de soldagem por fusão cria tensões residuais que resultam da dilatação e contração do metal aquecido e da anisotermia (distribuição não uniforme de temperaturas) que caracteriza a operação.

O metal de solda e a zona termicamente afetada próxima a zona de ligação são aquecidos em temperaturas muito maiores do que o metal de base. Durante o aquecimento, devido às restrições do restante do material não aquecido (metal de base), ocorre progressivamente na zona termicamente afetada uma compressão e deformação plástica localizada para acomodar sua dilatação. A medida em que a poça de fusão se solidifica e resfria, começa a ocorrer (devido à concentração) uma volta elástica das regiões plastificadas seguida de tensionamento em tração, que permanece residual e pode atingir valores tão elevados quanto o limite de escoamento de metal de base e zona termicamente afetada. (VER A ANALOGIA DA BARRA AQUECIDA, a seguir).

Os principais defeitos de origem metalúrgica (trincas), provenientes da operação de soldagem, ocorrem sempre pela associação das tensões residuais e microestruturas susceptíveis ao trincamento (constituintes de baixo ponto de fusão, constituintes frágeis). Essas trincas podem ocorrer em altas temperaturas (trincas a quente); ou em baixas temperaturas (trincas a frio).

As tensões residuais podem ainda gerar problemas de estabilidade dimensional (distorções) e muitas vezes são a causa de falha prematura em juntas soldadas.

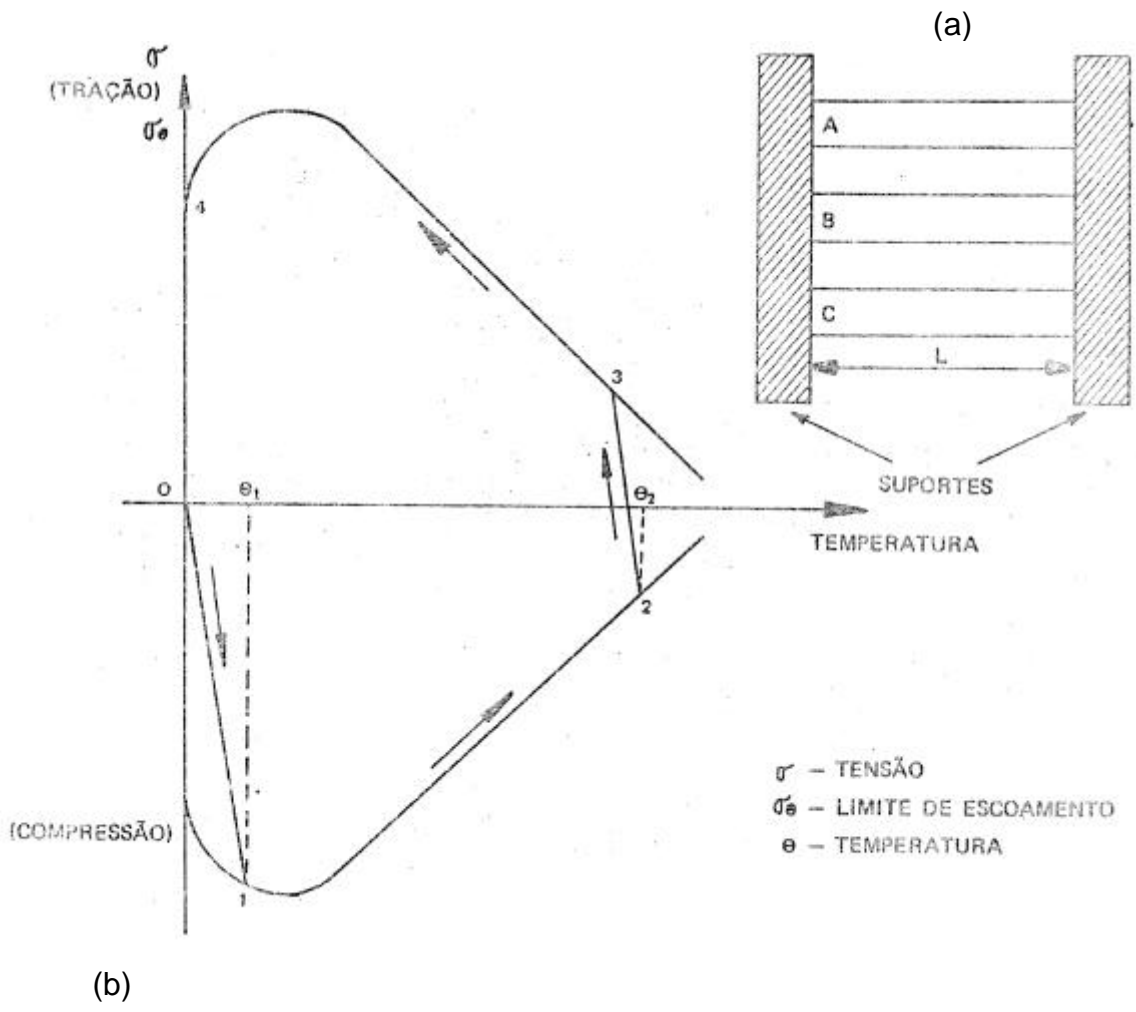
O alívio das tensões pode ser assegurado por tratamento térmico (ex: tratamento progressivo por chama) ou por tratamentos mecânicos (ex: martelamento). Quando ele se realiza por via térmica, o alívio das tensões é acompanhado de modificações de natureza metalúrgica, que podem ser muitas vezes desfavoráveis.

TENSÕES RESIDUAIS DE SOLDAGEM

Analogia da barra aquecida

Considere um dispositivo constituído de 3 barras (A, B e C) engastadas a suportes fixos, inicialmente à temperatura ambiente (figura 1a). Admita, agora, que a barra B seja aquecida independentemente das outras duas e constate no gráfico da figura 1b como varia a tensão nesta barra.

1. A dilatação térmica restringida provoca tensões de compressão na barra B e tração – para que o equilíbrio seja mantido – nas barras A e C.
2. A medida que a temperatura se eleva, as tensões nas barras aumentam, atingindo o limite de escoamento na barra B (ponto 1). A partir desse ponto a dilatação térmica é absorvida com a deformação plástica da barra B.
3. As curvas indicam a variação do limite de escoamento com a temperatura. Continuando o aquecimento, a tensão na barra B evolui ao longo de 1 - 2, onde a plastificação impede o estabelecimento de tensões superiores ao limite de escoamento. O ponto 2 corresponde à temperatura máxima atingida (θ_2).
4. Durante o resfriamento, a barra B se contrai tendendo para um comprimento livre menor do que L, em virtude da deformação plástica a que foi submetida. A tensão diminui, muda de sinal e atinge o limite de escoamento – à tração – no ponto 3.
5. A partir do ponto 3 a contração térmica é absorvida por deformação plástica, não permitindo que a tensão na barra ultrapasse o limite de escoamento. Ao longo de 3 - 4, o valor da tensão acompanha a variação do limite de escoamento com a temperatura.
6. Concluindo o resfriamento, as 3 barras ficam submetidas a um sistema de tensões residuais. Na barra B a tensão é de tração e da ordem de grandeza do limite de escoamento do material.
7. Esse raciocínio é evidentemente simplificado. Não foi considerada a variação do módulo de elasticidade e do coeficiente de dilatação térmica, com a temperatura. A fluência do material (“creep”) foi também desprezada.



Varição da tensão na barra B.

Soldabilidade

A soldabilidade é uma propriedade de fabricação do material que representa **a facilidade com que este material pode ser soldado**. Apesar de difícil quantificação é fácil perceber que um material que exige procedimentos de soldagem mais complexos apresentam difícil soldabilidade.

Os principais problemas que se traduzem em má soldabilidade, e que podem levar o material a falhas durante a soldagem ou durante o serviço, apresentam *natureza metalúrgica* e estão relacionados à:

- formação de trincas durante ou após o procedimento de soldagem, cuja natureza é basicamente a mesma para todos os materiais; e e que podem ser classificadas como **TRINCAS A QUENTE, TRINCAS A FRIO e TRINCAS DE REAQUECIMENTO**;
- perda de propriedades em virtude de transformações indesejáveis (fragilizações, amaciamentos, precipitações) durante os ciclos de soldagem.

Existem também problemas de *natureza operacional* que conduzem a defeitos do tipo trincas por tensões de restrição muito elevadas; falta de fusão ou porosidade; associados a projeto de junta inadequado, falta de limpeza, acesso difícil, consumíveis indevidos, proteção insatisfatória.

No sentido de conhecer alguns fatores que determinam a soldabilidade de ligas metálicas, e que portanto devem ser considerados quando se elabora um procedimento de soldagem, serão apresentados conceitos genéricos sobre:

1. **as características inerentes a cada região do conjunto soldado;**
2. **os principais problemas metalúrgicos que podem surgir em materiais metálicos e suas causas**

É muito importante ressaltar que qualquer tipo de trincamento que possa ocorrer durante a soldagem ou durante o serviço é função do nível de **tensões aplicadas + tensões residuais de soldagem**, e que procedimentos para aliviar tensões serão sempre recomendados em materiais de pequena capacidade de deformação plástica, ou seja materiais cuja relação entre limite de escoamento e limite de resistência seja elevada (superior a 0,75).

METAL DE SOLDA

O metal de solda é a região fundida durante a soldagem (poça de fusão) e posteriormente solidificada. Sua composição química depende das composições do metal de base (MB) e do metal de adição (MA); e é influenciada pelas reações entre a poça de fusão (ainda no estado líquido) e seu envoltório gasoso e/ou escorificante.

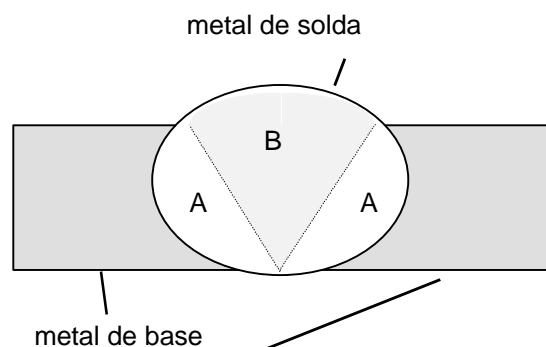
Os principais fatores que afetam as características e propriedades do metal de solda são a **diluição**, a **volatilização**, as **reações químicas**, a **absorção de gases** e a **estrutura de solidificação**.

Chama-se **diluição** a quantidade de metal de base que se funde e participa da constituição do metal de solda, figura 15. A participação do metal de base na composição química do metal de solda sempre ocorre para os processos de soldagem por fusão pois esta é a única forma de assegurar que haja a continuidade no conjunto soldado.

Figura 15

Diluição.

$$D = \frac{A}{A + B}$$



A contribuição do metal de base

B contribuição do metal de adição

A + B metal de solda

A diluição depende do tipo de junta, tipo de processo e parâmetros utilizados, e pode variar desde poucos percentuais indicado para a soldagem de revestimento até 100% na soldagem autógena (sem adição de consumível), sendo seu valor na faixa de 20 a 40% para os processos de união usuais.

O efeito da diluição nas transformações que podem ocorrer durante a soldagem é maior quando se solda materiais dissimilares, como é geralmente o caso de revestimentos, e a mistura de composições entre o metal de adição e o metal de base pode favorecer uma composição intermediária e propriedades totalmente diferentes daquelas que se esperaria para a solda. Na soldagem de metais dissimilares, a diluição é um dado indispensável para a previsão dos constituintes e propriedades da solda. Um exemplo clássico é o emprego do diagrama de Schaeffler na soldagem dos aços inoxidáveis.

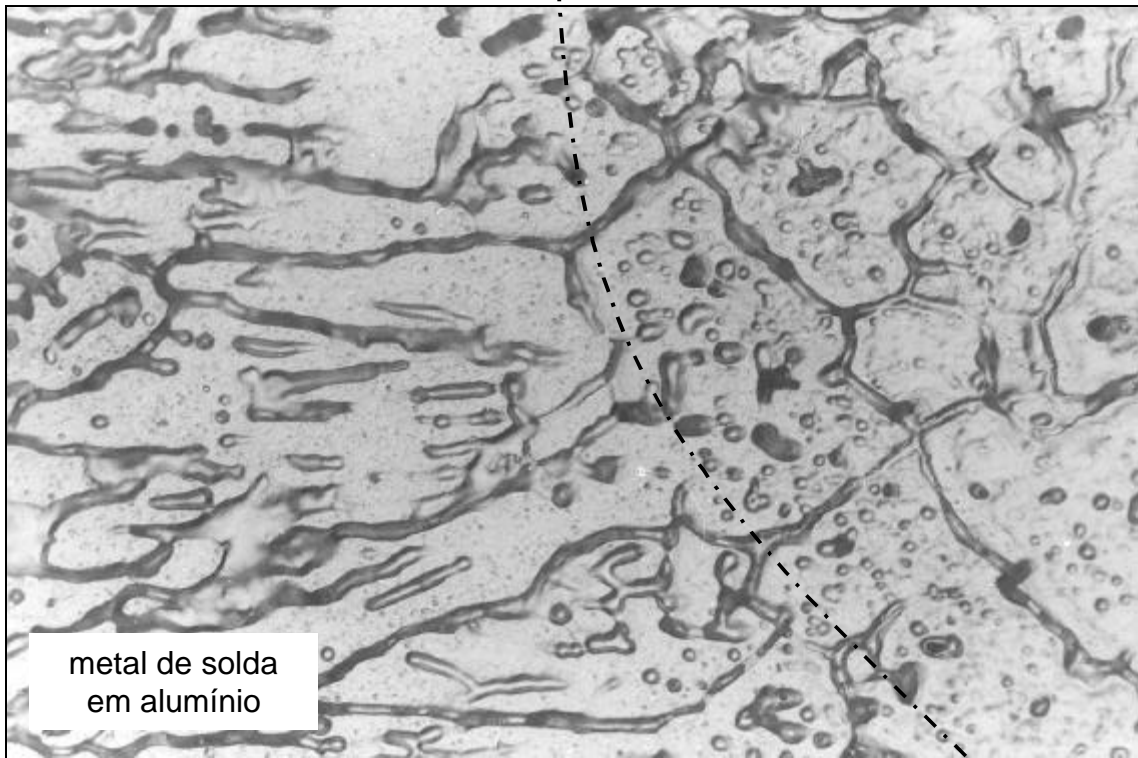
Outro efeito que altera as propriedades da solda diz respeito à **volatilização** de elementos de baixo ponto de fusão, como o zinco ou magnésio; que consiste em sua perda da poça de fusão por evaporação quando a temperatura da poça é muito elevada. Isto ocorre em processos de soldagem muito intensos cuja poça atinge temperaturas muito altas. Além da temperatura da poça de fusão, a volatilização depende também do tempo de permanência em alta temperatura. Assim a transferência rápida de metal por GMAW spray é preferível à transferência por gotas da soldagem com eletrodo revestido.

Reações químicas no metal líquido podem ser prejudiciais quando provocam o desprendimento exagerado de gases, favorecendo o aparecimento de porosidades na solda. Oxidações, carbonetações ou descarbonetações podem ocorrer na solda quando a poça entra em contato com a atmosfera (na raiz de soldas não protegidas) ou com gases ativos. Algumas reações são entretanto necessárias e merecem destaque. São as reações entre escória e metal líquido que possibilitam a adição de elementos a partir de ferro-ligas presentes no revestimentos e fluxos.

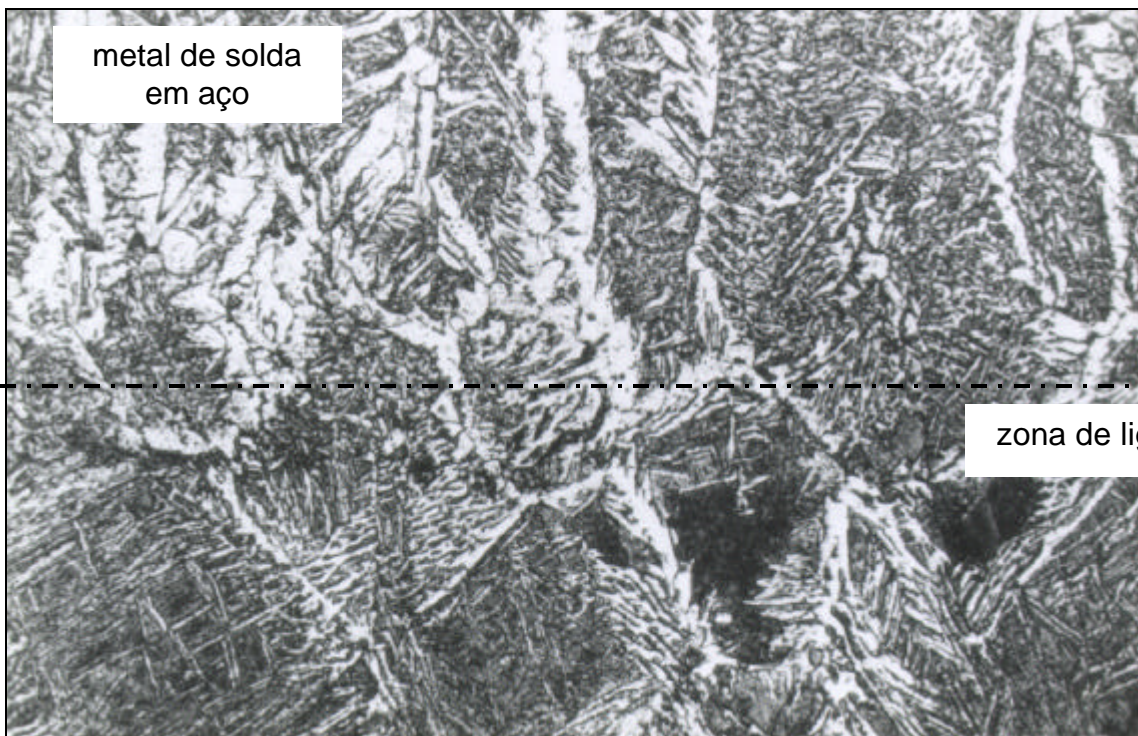
O metal líquido tem grande capacidade de **absorver e dissolver gases**, principalmente o **hidrogênio**, resultante da decomposição de vapor d'água no arco elétrico, e o **nitrogênio** da atmosfera (caso a proteção não seja efetiva) O vapor d'água provém da umidade absorvida pelos fluxos e eletrodos, da água de cristalização de alguns componentes, e dos produtos da combustão de substâncias orgânicas constitutivas dos revestimentos; e deve ser minimizado em materiais susceptíveis à fragilização pelo hidrogênio.

Em soldagem a **estrutura de solidificação** se desenvolve como um prolongamento de grãos da zona de ligação. Os grãos se solidificam adotando a mesma orientação cristalina e o tamanho dos grãos não fundidos (epitaxia). Os contornos de grão ultrapassam a zona de ligação, assegurando a continuidade metálica ao nível da estrutura cristalina. Este comportamento mostra que o tamanho de grão do metal de solda depende diretamente da granulação da zona termicamente afetada que por sua vez é grosseira em virtude do aquecimento de soldagem. A figura 16 ilustra para uma liga de alumínio e para um aço este fenômeno de epitaxia.

zona de ligação



(a) liga de alumínio. Microscopia ótica. 500x. Keller.



(b) aço. Microscopia ótica. 500x. Nital.

Figura 16 – *Fenômeno de epitaxia.*

A granulação grosseira, a orientação da estrutura e a formação de segregações (inerentes à própria solidificação) exercem uma influência marcante sobre a susceptibilidade à formação de defeitos no metal de solda, principalmente sobre o **trincamento a quente (trincas de solidificação)**.

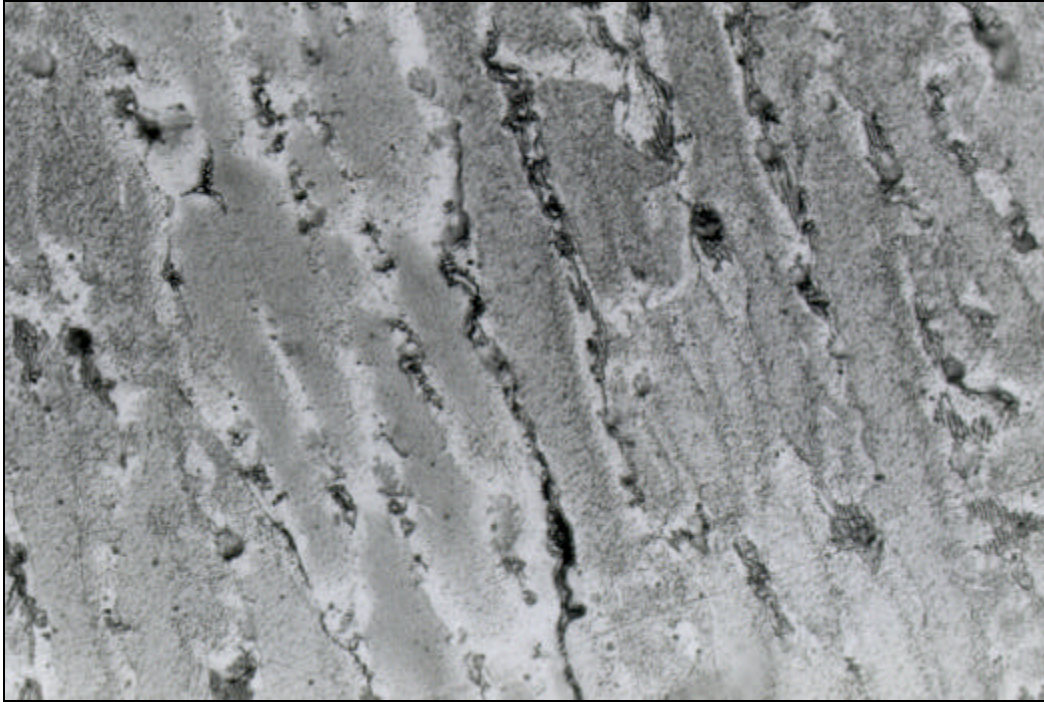
A figura 17 ilustra trincas a quente no espaçamento interdendrítico de um aço inox austenítico causadas pelo acúmulo de soluto. Esta figura apresenta um desenho esquemático comparativo entre diferentes estruturas de solidificação, evidenciando a maior susceptibilidade ao trincamento a quente para a solidificação dendrítica comparada à solidificação celular devido ao maior acúmulo de soluto.

Existem 5 tipos diferentes de estrutura de solidificação, que são a *planar*, a *celular*, a *celular dendrítica*, a *colunar dendrítica* e a *equiaxial dendrítica*. O que determina o tipo de solidificação que será predominante no metal de solda é o grau de super-resfriamento no material, que por sua vez depende da composição química da liga e do gradiente de temperaturas formado pelo procedimento de soldagem imposto. A figura 18 ilustra as estruturas de solidificação em função do grau de super-resfriamento. Quanto menor o acúmulo de soluto, com uma solidificação que tende a planar, menor a susceptibilidade ao aparecimento de trincas a quente.

As **trincas a quente** são formadas ainda em alta temperatura, no metal de solda (trincas de solidificação) ou na zona de ligação (trincas de liquação), e resultam das tensões geradas na contração do resfriamento, onde a presença de um filme líquido de produtos de baixo ponto de fusão não consegue resistir a tensões trativas e se abre, como um rechupe. Trincas de cratera são trincas a quente.

Em termos práticos pode-se afirmar que uma solidificação mais rápida (cordões menores formados com baixa energia de soldagem, de um metal de solda mais puro) minimiza os efeitos de segregações, reduzindo a susceptibilidade ao trincamento a quente.

A figura 19 apresenta um quadro que resume os fatores que afetam a tendência ao trincamento a quente no metal de solda e outro quadro que apresenta a tendência ao trincamento na zona de ligação.



trincamento interdendrítico no metal de solda de um aço austenítico

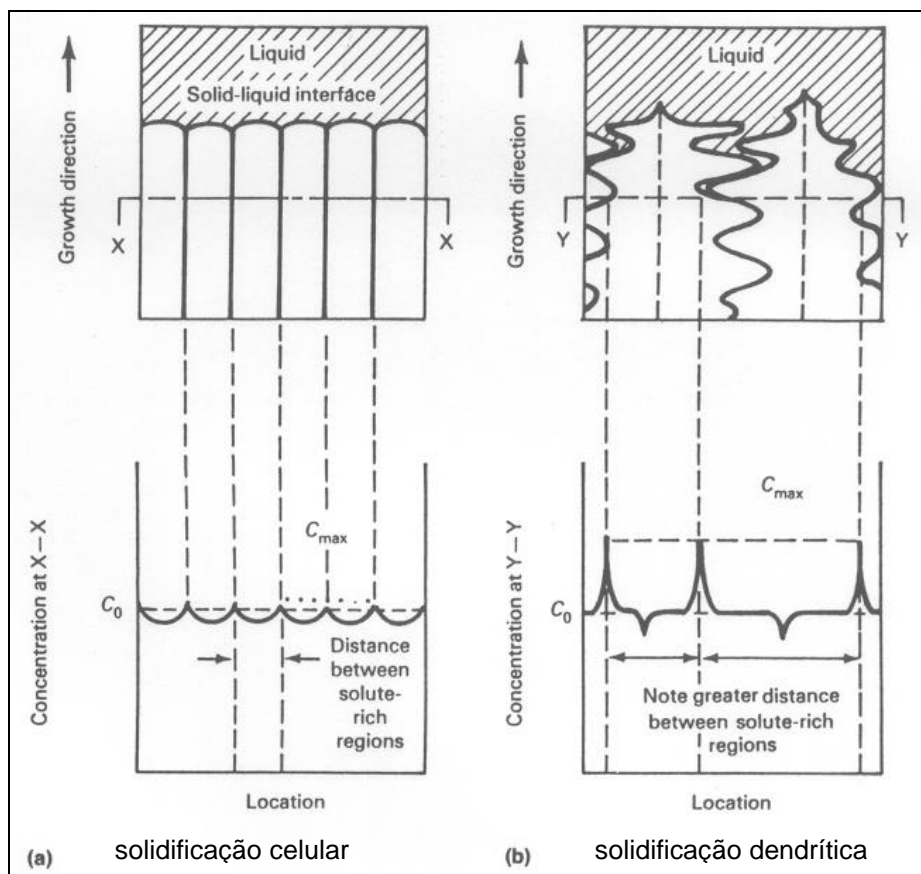


Figura 17 – Trincamento a quente. Trincas de solidificação que são influenciadas pela quantidade de soluto e pelo tipo de solidificação.

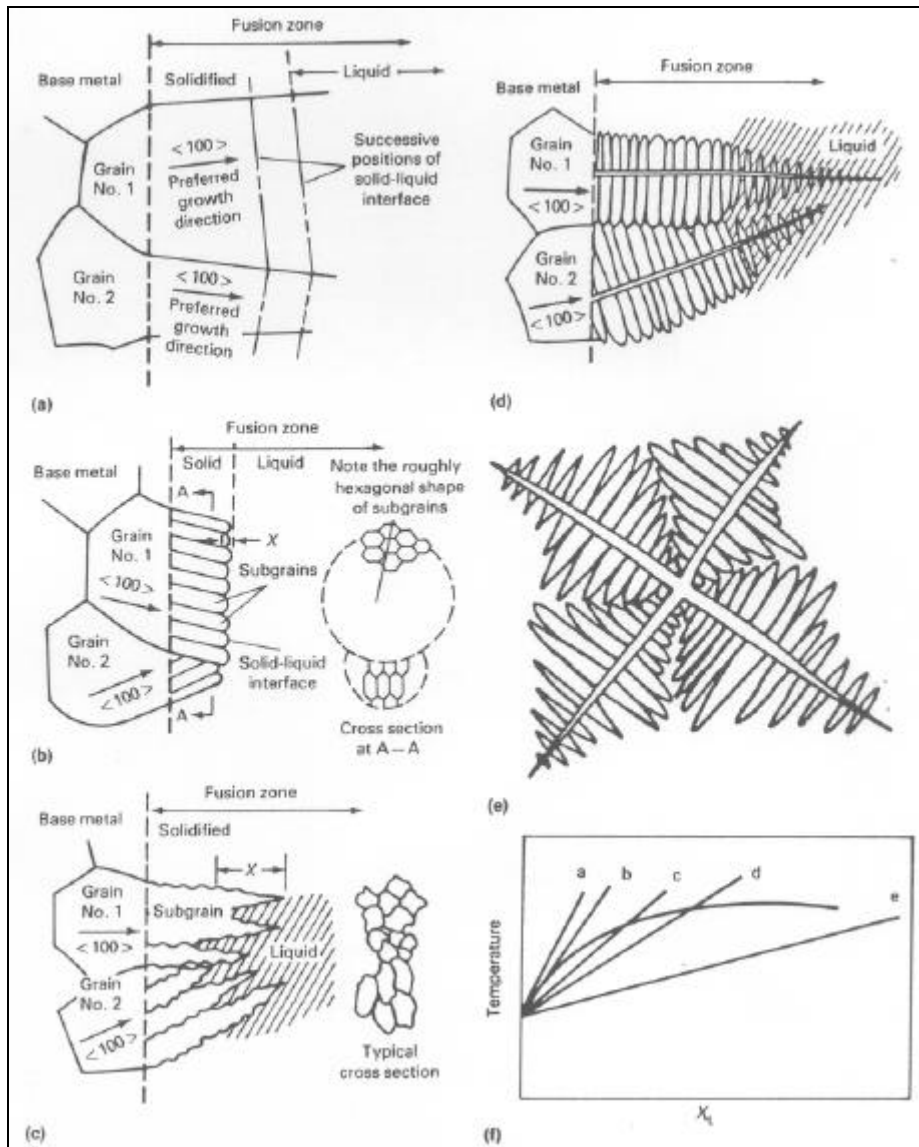


Figura 18 – Estruturas de solidificação formadas devido a diferentes graus de super-resfriamento constitucional.

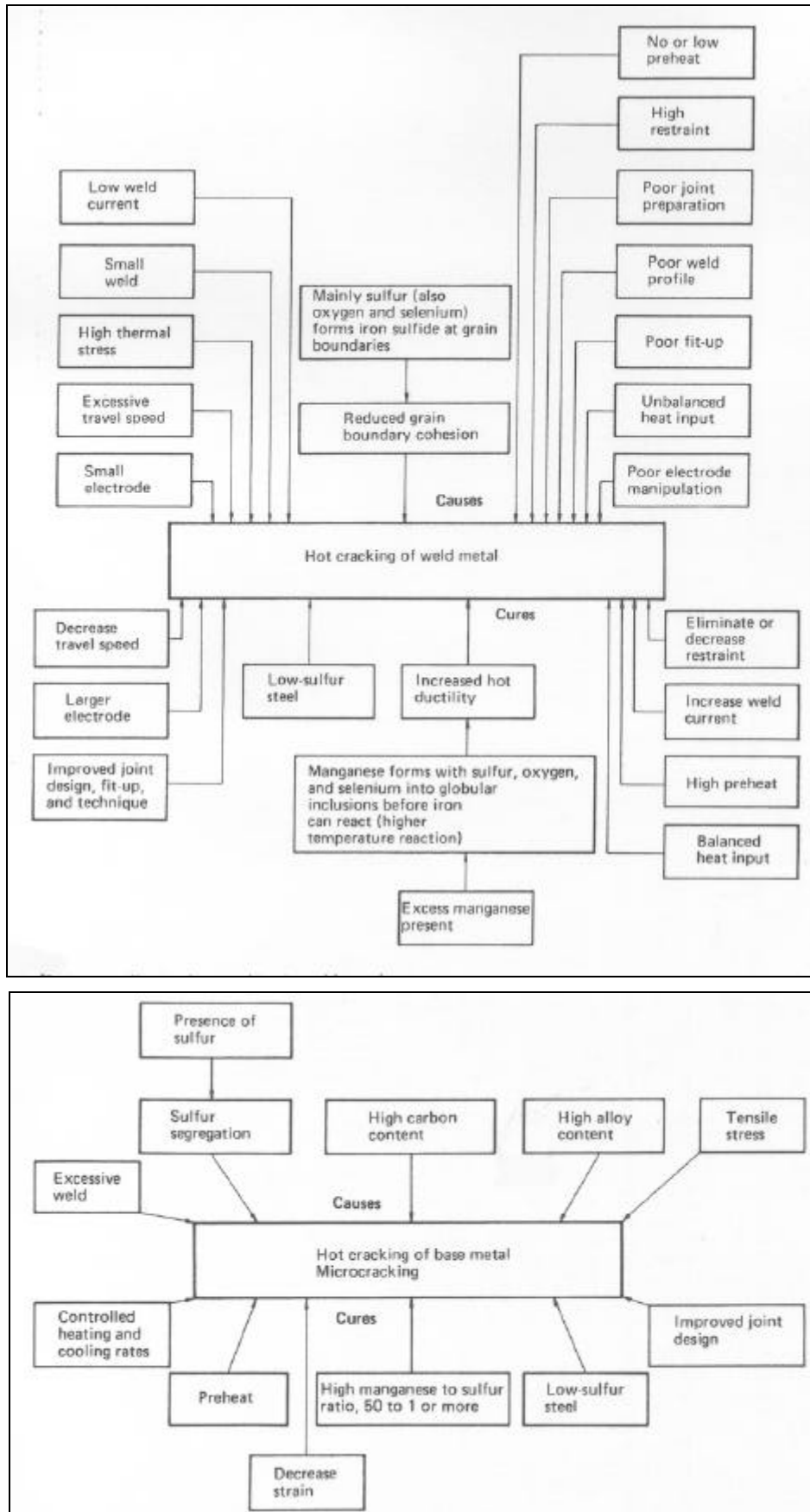


Figura 19 - Quadro resumo dos fatores que afetam as trincas a quente no metal de solda e na zona de ligação.

ZONA DE LIGAÇÃO

A zona de ligação é a região do metal de base que sofreu fusão parcial durante a soldagem, e sobre a qual se inicia a solidificação do metal de solda. Em muitos materiais esta região é pequena e somente pode ser observada a nível microscópico, podendo mesmo não ser identificada, como é o caso dos aços de baixo carbono. Porém existem materiais, austeníticos por exemplo, cuja presença desta região parcialmente fundida pode levar ao **trincamento por liquação**.

Componentes fundidos são muito susceptíveis principalmente devido à granulação grosseira e possível presença de fases eutéticas e contornos de grãos segregados (figura 20). Materiais conformados também podem apresentar este tipo de problema, relacionados a linhas de deformação, fases de diferentes pontos de fusão, etc.

Como o trincamento por liquação é formado por uma região de baixo ponto de fusão no próprio material de base (zona termicamente afetada) normalmente os cuidados para minimizar trincas de solidificação não são efetivos para evitar trincas de liquação sendo importante neste caso minimizar o tensionamento residual através da utilização de amanteigamento.

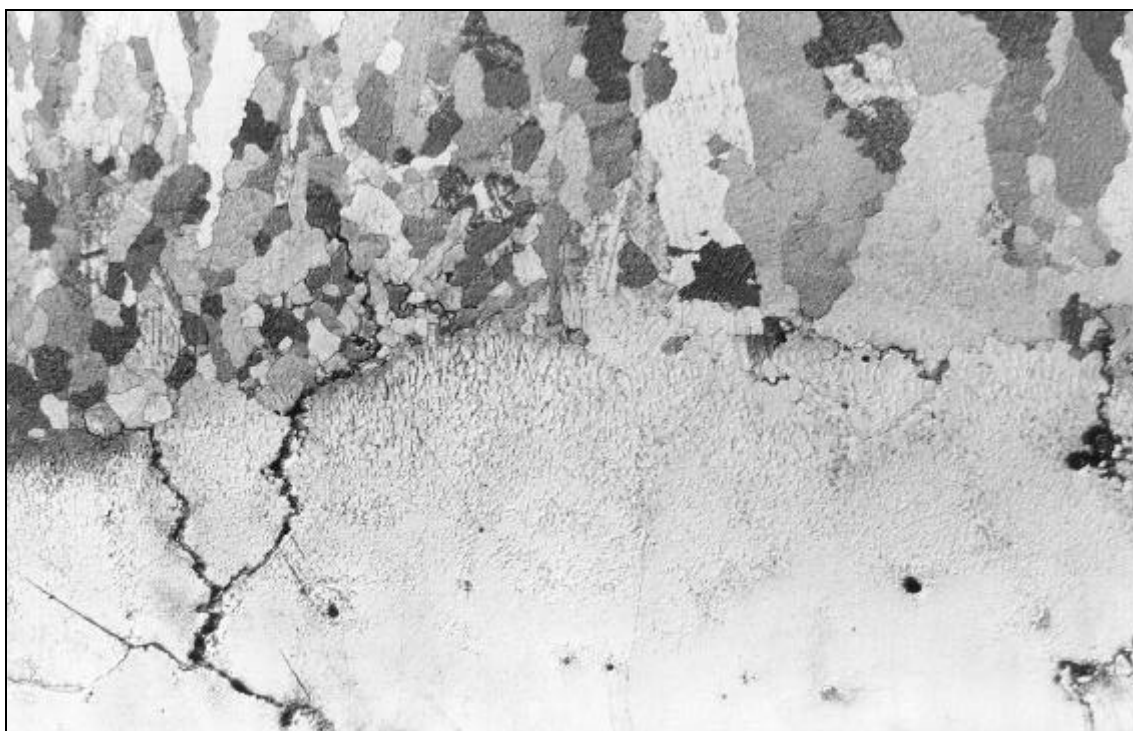


Figura 20 – Trincas de liquação em um aço Hadfield fundido. 50x. Nital.

ZONA TERMICAMENTE AFETADA

O metal base é afetado pelo ciclo térmico imposto na soldagem que, dependendo da composição da liga e das características térmicas da soldagem, modifica tanto a microestrutura como as propriedades em regiões que atingiram temperaturas superiores às de transformações metalúrgicas da liga em questão, correspondentes a:

- *crescimento de grão* em regiões de muito alta temperatura, podendo causar **perda de resistência mecânica e fragilização** em materiais que não sofrem transformações de fases, além de retardo de transformações (aumento da temperabilidade por exemplo) em materiais endurecíveis;
- *dissolução de fases ricas em soluto e/ou superenvelhecimento de precipitados e/ou recristalização* que causam amaciamento do material e **perda de resistência mecânica** ;
- *precipitações* que podem favorecer **trincas de reaquecimento** em materiais endurecíveis por precipitação como por exemplo ligas de níquel ou de alumínio;
- *transformações martensíticas* em ligas ferrosas, que podem causar fragilizações e **trincamento a frio**. Este tipo de transformação é usual em aços temperáveis, cujo carbono equivalente (CE) seja superior a 0,4% . Uma das fórmulas muito utilizadas para o CE é

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Si + \%Ni + \%Cu}{15}$$

As **trincas de reaquecimento** são formadas em materiais que sofrem endurecimento por precipitação, normalmente em ligas de níquel ou aços tipo cromo-molibdênio ou PH, onde o endurecimento do material ocorre no momento em que as tensões estão sendo relaxadas, em alta temperatura (durante o reaquecimento de passes posteriores ou durante o tratamento de alívio de tensões), pela movimentação de discordâncias e deformação plástica.

Existem dois tipos de **trincas a frio**, que são as **trincas de decoesão lamelar** (normalmente só ocorrem para aços ao carbono laminados) formadas pelo tensionamento residual na direção perpendicular à espessura, figura 21, em materiais com nível de impurezas (inclusões alongadas) muito elevado; e as **trincas induzidas pelo hidrogênio**.

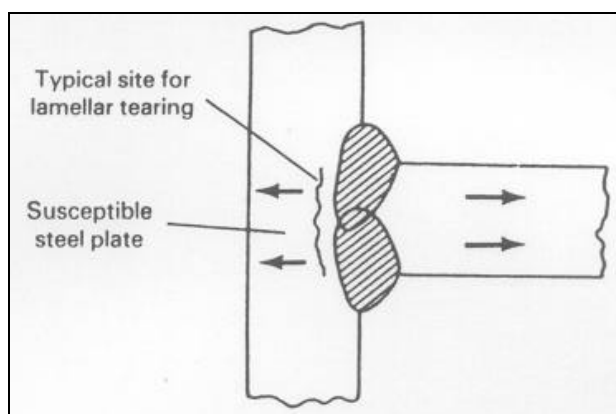


Figura 21
Trincas de decoesão lamelar em aços.

As **trincas induzidas pelo hidrogênio**, também conhecidas como trincas retardadas pois podem ocorrer até 48 horas após a soldagem, são formadas em ligas ferrosas que apresentam as seguintes condições concomitantes:

1. temperaturas inferiores a 150°C;
2. forte tensionamento residual;
3. presença de hidrogênio;
4. microestrutura martensítica de elevada dureza.

A figura 22 apresenta um quadro com um resumo dos fatores que afetam a susceptibilidade ao trincamento a frio. este tipo de trincamento ocorre com maior frequência na ZTA mas também pode ocorrer no metal de solda.

Os principais materiais de base e as transformações que podem ocorrer durante a soldagem estão apresentados na tabela 2, juntamente com a susceptibilidade ao trincamento e uma idéia de soldabilidade.

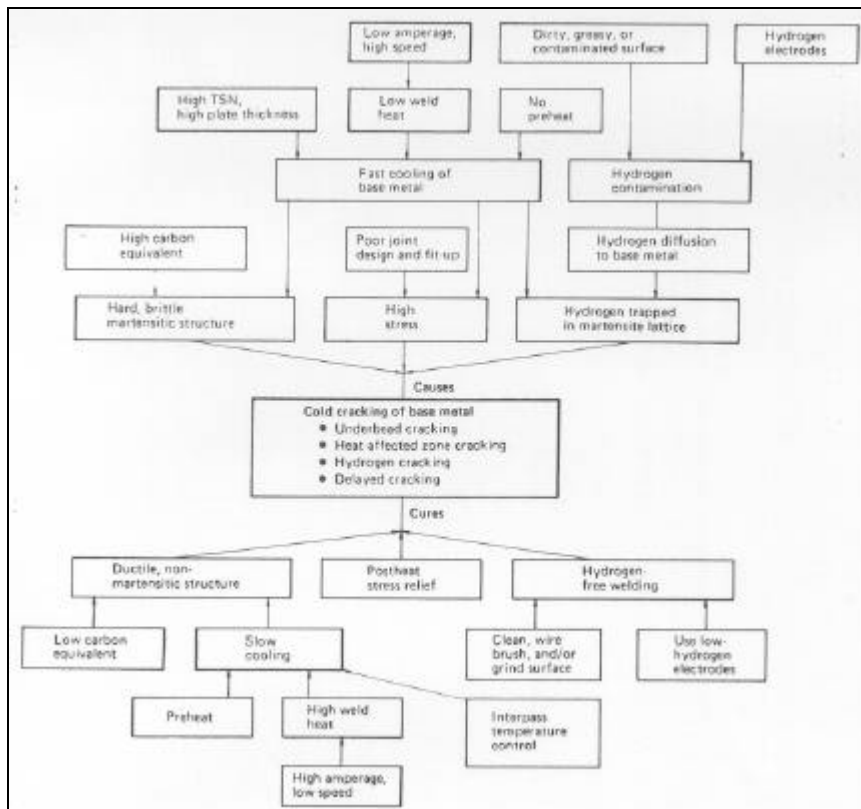
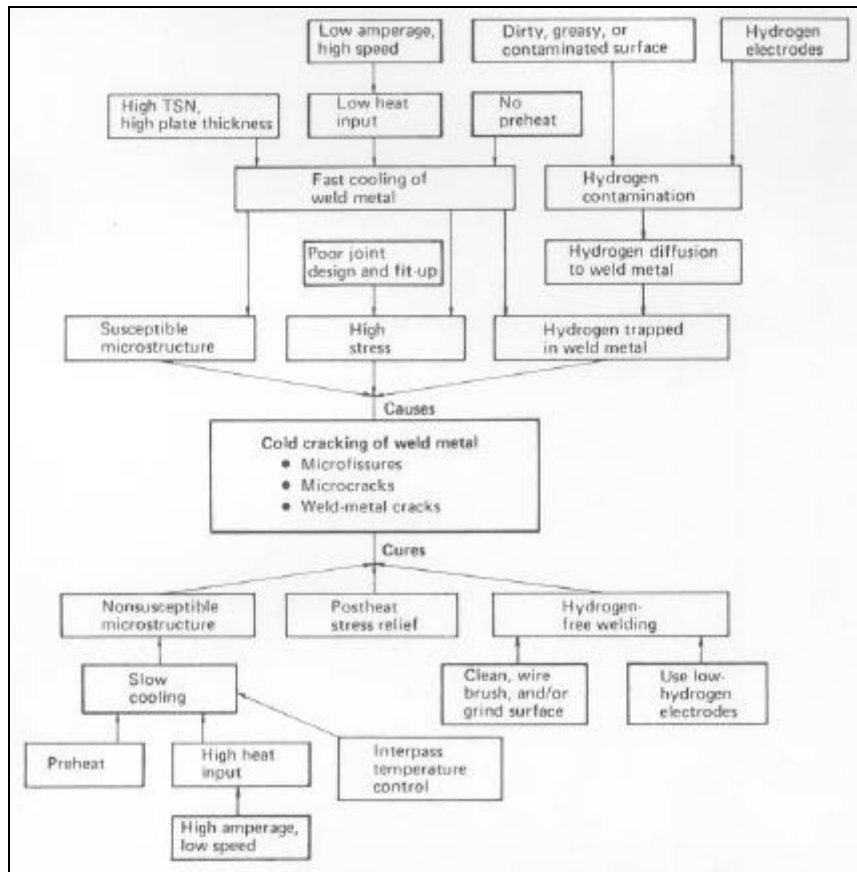


Figura 22 - Quadro resumo dos fatores que afetam as trincas a frio no metal de solda e na zona termicamente afetada.

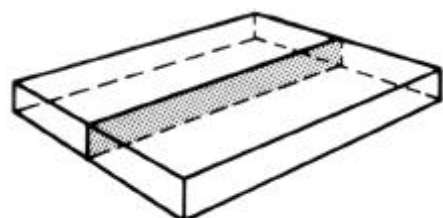
Tabela 2 – Principais tipos de material de base e transformações durante a soldagem.

liga	material	característica	temperaturas de transformação	transformação no resfriamento	susceptibilidade ao trincamento	perda de propriedade
qualquer	conformado a frio	encruado	recristalização	-	baixa	amaciamento
a base de ferro	aços ao carbono	baixo carbono	austenitização	sem problemas	média (TQ)	sem perdas
		médio carbono	austenitização	endurecimento excessivo	alta (TF)	fragilização
	aços baixa liga	não temperáveis	crescimento de grão austenitização	depende da metalurgia	depende da metalurgia	depende da metalurgia
		temperáveis	austenitização	endurecimento	alta (TF)	fragilização
		temperados e revenidos	austenitização revenimento	endurecimento	alta (TF)	fragilização + amaciamento
	aços inoxidáveis	austeníticos	sem	sensitização ?	alta (TQ)	sem perdas
		martensíticos	ferritização austenitização	endurecimento	alta (TF)	fragilização
		ferríticos	crescimento de grão	sem	alta (restrição)	fragilização
		duplex	ferritização	precipitações	baixa	fragilizações
	ferros fundidos	alto carbono	dissolução grafita austenitização	endurecimento	muito alta (TF)	fragilização
	não ferrosos	solução sólida	baixa resistência	sem	sem	alta (TQ)
Al, Ni, Cu	endurecíveis por precipitação	alta resistência	dissolução	precipitações	alta (TR)	fragilização e amaciamento

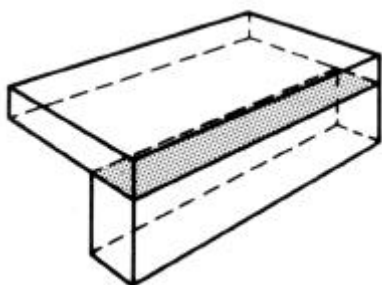
Anotações

Tipos de Juntas

O tipo de junta soldada deve ser determinado em projeto, em função das características do equipamento. É importante ressaltar que o carregamento em uma estrutura ou equipamento é transmitido entre as partes através da solda, e que esta pode uma das configurações da figura 23.



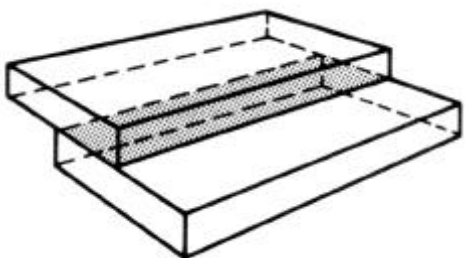
junta de topo (“butt joint”);



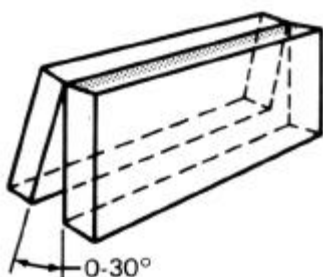
junta em quina (“corner joint”);



junta em ângulo ou em T (“T-joint”);



junta sobreposta (“lap joint”);



junta em aresta (“edge joint”).

Figura 23
Tipos de juntas soldadas

Para estes mesmos tipos de configurações podem ser utilizadas juntas de penetração total, juntas de penetração parcial ou juntas de filete, dependendo do tipo de solicitação na solda e das tensões admissíveis. A tabela 3 apresenta um quadro que resume a aplicação destes tipos de junta para estruturas soldadas segundo a AWS D1.1.

Table 5.6
Allowable Stress and Strength Levels for Steel Welds in Building Construction per AWS D1.1.

Type of Weld	Stress in Weld ^a	Allowable Stress	Required Weld Strength Level
Complete joint penetration groove welds	Tension normal to the effective area	Same as base metal	Matching weld metal must be used
	Compression normal to the effective area	Same as base metal	Weld metal with a strength level equal to or one classification (10 ksi) less than matching weld metal may be used
	Tension or compression parallel to the axis of the weld	Same as base metal	
	Shear on the effective area	0.30 nominal tensile strength of weld metal (ksi), except shear stress on base metal shall not exceed 0.40 yield strength of base metal	Weld metal with a strength level equal to or less than matching weld metal may be used
Partial joint penetration groove welds	Compression normal to the effective area	Joint not designed ^b to bear compression 0.50 nominal tensile strength ^b of weld metal (ksi), except stress on base metal shall not exceed 0.60 yield strength of base metal	
		Joint designed to ^b bear compression Same as base metal	
	Tension or compression parallel to the axis of the weld	Same as base metal	Weld metal with a strength level equal to or less than matching weld metal may be used
	Shear parallel to the axis of the weld	0.30 nominal tensile strength of weld metal (ksi), except shear stress on base metal shall not exceed 0.40 yield strength of base metal	
Fillet welds	Tension normal to the effective area	0.30 nominal tensile strength of weld metal (ksi), except tensile stress on base metal shall not exceed 0.60 yield strength of base metal	
	Shear on the effective area	0.30 nominal tensile strength of weld metal (ksi), except shear stress on base metal shall not exceed 0.40 yield strength of base metal	Weld metal with a strength level equal to or less than matching weld metal may be used
	Tension or compression parallel to the axis of weld	Same as base metal	
	Shear parallel to the faying surfaces (on effective area)	0.30 nominal tensile strength of weld metal (ksi), except shear stress on base metal shall not exceed 0.40 yield strength of base metal	Weld metal with a strength level equal to or less than matching

^a The effective weld area is the effective weld length multiplied by the effective throat.
^b AISC Specification stipulates allowable stress to be same as base metal without distinction as to whether joint is milled to bear or not based upon results of full size column tests.

Diversos tipos de chanfros podem ser utilizados, chanfros em V, em J em U, simples ou duplos (na soldagem pelos dois lados); e além do tipo de solicitação imposta – em tração, torção, dobramento ou cisalhamento; estático ou cíclico - deve-se ainda minimizar o nível de tensões residuais impostas pela soldagem.

A determinação das características específicas do chanfro pode não ser realizada pelo projetista pois as dimensões variam dependendo do processo de soldagem adotado, em função de acesso de tocha por exemplo, e muitas vezes cabe ao pessoal da área de solda determinar o dimensional do chanfro.

Características de qualidade também devem ser requeridas, considerando não somente a integridade da junta mas também requisitos de resistência à corrosão ou ao desgaste, por exemplo, onde a presença de irregularidades ou frestas pode acentuar um processo de acúmulo de danos.

Alguns fatores que devem ser considerados pelo projetista são:

1. a junta é acessível aos soldadores ou inspetores?
2. o projeto considera os fatores econômicos da soldagem?
3. se a junta não pode ser aliviada, o nível de tensões residuais é aceitável?

Procedimento de Soldagem

A elaboração de uma **Especificação de Procedimento de Soldagem** (EPS) consiste em determinar, em função do material e da aplicação do produto, o tipo de soldagem a ser realizada incluindo o processo e todos os seus parâmetros operacionais e tratamentos térmicos. Esta especificação deve ter como ponto de partida o projeto do produto a ser soldado, o qual deverá ter sido especificado através de uma *Norma de Projeto e Fabricação*. Caso não seja mencionada a norma de projeto, deverá ser adotada uma norma que satisfaça as condições de serviço do produto em questão.

A norma de projeto sempre menciona a *Norma de Qualificação* de Procedimentos e de Pessoal (performance) para processos de soldagem, conforme ilustrado na tabela 3 para algumas aplicações típicas.

Tabela 4 – Normas de qualificação requeridas por algumas normas de projeto.

<i>Norma de Projeto e Fabricação do Equipamento</i>	<i>Norma de Qualificação Requerida</i>
ASME SECTION I - Power Boilers SECTION II - Nuclear Components SECTION VIII - Pressure Vessel	ASME SECTION IX ASME SECTION IX ASME SECTION IX
ANSI B 31.1 - Power Piping B 31.3 - Refinery/Chemical Piping B 31.4 - Liquid petroleum Transportation Piping B 31.8 - Gas Transmission Distribution Piping	ASME SECTION IX ASME SECTION IX API-1104 ou ASME SECTION IX API-1104 ou ASME SECTION IX ou APPENDIX A da B 31.8
API 620 - Storage Tanks 650 - Oil Storage Tanks	ASME SECTION IX ASME SECTION IX
AWS D 1.1 - Structural Code-Steel D 1.3 - Sheet Steel in Structures D 1.4 - Structural Code Reinforcing Steel D 3.5 - Steel Hull Welding D 14.1 - Industrial and Mill Cranes D 14.3 - Heavy Equipment D 14.4 - Machinery Equipment	Incluída na D 1.1 Incluída na D 1.3 Incluída na D 1.4 U.S. Navy / U.S Coast Guard / Bureau of Ships Specifications Incluída na D 14.1 ou ASME IX Incluída na D 14.3 para Tubos AWS D 10.9 Incluída na D 14.4

Quando se pretende elaborar uma **Especificação de Procedimento de Soldagem** (EPS) para uma dada aplicação é importante observar que a maior ou menor “facilidade” de soldar um material não está relacionada apenas à natureza metalúrgica do material, mas também ao tamanho e geometria do componente a ser soldado; projeto da junta; acesso e localização; além do tipo de processo e consumíveis a serem utilizados. Outra importante consideração é quanto ao tipo de aplicação a que se destina o componente, pois as solicitações em serviço (temperatura, nível de tensões, meio corrosivo, choques) determinam as propriedades necessárias ao conjunto soldado.

Independente do tipo de material a ser soldado e qual sua aplicação, devem estar determinados na EPS:

- o tipo de material a ser soldado
- a espessura e dimensões permissíveis para o procedimento
- o processo ou processos de soldagem
- o tipo de chanfro
- as posições de soldagem para as quais o procedimento é aplicado
- o tipo de preparação da junta
- o procedimento de limpeza durante as etapas
- o tipo de consumível e diâmetros aplicáveis
- os parâmetros de soldagem
 - faixa de tensão
 - faixa de corrente
 - faixa de velocidades
- a temperatura mínima de preaquecimento
- a máxima temperatura interpasse
- o tratamento térmico pós-soldagem incluindo
 - taxa de aquecimento
 - temperatura de patamar
 - tempo de permanência e
 - taxa de resfriamento

A qualificação prévia de uma EPS é sempre necessária pois garante a integridade e as propriedades da solda, visto que são realizados ensaios destrutivos e não destrutivos em corpos-de-prova soldados com os mesmos parâmetros previstos na EPS.

A qualificação de uma EPS depende do código ou da norma de projeto que o equipamento/peça a ser soldado deve atender. Estruturas seguem o código AWS enquanto tubulações seguem o código API e caldeiras e vasos de pressão seguem o código ASME.

Ensaio não destrutivo sempre são realizados no próprio componente após a soldagem com o objetivo de detectar os possíveis defeitos operacionais de uma soldagem executada fora das condições ditadas pela EPS.

Ao elaborar qualquer procedimento de soldagem deve-se sempre **conhecer as características desejáveis para a aplicação a que se destina o conjunto soldado, conhecer os problemas de soldabilidade inerentes ao material sendo soldado e avaliar como as características térmicas da soldagem podem ser controladas para evitar os possíveis problemas.**

É importante mencionar que uma EPS deverá sempre prever:

- se o material de base apresenta difícil soldabilidade para que se possa realizar os procedimentos adequados de *preaquecimento*, controle da *temperatura interpasse* e *alívio de tensões* que garantam as propriedades e integridade do substrato sem comprometer as propriedades do depósito. Para os materiais usuais estão apresentadas a seguir algumas características de sua soldabilidade e recomendações gerais.
 1. se o metal de base for de aço ao carbono ou baixa liga **não temperável** (carbono equivalente inferior a 0,4%), este pode ser soldado sem maiores cuidados de preaquecimento para espessuras de até 1 “ pois o nível de restrição ainda é baixo em pequenas espessuras. Se for superior a 1” deve-se pré-aquecer para reduzir o tensionamento residual;
 2. se o metal de base for de aço ao carbono ou baixa liga **temperável** (carbono equivalente igual ou superior a 0,4%), este deve sofrer preaquecimento em temperatura adequada (função do carbono equivalente e da espessura) para evitar trincamento a frio. Consumíveis/processos de baixo hidrogênio devem ser sempre adotados;

3. se o metal de base for de aço baixa liga ou inoxidável **temperado e revenido**, além de um criterioso controle de preaquecimento e máxima interpasse deve ser realizado o pós-aquecimento e alívio de tensões na temperatura recomendada para o material. Neste caso o tipo de consumível a ser adotado deve ser recomendado para utilização com alívio;
 4. se o metal de base for de **aço austenítico** (não magnético), este deve ser mantido frio o tempo todo;
 5. se o metal de base for de **ferro fundido**, os cuidados são muito grandes pois a tendência ao trincamento é muito alta, sendo usual soldar com consumível de níquel;
- qual a espessura máxima do metal de base. Este fator é importante pois a troca de calor na peça de teste de qualificação não pode ser muito diferente da troca de calor da peça de produção para que os fatores metalúrgicos não se modifiquem muito;
 - qual a espessura mínima e máxima do depósito de solda. Este é um fator determinante quando a soldagem é de revestimento pois não pode ser utilizada espessura menor do que a qualificada, considerando inclusive a necessidade de usinagem;
 - que a soldagem seja executada segundo processos e técnicas adequadas à natureza do material. Neste sentido deve-se adotar procedimentos de baixo aporte de calor (consumíveis de menor diâmetro na primeira camada, trabalho com corrente mais baixa) quando o material apresenta requisitos de tenacidade.

A qualificação, tanto do procedimento de soldagem como do desempenho de soldadores, é realizada através da avaliação dos resultados de ensaios efetuados em *corpos de provas* extraídos de peças de teste soldadas, sob a supervisão de um inspetor de solda e com registro de todo o processo de qualificação em RQP e/ou RQS de acordo com a EPS estabelecida.

Os ensaios realizados para avaliação da peça de teste dependem do tipo de qualificação desejada e da norma de qualificação adotada.

Os principais tipos de ensaios adotados são:

- visual e dimensional;
- radiografia;
- fratura;
- ensaios mecânicos;
- ensaios metalográficos.

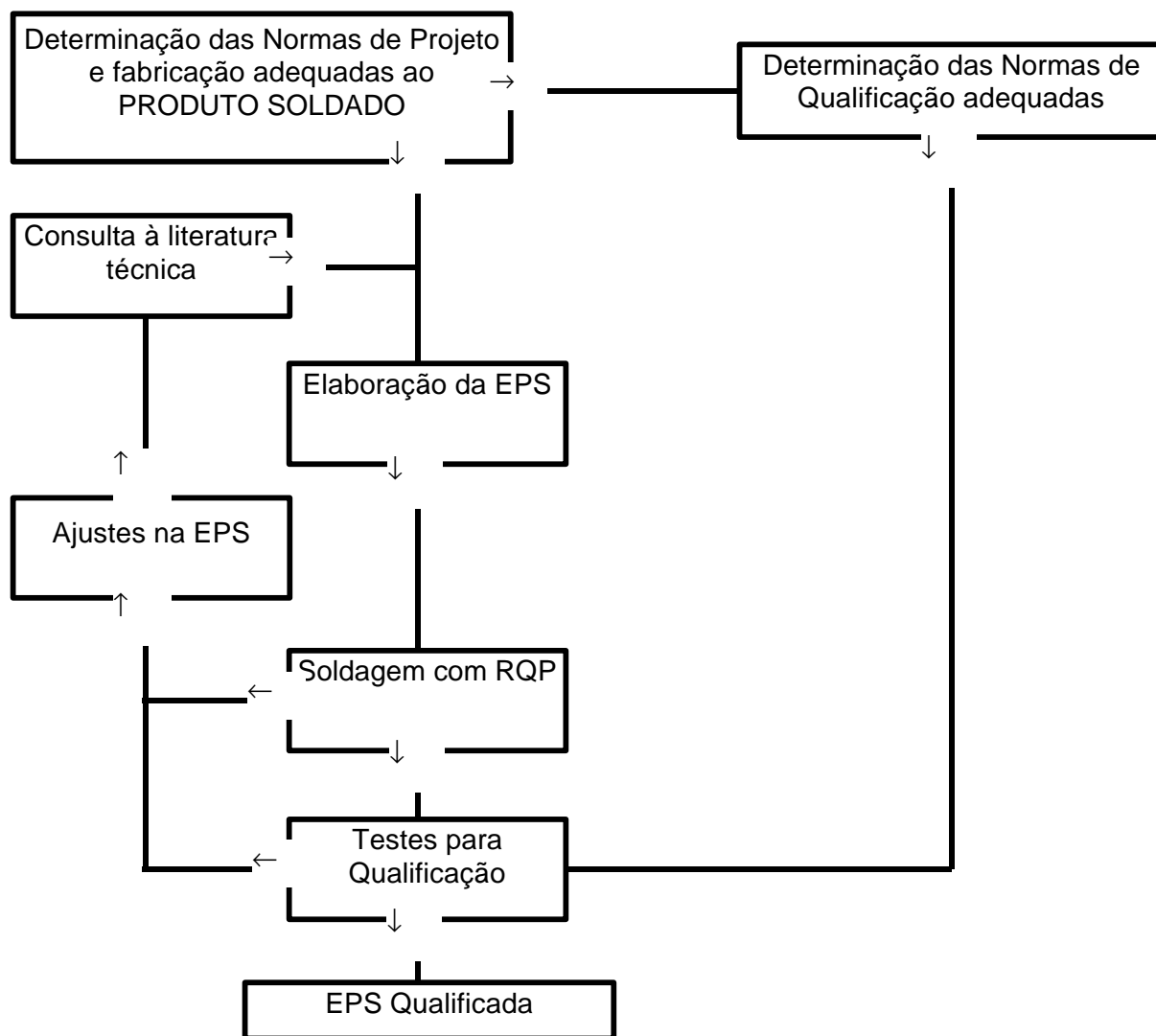
Qualificação de Procedimento de Soldagem

A norma de qualificação estabelece os requisitos mínimos especificados para garantir as propriedades mecânicas da solda. O Registro de Qualificação de Procedimento (RQP) deve conter todos os parâmetros operacionais essenciais para cada processo de soldagem utilizado e as variáveis devem anotadas durante a soldagem das peças de testes dos corpos de prova.

Em geral as variáveis registradas incluem-se dentro de uma pequena faixa de valores que são efetivamente utilizados na soldagem de produção.

As etapas de Elaboração e Qualificação de uma EPS são visualizadas no fluxograma da figura 24.

ETAPAS DE ELABORAÇÃO E QUALIFICAÇÃO DE UMA EPS



Qualificação de Desempenho de Soldagem

A qualificação de desempenho de soldadores (performance) tem por finalidade garantir que o fabricante ou contratante comprove a capacitação de seus soldadores para cumprir os requisitos mínimos especificados em uma solda aceitável.

A qualificação de soldadores deve ser realizada a partir de uma EPS qualificada. Existem casos onde se qualifica a EPS e o soldador ao mesmo tempo, ou seja, o soldador utilizado na soldagem de uma EPS que passou nos testes de qualificação está automaticamente qualificado.

REPAROS

As atividades de reparo deverão seguir as instruções contidas nas *Normas de Qualificação de Procedimento e de Performance e/ou Normas de Projeto de Fabricação* utilizadas. Caso as referidas normas não façam menção a tal atividade, recomenda-se o seguinte procedimento.

Reparo de Fabricação

O responsável deve avaliar as condições e localização da área a ser reparada e as conseqüências posteriores oriundas da atividade de reparo. Recomenda-se a simulação em corpo de prova para avaliação e ajuste dos parâmetros de soldagem determinados segundo a literatura técnica. Em caso de reparo de juntas soldadas deve-se utilizar o procedimento de soldagem pertinente à junta em questão.

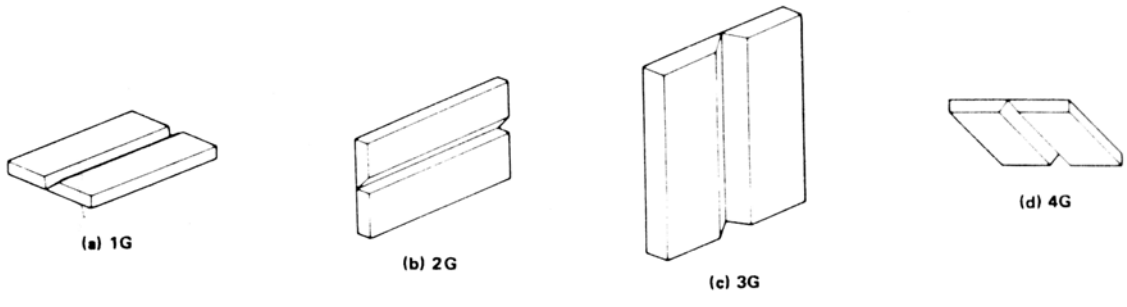
Reparo de Serviço

O responsável deve avaliar as condições e localização da área a ser reparada, solicitando informações referentes à:

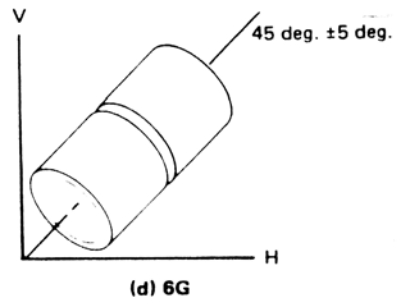
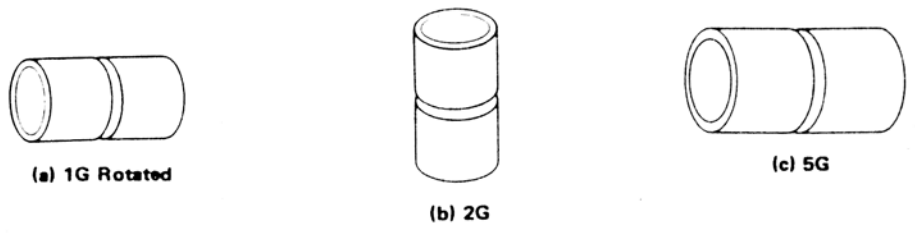
- tipo e ciclo de serviço sofrido pela área sob reparo;
- microestrutura da área de reparo, comparando-a com a do material novo;
- esforços atuantes na área a ser reparada.

Recomenda-se realizar a simulação em corpo de prova para a avaliação e ajuste dos parâmetros de soldagem, determinados segundo a literatura técnica. Em caso de reparos em regiões soldadas deve-se sempre que possível, após a análise das informações acima citadas, utilizar o procedimento de soldagem que gerou a junta em questão.

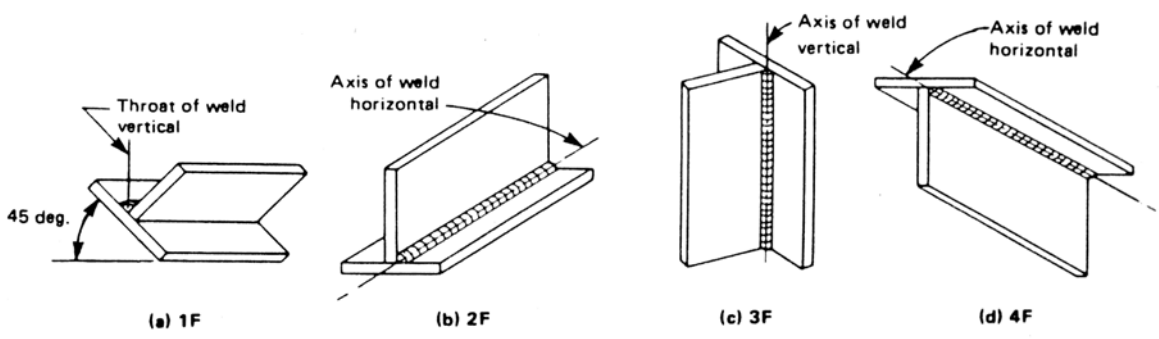
POSIÇÕES DE SOLDAGEM



QW-461.3 GROOVE WELDS IN PLATE — TEST POSITIONS



QW-461.4 GROOVE WELDS IN PIPE — TEST POSITIONS



QW-461.5 FILLET WELDS IN PLATE — TEST POSITIONS