



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA SOLDAGEM II

METALURGIA DA SOLDAGEM

1- Introdução

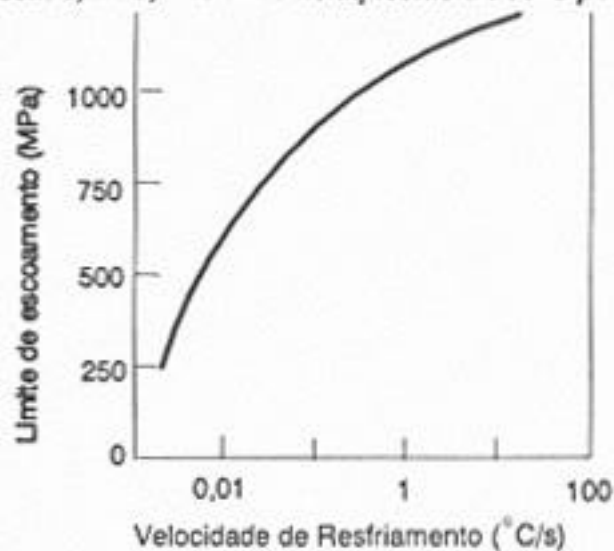
A soldagem é geralmente realizada com a aplicação de calor e/ou deformação plástica. como resultado, alterações das propriedades do material, nem sempre desejáveis ou aceitáveis, podem ocorrer na região da junta. a maioria das alterações depende das reações ocorridas durante a solidificação e resfriamento do cordão de solda e de sua microestrutura final.

2- Metalurgia física dos Aços

a) Relação estrutura-propriedades

Uma característica fundamental dos sólidos, e em particular dos metais, é a grande influencia de sua estrutura na determinação de varias de suas propriedades. Por sua vez, a estrutura é determinada pelos processamentos sofridos pelo material durante sua fabricação.

Figura 1 - Variação do limite de escoamento com a velocidade de resfriamento de um aço com 0,8%C, inicialmente aquecido a 900°C por 1 hora.



A soldagem sob certos aspectos é um tratamento térmico e mecânico muito violento, que pode causar alterações localizadas na estrutura da junta soldada e, portanto, é capaz de afetar localmente as propriedades do material.

Muitas destas alterações podem comprometer o desempenho em serviço do material e, assim devem ser minimizadas pela adequação do processo de soldagem ao material a ser soldado ou pela escolha de um material pouco sensível a alterações estruturais pelo processo de soldagem.

b) Níveis Estruturais

O termo pode compreender desde detalhes grosseiros (macroestrutura) até detalhes da organização interna dos átomos (estrutura eletrônica). A metalurgia física interessa-se pelo arranjo dos átomos que compõem as diversas fases de um metal (estrutura cristalina) e pelo arranjo destas fases (microestrutura). A maioria das propriedades mecânicas e algumas das propriedades físicas e químicas dos metais pode ser estudada, a nível dessas estruturas.

c) Fases presentes nos Aços

Os aços são ligas de ferro e carbono (até um teor Máximo de 2% de carbono, em peso) contendo ainda outros elementos, resultantes do processo de fabricação (impurezas) ou adicionados intencionalmente (elementos de liga) para lhes conferir propriedades especiais. De acordo com os elementos de liga os aços podem ser divididos em baixa-liga (teor de liga inferior a 5%), aços de media-liga (teor de liga entre 5 e 10%) e aços de alta-liga (teor de liga superior a 10%).

Para o estudo dos efeitos da soldagem no aço é necessário um conhecimento prévio de sua microestrutura e de como esta pode ser alterada pelos tratamentos térmicos e variações de composição química.

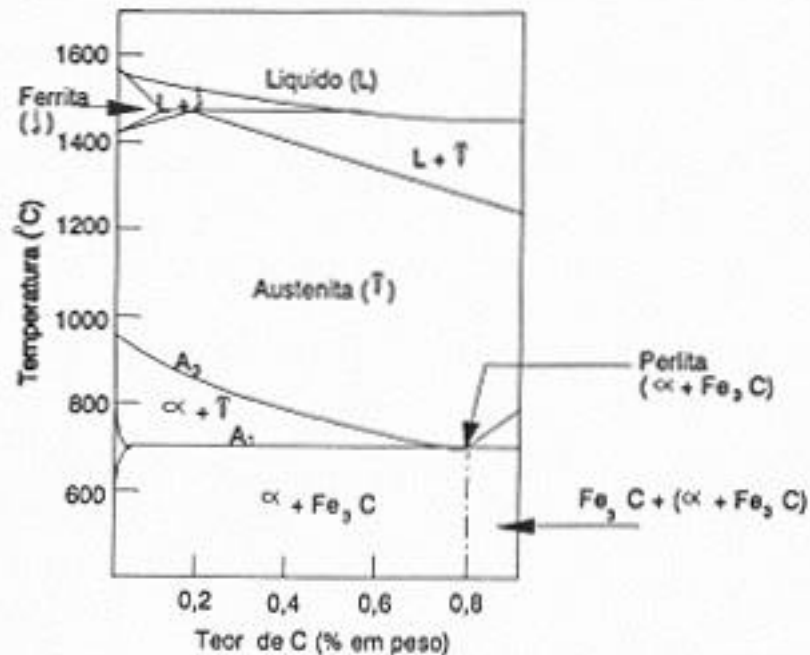
c.1) Fases presentes no aço resfriado lentamente

A figura 2 abaixo mostra um diagrama de equilíbrio ferro-carbono. Este pode ser usado para uma primeira análise dos constituintes de um aço, no equilíbrio, em função da temperatura e da composição química (teor de carbono).

Em temperaturas nas quais o aço está no campo gama, este apresenta uma estrutura austenítica (solução sólida de carbono e outros elementos de liga no ferro, com estrutura cristalina cúbica de face centrada).

Durante o resfriamento, a austenita (para aços com menos de 0,8%C) começa a se transformar em ferrita (solução sólida de C no Fe, com estrutura cúbica de corpo centrado) e finalmente, quando atinge 727^oC, a austenita remanescente transforma-se em perlita, um constituinte típico dos aços, formada por uma mistura de ferrita e cementita (carboneto de ferro).

Figura 2 - Diagrama Fe-C, mostrando os constituintes em equilíbrio nos aços (esquemático).

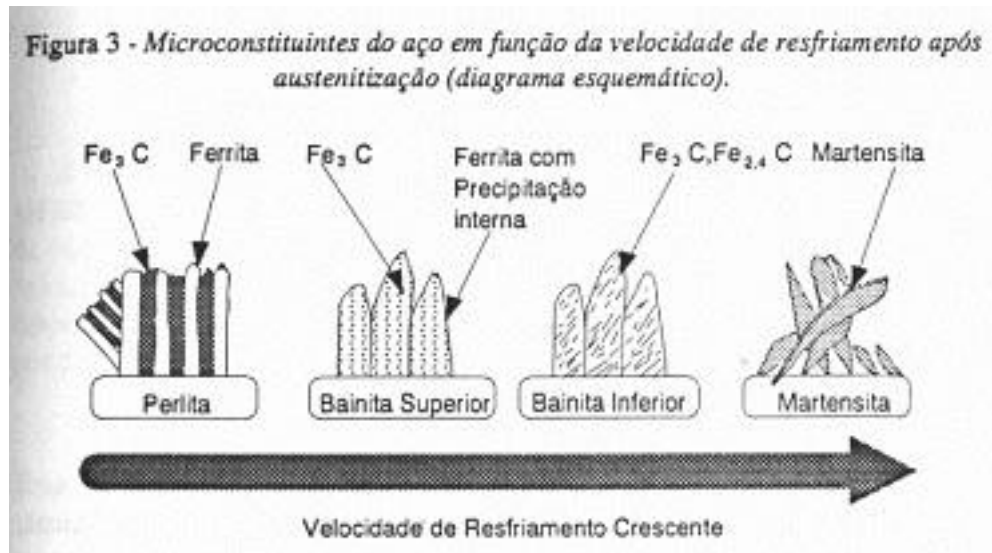


A ferrita é um constituinte macio, dúctil e, em geral tenaz. Contudo, sua tenacidade depende da temperatura, tornando-se completamente frágil a baixas temperaturas. a faixa de temperaturas onde ocorre esta mudança de comportamento depende da composição química da ferrita e de sua morfologia, particularmente do seu tamanho de grão.

A perlita é um constituinte mais duro e de menor tenacidade, a sua quantidade aumenta com o teor de carbono no aço, um aço com 0,8% C, resfriado lentamente, é completamente perlítico.

c.2) Fases metaestáveis e diagramas de transformação

Quando a velocidade de resfriamento aumenta, a temperatura na qual a austenita começa a se transformar torna-se menor. Menores temperaturas de transformação implicam menor mobilidade atômica e, portanto, maior dificuldade para separação em ferrita e carboneto de ferro, isto é, para formação de perlita. Assim em função da velocidade de resfriamento e da composição química do aço, diferentes agregados de ferrita e carboneto (bainita) podem ser formados a partir da decomposição da austenita.



Para altas velocidades de resfriamento, uma nova fase, a martensita, passa a se formar, esta fase possui uma estrutura cristalina diferente das anteriores e é caracterizada por uma elevada dureza. De um modo geral, pode se afirmar que quanto menor a temperatura de transformação e maior o teor de carbono mais dura e frágil é a microestrutura. Na soldagem por fusão, a velocidade de resfriamento varia com a energia cedida durante a soldagem por unidade de comprimento, Este fato é muito importante, pois pode limitar a faixa de energia utilizável na soldagem de uma estrutura do aço em que se necessita alta tenacidade.

Figura 4 - Diagrama TRC para soldagem. (esquemático)



c.3) Elementos de liga

A adição balanceada de elementos de liga permite a obtenção de uma variedade de tipos de aços com diferentes propriedades mecânicas, químicas, magnéticas, elétricas e térmicas. Estruturalmente, pode-se considerar que os elementos de liga atuam em dois aspectos fundamentais: termodinâmico e cinético.

No primeiro aspecto, um elemento de liga pode alterar a estabilidade relativa das fases do aço ou mesmo tornar estável uma outra fase. a maioria dos elementos de liga reduz a velocidade de transformação da austenita ou, em outras palavras, aumenta a sua temperabilidade. Este efeito pode ser diferente para os diversos constituintes e, portanto a adição de elementos de liga pode favorecer a formação de um constituinte, em prejuízo de outro.

Ao entrar em solução sólida em uma fase, um elemento de liga pode alterar as propriedades desta fase. em particular, a resistência mecânica é. em geral aumentada e sua ductilidade diminuída.

d) Mecanismos de Aumento da Resistência Mecânica

A resistência mecânica dos aços pode variar enormemente, de cerca de 200 ate 2000 MPa. Como em outros metais, existem para os aços diversos mecanismos de endurecimento, dos quais podemos citar: deformação a frio, formação de solução sólida e refino de grão. Destes o refino de grão é particularmente importante por produzir, simultaneamente, uma melhoria de ductilidade e tenacidade.

3- Fluxo de Calor

A maioria dos processos de soldagem por fusão é caracterizado pela utilização de uma fonte de calor intensa e localizada. Por exemplo, na soldagem a arco, tem-se uma intensidade da ordem de $5 \times 10^8 \text{ W/m}^2$. Esta energia concentrada pode gerar, em pequenas regiões, temperaturas elevadas, altos gradientes térmicos (10^2 a 10^3 °C/mm), variações bruscas de temperatura (de ate 10^3 °C/s) e, conseqüentemente, extensas variações de microestrutura e propriedades, em um pequeno volume de material.

O fluxo de calor na soldagem pode ser dividido, de maneira simplificada, em duas etapas básicas: fornecimento de calor a junta e dissipação deste calor pela peça.

Na primeira etapa, para soldagem a arco, pode-se considerar o arco como uma única fonte de calor, definido por sua energia de soldagem, isto é:

$$E = \eta \cdot V \cdot I / v ,$$

Onde:

E = Energia de soldagem, em J/mm;

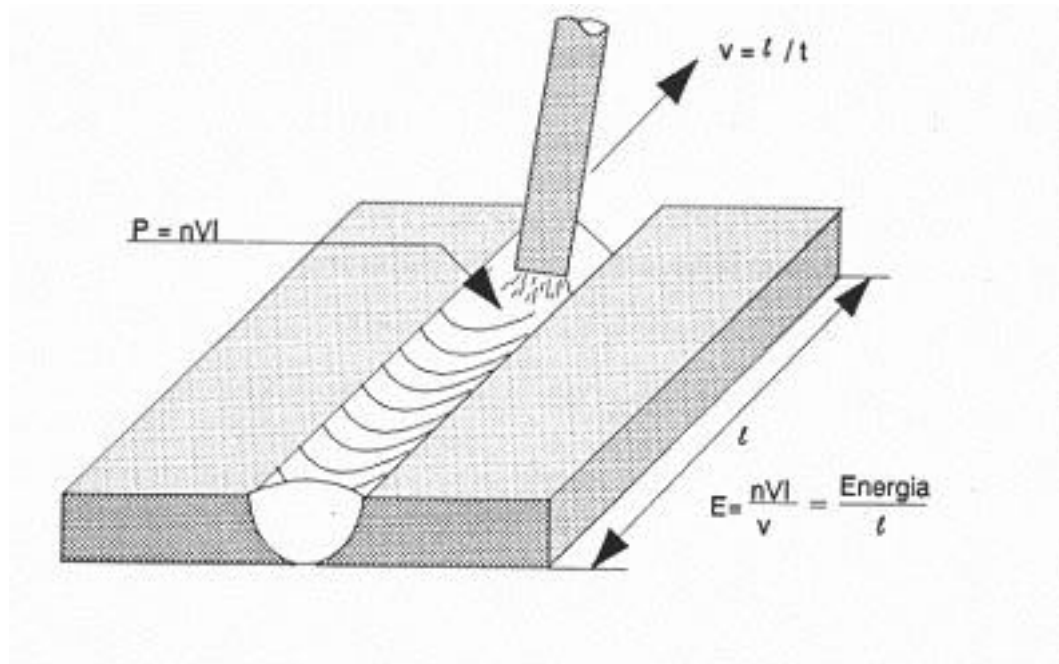
η = Eficiência elétrica do processo;

V = Tensão no arco, em V;

I = Corrente de soldagem, em A;

v = Velocidade de soldagem, em mm/s

A energia de soldagem é uma medida da quantidade de calor cedida a peça, por unidade de comprimento da solda.



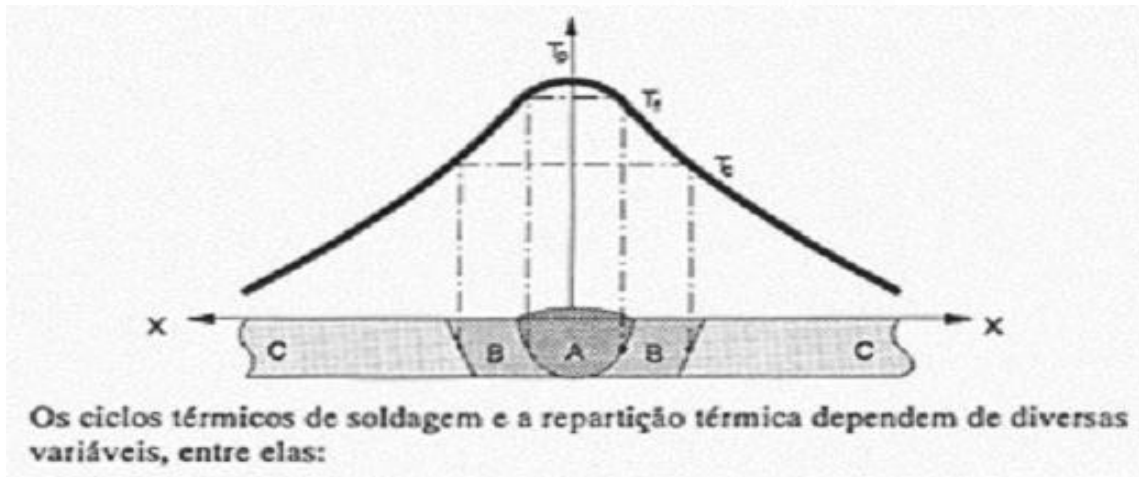
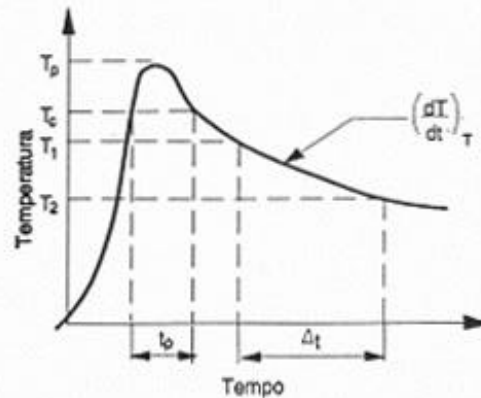
Na segunda etapa, a dissipação do calor ocorre principalmente por condução na peça, das regiões aquecidas para o restante do material. A evolução de temperatura em diferentes pontos, devido à soldagem, pode ser estimada teórica ou experimentalmente.

Um ponto localizado próximo à junta experimentará uma variação de temperatura, devido a passagem da fonte de calor, como mostra a figura abaixo, esta curva é chamada de "ciclo térmico de soldagem".

São características importantes do ciclo térmico de soldagem:

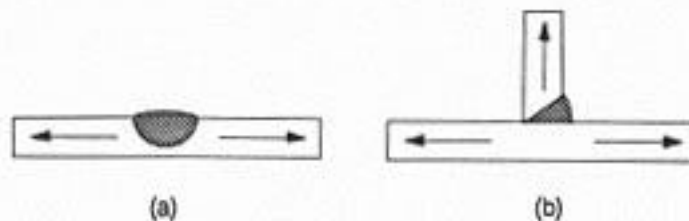
- Temperatura de pico (T_p), temperatura máxima atingida no ponto. T_p diminui com a distancia ao centro da solda, e indica a extensão das regiões afetadas pelo calor de soldagem;
- Tempo de permanencia (t_p) acima de uma temperatura critica, tempo em que o ponto fica submetido a temperaturas superiores a uma temperatura mínima para ocorrer uma alteração de interesse, chamada temperatura critica (T_c);
- Velocidade de resfriamento, definida pelo valor da velocidade de resfriamento a uma determinada temperatura T , ou pelo tempo necessário (t) para o ponto resfriar de uma temperatura (T_1) a outra (T_2).

Figura 6 - Ciclo térmico de soldagem (esquemático).



- Tipo de metal de base: quanto maior a condutividade térmica do material maior a velocidade de resfriamento;
- Geometria da junta soldada: considerando todos os outros parâmetros idênticos, uma junta em T possui três direções para o fluxo de calor, enquanto uma junta de topo possui apenas duas, as juntas em T tendem a resfriar mais rapidamente.

Figura 8 - Direções para escoamento do calor em juntas (a) de topo e (b) em T.



- Espessura da junta: até uma espessura limite, a velocidade de resfriamento aumenta com a espessura da peça. Acima deste limite, a velocidade de resfriamento independe da espessura.
- Energia de soldagem e temperatura inicial da peça: a velocidade de resfriamento diminui com o aumento destes dois parâmetros e a repartição térmica torna-se mais larga.

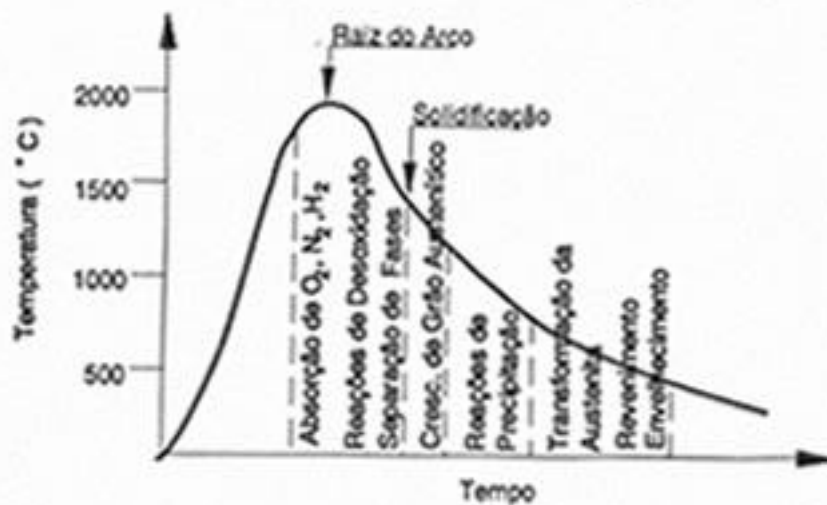
4- Macroestrutura de Soldas por Fusão

A figura abaixo mostra que uma solda por fusão apresenta três regiões básicas:

- Zona Fundida (ZF): região onde o material fundiu-se e solidificou-se durante a operação de soldagem. As temperaturas de pico nesta região foram superiores a temperatura de fusão do material (T_f);
- Zona Termicamente Afetada (ZTA) ou Zona Afetada pelo Calor (ZAC): região não fundida do metal base que teve sua microestrutura e/ou propriedades alteradas pelo ciclo térmico de soldagem. As temperaturas de pico foram superiores a temperaturas críticas para o material em questão;
- Metal de Base (MB): região mais afastada do cordão de solda e que não foi afetada pelo processo de soldagem. As temperaturas de pico são inferiores a temperaturas críticas para o material.

O ciclo térmico de soldagem determina, em grande parte, as alterações estruturais que uma dada região do material pode sofrer devido ao processo de soldagem.

Figura 9 - Diagrama esquemático mostrando diferentes alterações que ocorrem em um ponto na zona fundida da solda de um aço doce.



5- Características da Zona Fundida

a) Características da Poça de Fusão

Nos processos de soldagem por fusão, a zona fundida pode ser formada sob as mais diversas condições. Nos processos mais comuns, isto é, na soldagem a arco com eletrodo consumível, o metal de adição fundido é transferido para a poça de fusão na forma de gotas, aquecidas a temperaturas muito elevadas, acima de 2.000 °C, no caso dos aços.

Nas partes mais quentes da poça de fusão, localizadas logo abaixo do arco, o metal de adição é misturado, sob intensa agitação, ao metal base fundido. Na parte posterior da poça, a temperatura cai e ocorre a solidificação. Nas regiões superaquecidas ocorre uma intensa interação do metal fundido com os gases e escórias presentes na região do arco. Estas interações envolvem a absorção de gases (por exemplo, hidrogênio pelo aço, alumínio ou cobre), a redução de óxidos, com a transferência de oxigênio para o metal, a transferência de elementos de liga e impurezas do metal fundido para a escoria ou vice-versa e a volatilização de elementos de maior pressão de vapor (por exemplo, Zn, Cr e Al).

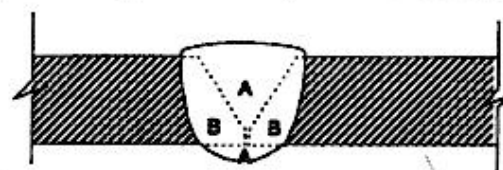
A composição química final da ZF depende da intensidade destas interações, das composições químicas do metal de base e de adição e da participação relativa destes na formação da ZF. Esta participação relativa é conhecida como "coeficiente de diluição" ou, simplesmente, como "diluição" (D), como definida abaixo:

$$D = \frac{\text{massa do metal de base fundido}}{\text{massa total da solda}} \times 100\%$$

A diluição pode ser medida em macrografias de seção transversal de soldas, como mostra a figura abaixo. Seu valor pode variar entre 100% (soldas sem metal de adição) e 0% (brasagem).

O controle da diluição é importante na soldagem de metais dissimilares, na deposição de revestimentos especiais sobre uma superfície metálica, na soldagem de metais de composição química desconhecida, caso muito comum em soldagem de manutenção e na soldagem de materiais que tenha altos teores de elementos prejudiciais à zona fundida, como carbono e o enxofre.

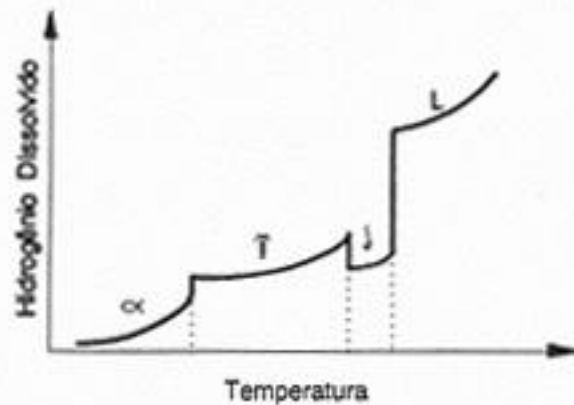
Figura 10 - Diluição medida na seção transversal de uma solda.



$$D = \frac{B}{A+B} \times 100\%$$

Na parte posterior da poça de fusão, a temperatura cai até a temperatura de início de solidificação do material. Esta queda de temperatura faz com que diversas reações que ocorreram nas regiões mais quentes ocorram agora em sentido contrário. O material pode ficar supersaturado de gases em solução, como hidrogênio e o nitrogênio, devido à redução de sua solubilidade com a queda de temperatura e a solidificação, a evolução destes gases pode gerar porosidade na solda.

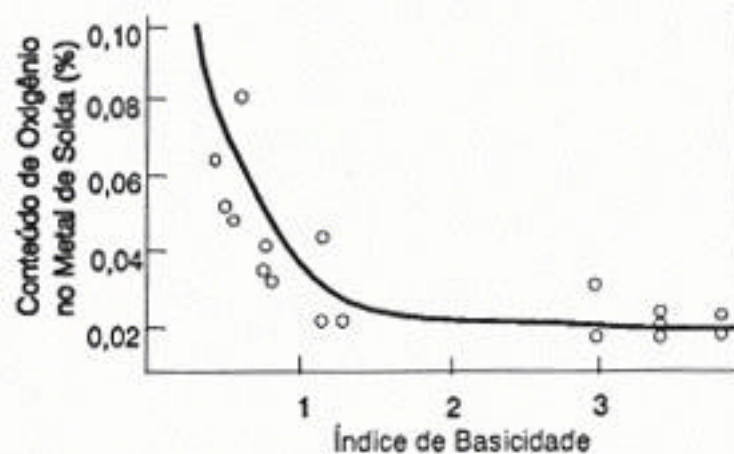
Figura 11 - Variação da solubilidade do hidrogênio no ferro (esquemática).



A solubilidade do oxigênio também cai com a temperatura e este passa a reagir com outros elementos. O produto destas reações pode ser um gás (por exemplo, $C + O \rightarrow CO(g)$, no aço), que pode causar porosidade; um sólido ou um líquido insolúvel na poça que, se for capturado pela frente de solidificação, resultara em inclusões na solda. A formação de porosidades devido a reações do oxigênio com o carbono e a formação de inclusões, sua forma, tamanho e quantidade, dependem do processo e do procedimento de soldagem, da composição do meio de proteção da poça de fusão e do arco (gases e escoria) e das composições do metal de base e adição.

Na soldagem a arco submerso, o teor final de oxigênio na solda e, portanto, o volume de inclusões, tende a diminuir com o aumento da proporção de óxido básicos na composição do fluxo, como mostra a figura abaixo.

Figura 12 - Efeito da basicidade da escória no teor de oxigênio da zona fundida.



b) Solidificação da Poça de Fusão

Em soldagem o fenômeno de solidificação, embora seja semelhante ao de um lingote ou peça fundida, guarda características que lhe são próprias:

b.1) Crescimento epitaxial

A formação de novos grãos não é um evento na solidificação em soldagem. Ao contrário do lingote ou peça fundida, a solda se forma pelo crescimento de grãos do metal de base que estão na interface sólido-líquido. Este fenômeno, chamado de “crescimento epitaxial”, assegura a continuidade metálica entre a ZF e o metal de base.

b.2) Crescimento competitivo

Como a “facilidade de crescimento” de um cristal depende de sua orientação em relação ao fluxo de calor, a solidificação de vários cristais aleatoriamente orientados causa uma seleção, isto é, os cristais orientados desfavoravelmente tendem a para de crescer. Este fenômeno ocorre em soldagem e pode ser responsável por um certo grau anisotropia da ZF.

b.3) Segregação

Devido às elevadas velocidades de solidificação em soldagem, a segregação ocorre em menor escala do que em um lingote. Esta segregação, contudo, é suficiente para causar variações localizadas de microestrutura, propriedades e mesmo problemas de fissuração, particularmente no centro do cordão.

Como as peças fundidas em geral, a ZF é caracterizada por uma estrutura primária de grãos colunares e grosseiros. Este tipo de estrutura confere baixa tenacidade ao material.

c) Formação da Estrutura Secundária

Após a sua solidificação, a ZF pode sofrer ainda alterações até o resfriamento final à temperatura ambiente. Estas alterações podem incluir, por exemplo, o crescimento do grão, a formação de carbonetos, nitretos, fases intermetálicas, etc. e a transformação de uma fase em outra(s). Nos aços doces e aços de baixa-liga, por exemplo, a poça de fusão normalmente se solidifica como ferrita delta, que logo se transforma em austenita. Por sua vez, esta pode se transformar em uma única fase ou em uma mistura complexa de constituintes, em função de fatores como tamanho do grão austenítico, composição química, velocidade de resfriamento e composição, tamanho e quantidade de inclusões.

Em soldagem com vários passes, a microestrutura é mais complexa devido ao efeito refinador (em aços transformáveis) de um passe sobre os imediatamente anteriores.

As propriedades finais da ZF dependerão de sua estrutura final, incluindo as microestruturas de solidificação e a secundária, e a presença de descontinuidades.

6- Características da Zona Afetada Termicamente

As características da ZTA dependem fundamentalmente do tipo de metal de base e do processo e procedimento de soldagem, isto é, do ciclo térmico e da repartição térmica. De acordo com o tipo de metal que esta sendo soldado, os efeitos do ciclo térmico poderão ser os mais variados. No caso de metais não transformáveis (por exemplo, alumínio), a mudança estrutural mais marcante será o crescimento do grão.

Em metais transformáveis, a ZTA será mais complexa. No caso de aços carbono e aços baixa-liga, está apresentará regiões características como ilustrada na figura abaixo:

a) Região de crescimento de grão

Compreende a região do metal de base, mais próxima da solda, que foi submetida a temperaturas próximas da temperatura de fusão. Nesta situação, a estrutura austenística sofre um grande crescimento de grão. Este crescimento dependerá do tipo de aço e da energia de soldagem (processos de maior energia resultarão em granulação mais grosseira). A estrutura final de transformação dependerá do teor de carbono e de elementos de liga em geral, do tamanho de grão austenístico e da velocidade de resfriamento. Aumentando-se qualquer um dos fatores a temperabilidade da região aumentará. De um modo geral, esta região é caracterizada por uma estrutura grosseira, com placas de ferrita, podendo conter perlita, bainita ou martensita. Esta região é a mais problemática da ZTA de um aço, podendo ter menor tenacidade e até apresentar problemas de fissuração.

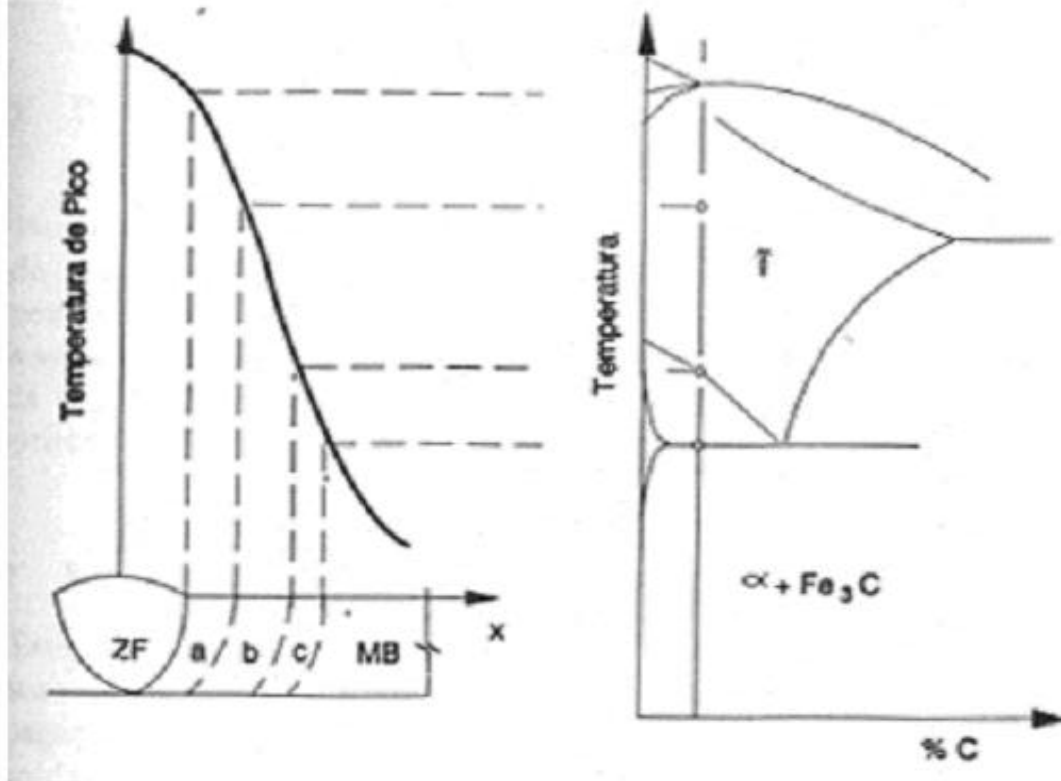
b) Região de refino de grão

Compreende a porção de junta aquecida a temperaturas comumente utilizadas na normalização dos aços (900 a 1000 °C). Após o processo de soldagem, esta região é caracterizada, geralmente, por uma estrutura fina de ferrita não sendo problemática na maioria dos casos.

c) Região intercrítica

Nesta região, a temperatura de pico varia entre 727 °C e a linha A3 da figura 2, sendo caracterizada pela transformação parcial da estrutura original do metal de base. Regiões mais afastadas do cordão de solda, cujas temperaturas de pico foram inferiores a 727 °C, apresentam mudanças microestruturais cada vez mais imperceptíveis.

Figura 13 - Estrutura da ZTA de aços carbono (esquemática).



7 – Descontinuidades comuns em soldas

De acordo com as exigências de qualidade da junta soldada (normas), uma descontinuidade pode ser considerada um defeito, exigindo ações corretivas. Devido ao alto custo destas ações, a presença de defeitos deve ser sempre evitada. Segundo a AWS (American Welding Society), as descontinuidades são divididas em três categorias básicas:

a) – Descontinuidades Dimensionais

- Distorção
- Dimensões incorretas da solda
- Perfil incorreto da solda

b) – Descontinuidades Estruturais

- Porosidades
- Inclusões de tungstênio
- Falta de fusão
- Falta de penetração
- Mordedura
- Outras

c) – Propriedades Inadequadas

- Propriedades mecânicas
- Propriedades químicas
- Outras

a.1) Distorção

Origem:

Deformações plásticas devidas ao aquecimento não uniforme e localizado durante a soldagem.

Causas práticas:

Soldagem em excesso, soldagem em juntas livres, seleção incorreta do chanfro e de seqüência de soldagem, etc.

Conseqüências:

Mudanças de forma e dimensões.

Medidas Corretivas:

A distorção pode ser reduzida, durante a soldagem, diminuindo-se a quantidade de calor e metal depositado, pela utilização de dispositivos de fixação, pelo martelamento entre passes, escolha correta do chanfro e seqüências de soldagem, etc. A correção da distorção em soldas prontas exige medidas, em geral onerosas, como despenamento mecânico ou térmico, remoção da solda e ressoldagem, etc.

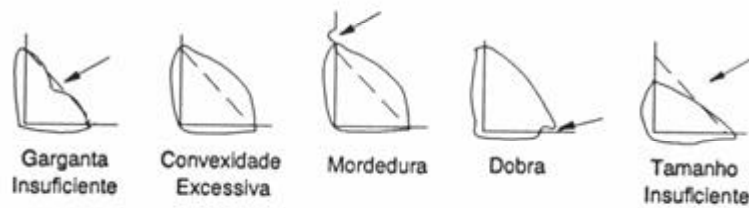
a.2) Dimensão incorreta da solda

No projeto de uma estrutura, as dimensões das soldas são especificadas de modo a atender a algum requisito, por exemplo, resistência mecânica a tração. Dimensões fora das tolerâncias admissíveis configuram defeitos de soldagem, uma vez que a solda deixa de atender a estes requisitos. As dimensões de uma solda são verificadas, em geral, numa inspeção visual, com auxílio de gabaritos.

a.3) Perfil incorreto da solda

Este deve ser considerado, na medida em que as variações geométricas bruscas agem como concentrador de tensões, facilitando a formação e propagação de trincas. A figura 14 abaixo mostra alguns exemplos de perfis inadequados de soldas. Convexidade excessiva de cordões em soldas multipasses podem causar falta de fusão e/ou inclusões de escoria entre passes. Em quase todos os casos, um perfil inadequado do cordão de solda está relacionado com a manipulação ou posicionamento imperfeito do eletrodo e/ou utilização de parâmetros de soldagem inadequados.

Figura 14 - Exemplos de perfis de solda inadequados (esquemático).

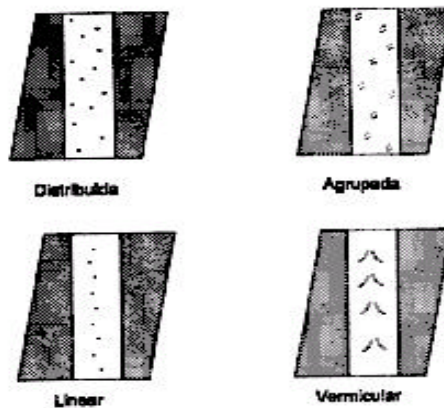


b.1) Porosidades

Origem:

Evolução de gases durante a solidificação da solda. As bolhas de gás podem ser aprisionadas pelo metal solidificado, à medida que a poça de fusão é deslocada. Pode ocorrer uniformemente distribuída, em grupos, alinhada ou como porosidade vermicular, como mostra a figura 15 abaixo.

Figura 15 - Formas de porosidade (esquemática).



Causas práticas

Umidade ou contaminações de óleo, graxa, ferrugem, etc. na região da junta; eletrodo, fluxo ou gás de proteção úmidos; corrente ou tensão de soldagem excessivas; correntes de ar durante a soldagem, etc.

Conseqüências:

Pequenas quantidades de porosidades não são consideradas prejudiciais. Acima de determinados limites (em geral estabelecido por normas), a porosidade pode afetar as propriedades mecânicas, particularmente reduzindo a seção efetiva da junta.

Medidas corretivas:

A formação de porosidade pode ser minimizada pelo uso de materiais limpos e secos, de equipamentos em boas condições e pelo uso de parâmetros de soldagem adequados.

b.2) Inclusões de escoria

Origem:

Durante a fusão e subsequente solidificação da poça de fusão, várias reações se processam. Estas reações podem gerar produtos que, se presos no metal solidificado, formariam inclusões. Por outro lado, vários processos de soldagem utilizam fluxos que formam uma escoria que pode, por diversos motivos, ficar presa no metal solidificado.

Causas práticas:

Proteção inadequada, permitindo a contaminação da poça de fusão; manipulação incorreta do eletrodo, de tal forma que o soldador “permite” que a escoria flua para a poça de fusão e remoção parcial da escoria solidificada, na soldagem em vários passes. Este problema é particularmente agravado quando os passes tem uma convexidade excessiva ou o chanfro é muito estreito. Este tipo de inclusão apresenta-se, em geral, com uma forma alongada em uma radiografia.

Conseqüências:

Uma quantidade excessiva de inclusões prejudica a tenacidade da solda, particularmente inclusões alongadas, que são concentradores de tensão relativamente severos. Este tipo de inclusão pode, também, favorecer a formação de trincas.

Medidas Corretivas:

Manipulação correta e remoção adequada da escoria dos passes de soldagem anteriores.

b.3) Inclusões de tungstênio

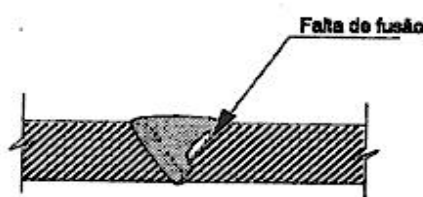
Este tipo de inclusão ocorre na soldagem com processo TIG, quando a ponta do eletrodo toca o metal de base ou a poça de fusão, particularmente na abertura do arco se ignitor de alta frequência, pode ocorrer também quando utilizamos eletrodo com polaridade positiva, associado a correntes elevadas, onde haverá um desgaste excessivo do eletrodo.

b.4) Falta de fusão

Origem:

O termo refere-se à ausência de continuidade metalúrgica entre o metal depositado e o metal de base ou dos passes adjacentes, como ilustra a figura 16 abaixo. Resulta do não aquecimento adequado do metal presente na junta e/ou da presença de camadas de óxidos refratários.

Figura 16 - Falta de fusão (esquemática).



Causas práticas:

Manipulação incorreta do eletrodo, falta de limpeza da junta, energia de soldagem insuficiente (corrente muito baixa ou velocidade de soldagem muito alta), impossibilidade do arco atingir certas regiões da junta (por exemplo na soldagem em vários passes, a região entre dois passes de convexidade excessiva), etc.

Conseqüências:

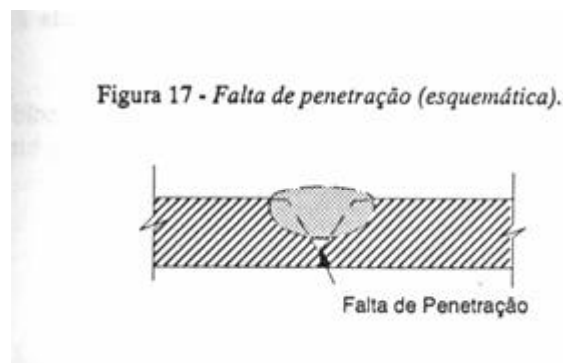
A falta de fusão é um concentrador de tensões severo, podendo facilitar o aparecimento e a propagação de trincas. Além disso, pode reduzir a seção efetiva da solda.

Medidas corretivas:

Em soldagem de responsabilidade, a presença de falta de fusão não pode ser tolerada, exigindo a remoção da região defeituosa e a sua ressoldagem. Para evitar sua formação, deve-se atuar no sentido de se eliminar suas causas práticas.

b.5) Falta de penetração**Origem:**

O termo refere-se a falhas em se fundir e encher completamente a raiz da junta, como mostra a figura 17 abaixo.

**Causas práticas:**

Manipulação incorreta do eletrodo, junta mal projetada (ângulo de chanfro ou abertura da raiz pequenos), corrente de soldagem insuficiente, velocidade de soldagem muito alta e diâmetro do eletrodo muito grande.

Conseqüências:

Redução da seção útil da solda e concentração de tensões.

Medidas corretivas:

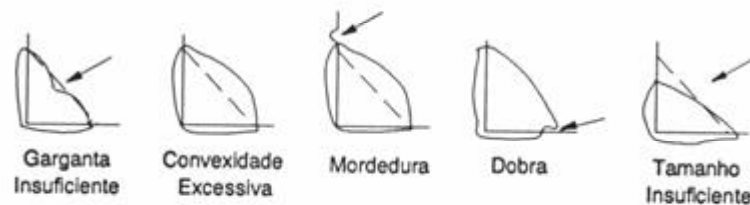
A falta de penetração pode ser evitada pelo projeto adequado da junta e utilização de um procedimento de soldagem adequado. Deve-se ressaltar que muitas juntas são projetadas para serem soldadas com penetração parcial. Neste caso a penetração parcial não constitui um defeito de soldagem.

b.6) Mordeduras

Origem:

Fusão do metal de base na margem do cordão de solda, sem ocorrer o enchimento desta área, resultando na formação de uma reentrância nesta região, como mostrado na figura 14 abaixo.

Figura 14 - Exemplos de perfis de solda inadequados (esquemático).



Causas práticas:

Manipulação incorreta do eletrodo, comprimento excessivo do arco, corrente de soldagem ou velocidade de soldagem muito elevadas. Deve-se observar que na soldagem com eletrodos revestidos, certos eletrodos tem maior tendência para gerar mordeduras que outros.

Conseqüências:

Redução da área útil e concentração de tensões. A resistência à fadiga é particularmente reduzida.

Medidas corretivas:

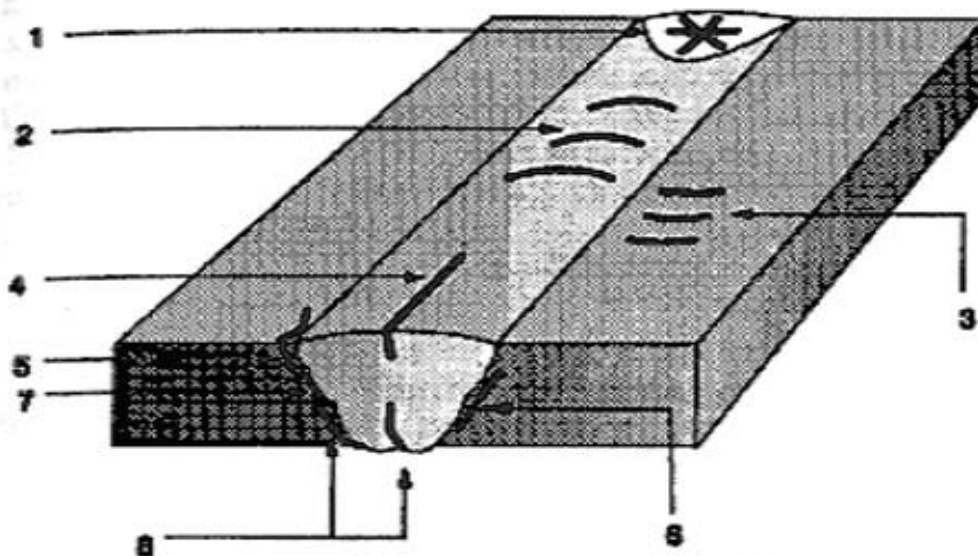
Atuar no sentido de se evitar as suas causas. Quando ocorre na soldagem em vários passes, a sua eliminação (com esmeril, por exemplo) é importante para se evitarem problemas na deposição dos passes seguintes.

b.7) Trincas

São consideradas as descontinuidades mais graves em soldagem. São fortes concentradores de tensão, podendo favorecer o início de fratura frágil na estrutura soldada. De um modo bem simples, uma trinca pode ser considerada como o resultado da incapacidade do material em responder as solicitações impostas localmente pelas tensões decorrentes do processo de soldagem. As tensões decorrentes do processo de soldagem, juntamente com a fragilização associada as mudanças microestruturais durante a soldagem e/ou a presença de certos elementos (particularmente o hidrogênio), pode resultar na formação de trincas.

As trincas podem ser externas, isto é, atingirem a superfície, ou totalmente internas, não sendo, neste caso, detectáveis por inspeção superficial da região da solda. Podem se localizar na ZF, ZTA ou mesmo no metal de base. Quanto às dimensões, tanto podem ser micro como macroscópicas. A figura 18 abaixo mostra as localizações típicas de algumas trincas de soldagem.

Figura 18 - Classificação das trincas de acordo com a sua localização.



1) FISSURA NA CRATERA DA ZF, (2) FISSURA TRANSVERSAL NA ZF, (3) FISSURA TRANSVERSAL NA ZEA, (4) FISSURA LONGITUDINAL NA ZF, (5) FISSURA NA MARGEM DO CORDÃO DE SOLDA, (6) FISSURA SOB O CORDÃO, (7) FISSURA NA LINHA DE FUSÃO E (8) FISSURA NA BASE DA SOLDA.

Vários mecanismos atuam para formação de trincas em soldas. Assim estas podem ser formadas durante a soldagem (na solidificação), durante o resfriamento da junta, horas após a realização da soldagem e mesmo quando da realização de tratamento térmico para alívio de tensões.