



TECNOLOGIA DE SOLDAGEM

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS.....	iii
1 - INTRODUÇÃO	1
2 - PROCESSOS DE SOLDAGEM.....	4
2.1 - Soldabilidade.....	4
2.2 - Classificação dos Processos de Soldagem	5
2.2.1 - Soldagem por oxigás	6
2.2.2 - Aluminotermia.....	12
2.2.3 - Soldagem TIG (soldagem a arco com proteção por gás e eletrodo não consumível) ...	13
2.2.4 - Soldagem a arco com plasma	19
2.2.5 - Soldagem MIG/MAG (Soldagem a Arco com Proteção por Gás e Eletrodo Consumível).....	21
2.2.6 - Soldagem com eletrodo tubular (FCAW).....	31
2.2.7 - Soldagem com eletrodo revestido.....	35
2.2.8 - Soldagem por arco submerso.....	43
2.2.9 - Eletroescória e Eletrogás	46
2.2.10 - Soldagem a ponto e por costura.....	48
2.2.11 - Soldagem por explosão.....	49
2.2.12 - Soldagem por fricção.....	50
3 - BRASAGEM E SOLDABRASAGEM.....	51
4 - FORMAÇÃO DE UMA JUNTA SOLDADA	54
5 - TERMINOLOGIA E SIMBOLOGIA DE SOLDAGEM	56
6 - METALURGIA DA SOLDAGEM.....	62
6.1 - Macroestrutura de Soldas por Fusão.....	66
6.2 - Características da Zona Fundida.....	67
6.3 - Microconstituintes do Metal de Solda de Aços Ferríticos.....	70
6.4 - Características da Zona Termicamente Afetada	71
7 - RESISTÊNCIA ESTRUTURAL DA JUNTA SOLDADA	73
7.1 - Resistência Estática da Junta Soldada.....	73
7.1.1 - Propriedades de tração.....	73
7.1.2 - Resistência do metal depositado.....	77
7.1.3 - Propriedades de tração de juntas de topo.....	77
7.1.4 - Juntas soldadas com filetes de solda.....	79
7.2 - Tenacidade da Junta Soldada.....	80
7.3 - Tensão Admissível e Coeficiente de Segurança.....	82
7.4 - Eficiência da Junta Soldada.....	82
7.5 - Cálculo da Resistência Estrutural das Juntas Soldadas.....	84
8 - CONTROLE DE QUALIDADE EM SOLDAGEM.....	85
8.1 - Trincas.....	87
8.2 - Inclusões.....	88
8.3 - Cavidades	89
8.4 - Geometria.....	90
8.5 - Decoção Lamelar.....	91
8.6 - Falta de Fusão.....	91
8.7 - Penetração Incompleta.....	92
8.8 - Distorções	92
8.9 - Ensaio Não-Destrutivo	93
8.9.1 - Inspeção visual	93
8.9.2 - Líquido penetrante.....	94
8.9.3 - Partícula magnética.....	95
8.9.4 - Ultra-som.....	96
8.9.5 - Radiografia (raios X e gama).....	98
9 - SEGURANÇA E HIGIENE NA SOLDAGEM.....	100
10 - BIBLIOGRAFIA.....	103

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação dos processo de soldagem quanto à fonte de energia.	5
Figura 2 - Representação esquemática do processo de soldagem por oxigás... ..	7
Figura 3 - Equipamento utilizado no processo de soldagem oxi-acetilênico... ..	8
Figura 4 - Cadinho utilizado no processo de soldagem aluminotérmica.....	13
Figura 5 - Esquema do processo de soldagem TIG	14
Figura 6 - Equipamento básico para soldagem TIG (esquemático).....	15
Figura 7 - Representação esquemática de uma tocha para soldagem TIG.	16
Figura 8 - Esquema do processo de soldagem a arco com plasma... ..	20
Figura 9 - Representação esquemática do processo de soldagem MIG/MAG	21
Figura 10 - Perfil típico de cordões de solda feitos com diferentes gases e misturas....	22
Figura 11 - Diferentes tipos de mecanismos de transferência metálica em MIG.....	25
Figura 12 - Esquema do processo MIG/MAG... ..	28
Figura 13 - Esquema de uma tocha para soldagem MIG/MAG.	28
Figura 14 - Representação esquemática do processo de soldagem a arco com eletro... ..	32
Figura 15 - Geometrias usuais dos eletrodos tubulares.	33
Figura 16 - Representação esquemática da soldagem a arco com eletrodo revestido. ..	35
Figura 17 - Esquema explicativo do sistema de classificação de eletrodos... ..	40
Figura 18 - Esquema do processo de soldagem por arco submerso utilizando.	44
Figura 19 - Esquema do processo de soldagem por eletroescória: (a) vista frontal.	47
Figura 20 - Esquema do processo de soldagem por resistência elétrica: (a) a.....	49
Figura 21 - Representação da soldagem por explosão... ..	49
Figura 22 - Micrografia da união de chapas por explosão... ..	50
Figura 23 - Representação esquemática do processo de soldagem por fricção.....	51
Figura 24 - Variação de energia potencial para um sistema composto de dois.....	54
Figura 25 - Formação teórica de uma solda pela aproximação das superfícies... ..	55
Figura 26 - Representação esquemática da superfície metálica limpa.	55
Figura 27 - Representação esquemática da soldagem por fusão.....	56
Figura 28 - Macrografia de uma junta soldada por fusão... ..	56
Figura 29 - Tipos de junta... ..	57
Figura 30 - Tipos de chanfro... ..	58
Figura 31 - Características dimensionais de chanfros usados em soldagem	58
Figura 32 - Algumas dimensões e regiões de soldas de topo e filete	58
Figura 33 - Posições de soldagem.....	59
Figura 34 - Localização dos elementos de um símbolo de soldagem.....	60
Figura 35 - Tipos básicos de soldas e seus símbolos... ..	61
Figura 36 - Sete variações de soldas em chanfro e seus símbolos... ..	62
Figura 37 - Símbolos suplementares.....	62
Figura 38 - Conceito de energia de soldagem. P é a potência dissipada no arco	64
Figura 39 - Ciclo térmico de soldagem (esquemático)... ..	64
Figura 40 - Repartição térmica em uma solda (esquemática). A - ZF, B -.....	65
Figura 41 - Direções para escoamento do calor em juntas (a) de topo e (b) em T.	65
Figura 42 - Seção transversal da região de uma solda obtida por processos que	66
Figura 43 - Diagrama esquemático mostrando diferentes alterações que ocorrem	67
Figura 44 - Diluição medida na seção transversal de uma solda... ..	68
Figura 45 - Variação da solubilidade do hidrogênio no ferro (esquemático)... ..	68
Figura 46 - Efeito da basicidade da escória no teor de oxigênio da zona fundida.....	69
Figura 47 - Micrografia de um metal de solda ferrítico mostrando ferrita acicular	71
Figura 48 - Estrutura da ZTA de aços carbono (esquemática). ..	72

Figura 49 - Microestrutura da ZTA, esquemática...	73
Figura 50 - Corpos de prova típicos para ensaios de tração utilizados em soldagem....	74
Figura 51 - Curva tensão-deformação real.....	75
Figura 52 - Limite elástico e limite convencional de escoamento...	76
Figura 53 - Fratura de corpos de prova para ensaio de tração.....	76
Figura 54 - Reforço da solda...	78
Figura 55 - Concentração de tensões em juntas de topo.....	78
Figura 56 - Tipos de juntas superpostas com filete. ..	79
Figura 57 - Dimensões básicas no filete de solda.....	80
Figura 58 - Corpo de prova para o ensaio de impacto Charpy e a aparência da fratura.	81
Figura 59 - Transição do tipo de fratura ...	81
Figura 60 - Classificação das trincas de acordo com a sua localização.....	88
Figura 61 - Influência do formato do cordão na sensibilidade à fissuração a quente....	88
Figura 62 - Formas de porosidade (esquemática).....	89
Figura 63 - Exemplos de perfis de solda inadequados (esquemático)... ..	90
Figura 64 - Decoção lamelar (esquemática).....	91
Figura 65 - Falta de fusão (esquemático).....	91
Figura 66 - Falta de penetração (esquemática). ..	92
Figura 67 - Esquema de gabarito para a determinação da dimensão de soldas de ...	94
Figura 68 - Princípios básicos da inspeção com líquidos penetrantes: (a) peça com....	94
Figura 69 - Princípios básicos da inspeção com partículas magnéticas: (a) peça com..	96
Figura 70 - Princípio básico da inspeção de materiais por ultra-som... ..	97
Figura 71 - Inspeção ultra-sônica de uma junta soldada com cabeçote angular.....	97
Figura 72 - Inspeção radiográfica.....	98
Figura 73 - Exemplos de radiografias de soldas com descontinuidades: (a) Falta de ...	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação de soldabilidade de alguns materiais.	4
Tabela 2 - Exemplos de tamanho de bico, pressão de gases e velocidade de soldagem	10
Tabela 3 - Características de combustão de alguns gases usados na soldagem a gás....	11
Tabela 4 - Especificações AWS para varetas de metal de adição para soldagem a gás.	12
Tabela 5 - Gases de proteção e tipos de corrente usuais na soldagem de diferentes.....	17
Tabela 6 - Especificações AWS para metais de adição adequados à soldagem TIG	18
Tabela 7 - Composição química de eletrodos de tungstênio... ..	18
Tabela 8 - Valores típicos de corrente para eletrodos de tungstênio	19
Tabela 9 - Classificação dos tipos transferência metálica feita pelo Instituto... ..	24
Tabela 10 - Corrente de transição para arames de aço e de alumínio com diferentes...	27
Tabela 11 - Especificações AWS de materiais de adição para soldagem MIG/MAG...	30
Tabela 12 - Gases e misturas usados na soldagem MIG/MAG... ..	31
Tabela 13 - Especificações AWS para classificação de eletrodos revestidos.....	39
Tabela 14 - Significado do quarto (ou quinto) dígito da classificação AWS de.....	41
Tabela 15 - Seleção de metais de adição para soldagem de aços inoxidáveis.....	42
Tabela 16 - Faixas típicas de parâmetros elétricos de operação para diferentes	43
Tabela 17 - Exemplos de propriedades mecânicas específicas para metais	77
Tabela 18 - Exemplos de tensões admissíveis, sem considerar a fratura por fadiga.	83
Tabela 19 - Exemplos de eficiências de juntas soldadas.	84
Tabela 20 - Exemplos de expressões para o cálculo da resistência de juntas soldadas.	86

1 - INTRODUÇÃO

Os materiais podem ser unidos de diversas maneiras e, para uma mesma união, pode haver diversos processos que competem entre si, produzindo resultados tecnológicos similares. Assim, a escolha do método a ser empregado recai sobre o de menor custo.

Os métodos de união dos metais podem ser divididos em duas categorias principais, isto é, aqueles baseados no aparecimento de forças mecânicas macroscópicas entre as partes a serem unidas e aqueles baseados no aparecimento de forças microscópicas (interatômicas ou intermoleculares). No primeiro caso, do qual são exemplos a parafusagem e a rebiteagem, a resistência da junta é dada pela resistência ao cisalhamento do parafuso ou rebite, mais as forças de atrito entre as superfícies em contato. No segundo caso, a união é conseguida pela aproximação dos átomos e moléculas das partes a serem unidas, ou destas e um material intermediário, até distâncias suficientemente pequenas para a formação de ligações metálicas e de Van der Waals. Como exemplos desta categoria citam-se a soldagem, a brasagem e a colagem.

Os processos em que ocorre a união de dois ou mais materiais com fornecimento de energia, criando um meio metálico contínuo, são denominados de processos de soldagem. A energia fornecida para que a união se estabeleça pode ser de origem mecânica, termomecânica, química, elétrica ou radiante.

A soldagem pode ou não utilizar materiais de adição e pode ou não apresentar a formação de uma fase líquida. O material de adição é definido como o material adicionado no processo de soldagem cujo objetivo é promover a união e preencher as cavidades da junta.

O processo de união é a visão clássica da soldagem, porém, muitos processos de soldagem ou variações destes são usados para a deposição de material sobre uma superfície, visando à recuperação de peças desgastadas ou para a formação de um revestimento com características especiais.

Diferentes processos relacionados com a soldagem são usados para corte de peças metálicas e em muitos aspectos estas operações se assemelham a operações de soldagem.

A grande vantagem da soldagem é a possibilidade de obtenção de uma união em que os materiais apresentem uma continuidade não só na aparência externa, mas

também nas suas características e propriedades mecânicas e químicas, relacionadas à sua estrutura interna.

Existem muitas definições de soldagem:

- “Processo de junção de metais por fusão”. (Deve-se ressaltar que não só metais são soldáveis e que é possível soldar metais sem fusão).
- “Operação que visa obter a união de duas ou mais peças, assegurando, na junta soldada, a continuidade de propriedades físicas, químicas e metalúrgicas”.
- “Processo de união de materiais baseado no estabelecimento, na região de contato entre os materiais sendo unidos, de forças de ligação química de natureza similar às atuantes no interior dos próprios materiais”.

Uma que é meramente operacional e não apresenta nada do ponto de vista comercial mas é abrangente é a definição da Associação Americana de Soldagem (American Welding Society - AWS): “Soldagem é o processo de união de materiais que visa obter a coalescência (união) localizada de metais e não-metais, produzida pelo aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem aplicação de pressão e/ou de metal de adição”.

Os processos de soldagem são aplicados em todos os segmentos da indústria, desde as etapas de fabricação até o reparo e manutenção de equipamentos e peças. Assim, fundamentalmente os campos de solda são: solda de produção e solda de manutenção.

A solda de produção é o campo de maior difusão e projeção da solda. Onde quer que se empreguem metais, a solda, logo após a matéria prima é o elemento de maior necessidade e, portanto, de uso indispensável. Para facilitar e regular o seu emprego são necessários estabelecer especificações técnicas, que são detalhadas através de um setor de engenharia, onde vários profissionais estão envolvidos.

Nomenclaturas e símbolos próprios, metal base, metal de adição, tratamento térmico, tipo de juntas, cálculos de estruturas e controle de inspeção para o conjunto a ser soldado, são sempre baseados em normas.

O projeto antes de entrar na produção foi cuidadosamente estudado por uma equipe, para em seguida passar para a execução.

O soldador de produção é um elemento que necessita apenas possuir a necessária habilidade manual ou conhecimentos mecânicos, quando se tratar de

soldagem automática. O soldador de produção não decide mais nada a respeito da obra, pois tudo já foi planejado por uma equipe.

O trabalho em produção passa a ser uma operação de rotina, uma vez que o soldador passa a fazer todo dia a mesma coisa.

A solda de manutenção é totalmente diferente. Cada caso é um caso diferente. Nunca se faz a mesma coisa que se fez ontem. A solda de manutenção tem um papel de igual importância ao da solda de produção, entretanto, com dificuldades muito maiores.

A ela compete, entre outras funções, a de manter em funcionamento as linhas de produção, a de recuperar rápida e economicamente peças e equipamentos cuja substituição é onerosa e muitas vezes impossível.

Normalmente, governando a sua aplicação não existem normas e nem especificações, pois geralmente se desconhece a composição química do metal base. Além disso, o metal base está sujo, contaminado, tensionado, o que dificulta determinar todo o restante.

Em função do metal base, não se pode indicar metal de adição, processo de solda a ser usado, tratamento térmico etc., além de ter que soldar em posições difíceis.

Na verdade, na solda de manutenção, normalmente, não existe uma engenharia que planeja tudo o que se tem que fazer, como na solda de produção. Geralmente quem decide o que fazer é o soldador, que acaba se tornando o projetista, calculista, engenheiro e soldador.

O soldador de manutenção que já tem um certo tempo de experiência no campo, já conseguiu aprender muito sobre solda de manutenção, pela ajuda dos fornecedores de consumíveis, que em doses homeopáticas transferem para ele tecnologia e com o tempo o soldador aprende muito a respeito do assunto, porém o profissional executa tudo o que o fornecedor de consumível ensina. Portanto, na área de solda de manutenção quem comanda o que fazer ainda é o fornecedor de produtos para solda.

Hoje se consegue aumentar a vida útil de equipamentos, através da aplicação correta dos processos e consumíveis, com a finalidade de fazer com que este campo se caracterize como de grande valor numa empresa.

A solda de manutenção pode ser dividida em preventiva e corretiva. Em geral, entende-se como solda de manutenção corretiva como sendo aquela em que se espera uma peça quebrar para repará-la. É a solda tipo socorro ou apaga incêndio.

Na manutenção preventiva é possível se encontrar duas situações. A primeira é quando a peça nova entra em operação e se faz reparo ou revestimento para voltar em trabalho como nova e preventivamente reparada. A segunda, é quando a peça nova, antes de entrar em operação, recebe uma prevenção (revestimento) para durar em trabalho mais do que a original. Isto é possível porque a região que sofre desgaste poderá ser revestida com uma película de material cujas características quanto ao desgaste é superior ao metal base.

Portanto, pode-se definir a solda de manutenção como o processo mediante o qual, manual ou mecanicamente, com ou sem uso de pressão, com ou sem uso de calor (ou ambos), pode-se unir, refazer ou revestir partes metálicas, alterando, ou não, suas características originais.

2 - PROCESSOS DE SOLDAGEM

2.1 - Soldabilidade

Quando da soldagem de um material, deve-se verificar a sua soldabilidade.. Se o material a ser soldado exigir muitos cuidados, tais como controle de temperatura de aquecimento e de interpasse, ou tratamento térmico após soldagem, por exemplo, dizemos que o material tem baixa soldabilidade.

A Tabela 1 mostra uma relação de alguns materiais e suas soldabilidades:

Tabela 1 - Relação de soldabilidade de alguns materiais.

Materiais	Soldabilidade			
	Ótima	Boa	Regular	Difícil
Aço Baixo Carbono	X			
Aço Médio Carbono		X	X	
Aço Alto Carbono				X
Aço Inox	X	X		
Aços-liga			X	
Ferro Fundido Cinzento			X	
Ferro Fundido Maleável e Nodular			X	
Ferro Fundido Branco				X
Liga de Alumínio		X		
Liga de Cobre		X		

2.2 - Classificação dos Processos de Soldagem

Vários autores utilizam-se de uma classificação baseada na natureza da união quanto à presença ou não de uma fase líquida que pode ser constituída apenas do material de adição ou de uma mistura entre o material de adição e parte do material base que se fundiu. Entretanto, não há consenso na literatura quanto à estruturação das subclasses de processos. Uma classificação muito útil agrupa os processos de soldagem pelo tipo de fonte de energia usada para produzir a fusão e união das peças, conforme mostra o fluxograma da Figura 1.

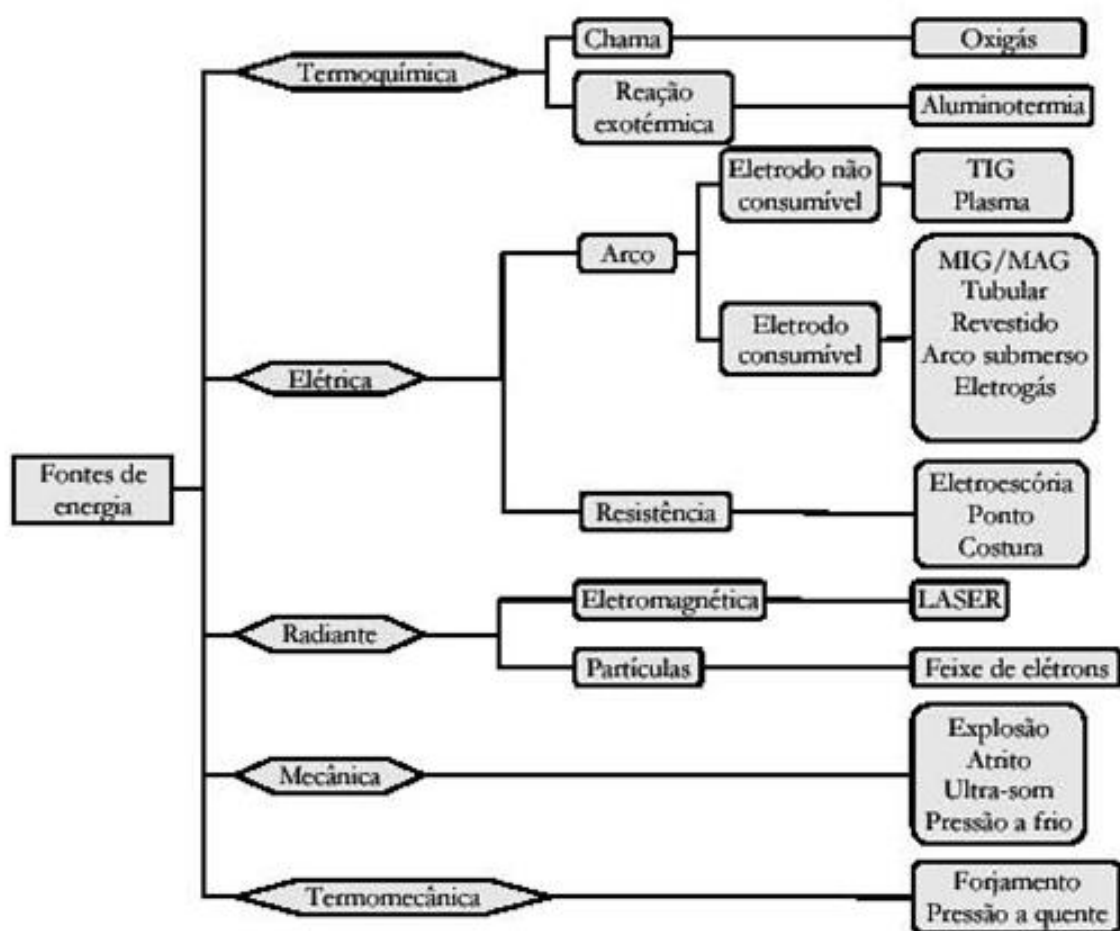


Figura 1 - Classificação dos processo de soldagem quanto à fonte de energia.

Os processos termoquímicos utilizam a energia liberada de reações químicas como fonte de energia, destacando-se os processos por chama oxiacetilênica e por aluminotermia. Na soldagem a resistência elétrica, o calor é gerado por efeito Joule, durante a passagem de corrente elétrica na região de contato entre as partes a serem

unidas e nas suas vizinhanças. Por outro lado, nos processos de soldagem por fusão a arco tais como, MIG/MAG, TIG e eletrodo tubular, o aquecimento ocorre pelo estabelecimento de um arco elétrico entre o metal base e um eletrodo ou entre dois eletrodos.

Soldagem a laser, por indução, por feixe de elétrons e de íons são alguns dos processos que utilizam energia radiante para produzir aquecimento das partes a serem soldadas. Os processos termomecânicos são realizados pela aplicação combinada de calor e pressão, ao passo que nos mecânicos, a geração de calor, quando ocorre, é consequência do atrito e deformação plástica resultantes de um trabalho mecânico. Uma ressalva importante deve ser feita quanto à brazagem e à soldabrazagem, que não foram incluídos no fluxograma, pois não necessitam de uma fonte de energia específica para a execução do processo.

Os processos sintetizados na Figura 1 representam apenas os principais métodos de soldagem e não incluem operações de corte, pulverização térmica e união por adesão. Na realidade, os processos são inúmeros, tanto que a Sociedade Americana de Soldagem (American Welding Society - AWS) reconhece mais de 100 processos de soldagem e técnicas relacionadas.

2.2.1 - Soldagem por oxigás

A soldagem a gás oxicombustível ou simplesmente soldagem a gás é um processo no qual a coalescência ou união dos metais é obtida pelo aquecimento destes com uma chama de um gás combustível e o oxigênio. O processo envolve a fusão do metal de base e do metal de adição, se usado. A Figura 2 mostra uma representação esquemática deste processo.

Uma importante característica deste processo é o excelente controle que se pode exercer sobre a entrada de calor e a temperatura das peças que estão sendo soldadas, devido ao controle independente da fonte de calor e da alimentação do metal de adição.

O equipamento usado é e pode também ser usado em outras operações. É um processo barato que utiliza equipamentos portáteis simples de baixo custo, consistindo de maçaricos e cilindros ou geradores de gases. É tipicamente empregado em reparos,

manutenção e como fonte de calor para os processos de brasagem e soldabrasagem, além de outras operações como dobramento, desempeno, pré e pós-aquecimento e corte a gás. Dentre suas principais limitações destacam-se a baixa densidade de energia, que provoca distorções acentuadas, e a soldabilidade e a eficiência, que são inferiores aos processos a arco elétrico.

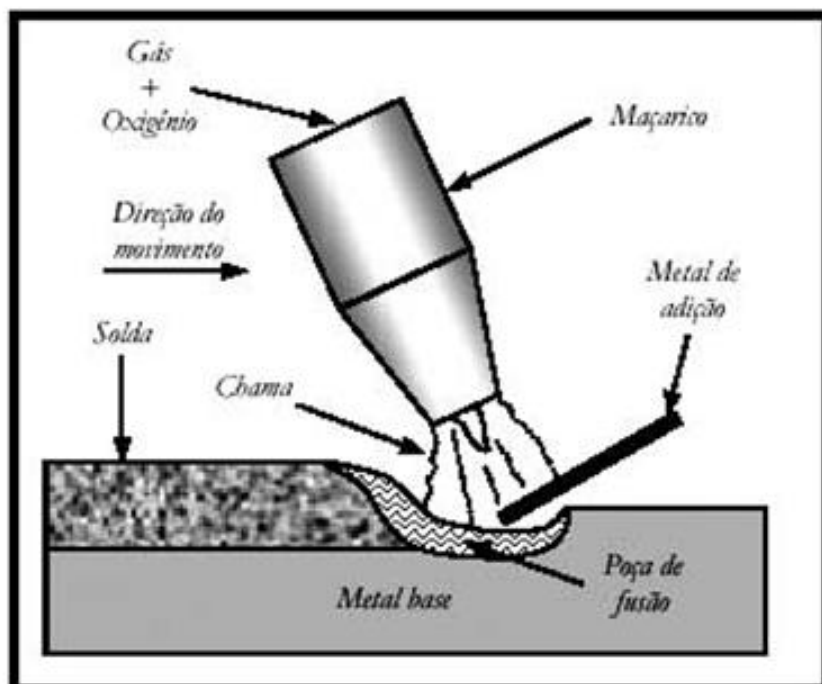


Figura 2 - Representação esquemática do processo de soldagem por oxigás.

Os gases usados como combustível devem ter alta temperatura de chama, alta taxa de propagação de chama, alto potencial energético e mínima reação química com os metais de base e adição. A soldagem oxiacetilênica é a mais utilizada, pois a mistura de acetileno e oxigênio é a que produz maior temperatura de queima, cerca de 3100°C.

Este processo é adequado à soldagem de chapas finas, tubos de pequeno diâmetro e também para a soldagem de reparo. Materiais como aço carbono, ferros fundidos, níquel, ligas de cobre-níquel, cobre, bronze e latão podem ser soldados utilizando-se esta técnica. Dependendo do tipo de material a ser soldado, a mistura de oxigênio e acetileno deve ser regulada de modo a produzir uma chama carburante (com excesso de acetileno), neutra ou oxidante (com excesso de oxigênio).

Durante a operação, a chama proveniente da mistura gás-oxigênio na ponta do maçarico é usada para fundir o metal de base e formar a poça de fusão. O metal de adição, quando usado, é adicionado separadamente na poça de fusão. O soldador movimenta a tocha para obter uma fusão uniforme e progressiva.

O equipamento básico para a soldagem oxigás consiste basicamente de cilindros de oxigênio e gás combustível, reguladores de pressão, mangueiras e do maçarico ou tocha de soldagem.

O equipamento básico utilizado no processo de soldagem oxi-acetilênico é mostrado na Figura 3.

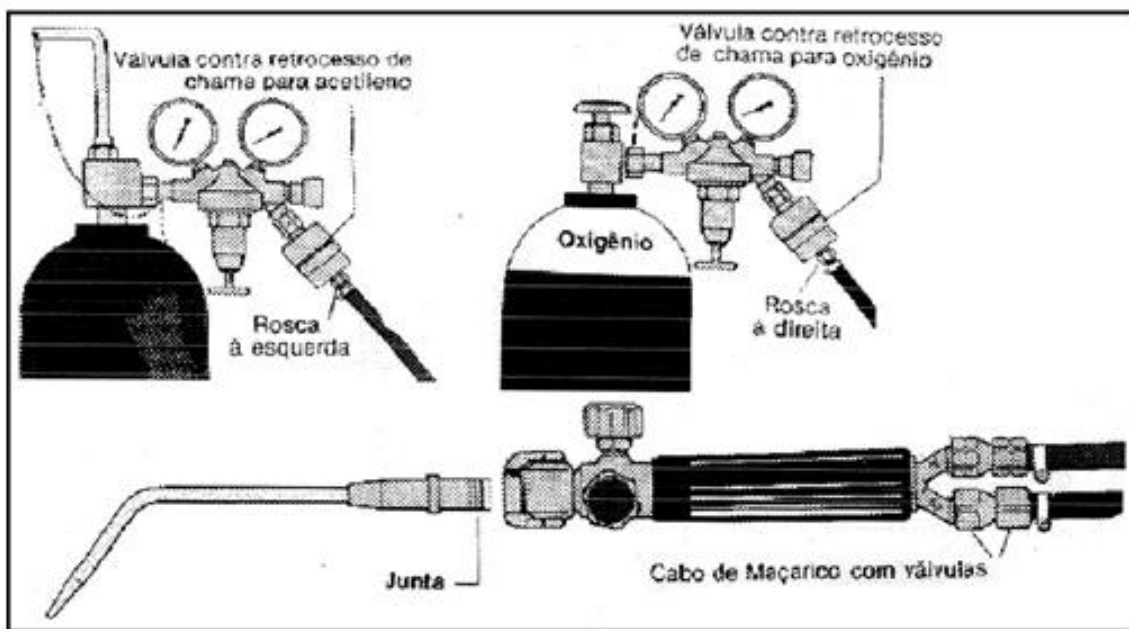


Figura 3 - Equipamento utilizado no processo de soldagem oxi-acetilênico.

Os gases utilizados na soldagem oxigás podem ser distribuídos pelas várias seções de uma instalação industrial através de cilindros portáteis, normalmente sobre carrinhos, através de uma tubulação proveniente de uma instalação centralizada, fixa ou portátil, ou ainda de geradores de acetileno e de tanques de armazenagem de oxigênio líquido.

Quando o consumo de gases é pequeno, utiliza-se normalmente um cilindro de oxigênio e outro de gás combustível. Ao contrário, onde se exige um grande consumo de gases, utilizam-se instalações centralizadas de cilindros ou tanques de armazenagem e geradores.

O oxigênio, individualmente, não é combustível ou explosivo. Entretanto, ele suporta a combustão e, sob pressão, pode reagir violentamente com óleo ou graxa. Assim, os cilindros e manômetros de oxigênio nunca devem ser lubrificados e devem ser mantidos limpos e armazenados longe de combustíveis. O contato com cabos e condutores elétricos também deve ser evitado.

O acetileno, em contato com cobre, mercúrio ou a prata pode, sob certas condições, formar compostos explosivos, que podem ser detonados por simples choques ou aplicação de calor. Por essa razão, as canalizações usadas para o acetileno são feitas, geralmente, de ferro ou de aço. Entretanto, os bicos de cobre dos maçaricos não oferecem perigo, pois a acetileno, neste caso, não apresenta pressão e tempo de contato suficiente para a reação.

Os maçaricos são dispositivos que recebem o oxigênio e o acetileno puros e fazem a sua mistura na proporção, volume e velocidade adequados à produção da chama desejada. O volume liberado dos gases determinará o tamanho da chama e a sua capacidade de aquecimento; a velocidade determinará se a chama será violenta, intermediária ou suave e a proporção dos gases determinará o caráter oxidante, neutro ou carburante da chama.

Com relação às velocidades de saída e de combustão dos gases, o ideal é que elas sejam iguais, proporcionando o funcionamento correto do maçarico, onde a queima se dá logo após a ponta do bico. Se a velocidade de saída for maior que a de combustão, a queima se dará a uma certa distância da ponta, podendo ocorrer a extinção da chama. Caso contrário, velocidade de queima maior que a de saída, a combustão ocorrerá no interior do bico, provocando um aumento na temperatura e sua dilatação, com uma conseqüente queda na velocidade de saída. Como a velocidade de combustão permanece constante, a queima se dará, cada vez mais, no interior do bico e, em casos extremos, poderá atingir a fonte de acetileno, provocando a sua explosão. Este fenômeno, conhecido como “engolimento de chama”, é devido ao uso de pressões excessivamente baixas, existências de dobras na mangueira, superaquecimento do bico, toque do maçarico na peça ou obstrução do bico por partículas de metal. O problema pode ser minimizado pelo uso de pressões corretas e de maçaricos em boas condições, evitando-se assim queimaduras e danos ao equipamento. Para eliminar o perigo de explosão, devido ao engolimento de chama, utilizam-se válvulas contra retrocesso de chama, que permitem fluxo apenas num sentido.

Os bicos dos maçaricos, também chamados de extensões, são intercambiáveis e de diversos tamanhos, devendo ser escolhidos em função da espessura das peças a serem soldadas. A Tabela 2 mostra exemplos de tamanho de extensões e pressões de gases a serem utilizados em maçaricos do tipo injetor e misturador, de acordo com a espessura das peças.

Tabela 2 - Exemplos de tamanho de bico, pressão de gases e velocidade de soldagem para diversas espessuras de peças de aço para diferentes tipos de maçarico.

Maça- rico	Espessura a Soldar (mm)	Número do Bico	Pressão Dinâmica (Kgf/mm ²)		Consumo de Gases (l/h)		Veloc. de Soldagem cm/min
			Oxig	.Acet.	Oxig.	Acet.	
Mis- tu- ra- dor	0,3- 0,5	2	0,4	0,4	75- 95	70- 90	14,5-15,0
	0,5- 0,8	4	0,4	0,4	115- 140	100- 130	13,0-15,0
	0,8- 1,5	6	0,4	0,4	150- 180	140- 165	11,0-13,0
	1,5- 2,5	9	0,4	0,4	220- 270	210- 250	8,0-12,0
	2,5- 3,0	12	0,5	0,5	310- 350	280- 320	6,0-10,0
	3,0- 5,0	15	0,5	0,5	400- 450	365- 410	3,5- 6,0
	5,0- 6,5	20	0,5	0,5	510- 600	470- 560	2,5- 4,5
In- je- tor	6,5- 9,5	30	0,5	0,5	690- 890	625- 805	1,5- 3,0
	0,8- 1,5	4	0,8-1,3	0,1	100- 180	90- 130	14,0-16,0
	1,5- 2,5	6	1,6-2,0	0,1	170- 220	130- 220	11,0-15,0
	2,5- 3,0	9	1,6-2,0	0,1	280- 340	200- 300	8,0-11,0
	3,5- 6,5	15	1,5-1,9	0,1	580- 640	400- 600	3,0- 7,0
	8,0-13,0	30	1,2-1,6	0,1	800-1100	700-1000	3,0- 1,5

OBS: ESTA TABELA É APENAS ILUSTRATIVA, NÃO TENDO VALOR PARA CONSULTA. PARA VALORES PRÁTICOS, DEVE-SE CONSULTAR O CATÁLOGO DO FABRICANTE DO EQUIPAMENTO EM UTILIZAÇÃO, PARA ESCOLHA DO NÚMERO DO BICO E OUTROS PARÂMETROS DE OPERAÇÃO.

Os consumíveis normalmente usados na soldagem a gás são os combustíveis e o oxigênio, os fluxos de soldagem e os metais de adição. A Tabela 3 mostra as características de combustão de alguns gases usados industrialmente.

O acetileno é o gás mais usado em soldagem, devido às suas características. É incolor e possui um cheiro característico. Normalmente, este gás não existe livre na natureza, mas é produzido a partir da reação do carbureto de cálcio (CaC_2) com a água (H_2O). Para uso industrial, pode ser fornecido em cilindros ou ser produzido em geradores.

O oxigênio é o comburente e é incolor e insípido, sendo encontrado em abundância na atmosfera. Ele pode ser obtido industrialmente por três processos: reação química, eletrólise da água ou liquefação do ar. O processo de obtenção mais usado é o último, no qual, após a retirada do gás carbônico, o ar é resfriado, expandido e liquefeito, passando posteriormente por colunas de retificação, onde diversos gases do

ar são separados de acordo com o seu ponto de evaporação. O oxigênio assim obtido é de alta pureza, maior ou igual a 99%.

Tabela 3 - Características de combustão de alguns gases usados na soldagem a gás.

Gás Combustível	Acetileno	Gás de Rua	Propano	Metano
Composição	C_2H_2	H_2 : 53% CH_4 : 25% CO : 8% Div. : 14%	C_3H_8	CH_4
Poder Calorífico Superior(Kcal/m ³)	14.000	4.300	24.300	9.410
Poder Calorífico Inferior(Kcal/m ³)	11.000	3.800	22.300	8.470
Oxig. Teoricamente Necessário(m ³ /m ³)	2,5	0,8 a 0,9	5,0	2,0
Velocidade Máxima Propagação (m/s)	13,5	7,05	3,7	3,3
Temper. Máx. (°C)	3.100	2.750	2.800	2.730
Intensidade Média na Ponta do Maçarico (Kcal/cm ² .s)	10,9	3,0	2,7	2,0

Outros gases combustíveis, por possuírem piores características que o acetileno, para soldagem, têm seu uso restrito à soldagem de ligas com baixo ponto de fusão, aquecimento, brasagem e, às vezes, operações de corte.

Os fluxos são materiais fusíveis, na forma de pó ou pasta, usados na soldagem oxigás com a função de reagirem quimicamente com óxidos metálicos e formar escórias, nas temperaturas de soldagem.

Uma maneira de remover os óxidos superficiais das peças metálicas é através dos fluxos. De um modo geral, não há necessidade de uso de fluxo na soldagem dos aços. Os fluxos são usados na soldagem do ferro fundido, do aço inoxidável e grande parte dos metais não ferrosos, como o alumínio, o cobre e suas ligas.

Os metais de adição usados na soldagem oxigás são fornecidos na forma de varetas, com comprimentos e diâmetros variados, escolhidos em função da quantidade de metal a depositar e da espessura das peças a serem unidas. Eles são classificados pela AWS em diferentes normas, como mostra a Tabela 4.

Tabela 4 - Especificações AWS para varetas de metal de adição para soldagem a gás.

Norma	Tipos de Metal de Adição
AWS A 5.2	Varetas para soldagem a gás de ferro e aço.
AWS A 5.7	Varetas para soldagem a gás de cobre e ligas de cobre.
AWS A 5.8	Metal de adição para brasagem.
AWS A 5.9	Varetas de soldagem e eletrodos nus de aços cromo/níquel e resistentes à corrosão ao níquel.
AWS A 5.10	Varetas para soldagem e eletrodos nus de alumínio e ligas de alumínio.
AWS A 5.13	Varetas de soldagem e eletrodos para recobrimento
AWS A 5.14	Varetas para soldagem e eletrodos nus de níquel e ligas de níquel.
AWS A 5.15	Varetas e eletrodos revestidos para a soldagem de ferro fundido.
AWS A 5.16	Varetas e eletrodos para soldagem de titânio e ligas de titânio.
AWS A 5.19	Varetas para soldagem e eletrodos nus de magnésio e ligas de magnésio.
AWS A 5.21	Varetas para recobrimento e eletrodos compostos.

Por exemplo, a norma AWS A 5.2 especifica e classifica os metais de adição para a soldagem de ferro e aço. Existem três classes: RG 45, RG 60 e RG 65, para as quais se exige um limite de resistência à tração de 45, 60 e 67 ksi (315, 420 e 469 MPa), respectivamente.

A escolha de um metal de adição adequado a uma determinada soldagem deve ser feita baseada nas propriedades mecânicas e/ou composição química do metal depositado. Esta escolha é orientada pelos fabricantes das varetas para soldagem oxigás, que fornecem as aplicações típicas e recomendações para o uso de seus produtos.

2.2.2 - Aluminotermia

A reação de elementos metálicos fortemente redutores, tais como o alumínio, adicionado ao óxido de ferro, libera uma grande quantidade de energia capaz de fundir o ferro produzido, conforme a equação abaixo:



A reação é processada dentro de um cadinho com revestimento refratário e elementos de liga podem ser adicionados à mistura aluminotérmica, como mostra a Figura 4. A reação é auto-sustentável, porém requer uma temperatura de ignição de cerca de 1200°C que pode ser obtida pela adição de uma pequena quantidade de magnésio. Temperaturas da ordem de 2500°C podem ser obtidas.

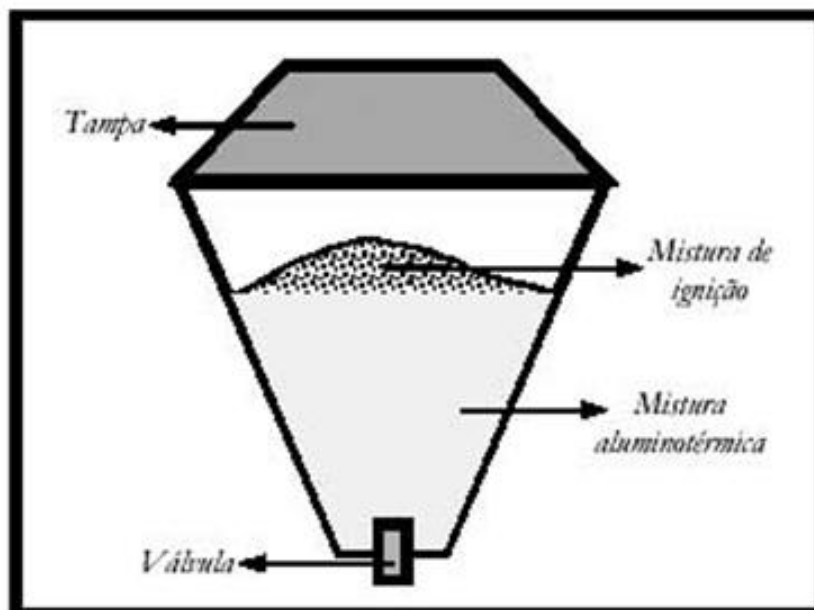


Figura 4 - Cadinho utilizado no processo de soldagem aluminotérmica.

Uma vez fundido, o material de adição é vazado sobre a junta de solda e devido às altas temperaturas, parte do material base também se funde. É um processo relativamente barato, pois requer equipamentos simples e não há consumo de eletricidade. Adicionalmente, o metal depositado é homogêneo e de qualidade relativamente alta, resultando em baixa distorção, pois a solda é produzida em apenas um passe. É aplicado na soldagem de trilhos de trens, cabos de cobre, cobre em aço e outras aplicações que necessitem de grandes quantidades de metais de solda, tais como grandes seções de estruturas de navios.

2.2.3 - Soldagem TIG (soldagem a arco com proteção por gás e eletrodo não consumível)

Na soldagem TIG (Tungsten Inert Gas), o arco elétrico é gerado entre a ponta de um eletrodo de tungstênio não-consumível e o material base. A poça de fusão é protegida por um gás inerte de alta pureza que flui do bocal envolvendo o eletrodo (Figura 5). O processo pode ou não utilizar um metal de adição, no formato de arame, que pode ser alimentado manual ou automaticamente.

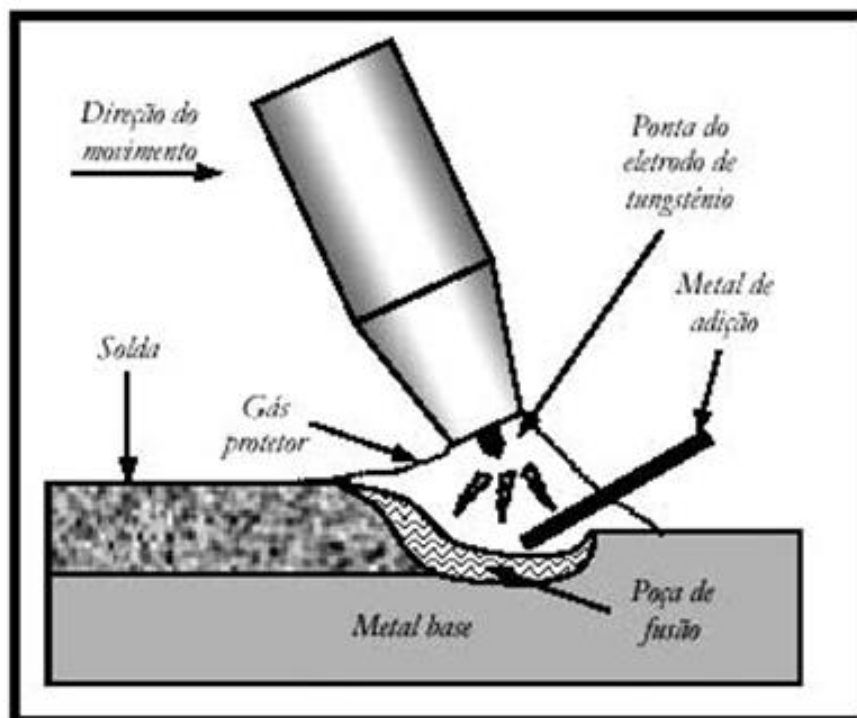


Figura 5 - Esquema do processo de soldagem TIG

Este processo produz soldas de alta qualidade, sendo indicada para soldar uma vasta gama de metais e ligas. É utilizado na produção de soldas de ligas não-ferrosas, aços inoxidáveis, aços resistentes ao calor, entre outros. Como o foco de calor é concentrado, a geração de distorções é minimizada e a ZTA é relativamente pequena. Em relação ao processo MIG, possui taxa de deposição menor e custo mais elevado. Além disso, não pode ser executado em locais com corrente de ar, emite uma alta intensidade de radiação ultravioleta e pode contaminar a solda por tungstênio.

Uma característica importante deste processo é o excelente controle do calor cedido à peça, devido ao controle independente da fonte de calor e da adição de metal de enchimento, semelhante ao que ocorre na soldagem oxiacetilênica. Isto torna o processo bastante adequado para a soldagem de peças de pequena espessura e, aliado à eficiente proteção contra a contaminação, à soldagem de materiais de difícil soldabilidade, com ótimos resultados.

O fato de o eletrodo ser não consumível possibilita a soldagem sem a adição de metal de enchimento. Isto pode ser interessante na soldagem de chapas finas. Além disso, como não existem reações metal-gás e metal-escória, não há grande geração de fumos e vapores, o que permite ótima visibilidade para o soldador.

O custo dos equipamentos necessários e dos consumíveis usados é relativamente alto e a produtividade ou rendimento do processo é relativamente baixa, o

que limita a sua aplicação a situações em que a qualidade da solda produzida seja um dos fatores mais importantes.

O arco elétrico na soldagem TIG é bastante suave, produzindo soldas com boa aparência e acabamento, exigindo pouca ou nenhuma limpeza após a operação.

A operação é normalmente manual, em qualquer posição, embora a mecanização do processo possa ser feita facilmente, com o uso de dispositivos de soldagem adequados.

Este processo é aplicável à maioria dos metais e suas ligas, numa ampla faixa de espessuras. Entretanto, em virtude de seu custo relativamente elevado, é usado principalmente na soldagem de metais não ferrosos e aços inoxidáveis, na soldagem de peças de pequena espessura (da ordem de milímetro) e no passe de raiz na soldagem de tubulações.

Existe ainda a possibilidade de, não havendo disponibilidade de metal de adição adequado, pode-se usar o próprio metal de base como metal de adição, bastando para isso cortá-lo de uma forma apropriada, particularmente para soldagem manual.

O equipamento básico usado na soldagem TIG consiste de uma fonte de energia elétrica, uma tocha de soldagem apropriada, uma fonte de gás protetor, um dispositivo para a abertura do arco, cabos e mangueiras. Diversos equipamentos auxiliares podem ainda ser usados na soldagem manual ou mecanizada, para permitir melhor controle do processo, maior produtividade, facilidade de operação, etc. A Figura 6 mostra um esquema do equipamento básico de soldagem TIG, e a Figura 7 mostra uma tocha TIG em detalhes.

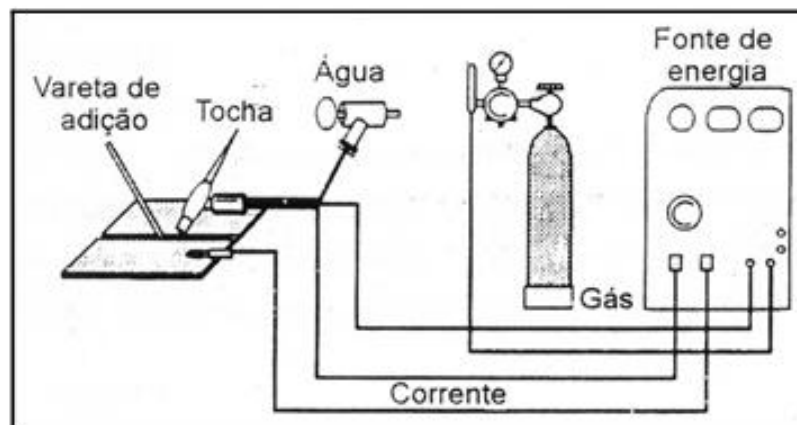


Figura 6 - Equipamento básico para soldagem TIG (esquemático).

A tocha de soldagem tem como função suportar o eletrodo de tungstênio e fornecer de forma apropriada o gás de proteção. Elas podem ser refrigeradas pelo

próprio gás de proteção (capacidade até 150 A) ou a água (capacidade acima de 150 A, até 500 A, de modo geral). Neste caso, pode ser usada água corrente (menos comum) ou um circuito fechado de refrigeração, dotado de motor elétrico, bomba e radiador.

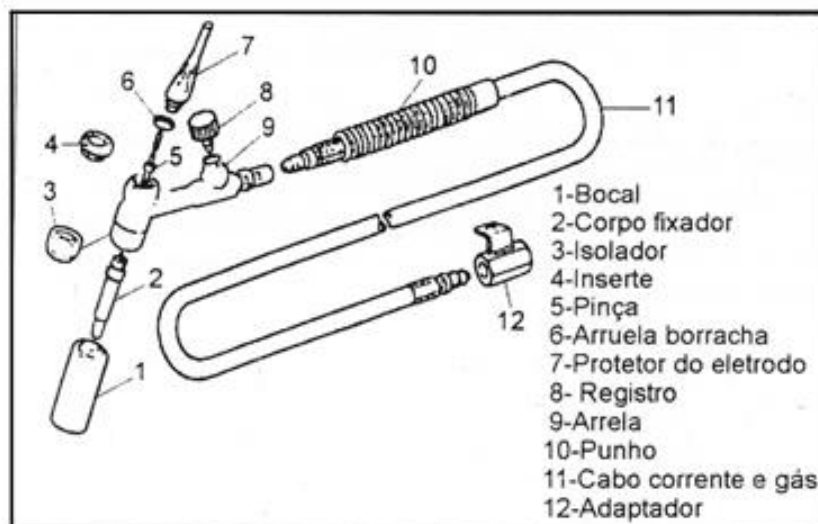


Figura 7 - Representação esquemática de uma tocha para soldagem TIG.

Vários dispositivos podem ser usados para permitir o início do arco sem tocar a peça, como um arco piloto, contudo o mais usado atualmente é o chamado “ignitor de alta frequência”. Este aparelho gera, superposto à corrente de soldagem, um sinal de alta tensão e de alta frequência (5 kV, 5kHz) que favorece a ionização da coluna de gás entre o eletrodo e a peça, permitindo a abertura do arco com baixas tensões na fonte de soldagem, da ordem de 60 a 80 V. Apesar de ser de alta tensão, este sinal é de baixíssima potência e não oferece perigo para o operador.

Os consumíveis principais na soldagem TIG são os gases de proteção e as varetas e arames de metal de adição. Os eletrodos de tungstênio, apesar de serem ditos não consumíveis, se desgastam durante o processo, devendo ser recondicionados e substituídos com certa frequência.

Os gases de proteção usados na soldagem TIG são inertes, principalmente o argônio, o hélio e misturas destes. Em alguns casos são usadas misturas especiais como as que contêm hidrogênio, que podem ser usadas na soldagem de aços inoxidáveis, e as que contêm nitrogênio, opcionais na soldagem de cobre e suas ligas.

A pureza dos gases utilizados na soldagem TIG é de grande importância para a qualidade da solda, exigindo-se teores mínimos de 99,99% do gás ou gases considerados. Também o teor de umidade deve ser bem controlado.

A seleção do gás de proteção é feita principalmente em função do tipo de metal que se quer soldar, da posição de soldagem e da espessura das peças a unir. A Tabela 5 ilustra algumas aplicações típicas.

Tabela 5 - Gases de proteção e tipos de corrente usuais na soldagem de diferentes ligas.

Material	Espessura (mm)	Gás de proteção e tipo de corrente	
		Soldagem Manual	Soldagem Mecanizada
Alumínio e Ligas	< 3,2	Ar (CAAF)	Ar (CAAF) ou He (CC-)
	> 3,2	Ar (CAAF)	Ar-He(CAAF) ou He(CC-)
Aço Carbono	< 3,2	Ar (CC-)	Ar (CC-)
	>3,2	Ar (CC-)	Ar-He(CC-) ou He (CC-)
Aço Inoxidável	< 3,2	Ar (CC-)	Ar-He(CC-) / Ar-H ₂ (CC-)
	> 3,2	Ar-He(CC-)	He (CC-)
Níquel e Ligas	< 3,2	Ar (CC-)	Ar-He(CC-) ou He(CC-)
	> 3,2	Ar-He (CC-)	He (CC-)
Cobre e Ligas	< 3,2	Ar-He (CC-)	Ar-He (CC-)
	> 3,2	He (CC-)	He (CC-)
Titânio e Ligas	< 3,2	Ar (CC-)	Ar(CC-) ou Ar-He (CC-)
	< 3,2	Ar-He (CC-)	He (CC-)

OBS.: - MISTURAS Ar-He COM ATÉ 75% He e Ar-H₂ COM ATÉ 15% H₂. - CAAF: CORRENTE ALTERNADA SUPERPOSTA COM ALTA-FRQUÊNCIA. - CC- CORRENTE CONTÍNUA E ELETRODO NEGATIVO

O metal de adição para a soldagem manual é fornecido na forma de varetas com comprimento em torno de 1 m. Para a soldagem mecanizada, o metal é fornecido na forma de um fio enrolado em bobinas com diferentes capacidades, dependendo do equipamento usado. Os diâmetros dos fios e varetas são padronizados e variam entre 0,5 e 5 mm aproximadamente.

Metais de adição estão disponíveis numa ampla faixa de materiais e ligas. Geralmente a composição química de metais de adição tem limites de tolerância muito inferiores aos de metal de base do mesmo tipo e custo bem mais elevado. Eles são classificados de acordo com sua composição química e com as propriedades mecânicas do metal depositado. A Tabela 6 mostra as principais normas de classificação da AWS para metais de adição para soldagem TIG.

A escolha do metal de adição para uma determinada aplicação é feita em função da composição química e das propriedades mecânicas desejadas para a solda. Em geral se usa metal de adição de composição similar à do metal de base, não necessariamente idêntica. Fatores como compatibilidade metalúrgica, adequabilidade à operação e custo também devem ser considerados.

Tabela 6 - Especificações AWS para metais de adição adequados à soldagem TIG

Nº da Especificação	Assunto
A 5.2	Varetas de Ferro e Aço para Soldagem a Gás
A 5.7	Arames e Varetas para Soldagem de Cobre
A 5.9	Arames e Varetas para Soldagem de Aços Resistentes à Corrosão ao Cr e Cr-Ni
A 5.10	Arames e Varetas para Soldagem de Alumínio
A 5.13	Arames e Varetas para Revestimento
A 5.14	Arames e Varetas para Soldagem de Níquel
A 5.16	Arames e Varetas para Soldagem de Titânio
A 5.18	Arames de Aço Carbono para Soldagem MIG/MAG
A 5.19	Arames e Varetas para Soldagem de Magnésio
A 5.24	Arames e Varetas para Soldagem de Zircônio

Os eletrodos de tungstênio normalmente são apontados por meios químicos ou mecânicos, antes de se iniciar a operação de soldagem e, no caso de soldagem mecanizada, a configuração da ponta do eletrodo pode ser uma variável importante para se garantir uma boa repetitividade de resultados.

As Tabelas 7 e 8 mostram respectivamente a composição química e as faixas de corrente usuais para eletrodos para soldagem TIG.

Tabela 7 - Composição química de eletrodos de tungstênio

Classificação A W S	Composição Química (% peso)				Cor de Identificação
	Tungstênio	Tória	Zircônia	Outros(máx)	
EWP	99,5	-	-	0,5	Verde
EWTh-1	98,5	0,8 a 1,2	-	0,5	Amarelo
EWTh-2	97,5	1,7 a 2,2	-	0,5	Vermelho
EWZr	99,2	-	0,15 a 0,40	0,5	Marrom
OBS.: SEGUNDO A NORMA AWS A 5.12-80 (REF.3).					

A seleção do tipo e diâmetro do eletrodo a ser usado numa dada situação é feita em função do material que vai ser soldado, da espessura da peça e do tipo e valor da corrente de soldagem que vai ser usada.

Antes de se iniciar a soldagem, é indispensável a remoção de óleo, graxa, sujeira, tinta, ferrugem ou qualquer outra contaminação existente no metal base. Esta remoção pode ser feita por meios mecânicos (lixamento, escovamento, etc.) ou químicos (decapagem, lavagem, etc.), usando agentes líquidos ou gasosos.

Tabela 8 - Valores típicos de corrente para eletrodos de tungstênio

Diâmetro do Eletrodo (mm)	Corrente (A) e Polaridade			
	CC-	CC+	CAAF	
	Todos os Tipos	Todos os Tipos	EWP	Outros Tipos
0,26	até 15	*	até 15	até 15
0,51	5 - 20	*	5 - 15	5 - 20
1,02	15 - 80	*	10 - 60	15 - 80
1,59	70 - 150	10 - 20	50 - 100	70 - 150
2,38	150 - 250	15 - 30	100 - 160	140 - 235
3,18	250 - 400	25 - 40	150 - 210	225 - 325
3,97	400 - 500	40 - 55	200 - 275	300 - 400
4,76	500 - 750	55 - 80	250 - 350	400 - 500
6,35	750 - 1000	80 - 125	325 - 450	500 - 630

OBS.: (*) - Não usado.
CC- - CORRENTE CONTÍNUA, ELETRODO NEGATIVO.
CC+ - CORRENTE CONTÍNUA, ELETRODO POSITIVO
CAAF - CORRENTE ALTERNADA SUPERPOSTA COM ALTA FREQUÊNCIA.

As principais variáveis operatórias da soldagem TIG são o comprimento do arco, a corrente e a velocidade de soldagem e a vazão de gás de proteção. Outras variáveis operatórias na soldagem TIG, com influência secundária, dentro de certos limites, são o ângulo da ponta do eletrodo, a distância do bocal à peça, os tempos de pré e pós-purga de gás.

A determinação dos parâmetros de soldagem é feita em função do material a ser soldado, da espessura das peças, da posição de soldagem e dos equipamentos disponíveis, bem como a decisão de uso ou não de metal de adição.

2.2.4 - Soldagem a arco com plasma

O plasma é o quarto estado da matéria e consiste em uma massa de gases extremamente quentes que sofreram ionização, ou seja, os átomos ou moléculas transformaram-se em uma mistura de íons e elétrons.

No processo de soldagem a arco com plasma, este estado é obtido pela passagem de um gás inerte através de uma arco elétrico constrito por um bocal refrigerado (Figura 8). Quando o arco se forma entre o eletrodo não-consumível e a

peça, o processo é denominado de “arco transferido”. Por outro lado, se o arco se estabelece entre o eletrodo e o bocal de constrição, o processo recebe o nome de “arco não-transferido”. Desta maneira, forma-se uma coluna aproximadamente cilíndrica de plasma que sai do orifício de constrição do bocal, em direção à peça. A proteção da região de solda é complementada por um gás que flui do bocal de constrição e cuja composição química depende do material a ser soldado. O gás de proteção também contribui para aumentar a constrição do jato de plasma e, por isto, também é chamado de gás de foco. Um metal de adição pode ou não ser utilizado.

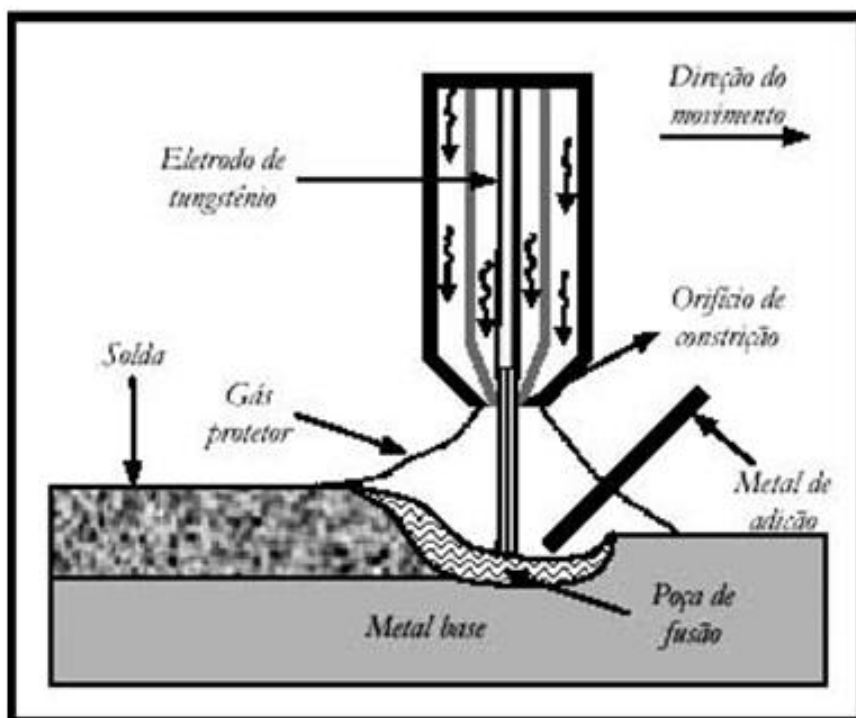


Figura 8 - Esquema do processo de soldagem a arco com plasma.

A soldagem por plasma apresenta uma concentração maior de calor do que o processo TIG e, portanto, permite maiores velocidades de soldagem, ZTA reduzida, menor gasto de material de adição e distorções menores. Como a coluna de plasma é relativamente rígida e cilíndrica, a distância entre o bocal e a peça pode ser maior, facilitando a visualização da região de solda pelo operador. Outra vantagem reside no fato do eletrodo de tungstênio nunca entrar em contato com a peça, minimizando a chance de contaminação da solda. Normalmente, este processo é limitado a materiais com espessura inferior a 25mm.

2.2.5 - Soldagem MIG/MAG (Soldagem a Arco com Proteção por Gás e Eletrodo Consumível)

Neste processo, um eletrodo consumível na forma de arame é alimentado continuamente, formando um arco elétrico entre a sua ponta e a peça a ser soldada. A proteção contra a oxidação da região da solda é feita por um fluxo de gás alimentado externamente, o qual também tem a função de colaborar na estabilização do arco e refrigeração da pistola de soldagem. A Figura 9 mostra esquematicamente este processo.

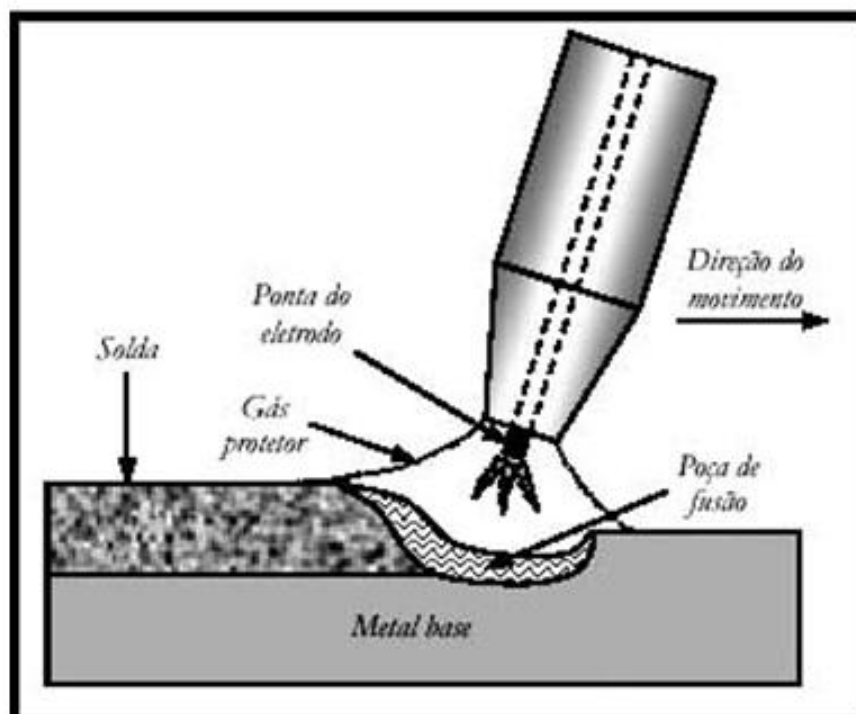


Figura 9 - Representação esquemática do processo de soldagem MIG/MAG

Quando são usados gases inertes, tais como argônio e hélio ou uma mistura deles, o processo é chamado de MIG (Metal Inert Gas). Entretanto, o processo pode utilizar gases oxidantes, tais como dióxido de carbono e/ou oxigênio, separadamente ou misturados com gases inertes e neste caso a soldagem é conhecida por MAG (Metal Active Gas). Em linhas gerais, o processo MIG é indicado para as ligas não-ferrosas, enquanto o processo MAG é aconselhado para a soldagem de ligas ferrosas.

O tipo de gás influencia as características do arco e transferência de metal, penetração, largura e formato do cordão de solda, velocidade máxima de soldagem, tendência ao aparecimento de mordeduras e o custo da soldagem. A Figura 10 mostra o

perfil típico de cordões de solda feitos com diferentes gases e misturas. Entretanto, deve-se lembrar que o perfil do cordão de solda pode ser totalmente modificado pela alteração do conjunto de parâmetros operacionais de soldagem.

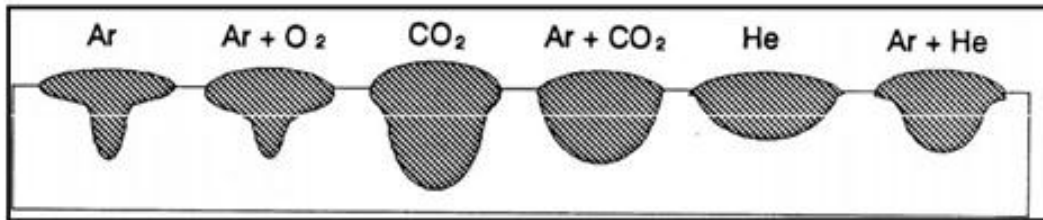


Figura 10 - Perfil típico de cordões de solda feitos com diferentes gases e misturas.

Várias características do processo favorecem a sua automação, dentre as quais podemos destacar: altas taxas de deposição; ausência de escória, permitindo que passes sucessivos sejam aplicados sem a necessidade de limpeza; baixa distorção; versatilidade de orientações da solda; boa estabilidade do arco. Além disto, a qualidade de solda destes processos é geralmente alta, devido à baixa concentração de hidrogênio, desde que a limpeza do eletrodo e da junta seja assegurada. Por outro lado, a ausência de escória resulta em altas taxas de resfriamento, propiciando a ocorrência de trincas.

Adicionalmente, o processo utiliza equipamentos mais caros, complexos e difíceis de serem transportados quando comparado à soldagem por eletrodo revestido e não é de operação fácil em locais de difícil acesso. A soldagem deve ser protegida de correntes de ar e emite significativa quantidade de luz ultravioleta.

Este processo normalmente é semi-automático, em que a alimentação do arame eletrodo é feita mecanicamente, através de um alimentador motorizado, e o soldador é responsável pela iniciação e interrupção da soldagem, além de mover a tocha ao longo da junta. A manutenção do arco é garantida pela alimentação contínua do arame eletrodo e o comprimento do arco é, em princípio, dentro de certos limites, mantido aproximadamente constante pelo próprio sistema, independentemente dos movimentos do soldador.

O calor gerado pelo arco é usado para fundir as peças a serem unidas e o arame eletrodo, que é transferido para a junta e constitui o metal de adição.

A soldagem MIG/MAG pode ser usada em materiais numa ampla faixa de espessuras, tanto em ferrosos como não-ferrosos. O diâmetro dos eletrodos usados varia normalmente entre 0,8 e 3,2 mm. O processo MAG é utilizado apenas na soldagem de materiais ferrosos, tendo como gás de proteção o CO_2 ou misturas ricas neste gás,

enquanto a soldagem MIG pode ser usada tanto na soldagem de ferrosos quanto não ferrosos, como alumínio, cobre, magnésio, níquel e suas ligas.

A soldagem MIG/MAG é usada em fabricação e manutenção de equipamentos e peças metálicas, na recuperação de peças desgastadas e no recobrimento de superfícies metálicas com materiais especiais.

De um modo geral, as principais vantagens do processo MIG/MAG são:

- soldagem de todos os metais e ligas comerciais;
- alimentação contínua do eletrodo;
- soldagem em todas as posições;
- elevadas taxas de deposição;
- elevadas velocidades de soldagem;
- obtenção de cordões extensos sem muitas interrupções;
- como não existe escória, mínima limpeza após a soldagem é exigida;
- permite a automatização industrial, possibilitando a utilização de robôs;
- exigência de menor habilidade do soldador, quando comparada à soldagem com eletrodos revestidos.

As principais limitações do processo MIG/MAG são:

- maior sensibilidade à variação dos parâmetros elétricos de operação do arco de soldagem;
- equipamentos de soldagem complexos, relativamente caros e menos portáteis;
- utilização mais restrita em locais de difícil acesso, devido à maior complexidade e dimensões dos equipamentos;
- o arco deverá ser protegido das correntes de ar, para garantir a eficiência de proteção realizada pelos gases empregados;
- os altos níveis de radiação e calor gerado fazem com que o operador ponha resistência à utilização deste processo.

Na soldagem com eletrodos consumíveis, o metal fundido na ponta do eletrodo tem que se transferir para a poça de fusão. O modo de ocorrência desta transferência é muito importante na soldagem MIG/MAG, pois afeta muitas características do processo, como por exemplo: a quantidade de gases (principalmente hidrogênio, nitrogênio e oxigênio) absorvidos pelo metal fundido, a estabilidade do arco, a aplicabilidade do

processo em determinadas posições de soldagem e o nível de respingos gerados. De uma forma simplificada, pode-se considerar que existem quatro formas básicas de transferência de metal de adição do eletrodo para a peça: transferência por curto-circuito, transferência globular, transferência goticular (também chamada de “spray” ou aerossol) e transferência controlada.

O Instituto Internacional de Soldagem (IIW) classifica os tipos de transferência conforme a Tabela 9. Esta classificação foi baseada nas técnicas de identificação e estudo dos mecanismos de transferência. Exemplos destas técnicas são: fotografias de alta velocidade, imagem ótica, emissão acústica, monitoramento do som do arco, monitoramento da luz do arco, etc. A Figura 11 mostra um esquema dos tipos de transferência.

Tabela 9 - Classificação dos tipos transferência metálica feita pelo Instituto Internacional de Soldagem (IIW).

Designação do Tipo de Transferência	Processos de Soldagem (exemplos)
1. Transferência pôr vôo livre	
1.1. Globular	
- Gotas	MIG/MAG baixa corrente
- Repelido	MIG/MAG protegida por CO ₂
1.2. Goticular (“spray”)	
- Projetado	MIG/MAG com corrente intermediária
- Com alongamento (“streaming”) - Rotacional	MIG/MAG com corrente média
- Explosiva	MIG/MAG com corrente alta
	Eletrodos revestidos
2. Transferência por Contato	
- Curto-circuito	MIG/MAG com curto-circuito
- Contato sem Interrupção	Soldagem com adição de metal
3. Transferência protegida por escória	
- Fluxo guiado pela parede	Arco Submerso
- Outros modos	Eletrodo Revestido, Eletrodo tubular, Eletroescória

A transferência por curto-circuito acontece quando a velocidade de alimentação do eletrodo excede a taxa de fusão até tocar na poça de fusão e a gota metálica que se forma na ponta do eletrodo é transferida para a poça de solda. Quando a gota toca a poça de solda, o sistema fecha um curto-circuito, de modo que a corrente aumenta, sendo esta gota rapidamente atraída para a poça, como consequência da ação da tensão superficial; em seguida o arco se restabelece, abaixando a corrente abruptamente. Este tipo de transferência é possível de ser usada em todas as posições de

soldagem ou em chapas finas e ocorre quando se tem baixos valores de tensão e corrente de soldagem.

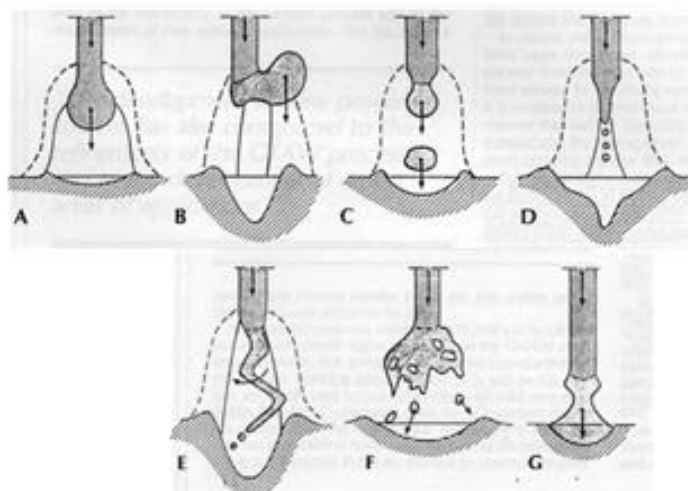


Figura 11 - Diferentes tipos de mecanismos de transferência metálica em MIG/MAG como classificado pelo IIW: A - globular; B - globular repelida, C - gotícula projetada, D - com alongamento ("streaming"); E - goticular rotacional; F - goticular explosivo; G - curto-circuito

Este modo de transferência caracteriza-se por uma grande instabilidade no arco, podendo apresentar a formação intensa de respingos. Entretanto, a quantidade de respingos pode ser limitada pela seleção adequada de parâmetros de soldagem e ajuste da fonte de energia, de forma que os curtos ocorram de forma suave. A utilização de uma reatância indutiva para controlar a velocidade de aumento da corrente de curto-circuito auxilia na diminuição dos respingos. A taxa de transferência da gota é da ordem de 20 a 200 vezes por segundo e fornece ao arco um zumbido típico.

A transferência globular ocorre para valores intermediários de tensão e corrente de soldagem e resulta em arco mais estável que na transferência por curto-circuito. O diâmetro médio das gotas transferidas varia com a corrente, tendendo a diminuir com o aumento desta, normalmente sendo maior que o diâmetro do eletrodo. O glóbulo de metal fundido no eletrodo aumenta de tamanho, até se separar do eletrodo sob efeito da ação da gravidade. Isto causa como consequência, a deposição de grandes gotas e o fornecimento de baixo aporte de calor à junta, resultando em uma solda de baixa penetração.

Quando da soldagem de aços ocorrem algumas circunstâncias em que a gota formada na ponta do eletrodo pode ser defletida para o lado e ainda ser forçada para fora da peça. Este modo de transferência metálica é chamado de transferência globular

repelida e tem sido observada em soldagem MAG com eletrodo negativo e com eletrodos tubulares auto-protegidos.

A transferência globular é caracterizada por um nível de respingos relativamente elevado e, como as gotas de metal fundido se transferem principalmente por ação da gravidade, sua utilização é limitada à posição plana. As velocidades de soldagem, mesmo em materiais de pouca espessura, são muito baixas.

A transferência goticular é mais conhecida pela sua denominação inglesa, ou seja, “spray”. À medida que se aumenta a corrente de soldagem, o diâmetro médio das gotas de metal líquido que se transferem para a peça diminui, até que acima de uma certa faixa, há uma mudança no modo de transferência, que passa de globular para goticular. Neste modo, as gotas de metal são extremamente pequenas e seu número bastante elevado. O arco é bastante estável, não há ocorrência de respingos e o cordão obtido é suave e regular. A corrente (faixa) na qual ocorre esta mudança no modo de transferência é conhecida como “corrente de transição”.

Antes da faixa de corrente de transição o volume das gotas formadas é grande e a frequência de transferência é baixa, observando-se que com o aumento da corrente as suas variações são muito pequenas. Na faixa de corrente de transição tem-se variações bruscas e significativas, ou seja, um pequeno aumento na corrente gera um grande aumento na frequência de transferência das gotas e uma queda acentuada no volume das gotas. Acima da corrente de transição as suas variações voltam a ser pequenas.

Na transferência goticular, a ação das forças de origem eletromagnética sobrepõem-se às gravitacionais e assim, em princípio, este método poderia ser aplicado a qualquer posição de soldagem. Entretanto, como esta transferência só é possível em correntes elevadas, ela não pode ser usada na soldagem de chapas finas e sua utilização fora da posição plana pode ser problemática.

A transição entre os modos de transferência metálica globular e goticular é dependente de um número de variáveis, às quais incluem a composição, diâmetro e comprimento do eletrodo e a composição do gás de proteção. A corrente de transição é aproximadamente proporcional ao diâmetro do eletrodo. A Tabela 10 mostra como a corrente de transição para o aço carbono e alumínio altera-se em função do diâmetro do eletrodo.

Sob a denominação de transferência controlada estão agrupados outros modos de transferência que podem ser obtidos pela introdução de perturbações controladas na corrente de soldagem e/ou na alimentação do arame. Estas perturbações têm como

objetivo obter uma transferência controlada de metal de adição com as características desejáveis da transferência goticular, mas a níveis bem mais baixos de corrente média, de forma a permitir sua utilização na soldagem de chapas finas ou fora da posição plana.

Tabela 10 - Corrente de transição para arames de aço e de alumínio com diferentes diâmetros.

Diâmetro do Eletrodo (mm)	Corrente de Transição (A)	
	Aço (Ar + 2% O ₂)	Alumínio (Argônio)
0,75	155	90
0,90	170	95
1,15	220	120
1,6	275	170

A transferência controlada mais usada é a transferência pulsada, que é um tipo de transferência onde se busca o modo goticular, mas com correntes médias abaixo da corrente de transição, juntando as qualidades da transferência por curto circuito com as do modo goticular. Isto é conseguido pela pulsação da corrente de soldagem em dois patamares, um inferior à corrente de transição e outro superior a esta, de modo que durante o período de tempo em que a corrente é baixa, uma gota se forma e cresce na ponta do arame e é transferida quando o valor da corrente é elevado. Este mecanismo de transferência é ideal quando se consegue uma gota por pulso. Para se obter este modo de transferência deve-se usar fontes de energia especiais, capazes de fornecer corrente pulsada, com parâmetros de pulso controláveis. Uma limitação deste modo de transferência é a introdução de novas variáveis (de pulsação) no processo MIG/MAG, dificultando ainda mais a seleção e otimização de parâmetros para soldagem.

O modo de transferência metálica é influenciado pelo tipo de eletrodo e pela corrente, mas a polaridade do eletrodo, os elementos constituintes do fluxo, o gás de proteção e a pressão ambiente podem influir significativamente.

O equipamento básico para a soldagem MIG/MAG consiste de uma fonte de energia, um sistema de alimentação de arame, uma tocha, um suprimento de gás protetor, um fluxímetro e um regulador-redutor de pressão do gás e, no caso de pistola refrigerada a água, um sistema de água de refrigeração. A Figura 12 mostra um esquema do processo. Dispositivos auxiliares como posicionadores e sistemas de movimento da tocha podem ser usados na soldagem mecanizada.

A tocha de soldagem (Figura 13) é constituída de um conduíte responsável pela condução do arame eletrodo até o bico da tocha onde ocorre o contato elétrico (o trecho

do arame eletrodo localizado entre este contato e o arco elétrico é denominado de comprimento do eletrodo), de uma canalização, que com o bocal, conduz o gás de proteção à poça de fusão, de um bico de contato e, finalmente, de um sistema de refrigeração, geralmente a água, para manter a temperatura da tocha de soldagem controlada.

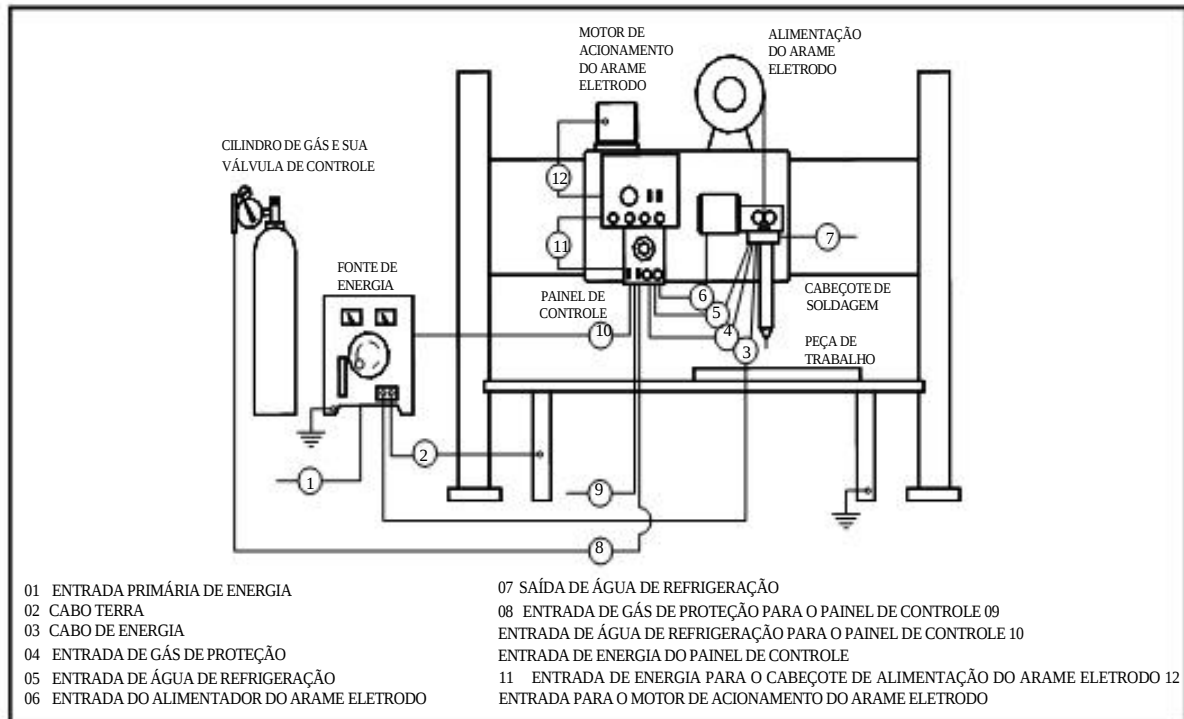


Figura 12 - Esquema do processo MIG/MAG.

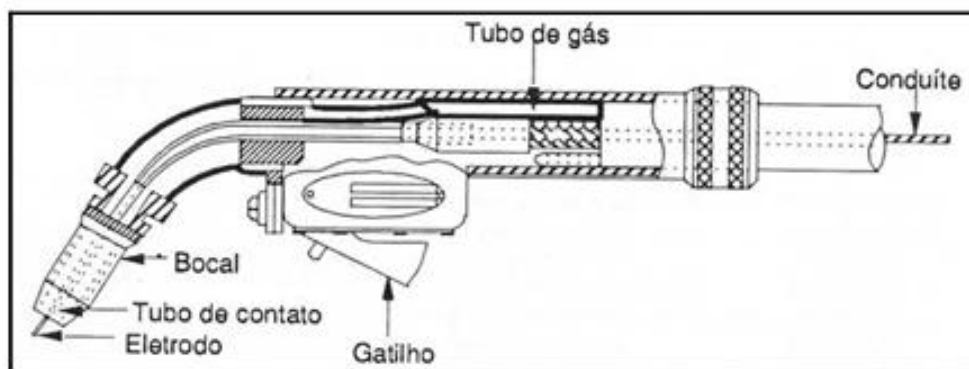


Figura 13 - Esquema de uma tocha para soldagem MIG/MAG.

O bico de contato é fabricado em cobre ou liga de cobre e o conduíte deve prevenir o amassamento do eletrodo e é confeccionado em aço, nylon ou teflon, sendo que, quando se utiliza eletrodo de alumínio, o conduíte deve ser de nylon, teflon ou outro material de baixo coeficiente de atrito, pois o atrito é indesejável.

O sistema de alimentação do arame eletrodo é constituído por um conjunto de roletes tracionadores e por um motor de corrente contínua com velocidade de rotação

ajustável, comandado pela fonte. Este conjunto de roletes pode ser montado em uma unidade de transporte de arame afastada da pistola, neste caso diz-se que a alimentação é por impulsão (“push”). Outro sistema de alimentação é por tração (“pull”), onde os roletes de alimentação são montados na pistola. Outro modo de proceder a alimentação do arame é uma combinação dos dois sistemas, que é o impulsão-tração (“push-pull”).

Os roletes podem ser simples (2 roletes) ou duplos (4 roletes) e recartilhados ou não. Para a soldagem de alumínio ele deve estar o mais próximo à tocha, ou seja, preferencialmente deve-se usar o sistema de alimentação por tração, ou o sistema impulsão-tração.

A fonte de energia fornece a tensão e a corrente elétrica necessárias para estabelecer e manter o arco elétrico entre o eletrodo e o material a ser soldado. Se a mesma apresenta controle de tensão (tensão constante), a velocidade de alimentação do arame eletrodo deverá ser ajustada em um valor constante. Este modo de atuação é denominado de controle interno, apresenta menor custo, porém é limitado à utilização de arames eletrodo de pequenos diâmetros (até 1,2 mm). A fonte de energia com controle de corrente (corrente constante e corrente pulsada), necessita de um sistema de retroalimentação que permita ajustes instantâneos da velocidade de alimentação do arame eletrodo durante a soldagem, a fim de manter constante a corrente. Este modo de atuação é denominado de controle externo, o seu custo é mais elevado e é mais adequado para arames eletrodo de diâmetros maiores (a partir de 1,6 mm).

A fonte de tensão constante é um equipamento mais simples e barato do que o de corrente constante. Na fonte de tensão constante, a corrente é função do comprimento do eletrodo e da velocidade de alimentação, enquanto na fonte de corrente constante, a tensão que é função destes parâmetros.

Para que o processo de soldagem com eletrodo consumível seja estável, é necessário que a velocidade de consumo (fusão) do eletrodo seja, em média, igual à velocidade de alimentação deste, de modo que o comprimento do arco permaneça relativamente constante.

Na soldagem MIG/MAG, são considerados materiais consumíveis o eletrodo e o gás de proteção e, em alguns casos, um líquido para proteção da tocha e regiões adjacentes à solda contra a adesão de respingos. As demais peças, tais como bico, bocal, mangueiras, etc., são consideradas peças de reposição e/ou sobressalentes do equipamento MIG/MAG.

Os arames para soldagem são constituídos de metais ou ligas metálicas que possuem composição química, dureza, condições superficiais e dimensões bem controladas. Arames de má qualidade em termos destas propriedades citadas podem produzir falhas de alimentação, instabilidade do arco e descontinuidades no cordão de solda. Arames de aço-carbono geralmente recebem uma camada superficial de cobre com o objetivo de melhorar seu acabamento superficial e seu contato elétrico com o bico de cobre. Os arames de aço usados com proteção de CO₂ contêm maiores teores de silício e manganês em sua composição, devido à sua ação desoxidante. A seleção do arame a ser usado numa dada operação é feita em termos da composição química do metal de base, do gás de proteção a ser usado e da composição química e propriedades mecânicas desejadas para a solda. A Tabela 11 relaciona as especificações AWS de arames para a soldagem MIG/MAG de diferentes materiais.

Tabela 11 - Especificações AWS de materiais de adição para soldagem MIG/MAG.

Especificação	Materiais
AWS - A 5.10	Alumínio e suas ligas
AWS - A 5.7	Cobre e suas ligas
AWS - A 5.9	Aço inóx e aços com alto Cr
AWS - A 5.14	Níquel e suas ligas
AWS - A 5.16	Titânio e suas ligas
AWS - A 5.18	Aço Carbono e baixa liga
AWS - A 5.19	Magnésio e suas ligas

A classificação de arames para soldagem de aços carbono tem a seguinte classificação:

ER XXY - ZZ, onde

ER indica que se trata de eletrodos (E) ou varetas (R) para soldagem a arco. Os dois (ou três) dígitos seguintes, representados por X, mostram a resistência à tração mínima do metal depositado, em 10³ psi. O dígito Y pode ser um “S” para arame sólido para soldagem, um “C” para arames indicados para revestimento duro ou um “T” para arames tubulares. Os próximos um ou dois dígitos, representados por Z, indicam a classe de composição química do arame e outras características e seu significado pode ser encontrado na especificação AWS A 5.18-79 para arames sólidos e AWS A 5.20-79 para arames tubulares.

Os gases utilizados na soldagem MIG/MAG podem ser inertes ou ativos ou mistura destes gases. O tipo de gás influencia as características do arco e transferência de metal, penetração, largura e formato do cordão de solda, velocidade máxima de

soldagem, tendência ao aparecimento de mordeduras e o custo da soldagem. Os principais gases e misturas utilizados na soldagem MIG/MAG são mostrados na Tabela 12.

Tabela 12 - Gases e misturas usados na soldagem MIG/MAG

Gás ou mistura	Comportamento químico	Aplicações
Argônio (Ar)	inerte	quase todos metais (- aço)
Hélio (He)	inerte	Al, Mg, Cu e suas ligas
Ar + 20 a 50 % He	inerte	idem He (melhor que 100% He)
Nitrogênio (N ₂)	inerte	Cobre e suas ligas
Ar + 20 a 30 % N ₂	inerte	idem N ₂ (melhor que 100% N ₂)
Ar + 1 a 2 % O ₂	ligeiram. oxidante	aços inóx e alg. ligas Cu
Ar + 3 a 5 % O ₂	oxidante	aços Carb. e alguns b. liga
CO ₂	oxidante	aços Carb. e alguns b. liga
Ar + 20 a 50 % CO ₂	oxidante	div. aços - transf. c. circ
Ar + CO ₂ + O ₂	oxidante	diversos aços

O diâmetro do eletrodo é escolhido principalmente em função da espessura do metal de base, da posição de soldagem e outros fatores que podem limitar o tamanho da poça de fusão ou a quantidade de calor que pode ser cedida à peça (energia de soldagem). Para cada diâmetro de eletrodo existe uma faixa de corrente de soldagem adequada, de forma que o arco apresente boas condições de operação.

2.2.6 - Soldagem com eletrodo tubular (FCAW)

É um processo semelhante ao MIG/MAG, porém a proteção da poça de solda provém dos gases e escória gerados pelo fluxo que se encontra no interior do eletrodo tubular (Figura 14). O fluxo é composto por um fundente que contém elementos formadores de escória, estabilizadores de arco, desoxidantes, desnitretantes e elementos de liga. Este processo também pode utilizar uma fonte suplementar de gás semelhante à dos processos MIG/MAG.

Como principais vantagens destacam-se: alta qualidade do metal de solda depositado, com excelente aparência; processo facilmente mecanizado; alta taxa de deposição devido à alta densidade de corrente; distorção reduzida quando comparada ao processo com eletrodo revestido; menor necessidade de limpeza se comparado aos

processos MIG/MAG e velocidades de soldagem relativamente altas. Entretanto, o processo é limitado a ligas ferrosas, o eletrodo tubular tem maior custo que o sólido, a escória produzida deve ser removida e ocorre alta produção de gases que devem ser removidos do ambiente de trabalho por sistemas de exaustão.

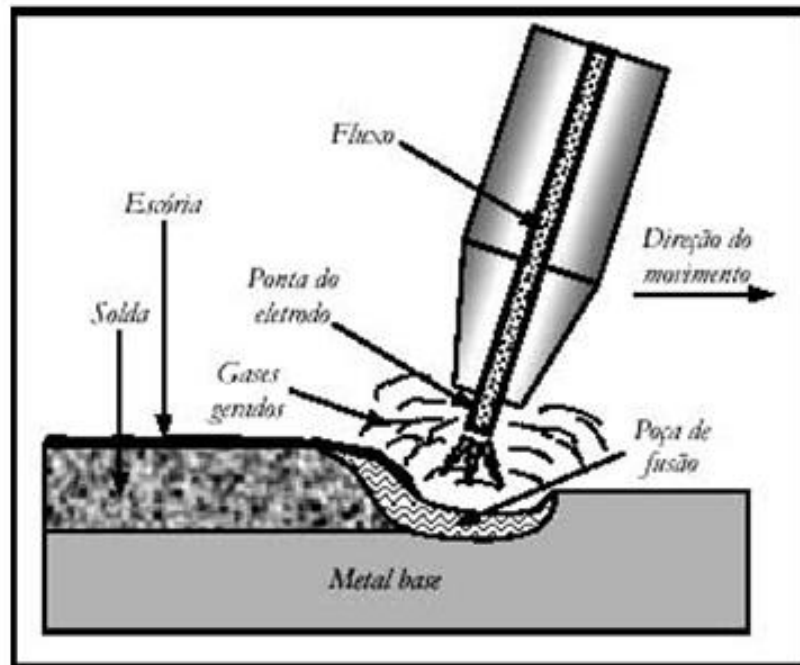


Figura 14 - Representação esquemática do processo de soldagem a arco com eletrodo tubular

Para soldar com eletrodo tubular existem duas opções básicas. No modo denominado autoprotegido, somente a escória e os gases produzidos pela decomposição de alguns dos seus elementos protegem o metal de solda da atmosfera (principalmente de O_2 e N_2). Outro método utiliza um gás de proteção adicional, geralmente CO_2 puro, ou misturas desse gás com argônio e, algumas vezes, também com oxigênio.

Em eletrodo tubular com gás de proteção é possível obter modos de transferência do metal para a peça do tipo curto-circuito, globular e aerossol (“spray”), dependendo da ajustagem dos parâmetros de soldagem.

Com eletrodo tubular autoprotegido a penetração é normalmente reduzida, quando comparado com aquele que utiliza CO_2 como gás auxiliar. Como a proteção é realizada somente pela escória, não é recomendável que esse tipo opere em aerossol, pois a área externa total das gotas aumenta muito e pode não ocorrer proteção das mesmas. Portanto, curto-circuito e globular são os modos de transferência usuais.

Além de operar com fontes de potência convencionais, o eletrodo tubular também pode soldar com corrente pulsada. Quando a mesma é aplicada ao eletrodo

tubular, os seguintes benefícios são notáveis: (a) arco mais estável; (b) possibilidade de soldar em todas as posições; (c) maior taxa de deposição para mesma energia equivalente à convencional; (d) melhor controle da geometria do cordão.

Os eletrodos tubulares são feitos de um tubo metálico preenchido com uma mistura de pó. O enchimento do núcleo pode ser principalmente pó de ferro, com elementos de liga e alguns desoxidantes gerando um eletrodo tubular metálico, ou minerais similares àqueles usados para o revestimento de eletrodos revestidos, gerando um eletrodo tubular com fluxo. Existem dois tipos principais de eletrodo tubular com fluxo: rutilico e básico.

Conforme classificação do IIW, os eletrodos tubulares podem ser confeccionados nas geometrias mostradas na Figura 15.

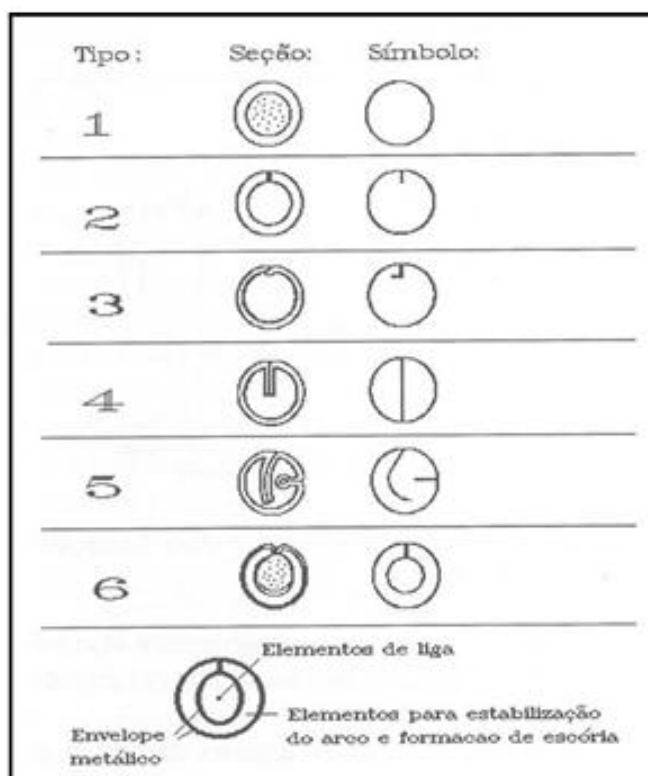


Figura 15 - Geometrias usuais dos eletrodos tubulares.

No processo FCAW, o fluxo tem funções similares à que possui nos eletrodos revestidos, ou seja,

- Desoxidar o metal de solda;
- Transferir elementos de liga;
- Aumentar a taxa de deposição, através do pó de ferro;
- Formar escória e gás de proteção produzido pela decomposição de alguns dos seus compostos;

- Estabilizar o arco;
- Estabelecer uma conveniente geometria para o cordão.

Apesar do custo específico adicional, o método com gás auxiliar de proteção é utilizado com frequência, pois aumenta muito a tolerância do processo e, em geral, as propriedades mecânicas do metal de solda, reduzindo o custo total final.

Resumidamente, a classificação para os eletrodos tubulares para aço ao carbono é composta na AWS A5.20 pelos seguintes dígitos: AWS EXYT-Z, onde E, designa eletrodo; X, a mínima resistência à tração do metal de solda em 10.000 psi (69 MPa); Y, a posição de soldagem, sendo 0 para plana-horizontal e 1 para todas; T, indicando eletrodo tubular; Z, demais características de uso e operacionais.

Em função do eletrodo tubular produzir alta penetração, na soldagem com proteção adicional de gás, o nariz da junta pode ser aumentado. Outrossim, uma junta em “V”, que para soldagem por eletrodo revestido geralmente teria um ângulo de 60° , no eletrodo tubular é de somente 45° , como consequência da mais longa extensão do eletrodo após o bico de contato.

Como a tensão é proporcional ao comprimento do arco, sendo esse excessivamente longo, a atmosfera pode contaminar a poça de fusão. Nos aços ao carbono e baixa liga, isso provoca oxidação da poça; formação de nitretos e consequente redução de tenacidade da junta; além de porosidade.

Um aumento de tensão resulta num cordão mais largo. Com a tensão excessivamente alta, pode ocorrer aumento de salpico e cordão irregular. A redução deste parâmetro altera a geometria do cordão, tornando-o convexo.

A corrente de soldagem é a principal responsável pela penetração e, também, preponderantemente, determina o modo de transferência e a taxa de deposição. Além disso, esse é o parâmetro que determina a velocidade de alimentação do arame.

Outrossim, excessiva intensidade de corrente produz um cordão convexo, enquanto que muito baixa resulta em grandes gotas sendo transferidas; alto nível de salpico e contaminação do metal de solda por nitrogênio do ar ambiente, quando são utilizados eletrodos autoprotetidos. Conforme esse parâmetro é alterado, a tensão deve ser simultaneamente ajustada, de modo a manter ótima a estabilidade do arco.

A velocidade de soldagem influencia de forma geral a geometria do cordão. Quando excessivamente alta, torna o cordão convexo com bordas irregulares e diminui a penetração e, se muito baixa, resultará em inclusão de escória e cordão irregular.

No processo FCAW, a soldagem pode ser automática ou semi-automática como no Arco Submerso e no MIG/MAG, e requer uma fonte de energia com maior capacidade de corrente, como no Arco Submerso.

No FCAW o metal de solda resfria lentamente fornecendo à solda boas ductilidade e propriedades mecânicas. Este processo de soldagem produz soldas com qualidade de “raio-X”.

Tem aplicação na indústria nuclear, indústria naval, construção de plataformas de exploração de petróleo e fabricação de componentes e estruturas de aço-carbono, aços baixa liga e aços inoxidáveis.

2.2.7 - Soldagem com eletrodo revestido

Este é um processo muito utilizado devido à sua simplicidade. O eletrodo é revestido por um material fundente, sendo consumido por um arco gerado entre a sua extremidade livre e o metal a ser soldado (Figura 16).

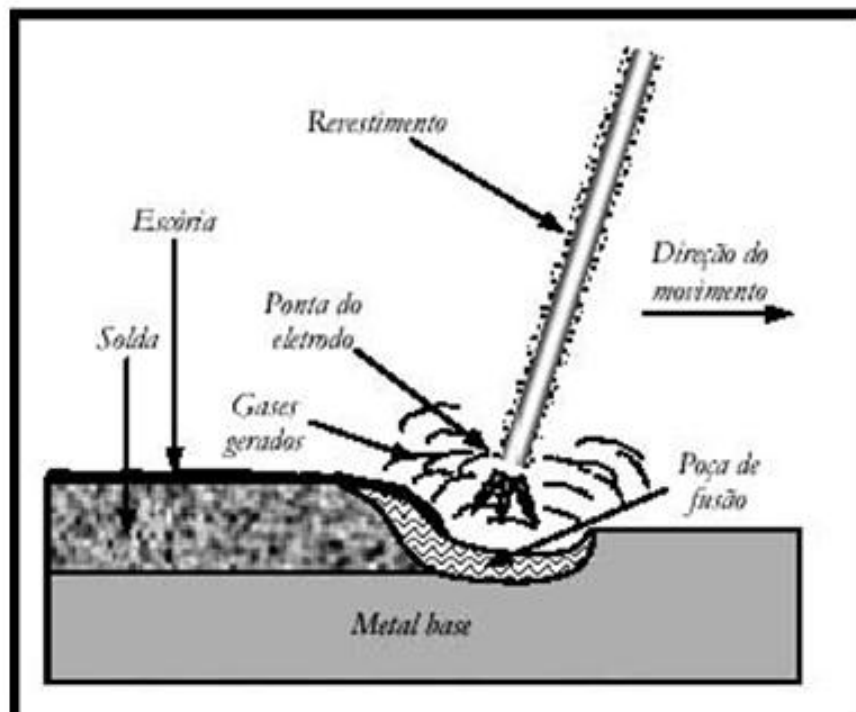


Figura 16 - Representação esquemática da soldagem a arco com eletrodo revestido.

O revestimento tem a função de estabilizar o arco, proteger o metal fundido por meio da formação de uma atmosfera de gases protetores e fornecer elementos de liga à

solda. É um processo manual, onde o soldador abre o arco elétrico, provocando um curto-circuito inicial entre a superfície da peça e o eletrodo. É muito utilizado em soldagens de campo e em manutenção, apresenta baixo custo, produz uniões soldadas com boas propriedades e tem grande versatilidade, tanto com relação à posição de soldagem quanto ao projeto da junta. Requer mão-de-obra habilidosa, exige uma freqüente troca de eletrodo e quando se executam vários passes, é necessário que se remova a escória após a deposição de cada um deles.

A possibilidade de inúmeras formulações para o revestimento explica a principal característica deste processo, que é a sua grande versatilidade em termos de ligas soldáveis, operacionalidade e características mecânicas e metalúrgicas do metal depositado. O custo relativamente baixo e a simplicidade do equipamento necessário, comparados com outros processos, e a possibilidade de uso em locais de difícil acesso ou abertos, sujeitos à ação de ventos, são outras características importantes.

Quando comparada com outros processos, particularmente com a soldagem com eletrodo consumível e proteção gasosa e com a soldagem ao arco submerso, a soldagem com eletrodo revestido apresenta como principal limitação uma baixa produtividade, tanto em termos de taxa de deposição, como em termos de fator de ocupação do soldador, em geral inferior a 40%. Outras limitações são a necessidade de um treinamento específico para o soldador, que é demorado e oneroso, particularmente para certas aplicações, necessidade de cuidados especiais com os eletrodos, principalmente com os do tipo básico, e o grande volume de gases e fumos gerados no processo, que podem ser prejudiciais à saúde, particularmente em ambientes fechados.

A soldagem com eletrodos revestidos é usada na fabricação e montagem de diferentes equipamentos e estruturas, tanto em oficina como no campo, sendo particularmente interessante neste último caso. O processo é usado basicamente como uma operação manual, sendo muitas vezes chamado simplesmente de soldagem manual. Somente uma variação “mecanizada” do processo, a soldagem por gravidade, é mais utilizada, principalmente em estaleiros.

A soldagem manual pode ser usada em grande número de materiais, como aços-carbono, aços de baixa, média e alta liga, aços inoxidáveis, ferros fundidos, alumínio, cobre, níquel e ligas destes.

Metais de baixo ponto de fusão como o chumbo, estanho e zinco e metais refratários ou muito reativos, como o titânio, zircônio, molibdênio e nióbio não são

soldáveis por este processo. Diferentes combinações de metais dissimilares podem ser soldadas com os eletrodos revestidos.

Os equipamentos de um posto de soldagem manual com eletrodos revestidos compreendem, em geral, fonte de energia, cabos, porta-eletrodos, ferramentas (picadeira, escova de aço, etc.) e materiais de segurança (máscara, óculos, avental, etc.).

Na soldagem com eletrodos revestidos, o comprimento do arco é controlado manualmente pelo soldador, sofrendo, portanto, variações durante a execução do cordão de solda. Por esta razão, fontes de energia com características de saída do tipo “tensão constante”, para as quais variações no comprimento de arco causam grandes alterações de corrente, não são adequadas para a soldagem com eletrodos revestidos. Neste caso, utilizam-se fontes com características do tipo “corrente constante”. Neste tipo de fonte, a corrente de soldagem fornecida pela máquina é aproximadamente constante, sofrendo muito pouca influência de variações no comprimento do arco e, portanto, da tensão de operação deste

Quanto ao tipo de corrente, as fontes podem fornecer corrente contínua (CC) ou alternada (CA) ou ambas. Na soldagem com corrente alternada existe uma tendência maior a instabilidade do arco elétrico, devido a mudança periódica da polaridade e a queda momentânea do valor da corrente a valores próximo de zero, o que torna este tipo de corrente inadequada para soldagem com certos tipos de eletrodos revestidos. Além disso, a abertura e a manutenção do arco são mais difíceis com esse tipo de corrente, particularmente para eletrodos de pequeno diâmetro, que são utilizados com menores correntes de soldagem. Por outro lado, as perdas nos cabos, desde que não estejam enrolados, e a tendência ao aparecimento de sopro magnético são menores, particularmente para maiores valores de corrente.

Construtivamente, as máquinas podem ser de três tipos, que são: transformadores, transformadores-retificadores e geradores. As máquinas do primeiro tipo fornecem apenas corrente alternada e são as mais simples e baratas, para a soldagem manual. O controle da corrente de soldagem pode ser feito por “taps” (controle por variação da tensão em vazio), bobina móvel, “shun magnético móvel” ou reator saturável (controle pela corrente de curto-circuito). Mais recentemente, foram desenvolvidas máquinas em que o controle é feito eletronicamente.

Diversos fatores devem ser considerados na seleção de uma fonte de energia para soldagem elétrica. Destes, pode-se destacar:

- tipo de corrente a ser utilizada;

- faixa de corrente necessária;
- posições de soldagem a serem usadas e
- potência disponível na rede de alimentação.

O porta-eletrodo tem a função de prender o eletrodo e energizá-lo. Seu cabo deve ser bem isolado para se minimizar o risco de choque elétrico para o soldador enquanto suas garras devem estar sempre limpas e em boas condições para evitar problemas de superaquecimento. Um porta-eletrodo é projetado para trabalhar com varetas dentro de uma determinada faixa de diâmetros, sendo especificado pela corrente máxima que pode conduzir. Como o peso do porta-eletrodo aumenta com o valor da corrente máxima permissível, deve-se procurar trabalhar sempre com o menor porta-eletrodo compatível com uma dada aplicação, a fim de reduzir a fadiga do soldador.

Os cabos tem a função de conduzir a corrente elétrica da fonte ao porta-eletrodo (cabo de soldagem) e da peça à fonte (cabo de retorno). Estes podem ser de cobre ou alumínio, devem apresentar elevada flexibilidade, para facilitar o manuseio, e serem recobertos por uma camada de material isolante, resistente à abrasão e a sujeira. Três fatores devem ser considerados na escolha de cabos para uma dada aplicação:

- corrente de soldagem;
- ciclo de trabalho da máquina e
- comprimento total dos cabos do circuito.

Um eletrodo revestido é constituído por uma vareta metálica, com diâmetro entre 1,5 e 8 mm e comprimento entre 23 e 45 cm, recoberta por uma camada de fluxo (revestimento). A composição do revestimento determina as características operacionais dos eletrodos e influencia a composição química e propriedades mecânicas da solda efetuada. Além das funções já citadas, o revestimento serve ainda para:

- realizar ou possibilitar reações de refino metalúrgico, tais como: desoxidação, dessulfuração, etc.;
- formar uma camada de escória protetora;
- facilitar a remoção da escória e controlar as suas propriedades físicas e químicas;
- facilitar a soldagem nas diversas posições;
- dissolver óxidos e contaminações na superfície da junta;
- reduzir o nível de respingos e fumos;

- diminuir a velocidade de resfriamento da solda;
- possibilitar o uso de diferentes tipos de corrente e polaridade;
- aumentar a taxa de deposição (quantidade de metal depositado por unidade de tempo), entre outras.

Como consequência, existe no mercado um grande número de tipos de eletrodos, apresentando diferentes características operacionais, aplicáveis a diferentes materiais e que produzem soldas com diferentes características. Para racionalizar o mercado, os eletrodos revestidos são classificados de acordo com sistemas propostos por diferentes sociedades. As classificações mais usadas no Brasil são as propostas pela AWS, listadas na Tabela 13.

Tabela 13 - Especificações AWS para classificação de eletrodos revestidos.

Especificação	Tipos de Eletrodo
AWS A 5.1	Eletrodos revestidos de aço doce para soldagem a arco.
AWS A 5.4	Eletrodos revestidos de aço ao Cr e ao Cr-Ni, resistentes à corrosão, para soldagem a arco.
AWS A 5.5	Eletrodos revestidos de baixa liga para soldagem a arco.
AWS A 5.6	Eletrodos revestidos de cobre e ligas de cobre para soldagem a arco.
AWS A 5.11	Eletrodos revestidos de níquel e ligas de níquel para soldagem a arco.
AWS A 5.13	Eletrodos e varetas para revestimento por soldagem

Os materiais mais comumente presentes no revestimento de aços são:

- celulose e dextrina;
- carbonatos e dióxido de titânio;
- ferro-manganês e ferro-silício;
- pó de ferro;
- outras adições metálicas;
- argilas;
- fluoreto de cálcio;
- silicatos;
- óxido de ferro e manganês.

De acordo com sua formulação, os revestimentos dos eletrodos revestidos podem ser separados em diferentes tipos, por exemplo:

- revestimento oxidante;

- revestimento ácido;
- revestimento rutílico;
- revestimento básico;
- revestimento celulósico.

O sistema de classificação de eletrodos de aço doce e de baixa liga da AWS utiliza um conjunto de números e letras que fornecem várias informações a respeito dos eletrodos, como mostra na Figura 17.

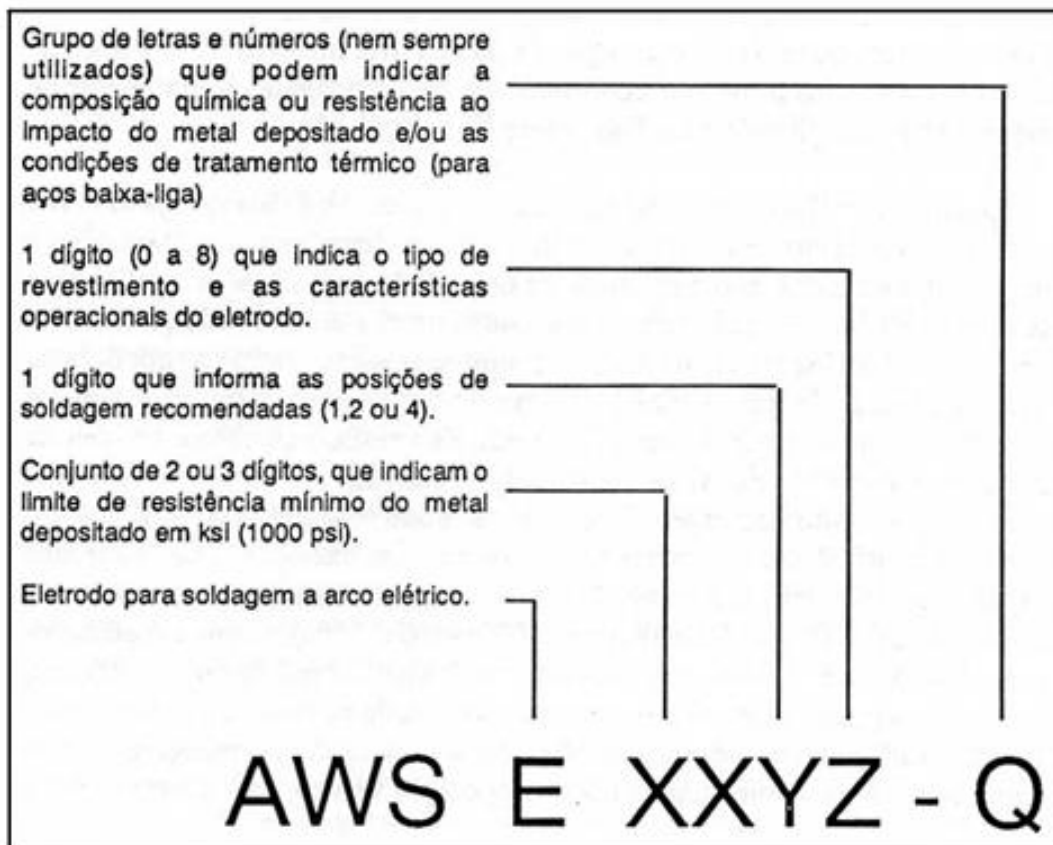


Figura 17 - Esquema explicativo do sistema de classificação de eletrodos revestidos adotado pelas especificações AWS A 5.1 (aços doces) e A 5.5 (aços baixa liga).

Neste sistema, a identificação se inicia pela letra E, que indica que o consumível é um eletrodo. O conjunto seguinte, formado por dois ou três algarismos, indica o limite de resistência mínimo à tração do metal depositado pelo eletrodo, em ksi (1.000 psi). O dígito seguinte é um algarismo que indica a posição de soldagem em que o eletrodo pode ser utilizado, sendo 1 para a soldagem em todas as posições, 2 para soldagem nas posições plana e horizontal e 4 para soldagem também na posição vertical ascendente.

O próximo dígito, que é o último para eletrodos de aço doce, indica o tipo de revestimento do eletrodo e, portanto, suas características operacionais. Seu significado é mostrado na Tabela 14

Tabela 14 - Significado do quarto (ou quinto) dígito da classificação AWS de eletrodos revestidos de aço doce e aço baixa-liga.

Eletrodo	Tipo de Revestimento	Tipo de Corrente (*)
E XX10	Celulósico (sódio)	CC +
E XX20	Ácido	CC -
E XXX1	Celulósico (potássio)	CC +, CA
E XXX2	Rutílico (sódio)	CC -, CA
E XXX3	Rutílico (potássio)	CC +, CC -, CA
E XXX4	Rutílico (pó de ferro)	CC +, CC -, CA
E XXX5	Básico (sódio)	CC +
E XXX6	Básico (potássio)	CC +, CA
E XXX7	Ácido (pó de ferro)	CC -, CA
E XXX8	Básico (pó de ferro)	CC +, CA

(*)	CA:	CORRENTE ALTERNADA;
	CC +:	CORRENTE CONTÍNUA, ELETRODO POSITIVO (POL. INVERSA)
	CC -:	CORRENTE CONTÍNUA, ELETRODO NEGATIVO (POL. DIRETA)

Os eletrodos de aço inoxidável e outras ligas ferrosas com elevado teor de cromo são agrupados na especificação AWS A 5.4. Por esta especificação, os eletrodos são divididos em dois grupos, quanto às características de revestimento:

E XXX-15: eletrodos para operar somente com CC e

E XXX-16: eletrodos para operar também com CA, onde XXX é a designação do grau do metal depositado, segundo a AISI (American Iron and Steel Institute).

Os eletrodos com revestimento do tipo básico apresentam melhor resistência à fissuração e excelentes características para a soldagem fora da posição plana. Embora as características metalúrgicas da solda sejam geralmente melhores, o cordão tende a ser mais irregular devido à menor estabilidade do arco com este tipo de eletrodo.

Os eletrodos do tipo E XXX-16 têm revestimento, em geral, rutílico e operam com CA e CC. Os cordões obtidos com estes eletrodos são caracterizados por um excelente acabamento.

A Tabela 15 fornece um guia para a seleção de metal de adição para a soldagem dos aços inoxidáveis e destes com outros materiais.

Tabela 15 - Seleção de metais de adição para soldagem de aços inoxidáveis.

Metal de Base (AISI)	301 302 304 308	304L	310 314 a	316	316L	317	321 347	405 410 420	430	446 b	Aços Carbono	Aços de Baixa-Liga Cr-Mn
301 302 304 308	E 308	E 308	E 308	E 308	E 308	E 308	E 308	E 309	E 309	E 310	E 309	E 309
304L		E308L	E 308	E 308	E 308	E 308	E 309	E 309	E 309	E 310	E 309	E 309
310 314 a			E 310	E 316	E 317	E 308	E 309	E 309	E 309	E 310	E 309	E 309
316				E 316	E 316	E 316	E 308	E 309	E 309	E 310	E 309	E 309
316L					E316L	E 316	E316L	E 309	E 309	E 310	E 309	E 309
317						E 317	E 308	E 309	E 309	E 310	E 309	E 309
321 347							E 347	E 309	E 309	E 310	E 309	E 309
405 410 420								E 410	E430 c	E410 c	E 410 c,d	E 410 c
430									E 430	E 430	E 430 c,d	E 430 c
446										E 446	E 430 c,d	E 430 c

OBS.: OS CONSUMÍVEIS MOSTRADOS SÃO OS MAIS UTILIZADOS, EMBORA OUTROS POSSAM SER USADOS

(a) LIGA SENSÍVEL À FISSURAÇÃO NA SOLIDIFICAÇÃO.
 (b) CONSUMÍVEL À BASE DE NÍQUEL É MAIS ADEQUADO PARA APLICAÇÕES A TEMPERATURAS ELEVADAS, EXCETO QUANDO EM PRESENÇA DE COMPOSTOS DE INÓXIDE.
 (c) SE UM DEPÓSITO AUSTENÍTICO É ACEITÁVEL PARA AS CONDIÇÕES EM SERVIÇO, E 309 OU E 310 SÃO PROCENTEMENTE USADOS.
 (d) ARAMES DE AÇO DOCE E E 7018 PODEM SER ACEITOS SE FOR UTILIZADO PRÉ-AQUECIMENTO E CONTROLE DO TEOR DE HIDRÓGENIO.

Na soldagem manual com eletrodos revestidos, as principais variáveis operatórias são: tipo e diâmetro do eletrodo; tipo, polaridade e valor da corrente de soldagem; tensão e comprimento do arco; velocidade de soldagem; técnica de manipulação do eletrodo e as seqüências de deposição e soldagem.

A faixa de corrente utilizável para um dado eletrodo depende principalmente do seu diâmetro e do material da alma, do tipo e espessura do revestimento e da posição de soldagem. Para cada tipo de eletrodo e para uma dada bitola existe um valor mínimo de corrente, abaixo do qual a instabilidade do arco torna a soldagem praticamente impossível, e um limite superior, acima do qual o revestimento pode ser danificado por um aquecimento excessivo, devido ao aquecimento por efeito Joule da alma do eletrodo. Eletrodos com revestimentos espessos e isentos de substâncias orgânicas tendem a suportar maiores valores de corrente do que eletrodos com revestimentos delgados e com celulose, como mostra a Tabela 16. A melhor maneira de se conhecer a faixa útil de corrente de um dado eletrodo é consultar as instruções de seu fabricante.

Tabela 16 - Faixas típicas de parâmetros elétricos de operação para diferentes eletrodos revestidos, em função de seu diâmetro.

Eletrodo Bitola (mm)	E 6010		E 7018	
	Corrente (A)	Tensão (V)	Corrente (A)	Tensão (V)
2,4	40 - 80	23 - 25	70 - 100	17 - 21
3,2	75 - 125	24 - 26	110 - 160	18 - 22
4,0	110 - 170	24 - 26	150 - 220	20 - 24
4,8	140 - 210	26 - 30	200 - 275	21 - 25
5,6	170 - 250	26 - 30	260 - 340	22 - 26
6,4	210 - 320	28 - 34	310 - 400	23 - 27
8,0	270 - 425	28 - 34	370 - 470	23 - 28

2.2.8 - Soldagem por arco submerso

Neste processo, o arco elétrico gerado entre a ponta de um eletrodo nu, sólido ou tubular, e a poça de fusão é totalmente recoberto por um fluxo granular, conforme esquematizado pela Figura 18. A principal função do fluxo é formar uma escória mais leve que flutua sobre o metal depositado, formando uma camada de proteção contra a atmosfera. Adicionalmente, o fluxo fornece elementos de ligas, atua como isolante térmico, elimina faíscas, luminosidade e respingos.

O processo de soldagem a arco submerso (AS) é empregado em grande escala na indústria devido à sua facilidade de operação e produtividade. Sua participação corresponde à cerca de 10% do volume de material de solda a arco elétrico.

No Brasil, este processo é utilizado na fabricação de tubos metálicos, partes de navios, perfis, vasos de pressão, trocadores de calor, caldeiras e todo tipo de equipamento pesado.

O processo de soldagem AS, em princípio, é muito similar ao MIG/MAG (Metal Inert Gas/Metal Active Gas), isto é, o eletrodo em forma de bobina é alimentado através de uma unidade de alimentação de eletrodo em direção à peça de trabalho. A corrente é transferida através de um bico de contato. Este processo permite o uso de eletrodos contínuos e de altas correntes.

A diferença está no fato de que no processo MIG/MAG a proteção do eletrodo e da poça de solda é feita através de gás e, no caso do processo AS, a proteção é feita

por um fluxo, que é alimentado separadamente. O fluxo produz uma completa cobertura do arco e da poça de fusão. Deste modo, o arco não é visível e a soldagem desenvolve-se sem respingos, luminosidade e radiação, dispensando ao operador o uso de máscara ou capacete de proteção.

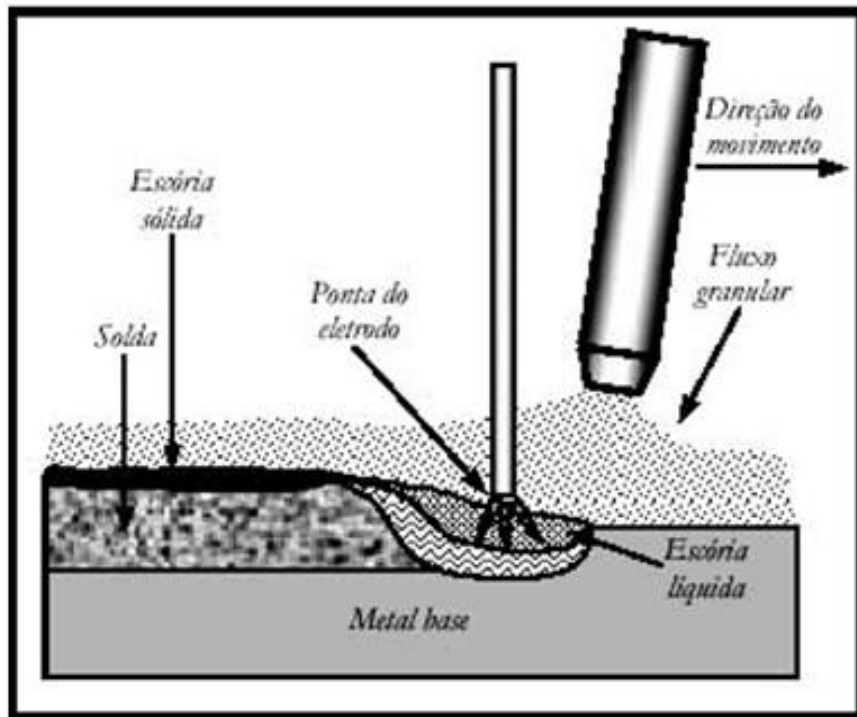


Figura 18 - Esquema do processo de soldagem por arco submerso utilizando eletrodo sólido.

Assim, a soldagem a arco submerso se caracteriza por ser um processo estável e suave, que gera poucos fumos de soldagem e quase nenhum respingo e resulta em cordões com acabamento uniforme e com uma transição suave entre o metal de solda e o metal de base.

Pode ser utilizado tanto para união quanto enchimento e revestimento de peças metálicas. No Brasil, devido a disponibilidade de fluxos e eletrodos, o processo tem sido usado em aços-carbono, aços de baixa liga, aços inoxidáveis e alguns tipos de revestimento.

O fluxo fundido cobre a solda metálica e a protege do meio ambiente durante a solidificação e, devido ao modo de alimentação do fluxo, permite soldagens apenas na posição plana ou horizontal.

O fluxo deve mostrar características físico-químicas que permitam controle do acabamento e da geometria do cordão de solda. Tem, também, a função de adicionar

elementos de liga no metal de solda, além de desoxidar e retirar impurezas do metal fundido através de reações químicas.

Na soldagem a arco submerso, o grau de automação é grande, sendo que a alimentação do eletrodo ocorre de forma contínua, conferindo rapidez, economia e repetibilidade de resultados.

No processo AS, tanto o fluxo quanto o eletrodo podem ser alterados a qualquer momento. Outra característica é a eficiência de deposição que se aproxima de 100%, pois não há perdas de metal por respingos. A perda de calor através do arco é baixa, devido ao efeito de isolamento térmico proporcionado pela camada de fluxo.

Os fluxos e arames são classificados pela AWS A 5.17, cuja simbolização resumida é a seguinte: AWS FUXY-EZZZ, onde o primeiro bloco (FUXY) é relativo à classificação do fluxo, enquanto o segundo (EZZZ) ao eletrodo (arame).

Para o fluxo: (a) F, designa fluxo; (b) U, a mínima resistência à tração, em incrementos de 10.000 psi (69 MPa), do metal de solda que esse fluxo deposita com certos arames; (c) X, as condições de tratamento térmico após a soldagem, que o metal de solda sofreu antes dos ensaios mecânicos, sendo “A” para “como soldado” (sem tratamento térmico) e “P” quando ocorreu algum tipo (detalhado na especificação); (d) Y, a menor temperatura que o metal de solda resiste ao impacto e alcança, ou excede 20 ft.lb (27 J).

Com relação ao arame: (a) E, para eletrodo maciço e EC para compósito; (b) ZZZ, podendo conter mais de três dígitos, especifica a composição química do arame, sendo típicos as combinações EL12, EM12K, EH14.

O AS é amplamente reconhecido como um processo de soldagem altamente produtivo, oferecendo as seguintes vantagens: altas taxas de deposição devido à aplicação de altas correntes de soldagem que geram uma elevada densidade de corrente, altas velocidades de soldagem, reduzidas incidências de falta de fusão e inclusões de escória, superfícies de solda regulares, sem produção de respingos e fumos.

A produtividade do processo AS pode ser aumentada de vários modos:

- Utilizando dois eletrodos paralelos alimentados através do mesmo bico de contato e conectados à mesma fonte de soldagem (“twin arc”). Os eletrodos são de diâmetro pequeno, mas devido às maiores densidades de corrente em cada eletrodo, a taxa total de fusão é maior do que se um eletrodo simples fosse utilizado;
- Pelo sistema “tandem” (eletrodos paralelos), onde dois ou até quatro

eletrodos são colocados um após o outro e cada eletrodo é conectado a uma fonte de soldagem;

- Pela adição de pó de ferro, que é alimentado através de uma unidade separada.

O eletrodo paralelo é relativamente simples de operar, porque somente uma fonte de tensão é utilizada. Entretanto, o ganho em produtividade é limitado, porque somente eletrodos de diâmetros menores podem ser utilizados. Com a técnica de multieletrodos, os eletrodos deverão fundir na mesma poça de solda. A distância entre eles pode ter um efeito pronunciado sobre a penetração e a altura do reforço. É também importante escolher corretamente a polaridade da tensão, a fim de evitar a interferência de um arco voltaico sobre o outro.

A soldagem a arco submerso convencional utiliza entre 10-20% da energia do arco disponível na fusão do metal de adição. O restante da energia é utilizado na fusão do metal base e do fluxo. Valores típicos da diluição na soldagem AS convencional estão na faixa de 50-70%, indicando disponibilidade de excesso de calor que poderia ser usado na fusão do metal de solda adicional. Portanto, a principal característica da adição de pó metálico é melhorar a eficiência de deposição, utilizando o excesso de calor disponível na poça de solda.

Com a adição de pó de ferro, um material frio não fundido é adicionado à poça de solda. Alguma energia é necessária para aquecer e fundir o pó de ferro e, portanto, o ciclo térmico do processo é alterado. Isto afeta a microestrutura e as propriedades tanto da solda metálica quanto da zona termicamente afetada.

Soldas por arco submerso utilizando apenas um eletrodo mostram boa ductilidade e tenacidade ao impacto, além de boa uniformidade e acabamento na aparência dos cordões de solda. As propriedades mecânicas da solda são sempre compatíveis às do metal de base utilizado.

A quantidade de hidrogênio contido nas soldas metálicas realizadas com o processo a arco submerso é, em geral, em um nível muito baixo.

2.2.9 - Eletroescória e Eletrogás

O processo de eletroescória é utilizado para soldar seções verticais com grande espessura em um único passe, utilizando deposição progressiva de material de adição

por meio de eletrodos consumíveis (tubulares ou maciços) no vão entre as placas a serem soldadas.

O início do processo ocorre pela aplicação de um arco elétrico que inicia a fusão do fluxo, formando uma escória líquida, constituída de uma mistura de silicatos e de até 20% de fundentes que têm por objetivo melhorar a fluidez e condutividade elétrica. A poça de fusão e a escória são contidas por duas sapatas de cobre refrigeradas a água, conforme mostra a Figura 19. Em seguida, mais fluxo é adicionado, extinguindo o arco e a escória é mantida no estado líquido, a temperaturas de até 2000°C, apenas por efeito Joule, devido à aplicação da corrente elétrica. À medida que o eletrodo funde, a poça de solda sobe e as sapatas de cobre acompanham o movimento vertical de soldagem, atuando como um molde.

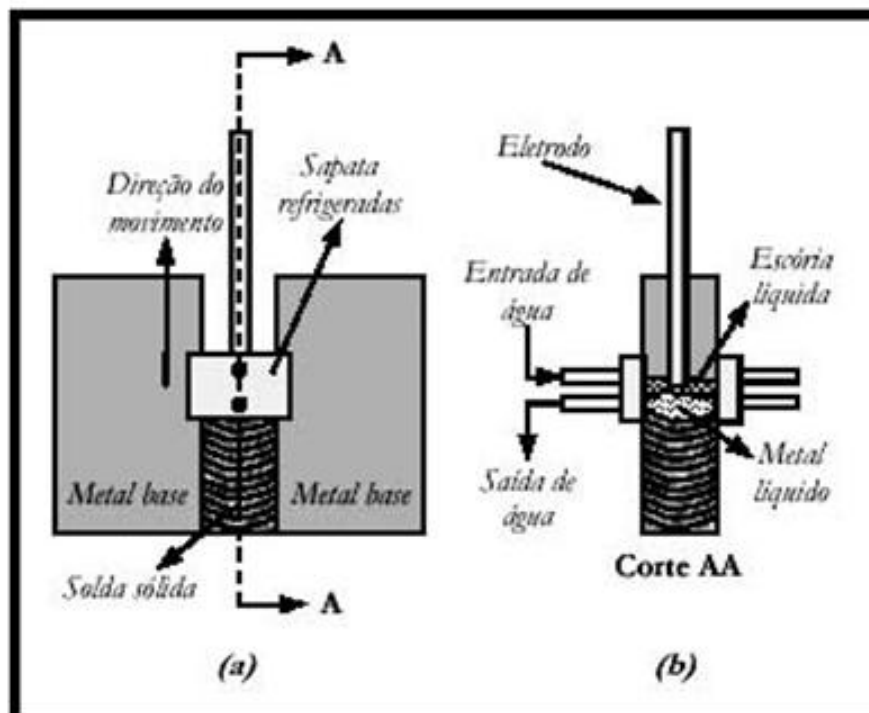


Figura 19 - Esquema do processo de soldagem por eletroescória: (a) vista frontal e (b) seção transversal.

É utilizado na união de componentes estruturais como soldagem de flanges, união de chapas para obtenção de peças com largura superior àquelas normalmente produzidas por laminação, solda de equipamentos como prensas de grande porte, fornos, vasos de pressão e anéis de turbina, peças fundidas e cascos de navios.

O processo de eletrogás possui uma configuração geométrica similar ao processo de eletroescória, porém não utiliza a escória como proteção e a poça de fusão é mantida por um arco elétrico durante todo o processo. Em alguns casos pode utilizar

dióxido de carbono ou uma mistura deste gás com argônio para proteger a região de solda. Esta característica faz com que este processo seja considerado uma variante da soldagem MAG.

Comparativamente ao processo de eletroescória, o processo de eletrogás possui algumas vantagens: o vão entre as chapas é reduzido; não necessita de limpeza de escória; é aplicável em chapas de espessuras menores e as propriedades de tenacidade da solda são melhores. Por outro lado, o processo de eletroescória apresenta menor probabilidade de formação de trincas e distorção.

A soldagem eletrogás é mais usada na união de chapas de aços-carbono ou ARBL (alta resistência e baixa liga) posicionadas verticalmente, que são encontradas na montagem de estruturas robustas, como cascos de navios, tanques de armazenagem, edifícios, etc.

2.2.10 - Soldagem a ponto e por costura

Os processos de soldagem a ponto e por costura são realizados pela passagem de corrente elétrica entre dois eletrodos não-consumíveis que pressionam as duas partes a serem soldadas. Após fundir localmente o material base, por efeito Joule, a corrente é desligada e os eletrodos são mantidos pressionados até que a solda se solidifique. Além de conduzir a corrente de soldagem e aplicar pressão localizada, os eletrodos têm a função de auxiliar na dissipação de calor.

No processo de soldagem a ponto, como o próprio nome diz, apenas um ou múltiplos pontos de solda são produzidos, conforme mostra a Figura 20a. É usada na fabricação de peças e conjuntos, a partir de chapas metálicas finas, com espessuras de até 3 mm aproximadamente, quando o projeto permite o uso de juntas sobrepostas. É aplicável aos aços carbono, aços inoxidáveis, Al, Cu, Mg, Ni e suas ligas.

O processo de soldagem por costura utiliza eletrodos com formato de disco que rolam sobre as superfícies formando um cordão de solda contínuo (Figura 20b); este processo é largamente empregado na confecção de tubos com costura, tanques de combustível para automóveis, extintores de incêndio, fabricação de tubos, etc.

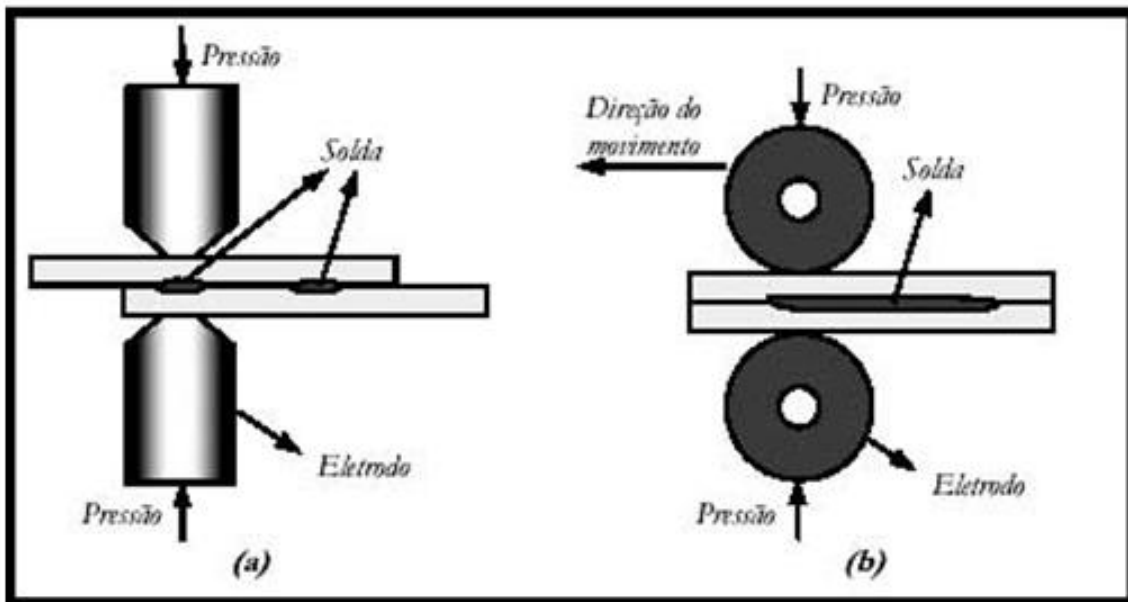


Figura 20 - Esquema do processo de soldagem por resistência elétrica: (a) a ponto e (b) por costura.

2.2.11 - Soldagem por explosão

Na soldagem por explosão, a solda é produzida pelo impacto violento entre duas superfícies, por meio da detonação controlada de uma explosão sobre uma das partes, conforme mostra esquematicamente a Figura 21. A união entre as placas ocorre por inter-travamentos mecânicos das ondulações criadas na superfície e por microfusão na interface (Figura 22).

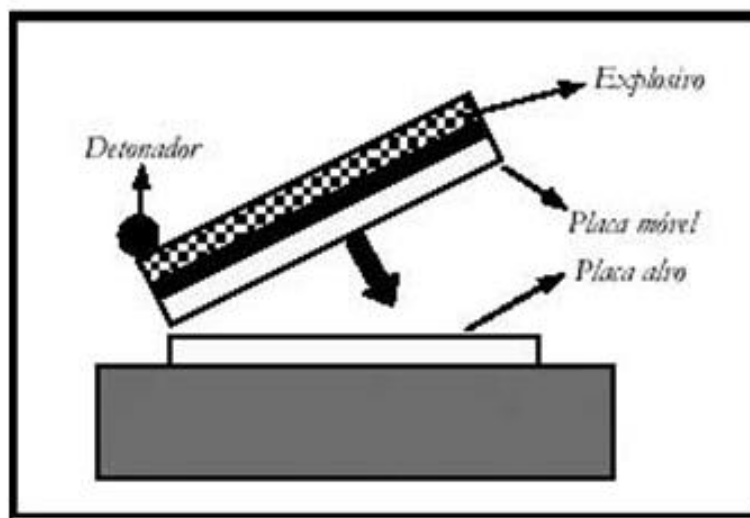


Figura 21 - Representação da soldagem por explosão

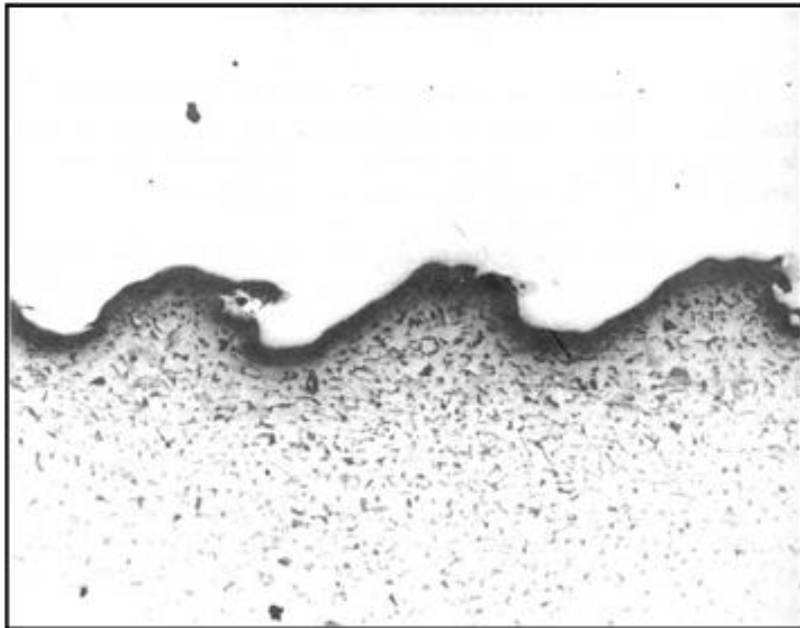


Figura 22 - Micrografia da união de chapas por explosão.

Os parâmetros mais importantes do processo são o ângulo de contato entre as placas, o acabamento superficial, além da velocidade de impacto que varia entre 150m/s e 300m/s, dependendo do material.

Pode ser usado em praticamente todos os metais dúteis. É aplicado no processo de revestimento (cladding) de chapas e internamente a tubos, podendo soldar materiais dissimilares, tais como titânio e aço, cobre e aço inoxidável e alumínio e aço.

2.2.12 - Soldagem por fricção

No processo de soldagem por fricção, uma parte rotacionada em alta velocidade é pressionada sobre a outra parte estacionária, gerando calor pelo atrito na interface. O calor amolece o material, que sob a ação da pressão forma a solda. Uma certa quantidade de material extrudado forma-se ao longo da interface, como consequência da pressão resultante do processo e do calor de contato (Figura 23). O processo é difícil de ser aplicado a materiais com baixo coeficiente de atrito, tais como bronzes e latões com mais de 0,3% de chumbo e em ferros fundidos, pois a grafita atua como lubrificante.

Como a soldagem por fricção ocorre sem a formação de fase líquida, é um processo adequado para materiais difíceis de serem soldados por meios convencionais a

arco, tais como as ligas de alumínio endurecíveis por precipitação. É capaz de soldar materiais dissimilares, apresenta baixa distorção, excelentes propriedades mecânicas, porosidade mínima, ausência de gases, baixo custo e o uso de equipamentos mecânicos simples e com menor consumo de energia.

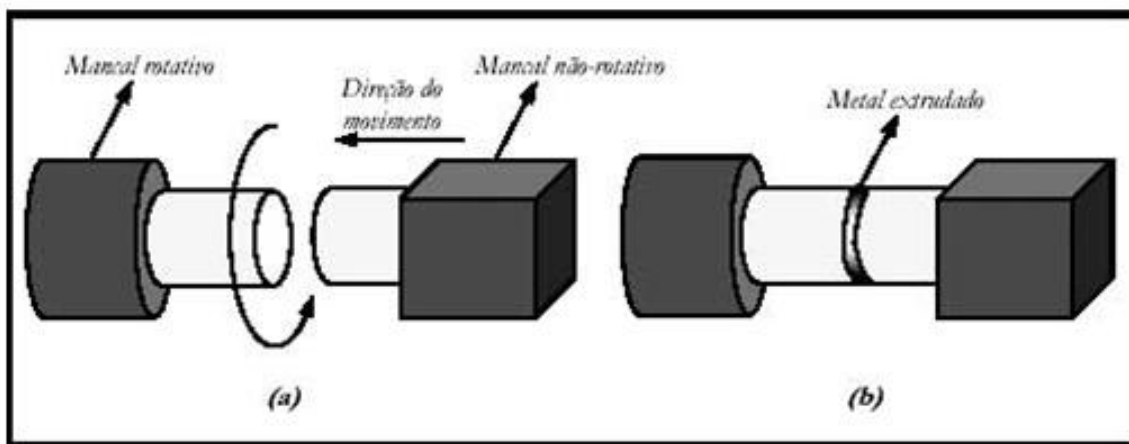


Figura 23 - Representação esquemática do processo de soldagem por fricção: (a) mancal aproximando-se e (b) após soldagem.

3 - BRASAGEM E SOLDABRASAGEM

O termo brasagem abrange um grupo de processos de união que produz a coalescência dos metais pelo aquecimento a uma temperatura adequada e pelo uso de metal de adição que tem ponto de fusão abaixo da temperatura “solidus” do metal de base. O metal de adição preenche a junta por ação capilar.

Se o ponto de fusão do metal de adição é superior a 450°C, o processo é chamado de brasagem (“brazing”) e, em caso contrário, é dito soldabrasagem (“soldering”) ou soldagem branca, fraca ou branda. Estes processos se distinguem da soldagem pelo fato de que, nestes processos, o metal de base nunca é levado à fusão.

Para a realização de uma junta brasada com boa qualidade, é necessário que haja um perfeito molhamento, das faces a serem unidas, pelo metal de adição fundido. Para isto, é imprescindível que o metal de base esteja metalicamente limpo, isto é, que as superfícies estejam completamente isentas de óxidos, graxas, etc. Esta limpeza normalmente é feita por decapagem química ou mecânica.

Os metais precisam ser protegidos durante o aquecimento por um fluxo ou atmosfera adequada. Os fluxos usados se fundem a temperaturas inferiores à

temperatura de fusão do metal de adição e atuam sobre as superfícies a serem unidas e áreas próximas, dissolvendo as camadas de óxido eventualmente formadas após a decapagem, permitindo assim, que o metal de adição possa fluir livremente sobre as superfícies a serem unidas e aderir ao metal de base.

A brasagem pode ser feita em atmosfera ativa, inerte ou sob vácuo, e o uso de atmosferas protetoras elimina a necessidade de limpeza após a operação, para eliminar da junta os materiais corrosivos dos fluxos.

As juntas brasadas são preenchidas por capilaridade e, para que este fenômeno ocorra de forma adequada, é necessário um controle rígido da distância de separação entre as peças. Se o espaçamento entre elas for muito pequeno, o preenchimento da junta é muito lento e pode ser apenas parcial. Espaçamentos exagerados também podem levar a tempos de preenchimento muito longos e à formação de bolhas de gás ou de inclusões de fluxo e óxidos. É recomendada uma folga na junta de 0,05 a 0,13 mm e o metal de adição deve apresentar boa fluidez. O aquecimento é normalmente realizado por chama ou em fornos de resistência ou por indução.

Os processos de brasagem podem ser classificados de acordo com os métodos de aquecimento usados. Em termos industriais, os mais importantes são a brasagem por chama, em forno, por indução, por resistência, por imersão e por infravermelho.

Na brasagem por chama, o aquecimento é feito com uma ou mais tochas. Dependendo da temperatura e da quantidade de calor requeridos, o gás combustível pode ser o acetileno, propano, gás de rua, etc. O metal de adição pode ser colocado previamente na junta ou alimentado manualmente, como na soldagem a gás. Para este processo, o uso de fluxo é essencial.

A brasagem em forno é muito usada quando o metal de adição pode ser colocado previamente na junta. Este processo é aplicável geralmente em produção em série e em grande escala. A proteção é feita por fluxo, por atmosfera controlada ou a vácuo.

Na brasagem por indução, o calor é obtido por uma corrente induzida nas peças a unir. Estas peças são colocadas no interior de uma bobina, na qual circula uma corrente alternada. É necessário um cuidadoso projeto da junta e da bobina para se garantir que as superfícies a serem brasadas atinjam ao mesmo tempo a temperatura de trabalho. O metal de adição é normalmente colocado com antecedência na junta e a proteção é feita por fluxo.

Na brasagem por resistência, o calor é obtido por efeito joule. O metal de adição também é colocado previamente na junta e a proteção é feita por fluxo ou atmosfera adequada.

A brasagem por imersão pode ser feita de duas maneiras: imersão em banho químico ou em metal fundido. No processo com imersão em banho químico, o metal de adição é colocado previamente na junta e o conjunto é imerso em um banho de sal fundido. O conjunto é aquecido por resistência elétrica. A proteção pode ser feita pelo próprio banho ou pelo uso de fluxo. Na brasagem por imersão em metal fundido, as partes a serem unidas são imersas em um banho fundido do metal de adição, contido em um recipiente adequado.

A brasagem por infravermelho é um processo que utiliza o calor emitido por fontes de radiação infravermelha, em geral lâmpadas.

A ligação entre o metal de adição e o metal de base se dá por difusão, com a formação de ligas intermetálicas na interface entre estes metais, e é sólida e resistente.

A brasagem tem grande aplicação industrial, principalmente para peças finas, para união de peças tratadas termicamente, para união de metais dissimilares, entre outras.

A escolha de um metal de adição para uma determinada operação de brasagem é crítica para se obter uma junta com características adequadas a uma dada aplicação. Esta escolha é feita em função do metal de base, do método de aquecimento, do desenho da junta e da proteção. Além disso, o metal de adição deve ter uma temperatura de fusão adequada, boa molhabilidade, boa fluidez e propriedades mecânicas compatíveis com a aplicação.

Uma característica importante das ligas de adição para brasagem é o seu intervalo de fusão. Metais puros e ligas eutéticas possuem temperaturas de fusão bem definidas. Já as demais ligas apresentam intervalos de fusão, isto é, as fases líquidas e sólidas coexistem numa determinada faixa de temperatura.

Outra consideração que deve ser levada em conta na escolha do metal de adição para brasagem é a possibilidade de interação metal de adição - metal de base (formação de compostos, difusão e solubilização), que depende fortemente do ciclo térmico de brasagem.

Os metais de adição para brasagem são classificados pelas normas AWS A 5.7-77 e A 5.8-81.

A brasagem é um processo atrativo na montagem de conjuntos em metais refratários, em particular, para seções finas.

Os metais de adição para solda-brasagem são, geralmente, à base de Cu e Zn. A junta solda-brasada pode estar sujeita à corrosão galvânica em certos ambientes e o metal de adição pode ser menos resistente que o metal de base em certas soluções químicas.

4 - FORMAÇÃO DE UMA JUNTA SOLDADA

De uma forma simplificada, uma peça metálica é formada por um grande número de átomos dispostos em um arranjo espacial característico (estrutura cristalina). Átomos localizados no interior desta estrutura são cercados por um número de vizinhos mais próximos, posicionados a uma distância r_0 , na qual a energia do sistema é mínima como mostra a Figura 24.

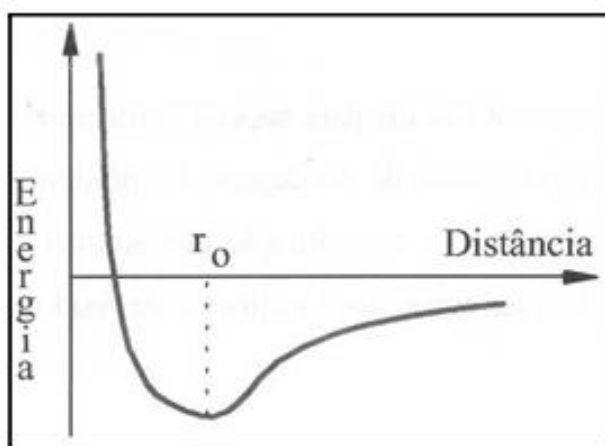


Figura 24 - Variação de energia potencial para um sistema composto de dois átomos em função da distância de separação entre eles.

Nesta situação, cada átomo está em sua condição de energia mínima, não tendendo a se ligar com nenhum átomo extra. Na superfície do sólido, contudo, esta situação não se mantém, pois os átomos estão ligados a menos vizinhos, possuindo, portanto, um maior nível de energia do que os átomos no seu interior. Esta energia pode ser reduzida quando os átomos superficiais se ligam a outros. Assim, aproximando-se duas peças metálicas a uma distância suficientemente pequena para a formação de uma ligação permanente, uma solda entre as peças seria formada, como ilustrado na Figura

25. Este tipo de efeito pode ser obtido, por exemplo, colocando-se em contato íntimo dois blocos de gelo.

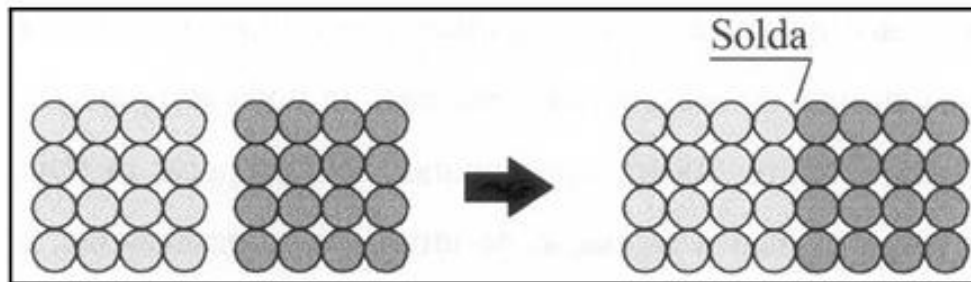


Figura 25 - Formação teórica de uma solda pela aproximação das superfícies das peças.

Entretanto, sabe-se que isto não ocorre para duas peças metálicas, exceto em condições muito especiais. A explicação para isto está na existência de obstáculos que impedem uma aproximação efetiva das superfícies até distâncias da ordem de r_0 . Estes obstáculos podem ser de dois tipos básicos:

- As superfícies metálicas, mesmo as mais polidas, apresentam uma grande rugosidade em escala microscópica e sub-microscópica .
Mesmo uma superfície com um acabamento cuidadoso apresenta irregularidades da ordem de 50 nm de altura, cerca de 200 camadas atômicas (Figura 26). Isto impede uma aproximação efetiva das superfícies, o que ocorre apenas em alguns poucos pontos de contato, de modo que o número de ligações formadas é insuficiente para garantir qualquer resistência para a junta.
- As superfícies metálicas estão normalmente recobertas por camadas de óxidos, umidade, gordura, poeira, etc, o que impede um contato real entre as superfícies, prevenindo a formação da solda. Estas camadas se formam rapidamente e resultam exatamente da existência de ligações químicas incompletas na superfície.

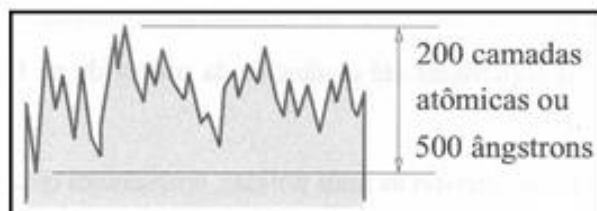


Figura 26 - Representação esquemática da superfície metálica limpa.

O segundo método se baseia na aplicação localizada de calor na região de união até a sua fusão e do metal de adição (quando este é utilizado), destruindo as

superfícies de contato e produzindo a união pela solidificação do metal fundido (Figura 27).

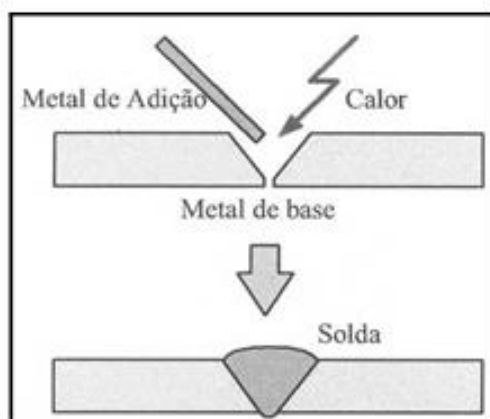


Figura 27 - Representação esquemática da soldagem por fusão.

Desta forma, uma forma de classificação dos processos de soldagem consiste em agrupá-los em dois grandes grupos baseando-se no método dominante para produzir a solda: (a) processos de soldagem por pressão (ou por deformação) e (b) processos de soldagem por fusão.

A Figura 28 mostra a macrografia de uma junta soldada por fusão, com chanfro em X.

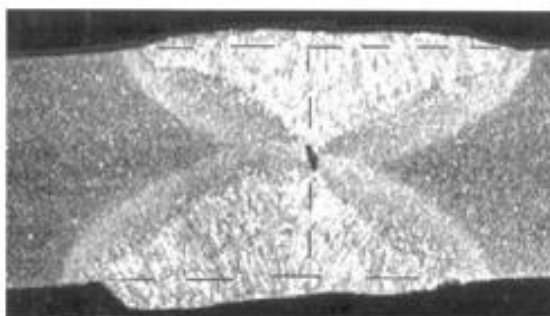


Figura 28 - Macrografia de uma junta soldada por fusão.

5 - TERMINOLOGIA E SIMBOLOGIA DE SOLDAGEM

A soldagem é uma operação que visa obter a união de peças, e solda é o resultado desta operação. Chama-se junta a região onde as peças serão unidas por soldagem. A Figura 29 mostra alguns tipos de junta.

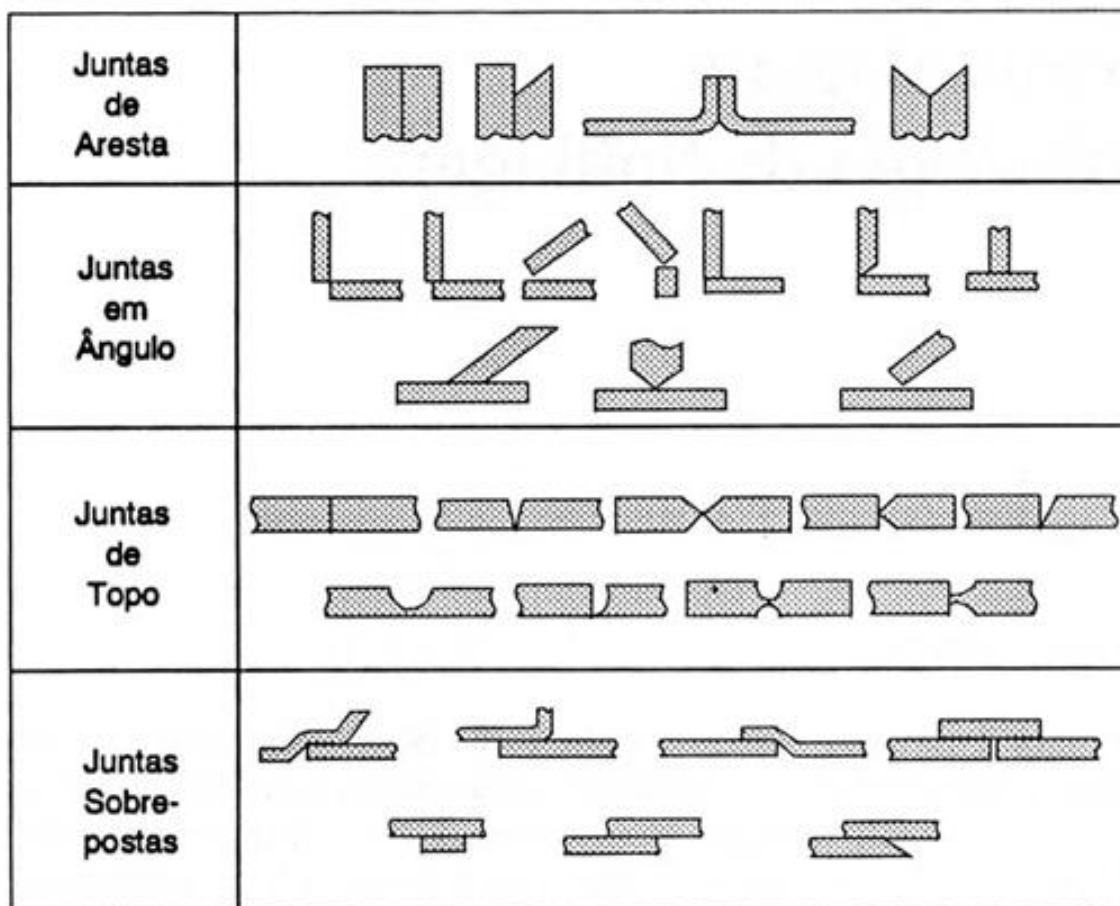


Figura 29 - Tipos de junta.

O posicionamento das peças para união determina os vários tipos de junta. Entretanto, muitas vezes, as dimensões das peças, a facilidade de se movê-las e necessidades do projeto exigem uma preparação das peças para soldagem, na forma de cortes ou conformação especial da junta. Estas aberturas ou sulcos na superfície da peça ou peças a serem unidas e que determinam o espaço para conter a solda recebem o nome de chanfro.

O tipo de chanfro a ser usado em uma soldagem específica é escolhido em função do processo de soldagem, espessura das peças, suas dimensões e facilidade de movê-las, facilidade de acesso à região da solda, etc. Os tipos de chanfros mais comuns usados em soldagem são mostrados na Figura 30 e suas características dimensionais são mostradas na Figura 31.

A Figura 32 mostra algumas dimensões e regiões importantes de uma solda de topo e de uma solda em ângulo (filete).

A posição da peça a ser soldada e do eixo da solda determinam a posição de soldagem, que pode ser plana, horizontal, vertical ou sobrecabeça. Estas são mostradas na Figura 33.

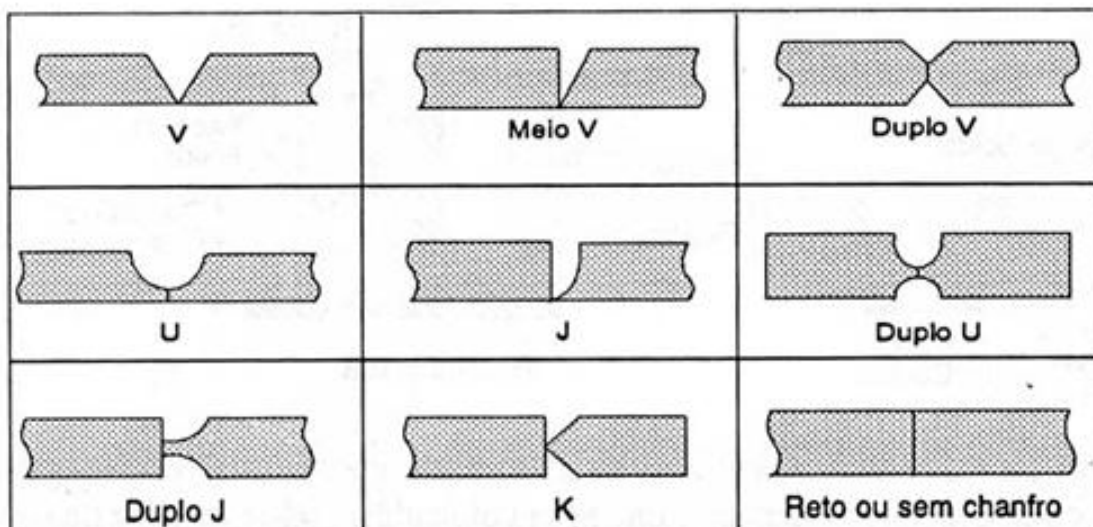


Figura 30 - Tipos de chanfro.

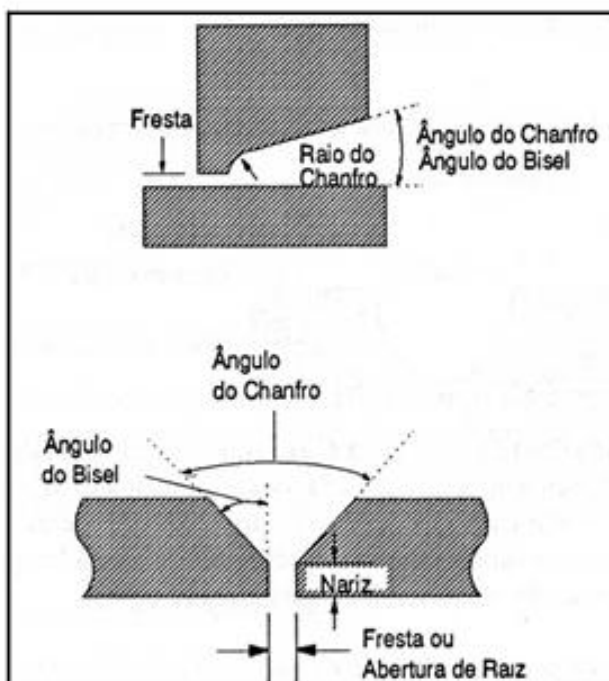


Figura 31 - Características dimensionais de chanfros usados em soldagem

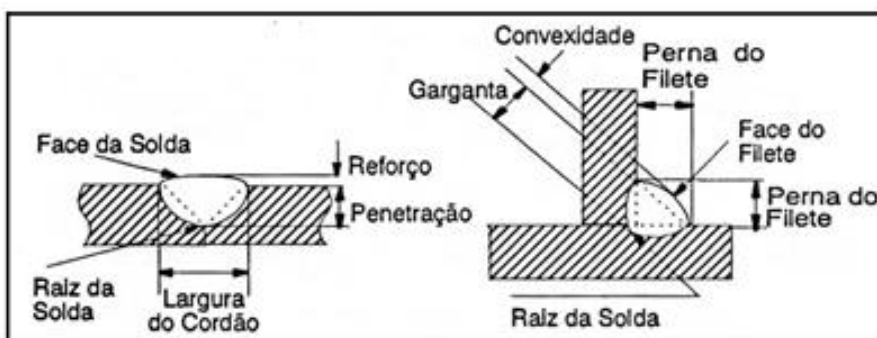


Figura 32 - Algumas dimensões e regiões de soldas de topo e filete

A simbologia de soldagem consiste de uma série de símbolos, sinais e números, dispostos de uma forma particular, que fornecem informações sobre uma determinada solda e/ou operação de soldagem. Estes elementos, que podem ou não ser usados numa situação particular, são, segundo a norma AWS A 2.4-86:

- a) Linha horizontal;
- b) Seta;
- c) Símbolo básico da solda;
- d) Dimensões e outros dados;
- e) Símbolos suplementares;
- f) Cauda;
- g) Especificação do processo de soldagem ou outra referência.

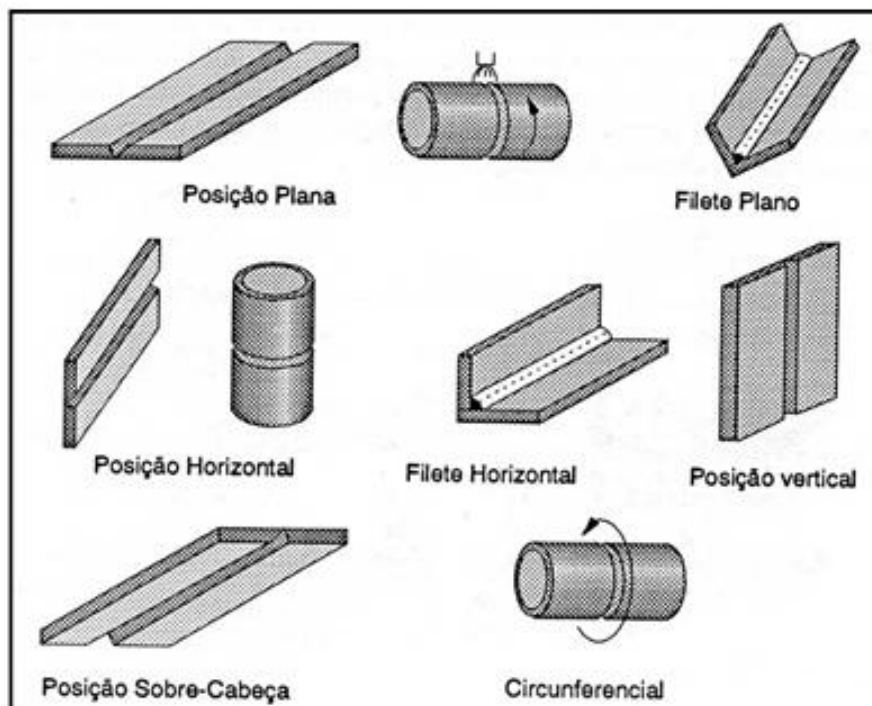


Figura 33 - Posições de soldagem

O elemento básico de um símbolo de soldagem é a linha de referência, colocada sempre na posição horizontal e próxima da junta a que se refere. Nesta linha são colocados os símbolos básicos da solda, símbolos suplementares e outros dados. A seta indica a junta na qual a solda será feita e na cauda são colocados os dados relativos ao processo, procedimento ou outra referência quanto à forma de execução da soldagem. A Figura 34 mostra a localização dos elementos de um símbolo de soldagem, onde:

- (a) Símbolo básico da solda;
- (b) Símbolos suplementares;

(c) Procedimento, processo ou referência;

(d) Símbolo de acabamento;

A, E, L, N, P, R, S - Números que representam dimensões e outros dados; A

- ângulo do chanfro;

E - garganta efetiva;

L - comprimento da solda;

N - número de soldas por projeção ou por pontos;

P - distância centro a centro de soldas intermitentes; R

- abertura de raiz;

S - tamanho da solda.

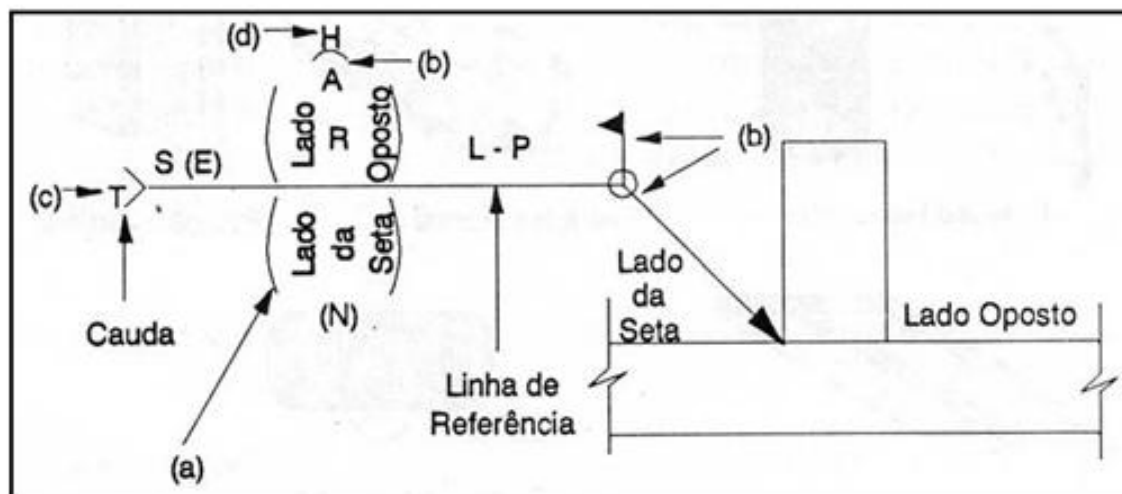


Figura 34 - Localização dos elementos de um símbolo de soldagem.

O símbolo básico indica o tipo de solda desejado. Existem oito tipos básicos de solda e quinze símbolos básicos, segundo a norma AWS A 2.4-86 ilustrados respectivamente na Figuras 35 e 36.

Cada símbolo básico é uma representação esquemática da seção transversal da solda a que se refere. Se o símbolo básico é colocado sob a linha de referência, a solda deve ser feita do mesmo lado em que se encontra a seta. Caso o símbolo esteja sobre a linha de referência, a solda deve ser realizada do lado oposto à seta. Mais de um símbolo básico pode ser usado de um ou dois lados da linha de referência.

Vários números, que correspondem às dimensões ou outros dados da solda, são colocados em posições específicas em relação ao símbolo básico. O tamanho da solda e/ou sua garganta efetiva são colocados à esquerda do símbolo. Em soldas em chanfro, se estes números não são colocados, subentende-se que a penetração deve ser total. A abertura de raiz ou a profundidade de soldas do tipo “plug” ou “slot” é colocada

diretamente dentro do símbolo básico da solda. À direita do símbolo podem ser colocados o comprimento da solda e a distância entre os centros dos cordões, no caso de soldas intermitentes.

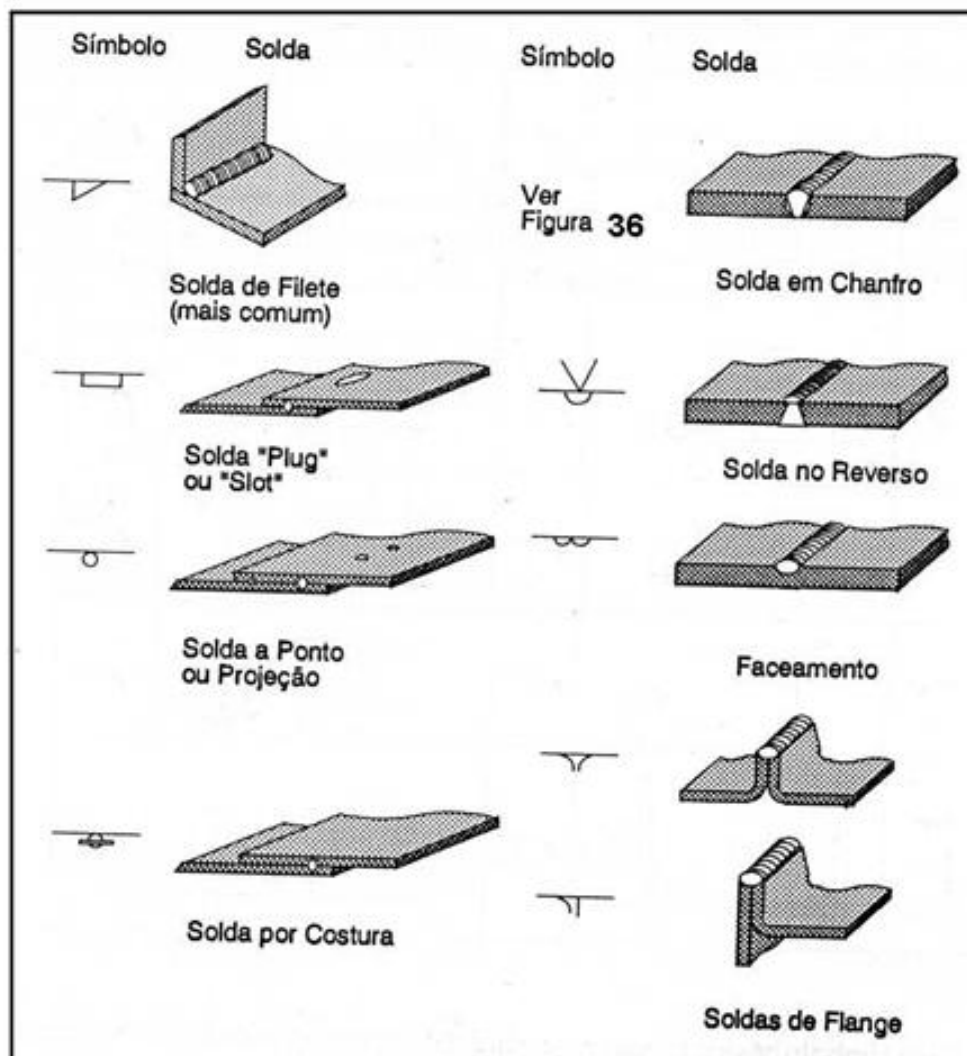


Figura 35 - Tipos básicos de soldas e seus símbolos.

Os símbolos suplementares são usados em posições específicas do símbolo de soldagem, quando necessários. Estes símbolos são mostrados na Figura 37. Além destes, existem símbolos de acabamento, que indicam o método de acabamento da superfície de solda. Estes símbolos são:

- C - rebarbamento;
- G - esmerilhamento;
- M - usinagem;
- R - laminação;
- H - martelamento.

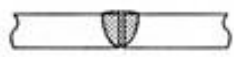
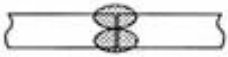
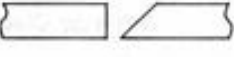
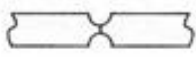
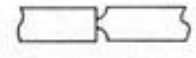
I				
V				
$\frac{1}{2} V$				
U				
J				
"Flare" V				
"Flare" $\frac{1}{2} V$				

Figura 36 - Sete variações de soldas em chanfro e seus símbolos.

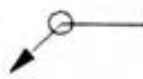
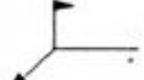
Soldar em todo o Contorno	Solda de Campo	Fusão no Reverso	Contorno da Solda		
			Plano	Convexo	Côncavo
					

Figura 37 - Símbolos suplementares.

6 - METALURGIA DA SOLDAGEM

Em geral os processos de soldagem tem como principal fonte de energia o calor, tornando-se uma fonte potencial de problemas, tendo influência direta nas transformações metalúrgicas e nos fenômenos mecânicos que ocorrem na zona da solda.

No estudo da transferência de calor em juntas soldadas devem ser considerados os seguintes fatores:

- aporte de calor ou de energia (insumo de calor ou energia);
- rendimento térmico do arco elétrico;
- distribuição e picos de temperatura (ciclo térmico) durante a soldagem;
- tempo de permanência nessas temperaturas;
- velocidade de resfriamento da zona da solda.

A maioria dos processos de soldagem por fusão é caracterizada 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 $10^3 \text{ }^\circ\text{C/mm}$), variações bruscas de temperatura (de até $10^3 \text{ }^\circ\text{C/s}$) e, conseqüentemente, extensas variações de microestrutura e propriedades, em um pequeno volume de material.

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

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

$$E = \eta \cdot V \cdot I / v, \text{ onde}$$

E = energia de soldagem, em J/mm; η
= eficiência térmica do processo; V =
tensão no arco, em V;
 I = corrente de soldagem, em A, e
 v = velocidade de soldagem, em mm/s.

A energia de soldagem é uma medida da quantidade de calor cedida à peça por unidade de comprimento da solda como mostrado na Figura 38.

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 à passagem da fonte de calor, como mostra a Figura 39. Esta curva é chamada de “ciclo térmico de soldagem”.

São características importantes do ciclo térmico de soldagem:

a - Temperatura de pico (T_p), temperatura máxima atingida no ponto. T_p diminui com a distância ao centro da solda, e indica a extensão das regiões afetadas pelo calor de soldagem;

b - Tempo de permanência (t_p) acima de uma temperatura crítica, tempo em que o ponto fica submetido a temperaturas superiores a uma temperatura mínima para ocorrer uma alteração de interesse, chamada temperatura crítica (T_c);

c - Velocidade de resfriamento, definida pelo valor da velocidade de resfriamento a uma determinada temperatura T , ou pelo tempo necessário (Δt) para o ponto resfriar de uma temperatura (T_1) a outra (T_2).

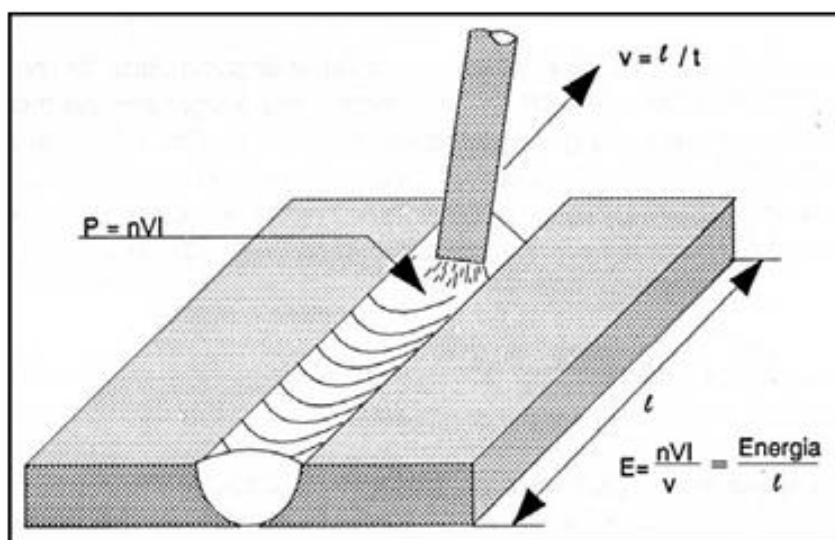


Figura 38 - Conceito de energia de soldagem. P é a potência dissipada no arco ($V.I$), ($n.V.I$) é a potência cedida à peça e I é o comprimento da solda.

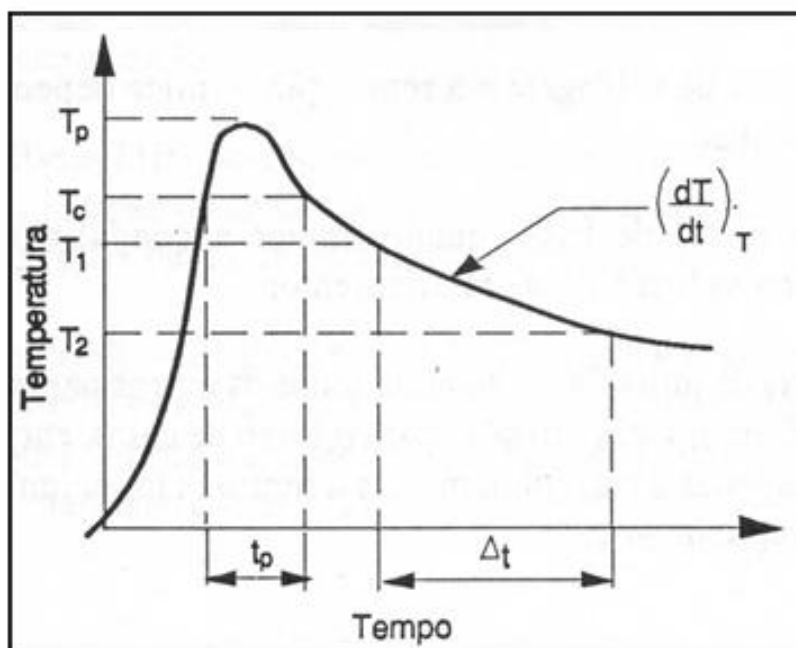


Figura 39 - Ciclo térmico de soldagem (esquemático).

A Figura 40 mostra a variação da temperatura de pico com a distância ao centro do cordão de solda, na direção perpendicular a este. Esta curva é conhecida como “repartição térmica”.

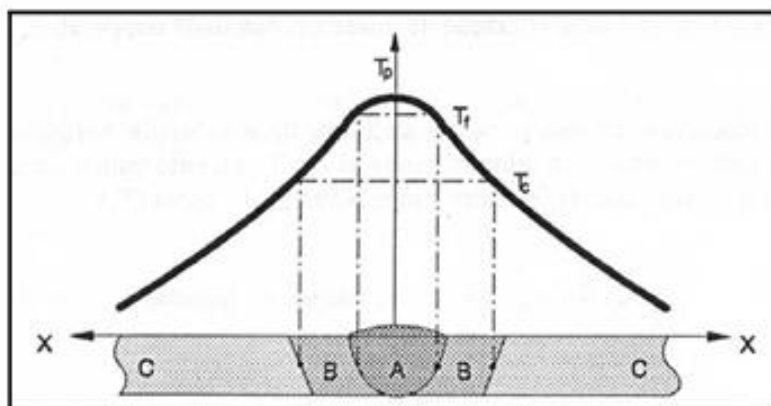


Figura 40 - Repartição térmica em uma solda (esquemática). A - ZF, B - ZTA e C - Metal de Base.

Os ciclos térmicos de soldagem e a repartição térmica dependem de diversas variáveis, entre elas:

a - Tipo de metal de base: quanto maior a condutividade térmica do material, maior a velocidade de resfriamento;

b - Geometria da junta: 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, como mostra a Figura 41; logo, juntas em T tendem a esfriar mais rapidamente;

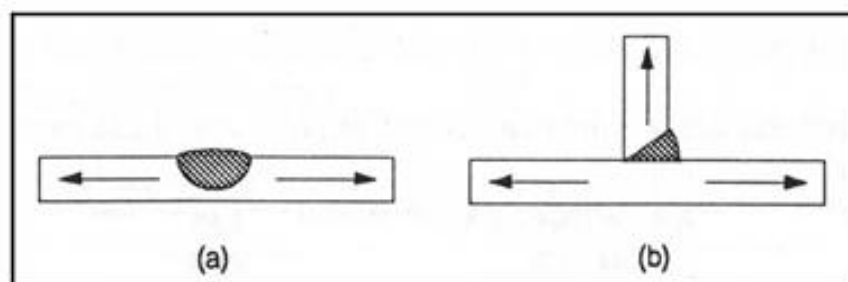


Figura 41 - Direções para escoamento do calor em juntas (a) de topo e (b) em T.

c - 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;

d - Energia de soldagem e temperatura inicial da peça: a velocidade de resfriamento diminui com o aumento destes dois parâmetros a repartição térmica tornase mais larga.

6.1 - Macroestrutura de Soldas por Fusão

As Figura 40 e 42 mostram que uma solda por fusão apresenta três regiões básicas:

a - 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 à temperatura de fusão do metal (T_f);

b - Zona Termicamente Afetada ou Zona Termicamente Alterada (ZTA) ou ainda Zona Afetada pelo Calor (ZAC): região não fundida do metal de 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;

c - 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.

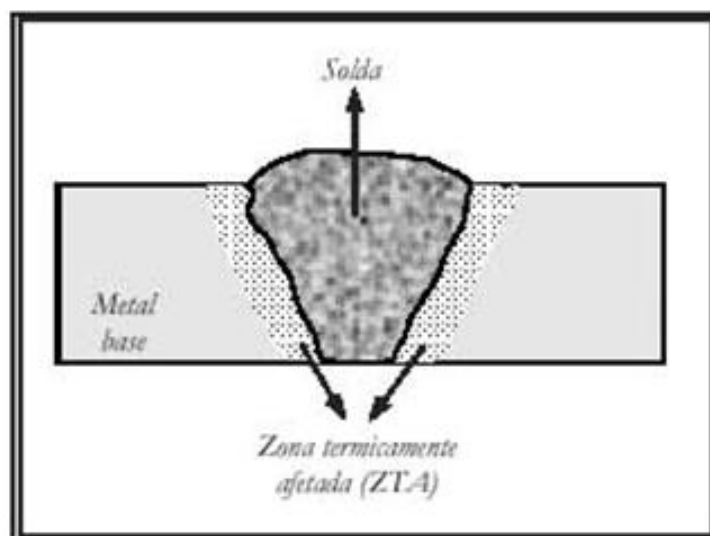


Figura 42 - Seção transversal da região de uma solda obtida por processos que envolvem a fusão parcial do material base.

Alguns autores ainda consideram a presença de uma quarta região, compreendida entre a solda e a ZTA, denominada zona de ligação ou transição.

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. A Figura 43 mostra esquematicamente estas alterações na soldagem de um aço doce, para um ponto situado na zona fundida.

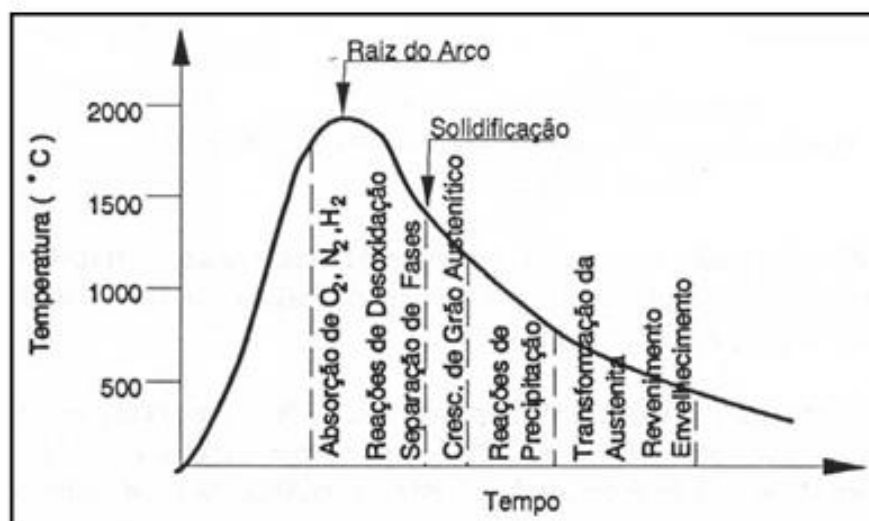


Figura 43 - Diagrama esquemático mostrando diferentes alterações que ocorrem em um ponto na zona fundida da solda de um aço doce.

6.2 - Características da Zona Fundida

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 $2.000^{\circ}C$, no caso de 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 de 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 escória ou vice-versa e a volatilização de elementos com maior pressão de vapor (por exemplo, Zn, Cd, Cr e Al).

A composição química final da ZF depende da intensidade destas interações, das composições químicas do metal de base e da 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 da seção transversal de soldas, como mostra a Figura 44. Seu valor pode variar entre 100% (soldas sem metal de adição) e 0% (brasagem).

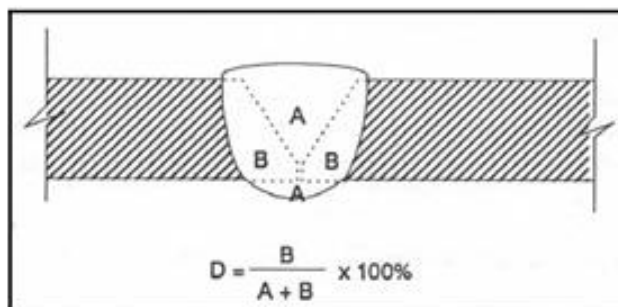


Figura 44 - Diluição medida na seção transversal de uma solda.

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 tenham altos teores de elementos prejudiciais à zona fundida, como o carbono e o enxofre.

Na parte posterior da poça de fusão, a temperatura cai até a temperatura de início da 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 o hidrogênio e o nitrogênio, devido à redução de sua solubilidade com a queda de temperatura e a solidificação, como mostra a Figura 45. A evolução destes gases pode gerar porosidades na solda.

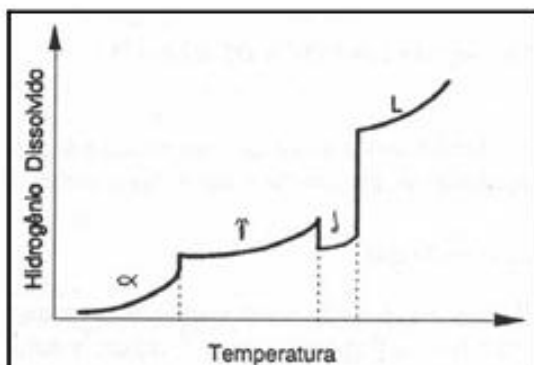


Figura 45 - Variação da solubilidade do hidrogênio no ferro (esquemático).

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 arco), que pode causar porosidades; um sólido ou um líquido insolúvel na poça que, se for capturado pela frente de solidificação, resultará 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 escórias) e das composições do metal de base e de adição, em particular, da presença de desoxidantes.

Por exemplo, 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 óxidos básicos na composição do fluxo, como mostra a Figura 46.

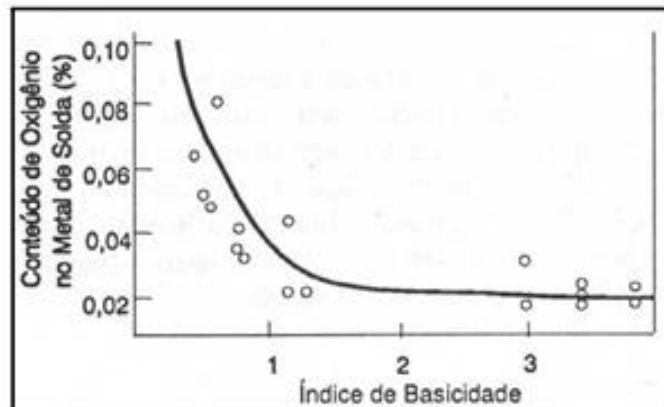


Figura 46 - Efeito da basicidade da escória no teor de oxigênio da zona fundida.

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

A formação de novos grãos não é um evento comum 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.

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 parar de crescer. Este fenômeno ocorre em soldagem e pode ser responsável por um certo grau de anisotropia da ZF.

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 microestruturas, propriedades e mesmo problemas de fissuração, particularmente no centro do cordão.

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

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 zona fundida dependerão de sua estrutura final, incluindo as microestruturas de solidificação e a secundária, e a presença de descontinuidades.

6.3 - Microconstituintes do Metal de Solda de Aços Ferríticos

Os microconstituintes do metal de solda de aços ferríticos, utilizando microscopia ótica, podem se classificar, segundo o International Institute of Welding (IIW), em:

- Ferrita primária => ferrita poligonal de contorno de grão e ferrita poligonal intragranular;
- Ferrita acicular;
- Ferrita com segunda fase => ferrita com segunda fase alinhada, ferrita de Widmanstätten (side plate), bainita, bainita inferior, bainita superior, ferrita com segunda fase não alinhada;
- Agregado ferrita carboneto;
- Martensita.

A Figura 47 mostra uma microestrutura de um metal de solda ferrítico com ferrita acicular (região mais escura) e ferrita poligonal (região mais clara).

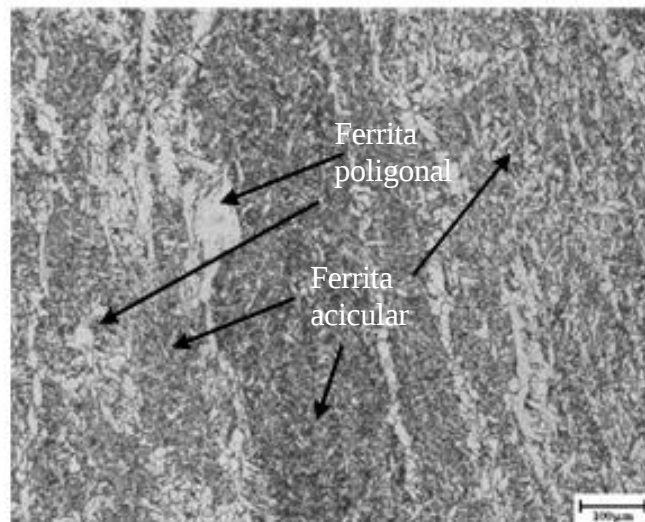


Figura 47 - Micrografia de um metal de solda ferrítico mostrando ferrita acicular (região mais escura) e ferrita poligonal (região mais clara).

6.4 - Características da Zona Termicamente Afetada

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 está sendo soldado, os efeitos do ciclo térmico poderão ser os mais variados. No caso de metais não transformáveis (por exemplo, o alumínio), a mudança estrutural mais marcante será o crescimento de grão.

Em metais transformáveis, a ZTA será mais complexa. No caso dos aços carbono e aços baixa-liga, esta apresentará diversas regiões características (Figura 48).

Ao contrário do que ocorre com o metal de solda, não se pode alterar a composição química da zona termicamente afetada. É necessário empregar-se aços com teores de carbono e de elementos de liga tais que as propriedades mecânicas de projeto sejam obtidas.

Na região mais próxima da solda ocorre um crescimento de grãos. Este crescimento dependerá do tipo de aço e da energia de soldagem. A estrutura final de transformação dependerá do teor de carbono e de elementos de liga em geral, do tamanho de grão austenítico e da velocidade de resfriamento.

A região de crescimento de grão (região a), 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 austenítica 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 austenítico e da velocidade de resfriamento. Aumentando-se qualquer um destes fatores a temperabilidade da região aumentará. De um modo geral, esta região é caracterizada por uma estrutura grosseira, com placas de ferrita (estrutura de Widmanstätten), 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.

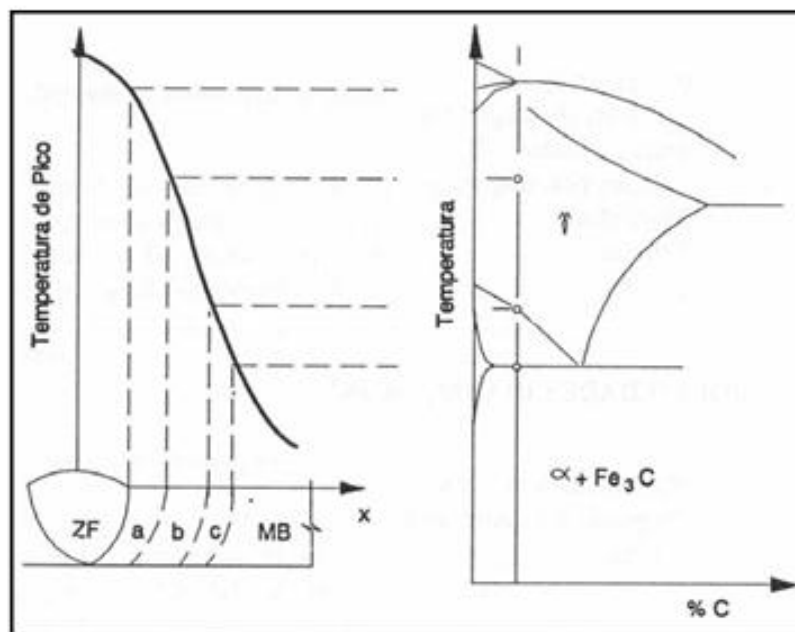


Figura 48 - Estrutura da ZTA de aços carbono (esquemática).

A região b é a região de refino de grão. Compreende a porção da junta aquecida a temperaturas comumente utilizadas na normalização dos aços (900 a 1.000°C). Após o processo de soldagem, esta região é caracterizada, geralmente, por uma estrutura fina de ferrita e perlita, não sendo problemática na maioria dos casos.

A região c é a região intercrítica. Nesta região, a temperatura de pico varia entre 727°C e a linha divisória entre as fases austenita e austenita mais ferrita, 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 menos perceptíveis.

A Figura 49 mostra, esquematicamente, a microestrutura da Zona Termicamente Afetada, com suas respectivas faixas de temperatura.

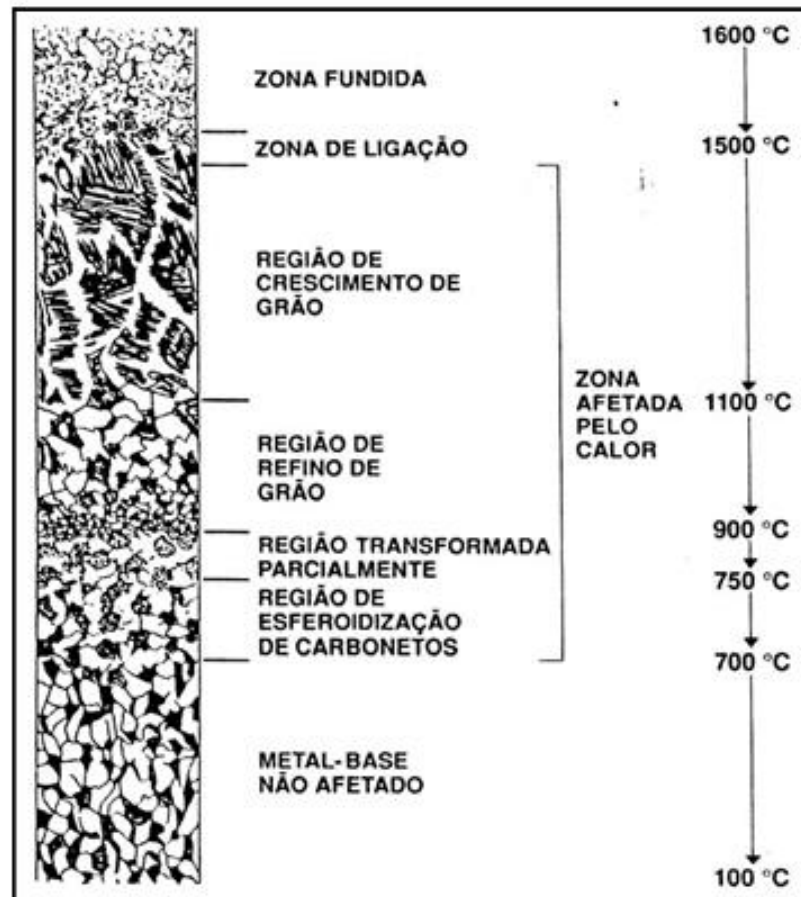


Figura 49 - Microestrutura da ZTA, esquemática.

7 - RESISTÊNCIA ESTRUTURAL DA JUNTA SOLDADA

7.1 - Resistência Estática da Junta Soldada

7.1.1 - Propriedades de tração

As propriedades de tração de uma junta soldada são funções das propriedades mecânicas do metal base, da zona termicamente afetada, bem como do metal depositado e ainda das características dinâmicas da junta, as quais variam de acordo com a geometria da junta e o nível de tensões nela atuantes.

As propriedades de tração são governadas pelo mais crítico dos fatores acima mencionados.

Dois corpos de prova são preparados para ensaios de tração da junta soldada conforme é mostrado na Figura 50. Um dos corpos de prova é retirado no sentido longitudinal e inclui a junta da solda; o outro é retirado de modo que o cordão de solda

se posicione perpendicularmente ao eixo longitudinal do corpo de prova, e também inclui a junta soldada. O limite de ruptura e o alongamento são determinados pelo ensaio dos dois corpos de prova.

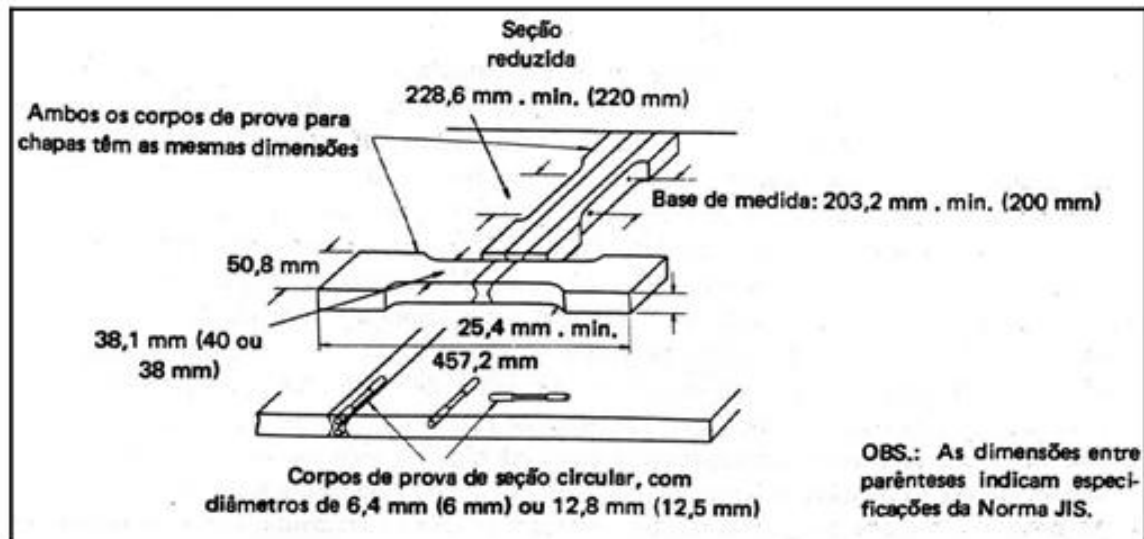


Figura 50 - Corpos de prova típicos para ensaios de tração utilizados em soldagem (segundo a AWS).

O ensaio é efetuado do modo convencional, solicitando-se gradualmente os corpos de prova, até o seu rompimento, e o limite de ruptura, σ , é determinado, dividindo-se a carga de ruptura, P , pela área seccional original, S_0 , do corpo de prova em consideração, ou seja, antes de ser submetido ao ensaio. Desta forma:

$$\sigma = \frac{P}{S_0} (\text{kg} / \text{mm}^2)$$

A Figura 51 mostra um diagrama tensão-deformação típico de um corpo de prova cilíndrico de aço doce, quando este é submetido ao ensaio de tração. O ponto P representa o limite de proporcionalidade do material, ou seja, até este ponto, as tensões crescem linearmente com as deformações, segundo a lei de Hooke.

O ponto E representa o limite de elasticidade do material, isto é, se o corpo de prova for carregado até este ponto e, em seguida, aliviado, não permanecerá qualquer deformação plástica permanente, revelando, portanto, o comportamento elástico do material até aquele ponto.

Nos ensaios convencionais de tração, este ponto é de difícil determinação, de modo que se convencionou estipular o valor da tensão correspondente a uma deformação de 0,005 a 0,01 % como sendo o limite de elasticidade do material.

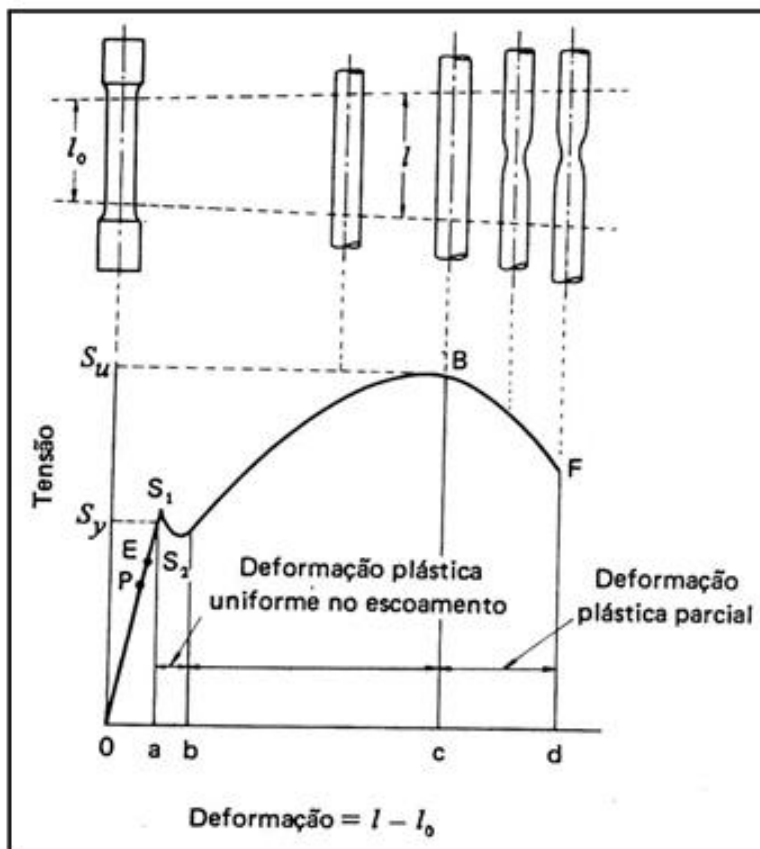


Figura 51 - Curva tensão-deformação real.

O ponto S_1 , por sua vez, é o valor máximo de tensão que se atinge antes de iniciar o escoamento, ou seja, quando ocorre um aumento radical da deformação, e se caracteriza pelo fato da tensão se manter constante ou sofrer uma rápida queda em sua velocidade de crescimento. Ao ponto S_1 dá-se o nome de limite de escoamento ou limite superior de escoamento.

Ao ponto S_2 , a partir do qual as tensões começam a crescer novamente, com correspondente aumento de deformações, dá-se o nome de limite inferior de escoamento.

Em alguns materiais, é bastante difícil distinguir os pontos citados em um diagrama tensão-deformação, obtidos através de ensaios de tração. Neste caso, é comum especificar-se, para os materiais em questão, um limite de escoamento convencional, que é definido como a tensão correspondente a uma deformação de 0,2%, conforme é indicado na Figura 52.

- A ductilidade do material também é estimada através da medida da elongação obtida no ensaio de tração, medida esta que é efetuada entre os pontos de referência, marcados sobre a parte útil do corpo de prova, conforme é mostrado na Figura 53.

A elongação é calculada pela seguinte expressão:

$$\varepsilon = \frac{l_f - l_0}{l_0} \times 100(\%),$$

em que l_0 - comprimento-base de referência;

l_f - comprimento entre os pontos de referência, após a ruptura do corpo de prova.

No caso de corpos de prova circulares, também é possível estimar a ductilidade do material por meio de redução da área que ocorre durante o ensaio de tração. A redução da área é expressa em porcentagem da área original do corpo de prova, segundo a equação:

$$RA = \frac{S_0 - S_f}{S_0} \times 100(\%),$$

em que S_0 - área da seção transversal original do corpo de prova;

S_f - área da seção transversal do corpo de prova, após sua ruptura.

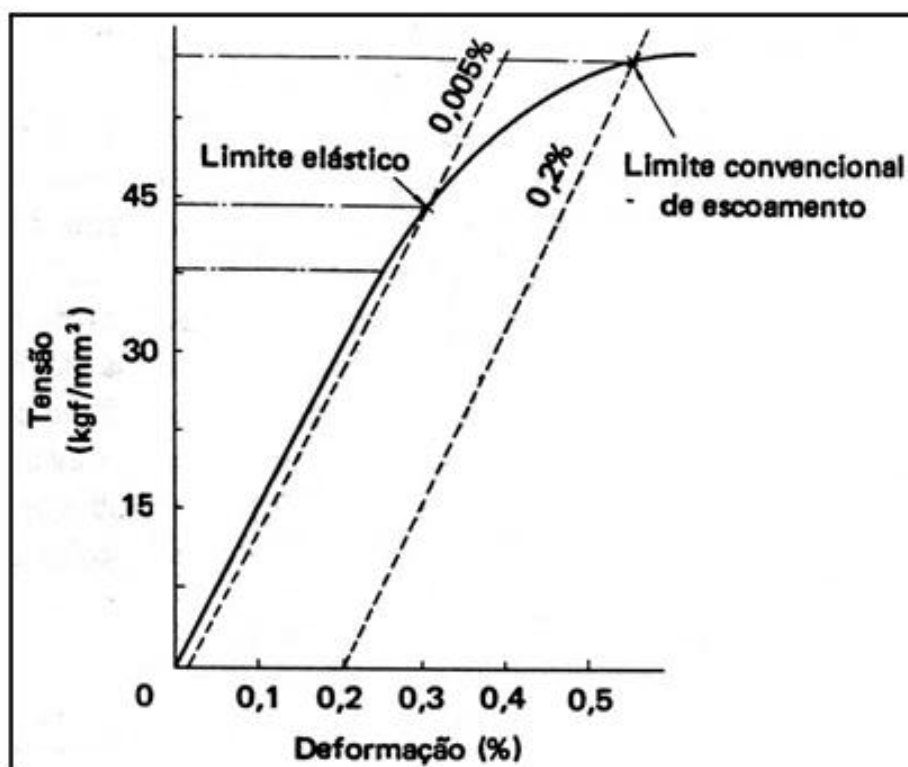


Figura 52 - Limite elástico e limite convencional de escoamento.

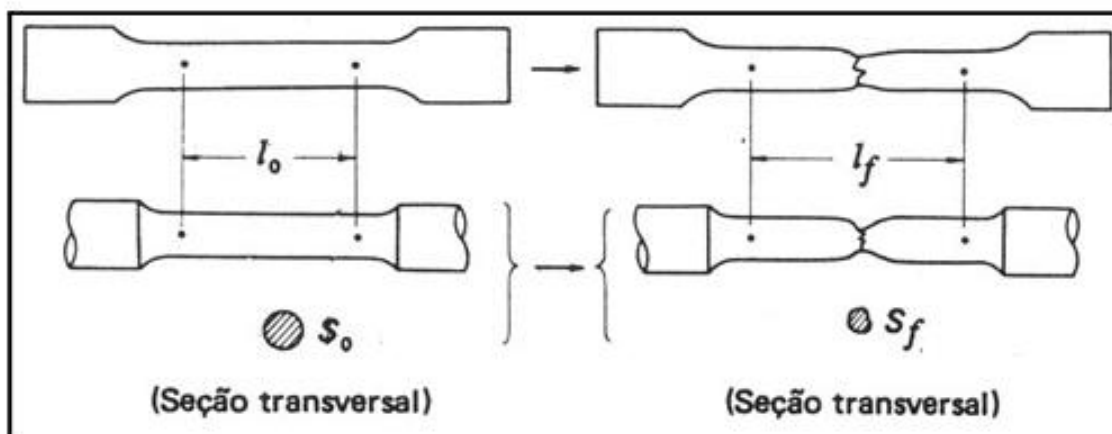


Figura 53 - Fratura de corpos de prova para ensaio de tração.

7.1.2 - Resistência do metal depositado

Em juntas soldadas de aços estruturais, a resistência à tração e a ductilidade do metal depositado são, em geral, superiores às do metal base, desde que o processo de soldagem e os materiais de consumo sejam os recomendados e a junta não apresente defeitos considerados condenáveis.

A elongação e a ductilidade do metal depositado variam com o processo de soldagem e o material de consumo utilizado. Dessa forma, estes dois parâmetros deverão ser selecionados de acordo com o procedimento de soldagem e as propriedades do material a ser soldado.

A resistência do metal depositado também varia de acordo com a localização na junta soldada, de maneira que é muito importante especificar de onde será retirado o corpo de prova, para a realização do ensaio de tração. A Tabela 17 mostra os valores das propriedades mecânicas do metal depositado com eletrodos revestidos de aço doce, tomando-se como parâmetro o tipo de revestimento.

Tabela 17 - Exemplos de propriedades mecânicas específicas para metais depositados de eletrodos revestidos para aço doce.

<i>Classificação do Eletrodo</i>	<i>Tipo de Revestimento</i>	<i>Limite de Ruptura (kgf/mm²)</i>	<i>Limite de Escoamento (kgf/mm²)</i>	<i>Elongação (%)</i>	<i>Energia Absorvida no Ensaio Charpy-V, a 0°C (kgf · m)</i>
D4301	Ilmenítico	43	35	22	4,8
D4303	Cal-titânio	43	35	22	2,8
D4311	Celulósico, com potássio	43	35	22	2,8
D4313	Rutílico, com potássio	43	35	17	—
D4316	Básico, com potássio	43	35	25	4,8
D4324	Rutílico, com pó de ferro	43	35	17	—
D4326	Básico, com potássio	43	35	25	4,8
D4327	Ácido, com pó de ferro	43	35	25	2,8
D4340	Ácido	43	35	22	2,8

7.1.3 - Propriedades de tração de juntas de topo

A resistência à tração de juntas de topo pode ser considerada, nos casos gerais, equivalente à do metal base, desde que os materiais e o processo de soldagem sejam os recomendados para cada caso considerado.

Na prática, uma junta de topo é executada por meio de vários passes, de modo que o cordão final tenha uma saliência em relação à superfície do metal base, denominada reforço do cordão ou da solda. A altura do reforço não deve exceder 3 mm (Figura 54).

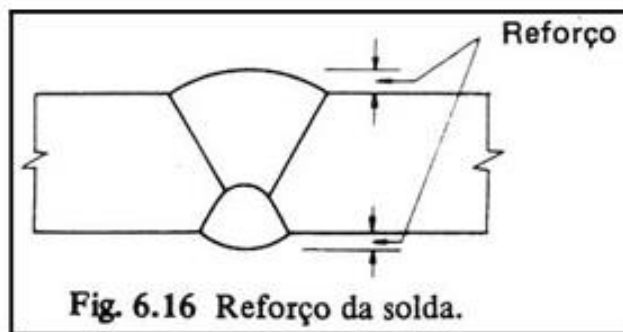


Figura 54 - Reforço da solda.

A transição entre o reforço e o metal base, denominada pé da solda, forma uma descontinuidade de forma, o que pode dar origem à concentração de tensões. A intensidade desta concentração depende do formato de pé do cordão e da existência de mordeduras causadas pelo manuseio inadequado do eletrodo. Se o formato do cordão for suave, o grau de concentração de tensões é da ordem de 1,3 a 1,8 vezes a tensão superficial atuante, conforme é mostrado na Figura 55.

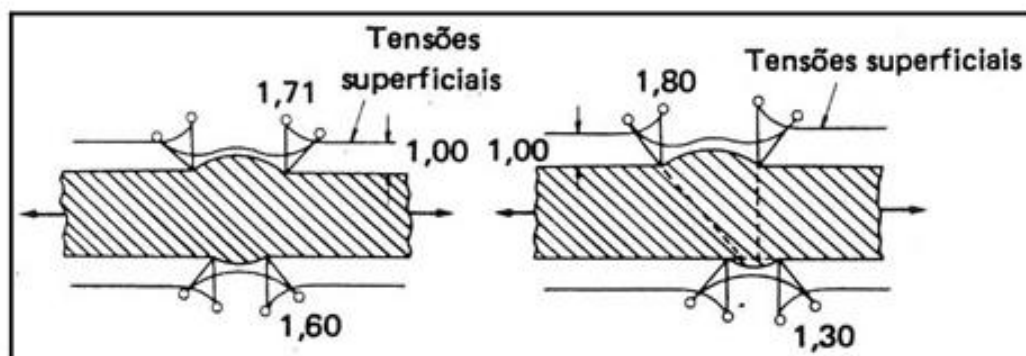


Figura 55 - Concentração de tensões em juntas de topo.

Uma pequena concentração de tensões ou tensões residuais na área adjacente à junta de solda pouco afeta a resistência da junta de topo. Entretanto, a presença de trincas no metal depositado diminui consideravelmente a resistência à tração da junta soldada, o mesmo não acontecendo no caso de porosidades, que têm seu efeito menor sobre a resistência da junta.

7.1.4 - Juntas soldadas com filetes de solda

O cordão de solda conhecido por filete é empregado em juntas em T, juntas de canto, juntas com talas de reforço, juntas em cruz, entre outras, sendo dividido em três grupos principais, conforme é mostrado na Figura 56, de acordo com o ângulo formado entre as direções do filete de solda e das tensões atuantes.

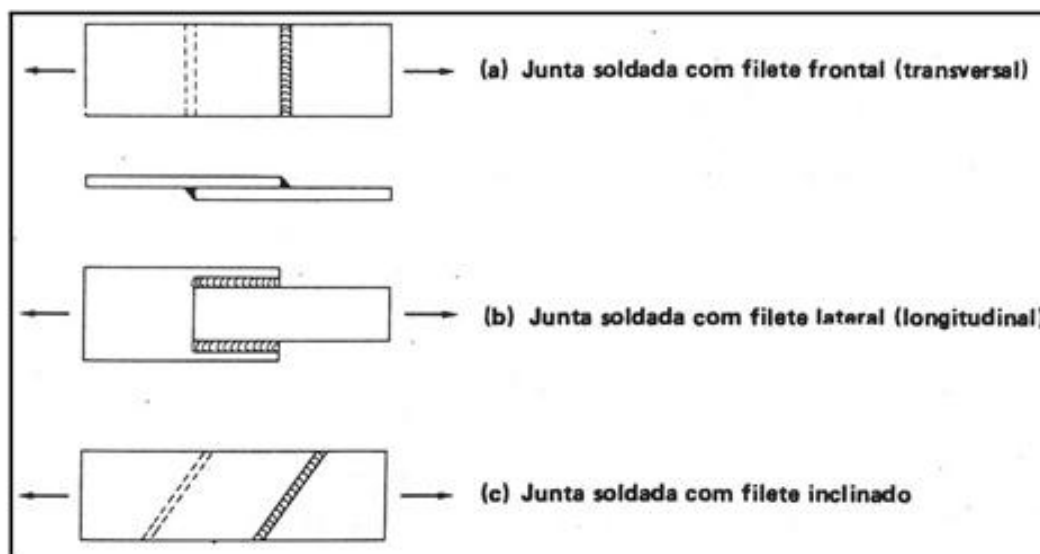


Figura 56 - Tipos de juntas superpostas com filete.

A distribuição de tensões em um filete de solda é bem mais complexa do que em uma junta de topo, devido ao seu formato, e uma concentração de tensões de alta intensidade pode ocorrer na raiz ou no pé da solda. O fator de concentração de tensões pode atingir valores da ordem de 6 a 8 na raiz e de 2 a 6 no pé do filete de solda.

A resistência à tração de uma junta soldada por meio de filetes é definida como sendo a carga que ocasiona a ruptura da garganta da seção transversal do filete, e é expressa, sob a forma de tensão, pela equação:

$$\sigma = \frac{P}{h_t l} = 1,414 \frac{P}{h l n} \text{ (kg / mm }^2 \text{) ,}$$

em que P - carga de ruptura do filete (kg);

l - comprimento efetivo da solda;

n - número de filetes efetivos;

h_t - garganta teórica do filete;

h - altura do filete.

As dimensões h_t e h estão representadas na Figura 57.

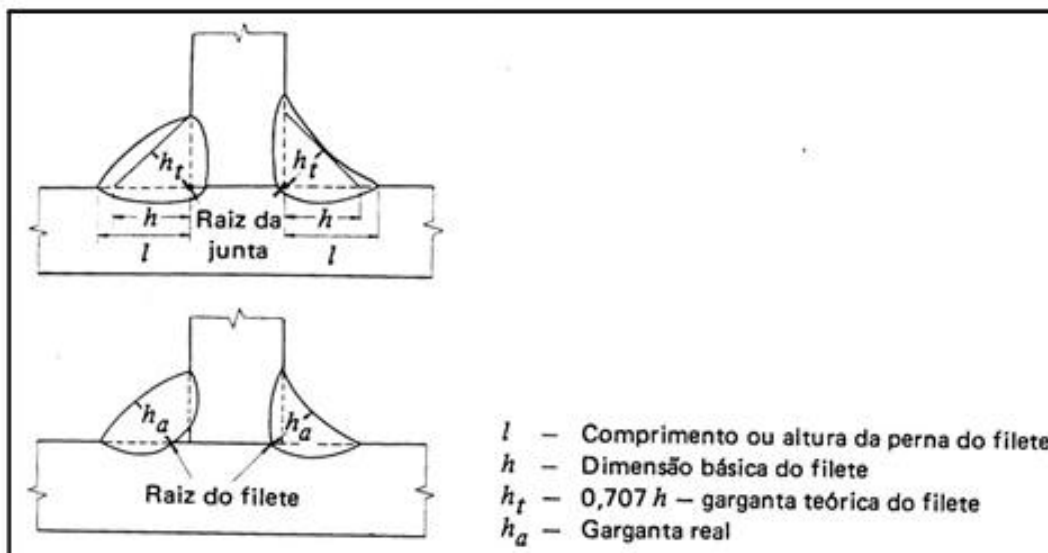


Figura 57 - Dimensões básicas no filete de solda.

Os resultados dos ensaios de tração dependem de vários fatores, como profundidade de penetração, a altura do reforço e o comprimento da perna do filete, ao contrário das juntas de topo, que apresentam uma uniformidade maior nos resultados dos ensaios, uma vez que o reforço é usinado na confecção dos corpos de prova.

A resistência à tração das juntas de filete, geralmente, diminui com o aumento da espessura da garganta, pois há uma tendência das deformações se concentrarem na raiz da solda.

Experiências conduzidas por Van der EB demonstraram que a resistência de uma junta de filete, com 4 mm de garganta, reduzia-se a 78,5% de seu valor original, quando a garganta era aumentada para 9 mm.

De acordo com proposição do IIW, haveria uma redução de 4% na resistência de juntas de filete para cada aumento de 1 mm na altura da garganta, tomando-se como base o filete de 5 mm, limitada, porém, a um máximo de 20%.

7.2 - Tenacidade da Junta Soldada

A resistência do material a carregamentos estáticos é, em geral, bastante diferente do seu comportamento em relação a solicitações dinâmicas.

Costuma-se denominar tenacidade à capacidade do material absorver um considerável nível de energia, antes de se romper. Uma noção errônea, bastante

difundida, é a de que quanto maior a resistência à ruptura do material, maior será sua tenacidade. Mesmo que dois materiais apresentem o mesmo valor de limite de ruptura, suas tenacidades poderão variar consideravelmente, em função de sua composição química.

Uma avaliação quantitativa da tenacidade dos materiais pode ser efetuada pela energia absorvida pelos corpos de prova durante a realização dos ensaios de impacto, conforme é ilustrado na Figura 58.

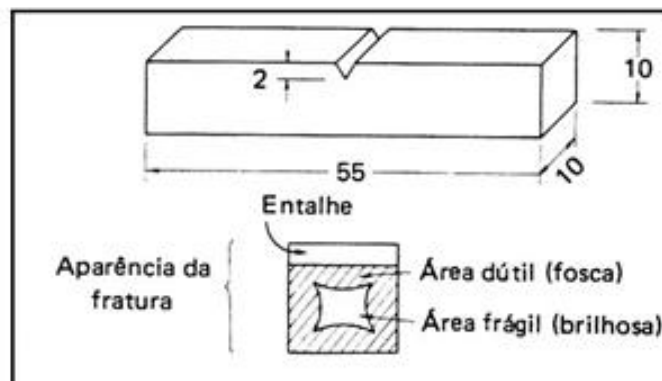


Figura 58 - Corpo de prova para o ensaio de impacto Charpy e a aparência da fratura.

A tenacidade de um metal decresce com a diminuição da temperatura do meio e cai abruptamente, quando a temperatura baixa até um determinado valor. Esta diminuição repentina de tenacidade é denominada transição característica do metal e, quando a temperatura do meio torna-se inferior àquele valor mencionado, o material se rompe de maneira totalmente frágil (Figura 59).

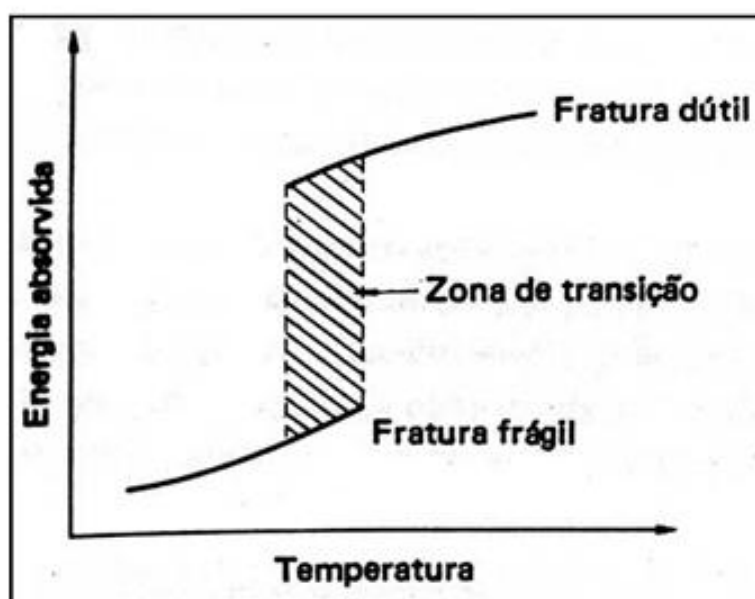


Figura 59 - Transição do tipo de fratura

7.3 - Tensão Admissível e Coeficiente de Segurança

No projeto de uma estrutura, deve-se conhecer de antemão qual a máxima tensão admissível com que o sistema estrutural poderá trabalhar. Esta tensão terá o valor máximo dentro de uma faixa de trabalho em que as tensões atuantes são consideradas seguras, e dependem das propriedades mecânicas do material base e do metal depositado, do tipo de esforços requeridos e da junta a ser utilizada.

O valor da tensão admissível para um dado material depende da importância, da confiabilidade e da utilização da estrutura e, normalmente, é especificado como sendo uma fração adequada da resistência à tração do metal base.

O coeficiente de segurança em um projeto estrutural, dentro do regime elástico, é definido como sendo a relação entre a tensão de escoamento (σ_y) do material e a tensão de projeto do membro estrutural, ou então a relação entre a tensão de ruptura (σ_B) e a mesma tensão de projeto. Este coeficiente pode ser considerado uma incerteza na capacidade de deformação ou de ruptura da estrutura, e é estabelecido para fazer frente a diversos fatores desconhecidos e aleatórios que podem influir no desempenho da referida estrutura.

No caso de juntas soldadas, a própria flutuação da qualidade da soldagem já é considerada um fator de incerteza, que pode influir na determinação do coeficiente de segurança.

Deve ser lembrado que as tensões em membros soldados são calculadas, estabelecendo-se certas hipóteses simplificadoras, de modo que o coeficiente de segurança nunca deve ser interpretado como sendo uma reserva de resistência do material.

Exemplos de valores de tensões admissíveis são mostrados na Tabela 18, para casos em que não se considera o efeito de fadiga dos materiais.

7.4 - Eficiência da Junta Soldada

A eficiência da junta é considerada por ocasião do cálculo da tensão admissível da junta soldada, e pode ser definida como sendo um fator de redução de tensão em relação à tensão admissível do metal base. É determinada em função do material de

soldagem, do procedimento, do método de inspeção e das condições de serviço da junta soldada, sendo expressa pela relação:

$$\text{Eficiência da junta } (\eta) = \frac{\text{Tensão admissível da junta } (f_w)}{\text{Tensão admissível do metal base } (f)}$$

Tabela 18 - Exemplos de tensões admissíveis, sem considerar a fratura por fadiga.

Tipo de Solda			Tipo de Solicitação	Tensões Admissíveis (kgf/mm ²)	
				SM41	SM50
Soldagem na oficina	Juntas de topo	Com exame radiográfico	Tração	1300	1800
			Compressão	1300	1800
	Sem exame radiográfico	Tração	1040	1440	
		Compressão	1170	1620	
		Cisalhamento	800	1100	
Solda de filete		Tração	800	1100	
		Compressão			
		Cisalhamento			
Soldagem no campo	Coeficientes		Tração	0,8	
			Compressão	0,9	
			Cisalhamento	0,9	

Os fatores diretamente relacionados à soldagem que influem na eficiência da junta são:

- material de solda;
- processo de soldagem (arco elétrico com eletrodo revestido, arco submerso, MIG, TIG, etc.);
- ambiente de soldagem (na oficina, no campo etc.) e posição de soldagem (plana, vertical, sobrecabeça, etc);
- tratamento térmico (alívio de tensões, pré-aquecimento, etc.);
- acabamento (o acabamento propriamente dito, remoção do reforço, etc.);
- tratamento superficial (processamento químico, etc);
- método de inspeção (tipo de ensaio não-destrutivo e métodos de amostragem, prova de carga e ensaio de estanqueidade);
- tipo de junta de solda (topo, filete, tipo de penetração, cobre-juntas etc);
- tipo e intensidade do carregamento (estático, dinâmico, carga de impacto etc.);
- condições atmosféricas (temperatura ambiente, pressão, atmosfera corrosiva etc.).

A eficiência da junta depende, portanto, dos fatores enumerados e também da tensão admissível. Dessa maneira, a comparação dos valores de eficiência de juntas, sem considerar tais fatores, não tem qualquer significado prático.

Os valores da eficiência da junta foram padronizados de acordo com os campos de aplicação. A Tabela 19, por exemplo, apresenta valores de eficiência para vasos de pressão, verificando-se que eles dependem do nível de ensaio radiográfico a que tais equipamentos são submetidos.

Tabela 19 - Exemplos de eficiências de juntas soldadas.

<i>Juntas</i>		<i>Eficiência da Junta (%)</i>		
		<i>Com Radiografia Total</i>	<i>Com Exame Radiográfico Parcial</i>	<i>Sem Exame Radiográfico</i>
(1)	Junta de topo soldada de ambos os lados ou junta de topo soldada de um dos lados, com resistência equivalente	100	95	70
(2)	Junta de topo com cobre-junta remanescente	90	85	65
(3)	Junta de topo executada de um só lado	—	—	60
(4)	Junta superposta, com filete duplo e altura total	—	—	55
(5)	Junta superposta, com filete simples e solda de bujão	—	—	50
(6)	Junta superposta, com filete simples, sem solda de bujão	—	—	45

7.5 - Cálculo da Resistência Estrutural das Juntas Soldadas

O cálculo da resistência de juntas soldadas baseia-se, normalmente, no critério das tensões admissíveis. Sendo assim, todas as hipóteses utilizadas na teoria das pequenas deformações são válidas, e a relação entre as tensões e deformações obedece simplesmente à lei de Hooke. O esforço máximo requerido será aquele que induz na estrutura uma tensão máxima, cujo valor será igual à tensão admissível previamente estabelecida.

Normalmente, a distribuição de tensões em uma junta de topo é determinada sem maiores problemas; já na junta de canto, o problema não é tão simples, pois a

distribuição de tensões em um filete de solda demanda cálculos relativamente complicados. Para simplificar os cálculos, geralmente, se adota o valor atuante na garganta do filete como sendo a tensão média na junta de canto.

A Tabela 20 mostra as formulações devidas a Jennings para efetuar cálculos estruturais simplificados de juntas soldadas.

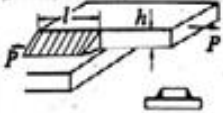
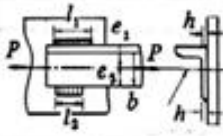
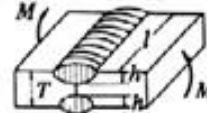
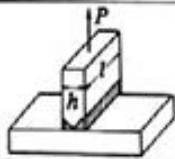
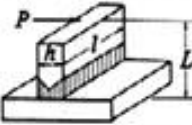
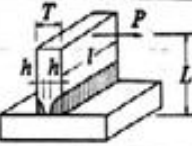
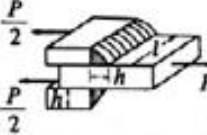
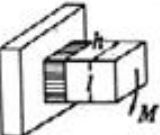
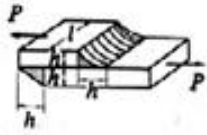
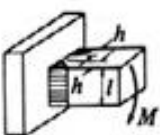
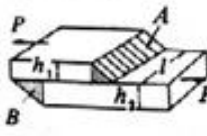
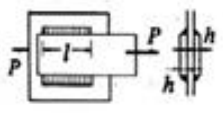
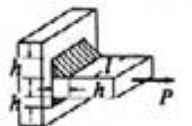
Em muitos países, tem-se efetuado tentativas no sentido de padronizar os cálculos estruturais das juntas soldadas, sendo as propostas do International Institute of Welding (IIW) e da International Standard Organization (ISO) as mais adotadas.

8 - CONTROLE DE QUALIDADE EM SOLDAGEM

Uma vez que o processo de soldagem é extremamente versátil, os componentes soldados estão presentes em quase todas as situações do cotidiano, desde uma simples cadeira até a mais avançada aeronave. Em aplicações de alta responsabilidade, tal como nas indústrias nuclear, petroquímica e aeroespacial, um defeito de soldagem pode resultar em consequências catastróficas, tanto para o ser humano quanto para o meio ambiente.

Assegurar a qualidade de um componente soldado é extremamente complicado, pois a soldagem é uma operação que possui um grande número de variáveis, sendo que algumas delas são difíceis de serem controladas e/ou quantificadas. Com a finalidade de minimizar a probabilidade de falha em componentes soldados, os seguintes parâmetros devem ser levados em consideração: soldabilidade do material base; compatibilidade entre material base e metal de adição; geometria do eletrodo; cálculo de esforços; geometria de seções e juntas; equipamentos e parâmetros de processo, tais como corrente elétrica e tensão, pressão aplicada, temperatura, tipo de gás de proteção; nível de qualificação do corpo técnico; tratamentos térmicos antes e após a soldagem; custo, levando em conta a disponibilidade de insumos de produção; ensaios destrutivos e não-destrutivos; normas, códigos e procedimentos. O grande desafio para a implementação de uma política de qualidade de soldagem é ter um sistema de auditoria e rastreabilidade que sejam capazes de determinar o mais rapidamente possível qual variável do processo foi responsável pelo surgimento da não conformidade e tomar medidas corretivas e preventivas.

Tabela 20 - Exemplos de expressões para o cálculo da resistência de juntas soldadas.

N.º	Tipo de Junta	Cálculo da Tensão Atuante	N.º	Tipo de Junta	Cálculo da Tensão Atuante
1		$\sigma_b = \frac{P}{hl}$	11		$\tau = \frac{0,707P}{hl}$
2		$\sigma_b = \frac{P}{(h_1 + h_2)l}$	12		$\sigma_b = \frac{1,414P}{h(l_1 + l_2)}$ $l_1 = \frac{1,414Pe_1}{\sigma_b h}$ $l_2 = \frac{1,414Pe_2}{\sigma_b h}$
3		$\sigma_b = \frac{6M}{lh^2}$	13		$\sigma_b = \frac{6M}{lh^2}$
4		$\sigma_b = \frac{37M}{h(37l^2 - 67h + 4h^2)}$	14		$\sigma_b = \frac{37M}{l - h(37l^2 - 67h + 4h^2)}$
5		$\sigma_b = \frac{P}{hl}$	15		$\sigma_b = \frac{6PL}{h^2}, \quad \tau = \frac{P}{h}$ $\sigma = \frac{P}{h} \sqrt{36\left(\frac{l}{h}\right)^2 + 1,8}$ Para $L/h > 2 \quad \sigma = \sigma_b$
6		$\sigma_b = \frac{P}{(h_1 + h_2)l}$	16		$\sigma_b = \frac{37PL}{h(37l^2 - 67h + 4h^2)}$ $\tau = \frac{P}{2h}$
7		$\sigma_b = \frac{0,707P}{hl}$	17		$\sigma_b = \frac{6M}{hl^2}$
8		$\sigma_b = \frac{0,707P}{hl}$	18		$\sigma_b = \frac{3M}{hl^2}$
9		$\sigma_b = \frac{1,414P}{(h_1 + h_2)l}$ Tensões iguais em A & B	19		$\tau = \frac{0,354P}{hl}$
10		Zona soldada A $\sigma_b = \frac{1,414P}{h_1(l_1 + h_2)}$ Zona soldada B $\sigma_b = \frac{1,414P}{h_2(h_1 + l_2)}$	20		$\sigma_b = \frac{0,707P}{hl}$

Os principais tipos de não-conformidades encontradas em componentes soldados são distorções e descontinuidades (defeitos). As distorções são causadas pela presença de tensões residuais geradas durante as etapas de aquecimento e resfriamento da soldagem; adicionalmente as distorções são fortemente dependentes da geometria e dimensões do componente. Existe uma quantidade muito grande de defeitos de soldagem. Algumas publicações especializadas de soldagem citam mais de 40 tipos diferentes de defeitos. Entretanto, estes defeitos podem ser agrupados nas seguintes categorias: trincas; inclusões; cavidades; fusão e penetração incompletas e geometria.

8.1 - Trincas

Trincas são descontinuidades que propiciam uma alta concentração de tensão e que podem levar à fratura prematura e/ou catastrófica do componente soldado. Surgem devido a parâmetros e/ou procedimentos inadequados de processo que levam ao surgimento de tensões residuais trativas excessivas e/ou por fragilização do material.

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 às solicitações impostas localmente pelas tensões decorrentes do processo de soldagem.

A aplicação localizada de calor, deformando localmente o material, causa o aparecimento de tensões de tração bi ou mesmo triaxiais na região da solda. Este estado de tensões, juntamente com a fragilização associada às 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 classificadas quanto à localização, orientação ou temperatura em que se formam. Quanto à localização, as trincas podem ser superficiais ou internas ou ainda podem ser classificadas em relação à localização na região de soldagem. Podem ainda estar ocupando posições transversais, longitudinais ou radiais, em relação ao cordão de solda. Com relação à temperatura, as trincas podem ser quentes, quando ocorrem durante ou imediatamente após a soldagem, ou frias, quando surgem após o resfriamento do material até a temperatura ambiente.

A Figura 60 mostra a classificação das trincas de acordo com a sua localização. E a Figura 61 mostra a influência do formato do cordão na sensibilidade à fissuração a quente.

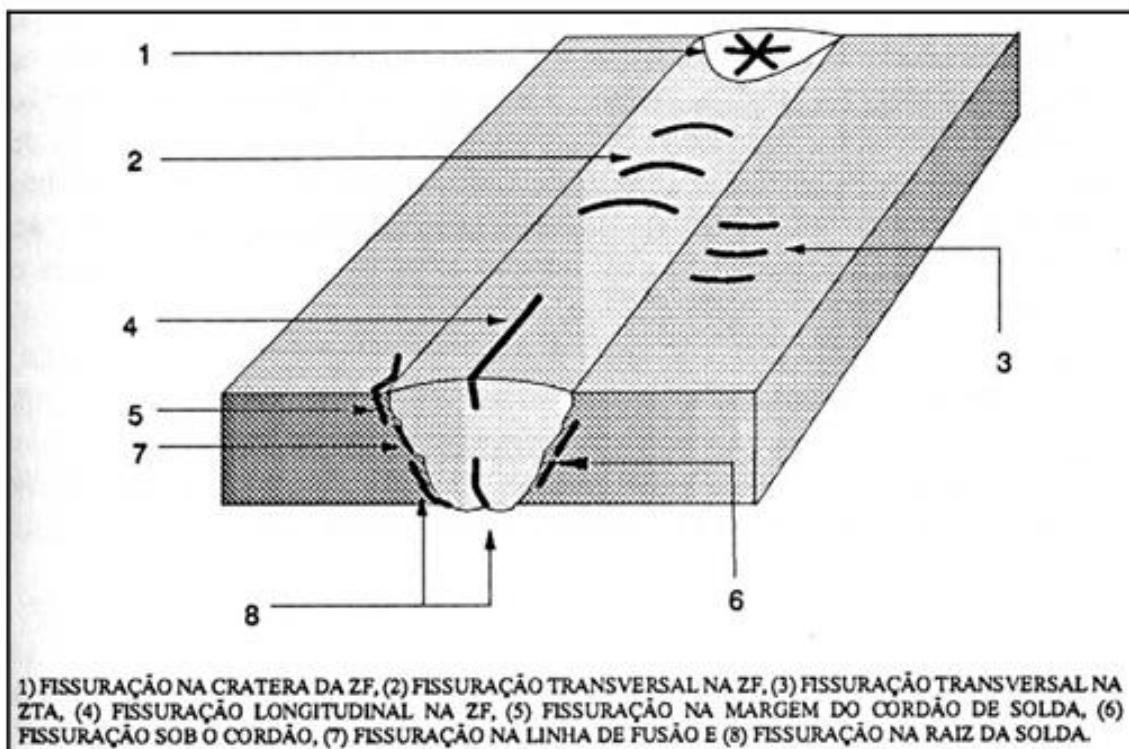


Figura 60 - Classificação das trincas de acordo com a sua localização.

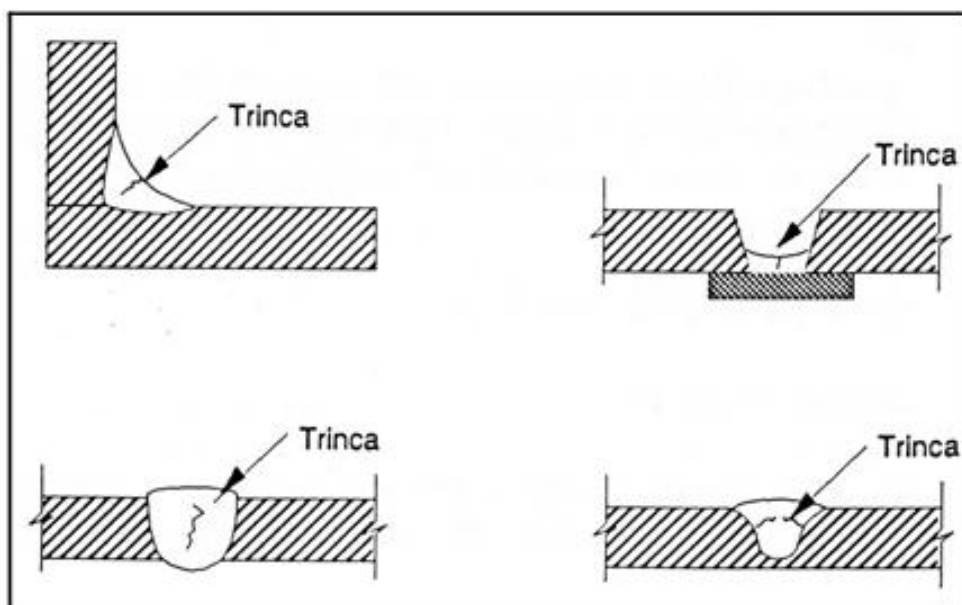


Figura 61 - Influência do formato do cordão na sensibilidade à fissuração a quente.

8.2 - Inclusões

Inclusões são normalmente encontradas no cordão de solda, em regiões subsuperficiais. Podem ser classificadas em contínuas, intermitentes ou aleatórias e podem ser constituídas de escória, fluxo ou óxidos. Os principais motivos para a ocorrência de inclusões são limpeza deficiente entre os passes, técnica errada de soldagem, posicionamento incorreto do eletrodo, aporte de energia insuficiente, atmosfera protetora ineficiente, entre outros.

8.3 - Cavidades

As porosidades são a forma mais comum de cavidades encontradas em materiais soldados, especialmente naqueles em que ocorre a fusão. Consistem de bolhas de gás aprisionadas durante a solidificação do metal. Podem ocupar posições superficiais ou internas e são causadas, dentre outros motivos, por umidade, sujeira, graxa, tintas na superfície, fluxo de gás incorreto e fluxo excessivamente fino. A Figura 62 mostra algumas formas de porosidade.

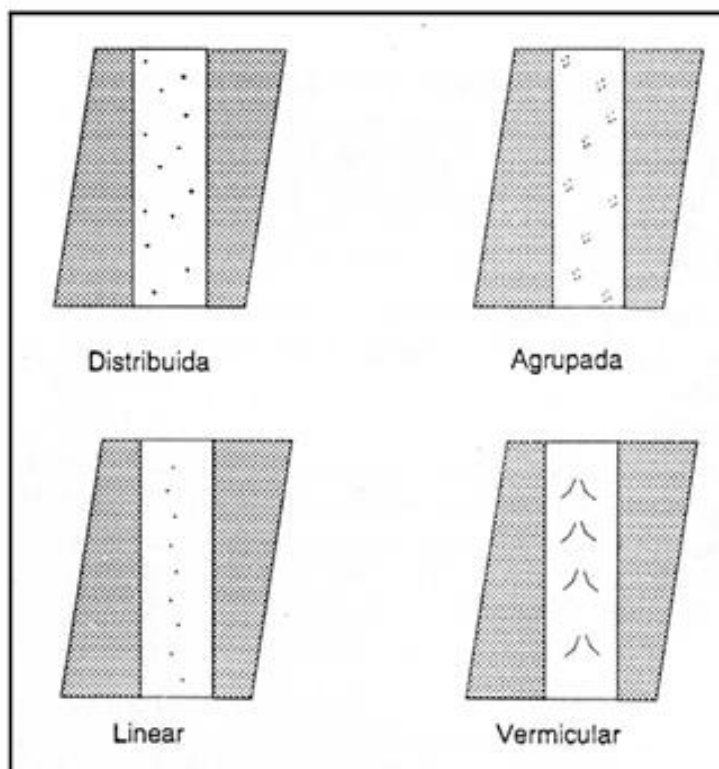


Figura 62 - Formas de porosidade (esquemática).

Outra forma de cavidade são os rechupes ou vazios de contração que surgem quando não existe metal líquido suficiente para compensar a contração de solidificação. Fusão e penetração incompletas A fusão incompleta é um tipo de descontinuidade de solda devido à fusão insuficiente entre o metal de solda e as faces do chanfro ou entre os passes de solda. Neste caso, ocorre apenas uma aderência superficial e o defeito é caracterizado como planar. Por outro lado, a penetração incompleta é a falta de preenchimento total do espaço da junta. Dentre os principais motivos para a ocorrência destes dois tipos de defeitos destacam-se: energia insuficiente de soldagem, preparação inadequada da junta, parâmetros incorretos de soldagem, eletrodo incorreto, desvio do arco, entre outros.

8.4 - Geometria

Os defeitos geométricos são aqueles que resultam em um perfil de solda imperfeito ou inaceitável. Um dos principais defeitos geométricos é a mordedura que consiste em uma depressão, em forma de entalhe, ao longo da solda entre o metal base e o cordão. É um tipo de defeito perigoso, pois pode facilmente iniciar uma trinca por fadiga.

Os defeitos geométricos ainda podem ser provocados por movimentação ou posicionamento incorreto das chapas soldadas, podendo originar desalinhamentos ou ângulos incorretos entre as chapas.

A Figura 63 mostra alguns exemplos de perfis de solda inadequados.

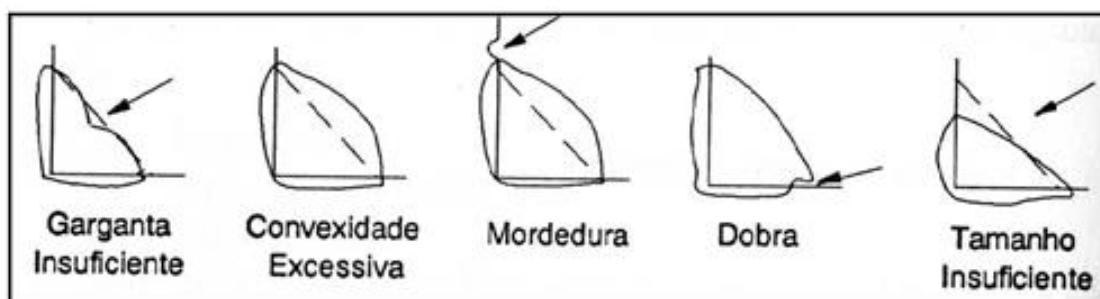


Figura 63 - Exemplos de perfis de solda inadequados (esquemático).

8.5 - Decoção Lamelar

A decoção lamelar ocorre em aços estruturais (espessuras típicas entre 12 e 60 mm), em juntas em T, “córner” e cruciforme. Foram observadas trincas na construção de pontes e edifícios de estrutura metálica, navios, plataformas para extração de petróleo no mar, vasos de pressão e equipamentos nucleares. A trinca se localiza no metal de base, na chapa submetida a esforços de tração no sentido da espessura, e ocorre paralelamente à linha de fusão, como mostra a Figura 64.

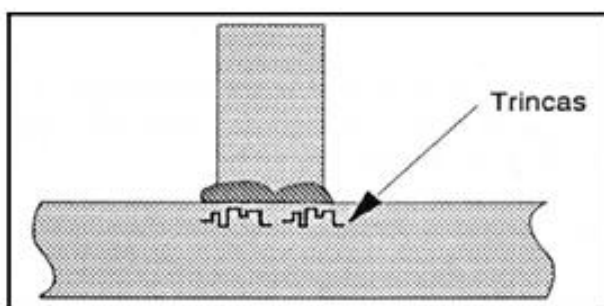


Figura 64 - Decoção lamelar (esquemática).

8.6 - Falta de Fusão

O termo refere-se à ausência de continuidade metalúrgica entre o metal depositado e o metal de base ou dos passes adjacentes, como mostra a Figura 65. Resulta do não aquecimento adequado do metal presente na junta e/ou da presença de camadas de óxidos refratários.

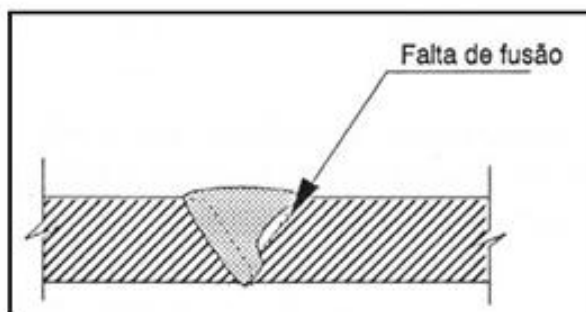


Figura 65 - Falta de fusão (esquemático).

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.

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.

8.7 - Penetração Incompleta

O termo refere-se a falhas em se fundir e encher completamente a raiz da junta, como mostra a Figura 66. A falta de penetração causa uma redução da seção útil da solda e concentração de tensões.

Ela 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. Nestes casos, a penetração parcial não constitui um defeito de soldagem.

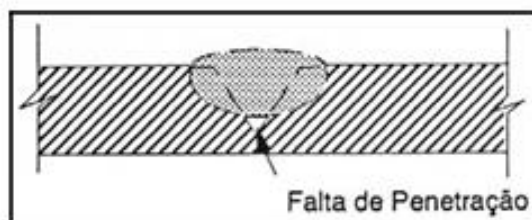


Figura 66 - Falta de penetração (esquemática).

8.8 - Distorções

As distorções são deformações plásticas devidas ao aquecimento não-uniforme e localizado durante a soldagem, causando mudanças de forma e dimensões..

Soldagem em excesso, soldagem em juntas livres (aquelas em que as peças podem se mover facilmente), seleção incorreta do chanfro e da sequência de soldagem, etc, são algumas das causas práticas que provocam as distorções.

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 sequência de soldagem, etc. A correção da distorção em soldas prontas exige medidas, em geral onerosas, como desempenamento mecânico ou térmico, remoção da solda e ressoldagem, etc.

8.9 - Ensaios Não-Destrutivos

São ensaios realizados em materiais acabados ou semi acabados para verificar a existência ou não de descontinuidades ou defeitos, sem interferir em seu uso posterior. São utilizados na fabricação, construção, montagem e inspeção em serviço e manutenção, sendo largamente utilizados em soldas, fundidos, forjados, entre outros.

Para se obter resultados satisfatórios e válidos, os seguintes itens devem ser considerados como elementos fundamentais para o resultado destes ensaios: pessoal treinado e qualificado; procedimentos de execução de ensaios qualificados com base nas normas e critérios de aceitação perfeitamente definidos; equipamentos devidamente calibrados.

Os métodos de ensaios não-destrutivos mais utilizados são: inspeção visual; líquido penetrante; partícula magnética; ultra-som; radiografia (raios X e gama).

8.9.1 - Inspeção visual

Esse é o método mais simples, o mais utilizado e, em geral, precede qualquer outro tipo de ensaio. Ela é usada na inspeção de superfícies externas para a determinação de tamanho, forma, acabamento, ajuste e existência de trincas, poros, etc. Pode ser feita a olho nu ou com o uso de instrumentos como microscópios, lupas, tuboscópios, espelhos e câmaras de televisão. Além disso, instrumentos como réguas e gabaritos (Figura 67) são comumente utilizados.

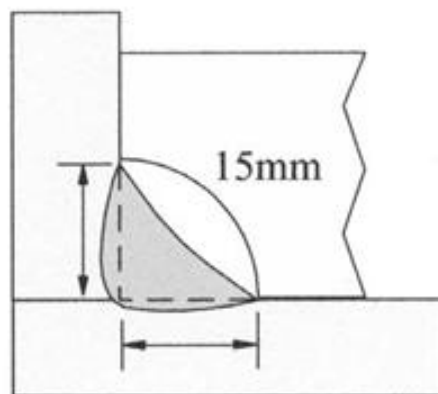


Figura 67 - Esquema de gabarito para a determinação da dimensão de soldas de filete.

8.9.2 - Líquido penetrante

É utilizado para detectar descontinuidades superficiais e que sejam abertas na superfície, tais como trincas, poros, etc. Pode ser aplicado em todos os materiais sólidos e que não sejam porosos ou com superfície muito grosseira. É muito utilizado em materiais não magnéticos como alumínio, magnésio, aços inoxidáveis austeníticos, ligas metálicas, além de materiais magnéticos. É também aplicado em cerâmicas vitrificadas, vidros e plásticos.

O método consiste em fazer penetrar na abertura da descontinuidade um líquido. Após a remoção do excesso de líquido da superfície, faz-se sair da descontinuidade o líquido retido através de um revelador. A imagem da descontinuidade fica então desenhada na superfície (Figura 68).

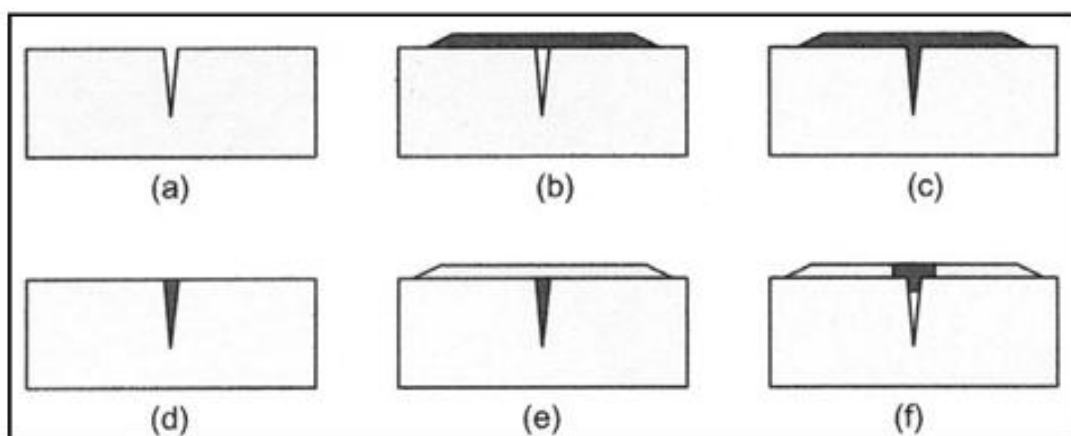


Figura 68 - Princípios básicos da inspeção com líquidos penetrantes: (a) peça com trinca superficial, (b) aplicação do líquido penetrante, (c) penetração, (d) remoção do excesso de líquido, (e) aplicação do revelador e (f) formação da indicação da trinca.

Este método consiste das seguintes etapas: preparação da superfície (limpeza inicial); aplicação do penetrante; remoção do excesso de penetrante; revelação; avaliação e inspeção; limpeza pós-ensaio.

Quando comparado com outros métodos tem as seguintes vantagens e limitações:

Vantagens: é fácil de fazer e interpretar seus resultados; não há limitações para o tamanho das peças a ensaiar; pode revelar descontinuidades (trincas) extremamente finas (da ordem de 0,001 mm de abertura).

Limitações: só detecta descontinuidades superficiais; a superfície não pode ser porosa ou absorvente, já que não haveria possibilidade de remover totalmente o excesso de penetrante, causando mascaramento do resultado; a aplicação do penetrante deve ser feita numa determinada faixa de temperatura, superfícies muito frias (abaixo de 10°C) ou muito quentes (acima de 52°C) não são recomendáveis ao ensaio.

8.9.3 - Partícula magnética

É usado para revelar descontinuidades superficiais e sub-superficiais em materiais ferromagnéticos pela aplicação de um campo magnético e deposição de um pó capaz de ser atraído para as regiões em que este campo magnético escapar do interior da peça (Figura 69). Este método está baseado na geração de um campo magnético que percorre toda superfície do material ferromagnético.

As etapas do processo são as seguintes:

- a) aplicação do campo magnético;
- b) aplicação das partículas magnéticas;
- c) aglomeração das partículas na descontinuidade (campo de fuga);
- d) identificação da descontinuidade.

Não existe um tamanho mínimo da descontinuidade para que ocorra o campo de fuga, o que faz com que o método de ensaio por partículas magnéticas seja o mais eficiente dos métodos superficiais, até mesmo que o ensaio por líquido penetrante, para materiais ferromagnéticos.

São detectados defeitos tais como: trincas, junta fria, inclusões, dupla laminação, falta de penetração, etc.

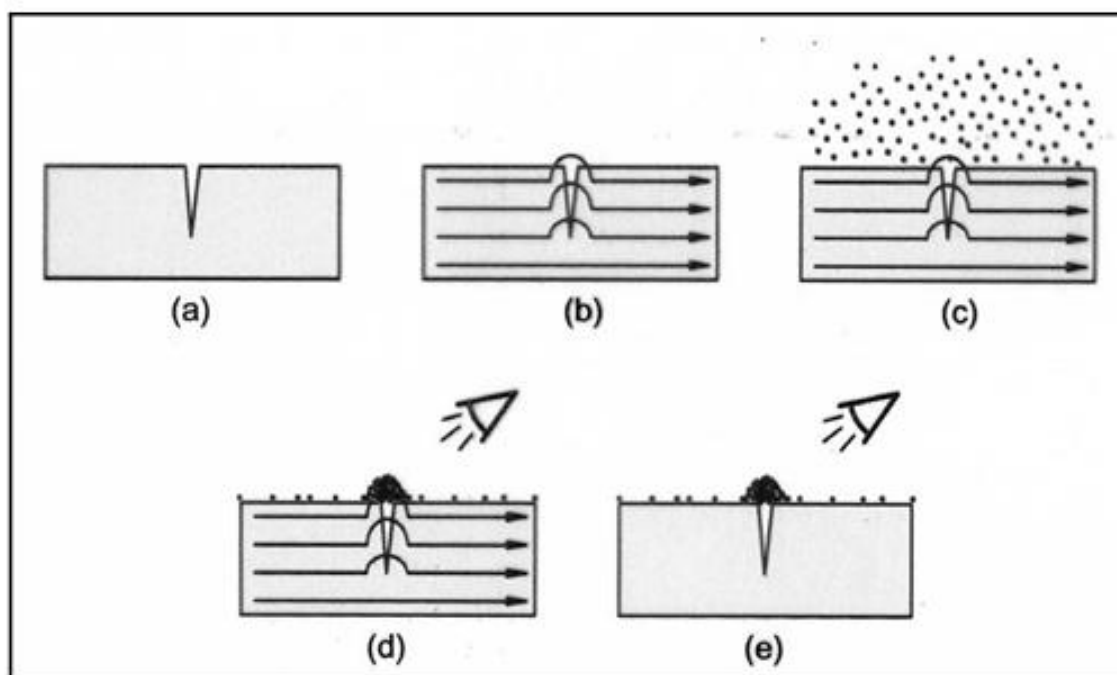


Figura 69 - Princípios básicos da inspeção com partículas magnéticas: (a) peça com trinca superficial ou sub-superficial, (b) aplicação do campo magnético, (c) aplicação das partículas, (d) formação da indicação e inspeção com campo magnético e (e) sem o campo.

8.9.4 - Ultra-som

Neste tipo de ensaio, um feixe de ultra-som é introduzido no material e as informações são obtidas com base na transmissão deste feixe através do material e na sua reflexão por interfaces e discontinuidades. Um pulso ultra-sônico é gerado e transmitido através de um transdutor especial, encostado ou acoplado ao material. Os pulsos ultra-sônicos refletidos por uma discontinuidade, ou pela superfície oposta da peça, são capturados pelo transdutor, convertidos em sinais eletrônicos e mostrados na tela LCD ou em tubos de raios catódicos (TRC) do aparelho (Figura 70). Os ultra-sons são ondas mecânicas de frequência elevada (acima da capacidade da audição humana), usualmente na faixa de 25 kHz a 40 MHz.

Este ensaio é usado para a inspeção do interior de peças metálicas, plásticas e cerâmicas e para a medida de espessura. Para a inspeção de peças metálicas, este ensaio

apresenta um grande poder de penetração (até cerca de 6m), uma elevada sensibilidade e a capacidade de localizar descontinuidades com precisão.

Com a técnica “pulso-eco”, é necessário, para a inspeção, o acesso a apenas um lado da peça. Devido às suas características, é um método de ensaio muito adequado para a detecção de descontinuidades planares (como trincas). Por outro lado, a interpretação dos resultados deste ensaio é relativamente difícil e a detecção de descontinuidades localizadas próximas da superfície pode ser problemática.

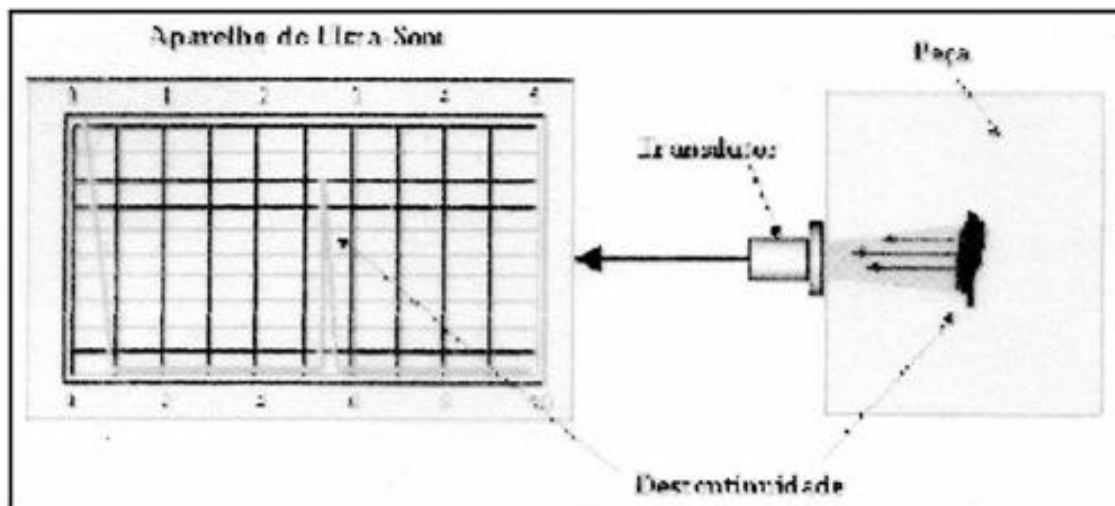


Figura 70 - Princípio básico da inspeção de materiais por ultra-som.

Na inspeção de juntas soldadas, a existência do reforço da solda dificulta o acoplamento e o uso de cabeçotes retos (nos quais o feixe sônico entra na peça perpendicularmente à superfície de contato). Neste caso, é mais comum o uso de cabeçotes angulares (o feixe sônico penetra com um ângulo determinado diferente de 90°), Figura 71.

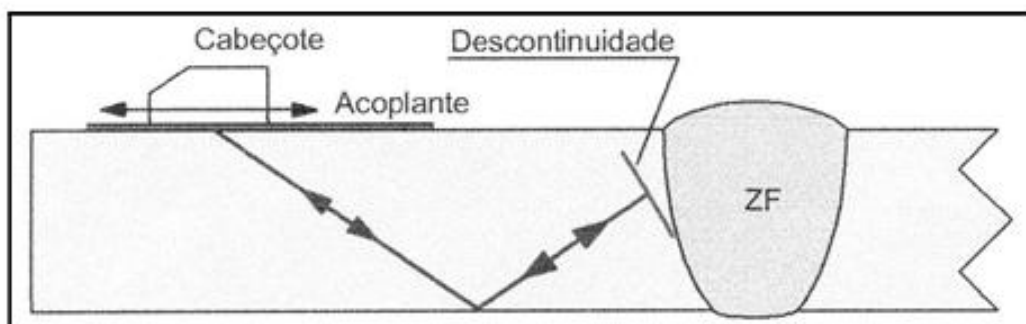


Figura 71 - Inspeção ultra-sônica de uma junta soldada com cabeçote angular.

Em comparação com outros métodos de ensaios, as principais vantagens são: possui alta sensibilidade na detectabilidade de pequenas descontinuidades; não requer planos especiais de segurança ou quaisquer acessórios para sua aplicação; para

interpretação das indicações, dispensa processos intermediários, agilizando a inspeção. Como principais limitações, tem-se: requer grande conhecimento teórico e experiência por parte do inspetor; o registro permanente do ensaio não é facilmente obtido; requer o preparo da superfície para sua aplicação.

8.9.5 - Radiografia (raios X e gama)

Este método é baseado em variações da absorção de radiação eletromagnética penetrante (raios X e gama) devidas a alterações de densidade, composição e espessura da peça sob inspeção (Figura 72).

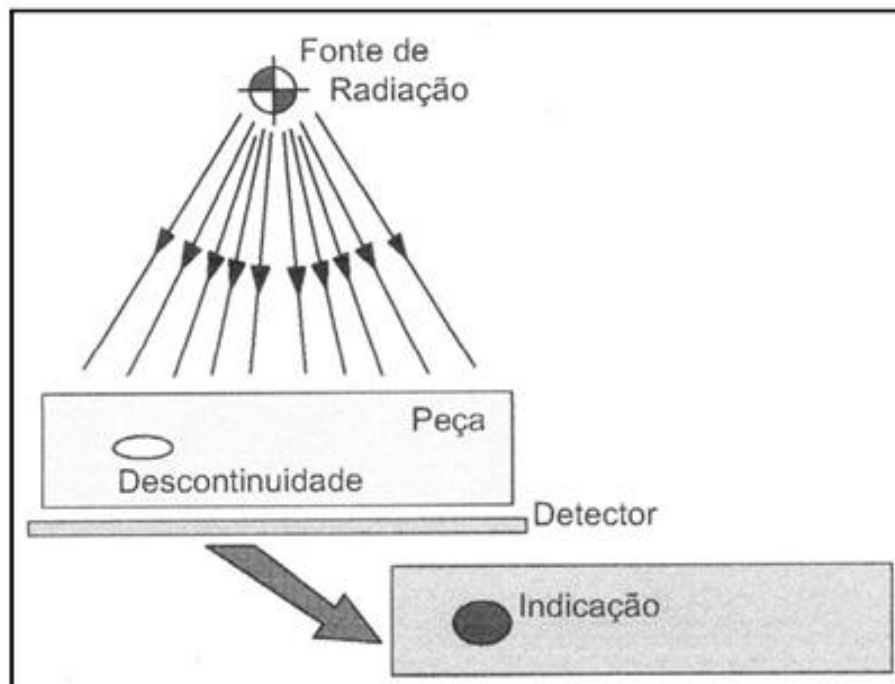


Figura 72 - Inspeção radiográfica.

A radiografia é realizada com raios X que são gerados pelo impacto contra um alvo metálico de eletros acelerados no vácuo por uma fonte de alta tensão. A gamatografia utiliza radiação gama resultante da reação nuclear em uma fonte de material radioativo. Como esta última não necessita de energia elétrica para a sua operação, ela é particularmente usada em inspeções de campo. Devido aos efeitos extremamente perigosos da radiação penetrante para os seres vivos, são necessários cuidados especiais de segurança para a realização deste ensaio.

Este método é usado para detectar a presença de descontinuidades internas e externas em metais ferrosos e não ferrosos e em materiais não metálicos, e permite a obtenção de um registro permanente do resultado do ensaio. Ele tem um importante uso na inspeção de peças soldadas e fundidas, com espessuras de até cerca de 100 mm (aço) e, particularmente, quando destinadas a aplicações críticas.

O processo tende a ser relativamente caro e lento, podendo necessitar, no caso de peças de maior espessura, tempos de exposição de muitos minutos ou, mesmo, horas. A realização deste ensaio exige o acesso aos dois lados da peça.

Como o método é baseado em diferenças de exposição, defeitos planares como trinca, cuja orientação não seja paralela à direção de propagação da radiação, são de difícil detecção por este ensaio. O resultado do ensaio é, em geral, registrado em filme ou, menos comumente, em telas fluorescentes. Este resultado é interpretado em termos das diferenças de exposição do filme devido às diferenças de espessura, densidade ou composição da peça associadas com suas descontinuidades e variações dimensionais. A Figura 73 mostra radiografias de soldas contendo algumas descontinuidades típicas.

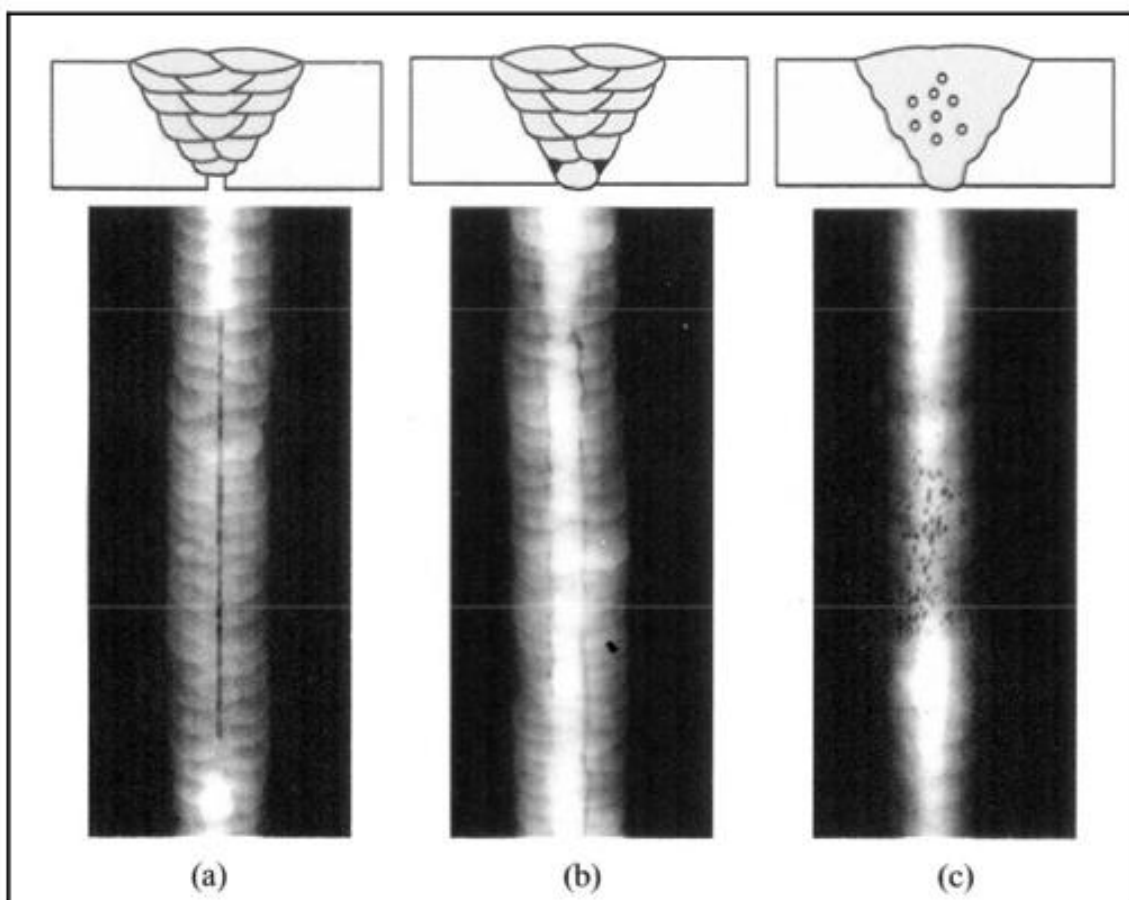


Figura 73 - Exemplos de radiografias de soldas com descontinuidades: (a) Falta de penetração, (b) inclusão de escória e (c) porosidade agrupada.

9 - SEGURANÇA E HIGIENE NA SOLDAGEM

Noções sobre segurança é importante em soldagem, corte e operações relacionadas a estas práticas, pois os riscos envolvidos nestas atividades são numerosos e capazes de provocar danos sérios a pessoal, equipamentos e instalações. Portanto, deve-se ter conhecimento dos principais riscos das operações de soldagem e afins e as práticas usuais para se evitar ou minimizar a ocorrência de acidentes. Além dessas práticas, as recomendações e instruções dos fabricantes de equipamentos e produtos devem ser rigorosamente observadas.

Os objetivos e o Plano de Segurança da empresa, que deve incluir a seleção das áreas para operações de soldagem e corte, exigência de compra de equipamentos de soldagem e segurança devidamente aprovados, estabelecimento e fiscalização de cumprimento de normas de segurança internas, execução de programas de treinamento no uso do equipamento de trabalho e de segurança e procedimentos em caso de emergências ou acidentes, utilização de sinais de advertência para os perigos de cada área específica e a inspeção e manutenção periódicas dos equipamentos e instalações, devem ser estabelecidos claramente.

Os principais riscos das operações de soldagem e afins são incêndios e explosões, queimaduras, choque elétrico, inalação de gases e fumos nocivos e radiação.

Para que se inicie um incêndio são necessários uma fonte de calor, um combustível e oxigênio.

As fontes de calor podem ser uma chama, o arco elétrico, um curto-circuito nas instalações elétricas ou nos locais de soldagem, etc. Assim, chamas e arcos elétricos de soldagem só devem ser acesos em locais próprios e manuseados com o máximo de atenção e cuidado. Outra fonte de calor, muitas vezes esquecida, são os respingos de metal aquecido que podem cair em regiões relativamente afastadas dos locais onde se realiza a soldagem ou o corte. As instalações elétricas devem ser mantidas em boas condições de conservação, com inspeções periódicas e dotadas de fusíveis protetores adequados e chaves seccionadoras de circuitos de fácil acesso e operação.

Nos ambientes industriais, inúmeros são os materiais combustíveis presentes. Estes combustíveis podem ser sólidos, líquidos ou gasosos. Muitas vezes, materiais inflamáveis, não usados como combustível, como tintas, solventes, graxas e óleos, são utilizados nas imediações de áreas de soldagem. Assim, todo o cuidado deve ser tomado

para manter estes materiais em recipientes adequados, tampados e afastados da área de soldagem e corte térmicos. Estopas, panos e papéis embebidos em solventes e outros inflamáveis devem ser retirados da área antes de se iniciar quaisquer destas operações. Fica claro que a limpeza e organização das áreas de soldagem são fundamentais para a segurança.

Na soldagem de manutenção de tanques de combustível vazios, muitas vezes há formação de vapores explosivos. Antes de se iniciar a soldagem, estes tanques devem ser rigorosamente limpos e/ou lavados e é aconselhável que sejam cheios de água de forma conveniente a não prejudicar a soldagem.

As queimaduras são causadas principalmente por fagulhas e respingos, chamas e metal aquecido.

Fagulhas e respingos quase sempre estão presentes nas operações de soldagem e corte. O soldador, durante a operação, não tem visão da área à sua volta. Assim, o acesso de pessoas deve ser restrito nas áreas de soldagem e o uso de biombos é aconselhável para se minimizarem os riscos para terceiros e evitar a projeção de fagulhas e respingos a longas distâncias.

Quanto à segurança pessoal, o soldador deve sempre usar vestimenta e equipamentos de proteção individual adequados.

Chamas devem ser manuseadas com atenção para não serem dirigidas acidentalmente contra terceiros ou objetos.

O metal aquecido tem, muitas vezes, a mesma aparência do metal não aquecido e nunca deve ser tocado bruscamente, mas através da aproximação gradativa, tornando possível um recuo imediato caso se constate que sua temperatura está elevada.

A gravidade de um choque elétrico está relacionada não à tensão da fonte que provoca, mas sim à intensidade da corrente que passa pela vítima, ao caminho dela no corpo do acidentado e ao tempo de circulação. As sensações sentidas por uma pessoa normal percorrida por correntes de diferentes intensidades são:

1 mA ⇨ sensação de choque ⇨ não envolve qualquer perigo;

5 mA ⇨ músculos violentamente estimulados ⇨ sensação de dor; 10 mA ⇨ dor insuportável;

20 mA ⇨ contração violenta dos músculos; 60

mA ⇨ respiração difícil;

80 mA ⇨ parada respiratória;

100 mA ⇨ queimaduras severas e parada cardíaca.

As precauções que devem ser tomadas para se evitar o choque elétrico são: aterrar todo equipamento elétrico, trabalhar em ambientes secos, manter as conexões elétricas limpas e bem ajustadas, usar cabos de dimensões corretas, evitar trabalhar em circuitos energizados, usar roupas e calçados secos.

As operações de soldagem podem gerar gases e fumos (vapores e fumaças) que podem ser prejudiciais à saúde de diversos modos. Por exemplo, vapores de zinco podem causar dor de cabeça intensa e febre, enquanto vapores de cádmio podem ser fatais.

O argônio, usado como gás de proteção da solda em alguns processos, não é tóxico, mas como é mais pesado que o ar, pode causar asfixia e morte, se for usado em ambientes fechados.

Assim, as operações de soldagem e corte devem ser efetuadas em locais bem ventilados e, se necessário, podem ser usados ventiladores e exaustores. Para proteção individual, o soldador pode usar uma máscara contra gases.

Metais aquecidos e, particularmente, o arco elétrico de soldagem emitem radiação eletromagnética. Esta radiação pode ser emitida na região do infravermelho, do ultravioleta e da luz visível.

A radiação infravermelha pode causar queimaduras, dor de cabeça e lesão nos olhos (inflamações nas pálpebras, na córnea, catarata). A radiação visível, quando em alta intensidade, pode causar ofuscamento e cansaço visual e a radiação ultravioleta pode causar queimaduras severas e até tumores na pele, além de lesões nos olhos (conjuntivite, danos à córnea e cegueira).

A proteção contra a radiação deve evitar a exposição, tanto à radiação direta quanto à indireta, do soldador e de terceiros. Individualmente o soldador deve se proteger com o uso de roupas opacas e máscaras com filtros de luz adequados. A proteção de terceiros pode ser proporcionada pelo uso de biombo e cortinas não refletoras.

Outros riscos comuns em áreas de soldagem e operações afins são: queda de objetos e ferramentas, queda de pessoal trabalhando em andaimes e plataformas ou locais elevados e movimentações de cargas no nível do solo ou elevadas. Capacetes de segurança devem ser sempre usados nestes casos e cintos de segurança são recomendados quando se trabalha em locais elevados.

Fagulhas e partículas frias ou aquecidas podem ser lançadas durante esmerilhamento, limpeza e goivagem em áreas de soldagem. Acesso restrito e uso de biombos e óculos de segurança devem ser recomendados.

A maior regra de segurança continua sendo PENSE ANTES DE AGIR E AJA SEMPRE COM BOM SENSO. Somente a ATENÇÃO E ALERTA constantes podem minimizar os riscos de acidentes.

10 - BIBLIOGRAFIA

American Welding Society, Welding Handbook, 8ª edição, vol. 1, AWS, Miami, 1987.

American Welding Society, Welding Inspection, 2ª edição, AWS, Miami, 1980.

Cary, H. B., Modern Welding Technology, 4th ed., 7-4 Thermit Welding, Columbus (Ohio): Prentice Hall, 1998, p223-226.

Gehring, M. and Studholme, S., Fabricators Pleased with Increased Submerged Arc Productivity from Cored Wires, Svetsaren, nº 12-, pp. 70-72, 1999.

IIW - International Institute of Welding, Guide to the Light Microscope Examination of Ferritic Steel Weld Metals, Doc. N°IX-1522-88 IXJ-123-87 Revision 2, June, 1988.

Machado, I.G. , Soldagem & Técnicas Conexas: Processos, Laboratório de Soldagem & Técnicas Conexas (LS&TC), Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 1996.

Marques, P.V., Tecnologia da Soldagem, Fundação Christiano Ottoni - FCO, Belo Horizonte - MG, 2002.

Milan, M.T., Maluf, O., Spinelli, D. e Bose Filho, W.W., Metais - uma visão objetiva, Suprema Gráfica e Editora Ltda, São Carlos - SP, 2004.

Mondenese, P.J. e Marques, P.V., Soldagem I - Introdução aos Processos de Soldagem, Apostila, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Metalúrgica, Belo Horizonte, Janeiro, 2005.

Okumura, T. & Taniguchi, C., Engenharia de Soldagem e Aplicações, LTC, Rio de Janeiro, Brasil, 1982.

Paranhos, R. e Souza, A.C., Soldagem a Arco Submerso, Coleção Soldagem 2000, volume 2, FIRJAN/SENAI, Rio de Janeiro, 77 pp, 1999.

Prisco, M., Soldagem de Manutenção, Programa de Cursos Modulares em Tecnologia da Soldagem, Módulo Manutenção, ABS - Associação Brasileira de Soldagem e ABRAMAN - Associação Brasileira de Manutenção, 19??.

Stinchcomb, C., Welding Technology Today - Principles and Practices, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 468 pp., 1989.

Svensson, L.E., Control of Microstructures and properties in Steel Arc Welds, CRC Press, 240 pp., 1994.

Wainer, E., Brandi, S.D. et. al, Soldagem - Processos e Metalurgia, Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, Brasil, 1992.