

1) OS AÇOS INOXIDÁVEIS.

Os aços inoxidáveis são aços de alta liga, geralmente contendo cromo, níquel, molibdênio em sua composição química. Estes elementos de liga, em particular o cromo, conferem uma excelente resistência à corrosão quando comparados com os aços carbono. Eles são, na realidade, aços oxidáveis. Isto é, o cromo presente na liga oxida-se em contato com o oxigênio do ar, formando uma película, muito fina e estável, de óxido de cromo. Ela é chamada de **camada passiva** e tem a função de proteger a superfície do aço contra processos corrosivos. Para que a película de óxido seja efetiva, o teor mínimo de cromo no aço deve estar ao redor de 11%. Assim, deve-se tomar cuidado para não reduzir localmente o teor de cromo dos aços inoxidáveis durante o processamento. Nos capítulos subseqüentes serão apresentados alguns fenômenos que podem alterar o teor de cromo, prejudicando a resistência à corrosão dos aços inoxidáveis.

Os aços inoxidáveis são classificados, segundo a sua microestrutura, em: aços inoxidáveis austeníticos, aços inoxidáveis ferríticos e aços inoxidáveis martensíticos. Existem outras variantes destes grupos, como, por exemplo, os aços inoxidáveis duplex (que possuem 50% de ferrita e 50% de austenita) e os aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação.

As diversas microestruturas dos aços são função da quantidade dos elementos de liga presentes. Existem basicamente dois grupos de elementos de liga: os que estabilizam a ferrita (Cr, Si, Mo, Ti e Nb); e os que estabilizam a austenita (Ni, C, N e Mn). Para facilitar, os elementos de liga com características semelhantes foram agrupados no cromo e no níquel equivalente. A partir deste agrupamento foi construído o diagrama de Schaeffler, que relaciona a microestrutura de um aço trabalhado com a sua composição química. Este diagrama está apresentado na figura 1.

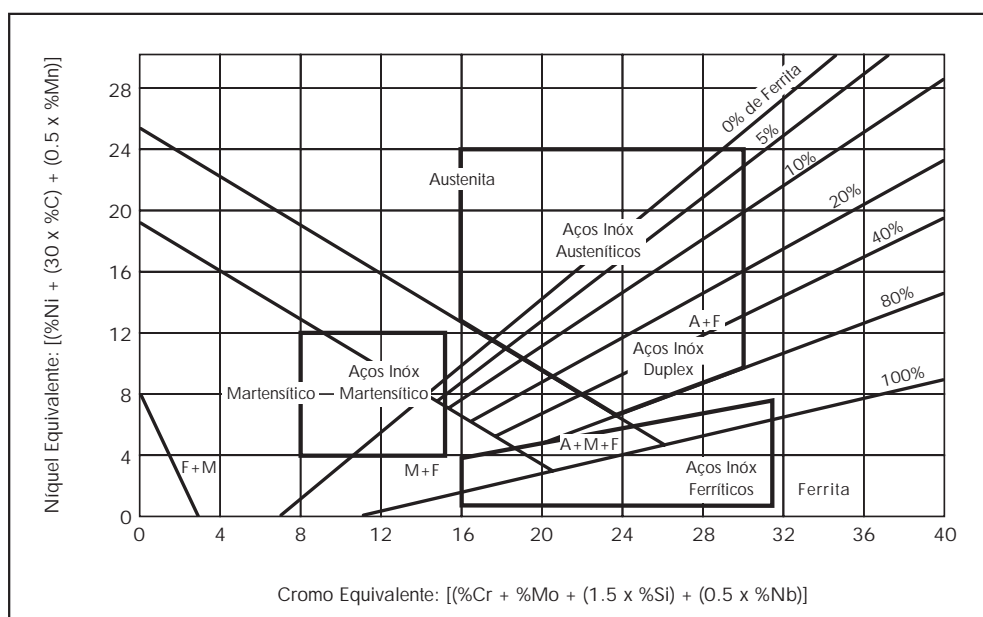


Fig. 1 - Diagrama de Schaeffler.

Analisando-se o diagrama de Schaeffler, percebe-se a presença de três regiões distintas e que possuem somente uma fase: região completamente austenítica, outra ferrítica e outra martensítica. O diagrama mostra também regiões de duas e até três fases presentes.

A composição química junto com o processamento termo-mecânico, confere aos aços inoxidáveis propriedades diferentes. Assim, cada grupo de aço inox tem uma aplicação. A tabela 1 mostra algumas aplicações dos aços inoxidáveis.

Tabela 1 - Algumas aplicações dos aços inoxidáveis.

Tipo de aço inox	Aplicação
Austenítico (resistente à corrosão)	<ul style="list-style-type: none">• equipamentos para indústria química e petroquímica• equipamentos para indústria alimentícia e farmacêutica• construção civil• baixelas e utensílios domésticos.
Ferrítico (resistente à corrosão, mais barato)	<ul style="list-style-type: none">• eletrodomésticos (fogões, geladeiras, etc)• balcões frigoríficos• moedas• indústria automobilística• talheres
Martensítico (dureza elevada)	<ul style="list-style-type: none">• cutelaria• instrumentos cirúrgicos como bisturi e pinças• facas de corte• discos de freio

2) INTRODUÇÃO AOS PROCESSOS DE SOLDAGEM.

Existem diversas maneiras de unir duas partes metálicas. Entre elas está a soldagem, que é um processo de junção, utilizando uma fonte de calor, com ou sem aplicação de pressão.

Um processo de soldagem deve ter as seguintes características:

- produzir uma quantidade de energia suficiente para unir dois materiais, similares ou não, com ou sem fusão entre as partes.
- evitar o contato da região aquecida e/ou fundida com o ar atmosférico.
- remover eventuais contaminações das superfícies que estão sendo unidas, oriundas do metal de base ou do metal de adição.
- propiciar o controle das transformações de fase na junta soldada que podem afetar o seu desempenho.

Os processos de soldagem podem ser classificados de acordo com o tipo de fonte de energia ou de acordo com a natureza da união. Industrialmente, os processos de soldagem mais empregados são os que utilizam a eletricidade como geração da energia para realizar a união. Para promover a fusão entre as duas partes que serão unidas pode-se utilizar o arco elétrico ou a resistência elétrica, através do aquecimento por efeito Joule. A soldagem por resistência envolve as seguintes variantes de processo: soldagem a ponto, soldagem com costura, soldagem topo-a-topo e soldagem com ressalto. Já a soldagem com arco elétrico pode ser subdividida entre soldagem com eletrodo consumível e soldagem com eletrodo não consumível. No primeiro caso estão englobados os processos de soldagem com eletrodo revestido, processo de soldagem MIG/MAG, processo de soldagem com eletrodo tubular e processo de soldagem com arco submerso. Os processos que utilizam eletrodo não consumível são soldagem TIG e soldagem com plasma. Todos os processos citados podem ser utilizados para a soldagem dos aços inoxidáveis. A escolha vai depender de diversos fatores que serão abordados a seguir.

3) GUIA PARA ESCOLHER O PROCESSO DE SOLDAGEM PARA UMA APLICAÇÃO.

A escolha do processo de soldagem envolve basicamente quatro fatores:

- a) o projeto da junta (tipo, posição,...);
- b) a espessura do material;
- c) a natureza do material a ser soldado;
- d) o custo de fabricação (produtividade, qualidade da junta, durabilidade do produto...).

3.1) PROJETO DA JUNTA.

As juntas mais usuais são classificadas como: topo, ângulo, sobreposta e canto. Dependendo da espessura do material a ser soldado, as bordas podem ser preparadas com diversos processos, sejam a quente (oxicorte e plasma) ou a frio (jato de água, processos de usinagem). Se o material a ser soldado é um aço inox ou um não ferroso, dificilmente o processo de oxicorte seria utilizado. Da mesma maneira, no processo de preparação a quente das juntas de alguns materiais (aços baixa e média liga, aços inoxidáveis martensíticos, ligas de alumínio endurecíveis por precipitação,...), a zona afetada pelo calor deve ser eliminada, dependendo da aplicação desejada.

Conforme o tipo de junta e a sua localização no equipamento, o acesso de cada processo de soldagem deve ser levado em conta. De uma maneira geral, o processo de soldagem com eletrodo revestido possui uma acessibilidade muito melhor em juntas de localização difícil que o processo TIG e o processo MIG, porém as soldas obtidas com eletrodo revestido são de qualidade inferior. Da mesma maneira, a habilidade do soldador/operador em soldar a junta deve ser levada em conta. Por exemplo, o processo TIG com adição envolve uma habilidade do soldador muito maior que a necessária para executar uma junta com o processo MIG. Dependendo do equipamento de soldagem utilizado, o soldador TIG deve controlar a velocidade de deslocamento da tocha, a oscilação lateral da mesma, a alimentação do arame e, dependendo do equipamento, a corrente de soldagem no pedal. Por outro lado, no processo MIG, o soldador controla somente a velocidade de deslocamento da pistola e a oscilação lateral.

Outro fator a ser considerado é a penetração que foi projetada para o cordão de solda. As soldas podem ser de penetração parcial ou total e, dependendo do que foi projetado, exigem cuidados maiores na sua execução. O processo de soldagem MIG com transferência por spray apresenta uma penetração muito maior que o processo TIG. A quantidade de material fundido está associada à diluição do cordão. Por diluição entende-se a quantidade do metal de base que foi fundida e que participa da composição química do cordão de solda. Um cordão de solda pode ter 0% de diluição quando o metal de base não é fundido. Se a adição preenche completamente a espessura da junta, esta tem 100% de penetração e 0% de diluição, como no caso da brasagem. Um cordão tem 100% de diluição quando a soldagem é realizada sem adição, isto é, autogenamente. Da mesma maneira, o cordão tem 100% de diluição e pode ter uma penetração diferente de 100%, como uma solda somente de selagem.

Outro aspecto importante é a posição de soldagem. A soldagem nas posições sobre-cabeça e verticais ascendente e descendente apresenta uma dificuldade maior de execução do que nas posições plana e horizontal, devido a ação da gravidade. Nem todos os processos de soldagem são utilizados em todas as posições. Um processo versátil pode ser muito caro, dependendo dos requisitos de qualidade exigidos na construção de um equipamento. De novo, a habilidade do soldador deve ser levada em conta. Nem todos os soldadores são qualificados em diferentes processos, diversos materiais e diferentes posições de soldagem.

Dependendo do material há a necessidade de se utilizar cobre-junta. Por cobre-junta entende-se uma maneira de proteger o líquido contra a contaminação com a atmosfera e também que sustente fisicamente este líquido. A figura 2 apresenta esquematicamente um cobre-junta. Em ambos os casos a sua função é de proteger a raiz do cordão de solda. A sua natureza pode ser sólida (chapas ou anéis de aço ou cobre, peças de material cerâmico, etc) ou gasoso (gases inertes como o argônio e o nitrogênio). Ele pode ser temporário ou permanente, dependendo da aplicação envolvida. No caso de cobre-junta sólido temporário não pode haver ligação entre a raiz do cordão e o material do cobre-junta. A soldagem dos aços inoxidáveis exige a utilização de cobre junta. Este geralmente é gasoso ou fabricado com cobre ou material cerâmico. Neste caso deve-se tomar cuidado para não contaminar a poça de fusão com cobre durante a soldagem, gerando trincas de solidificação. Da mesma maneira, a utilização de nitrogênio como cobre-junta gasoso

pode modificar o teor de ferrita do cordão de solda dos aços inoxidáveis austeníticos, tornando-os mais suscetíveis a trincas no cordão.

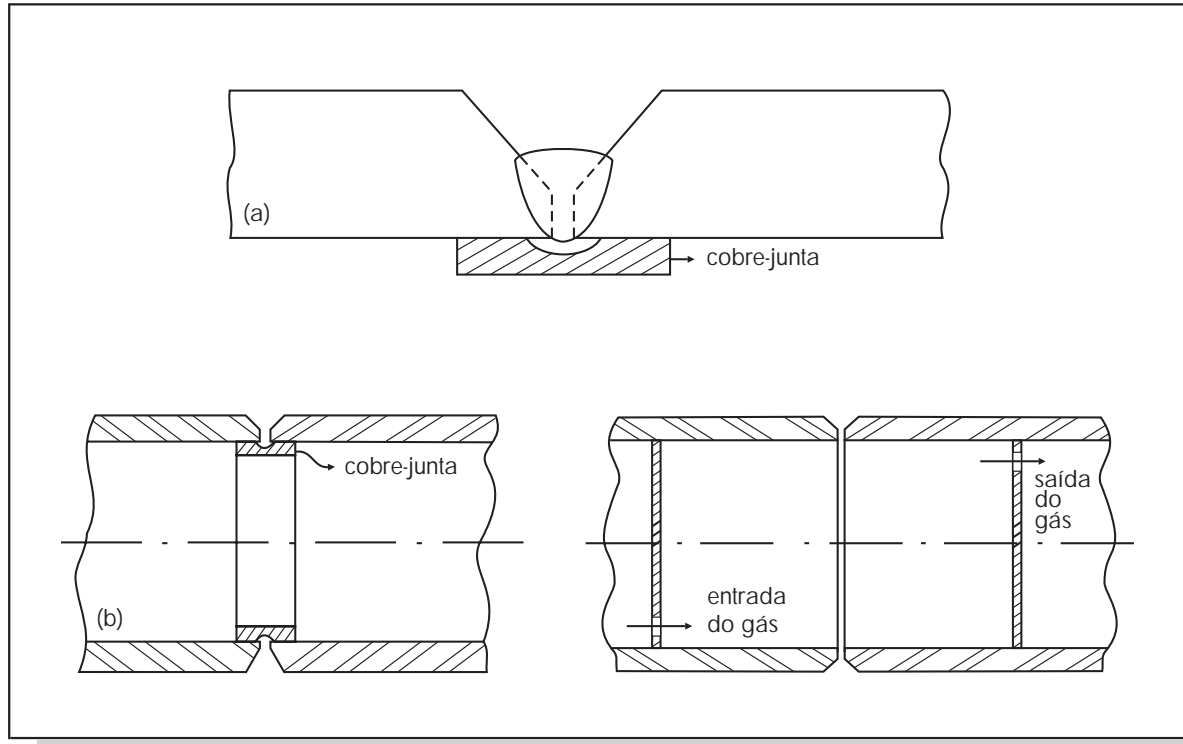


Fig. 2 - Esquema de um cobre-junta. Em (a) para uma junta entre duas chapas; (b) para uma junta entre dois tubos; em (c) um cobre-junta gasoso para uma junta entre dois tubos.

3.2) ESPESSURA DO MATERIAL.

Durante a concepção e o projeto da junta deve-se avaliar também a espessura do material a ser soldado. Dependendo dela é necessária a operação de preparação da borda da chapa (chanfro). Os chanfros podem ter os seguintes formatos: reto, V, X, $\frac{1}{2}V$, K, U, duplo U, J, duplo J, misto. A figura 3 apresenta a geometria de algumas juntas e chanfros utilizados na soldagem a arco.










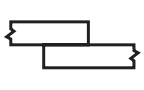
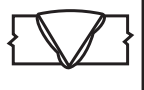




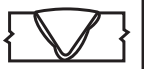

Tipos de Juntas		Tipos de Chanfros			
Topo					
Ângulo				Reto	Reto
Canto				1/2 V	K
Sobreposta				v	X
Aresta				j	Duplo j
				u	Duplo u

Fig. 3 - Geometria de chanfros utilizados na soldagem a arco elétrico.

Esses formatos estão relacionados com: acesso da raiz e facilidade de fusão das faces do chanfro. O acesso é determinado pelo processo de soldagem e pelas características geométricas do chanfro como: ângulo, dimensão da face de raiz, abertura de raiz, etc. A figura 4 ilustra as características geométricas de um chanfro.

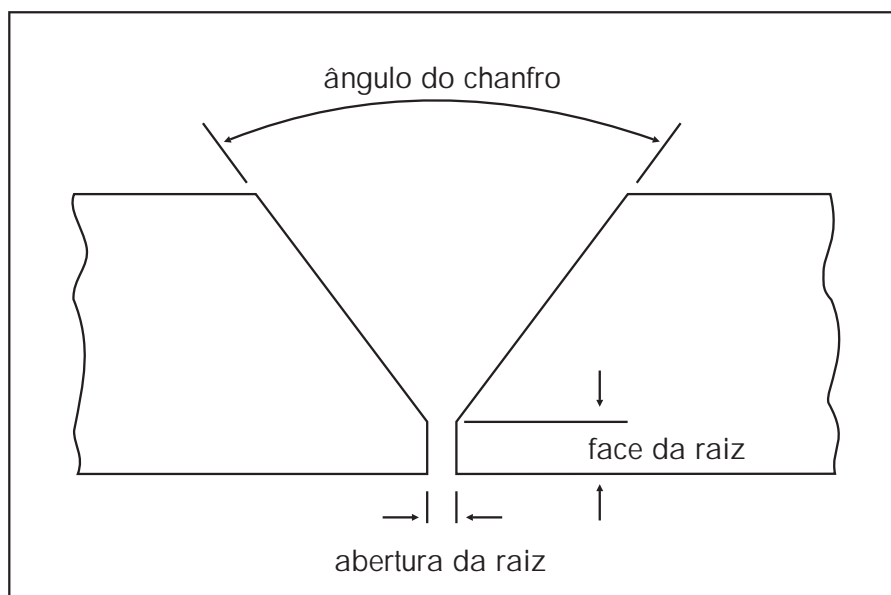


Fig. 4 - Esquema das partes de um chanfro.

A facilidade de fusão é conseguida através da redução, no chanfro, da espessura da chapa, isto é, da quantidade de material que deve ser fundido. Por exemplo, a soldagem de uma junta com chanfro com face de raiz exige menos habilidade do soldador do que uma junta

sem face de raiz. Por outro lado, a probabilidade de ocorrência de defeitos é muito maior na junta com o chanfro com face de raiz, principalmente se este tiver uma dimensão excessiva. A figura 5 compara estas três condições, supondo uma mesma energia produzida pelo arco elétrico.

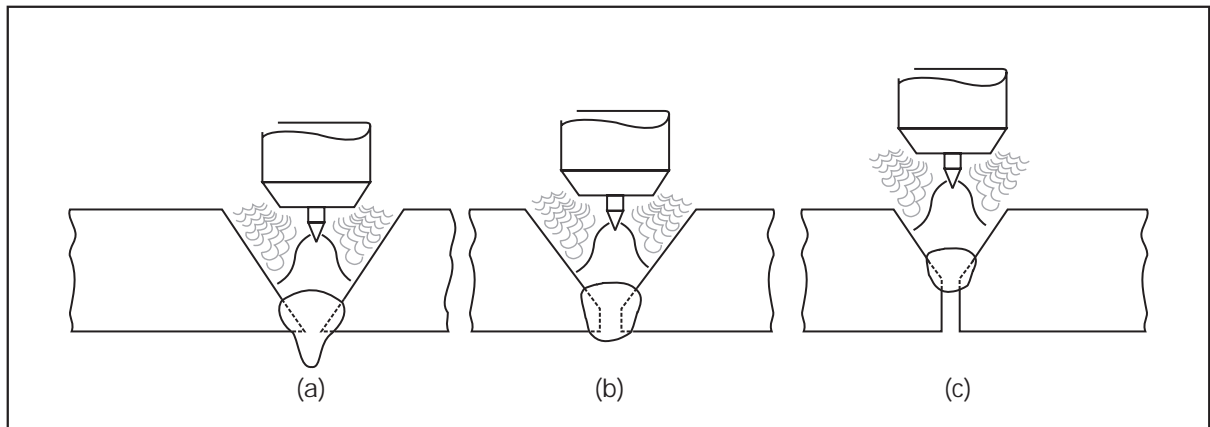


Fig. 5 - Comparação entre três geometria de cordão e a eventual formação de um defeito. Em (a) sem face de raiz; em (b) com a face de raiz correta e em (c) com face de raiz excessiva.

A espessura da chapa e a geometria da junta, em conjunto com o tipo de material e os parâmetros de soldagem, a velocidade de resfriamento da junta. Quanto mais fina for a chapa, mais lento será o seu resfriamento. Por outro lado, chapas grossas resfriam mais rapidamente. Este fato está associado com as direções de extração de calor na chapa. Quanto mais direções, menor o tempo de resfriamento. A figura 6 ilustra, esquematicamente, este fenômeno.

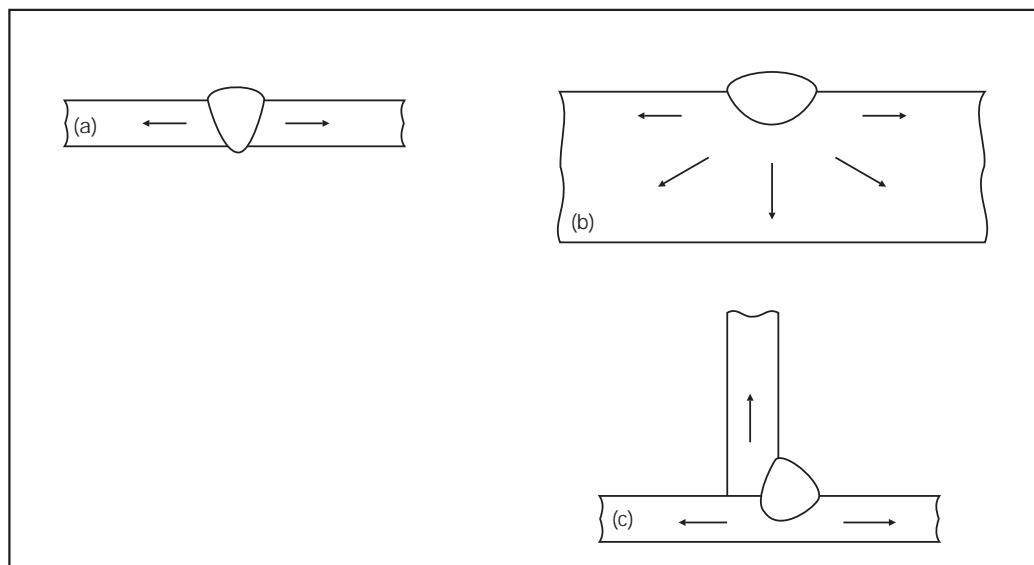


Fig. 6 - Direções de extração de calor durante a soldagem. Em (a) para chapa fina; (b) para chapa grossa; em (c) para uma junta em ângulo.

Analisando-se a figura 6(a) percebe-se que o tempo de resfriamento é maior (velocidade de resfriamento menor) que 6(b) e 6(c). Estas figuras apresentam uma quantidade maior de caminhos de extração de calor e, portanto, apresentam tempos de resfriamento menores (velocidades de resfriamento maiores). Dependendo do tipo de aço inox deseja-se um tempo de resfriamento maior (aço inox martensítico) ou menor (aços inoxidáveis austenítico e ferrítico)

3.3) NATUREZA DO MATERIAL.

Quando se fala na escolha do processo baseado no tipo de material deve-se ter em mente as seguintes características: propriedades físicas (condutividade térmica, coeficiente de expansão térmica linear, etc...); ponto de fusão (temperatura liquidus); reatividade do material com o ar e prováveis fragilizações do material durante a soldagem.

Materiais com condutividade térmica elevada como o cobre e o alumínio dissipam muito calor da junta para o metal base quando comparados aos aços carbono, aços inoxidáveis e ao titânio. Associando-se essa característica à espessura da chapa, fica praticamente impossível utilizar um processo de soldagem a gás para o cobre, por exemplo. Isso significa que a fonte de calor utilizada deve produzir uma quantidade mínima de energia térmica no local, para fundir as faces do chanfro.

O coeficiente de expansão térmica linear é importante para as soldagens de materiais dissimilares e também para os fenômenos de tensão residual e distorção de estruturas metálicas. De uma maneira bem simplificada, a tensão residual é diretamente proporcional ao módulo de elasticidade (E), coeficiente de expansão térmica linear (k) e a diferença entre a temperatura de fusão (liquidus) e a temperatura ambiente. Baseando-se neste fato, o aço ($E = 211 \text{ GPa}$, $k = 12,1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $T_f = 1535^\circ\text{C}$), o aço inox ferrítico ($E = 193 \text{ GPa}$, $k = 11,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $T_f = 1510^\circ\text{C}$), o aço inox austenítico ($E = 200 \text{ GPa}$, $k = 18,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $T_f = 1450^\circ\text{C}$) e as ligas de titânio ($E = 120 \text{ GPa}$, $k = 8,9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $T_f = 1678^\circ\text{C}$) são mais susceptíveis aos fenômenos de tensão residual e distorção ocorridos durante a soldagem que o alumínio ($E = 70 \text{ GPa}$, $k = 23,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $T_f = 660^\circ\text{C}$). Assim, comparando-se com a tensão residual gerada no alumínio (σ_{Al}) tem-se:

$$\sigma_{Al} = 1,7. \sigma_{Ti} = 3,1. \sigma_{\text{aço inox ferrítico}} = 3,7. \sigma_{\text{aço}} = 5,0. \sigma_{\text{aço inox austenítico}}$$

Metais e ligas com ponto de fusão muito elevados (Ti, Nb, Mo e W), que podem ser elementos de liga dos aços inoxidáveis, também apresentam restrições com relação ao tipo de fonte de calor utilizada para fundi-los. Se esse fator for associado à capacidade do material de reagir facilmente com o oxigênio, hidrogênio, nitrogênio e carbono, começa-se a ter restrições com relação à presença de escória no processo de soldagem ou a utilização de processos com gás de proteção considerado ativo para o material a ser soldado. Por exemplo, para a soldagem do titânio recomenda-se um gás de proteção com teores baixos de umidade e procura-se durante a soldagem minimizar a contaminação da atmosfera do arco com o ar. Outro exemplo é a falta de proteção na raiz do cordão de solda dos aços inoxidáveis. Caso a raiz esteja exposta ao meio, haverá uma queima local de cromo, identificada por uma aparência

preta e bastante rugosa. Esta região pode ser removida facilmente com uma lixadeira sem alterar a aparência do cordão. Apesar de não apresentar nenhuma diferença com a parte sã do aço inox, a resistência a corrosão fica bastante reduzida.

Com relação a mudanças nas propriedades mecânicas e de corrosão durante a soldagem, a escolha do tipo de fonte de energia também é importante. Quanto mais concentrada for a fonte, menor será a extensão da região aquecida e, conseqüentemente, menores serão as mudanças nas propriedades da junta. A concentração da fonte de energia é medida pela potência específica (W/m^2). A potência específica dos processos TIG, plasma e MIG é da ordem de $10^4 W/m^2$, enquanto que para a soldagem oxigás obtém-se valores da ordem de $10^2 W/m^2$. A figura 7 apresenta esquematicamente as potências específicas dos processos de soldagem citados.

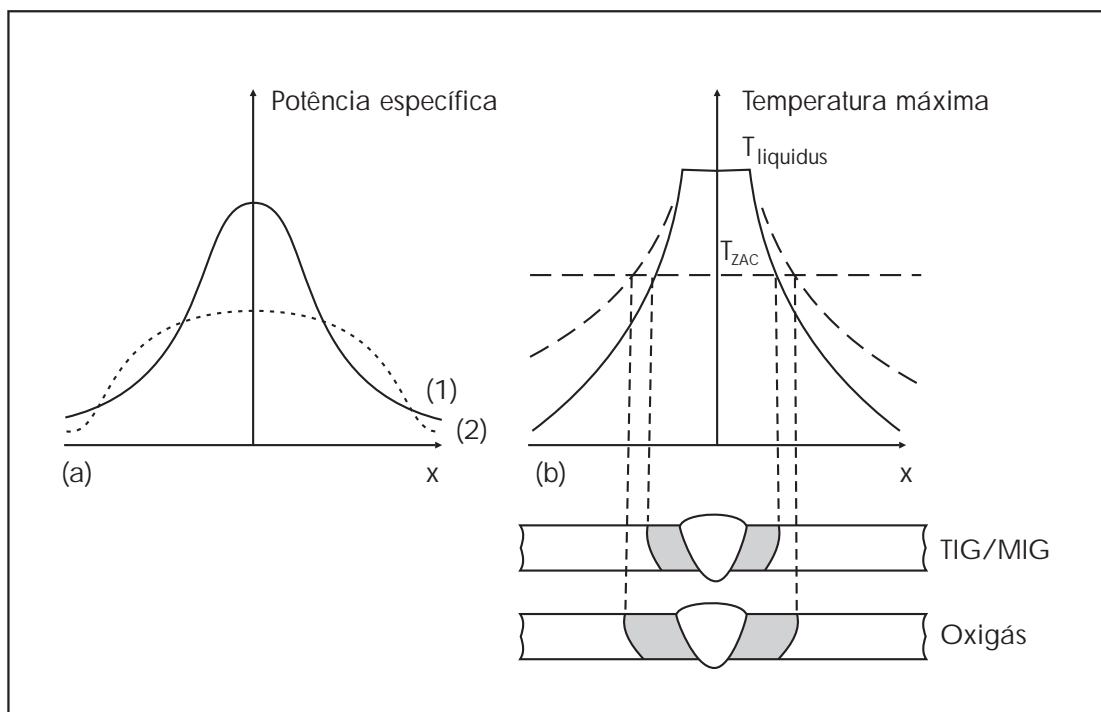


Fig. 7 - Em (a) potência específica dos processos de soldagem TIG e MIG(1) e oxigás (2); em (b) a relação com a extensão da zona afetada pelo calor.

A concentração da fonte de energia está relacionada com a expansão da região aquecida e, conseqüentemente, da extensão da zona afetada pelo calor. Assim, a soldagem TIG é mais recomendada para soldar aços inoxidáveis que a soldagem oxigás, levando-se em conta somente a potência específica e não a qualidade da junta soldada. Isto significa que a soldagem oxigás de um aço inox austenítico produzirá um cordão com uma zona afetada pelo calor muito maior além de empenar a peça.

3.4) CUSTO.

O custo do equipamento deve ser baseado na sua aplicação. Dependendo dela, os requisitos de qualidade podem ser mais ou menos rigorosos. Isso significa que um processo que é caro para uma dada aplicação com muito pouca responsabilidade pode ser barato para uma outra aplicação. Como exemplo pode-se citar a soldagem TIG autógena de tubos de pequena espessura de alumínio para fins nucleares, apesar do custo elevado do gás.

Outro fator muito desejado é o aumento da produtividade sem a perda da qualidade. Nesses casos, a taxa de deposição dos processos de soldagem é bastante importante. Pode-se optar por variantes de processos, como o TIG com arame aquecido, que possui taxa de deposição próxima do MIG, porém com a qualidade do processo TIG.

3.5) EXEMPLO DE APLICAÇÃO.

Supondo a seguinte situação: soldagem de uma chapa de um equipamento, projetado em aço inox austenítico, para aplicação na indústria alimentícia, junta topo-a-topo em chapa com 3 mm de espessura, 2 passes, chanfro em V com 45°, sem face de raiz e sem abertura da junta, comprimento de 1 m, posição vertical ascendente, 1200 peças/mês e disponibilidade de 1 soldador trabalhando 8h/dia. Os processos prováveis para realizar esta operação de soldagem estão apresentados na tabela 2.

Tabela 2 - Características dos processos de soldagem prováveis para realizar a tarefa proposta.

Processo de soldagem	Características				
	Taxa de deposição (kg/h)	Posição	Custo do equipamento ⁽¹⁾	Habilidade do soldador ⁽²⁾	Materiais soldáveis
Eletrodo revestido	0,5-5,0	todas ⁽³⁾	1	M-G	aços, não ferrosos
TIG	0,2-1,5	todas	1,5-10	M-G	aços, não ferrosos
Plasma	0,5-2,5	todas	5-10	M	aços, não ferrosos
MIG	1,0-15,0	todas ⁽⁴⁾	5-10	P	aços, não ferrosos

Legenda: (1) Custo relativo ao equipamento de soldagem com eletrodo revestido; (2) P = pouca; M = moderada; G = grande; (3) depende do tipo de revestimento e do diâmetro do eletrodo; (4) depende do tipo de transferência metálica utilizado.

O volume de material depositado no chanfro, supondo que não exista reforço do cordão de solda, é de $3,6 \text{ cm}^3/\text{peça}$. Admitindo-se a densidade do aço igual a $7,8 \text{ g/cm}^3$ e os valores mínimos da taxa de deposição da tabela 2 tem-se os seguintes tempos de produção:

- Eletrodo revestido = 8 dias de trabalho;
- TIG = 20,5 dias de trabalho;
- Plasma = 8 dias de trabalho;
- MIG = 4 dias de trabalho.

A princípio, os quatro processos são adequados para a fabricação das peças. Como a aplicação é na indústria alimentícia, os processos que geram escória devem ser descartados, a fim de eliminar qualquer risco de contaminação dos alimentos. Assim, o processo de soldagem com eletrodo revestido deve ser eliminado.

O processo MIG é o mais rápido de todos. Como a soldagem é fora de posição (vertical ascendente), a escolha deste processo será função da habilidade do soldador com este processo e da capacidade de regulagem da máquina de soldagem para esta posição.

Os processos de soldagem com plasma e TIG são os que apresentam melhor qualidade da junta soldada. O soldador tem que ter uma habilidade no mínimo moderada. A diferença entre os tempos de produção é bastante grande, mas os equipamentos para soldagem com plasma são muito mais caros. O processo TIG pode ser o mais indicado para as condições propostas.

Na prática, às vezes, utiliza-se um processo de qualidade superior e baixa produtividade para realizar o passe de raiz. Emprega-se um processo que possui qualidade inferior para preencher o restante da junta. Esta solução é empregada no caso de somente o passe de raiz ter contato com o meio corrosivo. Se ambos os lados estiverem em contato, outras soluções devem ser estudadas.

4) PROCESSOS USUAIS DE SOLDAGEM DE AÇOS INOXIDÁVEIS.

4.1) SOLDAGEM COM ELETRODO REVESTIDO.

O processo de soldagem com eletrodo revestido é um processo de soldagem a arco elétrico produzido entre um eletrodo revestido e a peça a ser soldada. Esse eletrodo é constituído de uma alma metálica, que se funde, e um revestimento composto de materiais orgânicos e inorgânicos, que têm as seguintes funções:

- a) estabilizar o arco elétrico, promovendo uma transferência relativamente uniforme das gotas metálicas;
- b) gerar gases para proteção da poça de fusão líquida;
- c) produzir escória com o intuito de refinar a poça de fusão e proteger a poça de fusão e o cordão de solda da contaminação com o ar atmosférico durante a solidificação e o resfriamento;
- d) adicionar elementos de liga na poça de fusão;
- e) facilitar a soldagem fora de posição;
- f) facilitar a fabricação dos eletrodos revestidos.

Um desenho esquemático do processo de soldagem com eletrodo revestido está mostrado na figura 8.

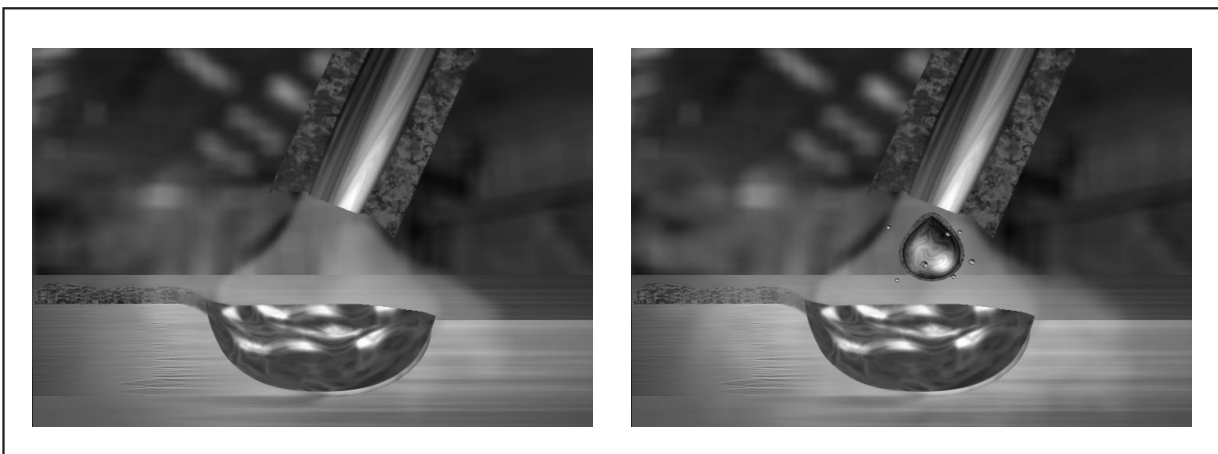


Fig. 8 - Esquema do processo de soldagem com eletrodo revestido.

As características do processo de soldagem com eletrodo revestido estão apresentadas na tabela 3.

Tabela 3 - Características do processo de soldagem com eletrodo revestido.

Tipo de operação: <ul style="list-style-type: none"> Manual 	Equipamentos: <ul style="list-style-type: none"> Fonte de energia Porta eletrodos
Características: <ul style="list-style-type: none"> Taxa de deposição: 0,5 a 5,0 kg/h Espessuras soldáveis: 2 mm Posições de soldagem: depende do tipo de revestimento Diluição: 10 a 30 % com adição Tipo de junta: todas Faixa de corrente: 50 a 300 A 	Custo do equipamento: <ul style="list-style-type: none"> 1 (referência para os outros processos de soldagem a arco)
	Consumíveis: <ul style="list-style-type: none"> eletrodos revestidos com diâmetro entre 1 e 6 mm.
Vantagens: <ul style="list-style-type: none"> baixo custo do equipamento versatilidade soldagem em locais de difícil acesso disponibilidade de consumíveis no mercado 	Limitações: <ul style="list-style-type: none"> baixa produtividade devido a taxa de deposição necessidade de remoção de escória dependente da habilidade do soldador produção de fumos e respingos qualidade do cordão de solda inferior aos processos TIG/ plasma e MIG posição de soldagem restrita (dependendo do diâmetro e tipo de revestimento do eletrodo) não automatizável
Segurança: <ul style="list-style-type: none"> proteção ocular emissão de radiação ultravioleta risco de choque elétrico inalação de gases e fumos provenientes da atmosfera gerada pela decomposição do revestimento queimaduras produzidas por respingos ou escória em alta temperatura 	

4.2) PROCESSO DE SOLDAGEM TIG.

O processo de soldagem TIG é definido como o processo de soldagem a arco elétrico estabelecido entre um eletrodo não consumível a base de tungstênio e a peça a ser soldada. A poça de fusão é protegida por um fluxo de gás inerte. O nome TIG é originado das iniciais da nomenclatura do processo em inglês: **Tungsten Inert Gas**. Neste processo a adição é feita externamente, manual ou automatizada. A figura 9 mostra esquematicamente o processo de soldagem TIG.

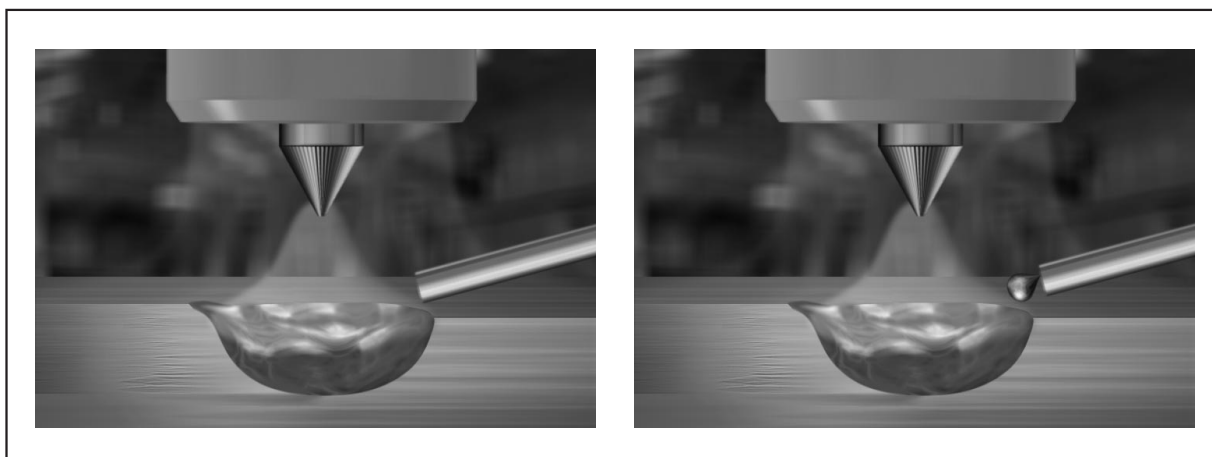


Fig. 9 - Esquema do processo de soldagem TIG.

As características do processo de soldagem TIG estão apresentadas na tabela 4.

Tabela 4 - Características do processo TIG.

<p>Tipo de operação:</p> <ul style="list-style-type: none"> Manual ou automática 	<p>Equipamentos:</p> <ul style="list-style-type: none"> Fonte de energia Cilindro de gases Tocha Fluxômetros para medir vazão do gás
<p>Características:</p> <ul style="list-style-type: none"> Taxa de deposição: 0,2 a 1,5 kg/h Espessuras soldáveis: 0,1 a 12 mm Posições de soldagem: todas Diluição: 2 a 20 % com adição Tipo de junta: todas Faixa de corrente: 10 a 300 A 	<p>Custo do equipamento:</p> <ul style="list-style-type: none"> 1,5 a 10 vezes o custo do equipamento de soldagem com eletrodo revestido <p>Consumíveis:</p> <ul style="list-style-type: none"> Gás de proteção Metal de adição Bocal de cerâmica (Eletrodo de tungstênio)
<p>Vantagens:</p> <ul style="list-style-type: none"> Soldas de excelente qualidade Acabamento do cordão de solda Menor aquecimento da peça soldada Baixa sensibilização à corrosão intergranular Ausência de respingos Pode ser automatizado 	<p>Limitações:</p> <ul style="list-style-type: none"> Dificuldade de utilização em presença de corrente de ar Inadequado para soldagem de chapas com mais de 6 mm de espessura Produtividade baixa devido a taxa de deposição Custo Processo dependente da habilidade do soldador, quando não automatizado.
<p>Segurança:</p> <ul style="list-style-type: none"> Proteção ocular Emissão intensa de radiação ultravioleta Risco de choque elétrico 	

Dependendo do tipo de aço inox, utiliza-se diferentes gases de proteção. Somente para os aços inoxidáveis austeníticos pode-se empregar o hidrogênio na mistura gasosa. Este gás tem a função de tornar o arco mais direcionado. A sua utilização na soldagem dos outros tipos de aços inoxidáveis pode causar a fragilização da junta soldada. A tabela 5 apresenta alguns exemplos de gases utilizados na soldagem de aços inoxidáveis.

Tabela 5 - Exemplos de gases de proteção.

Metal de base	Processo manual	Processo automático
Aço inox austenítico	Argônio	Argônio + 5% H ₂
Aço inox ferrítico	Argônio	Argônio
Aço inox martensítico	Argônio	Argônio

4.3) PROCESSO DE SOLDAGEM COM PLASMA.

O processo de soldagem com plasma é um aperfeiçoamento do processo TIG. Neste processo, o arco elétrico é comprimido por uma vazão adicional de gás. Com isto, ele torna-se mais concentrado, aumentando a velocidade de soldagem e, conseqüentemente, a taxa de deposição. Neste processo pode-se soldar com duas técnicas: convencional (similar ao TIG) e buraco de fechadura (key hole). Nesta técnica a poça de fusão é mais estreita e possui um furo passante através do metal de base. Ela é empregada para a soldagem de chapas mais espessas. O processo tem as mesmas vantagens e desvantagens do TIG, com exceção da espessura limite das chapas e da taxa de deposição. A figura 10 apresenta um esquema do processo de soldagem com plasma.

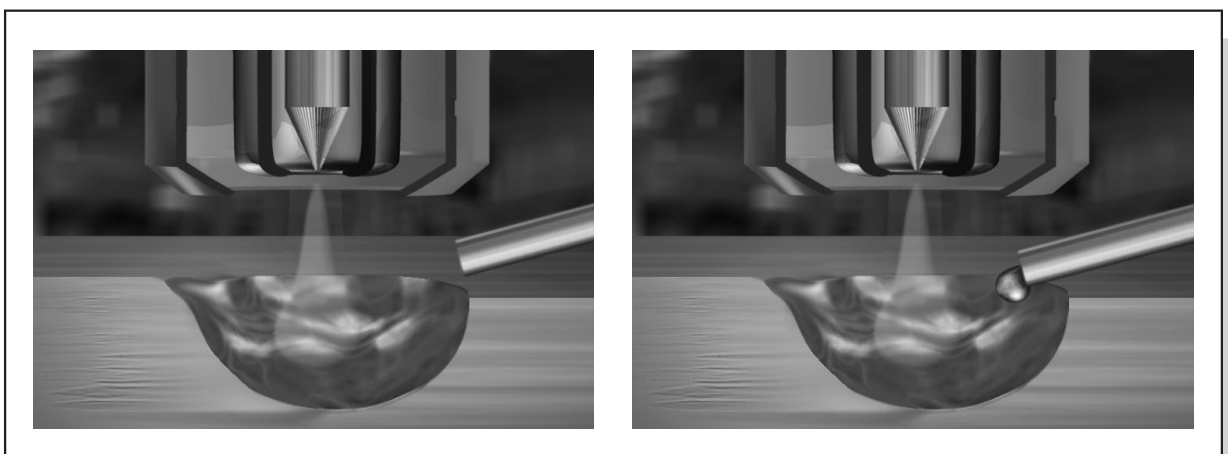


Fig. 10 - Esquema do processo de soldagem com plasma.

As características do processo de soldagem com plasma estão apresentadas na tabela 6.

Tabela 6 - Características do processo de soldagem com plasma.

Tipo de operação: <ul style="list-style-type: none"> Manual ou automática 	Equipamentos: <ul style="list-style-type: none"> Fonte de energia Cilindro de gases Tocha Fluxômetros para medir vazão do gás
Características: <ul style="list-style-type: none"> Taxa de deposição: 0,5 a 2,5 kg/h Espessuras soldáveis: 1 a 12 mm (plasma) Posições de soldagem: todas Diluição: 20 a 40 % com adição Tipo de junta: topo-a-topo (chanfro reto) Faixa de corrente: 1 a 500 A 	Custo do equipamento: <ul style="list-style-type: none"> 5 a 10 vezes o custo do equipamento de soldagem com eletrodo revestido Consumíveis: <ul style="list-style-type: none"> Gás de plasma Gás de proteção Metal de adição (Bocal de cobre e de cerâmica) (Eletrodo de tungstênio)
Vantagens: <ul style="list-style-type: none"> Soldas de excelente qualidade Soldagem de espessuras grandes (>6 mm) em um único passe. Velocidade de soldagem maior que o TIG 	Limitações: <ul style="list-style-type: none"> Custo Equipamento complexo Difícil controle do processo
Segurança: <ul style="list-style-type: none"> Proteção ocular Emissão intensa de radiação ultravioleta 	

Uma sugestão de gases utilizados na soldagem com plasma de aços inoxidáveis está apresentado na tabela 7.

Tabela 7 - Sugestão de gases utilizados na soldagem com plasma de aços inoxidáveis.

Metal de base	Técnica convencional		Técnica do buraco de fechadura	
	Gás de plasma	Gás de proteção	Gás de plasma	Gás de proteção
Aço inox austenítico	Argônio	Argônio + 5-7% H_2	Argônio	Argônio + 5-7% H_2
Aço inox ferrítico	Argônio	Argônio	Argônio	Argônio
Aço inox martensítico	Argônio	Argônio	Argônio	Argônio

4.4) PROCESSO DE SOLDAGEM MIG.

No processo de soldagem MIG o arco elétrico é aberto entre um arame alimentado continuamente e o metal de base. O nome MIG vem das iniciais do nome do processo em inglês: **Metal Inert Gas**. Assim, a região fundida é protegida por um gás inerte ou mistura de gases (argônio, CO_2 , hélio ou O_2). A soldagem é realizada com o arame na polaridade positiva. A figura 11 mostra esquematicamente o processo de soldagem MIG.

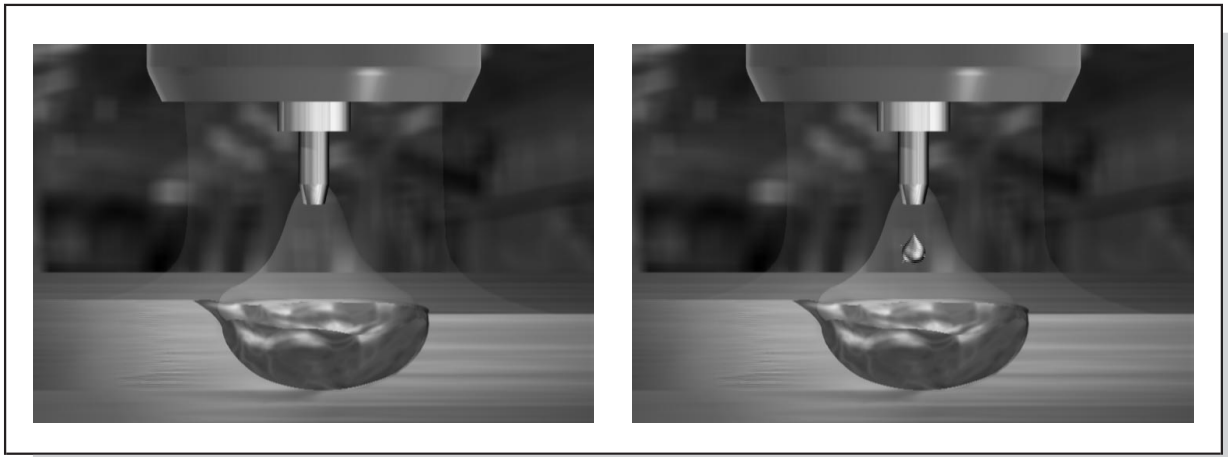


Fig. 11 - Esquema do processo de soldagem MIG.

As características do processo MIG estão apresentadas na tabela 8.

Tabela 8 - Características do processo de soldagem MIG.

<p>Tipo de operação:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Semi-automática ou automática 	<p>Equipamentos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fonte de energia • Alimentador de arame • Cilindro de gás • Pistola • Fluxômetros para medir vazão do gás
<p>Características:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Taxa de deposição: 1 a 15 kg/h • Espessuras soldáveis: 1,5 mm mínimo na soldagem automática e 3,0 mm na soldagem semi-automática • Posições de soldagem: todas (depende da regulagem do equipamento) • Diluição: 10 a 30 % com adição • Tipo de junta: todas • Faixa de corrente: 60 a 400 A 	<p>Custo do equipamento:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 5 a 10 vezes o custo do equipamento de soldagem com eletrodo revestido
	<p>Consumíveis:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Arame sólido • Gás de proteção • Tubo de contato e bocal
<p>Vantagens:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Facilidade de operação • Alta produtividade • Processo automatizável • Baixo custo • Não forma escória • Cordão de solda com bom acabamento • Gera pouca quantidade de fumos • Soldas de excelente qualidade 	<p>Limitações:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Regulagem do processo bastante complexa • Não deve ser utilizado em presença de corrente de ar • Posição de soldagem limitada • Probabilidade elevada de gerar porosidade no cordão de solda • Produção de respingos • Manutenção mais trabalhosa
<p>Segurança:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Proteção ocular • Emissão intensa de radiação ultravioleta • Risco de choque elétrico • Queimaduras produzidas por respingos em alta temperatura 	

Neste processo, a maneira e o tamanho das gotas de material fundido que atravessa o arco elétrico é importante para a qualidade da junta soldada por este processo. Basicamente existem quatro modos de transferência metálica no processo MIG: globular, curto-circuito, spray e pulsada. Cada um destes modos apresenta uma característica de transferência diferente. A transferência por curto-circuito, como o próprio nome diz, envolve o curto-circuito instantâneo, causado entre a gota e a poça de fusão. A diferença básica entre a transferência por curto-circuito e a transferência globular é a distância entre a ponta do eletrodo e a poça de fusão. No segundo modo, esta distância é suficiente para que a gota viaje através do arco sem realizar nenhum curto-circuito. Na transferência por spray, as gotas são muito pequenas e são desprendidas com uma velocidade bastante elevada. Na transferência por arco pulsado, a corrente varia entre dois valores, um alto (corrente de pico) e outro baixo (corrente de base). A gota é destacada somente na corrente de pico e tem características próximas da gota transferida por spray. Estes modos são função dos parâmetros de soldagem como corrente e tensão do arco e da natureza do gás, ou mistura de gases utilizados neste processo. A tabela 9 apresenta as principais características dos modos de transferência metálica do processo MIG.

Tabela 9 - Características dos modos de transferência metálica na soldagem MIG.

Modo de transferência	Tensão do arco	Densidade de corrente	Energia de soldagem	Soldagem fora de posição	Penetração
curto-circuito	baixa	baixa	baixa	sim	pequena
globular	média	baixa	média	não	média
spray	alta	alta	alta	depende	grande
pulsada	alta	média	média	sim	grande

A proteção gasosa tem a função de evitar a contaminação da poça de fusão pelo ar atmosférico. Tanto no processo MIG como nos processos TIG e plasma a soldagem em campo deve ser realizada com cautela. Isto porque correntes de ar podem deslocar a proteção gasosa e, conseqüentemente, comprometer a proteção da região que está sendo fundida. Assim, podem aparecer defeitos como porosidade, falta de fusão, falta de penetração, etc. Algumas misturas gasosas utilizadas na soldagem MIG dos aços inoxidáveis estão apresentadas na tabela 10.

Tabela 10 - Misturas gasosas para a soldagem MIG dos aços inoxidáveis.

Mistura de gás*	Tipo de transferência		Observação
	curto-circuito	spray	
Ar + 1 - 3 % O ₂	regular	bom	-
Ar + 1 - 5 % CO ₂	bom	bom	alguma adição de carbono
Ar + 30% He + 1 % O ₂	muito bom	bom	aplicação em processos automáticos

* outras misturas podem ser utilizadas, dependendo da aplicação e do material a ser soldado.

4.5) SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA.

Ao contrário dos outros processos, a soldagem por resistência elétrica utiliza o aquecimento por efeito Joule para realizar a fusão da face comum entre as duas chapas. O efeito Joule ocorre pela geração de calor através da passagem de corrente elétrica em uma resistência. Este fenômeno é utilizado para aquecer a água em chuveiros elétricos. No caso da soldagem, a maior resistência está localizada exatamente na superfície interna das chapas, utilizando-se as condições corretas de soldagem. Com a aplicação da pressão pelos eletrodos de cobre e a posterior passagem de corrente, ocorre a fusão desta face em comum, formando o ponto. A figura 12 apresenta um esquema deste processo.

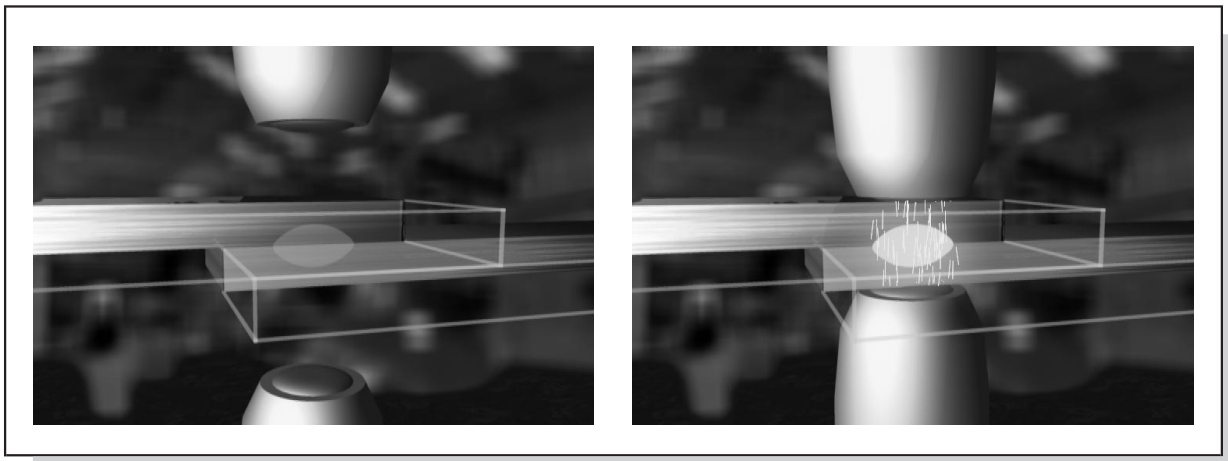


Fig. 12 - Esquema do processo de soldagem por resistência elétrica a ponto.

Este processo apresenta uma série de variantes, porém todas utilizando a corrente elétrica e a aplicação de pressão. Dentre os processos é interessante ressaltar a soldagem de tubos com costura (ERW). Neste caso, a corrente elétrica induz correntes na superfície dos chanfros, fundindo o material. Com a aplicação da pressão, a região fundida é quase que totalmente expulsa, produzindo um cordão de solda com uma zona fundida bastante reduzida, ou inexistente, e uma zona afetada pelo calor bem estreita.

As características gerais dos processos de soldagem por resistência estão apresentadas na tabela 11.

Tabela 11 - Características dos processos de soldagem por resistência elétrica.

Tipo de operação: <ul style="list-style-type: none"> Automática 	Equipamentos: <ul style="list-style-type: none"> Fonte de energia Eletrodos de liga de cobre
Características: <ul style="list-style-type: none"> Velocidade de soldagem: 0,1 s por ponto 10 cm/s (costura) Espessuras soldáveis: de 1,0 mm a 3,0 mm Posições de soldagem: todas (depende da geometria da peça e da flexibilidade do equipamento) Diluição: 100 % Tipo de junta: sobreposta (ponto) ou topo-a-topo (costura) Faixa de corrente: 10.000 a 50.000 A 	Custo do equipamento: <ul style="list-style-type: none"> 10 a 30 vezes o custo do equipamento de soldagem com eletrodo revestido Consumíveis: <ul style="list-style-type: none"> Não se aplica
Vantagens: <ul style="list-style-type: none"> Soldagem de chapas muito finas Facilidade de operação Velocidade do processo elevada Facilidade para automação Não depende da habilidade do soldador 	Desvantagens: <ul style="list-style-type: none"> Não aceita peças com formatos muito complexos e pesadas Custo elevado do equipamento e da manutenção Demanda de energia elétrica durante a soldagem
Segurança: <ul style="list-style-type: none"> Risco de choque elétrico Risco de acidentes no posicionamento das peças antes da soldagem, no caso de operação manual 	

4.6) COMPARAÇÃO ENTRE OS PROCESSOS DE SOLDAGEM.

Para uma compreensão maior, algumas características dos processos de soldagem foram agrupadas na tabela 12.

Tabela 12 - Comparação entre os processos usuais utilizados na soldagem dos aços inoxidáveis.

Variáveis do processo		Eletrodo revestido	TIG	Plasma	MIG	Resistência elétrica
Espessura (mm)	mín.	2,0	0,3	1,0	0,7	0,5
	máx.	SL	6,0	12,0	SL	3,0
Posição de soldagem		T	T	T	Depende	T
Geometria da junta	simples	S	S	S	S	S
	complexa	S	S	S	S	N
Comprimento do cordão		SL	SL	SL	SL	NA
Taxa de deposição (kg/h)		0,5 a 5,0	0,2 a 1,5	0,5 a 2,5	1,0 a 15,0	NA
Materiais soldáveis		T	T	T	NT	NT
Ambiente aberto		S	N	N	N	S
Habilidade do soldador		maior	maior	maior	menor	menor
Automação		S	S	S	S	S
Custo relativo		1	1,5 a 10	5 a 10	5 a 10	10 a 30

Legenda: SL = sem limite; T = todas; S = sim; N = não; NA = não aplicável; NT = nem todos.

5) SOLDABILIDADE DOS AÇOS INOXIDÁVEIS.

5.1) CONCEITO DE SOLDABILIDADE.

O conceito de soldabilidade é bastante abrangente. Ele pode ser definido como “ a facilidade com que uma junta soldada é fabricada de tal maneira que preencha os requisitos de um projeto bem executado “. Em outras palavras, a junta soldada deve estar isenta de defeitos que prejudicam a performance da peça ou equipamento. Por esta definição, a soldabilidade envolve não somente os aspectos da fabricação do componente soldado, bem como o seu desempenho em serviço. Para melhor compreensão, o conceito de soldabilidade será dividido em três: soldabilidade operacional, soldabilidade metalúrgica e soldabilidade em serviço. Apesar da sub-divisão, deve-se ter em mente que os três conceitos que serão apresentadas fazem parte de uma única propriedade, e estão todos inter-relacionados.

A soldabilidade operacional está associada com a fabricação das juntas do equipamento. Este aspecto da soldabilidade envolve as particularidades de um processo de soldagem, a habilidade do soldador em soldar em diversas posições e diversos materiais, as características do material a ser soldado e a versatilidade do processo de soldagem.

A soldabilidade metalúrgica envolve transformações de fase que ocorrem no material durante o aquecimento, a fusão, a solidificação e o seu resfriamento. Esta subdivisão da soldabilidade é a mais relacionada com a metalurgia da soldagem. Ela está relacionada com a natureza do material e com a transferência de calor na junta soldada e como a combinação deles pode afetar o desempenho da junta soldada. Em outras palavras, este aspecto da soldabilidade determina a durabilidade e o desempenho da peça ou equipamento soldado.

Pela definição de soldabilidade de um material, a aplicação em serviço é o objetivo final da escolha dos materiais e procedimentos corretos para o bem que está sendo projetado e construído. Caso ocorra algum erro ou na especificação dos materiais envolvidos na fabricação ou no procedimento, o equipamento poderá ter uma falha em serviço prematura. Esta divisão da soldabilidade deixa de ter sentido quando todo o processo de projetar, fabricar e a aplicação são bem conhecidos e devidamente controlados.

Resumindo, a soldabilidade envolve desde aspectos relacionados com a habilidade do soldador ou do operador até o controle correto de todas as etapas envolvidas no processo de fabricação. As subdivisões da soldabilidade podem ser visualizadas na figura 13.

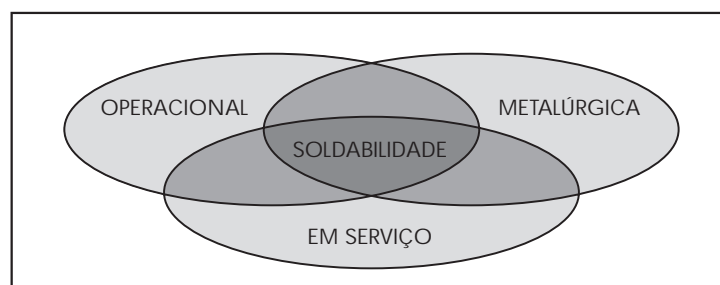


Fig. 13 - Subdivisões do conceito de soldabilidade.

5.2) SOLDABILIDADE DOS AÇOS INOXIDÁVEIS.

Quando se diz que um material tem uma soldabilidade ruim, ou que é difícil de ser soldado, o que está sendo dito, na realidade, é que a soldagem deste material envolve uma série de cuidados. Em poucos casos significa que o material não é soldável. Os aços inoxidáveis são materiais que apresentam uma boa soldabilidade, que exigem alguns poucos cuidados durante a soldagem.

A soldabilidade dos aços inoxidáveis é função do tipo de aço inox. Cada um dos grupos apresenta características próprias com relação a soldabilidade. A tabela 13 apresenta alguns problemas de soldabilidade metalúrgica dos aços inoxidáveis.

Além dos problemas de soldabilidade apresentados na tabela 13, que são geralmente de origem metalúrgica, existem outros tipos de descontinuidades introduzidas no cordão de solda, que também afetam o desempenho da junta soldada. A seguir serão tratadas algumas das fragilizações apresentadas nesta tabela.

Tabela 13 - Alguns problemas na soldabilidade metalúrgica dos aços inoxidáveis.

Tipo de aço inox	Problema	Solução
Ferrítico	• sensitização	• material adequado (estabilizado ao titânio ou ao nióbio); reduzir a energia de soldagem.
	• fragilização por hidrogênio	• utilizar procedimento que introduzam pouco hidrogênio durante a soldagem.
	• crescimento de grão	• procedimento com energia de soldagem a menor possível
Austenítico	• sensitização	• material adequado (baixo carbono ou estabilizado ao titânio ou nióbio); reduzir a energia de soldagem.
	• trincas à quente (trinca de: solidificação, liquação e reaquecimento)	• utilizar aço com teor baixo de enxofre e fósforo; utilizar metais de adição que gerem um teor de ferrita ao redor de 8% no cordão de solda; modificar a geometria da junta para reduzir tensões introduzidas durante a soldagem.
Martensítico	• fragilização por hidrogênio	• utilizar procedimento que introduzam pouco hidrogênio durante a soldagem; utilizar técnicas que reduzam a velocidade de resfriamento da junta (pré-aquecimento, pós-aquecimento).

5.3) SENSITIZAÇÃO.

A sensitização é caracterizada por um ataque localizado de contornos de grão. Estes locais apresentam regiões adjacentes empobrecidas em cromo devido a precipitação de fases ricas neste elemento, como os carbonetos de cromo. Caso o teor de cromo desta região fique

abaixo de 11%, elas serão corroídas preferencialmente. Este tipo de fragilização ocorre quando o material fica exposto na faixa de temperatura de 600 a 900°C. Nesta condição, a precipitação de carbonetos é bastante favorecida, produzindo a região sensitizada. A figura 14 apresenta um esquema da sensitização ocorrendo na zona afetada pelo calor de um cordão de solda.

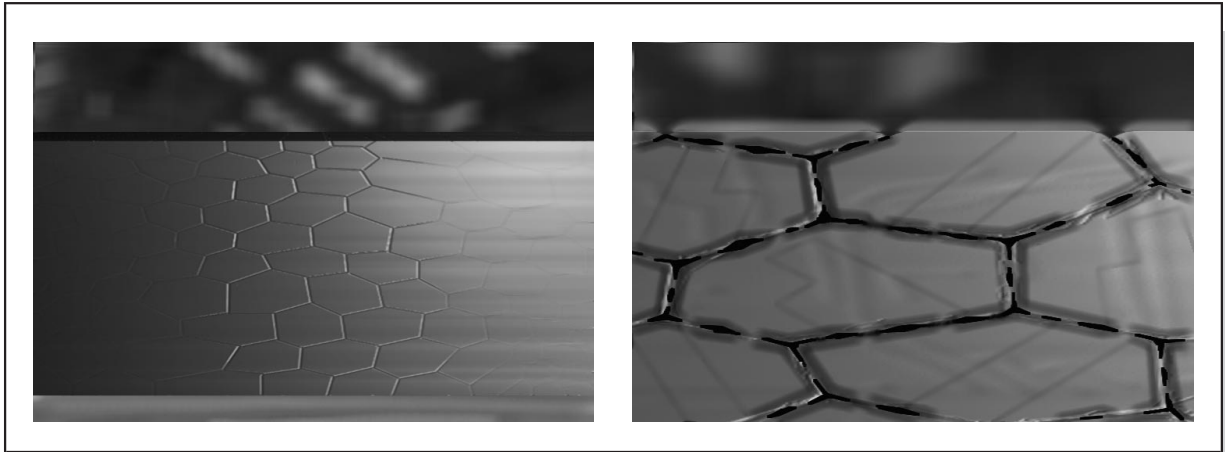


Fig. 14 - Representação esquemática da sensitização em um aço inox.

Este fenômeno ocorre tanto nos aços inoxidáveis austeníticos como nos ferríticos. Para evitar este problema deve-se utilizar um aço inox com teor mais baixo de carbono (os aços grau L); utilizar elementos que possuam uma afinidade maior com o carbono que o cromo (aços inoxidáveis estabilizados ao titânio e ao nióbio) ou um tratamento de solubilização dos carbonetos, após a soldagem.

5.4) CORROSÃO-SOB-TENSÃO.

A corrosão-sob-tensão (CST) é um tipo de fenômeno que leva a propagação de uma trinca por processos que não envolvem grandes deformações plásticas da estrutura. Ela ocorre para uma combinação específica entre um material e um meio e requer a presença de tensões residuais de tração. Devido a estas características não existe uma explicação única para o fenômeno. Uma proposta de modelo que pode explicar a CST é o da ruptura da camada passiva. Neste caso, a deformação plástica na ponta da trinca rompe a camada passiva, expõe o material sem proteção ao meio corrosivo e, conseqüentemente, ocorre uma dissolução do material neste local. Desta maneira, a trinca continua se propagando. A nucleação da trinca é facilitada quando o aço está sensitizado. Este tipo de fragilização pode ocorrer em paralelo com a fragilização por hidrogênio.

Para reduzir o risco da ocorrência de corrosão-sob-tensão deve-se tentar diminuir os valores de tensão residual através de um aquecimento bem distribuído durante a soldagem. Isto pode ser conseguido com uma seqüência correta de soldagem. Outra maneira de minimizar este tipo de falha do material é através de tratamentos térmicos de alívio de tensão. Neste caso, deve-se tomar cuidado para não sensitizar todo o equipamento.

5.5) FRAGILIZAÇÃO POR HIDROGÊNIO.

Este tipo de fragilização é bastante perigoso, pois nem sempre as trincas ocorrem logo após a soldagem. Existem dados relatando a ocorrência das trincas em até uma semana após a soldagem. Para ocorrer a fragilização por hidrogênio são necessários três fatores:

- a) origem e localização do hidrogênio;
- b) transporte do hidrogênio até o local onde interage com o metal e causa a fragilização;
- c) mecanismo de fragilização.

Existem diversos mecanismos de fragilização por hidrogênio e cada caso deve ser analisado separadamente, levando-se em conta as particularidades do fenômeno e das condições que o geraram.

5.6) DEFEITOS INTRODUZIDOS DURANTE A SOLDAGEM

Além dos fenômenos de fragilização de origem metalúrgica, outros defeitos podem ocorrer. Estes defeitos são classificados como: planos ou volumétricos. Os defeitos planos necessitam quase sempre ser reparados. Já os defeitos volumétricos são reparados, dependendo do seu tamanho e distribuição. A tabela 14 apresenta a classificação de alguns defeitos mais comuns de serem encontrados na soldagem. Estes defeitos podem ser de origem operacional ou relacionado ao material.

Tabela 14 - Classificação dos defeitos mais comuns encontrados na soldagem a arco elétrico.

Defeito plano	Falta de fusão (FDF) Falta de penetração (FDP) Trincas
Defeito volumétrico	Poros Inclusão de escória Inclusão de tungstênio Mordedura

Cada um dos defeitos apresentados na tabela 14 está associado às características dos diversos processos de soldagem. Em outras palavras, são defeitos típicos dos processos de soldagem. A tabela 15 mostra a relação entre os processos usuais de soldagem dos aços inoxidáveis.

Tabela 15 - Defeitos comuns nos processos de soldagem.

Processo de soldagem	Tipo de defeito					
	FDF	FDP	Trincas	Poros	Inclusão de escória	Inclusão de tungstênio
Eletrodo revestido	X	X	X	X	X	NA
TIG	X	X	X	X	NA	X
Plasma	X	X	X	X	NA	X
MIG	X	X	X	X	NA	NA
Resistência	X	NA	X	NA	NA	NA

legenda: NA = não aplicável.

Os defeitos apresentados na tabela 15 podem ser detectados por ensaios não destrutivos como: exame visual, líquido penetrante, partícula magnética, ultra-som e ensaios radiográficos. A seguir estes defeitos serão apresentados em maior detalhe. A tabela 16 apresenta alguns ensaios não destrutivos e os tipos de defeitos que eles detectam.

Tabela 16 - Detecção de defeitos por diversos ensaios não destrutivos.

Defeitos	Ensaio não destrutivo				
	Exame Visual	Líquido Penetrante	Radiografia	Ultrassom	Partícula Magnética
Falta de fusão	NA	NA	D	AP	NA
Falta de penetração	NA	NA	AP	AP	NA
Mordedura	AP	D	AP	D	D
Inclusão (escória ou tungstênio)	NA	NA	AP	AP	D ²
Porosidade	AP ¹	AP ¹	AP	D	D ²
Trincas	AP ¹	AP ¹	D	AP	AP ²

legenda: AP = aplicável; NA = não aplicável; D = depende; 1 = somente na superfície; 2 = superficial e sub-superficial.

A) FALTA DE FUSÃO (FDF).

A falta de fusão é um tipo de defeito onde parte do cordão não está unido na lateral do chanfro ou entre dois cordões na soldagem multipasse, devido a uma deficiência na fusão destas regiões. A figura 15 apresenta esquematicamente este defeito.

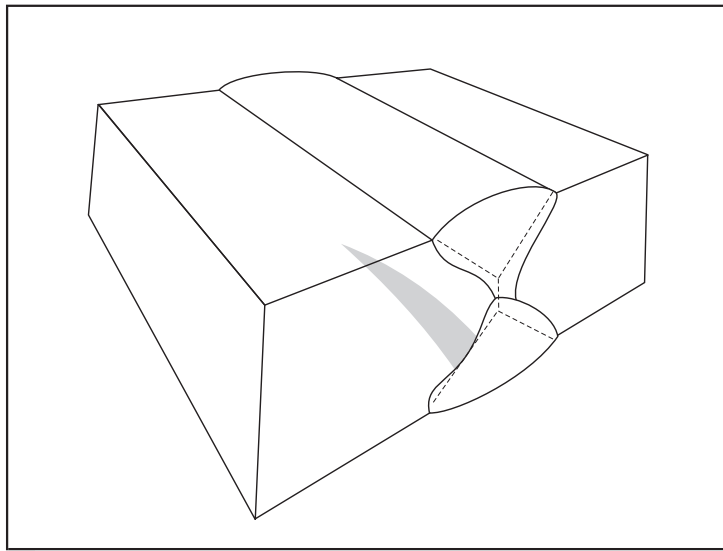


Fig. 15 - Desenho esquemático da falta de fusão.

A causa básica da falta de fusão pode ser uma energia de soldagem insuficiente para fundir a região do chanfro onde está sendo realizado o cordão. Ela pode ocorrer devido a:

- energia de soldagem baixa, isto é, corrente de soldagem baixa ou velocidade de soldagem elevada;
- consumível especificado erroneamente: diâmetro excessivo para a geometria do chanfro ou com pouca penetração;
- projeto da junta inadequado, ou seja, tipo do chanfro não adequado para a espessura do material, ângulo do chanfro pequeno ou abertura de raiz pequena.
- procedimento de soldagem incorreto como: posição de soldagem da peça; desalinhamento entre as partes; superfície da chapa contaminada por óleo, graxa, pintura ou oxidação superficial; presença de escória do passe anterior; falta de goivagem do passe de raiz (processo de remoção de material por meios mecânicos ou térmicos cuja função é aumentar a abertura de raiz para facilitar a soldagem do lado oposto do primeiro cordão).

B) FALTA DE PENETRAÇÃO (FDP).

A falta de penetração é caracterizada pela produção de um cordão de solda que não une completamente a espessura das duas partes que estão sendo soldadas. Isto significa que, parte da espessura do material não foi completamente fundida e, como consequência, não teve penetração total. A figura 16 apresenta esquematicamente este tipo de descontinuidade.

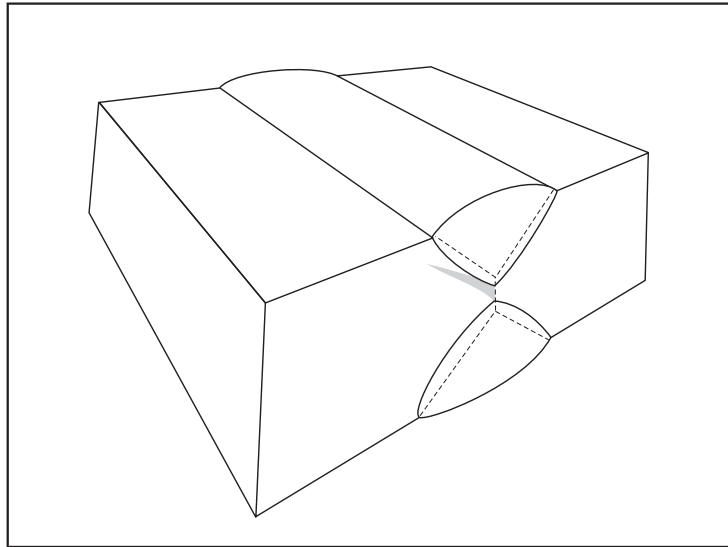


Fig. 16 - Desenho esquemático da falta de penetração.

As causas da falta de penetração são similares a da falta de fusão. Ela pode ocorrer devido a:

- energia de soldagem baixa, isto é, corrente de soldagem baixa ou velocidade de soldagem elevada;
- consumível especificado erroneamente: diâmetro excessivo para a geometria do chanfro ou com pouca penetração;
- projeto da junta inadequado, ou seja, tipo do chanfro não adequado para a espessura do material, ângulo do chanfro pequeno ou abertura de raiz pequena;
- procedimento de soldagem incorreto como: arco instável; ângulo de trabalho do eletrodo, tocha ou pistola; ângulo de ataque do arco elétrico; desalinhamento entre as partes; superfície da chapa contaminada por óleo, graxa, pintura ou oxidação superficial; presença de escória do passe anterior; falta de goivagem do passe de raiz.

C) MORDEDURA.

A mordedura é caracterizada pela fusão do metal de base na região adjacente à margem do cordão de solda. Ela não deve ser confundida com a deposição insuficiente, onde pode-se observar a face original do chanfro no metal de base. A figura 17 mostra esquematicamente este tipo de defeito.

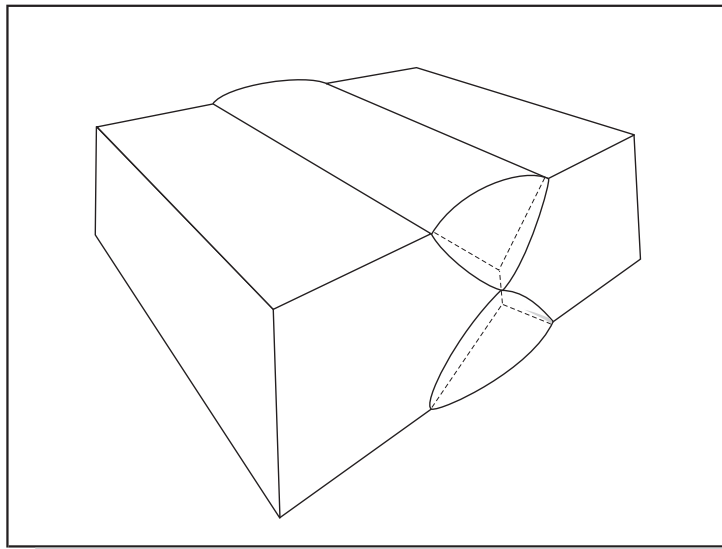


Fig. 17 - Desenho esquemático da mordedura.

As causas da mordedura podem ser:

- energia de soldagem elevada, isto é, corrente de soldagem elevada ou velocidade de soldagem baixa;
- consumível especificado erroneamente: diâmetro excessivo para a geometria do chanfro;
- projeto da junta inadequado, ou seja, tipo do chanfro não adequado para a espessura do material, ângulo do chanfro pequeno;
- procedimento de soldagem incorreto como: tensão do arco excessiva; ângulo de trabalho do eletrodo, tocha ou pistola; ângulo de ataque do arco elétrico favorecendo a fusão das extremidades do chanfro; evitar a técnica de deposição com oscilação lateral; velocidade de soldagem inconstante.

D) INCLUSÃO DE ESCÓRIA/INCLUSÃO DE TUNGSTÊNIO.

A inclusão de escória é produzida pelo aprisionamento de compostos não metálicos no cordão ou entre cordões de solda. A inclusão de tungstênio ocorre quando a ponta do eletrodo do processo TIG quebra ou é fundida por excesso de corrente ou polaridade errada

para o tipo de eletrodo. Ambas as discontinuidades podem ser causadas por uma falta de atenção do soldador durante a soldagem ou na remoção da escória. A figura 18 mostra esquematicamente a inclusão de escória.

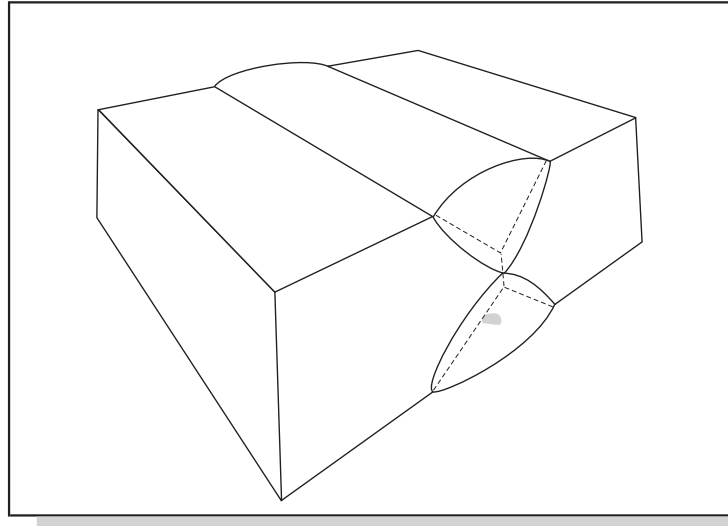


Fig. 18 - Desenho esquemático da inclusão de escória.

As causas da inclusão de escória podem ser:

- energia de soldagem inadequada, isto é, corrente de soldagem baixa para eletrodos com escória bastante viscosa;
- consumível especificado erroneamente: diâmetro excessivo para a geometria do chanfro; consumível com escória muito viscosa; consumível em má condição, destacando pedaços de revestimento na poça de fusão;
- projeto da junta inadequado, ou seja, tipo do chanfro não adequado para a espessura do material, ângulo do chanfro pequeno; abertura da raiz pequena;
- metal de base com teores elevados de elementos desoxidantes como silício, manganês e alumínio.
- procedimento de soldagem incorreto como: arco instável; ângulo de trabalho do eletrodo, tocha ou pistola; ângulo de ataque do arco elétrico favorecendo o deslocamento da escória para a frente da poça de fusão; mudar o acabamento do cordão de côncavo para convexo; reforço do cordão excessivo; não remoção da escória antes de continuar a soldagem.

E) POROSIDADE

A porosidade é caracterizada pelo aprisionamento de bolhas de gás no cordão de solda. Ela está associada a um aumento na quantidade de gás dissolvido na poça de fusão. Os poros

podem ser do tipo agrupados, alinhados, "pipe" e tipo lagarta. A figura 19 mostra esquematicamente este tipo de defeito.

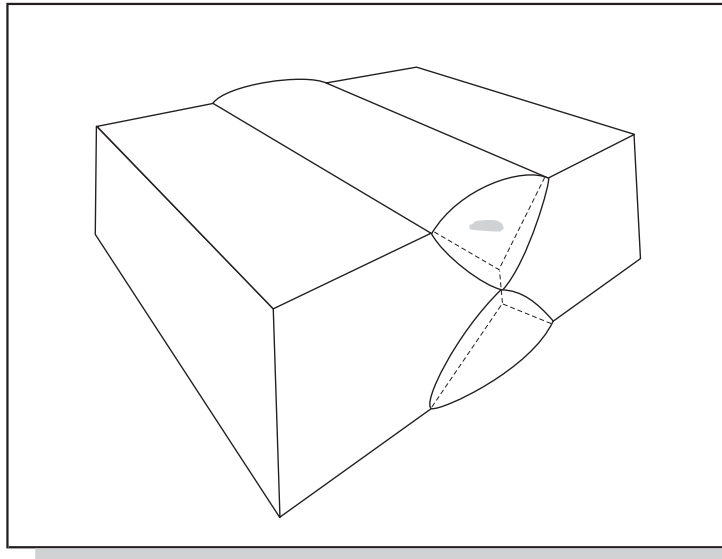


Fig. 19 - Desenho esquemático de poros agrupados.

As causas da porosidade podem ser:

- energia de soldagem baixa, isto é, corrente de soldagem baixa ou velocidade de soldagem elevada;
- consumível especificado erroneamente: diâmetro excessivo para a geometria do chanfro; umidade no revestimento do consumível; metal de adição contaminado;
- metal de base inadequado, ou seja, teor elevado de carbono ou oxigênio residual; teor de enxofre elevado no aço;
- procedimento de soldagem incorreto como: arco instável; mistura gasosa inadequada; pré-aquecimento ausente ou com temperatura insuficiente; tensão do arco excessiva, isto é, distância do arco grande; superfície da chapa contaminada por óleo, graxa, pintura ou oxidação superficial.

F) TRINCAS DE SOLIDIFICAÇÃO.

As trincas de solidificação são geradas pela presença de um filme líquido em um cordão de solda ou na zona de ligação, que está macroscopicamente solidificado. Este tipo de trinca está associado a composição química do metal de base e a presença de tensões geradas durante a soldagem. Geralmente aparece durante o resfriamento no centro do cordão de solda ou na zona de ligação, ou mesmo em regiões reaquecidas na soldagem multipasse. A figura 20 mostra esquematicamente este tipo de defeito.

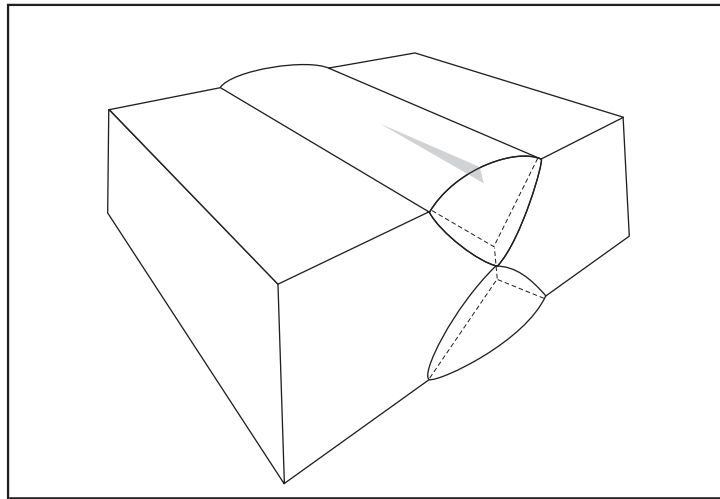


Fig. 20 - Desenho esquemático da trinca de solidificação.

As causas da trinca de solidificação podem ser:

- energia de soldagem elevada, isto é, corrente de soldagem elevada ou velocidade de soldagem baixa;
- consumível especificado erroneamente: diâmetro excessivo para a geometria do chanfro; teor de ferrita pequeno (menor que 2%);
- metal de base com composição química incorreta, isto é, teores elevados de enxofre e fósforo;
- projeto da junta inadequado, ou seja, tipo do chanfro não adequado para a espessura do material, ângulo do chanfro muito grande; abertura da raiz excessiva; restrição elevada da junta;
- procedimento de soldagem incorreto como: formato do cordão inadequado, isto é, cordão estreito e com grande penetração; falta de pré-aquecimento para reduzir as tensões geradas durante a soldagem; deposição de cordões compridos e largos; técnica de soldagem que aumenta as tensões geradas durante a soldagem; desalinhamento entre as partes; excesso de restrição na junta devido aos dispositivos para posicionamento.

G) TRINCA A FRIO INDUZIDA POR HIDROGÊNIO.

Conforme mencionado no item 5.5, a fragilização por hidrogênio pode gerar trinca alguns dias após a soldagem ou mesmo trincas tão pequenas que podem estar abaixo do limite de detecção dos ensaios não destrutivos. Por isso o nome de trinca a frio, pois ocorre em temperaturas próximas da temperatura ambiente. Este tipo de trinca pode levar a uma falha catastrófica do equipamento e, portanto, deve ser minimizada a sua ocorrência durante a fabricação de uma peça ou equipamento soldado. Para que ocorra este tipo de fragilização são necessários quatro condições:

- a) microestrutura suscetível do aço (martensita, ferrita,...);
- b) tensões residuais de tração;
- c) teor de hidrogênio dissolvido no material;
- d) temperatura abaixo de 150 C.

A figura 21 mostra esquematicamente este tipo de defeito. Ele pode estar localizado ou na raiz do cordão ou próximo a margem do cordão, quase sempre na zona afetada pelo calor.

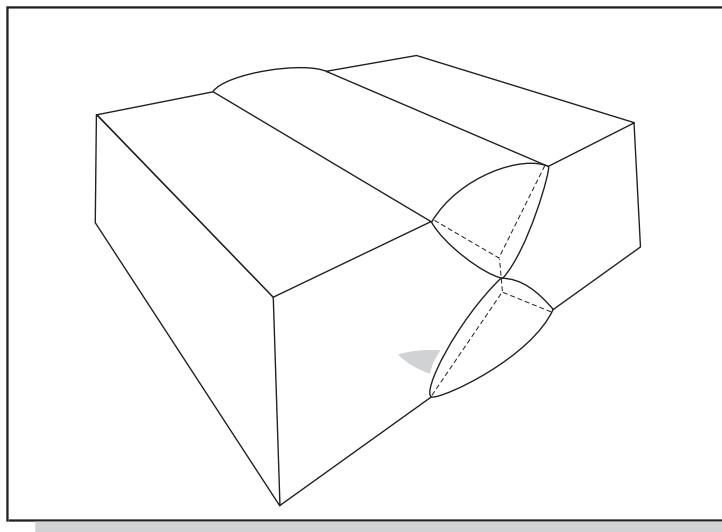


Fig. 21 - Desenho esquemático da trinca a frio induzida por hidrogênio.

As causas da trinca a frio induzida por hidrogênio podem ser:

- energia de soldagem baixa, isto é, corrente de soldagem baixa ou velocidade de soldagem elevada;
- consumível especificado erroneamente: diâmetro pequeno e, conseqüentemente, corrente de soldagem baixa; consumível com teor de hidrogênio elevado;
- projeto da junta inadequado, ou seja, tipo do chanfro não adequado para a espessura do material, ângulo do chanfro grande, gerando tensões elevadas na junta;
- metal de base especificado erroneamente, isto é, com teor muito elevado de carbono ou com espessura excessiva;
- procedimento de soldagem incorreto como: ausência ou temperatura de pré-aquecimento insuficiente; ausência de controle da temperatura inter-passe; ausência de pós-aquecimento para aliviar as tensões e diminuir o teor de hidrogênio dissolvido no material; ausência de tratamento térmico pós-soldagem de alívio de tensões; goivagem do passe de raiz para evitar qualquer tipo de descontinuidade que concentre tensões; superfície da chapa contaminada por óleo, graxa, pintura ou oxidação superficial, que podem ser fonte de hidrogênio.

6) ESCOLHA DO METAL DE ADIÇÃO.

Uma maneira prática de escolher o metal de adição é através da consulta da tabela 17. Nela, estão mostradas as adições usualmente recomendadas para a soldagem de aços inoxidáveis, dissimilares ou não. Outros consumíveis podem ser utilizados, além dos apresentados na tabela. Para um melhor detalhamento consultar um técnico no assunto.

Tabela 17 - Seleção de consumíveis para a soldagem dos aços inoxidáveis, dissimilares ou não.

Combinação de metal de base	301, 302, 304, 308	304L	310, 314 ^(a)	316	316L	317	321, 347	405, 410, 420	430	446 ^(b)	Aços carbono	Aços carbono baixa liga ou Cr-Mo
301, 302, 304, 308	308	308	308	308	308	308	308	309	309	310	309	309
304L		308L	308	308	308	308	309	309	309	310	309	309
310, 314 ^(a)			310	316	317	308	309	309	309	310	309	309
316				316	316	316	308	309	309	310	309	309
316L					316L	316	316L	309	309	310	309	309
317						317	308	309	309	310	309	309
321, 347							347	309	309	310	309	309
405, 410, 420								410	430 ^(c)	410 ^(c)	410 ^(c,d)	410 ^(c)
430									430	430	430 ^(c,d)	430 ^(c)
446										446	430 ^(c,d)	430 ^(c)

Legenda: (a) Suscetível a trinca de solidificação; (b) consumível à base de níquel é mais adequado para aplicações em temperaturas elevadas, exceto na presença de enxofre; (c) no caso de ser aceito um depósito completamente austenítico, pode-se utilizar 309 ou 310; (d) consumíveis de aço carbono podem ser empregados, desde que a peça seja pré-aquecida e que haja um controle de hidrogênio.

Para utilizar a tabela 17 é só escolher os metais de base que serão soldados e encontrar a intersecção entre a respectiva linha e coluna da tabela. Por exemplo: deseja-se soldar um aço carbono (ASTM A36) com um aço inox (AISI 316). A intersecção da linha "316" e da coluna "aço carbono" indicam a adição 309 como uma indicação para soldar estes dois materiais. A escolha pela tabela não leva em conta eventuais riscos de fragilização, que pode ocorrer durante a soldagem. A classificação do consumível depende do tipo do processo de soldagem. Assim, no caso da soldagem TIG, Plasma ou MIG, a classificação correta seria ER309. Já para o eletrodo revestido seria E309-15 ou E390-16. Neste caso, os números 15 e 16 indicam características como tipo de revestimento e de posição de soldagem entre outras.

A escolha do metal de adição para a soldagem de aços inoxidáveis também pode ser feita utilizando-se o diagrama de Schaeffler, apresentado anteriormente, com pequenas modificações. Elas incluem a divisão do diagrama em regiões prováveis de ocorrer algum tipo de fragilização. Este diagrama está apresentado na figura 22.

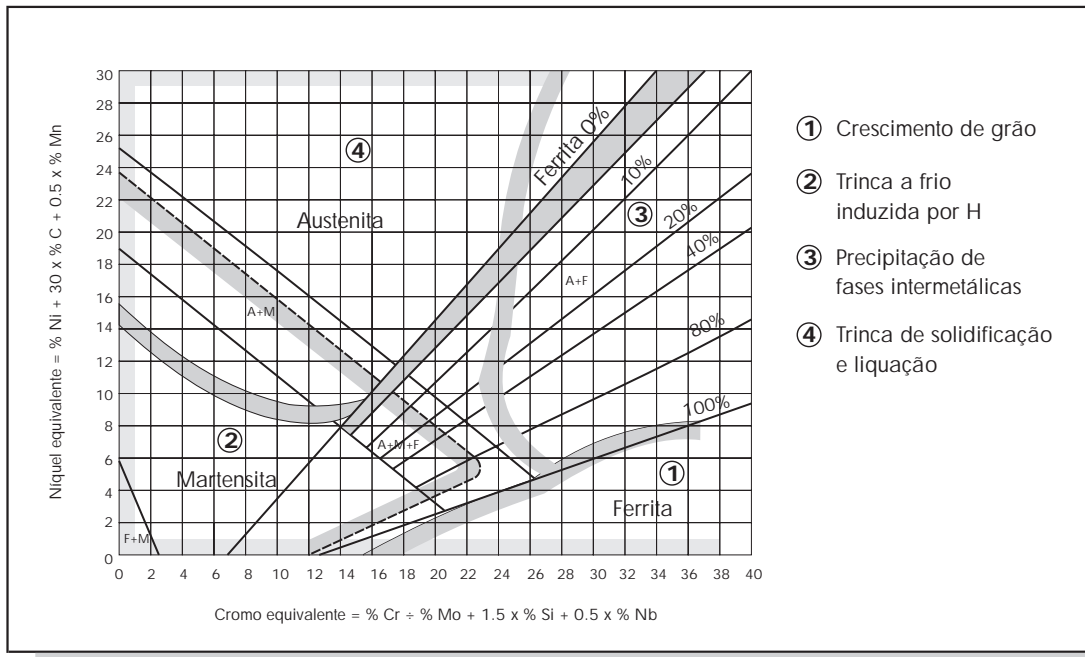


Fig. 22 - Diagrama de Schaeffler adaptado para a soldagem.

Analisando-se a figura 22 percebe-se quatro regiões que apresentam algum tipo de fragilização: região de crescimento de grão na ZAC acima de 1150°C (região 1); trinca a frio induzida por hidrogênio (região 2); precipitação de fase sigma entre 600 e 950°C (região 3) e trinca de solidificação e liquação (região quatro). Entre estas quatro regiões existe uma quinta região que é isenta de qualquer tipo de problema, que está ao redor do ponto 21%Cr e 10%Ni.

Para utilizar o diagrama de Schaeffler calcula-se o cromo e o níquel equivalentes dos materiais que serão utilizados, através das equações:

$$Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 1,5 \%Si + 0,5 \%Nb$$

$$Ni_{eq} = \%Ni + 30 \%C + 0,5 \%Mn$$

Em seguida localiza-se o ponto no diagrama mostrado na figura 22. A partir daí, tem-se três diferentes maneiras de utilizar o diagrama:

- 1) Se a soldagem for autógena, isto é, sem metal de adição, basta verificar em qual das regiões a composição química caiu. Se o ponto cair dentro de alguma região com problema de soldabilidade, existe a possibilidade de ocorrer tal problema durante a soldagem. Assim, é importante verificar se existe alguma ação corretiva antes de realizar a soldagem.
- 2) No caso da soldagem de um aço inox com adição, coloca-se os pontos dos dois materiais no diagrama. Em seguida, traça-se um segmento de reta unindo os dois pontos. Divide-se este segmento de reta em 10 partes iguais, que representam a diluição do processo de soldagem que será empregado. Cada uma dessas partes do segmento representa de 0 a 100% de diluição do cordão de solda. Marca-se no diagrama 0% de diluição no ponto

que corresponde à composição química do metal de adição e 100% no ponto da composição química do metal de base. Falta determinar a diluição do processo de soldagem, que pode ser feita através da medida da área do cordão de solda e da região fundida do metal de base ou então utilizar os valores médios apresentados nas tabelas de características dos processos de soldagem. Admitindo-se que o processo de soldagem a ser utilizado tem uma diluição média de 40%, marca-se este ponto no segmento de reta correspondente. Em seguida, verifica-se em qual das regiões este ponto caiu. O que geralmente é feito na prática é escolher uma adição com composição química ou processo de soldagem com diluição tal que o ponto determinado caia dentro da quinta região, que é isenta de problemas.

- 3) no caso da soldagem dissimilar entre um aço carbono e um aço inox com adição, o procedimento é um pouco diferente. Primeiro calcula-se o cromo e o níquel equivalente dos dois metais de base. Em seguida, marca-se os dois pontos no diagrama e une-se estes pontos com um segmento de reta, e marcando o seu ponto médio. Esse ponto médio deve ser unido ao ponto da composição química do metal de adição que será utilizado. O segmento de reta obtido pela união destes dois pontos é que é dividido em 10 partes. A partir desta etapa, o procedimento é análogo ao do item anterior, bastando encontrar a diluição do processo de soldagem.

A título de ilustração vejamos um exemplo de emprego do diagrama de Schaeffler onde um aço carbono ASTM A36 deve ser soldado a um aço inox ASTM A269 - TP 316. Esses dois materiais poderão ser soldados com a adição 309, conforme a tabela 17. Admitindo-se que o 312 possa ser uma opção de metal de adição, qual a faixa de diluição ideal para realizar esta solda usando cada um deles?

A primeira etapa é calcular o cromo e o níquel equivalente de todos os materiais que serão utilizados. A tabela 18 apresenta a composição química e os valores do cromo e níquel equivalente para cada um dos materiais.

Tabela 18 - Composição química dos materiais.

Material	Composição química (%)									
	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Cr _{eq}	Ni _{eq}
A36	0,22	1,15	0,03	0,025	0,28	-	-	-	0,42	7,75
316	0,05	1,50	0,02	0,015	0,70	12,7	17,0	2,75	20,80	14,95
309	0,021	1,56	0,022	0,003	0,48	13,6	24,2	0,5	25,42	15,01
312	0,10	1,37	0,019	0,009	0,40	9,7	30,8	0,5	31,90	13,4

Colocando-se os pontos dos metais de base no diagrama de Schaeffler, traçando um segmento de reta entre estes dois pontos, encontra-se o ponto médio do segmento, que está aproximadamente na coordenada Cr_{eq} = 11% e Ni_{eq} = 11%. Unindo-se este ponto aos pontos dos dois metais de adição e dividindo-se este novo segmento de reta em dez partes iguais, determina-se a faixa de diluição ideal para cada material. Conforme explicado anteriormente, a faixa de diluição deve cair, quando possível, dentro da região isenta de problemas de soldabilidade. A figura 23

apresenta a faixa ideal de diluição para os dois metais de adição. Neste caso, para cada metal de adição nas condições dadas, ela é de 15 a 30 % para o 309 e de 40 a 60% para o 312.

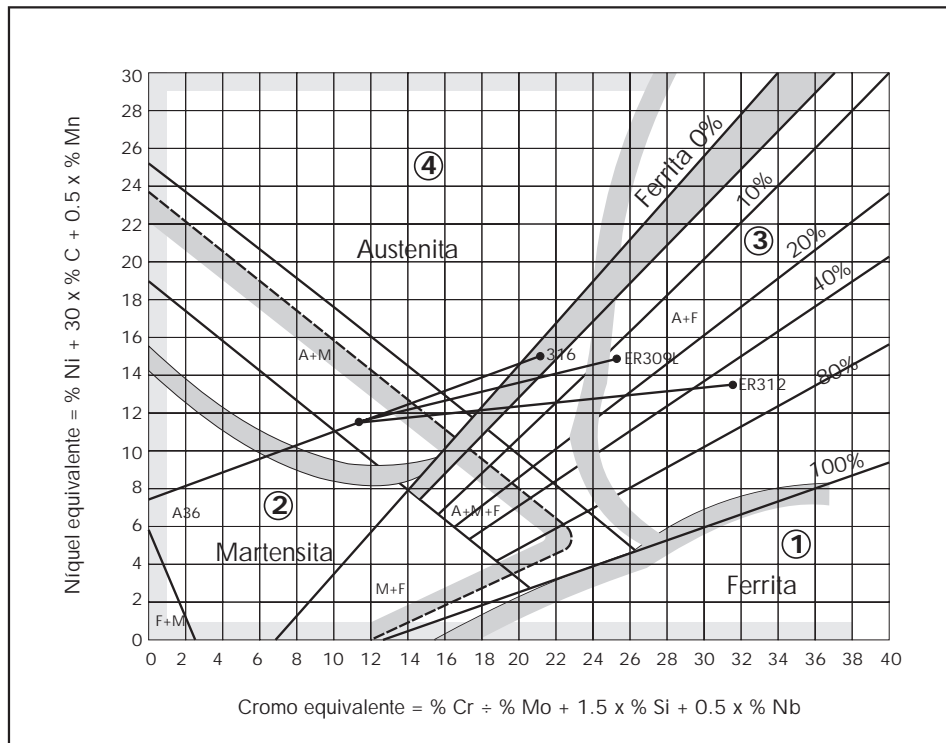


Fig. 23 - Faixa de diluição ideal para as adições 309 e 312.

Com estes dados em mãos, deve-se analisar a diluição dos diversos processos de soldagem. A tabela 19 resume a faixa de diluição apresentada nas tabelas das características do processo de soldagem, apresentadas nesta apostila. Deve-se lembrar que estes valores servem somente de orientação, uma vez que a diluição é função dos parâmetros de soldagem

Tabela 19 - Faixa de diluição dos processos de soldagem.

Processo	Faixa de diluição (%)
Eletrodo revestido	10 a 30
TIG com adição	2 a 20
Plasma com adição	20 a 40
MIG	10 a 30

Comparando-se a flexibilidade das duas adições, o ER309 apresenta um maior número de processos que podem soldar os dois materiais do exemplo. A partir deste dado, a análise da escolha do processo será definida pelos fatores discutidos no item 3.

Conforme pode-se observar, o diagrama de Schaeffler é bastante útil para prever os problemas de soldabilidade durante a soldagem de um aço inox. Porém, na análise que foi feita, não foi levada em conta a presença de elementos residuais, como o enxofre e o fósforo, que favorecem, por exemplo, a formação da trinca de solidificação. Este fato é importante, principalmente quando as composições químicas envolvidas estão dentro do campo onde existe a possibilidade de ocorrência de trinca de solidificação. Neste caso, geralmente é recomendado um teor de fósforo mais enxofre ao redor de 0,04%, combinados com um teor de ferrita no cordão de solda próximo de 10%. Essa ferrita tem a função de dissolver parte desses elementos, aliviar as tensões residuais durante o resfriamento e aumentar o número de interfaces para distribuir o eventual líquido formado durante a solidificação.

7) BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA.

- 1) Peter Houldcroft, "**Which process?**", Abington Publishing, Inglaterra, 1990.
- 2) E. Wainer, S.D.Brandi, F.D.H. Mello - "**Soldagem: metalurgia e processos**", Editora Edgar Blucher, 1992.
- 3) "Principais processos de soldagem dos aços inoxidáveis", Publicação Técnica no. 209401, Núcleo Inox, 6 pgs, 1994.
- 4) American Welding Society, "**Welding Handbook**", vol. 1 e 2, 8ª. edição, EUA, 1990.
- 5) Erich Folkhard, "**Welding metallurgy of stainless steels**", Springer-Verlag, 1989.
- 6) Lincoln Electric Company, "The procedure handbook of arc welding", 12ª edição, EUA, 1973.

As informações contidas nesta publicação, resultam de testes de laboratório e de consultas às referências bibliográficas tradicionais e respeitáveis.

O desempenho dos aços inoxidáveis em serviço ou durante a fabricação de produtos, pode sofrer alterações com mudanças de temperatura, PH, traços de elementos contaminantes, bem como em função do estado de conservação e correta ajustagem dos equipamentos de soldagem ou conformação, sendo ainda a adequada qualificação de mão-de-obra operacional de grande importância no processo. Por estas razões, as informações contidas nesta publicação, devem ser consideradas apenas como referência inicial para testes ou para uma especificação mais precisa por parte do comprador. **A Acesita não se responsabiliza por perdas e/ou prejuízos decorrentes da utilização inadequada das informações aqui contidas.**