

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Soldabilidade de Algumas Ligas Metálicas

Prof. Paulo J. Modenesi

Janeiro de 2011

Soldabilidade de Algumas Ligas Metálicas

1. Soldabilidade:

A American Welding Society (AWS) define soldabilidade como “a capacidade de um material ser soldado nas condições de fabricação impostas por uma estrutura específica projetada de forma adequada e de se comportar adequadamente em serviço”. Esta definição coloca pontos importantes como: “o projeto é adequado?”, “e as condições e o procedimento de soldagem?” Uma definição alternativa, mais prática, seria: “a facilidade relativa com que uma solda satisfatória, que resulte em uma junta similar ao metal sendo soldado, pode ser produzida”.

A maioria das ligas metálicas são soldáveis, mas, certamente, algumas são muito mais difíceis de serem soldadas por um dado processo que outras. Por outro lado, o desempenho esperado para uma junta soldada depende fundamentalmente da aplicação a que esta se destina. Assim, para determinar a soldabilidade de um material, é fundamental considerar o processo e procedimento de soldagem e a sua aplicação. Assim, é importante conhecer bem o material sendo soldado, o projeto da solda e da estrutura e os requerimentos de serviço (cargas, ambiente, etc).

Com base nessas definições, para melhor determinar a soldabilidade, é interessante fazer algumas suposições:

1. O metal base é adequado para a aplicação desejada, isto é, ele possui as propriedades adequadas e necessárias para resistir aos requerimentos da aplicação.
2. O projeto da estrutura soldada e de suas soldas é adequado para o uso pretendido.

Baseado nestas suposições, é necessário, então, avaliar a própria junta soldada. Idealmente, uma junta deveria apresentar resistência mecânica, ductilidade, tenacidade, resistências à fadiga e à corrosão uniformes ao longo da solda e similares às propriedades do material adjacente.

Na maioria dos casos, a produção de uma solda envolve o uso de calor e/ou deformação plástica, resultando em uma estrutura metalúrgica diferente da do metal base. Soldas podem, também, apresentar descontinuidades como vazios, trincas, material incluso, etc. Três tipos de problemas inter-relacionados devem ser considerados:

1. Problemas na zona fundida ou na zona termicamente afetada que ocorrem durante ou imediatamente após a operação de soldagem, como poros, trincas de solidificação, trincas induzidas pelo hidrogênio, perda de resistência mecânica, etc.
2. Problemas na solda ou no material adjacente que ocorrem nas etapas de um processo de fabricação posteriores à soldagem. Incluem, por exemplo, a quebra de componentes na região da solda durante processos de conformação mecânica.
3. Problemas na solda ou no material adjacente que ocorrem em um certo momento durante o serviço da estrutura soldada. Estes podem reduzir a eficiência da junta nas condições de serviço e incluem, por exemplo, o aparecimento e a propagação de trincas por diversos fatores, problemas de corrosão, fluência, etc.

Para se evitar estes problemas, é importante conhecer as possíveis complicações que os materiais podem apresentar ao serem soldados, os fatores do material, do projeto e do procedimento de soldagem que as afetam e a sua influência no comportamento em serviço da estrutura soldada.

2. Soldagem dos Aços:

2.1. Classificação dos Aços:

Existem muitos tipos de aços e inúmeras formas de classificá-los: aços estruturais, aços fundidos, aços ferramenta, aços inoxidáveis, aços laminados a quente, aços microligados, aços baixo carbono, aços ao níquel, aços cromo-molibdênio, aço C-1020, aço A36, aço temperado e revenido, aço efervescente, etc.

Um sistema muito usado para a classificação de aços é a Designação Numérica de Aços Carbono e Aços Ligados do American Iron and Steel Institute. Este é conhecido como o sistema de classificação AISI ou como sistema SAE, uma vez que foi desenvolvido originalmente pela Society of Automotive Engineers. O sistema utiliza uma série de quatro ou cinco números para designar aços carbono e ligados de acordo com as classes e tipos mostrados na tabela 1. Os dois (ou três) últimos dígitos deste sistema indicam o valor médio aproximado da faixa de carbono do aço; por exemplo, 21 indica uma faixa de 0,18 a 0,23%C. Em alguns poucos casos, esta regra não é seguida para se informar as faixas de manganês, enxofre, fósforo, cromo e outros elementos. Os primeiros dois dígitos indicam os principais elementos de liga do aço. Assim, este sistema informa os principais elementos de liga do aço e o seu teor aproximado de carbono. Exemplos deste sistema são mostrados na tabela 2. Este sistema é adotado, basicamente sem alterações, no Brasil, pela ABNT.

Tabela 1 - Designação numérica AISI-SAE para aços.

Designação da Série	Tipos e Classes
10xx	Aço carbono não resulfurado
11xx	Aço carbono resulfurado
13xx	Manganês 1,75%
23xx	Níquel 3,50%
25xx	Níquel 5,00%
31xx	Níquel 1,25% - cromo 0,65 ou 0,80%
33xx	Níquel 3,50% - cromo 1,55%
40xx	Molibdênio 0,25%
41xx	Cromo 0,50-0,95% - molibdênio 0,12 ou 0,20%
43xx	Níquel 1,80% - cromo 0,50 ou 0,80% - molibdênio 0,25%
46xx	Níquel 1,55 ou 1,80% - molibdênio 0,20 ou 0,25%
47xx	Níquel 1,05% - cromo 0,450% - molibdênio 0,25%
48xx	Níquel 3,50% - molibdênio 0,25%
50xx	Cromo 0,28 ou 0,40%
51xx	Cromo 0,80, 0,90, 0,95, 1,00 ou 1,05%
5xxxx	Carbono 1,00% - cromo 0,50, 1,00 ou 1,45%
61xx	Cromo 0,80 ou 0,95% - Vanádio 0,10 ou 0,15 min.
86xx	Níquel 0,55% - cromo 0,50 ou 0,65% - molibdênio 0,20%
87xx	Níquel 0,55% - cromo 0,50% - molibdênio 0,25%
92xx	Manganês 1,00% - silício 2,00%
93xx	Níquel 3,25% - cromo 1,20% - molibdênio 0,12%
94xx	Manganês 1,00% - Níquel 0,45% - cromo 0,40% - molibdênio 0,12%
97xx	Níquel 0,55% - cromo 0,17% - molibdênio 0,20%
98xx	Níquel 1,00% - cromo 0,80% - molibdênio 0,25%

Tabela 2 – Exemplos de designações de aços pelo sistema AISI-SAE.

Aços carbono

Nº SAE	C	Mn	P (max)	S (max)	Nº AISI
1006	0,08 max.	0,25-0,40	0,040	0,050	C1006
1010	0,08-0,13.	0,30-0,60	0,040	0,050	C1010
1015	0,13-0,18	0,30-0,60	0,040	0,050	C1015
1016	0,13-0,18.	0,60-0,90	0,040	0,050	C1016
1020	0,18-0,23.	0,30-0,60	0,040	0,050	C1020
1022	0,18-0,23	0,70-1,00	0,040	0,050	C1022
1025	0,22-0,28	0,30-0,60	0,040	0,050	C1025
1030	0,28-0,34	0,60-0,90	0,040	0,050	C1030
1040	0,37-0,44	0,60-0,90	0,040	0,050	C1040
1045	0,43-0,50	0,60-0,90	0,040	0,050	C1045
1050	0,48-0,55	0,60-0,90	0,040	0,050	C1050
1055	0,50-0,60	0,60-0,90	0,040	0,050	C1055
1060	0,55-0,65	0,60-0,90	0,040	0,050	C1060
1065	0,60-0,70	0,60-0,90	0,040	0,050	C1065
1070	0,65-0,75	0,60-0,90	0,040	0,050	C1070
1074	0,70-0,80	0,50-0,80	0,040	0,050	C1074

Aço ligados

SAE	C	Mn	P (m)	S (m)	Si	Ni	Cr	Outros	AISI
1320	0,18-0,23	1,60-1,90	0,040	0,040	0,20-0,35	--	--	--	1320
1340	0,38-0,43	1,60-1,90	0,040	0,040	0,20-0,35	--	--	--	1340
2317	0,15-0,20	0,40-0,60	0,040	0,040	0,20-0,35	3,25-3,75	--	--	2317
2340	0,33-0,43	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	3,25-3,75	--	--	2340
2512	0,09-0,14	0,45-0,60	0,025	0,025	0,20-0,35	4,75-5,25	--	--	E2512
3115	0,13-0,18	0,40-0,60	0,040	0,040	0,20-0,35	1,10-1,40	0,55-0,75	--	3115
3140	0,38-0,43	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	1,10-1,40	0,55-0,75	--	3140
3150	0,48-0,53	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	1,10-1,40	0,55-0,75	--	3150
3315	0,08-0,13	0,45-0,60	0,025	0,025	0,20-0,35	3,25-3,75	1,40-1,75	--	E3315
Mo									
4017	0,15-0,20	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	--	--	0,20-0,30	4017
4042	0,40-0,45	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	--	--	0,20-0,30	4045
4068	0,63-0,70	0,75-1,00	0,040	0,040	0,20-0,35	--	--	0,20-0,30	4068
4130	0,28-0,33	0,40-0,60	0,040	0,040	0,20-0,35	--	0,80-1,10	0,15-0,25	4130
4140	0,38-0,43	0,75-1,00	0,040	0,040	0,20-0,35	--	0,80-1,10	0,18-0,25	4140
4320	0,17-0,22	0,45-0,65	0,040	0,040	0,20-0,35	1,65-2,00	0,40-0,60	0,20-0,30	4320
4340	0,38-0,43	0,60-0,80	0,040	0,040	0,20-0,35	1,65-2,00	0,70-0,90	0,20-0,30	4340
4615	0,13-0,18	0,45-0,65	0,040	0,040	0,20-0,35	1,65-2,00	--	0,20-0,30	4615
4640	0,38-0,43	0,60-0,80	0,040	0,040	0,20-0,35	1,65-2,00	--	0,20-0,30	4640
4820	0,18-0,23	0,50-0,70	0,040	0,040	0,20-0,35	3,25-3,75	--	0,20-0,30	4820
5045	0,43-0,48	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	--	0,55-0,75	--	5045
5130	0,28-0,33	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	--	0,80-1,10	--	5130
50100	0,95-1,10	0,25-0,45	0,025	0,025	0,20-0,35	--	0,40-0,60	--	E50100
52100	0,95-1,10	0,25-0,45	0,025	0,025	0,20-0,35	--	1,30-1,60	--	E52100
V									
6150	0,48-0,53	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	--	0,80-1,10	0,15 min.	6150
Mo									
8615	0,13-0,18	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	0,40-0,70	0,50-0,60	0,15-0,25	8615
8740	0,38-0,43	0,75-1,00	0,040	0,040	0,20-0,35	0,40-0,70	0,40-0,60	0,20-0,30	8740
9260	0,55-0,65	0,70-1,00	0,040	0,040	1,80-2,20	--	--	--	9260
9440	0,38-0,43	0,90-1,20	0,040	0,040	0,20-0,35	0,30-0,60	0,30-0,50	0,08-0,15	9440
9840	0,38-0,43	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	0,85-1,15	0,70-0,90	0,20-0,30	9840

Prefixo: E – Aço fabricado em forno elétrico, (m) – valor máximo

Outro sistema comumente utilizado para a classificação de aços e outras ligas metálicas é feito pela American Society for Testing and Materials (ASTM). Este sistema é publicado anualmente em um livro de normas ASTM que consiste de, pelo menos, 33 partes. Sete destas partes especificam metais:

- Part 1: Steel piping, tubings and fittings.
- Part 2: Ferrous castings-ferro-alloys.
- Part 3: Steel sheet, strip, bar, rod, wire, etc.
- Part 4: Structural steel, steel plate, steel rails, wheels, etc.
- Part 5: Cooper and cooper alloys.
- Part 6: Die-cast metals, light metals and alloys.
- Part 7: Nonferrous metals and alloys.

Outras partes cobrem materiais diversos como concreto, produtos químicos, materiais isolantes, papel, produtos de petróleo, combustíveis, borracha, etc. Três partes são relacionadas com testes:

- Part 30: General Test Methods.
- Part 31: Metals-Physical and Mechanical Non-destructive Tests.
- Part 32: Analytical Methods of Analysis.

As especificações ASTM para metais são identificadas por uma letra, A para ligas ferrosas e B para ligas não ferrosas. Após esta letra, um grupo de um, dois ou três dígitos indica o número da especificação, seguido por dois dígitos que indicam o ano de sua adoção formal. As especificações ASTM apresentam uma posição comum de fabricantes, usuários e outros grupos interessados em um dado tipo de produto ou material. Elas especificam as propriedades mecânicas do material e, em muitos casos, a sua composição química.

Outras organizações que especificam aços, cujos sistemas de especificação são usados algumas vezes em nosso país, incluem a American Society of Mechanical Engineers (ASME), o American Petroleum Institute (API) e o American Bureau of Shipping (ABS), além de diversas organizações normalizadoras nacionais como a British Standard (BS) e a DIN.

Nos últimos anos, o sistema de numeração unificado (UNS – unified numbering system), gerenciado em conjunto para ASTM e a SAE internacionais, tem sido amplamente usado para a designação de ligas metálicas. Este sistema se baseia em uma letra seguida por cinco dígitos usados para designar a composição química, sem especificar diretamente propriedades da liga e características (por exemplo, forma e dimensões) de produtos. No sistema UNS, a letra indica o tipo de liga, por exemplo, o “A” indica alumínio e suas ligas e o “S” indica aço inoxidável (Stainless Steel). Os dígitos indicam a liga específica, sendo que, frequentemente, alguns dos dígitos refletem aqueles usados em sistemas de classificação mais antigos. A tabela 3 mostra o significado das letras usadas no sistema UNS.

2.2. Soldagem de Aços Carbono e de Baixa Liga:

Aços carbono são ligas de ferro e carbono (até 2%C) contendo ainda, como residuais (de materiais primas ou do processo de fabricação), outros elementos como Mn, Si, S e P. Aços de baixo carbono têm um teor de carbono inferior a 0,15%. Aços doces (“*mild steels*”) contêm

de 0,15 a 0,3%C. Aços de baixa liga têm uma quantidade total de elementos de liga inferior a 2%. Estes grupos de aços serão considerados neste item.

Tabela 3 - Designação UNS para aços e ligas não ferrosas.

Designação UNS	Tipo de Metal/Liga
A00001-A99999	Alumínio e suas ligas
C00001-C99999	Cobre e suas de cobre
D00001-D99999	Aços especificados por propriedades mecânicas
E00001-E99999	Terras raras e metais e ligas similares a terras raras
F00001-F99999	Ferros fundidos
G00001-G99999	Aços carbono e ligados AISI e SAE (exceto aços ferramenta)
H00001-H99999	Aços AISI e SAE H (temperabilidade controlada)
J00001-J99999	Aços fundidos (exceto aços ferramenta)
K00001-K99999	Aços e ligas ferrosas diversas
L00001-L99999	Metais e ligas de baixo ponto de fusão (chumbo, estanho, lítio, etc.)
M00001-M99999	Metais e ligas não ferrosas diversas
N00001-N99999	Níquel e suas ligas
P00001-P99999	Metais preciosos e suas ligas
R00001-R99999	Metais reativos e refratários e suas ligas
S00001-S99999	Aços (inoxidáveis) resistentes à corrosão e ao calor, aços para válvulas, superligas a base de ferro
T00001-T99999	Aços ferramenta processados e fundidos
W00001-W99999	Metais de adição para soldagem, classificados pela composição do depósito
Z00001-Z99999	Zinco e suas ligas

O maior problema de soldabilidade destes aços é a formação de trincas induzidas pelo hidrogênio, principalmente na zona termicamente afetada (ZTA). Outros problemas mais específicos incluem a perda de tenacidade na ZTA, ou na zona fundida (associada com a formação de estruturas de granulação grosseira, durante a soldagem com elevado aporte térmico, ou com a formação de martensita na soldagem com baixo aporte térmico) e a formação de trincas de solidificação (em peças contaminadas ou na soldagem com aporte térmico elevado). Ainda, em função de uma seleção inadequada de consumíveis ou de um projeto ou execução incorretos (ver item 1 - soldabilidade), podem ocorrer problemas de porosidade, mordeduras, falta de fusão, corrosão, etc.

Aços de Baixo Carbono e Aços Doces

Aços de baixo carbono incluem as séries AISI C-1008 e C-1025. O teor de carbono varia entre 0,10 e 0,25%, o de manganês entre 0,25 e 1,5%, o teor de fósforo máximo é de 0,04% e o de enxofre é de 0,05% (hoje, na prática, os teores de P e S dificilmente chegam próximo destes limites). Estes são os aços mais comumente usados em fabricação e construção. São materiais facilmente soldáveis por qualquer processo a arco, gás ou resistência.

Para a soldagem com eletrodos revestidos (SMAW), eletrodos da classe AWS E60XX e E70XX fornecem resistência mecânica suficiente para a soldagem destes aços. Eletrodos da classe E60XX devem ser usados para aços com limite de escoamento inferior a 350 MPa e eletrodos E70XX devem ser usados com aços com limite de escoamento de até 420 MPa. Para

a seleção do tipo de eletrodo, as características operacionais desejadas devem ser consideradas.

Aços de Médio Carbono

Estes aços incluem as séries AISI entre C-1030 e C-1050. A composição é similar a dos aços de baixo carbono, exceto pelo teor de carbono entre 0,3 e 0,5% e o teor de manganês entre 0,6 e 1,65%. Em função do maior teor de carbono e de manganês, eletrodos de baixo hidrogênio são recomendados, particularmente para peças de maior espessura. Um pré-aquecimento entre 150 e 260°C pode ser necessário. Pós-aquecimento é recomendado algumas vezes para aliviar tensões residuais e reduzir a dureza que pode ser causada por um resfriamento rápido após soldagem. Aços de médio carbono podem ser facilmente soldados pelos mesmos processos usados para os aços de baixo carbono desde que os cuidados colocados acima sejam observados.

Aços de Alto Carbono

Estes aços incluem as séries AISI entre C-1050 e C-1095. A composição é similar aos aços anteriores, exceto pelo teor de carbono entre 0,5 e 1,03% e o teor de Mn entre 0,3 e 1,0%. A soldagem destes aços necessita de cuidados especiais. Eletrodos/processos de baixo hidrogênio precisam ser usados com um pré-aquecimento entre 200 e 320°C, especialmente, para peças mais pesadas. Um tratamento térmico após soldagem (alívio de tensões ou mesmo recozimento) é usualmente especificado. Os mesmos processos de soldagem podem ser usados para estes aços.

Aços de Baixa Liga

Estes aços são soldados, no processo SMAW, com eletrodos das classes E80XX, E90XX e E100XX da norma AWS A5.5. Para a seleção do metal de adição para estes aços, além das propriedades mecânicas, é muitas vezes necessário considerar detalhes de sua composição química, o que é indicado, no caso da soldagem SMAW, por um sufixo de letras e dígitos (tabela 4). Apresentam-se, a seguir, exemplos de alguns destes aços.

Aços de Baixa Liga ao Níquel

Incluem os aços das séries AISI 2315, 2515 e 2517. Teores de carbono variam entre 0,12 e 0,3%, de manganês entre 0,4 e 0,6%, de silício entre 0,2 e 0,45% e de níquel entre 3,25 e 5,25%. Pré-aquecimento não é necessário para %C < 0,15, exceto para juntas de grande espessura. Para maiores teores de carbono, um pré-aquecimento de até 260°C deve ser usado, embora para juntas de menos de cerca de 7 mm, este possa ser dispensado. Alívio de tensões após soldagem é recomendável. Na soldagem SMAW, eletrodos de baixo hidrogênio com sufixo C1 ou C2 (tabela 4) devem ser usados dependendo do teor de níquel do metal base.

Aços de Baixa Liga ao Manganês

Este grupo inclui os tipos AISI 1320, 1330, 1335, 1340 e 1345. Nestes aços, o teor de carbono varia de 0,18 a 0,48%, de manganês entre 1,6 e 1,9% e de silício entre 0,2 e 0,35%. Pré-aquecimento não é necessário para os menores teores de C e Mn. Para C > 0,25%, um pré-aquecimento entre 120 e 150°C é necessário. Para maiores teores de C e Mn e para juntas de grande espessura, a temperatura de pré-aquecimento pode atingir 300°C, sendo recomendado o uso de alívio de tensões. Eletrodos E80XX e E90XX com sufixo A1, D1 e D2 devem ser usados.

Tabela 4 - Código de composição química do metal depositado por eletrodos revestidos segundo a norma AWS A5.5.

Designação	Características
Exxxx-A1	Eletrodos de aço C-Mo com 0,40 a 0,65%Mo.
Exxxx-B1	Eletrodos de aço Cr-Mo com 0,40 a 0,65% de Cr e Mo.
Exxxx-B2	Eletrodos de aço Cr-Mo com 1,00 a 1,50%Cr e 0,40 a 0,65%Mo.
Exxxx-B2L	Eletrodos de aço Cr-Mo com 1,00 a 1,50%Cr e 0,40 a 0,65%Mo e baixo teor de carbono (<0,05%)..
Exxxx-B3	Eletrodos de aço Cr-Mo com 2,00 a 2,50%Cr e 0,90 a 1,20%Mo.
Exxxx-B4L	Eletrodos de aço Cr-Mo com 1,75 a 2,25%Cr e 0,40 a 0,65%Mo e baixo teor de carbono (<0,05%).
Exxxx-B5	Eletrodos de aço Cr-Mo com 0,40 a 0,60%Cr e 1,00 a 1,25%Mo e <0,05% V.
Exxxx-C1	Eletrodos de aço Ni com 2,00 a 2,75%Ni.
Exxxx-C2	Eletrodos de aço Ni com 3,00 a 3,75%Ni.
Exxxx-C3	Eletrodos de aço Ni com 0,80 a 1,10%Ni, <0,15%Cr, <0,35%Mo e <0,05% V.
Exxxx-D1	Eletrodos de aço Mn-Mo com 1,25 a 1,75%Mn e 0,25-0,45%Mo.
Exxxx-D2	Eletrodos de aço Mn-Mo com 1,65 a 2,00%Mn e 0,25-0,45%Mo.
Exxxx-G	Todos os outros eletrodos de aço baixa liga com >1,00%Mn mais diferentes teores de Ni, Cr, Mo e V.
Exxxx-M	Classes especiais ligadas a especificações militares.

Aços de Baixa Liga ao Cromo

Este grupo inclui os aços dos tipos AISI 5015, 5160, 50100, 51100 e 52100. Nestes aços, o teor de carbono varia entre 0,12 e 1,1%, o manganês varia entre 0,3 e 1,0%, o silício entre 0,2 e 0,3% e o cromo entre 0,2 e 1,6%. Aços com teor de C próximo de seu limite inferior podem ser soldados sem nenhum cuidado especial. Para maiores teores de carbono (e de cromo), a temperabilidade aumenta de forma pronunciada e pré-aquecimentos de até 400°C podem ser necessários, particularmente para juntas de maior espessura. Eletrodos revestidos com sufixo B devem ser usados.

Os exemplos anteriores ilustram a importância de, na seleção de um consumível para aços de baixa liga, ajustar a resistência mecânica e a composição química do depósito de solda de acordo com as características do metal base. Contudo, nem sempre existe disponível um consumível capaz de depositar material com composição igual ao metal base, sendo preciso selecionar consumível o mais similar o possível e avaliar possíveis efeitos das diferenças de composição no comportamento da solda.

Aços Resistentes ao Tempo

Aços resistentes ao tempo (aços patináveis) são aços de baixa liga que podem ser expostos ao ambiente sem serem pintados, sendo protegidos por uma densa camada de óxido que se forma naturalmente. Devido a esta camada, a sua resistência a corrosão é quatro a seis vezes a resistência de aços estruturais ao carbono. Aços resistentes ao tempo são cobertos pela

especificação ASTM A242. Nesta, limites mínimos de escoamento e de resistência de 350 MPa e de 420 MPa (70 ksi), respectivamente, são especificados.

Para os aços citados acima em geral, fórmulas de carbono equivalente (CE) são comumente usadas para estimar a necessidade de cuidados especiais na sua soldagem. Uma expressão de CE muito difundida é:

$$CE = \% C + \frac{\% Mn}{6} + \frac{\% Mo}{4} + \frac{\% Cr}{5} + \frac{\% Ni}{15} + \frac{\% Cu}{15} + \frac{\% P}{3}$$

Preferencialmente, o CE deve ser calculado para a composição real do aço. Quando esta não é conhecida, os teores máximos na faixa da especificação do aço devem ser considerados por segurança. Um metal base é considerado facilmente soldável com o processo SMAW quando $CE < 0,40$. Acima deste nível, cuidados especiais são necessários. Processos de soldagem de baixo hidrogênio devem ser usados e pode ser necessário pré-aquecer a junta. Quando $CE > 0,60$, deve-se usar pré-aquecimento para juntas com espessura acima de 20 mm. Quando $CE > 0,90$, um pré-aquecimento a uma temperatura elevada é absolutamente necessário para todos os casos, exceto para juntas de muito pequena espessura. A tabela 5 mostra valores típicos de temperatura de pré-aquecimento para diferentes tipos de aços e, também, para ferro fundido. Como a temperatura de pré-aquecimento depende de diversos fatores, os valores mostrados nesta tabela devem ser tomados apenas como uma referência inicial.

Na soldagem com arco submerso (SAW), a composição do depósito de solda deve, também, ser similar a do metal base. Um fluxo não ativo (que não coloca nem retira elementos de liga da poça de fusão) deve ser usado preferencialmente com aços de baixa liga. Em geral, a necessidade de pré-aquecimento é reduzida na soldagem SAW devido aos maiores aportes térmicos utilizados. Para garantir um baixo nível de hidrogênio, é importante utilizar um fluxo corretamente seco e limpar adequadamente o metal base na região da solda.

Na soldagem com eletrodo consumível e proteção gasosa (GMAW) de aços de baixa liga, a composição do eletrodo deve ser adequada para o metal base e o gás de proteção deve ser selecionado de forma a minimizar a queima (oxidação) do metal de solda. O nível de pré-aquecimento é similar ao usado com o processo SMAW.

Tabela 5 – Temperaturas típicas de pré-aquecimento para diferentes tipos de aço e para ferro fundido¹.

Tipo de aço	Temperatura (°C)
Baixo carbono (%C < 0,30)	90-150
Médio carbono (0,30 < %C < 0,55)	150-260
Alto carbono (0,50 < %C < 0,83)	260-430
Aços C-Mo (0,10 < %C < 0,30)	150-320
Aços C-Mo (0,30 < %C < 0,35)	260-430
Aços Ni (< 3,5%Ni)	90-370
Aços Cr	150-260
Aços Cr-Ni	90-590
Ferro fundido	370-480

¹ TC 9-237, Welding Theory and Application, American Army, 1993.

Na soldagem de aços com níveis diferentes de resistência mecânica, o metal de adição deve ser selecionado de forma a fornecer um depósito de resistência compatível com o aço de menor resistência. O procedimento de soldagem (pré-aquecimento, aporte térmico, etc), contudo, deve ser especificado de acordo com o aço de maior resistência.

Em princípio, aços resistentes ao tempo podem ser soldados por todos os processos a arco, por soldagem a gás e por resistência. Contudo, cuidados especiais devem ser tomados em função de suas características. Na soldagem SMAW, eletrodos E7018 podem ser usados para a deposição dos passes de raiz e de enchimento. O acabamento (isto é, a última camada da solda, exposta ao tempo) deve, contudo, ser feito com um eletrodo E7018-C1 uma vez que o maior teor de níquel do depósito dará à solda características de resistência à corrosão similares ao metal base.

2.3. Soldagem de Aços Ligados:

Aços Estruturais Temperados e Revenidos

Estes aços foram desenvolvidos na década de 50 a partir de aços para aplicação militar (blindagem). Estes aços são usados após tratamento térmico de têmpera e revenido e apresentam elevada resistência mecânica, com limite de escoamento da ordem de 700 MPa, associado com uma boa soldabilidade. Eles ainda apresentam boa ductilidade, boa tenacidade e boa resistência à fadiga. Procedimentos de soldagem relativamente simples podem ser usados na sua soldagem, sem pré-aquecimento ou com pré-aquecimentos a temperaturas baixas. Aços temperados e revenidos são cobertos pelas especificações ASTM A514, A517 e outras, por especificações da marinha americana (aços HY) e por documentos de diferentes produtores de aço. Aços temperados e revenidos são muito utilizados na fabricação de estruturas soldadas nas quais uma elevada razão peso/resistência é importante.

Para a soldagem de aços temperados e revenidos da classe ASTM A514/A517, um baixo aporte térmico é utilizado para se conseguir uma resistência mecânica adequada na junta. Três fatores devem ser considerados: (1) o uso de um metal de adição adequado, (2) o uso do correto aporte térmico e (3) a estrita obediência ao procedimento de soldagem recomendado.

Processos comumente utilizados na soldagem destes aços são SMAW, GMAW, SAW e FCAW (arame tubular), dependendo da disponibilidade de consumíveis. O processo TIG (GTAW) também é utilizado, mas é restrito a juntas de menor espessura. Processos de alto aporte térmico, como a soldagem com eletro-escória, não são recomendados devido à perda de resistência mecânica que a junta pode sofrer em função da microestrutura formada. Qualquer que seja o processo de soldagem, é essencial garantir que o nível de hidrogênio na solda seja mínimo devido ao risco de formação de trincas. Isto significa a utilização de consumíveis de baixo hidrogênio, uma secagem adequada destes e a preparação de uma junta limpa.

Na soldagem SMAW, eletrodos de baixo hidrogênio da classe E11018 ou E12018 devem ser utilizados para garantir uma resistência mecânica adequada da solda. Para o processo GMAW, uma mistura de proteção Ar-2%O₂ é comumente usada. Arames de composição química especial (não cobertos usualmente por especificações da AWS) devem ser usados. A composição química do arame deve ser similar ao do metal base. Na soldagem SAW, um fluxo não ativo deve ser usado com um arame de composição similar ao metal base.

O aporte térmico depende da espessura da junta e das temperaturas de pré-aquecimento e entre-passes. Juntas de pequena espessura (25 mm) podem ser soldadas a temperaturas próximas da ambiente. Maiores espessuras precisam de um pré-aquecimento em torno de 100°C e temperaturas maiores podem ser utilizadas para juntas com pequena liberdade de movimento (alta restrição) devido às elevadas tensões residuais que podem se desenvolver nestas condições. A tabela 6 mostra limites superiores de aporte térmico, sugeridos para aços da classe ASTM A514/A517. Na prática, estes limites podem variar para cada aço e uma boa prática é a consulta às recomendações do próprio fabricante do aço. Quando a soldagem é feita com um aporte térmico superior ao adequado, a junta soldada tende a apresentar menor resistência mecânica do que o metal base.

Tabela 6 - Limites superiores sugeridos para o aporte térmico (kJ/mm).

Espessura da Junta (mm)	Pré-aquecimento (°C)			
	Ambiente	95	150	205
5,0	0,7	0,6	0,5	0,4
6,4	0,9	0,8	0,6	0,5
12,7	1,9	1,5	1,3	1,0
19,0	3,5	2,8	2,2	1,6
25,4	--	4,3	3,4	2,6
31,8	--	6,1	4,7	3,7

Durante a soldagem destes aços, o procedimento de soldagem deve ser cuidadosamente seguido e técnicas operatórias que resultem em uma velocidade de resfriamento inadequadamente baixa devem ser evitadas. Assim, não se deve usar o tecimento dos cordões. Quando este não puder ser evitado, como na soldagem vertical ascendente, ele deve ser o menor possível, por exemplo inferior a dois diâmetros do eletrodo. Pelo mesmo motivo, cuidado extremo deve ser tomado para evitar que a temperatura entre passes ultrapasse o máximo especificado.

Aços Cromo-Molibdênio

Estes aços foram desenvolvidos para aplicações a temperatura elevada, sendo muito usados em tubulações que operam a alta pressão e temperaturas entre cerca de 370 e 600°C. Nesta faixa de temperatura, os aços Cr-Mo mantêm uma resistência mecânica adequada, além de não sofrerem problema de fluência nem de fragilização após longos períodos de uso. São comumente usados na condição normalizada ou temperada e revenida com a resistência mecânica à temperatura ambiente variando de 590 a 940 MPa. As composições comuns destes aços incluem: 1%Cr-1/2%Mo, 1-1/4%Cr-1/2%Mo, 2%Cr-1/2%Mo, 2-1/4%Cr-1%Mo e 5%Cr-1/2%Mo.

Os processos mais comumente usados para a soldagem de aços Cr-Mo são SMAW, GTAW e GMAW, embora arco submerso e arame tubular também possam ser usados. Para qualquer processo, é importante selecionar um metal de adição de composição similar ao metal base.

No processo SMAW, eletrodos com sufixo B são utilizados (tabela 4) variando de B1 para aços 1/2%Cr-1/2%Mo até B4 para o aço 2-1/2%Cr-1/2%Mo. Para maiores teores de liga são necessários eletrodos especiais, não cobertos pela especificação da AWS. Eletrodos devem ser sempre de baixo hidrogênio os quais podem ter características operatórias que dificultam a realização do passe de raiz em tubulações.

Boa parte da soldagem destes aços é feita em tubulações para as quais o passe de raiz é comumente feito pelo processo GTAW e os outros passes por um outro processo.

O procedimento de soldagem deve incluir pré-aquecimento e, muitas vezes, pós-aquecimento em função da temperabilidade destes aços. Temperaturas de pré-aquecimento de até 370°C podem ser usadas. Para um teor de carbono inferior a 0,2% e espessura menor que 9,5mm, a soldagem pode ser feita com um pré-aquecimento mínimo (40°C). Maiores teores de carbono e maiores espessuras exigem pré-aquecimento a maiores temperaturas.

Tratamento térmico após soldagem deve ser feito para teores de carbono acima de 0,2% e espessuras superiores a 13 mm. Temperaturas de tratamento térmico variam de 620 a 705°C, as menores temperaturas sendo usadas para as menores espessuras. No caso de interrupção da soldagem antes de seu término, a junta deve ser resfriada lentamente e tratada termicamente antes do reinício da soldagem.

Quando diferentes tipos de aços Cr-Mo são soldados, as condições de pré-aquecimento e de tratamento térmico são determinadas pelo aço de maior teor de liga, mas o metal de adição pode ser selecionado com base no metal base menos ligado.

2.4. Soldagem de Aços Inoxidáveis:

Aços inoxidáveis são ligas ferrosas de excelente resistência à corrosão em diversos ambientes. São basicamente ligas Fe-Cr ou Fe-Cr-Ni, podendo conter, ainda, elementos como C, N, Mo, Mn, Nb, Ti, etc, seja como elementos de liga seja como residuais. A forma mais usual de classificar estes materiais baseia-se na sua microestrutura usual, resultante do balanço de elementos de liga e dos tratamentos térmicos e mecânicos aplicados, isto é:

- (a) *Aços inoxidáveis ferríticos*: São ligas Fe-Cr, com teor de cromo, em geral, entre 11 e 30% e um teor de carbono relativamente baixo, em geral inferior a 0,12%. O tipo mais comumente usado deste aço é o AISI 430. Estes aços não são temperáveis e sua granulação só pode ser refinada por uma combinação adequada de trabalho mecânico e recozimento. Se expostos por tempos prolongados a temperaturas em torno de 500°C, estes aços podem ser fragilizados pela precipitação de intermetálicos. No estado recozido, sua ductilidade e tenacidade à temperatura ambiente são geralmente satisfatórias. Apresentam boa resistência à corrosão e à oxidação, inclusive a alta temperatura. São usados em aplicações envolvendo o ácido nítrico, na fabricação de eletrodomésticos, cubas, utensílios para cozinha e laboratórios, em aplicações a alta temperatura, etc. Apresentam uma estrutura predominantemente ferrítica em qualquer temperatura até a sua fusão.
- (b) *Aços inoxidáveis martensíticos*: São, geralmente, ligas Fe-Cr-C, com teores de cromo entre 11 e 18% e entre 0,1 e 0,5% (podendo, em alguns casos, chegar a 1%) de carbono e capazes de serem austenitizadas a uma temperatura suficiente elevada. O tipo mais comumente usado deste aço é o AISI 410. Devido à sua elevada temperabilidade, estas ligas podem apresentar uma estrutura completamente martensítica mesmo após um resfriamento ao ar calmo. São, portanto, ligas endurecíveis por tratamento térmico, sendo usadas, em geral, no estado temperado e revenido. Sua resistência à corrosão é inferior a dos outros tipos, sendo, contudo, satisfatória para meios mais fracamente corrosivos. São particularmente adequados para aplicações que requerem elevada resistência mecânica,

dureza e resistência à abrasão ou erosão em ambiente seco ou úmido como, por exemplo, em componentes de turbinas a gás ou vapor, mancais e em peças de cutelaria.

- (c) *Aços inoxidáveis austeníticos*: Esta classe inclui, principalmente, ligas Fe-Cr-Ni. Apresentam estrutura predominantemente austenítica à temperatura ambiente, não sendo endurecíveis por tratamento térmico. Formam o grupo mais usado e numeroso de aços inoxidáveis. Contêm entre cerca de 16 e 30% de Cr, entre 6 e 26% de Ni e menos de 0,3% de carbono, sendo o tipo mais comum o aço AISI 304. Apresentam, à temperatura ambiente, um baixo limite de escoamento, um limite de resistência elevado e grande ductilidade. São, entre os aços inoxidáveis, os materiais de melhor soldabilidade e resistência geral à corrosão. Encontram aplicações na indústria química, alimentícia, de refino de petróleo e em muitas outras.
- (d) *Aços inoxidáveis duplex*: São ligas Fe-Cr-Ni-Mo-N, podendo conter, ainda, adições de Cu e outros elementos. Apresentam uma estrutura austeno-ferrítica com aproximadamente 50% de cada fase. São caracterizados por uma elevada resistência mecânica e excelente resistência à corrosão, particularmente em ambientes contendo cloretos, nos quais os aços austeníticos têm um pior desempenho.

Os três processos mais utilizados para a soldagem de aços inoxidáveis são SMAW, GTAW e GMAW, embora vários outros sejam também usados. O processo SMAW é utilizado em serviços em geral, particularmente no campo e em diferentes posições. O processo GTAW é amplamente utilizado na soldagem de peças de aço inoxidável de menor espessura. O processo GMAW é utilizado para juntas mais espessas, sendo um processo de maior produtividade. Transferências spray (com misturas Ar-2%O₂ ou 5%O₂) e por curto circuito (com misturas Ar-CO₂ e Ar-He-CO₂) podem ser usadas. Arames tubulares para a soldagem destes aços estão se tornando mais comuns nos últimos anos.

Aços inoxidáveis podem ser considerados como ligeiramente mais difíceis de soldar que aços de baixo carbono, mas as dificuldades variem de forma importante com o tipo de aço. Um aspecto fundamental na soldagem de aços inoxidáveis é a necessidade de limpeza de modo a minimizar contaminações que deteriorem a sua resistência à corrosão. Cuidados com a forma do cordão também são muito importantes, uma vez que irregularidades superficiais podem se tornar pontos de acúmulo de sujeira e início de corrosão. Adicionalmente, as diferenças de propriedades físicas entre os aços comuns e os inoxidáveis, implicam em diferenças nos procedimentos de soldagem. As principais diferenças de propriedades são:

1. Menor temperatura de fusão.
2. Menor condutividade térmica.
3. Maior coeficiente de expansão térmica.
4. Maior resistência elétrica.

Aços Inoxidáveis Austeníticos

Todos os aços austeníticos são relativamente simples de soldar, com exceção dos aços com adição de enxofre para usinagem fácil. Os aços austeníticos apresentam coeficiente de expansão térmica maior (cerca de 45%), maior resistência elétrica e menor condutividade térmica que os aços doces. Nos aços com teor de carbono superior a 0,06%, carbonetos podem ser precipitados nos contornos de grão da ZTA, durante o ciclo térmico de soldagem, prejudicando a resistência à corrosão. Para minimizar este problema e, também, problemas de distorção, recomenda-se soldar estes aços com uma maior velocidade de deslocamento. Devido à menor temperatura de fusão destes aços e sua menor condução de calor, a corrente

de soldagem é usualmente menor que a usada em aços doces. Um maior coeficiente de expansão térmica torna maior a tendência à distorção na soldagem destes aços e levam à necessidade da adoção de técnicas para a sua redução. Para chapas finas, dispositivos de fixação e um ponteamto cuidadoso são, em geral, uma necessidade. Dependendo de sua composição química (maior quantidade de elementos gamagênicos), o metal de solda pode solidificar-se com uma estrutura completamente austenítica. Nestas condições, a solda é muito sensível ao aparecimento de trincas durante a solidificação. Este problema é minimizado pela seleção de metal de adição que possibilite uma estrutura austeno-ferrítica na solidificação e resulte em cerca de 4 a 10% de ferrita na solda à temperatura ambiente. Nos casos em que a seleção de um consumível deste tipo não seja possível, isto é, havendo a necessidade de uma estrutura completamente austenítica na solda (em ambientes altamente corrosivos ou em aplicações criogênicas, por exemplo), eletrodos com baixos teores de enxofre e fósforo e uma elevada relação Mn/S devem ser usados junto com um procedimento de soldagem que minimize o nível de tensões na solda.

Aços Inoxidáveis Ferríticos

Estes aços apresentam coeficiente de expansão térmica similar aos aços doces, tendo, portanto, menor tendência à distorção. Apresentam, contudo, sérios problemas de perda de ductilidade e tenacidade e de resistência à corrosão da região da solda devido à formação de uma estrutura de granulação grosseira, à precipitação de carbonetos e nitretos e à formação de uma rede de martensita ao longo dos contornos dos grãos de ferrita. Estes problemas limitam, para a maioria dos aços ferríticos, a utilização da soldagem para aplicações de pequena responsabilidade. Nestes casos, para algumas aplicações, pode-se utilizar metal de adição austenítico para restringir estes problemas à ZTA da solda. Novos tipos de aços inoxidáveis ferríticos com extra baixo teor de elementos intersticiais ($C+N < 0,03\%$) e adições de Nb ou Ti (elementos que se ligam fortemente aos elementos intersticiais reduzindo a sua influência negativa durante a soldagem) têm desenvolvidos. Estes aços apresentam um comportamento melhor para a soldagem e têm sido utilizados em aplicações que envolvem soldagem como em tubulações, trocadores de calor e sistemas de escapamento de automóveis..

Aços Inoxidáveis Martensíticos

Aços inoxidáveis martensíticos de baixo teor de carbono podem ser soldados sem maiores problemas. Aços com teor de carbono acima de 0,15% tendem a ser temperáveis ao ar e, assim, é necessário o uso de pré-aquecimento e, frequentemente, de pós-aquecimento para a sua soldagem. Temperatura de pré-aquecimento varia usualmente entre 230 e 290°C. O Pós-aquecimento deve ser feito imediatamente após a soldagem, entre 650 e 760°C, seguido de resfriamento lento até a temperatura ambiente. Pré-aquecimento ou pós-aquecimento deficientes levam à formação de trincas de têmpera na região solda, potencializadas pela presença de hidrogênio. Quando o pré-aquecimento for impossível, metal de adição inoxidável austenítico deve ser usado.

Aços Inoxidáveis Duplex

Estes aços tendem a ser facilmente soldáveis desde que cuidados necessários sejam tomados. Em particular, um resfriamento muito rápido potencializa um teor muito elevado de ferrita e a precipitação de nitretos de cromo na ZTA e ZF, o que prejudica a tenacidade e a resistência à corrosão da solda. Por outro lado, um resfriamento muito lento e a manutenção por tempos longos a temperaturas entre cerca de 1000 e 600°C pode levar a precipitação de compostos intermetálicos que também prejudicam as propriedades mecânicas e químicas da solda. Assim, o controle da energia de soldagem e da temperatura de pré-aquecimento é muito

importante para estes materiais. Para reduzir a quantidade de ferrita na ZF, o uso de uma mistura Ar-N₂ como gás de proteção é comum.

Metal de adição de aço inoxidável (principalmente austenítico) é comumente usado na soldagem de outros tipos de aços, na união de aços inoxidáveis com outros aços e na fabricação de revestimentos protetores contra a corrosão ou contra diversos tipos de desgaste. Para a previsão da microestrutura da solda e da possibilidade de ocorrência de problemas, diagramas constitucionais empíricos são muito utilizados. Destes, o mais conhecido é o Diagrama de Schaeffler (figura 1), existindo, contudo, diversos outros (Diagrama de DeLong, do WRC 1986, etc). Estes diagramas permitem prever a microestrutura da solda a partir de sua composição química, expressa em termos de equivalentes de cromo (Cr_{eq}) e de (Ni_{eq}).

A figura 2 mostra o diagrama de Schaeffler indicando áreas típicas de problemas na soldagem de aços inoxidáveis. De forma resumida, estes problemas são:

1. Solidificação com uma estrutura completamente austenítica com uma elevada sensibilidade à formação de trincas durante a solidificação ou por perda de ductilidade acima de 1250°C;
2. Aços com elevado teor de elementos de liga levando à formação de fases intermetálicas após aquecimento entre cerca de 450 e 900°C e, com isto, à sua fragilização;
3. Aços com estrutura ferrítica capaz de sofrer um grande crescimento de grão na ZTA e ZF, sendo, desta forma, fragilizados;
4. Aços de elevada temperabilidade com a formação de martensita na ZTA e ZF causando fragilização e fissuração pelo hidrogênio e por formação de martensita.

Pode-se observar, na parte central do diagrama, na região de coexistência da ferrita e austenita, uma pequena área triangular que não é atingida por nenhum dos problemas indicados. De uma forma geral, para as aplicações usuais, os consumíveis de aço inoxidáveis austeníticos são projetados para, após diluição com o metal base, fornecer uma solda cuja composição química caia nesta região.

O diagrama de Schaeffler permite prever a microestrutura da ZF com base na sua composição química e não é restrito aos aços inoxidáveis austeníticos, podendo ser usado também para aços ferríticos e martensíticos. Para utilizá-lo, os equivalentes de Cr e Ni devem ser calculados pela composição química da solda e a microestrutura é determinada pela leitura direta no diagrama do campo em o ponto (Cr_{eq} , Ni_{eq}) se localiza. Em aplicações em que as composições dos metais base e de adição sejam diferentes, o ponto que representa a solda no diagrama estará sobre o segmento de reta entre o metal base e o metal de adição. A posição desse ponto no segmento dependerá da diluição da solda, ficando mais próximo do metal de adição para soldas de pequena diluição. Como um exemplo, suponha-se que um aço inoxidável ferrítico ABNT430 (0,03%C, 0,9%Mn, 0,4%Si e 17,3%Cr) tenha sido soldado com um eletrodo AWS E309 (0,06%C, 0,7%Mn, 0,7%Si, 22,1%Cr e 12,5%Ni). Os valores dos equivalentes de Cr e Ni seriam:

- Metal base: $Cr_{eq} = 17,9$ e $Ni_{eq} = 1,4\%$
- Metal de adição: $Cr_{eq} = 23,2$ e $Ni_{eq} = 14,7$

A figura 3 mostra, no diagrama, os pontos deste exemplo correspondentes ao metal base, metal de adição e ao metal de solda para uma diluição de 30%. Neste caso, a solda teria certa de 15% de ferrita δ em sua estrutura.

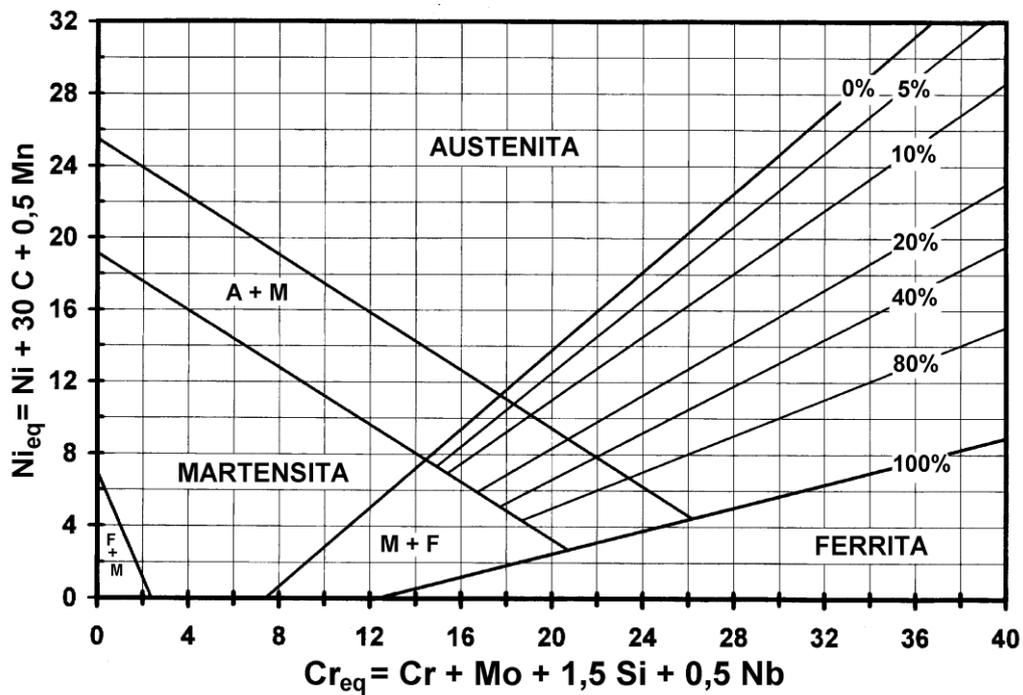


Figura 1 - Diagrama de Schaeffler

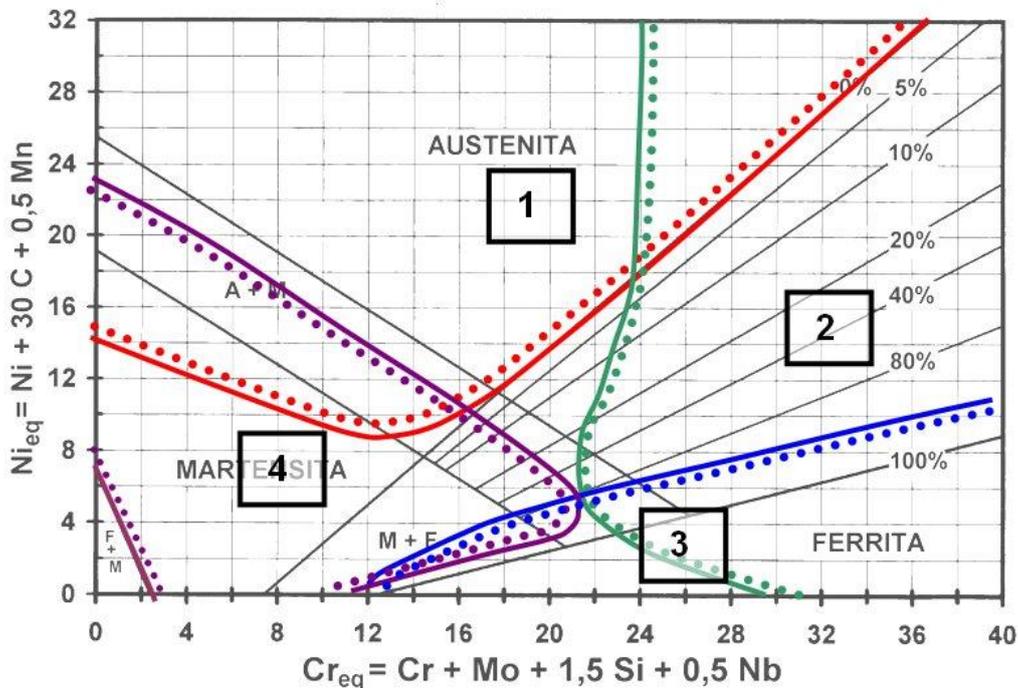


Figura 2 Regiões problemáticas típicas na soldagem de aços inoxidáveis: (1) Formação de trincas de solidificação ou por perda de ductilidade acima de 1250°C; (2) fragilização por formação de fases intermetálicas após aquecimento entre cerca de 450 e 900°C; (3) fragilização por crescimento de grão; e (4) fragilização e fissuração por formação de martensita.

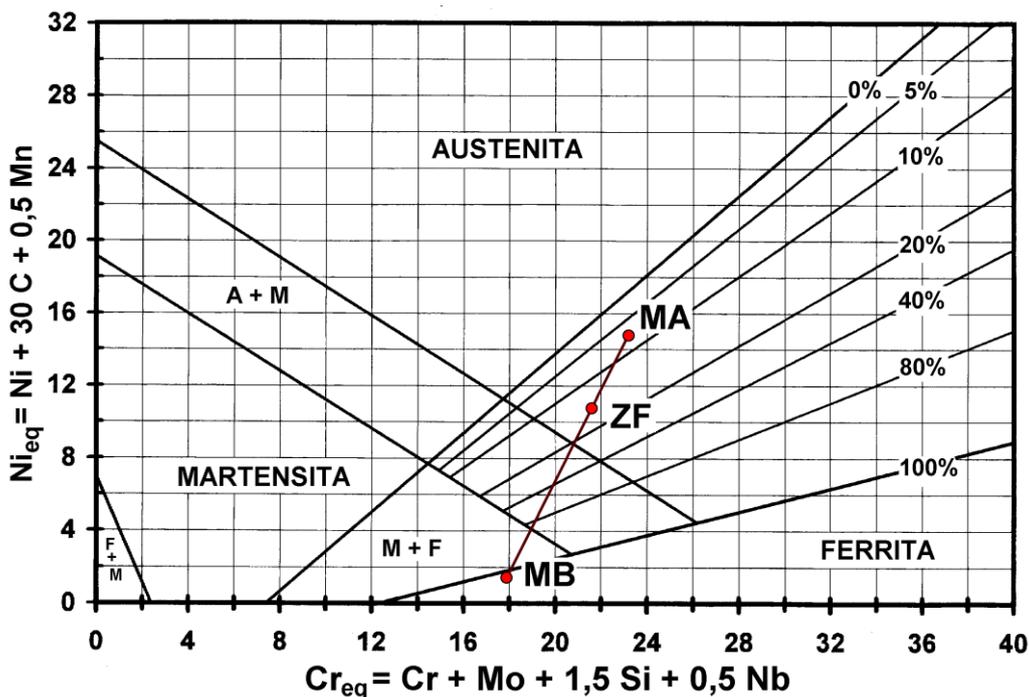


Figura 3 - Diagrama de Schaeffler mostrando os pontos correspondentes ao metal base (MB), metal de adição (MA) e a solda (ZF), ver texto.

2.5. Soldagem de Ferros Fundidos:

Ferros fundidos são ligas com teores de carbono, em geral, superiores a 2% que se solidificam com a formação de um constituinte eutético. Além do carbono, este material contém teores variados de silício, manganês, fósforo e enxofre e, em alguns casos, de cromo, níquel, molibdênio, titânio e outros elementos. A tabela 7 mostra a faixa de composição típica dos diferentes tipos de ferro fundido não ligados.

Tabela 7 – Faixa típica de composição química (% em peso) de ferros fundidos não ligados.

	C	Si	Mn	S	P
Branco	1,8-3,6	0,5-1,9	0,25-0,8	0,06-0,2	0,06-0,2
Maleável	2,2-2,9	0,9-1,9	0,15-1,2	0,02-0,2	0,02-0,2
Cinzento	2,5-4,0	1,0-3,0	0,2-1,0	0,02-0,25	0,02-1,0
Nodular	3,0-4,0	1,8-2,8	0,1-1,0	0,01-0,03	0,01-0,1
Vermicular	2,5-4,0	1,0-3,0	0,2-1,0	0,01-0,03	0,01-0,1

Os ferros fundidos brancos não têm praticamente nenhum carbono livre, estando este elemento na forma de cementita ou de outro carboneto (nos ferros fundidos ligados). O constituinte eutético, formado na solidificação deste material, é formado de cementita e austenita (que, no resfriamento, se transforma em perlita) e é conhecido como ledeburita. Devido à grande quantidade de carboneto existente neste material e, eventualmente, a

presença de martensita, este tipo de ferro fundido apresenta uma elevada resistência ao desgaste, particularmente quando ligado, mas possui uma ductilidade quase nula. A formação do ferro fundido branco é favorecida por baixos teores de Si e de outros elementos que favorecem a formação de grafite como Ni e Cu, pela presença de elementos que inibem a formação de grafite, como B, N, S, Cr, V, Mo e Mn, e por um resfriamento mais rápido.

Os ferros fundidos maleáveis são basicamente ferros fundidos branco de composição adequada que são submetidos a um recozimento de longa duração no qual os carbonetos são decompostos, sendo formados nódulos de grafite uma forma aproximadamente esférica. Esta transformação possibilita uma melhoria substancial da ductilidade do material.

Os ferros fundidos cinzentos têm, em geral, teor de silício acima de 1,5%, o que favorece a formação de grafite na solidificação e, em parte, enquanto o material está ainda na forma austenítica. A grafite tem uma forma típica de flocos finos que aparecem, em uma metalografia, como veios pontiagudos. Esta microestrutura favorece a propagação de trincas e prejudica a ductilidade deste material. A superfície de fratura, devido à grafite, tem um aspecto cinza característico e responsável pela denominação deste ferro fundido.

Os ferros fundidos nodulares têm composição similar aos dos ferros fundidos cinzentos exceto pelo seu menor teor de enxofre. Para estes material, a sua inoculação, antes da solidificação, com pequenas quantidades de Mg ou Cério modifica radicalmente a geometria dos flocos de grafite que se tornam aproximadamente esféricos. A matriz deste ferro fundido, dependendo de suas condições de processamento pode ser perlítica ou ferrítica. A forma dos nódulos de grafite, que não atuam como fortes concentradores de tensão e iniciadores de trincas, garantem uma melhor ductilidade para este tipo de ferro fundido, que pode apresentar um alongamento de até cerca de 15%.

Os ferros fundidos vermiculares têm estruturas intermediárias entre os ferros fundidos cinzentos e os nodulares. O controle rigoroso da quantidade de inoculante e de suas condições de solidificação fazem que parte da grafite se forme com uma forma irregular e parte nodular. Este tipo de ferro fundido apresenta propriedades intermediárias entre os ferros fundidos cinzentos e os nodulares e possui uma elevada condutividade térmica e grande capacidade de absorção de vibração e tem sido usado na fabricação, por exemplo, de blocos de motores.

A tabela 8 ilustra propriedades mecânicas típicas de alguns tipos de ferro fundido.

Os ferros fundidos apresentam várias características que dificultam a sua soldagem, destacando-se:

- Alto teor de carbono e, em geral, de fósforo e de enxofre.
- Tendência à formação de cementita na região da solda devido às velocidades de resfriamento relativamente elevadas associadas com a soldagem.
- Baixa ductilidade do metal base e de sua zona termicamente afetada.
- Estrutura porosa dos ferros fundidos cinzento, maleável e nodular favorece a absorção de graxas e outras sujeiras durante o seu uso.

Tabela 8 – Propriedades mecânicas típicas de alguns tipos de ferro fundido.

Tipo	Microestrutura da matriz	Lim. de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência (MPa)	Alongamento (%)
Cinzentos	Ferrítica-perlítica	---	125	---
Cinzentos	Perlítica	---	275	---
Maleável	Ferrítica	225	345	10
Maleável	Perlítica	350	480	5
Nodular	Ferrítica	275	415	18
Nodular	Perlítica	380	550	6

Ferros fundidos brancos são considerados, em geral, não soldáveis devido à sua extrema fragilidade. A soldagem pode ser utilizada, em ferros fundidos cinzentos, maleáveis, nodulares e vermiculares, principalmente para eliminar defeitos de fundição e para reparar peças trincadas ou mesmo fraturas.

Com base no tipo de metal de adição utilizado, a soldagem de ferros fundidos pode ser dividida em dois grupos principais:

- Procedimentos que fornecem um metal depositado de composição similar ao metal base (ferro fundido), e
- Procedimentos que fornecem um metal depositado de aço ou ligas com um elevado teor de metais não ferrosos (cobre/níquel).

O primeiro método é usado principalmente para reparar defeitos em peças fundidas e utiliza um pré-aquecimento de 300 a 700°C e, em geral, um tratamento térmico após a soldagem. Durante a soldagem, forma-se uma grande poça de fusão, favorecendo a remoção de gases e inclusões não metálicas na zona fundida. O resfriamento da solda é mantido bem lento (não mais do que 50-100°C/h) dificultando a formação de ledeburita e de martensita na ZF e ZTA. Os principais processos de soldagem usados neste tipo de procedimento são OFW, SMAW e FCAW.

No segundo método, a soldagem é, em geral, feita sem pré-aquecimento ou com um pré-aquecimento mínimo com a deposição de passes curtos e espaçados e com uma baixa energia de soldagem de modo a minimizar a extensão das regiões afetadas pela soldagem. Martelamento (**da solda**) pode ser, em alguns casos, usado para reduzir o nível das tensões residuais. Eletrodos podem ser de metais não ferrosos (ligas de níquel ou de cobre) ou de aço. No primeiro caso, o material não dissolve o carbono nem forma carbonetos, mantendo a ZF dúctil e macia. Eletrodos de aço podem ser de aço inoxidável austenítico ou de aços especiais com elevado teor de elementos formadores de carboneto. Neste caso, o depósito tende a ter uma dureza mais elevada, não sendo, em geral, usinável. O método é usualmente realizado com o processo SMAW.

2.6. Soldagem de Metais Não Ferrosos:

2.6.1. Alumínio e suas ligas:

O alumínio é um metal caracterizado por sua baixa densidade, baixa resistência mecânica (embora tratamentos térmicos e mecânicos, particularmente para certas ligas de Al, possam levar a níveis razoavelmente elevados de resistência mecânica), boa resistência à corrosão e elevadas condutividades térmica e elétrica. Existe um grande número de ligas de alumínio que podem apresentar um amplo espectro de propriedades. Estas ligas são classificadas geralmente por um sistema de quatro dígitos desenvolvido pela Aluminum Association, tabela 9.

Tabela 9 – Designação para grupos de ligas de alumínio.

Elementos de liga principais	Designação
Alumínio comercialmente. puro (>99,0% Al)	1XXX
Cobre	2XXX
Manganês	3XXX
Silício	4XXX
Magnésio	5XXX
Magnésio/Silício	6XXX
Zinco	7XXX
Outros elementos	8XXX

Algumas ligas de alumínio (principalmente dos grupos 1XXX, 3XXX, 4XXX e 5XXX) não são tratáveis termicamente enquanto outras (principalmente dos grupos 2XXX, 6XXX e 7XXX) podem ser tratadas termicamente. As ligas não endurecíveis por tratamento térmico podem ser endurecidas por solução sólida e por encruamento. Para as ligas tratáveis termicamente, o principal tratamento é o de solubilização e envelhecimento para causar endurecimento por precipitação. Este tratamento pode ser combinado com um encruamento antes do envelhecimento para maximizar o ganho de resistência mecânica. A condição ou estado da liga de alumínio pode ser indicado por um conjunto de letras e números colocados ao final de sua classificação. A designação da condição para ligas não tratáveis termicamente é mostrada, de forma resumida, na tabela 10. A designação para ligas tratáveis é mostrada, também de forma resumida, na tabela 11.

Tabela 10 – Designação da condição de ligas não tratáveis termicamente.

Designação	Condição
-O	Recozido (para produtos trabalhados mecanicamente e recozidos até o maior amaciamento possível).
-F	Como fabricado (para produtos processados sem um controle específico das condições de fabricação).
-H1*	Encruado (para produtos trabalhados a frio sem recozimento posterior).
-H2*	Encruado e parcialmente e parcialmente recozido (para produtos encruados acima da resistência desejada e parcialmente recozidos até a resistência desejada).
-H3*	Encruado e estabilizado (para produtos tratados a baixa temperatura para reduzir ligeiramente a sua resistência e evitar o seu amaciamento progressivo à temperatura ambiente).

* Dígitos colocados após estas designações indicam a severidade do tratamento.

Tabela 11 – Designação da condição de ligas tratáveis termicamente.

Designação	Condição
-O	Recozido (para produtos recozidos até o maior amaciamento possível).
-F	Como fabricado (para produtos processados sem um controle específico das condições de fabricação).
-W	Solubilizado (para produtos submetidos ao tratamento de solubilização).
-T1*	Envelhecido (Produto resfriado da temperatura de trabalho a quente e envelhecido naturalmente até uma condição bem estável).
-T2*	Envelhecido (Produto resfriado da temperatura de trabalho a quente, encruado e envelhecido naturalmente até uma condição bem estável).
-T3*	Envelhecido (Produto solubilizado, encruado e envelhecido naturalmente até uma condição bem estável).
-T4*	Envelhecido (Produto solubilizado e envelhecido naturalmente até uma condição bem estável).
-T5*	Envelhecido (Produto resfriado da temperatura de trabalho a quente e envelhecido artificialmente).
-T6*	Envelhecido (Produto solubilizado e envelhecido artificialmente).
-T7*	Envelhecido (Produto solubilizado e envelhecido artificialmente até uma condição além da de resistência máxima).
-T8*	Envelhecido (Produto solubilizado, encruado e envelhecido artificialmente).
-T9*	Envelhecido (Produto solubilizado, envelhecido artificialmente e encruado).
-T10*	Envelhecido (Produto resfriado da temperatura de trabalho a quente, encruado e envelhecido artificialmente).

* Dígitos (o primeiro diferente de zero) colocados após estas designações indicam variações do tratamento.

A presente discussão não engloba as diferentes características e, em particular, a soldabilidade das várias ligas de alumínio. O que é aqui apresentado deve ser considerado apenas como uma série de recomendações gerais válidas principalmente para o alumínio comercialmente puro. O alumínio apresenta diferenças de propriedades físicas e químicas que levam a diferenças de sua soldagem em comparação com a dos aços:

1. Elevada afinidade pelo oxigênio.
2. Elevada condutividade térmica.
3. Elevado coeficiente de expansão térmica.
4. Baixo ponto de fusão (660°C).

O alumínio reage prontamente com o oxigênio do ar formando uma camada superficial de óxido cujo ponto de fusão ($\approx 2000^\circ\text{C}$) é muito superior ao do alumínio e que, durante a soldagem, pode formar uma barreira física impedindo o contato e mistura do metal base fundido e do metal de adição e formando inclusões na solda. Adicionalmente, a medida que se torna mais expressa, a camada de óxido absorve umidade do ar. Na soldagem, esta umidade, juntamente com outras contaminações superficiais, é uma fonte de hidrogênio capaz de gerar porosidade na zona fundida de alumínio.

O óxido de alumínio pode ser removido por meios químicos (limpeza por solventes e/ou decapagem), mecânicos (lixamento, escovamento, etc) elétricos (ação de limpeza catódica do arco) ou metalúrgicos (ação escorificante de um fluxo durante a soldagem). Esta última forma é comum na soldagem SMAW e em processos de brasagem. Como o fluxo para alumínio é

muito reativo, a sua limpeza completa da junta após a soldagem é essencial para se evitar problemas futuros de corrosão. Usualmente, mais de um método de remoção da camada de óxido é usado em conjunto. Em função da elevada reatividade do alumínio, a remoção da camada oxidada pelos dois primeiros métodos deve ser realizada imediatamente ou, no máximo, 8 horas antes da soldagem.

Como a condutividade térmica do alumínio é 3 a 5 vezes maior que a do aço, o calor de soldagem é menos eficientemente usado na soldagem desse metal. Assim, o uso de pré-aquecimento e de um maior aporte térmico é comum na soldagem de juntas de maior espessura de alumínio para garantir a formação da poça de fusão e evitar problemas de falta de fusão. O pré-aquecimento, na soldagem do alumínio, não deve ser superior a 205°C. Na soldagem de ligas de alumínio endurecíveis por precipitação, a temperatura de pré-aquecimento deve ser ainda menor para minimizar a ocorrência de super-envelhecimento. A elevada condutividade térmica do alumínio favorece a rápida extração de calor e, assim, a rápida solidificação da poça de fusão o que facilita a sua soldagem fora da posição plana.

O coeficiente de expansão térmica do alumínio é aproximadamente duas vezes maior que o do aço. Isto favorece a ocorrência de distorção e o aparecimento de trincas.

Devido ao seu baixo ponto de fusão, este material não apresenta uma mudança de cor quando se aproxima de sua temperatura de fusão. Isto pode dificultar o controle da temperatura na brasagem manual com chama e, na soldagem a arco de chapas finas, exige um cuidado maior do soldador para se evitar que ocorra um excesso de fusão e, assim, a perfuração da junta.

Os principais problemas metalúrgicos de soldabilidade do alumínio e suas ligas são a formação de porosidade pelo H₂, a formação de trincas a alta temperatura (principalmente de solidificação) e a perda de resistência mecânica (para metal base encruado ou endurecido por precipitação).

A formação de porosidade está ligada à grande variação da solubilidade do hidrogênio com a temperatura no alumínio líquido. O limite de solubilidade deste gás no alumínio líquido é dado por:

$$S_H = 625,2\sqrt{p} \exp(-6355/T)$$

onde S_H é dada em ml/100g, p é a pressão parcial de hidrogênio em atmosferas e T é a temperatura absoluta. A figura 4 mostra a variação de S_H no alumínio líquido entre 1300°C e 660°C. Pode-se observar a grande variação desta solubilidade, o que mostra um elevado potencial para a ocorrência de super-saturação de hidrogênio, na parte posterior da poça de fusão, devido à menor temperatura desta em relação à região da poça diretamente sob o arco. Além disto, como o hidrogênio pode ser dissociado no arco, tornando-se mais reativo, existe a possibilidade de absorção deste elemento pela poça de fusão em teores superiores aos previstos pela equação anterior.

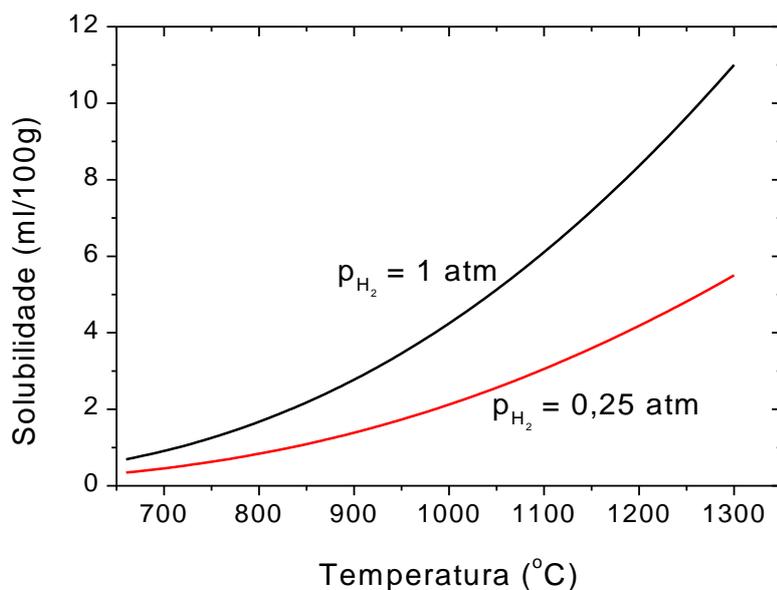


Figura 4 - Solubilidade do hidrogênio no alumínio líquido para dois valores de pressão parcial de hidrogênio.

As principais fontes de hidrogênio são a umidade da camada de óxido no metal base e no metal de adição, resíduos de lubrificante de produtos de trefilação, umidade absorvida no revestimento de eletrodos e proveniente da atmosfera quando uma menor estabilidade do processo ou um comprimento excessivo do arco comprometem a proteção.

Várias ligas de alumínio são sensíveis à formação de trincas na solidificação e, eventualmente, por ligação e por perda de ductilidade a alta temperatura. Algumas ligas são, também, sensíveis à fissuração por corrosão sob tensão. A fissuração na solidificação é favorecida pela presença de certos elementos de liga como Si, Cu e Mg (figura 5).

A resistência mecânica de diversas ligas de alumínio é baseada no seu encruamento ou em endurecimento por precipitação. Estes dois mecanismos são sensíveis a uma elevação da temperatura e, portanto, na soldagem, a zona termicamente afetada destas ligas pode ser amaciada. A figura 6 mostra a variação da dureza da ZTA nas condições como soldado e tratado termicamente após soldagem de uma liga de alumínio endurecível por precipitação submetida, antes da soldagem, a duas condições diferentes de envelhecimento.

Os processos mais usados para a soldagem do alumínio são GMAW e GTAW. Em ambos os processos, a seleção de consumível é baseada na composição química e em aspectos metalúrgicos e mecânicos. A especificação de consumíveis para a soldagem de alumínio e suas ligas para os processos GTAW e GMAW é coberta pelas normas AWS A5.3 e A5.10.

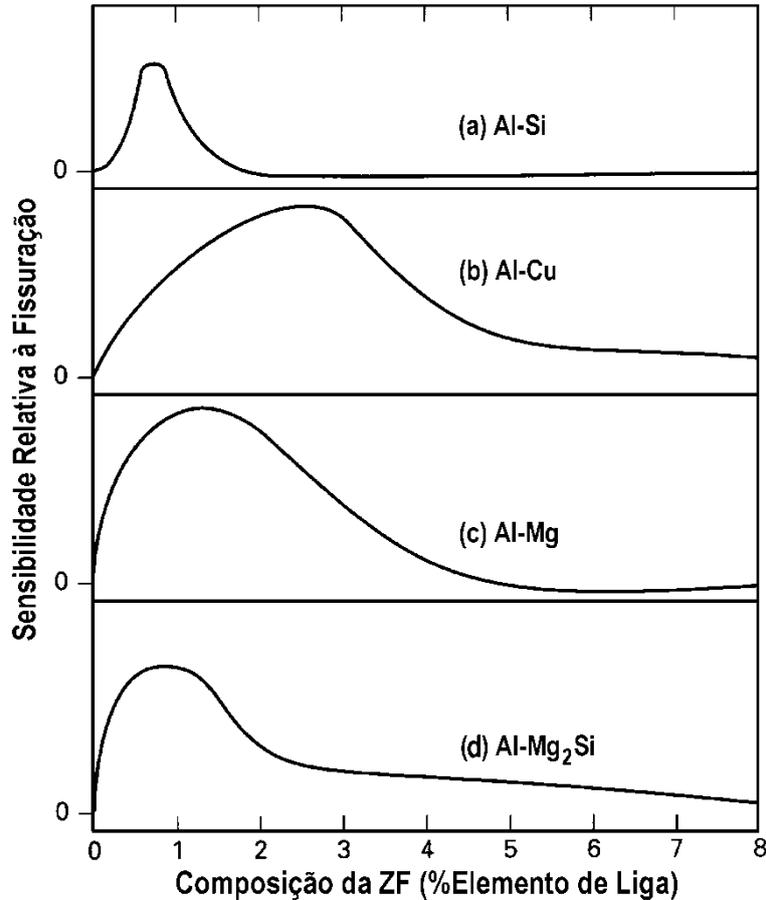


Figura 5 - Influência relativa na sensibilidade à fissuração na solidificação de alguns elementos de liga.

A soldagem GTAW é usada principalmente para juntas de menor espessura. Trabalha, em geral, com corrente alternada e eletrodo de tungstênio puro para garantir a remoção superficial de alumina (Al_2O_3) sem um aquecimento excessivo do eletrodo. O ignitor de alta frequência é mantido funcionando durante a soldagem para facilitar a reabertura do arco e aumentar a sua estabilidade. Recentemente, fontes de energia modernas têm permitido a soldagem com de polaridade variada com onda de formato retangular (em oposição à corrente alternada comum cuja onda tem um formato senoidal). Nesse caso, como a troca de polaridade é quase instantânea, o uso de alta frequência para manter o arco pode ser dispensado. Estas fontes permitem ainda ajustar a relação entre os tempos de cada polaridade da corrente, permitindo, assim, otimizar a ação de limpeza do arco e minimizar o desgaste do eletrodo.

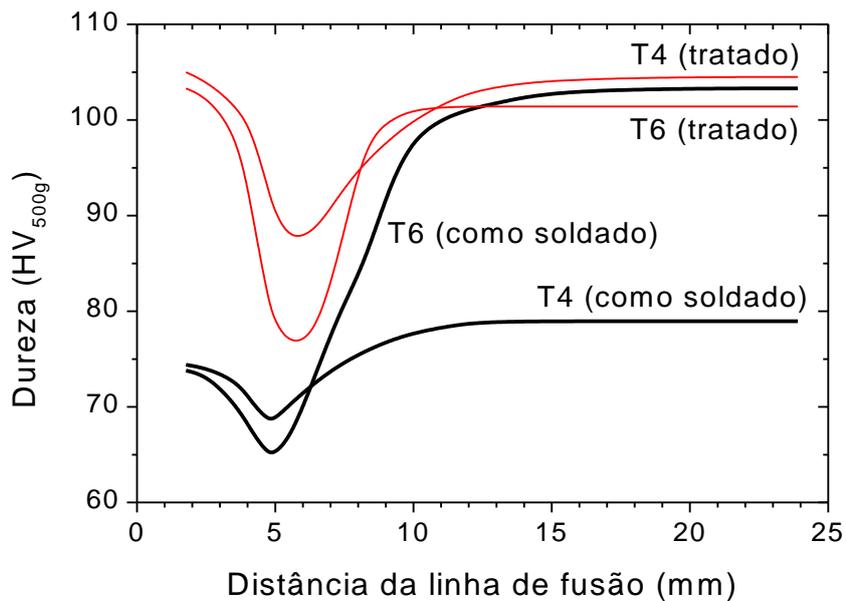


Figura 6 - Variação dureza na ZTA de ligas de alumínio 6061-T4 e -T6 nas condições como soldada e após tratamento térmico de envelhecimento após a soldagem.

Os gases de proteção usuais são argônio, hélio ou misturas de ambos. Maiores teores de hélio permitem uma melhor fusão do metal base mas causam uma redução da estabilidade do processo e da remoção de óxido da superfície da junta.

O processo GMAW é mais usado para juntas de maiores espessuras, apresentando velocidade de soldagem muito superior ao processo GTAW. O modo de transferência mais usado é o spray, sendo a soldagem com curto circuito difícil ou impossível pois a baixa resistividade elétrica do arame de alumínio tende a tornar o processo difícil de ser controlado. Em função da baixa resistência mecânica dos arames de alumínio, o correto ajuste do sistema de alimentação de arame é fundamental para se evitar problemas (dobramento do arame na entrada do conduto e conseqüente interrupção de sua alimentação), particularmente, na soldagem de arames de menor diâmetro.

Outros processos usados na soldagem do alumínio são a soldagem com eletrodos revestidos (SMAW), o plasma (PAW), soldagem a gás (OAW) e os processos de soldagem por resistência. Os processos de soldagem com feixe de elétrons e laser são também utilizados, mas, ainda, em pequena escala.

2.6.2. Cobre e suas ligas:

Cobre e suas ligas são amplamente utilizados na indústria elétrica (devido a sua baixa resistividade), em aplicações onde a resistência à corrosão de algumas destas ligas é importante, na fabricação de mancais, etc. Existem algumas centenas de ligas de cobre com elementos como zinco, níquel, estanho, alumínio, manganês, fósforo, berílio, cromo, ferro e chumbo. Os principais grupos de ligas de cobre são:

- Cobre comercialmente puro (>99,3% Cu);
- Cobre ligado (<5% de elementos de liga);

- Ligas Cu-Zn (latão);
- Ligas Cu-Sn (bronze);
- Ligas Cu-Al (bronze aluminoso);
- Ligas Cu-Si (bronze silicoso);
- Ligas Cu-Ni; e
- Ligas Cu-Ni-Zn.

Novamente, a discussão aqui apresentada terá um caráter mais geral, voltada principalmente para o cobre comercialmente puro, sem entrar em detalhes da soldagem de ligas específicas.

As propriedades do cobre que requerem atenção especial para soldagem são:

1. Elevada condutividade térmica.
2. Elevado coeficiente de expansão térmica.
3. Tendência a se tornar frágil a altas temperaturas.
4. Ponto de fusão relativamente baixo.
5. Baixa viscosidade do metal fundido.
6. Elevada condutividade elétrica.
7. Resistência mecânica, para várias ligas, baseada principalmente no encruamento.

Cobre é o metal de uso comercial de condutividade térmica mais elevada necessitando, para controle da fusão na sua soldagem, de pré-aquecimentos ainda maiores que o alumínio. Por exemplo, para a soldagem de uma junta de 12 mm de espessura, recomenda-se um pré-aquecimento de cerca de 400°C para a soldagem GMAW com argônio.

O coeficiente de expansão térmica do cobre é cerca de 50% maior que o do aço, podendo ser ainda maior para algumas ligas de cobre, existindo, assim, um grande potencial para problemas de distorção com o cobre.

O cobre e muitas de suas ligas são basicamente monofásicas, com estrutura cristalina CFC. Diversas destas ligas podem perder a sua ductilidade a alta temperatura e, ainda, sofrer problemas de fissuração a quente. Elementos de liga como arsênico, bismuto, estanho, selênio e chumbo tendem a favorecer esta forma de fissuração. Na soldagem de cobre comercialmente puro não desoxidado, a absorção de hidrogênio pela poça de fusão pode levar à reação deste gás com inclusões de óxido de cobre, com a formação de água, a qual leva à formação de trincas na ZTA destes materiais.

Ligas de cobre e zinco não devem ser soldadas a arco pois a elevada temperatura deste pode levar à vaporização de parte do zinco na poça de fusão.

Os processos mais usados para a soldagem do cobre e suas ligas são GTAW e GMAW. Soldagem GTAW é normalmente feita com corrente contínua e eletrodo negativo e proteção de argônio, hélio ou misturas destes dois gases. Para ligas de cobre e alumínio, pode ser necessário o uso de corrente alternada para a limpeza superficial. O processo GMAW é usado para a soldagem de peças de maior espessura.

Bibliografia complementar:

- Cary, H. B., **Modern Welding Technology**, Prentice-Hall, cap. 12-14, 1979.
- AWS, **Welding Handbook, Materials and Applications – Part 1**, American Welding Society, 8ª Edição, Vol. 3, 1996.
- AWS, **Welding Handbook, Materials and Applications – Part 2**, American Welding Society, 8ª Edição, Vol. 4, 1998.
- ASM, **Metals Handbook – Welding and Brazing**, American Society for Metals, 8ª Edição, Vol. 6, 1971.