



Boas práticas na soldagem de tubulações de Aços Inoxidáveis Duplex e Superduplex, utilizando o processo GTAW.

José **Arthur** Ferreira

José Arthur Ferreira trabalha há 23 anos na Petrobras, atualmente é lotado na UO-ES/ATP-JUB-CHT/ISUP, notes KMEM e rota 705-3630 atuando como Técnico de Inspeção de Equipamentos. Possui formação de Técnico de Mecânica (ETFES), Tecnólogo Mecânica (UFES) com Especialização em Engenharia e Tecnologia da Soldagem (UFMG).

RESUMO

Os aços inoxidáveis Duplex e Super Duplex são materiais com um excelente desempenho, devido às suas propriedades mecânicas e elevada resistência à corrosão. Uma composição química adequada e microestrutura balanceada são as responsáveis por esta combinação de propriedades. No entanto, são estes mesmos fatores que os fazem especialmente susceptíveis à precipitação de fases intermetálicas, com efeitos maléficos no seu desempenho.

O desempenho desses aços pode ser seriamente afetado pela soldagem. Devido à importância em manter a microestrutura desses materiais balanceada e evitar a formação de fases intermetálicas indesejáveis, os parâmetros de soldagem e os metais de adição empregados devem ser minuciosamente especificados e controlados. O balanço micro estrutural do metal base (iguais proporções de Ferrita e Austenita) será afetado pelo ciclo térmico de soldagem. Se houver mudança no balanço da microestrutura ao longo do material soldado, a perda das propriedades dos AID e AISD podem ser significativas. Esses materiais apresentam propriedades que derivam tanto da fase ferrítica quanto da austenítica em sua microestrutura.



A maior parte das fases intermetálicas precipitadas nesses materiais são ricas em cromo e molibdênio. Devido à precipitação, acaba por existir regiões na matriz que ficam empobrecidas nesses elementos, favorecendo o aparecimento de corrosão, principalmente a localizada. A partição dos elementos de liga na estrutura duplex ocorre de forma que os elementos cromo e molibdênio enriquecem a fase ferrítica, enquanto os elementos níquel e nitrogênio se concentram na fase austenítica. A partição ocorre mais facilmente em juntas soldadas onde há o reaquecimento devido a uma maior quantidade de passes de solda. Quanto maior a energia imposta à junta, mais significativa se torna a partição. Quando houver na microestrutura do metal de solda e da zona afetada pelo calor muita quantidade de Ferrita, a resistência à corrosão por pites é bastante afetada. A estrutura ferrítica é propensa à precipitação de nitretos de cromo, o que leva a uma diminuição da concentração de cromo na estrutura, diminuindo a resistência à corrosão por pite.

Palavras-chave:

AIA – Aços inoxidáveis austeníticos

AID – Aços inoxidáveis duplex

AIHD - Aços inoxidáveis hiperduplex

AISD – Aços inoxidáveis superduplex

GTAW – Gás Tungstênio Arc Welding

PRE – *pitting resistance equivalent*

PRE_w – *pitting resistance equivalent* para aços com adição de tungstênio

ZAC – Zona Afetada pelo Calor

γ – austenita

α – ferrita

σ – fase sigma

$\gamma 2$ – austenita secundária

1. OBJETIVO

Apresentar algumas boas práticas para realização de soldagem de tubulações de Aços Inoxidáveis Duplex e Superduplex, utilizando o processo GTAW, visando atenuar problemas típicos encontrados em nossas instalações, onde a junta soldada apresenta falhas em serviço, em curtas campanhas.

2. INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis duplex (AID) surgiram na década de 30 e adquiriram importância comercial na década de 40. O crescente avanço das atividades de exploração e produção de petróleo offshore e o aumento da produtividade em meios mais agressivos alavancaram a procura por



materiais que possuam elevadas propriedades mecânicas, assim como uma excelente resistência à corrosão em contato com estes meios. Com o interesse de melhorar a resistência à corrosão, as ligas mais recentemente introduzidas no mercado, chamadas de aços inoxidáveis superduplex (AISD), e aços inoxidáveis hiperduplex (AIHD) possuem uma maior quantidade de elementos de liga.

Os aços inoxidáveis duplex (AID) são materiais que aliam uma alta resistência à corrosão com valores elevados de resistência mecânica produto dos diversos elementos de liga contidos em solução sólida na liga, além da fina microestrutura bifásica composta por proporções semelhantes das fases Ferrita e Austenita. Porém, é interessante salientar que estes aços podem sofrer fenômenos de fragilização e perda de resistência à corrosão provocados pelo aquecimento localizado, tal como acontece em diversos processos de soldagem.

A maioria dessas transformações está relacionada à Ferrita, pois a taxa de difusão nesta fase é aproximadamente 100 vezes mais rápida do que na Austenita. O metal de base apresenta microestrutura composta por cerca de 50 % de Ferrita e 50 % de Austenita, entretanto o teor de ferrita na zona fundida pode variar de 35 % a 65 %. Neste contexto, a fase sigma é um dos compostos que se precipita e mais prejudica as propriedades dos AISD. Esta fase deletéria, rica em Cr, é fortemente fragilizante e pode se formar entre 650°C e 1000°C, mas este intervalo é fortemente dependente da composição química da liga. Esta fase, freqüentemente é associada a uma forte redução na tenacidade ao impacto e à perda de resistência à corrosão da liga. Neste sentido, a precipitação de 4% em volume de fase sigma pode resultar em um decréscimo de aproximadamente 90% da tenacidade.

Os aços inoxidáveis duplex (AID) não devem ser exposto à temperatura de operação superior a 250 °C em função da precipitação de fases deletérias que acarretam na redução da resistência à corrosão, ductilidade e tenacidade.

Ao longo da sua evolução esses aços inoxidáveis têm sido referenciados comercialmente de três maneiras: duplex, superduplex e hiperduplex. Neste trabalho quando for feita menção de forma geral ao aço Inoxidável duplex (AID) entenderemos que o conceito pode ser estendido ao aço inoxidável superduplex e também ao aço inoxidável hiperduplex, salvo se for uma referência explícita. Todos apresentam estrutura austeno-ferrítica. Basicamente a diferença entre eles está no valor de Número de Resistência Equivalente ao Pitting (PREN). Atualmente tem se adotado a classificação dos diferentes graus baseado na composição química e no PREN, segundo as seguintes fórmulas, que servem para aços com e sem adição do elemento W.

$$PREN_N = \%Cr + 3,3 x(\%Mo) + 16x(\%N)$$

$$PREN_W = \%Cr + 3,3x(\%Mo + 0,5\%W) + 16x(\%N)$$



Neste contexto, a soldagem dos AID é uma operação que exige grandes cuidados, pois esta família de aços inoxidáveis se solidifica com uma microestrutura 100% Ferrítica e a Austenita somente surge por difusão no resfriamento abaixo de 1250 – 1300°C. Deste modo, uma velocidade de resfriamento muito rápida conduz a uma microestrutura com maior proporção de Ferrita e rica em nitretos de cromo (Cr₂N). Por outro lado, um resfriamento muito lento pode provocar principalmente, a formação da fase intermetálica σ a partir da fase Ferrita.

Deste modo, estas duas formas de desbalanço microestrutural devem ser evitadas na soldagem de AID e AISD. As medidas para evitar estas mudanças micro estruturais indesejáveis são a utilização de metal de adição mais rico em Ni, uso de gás de proteção com adição de 1 a 3% nitrogênio na soldagem TIG e controle do aporte de calor para que não seja muito baixo. Para se evitar a precipitação de intermetálicos, a principal medida é o controle do aporte de calor, para que não seja excessivamente alto. Na pesquisa bibliográfica é recomendado aporte de calor entre 0,5 kJ/mm e 2,5 kJ/mm para a soldagem de AID e entre 0,5 kJ/mm e 1,5 kJ/mm para os AISD.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. FLUXO DE CALOR NA SOLDAGEM

Na soldagem a arco elétrico, o calor necessário para fundir os metais de base e de adição é gerado pelo arco elétrico. Esta energia determina não só o volume da poça de fusão como também o seu tempo de solidificação e as velocidades de resfriamento e temperaturas na junta soldada.

3.1.1. Eficiência Térmica do Processo de Soldagem

Nem toda a energia gerada pelo arco elétrico atinge o metal de base. Uma parte é dissipada para o meio circundante. Por este motivo define-se a eficiência térmica do processo de soldagem como sendo a relação entre a energia efetivamente absorvida pelo metal de base e a energia gerada pelo arco elétrico.

A eficiência térmica para o processo GTAW está entre 0,4 e 0,8. Esta dispersão de valores pode ser devido às diferenças nos arranjos experimentais. Alguns autores reportam que a eficiência térmica do processo de soldagem diminui com o aumento da corrente de soldagem. Este efeito pode ser explicado por uma perda maior de energia pela superfície da peça soldada. Por outro lado, uma diminuição no comprimento do arco acarreta em um aumento. De qualquer maneira, a influência dos parâmetros de soldagem na eficiência térmica do processo de soldagem GTAW leva a variações sempre ao redor de 0,6.

3.1.2. História Térmica

A história térmica de uma junta soldada é composta pela repartição térmica e infinitos ciclos térmicos de soldagem. Esta é determinada pelas propriedades físicas do material, a temperatura inicial do metal de base, a geometria da junta, a energia de soldagem líquida e o formato da fonte de calor.



O ciclo térmico representa a variação da temperatura com o tempo, para um dado ponto da junta soldada. Ele está relacionado com a microestrutura nas diferentes regiões da junta soldada. A Figura 1 apresenta esquematicamente diversos ciclos térmicos e a linha tracejada une as temperaturas máximas de cada um dos ciclos. Percebe-se que, o ciclo térmico experimentado por um determinado ponto da junta soldada, depende entre outras coisas da sua posição relativa à fonte de calor.

Por repartição térmica entende-se a variação da temperatura máxima dos ciclos térmicos em função da distância ao centro do cordão de solda. Ela determina a extensão da zona afetada pelo calor (ZAC). A Figura 2 apresenta esquematicamente a repartição térmica em uma junta topo-a-topo.

No caso de uma solda multipasse, a região da ZAC do passe de raiz (A) está sujeita a ciclos térmicos, conforme mostrado na Figura 3. Analisando-se a figura, percebe-se uma diminuição na temperatura máxima do primeiro para o terceiro passe. Da mesma maneira, ocorre um aquecimento da chapa com a seqüência de soldagem.

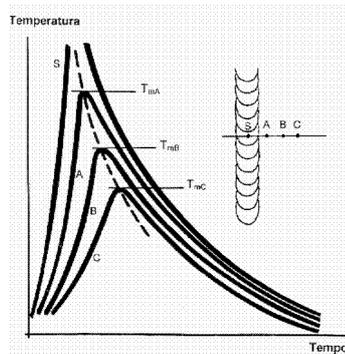


Figura 1. Ciclos térmicos de soldagem experimentados por diferentes pontos da junta soldada

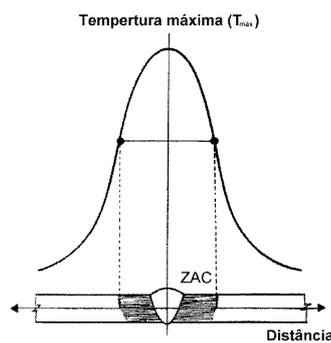


Figura 2. Repartição térmica em uma junta soldada

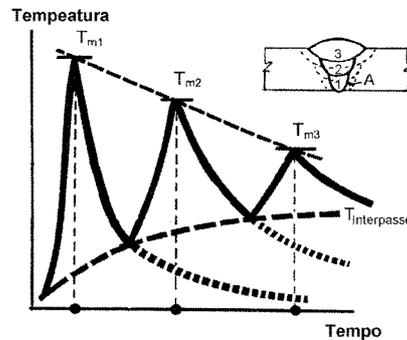


Figura 3. Exemplo dos ciclos térmicos experimentados por um ponto da ZAC perto da raiz de uma solda multipasse topo-a-topo

3.2. AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX

Os aços inoxidáveis duplex (AID) são materiais baseados no sistema Fe-Cr-Ni. Sua composição química e processamento termomecânico conferem-lhes uma microestrutura bifásica com proporções aproximadamente iguais de Ferrita e Austenita. Tipicamente possui 20 a 30% de cromo e 5 a 10% de níquel, com teores muito baixos de carbono (menores de 0,03%) e com adições de nitrogênio, molibdênio, tungstênio e cobre. No presente trabalho, salvo citação contrária, o termo inoxidável duplex estará referenciando às três designações comerciais conforme Tabela 1.

Tabela 1. Composição química (% em peso) dos principais Aços Inoxidáveis Duplex

Grade	UNS N°	EN N°	C	Cr	Ni	Mo	N	Mn	Cu	W	PREN
Duplex - 22 Cr standard											
LDX2101	S32101	1,4162	0,04	21,0-22,0	1,35-1,7	0,1-0,8	0,2-0,25	4,0-6,0	0,1-0,8	-	28,0
2205	S31803	1,4462	0,03	21,0-23,0	4,5-6,5	2,5-3,5	0,08-0,20	2,00	-	-	30,5
2205	S32205	1,4462	0,03	22,0-23,0	4,5-6,5	3,0-3,5	0,14-0,20	2,00	-	-	34,1
2304	S32304	-	0,03	21,5-24,5	3,0-5,5	0,05-0,60	0,05-0,20	2,50	0,05-0,60	-	23,0
Super duplex - 25Cr											
2520	S32520	1,4507	0,03	24,0-26,0	5,5-8,0	3,0-4,0	0,20-0,35	1,50	0,5-2,0	-	37,1
F255	S32550	1,4507	0,04	24,0-27,0	4,5-6,5	2,9-3,9	0,10-0,25	1,50	1,5-2,5	-	35,2
2507	S32750	1,4410	0,03	24,0-26,0	6,0-8,0	3,0-5,0	0,24-0,32	1,20	0,50	-	37,7
Zeron100	S32760	1,4501	0,03	24,0-26,0	6,0-8,0	3,0-4,0	0,20-0,30	1,00	0,5-1,0	0,5-1,0	40,0
DP3W	S39274	-	0,03	24,0-26,0	6,0-8,0	2,5-3,5	0,24-0,32	1,00	0,2-0,8	1,50-2,50	38,6
Hiperduplex											
2707	S32707	-	0,03	26,0-29,0	5,50-9,50	4,0-5,0	0,30-0,50	1,50	1,00	-	≥48
3207	S33207	-	0,03	29,0-33,0	6,00-9,00	3,0-5,0	0,40-0,60	1,50	1,00	-	≥48
NOTA 1 Valores de % únicos são máximos.											
NOTA 2 (-) Não definido nas especificações.											



Os AID apresentam numerosas vantagens sobre os aços inoxidáveis austeníticos e ferríticos tradicionais. A resistência mecânica dos AID é aproximadamente o dobro da dos aços inoxidáveis austeníticos, combinada com uma boa tenacidade. Apresentam uma elevada resistência ao trincamento por corrosão-sob-tensão e à corrosão localizada em meios contendo cloretos. A sua soldabilidade é superior à dos aços inoxidáveis ferríticos.

A maior resistência à tração dos AID permite importantes reduções na seção resistente, obtendo-se grandes economias de peso. Além disso, devido à excelente resistência à corrosão, a vida útil do equipamento pode ser prolongada, dependendo da aplicação e do material que está sendo substituído pelo AID. Desta forma, estes materiais tornam-se bastante atrativos do ponto de vista econômico. Dependendo da norma de fabricação aplicada e do material substituído, a economia em peso pode chegar a 50%. A Tabela 2 mostra a economia em peso alcançada quando o aço inoxidável austenítico AISI 316 L é substituído pelo AID UNS S31 803.

Tabela 2. Economia em peso alcançada pela substituição do aço inoxidável austenítico AISI 316 L pelo AID UNS S31 803, com a aplicação de diversos códigos.

Código	País	Esforço Admissível ($e > 5$ mm, 20°C) [MPa]		Economia em peso [%]
		AISI 316 L	UNS S31803	
ASME VIII	E.U.A.	115	155	26
CODAP 90, f.1	França	170	275	38
BS 5.500	Inglaterra	150	289	48
ADW 2	Dinamarca	150	300	50

Os Aços Inoxidáveis Duplex (AID) possuem aproximadamente proporções iguais de austenita e ferrita, com a ferrita compondo a matriz. Exemplos de microestruturas representando materiais base de laminados e fundidos são apresentados nas figuras 4 e 5, ambos exibindo matriz ferrítica com ilhas de austenita de várias morfologias. A estrutura na figura 4 (a) tem orientação pronunciada paralela ao sentido de laminação. A figura 4 (b) mostra as ilhas de austenita - seção transversal ao sentido de laminação. A vista da figura 4 (c) também possui algum direcionamento no sentido da laminação, mas não tão pronunciado como na figura 4 (a).

A microestrutura do AID fundido (figura 5) é grosseira e apresenta diferente morfologia da austenita observada nos laminados.

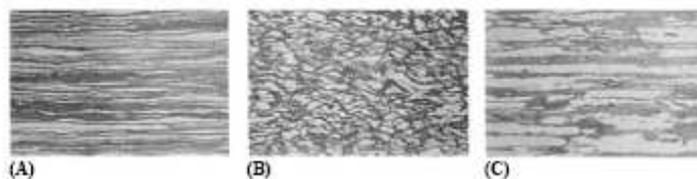


Figura 4. Efeito da orientação do plano na microestrutura do AID FE-22CR-5,5NI-3MO-0,15N. (A) Paralelo à direção de laminação. (B) Transversal à direção de laminação. (C) Visão plana. 100x.

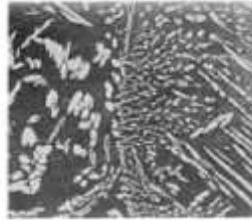


Figura 5. Microestruturas do AID fundido FE-22CR-5-NI-3MO-0,15N. 25x.

A dureza do material de base é dependente do tipo e nível de trabalho a frio, mas possui geralmente uma média de 260 HV (25HRC) para o Fe-22Cr-5,5Ni-3Mo-0,15N.

Detalhes de resistência à tração e dureza para cada grau são fornecidas na tabela 3.

Tabela 3. Propriedades Mecânicas à Temperatura ambiente

UNS NO.	MINIMUM YIELD STRENGTH		MINIMUM TENSILE STRENGTH		ELONGATION (MINIMUM), %	HARDNESS	
	MPA	KSI	MPA	KSI		HB	HRC
S31200	450	65	690	100	25	280	...
S31500	440	64	630	92	30	290	30.5
S31803	450	65	620	90	25	290	30.5
S32304	400	58	600	87	25	290	30.5
S32550	550	80	760	110	15	297	31.5
S32750	550	80	800	116	15	310	32
S32760 ^(A)	550	80	750	109	25	200-270	...
S32900	485	70	620	90	20	271	28
S32950	480	70	690	100	20	290	30.5

(A) NOT LISTED IN ASTM A 790

A tenacidade dos AID em temperaturas de aproximadamente -100°C é boa, mas o metal de solda e ZAC são comumente muito menos tenazes, e é freqüentemente um fator limitante na aplicação dos AID. O material base do AID possui uma estreita transição dúctil-frágil (figura 6), mas a mudança não é marcante como outros aços de estrutura cúbica de corpo centrado (ccc). Estas ligas não são adequadas para aplicações criogênicas.

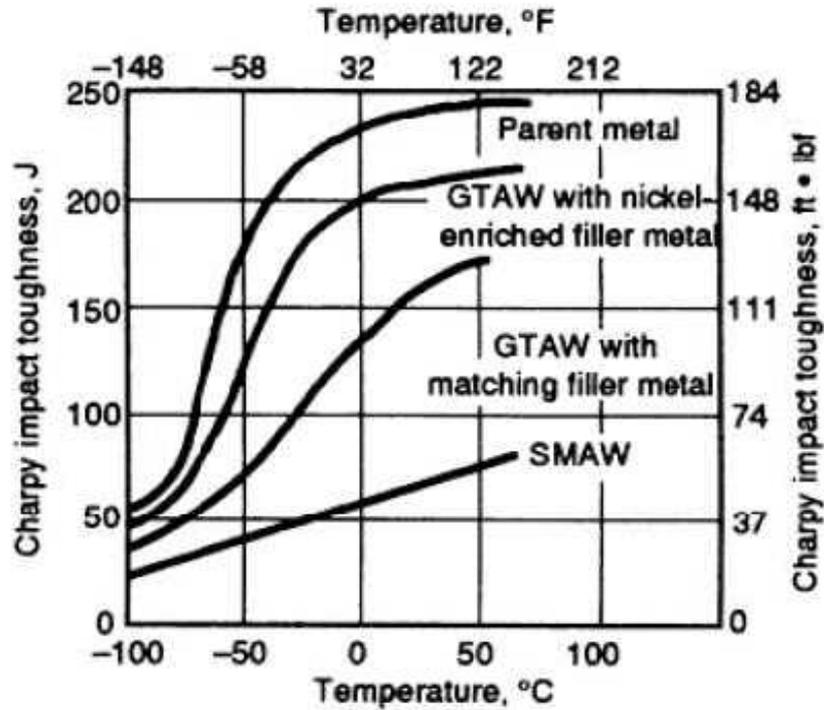


Figura 6 – Gráfico Charpy X Temperatura para a Liga Fe-22cr-5,5ni-3mo-0,15n (Metal De Base e Metal de Solda Soldados Pelos Processos GTAW e SMAW)

3.3. FASES INTERMETÁLICAS

O alto conteúdo de liga e a presença de matriz ferrítica, tornam o AID suscetível à fragilização e perda de propriedades mecânicas, especialmente a tenacidade, através de prolongada exposição a elevadas temperaturas. Isto é causado pela precipitação de fases intermetálicas como: fase sigma (σ), fase chi (χ), e fase laves (η). Por esta razão, a temperatura para aplicação destes materiais é de no máximo 280°C, para o material base, e no máximo 250°C para estruturas soldadas.

A maioria dos aços alta liga, como por exemplo: Fe-25Cr-5Ni-2,5Mo-0,17N-Cu e Fe-25Cr-7Ni-3,5Mo-0,25N-Cu-W, são mais suscetíveis para formação destas fases deletérias.

A Figura 7 mostra às fases que podem ser formadas nos AID, a faixa de temperatura aproximada acima da qual elas irão desenvolver, e os efeitos dos elementos de liga na cinética de transformação.

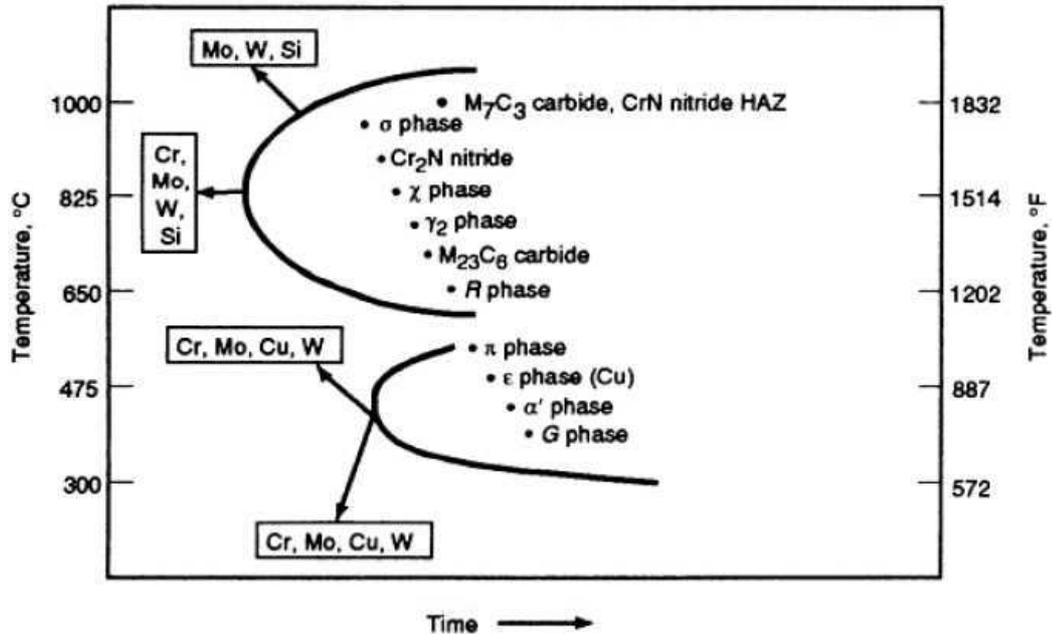


Figura 7. Diagrama de Transformação Tempo X Temperatura

3.3.1. FASE ALFA LINHA (FRAGILIZAÇÃO A 475°C)

A figura 8 demonstra a forte influência da microestrutura à perda de tenacidade após a exposição do metal base e ZAC da liga 2205 à faixa de fragilização de 475°C.

Neste caso, a microestrutura da ZAC simulada contém um maior nível de ferrita do que a material base (100FN x 70FN), devido ao fato do material 2205 ser um material com menor conteúdo de nitrogênio. Esta dramática perda de tenacidade na ZAC em poucos minutos de exposição nesta faixa de temperatura, demonstra porque o uso de soldagem multipasse e TTPS pode criar potenciais problemas de fragilização, se a microestrutura da solda não for devidamente controlada.

Já a ZAC simulada da liga 2507 (figura 8c) é muito mais lenta para a perda a tenacidade devido ao seu alto conteúdo de nitrogênio, resultando em menor FN (80FN). O maior conteúdo de cromo da liga 2507 deveria acelerar a fragilização alfa linha da ferrita, entretanto o maior conteúdo de austenita na ZAC simulada mitiga o efeito da fragilização, resultando em um maior envelhecimento do que perda de tenacidade. Até uma ZAC com microestrutura balanceada não pode prevenir uma eventual fragilização, demonstrando o motivo da aplicação de AID em temperaturas inferiores a 280°C.

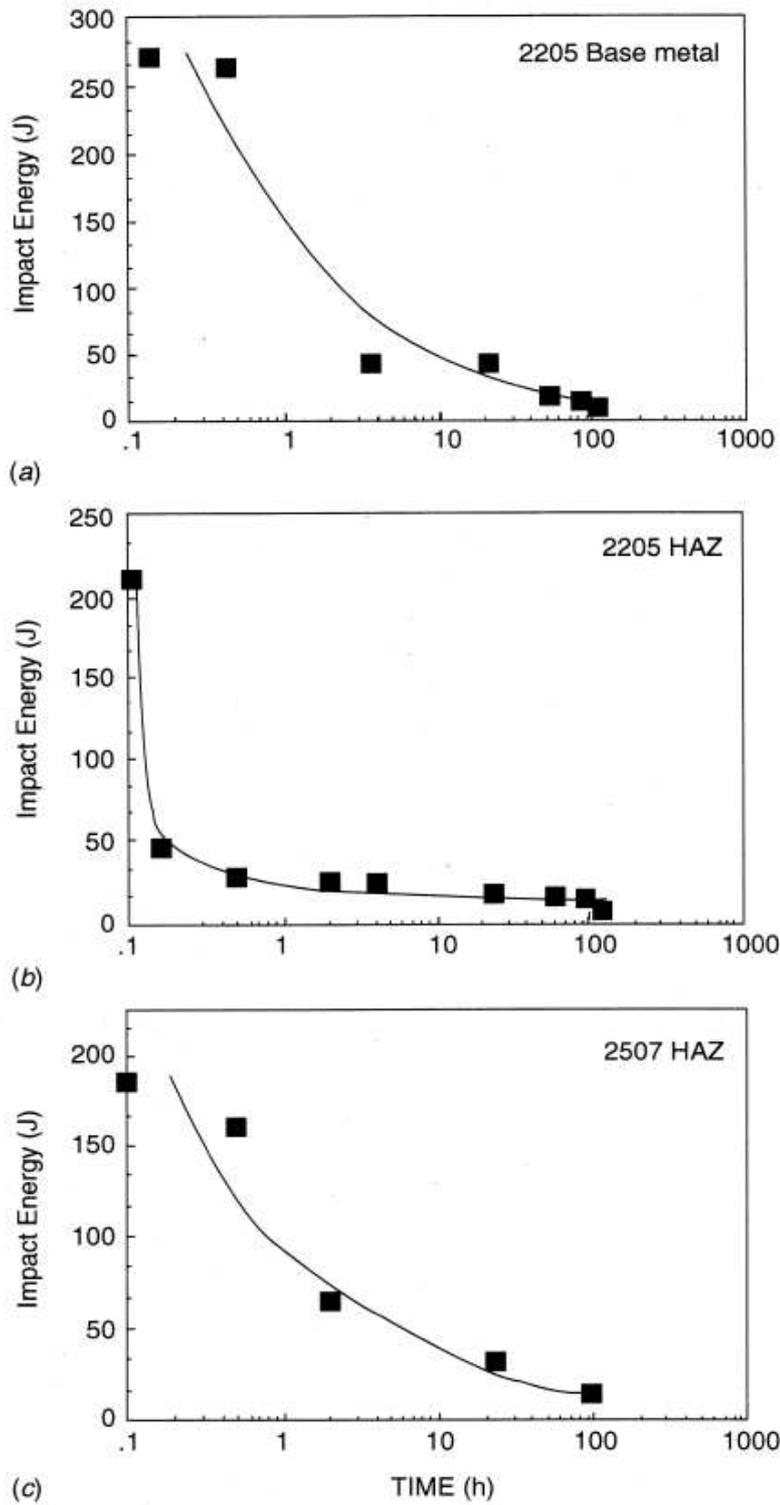


Figura 8 . Efeito da Exposição a 475°C na Tenacidade e de AID: (a) 2205 Metal De Base; (b) 2205 Zac; (c) 2507 Zac



3.3.2. NITRETOS DE CROMO – Cr₂N – CrN

Nos aços inoxidáveis que não tem na sua composição química elementos com uma elevada capacidade de formação de nitretos (Ti, Nb ou V), o limite de solubilidade do nitrogênio é dado pelo equilíbrio entre a matriz e o Cr₂N. Portanto, quando o teor de nitrogênio supera esse limite, a liga se torna termodinamicamente instável e nitretos podem precipitar entre 600°C e 1050°C.

A direção do crescimento do Cr₂N na ferrita depende da relação entre os parâmetros de rede do precipitado e da matriz, que por sua vez, muda com a temperatura.

Os nitretos de cromo precipitam por nucleação e crescimento, seguindo uma curva de cinética em “C”. A nucleação se dá nas discordâncias, inclusões, contornos de grão ferrita-ferrita e interfaces ferrita-austenita. A cinética de precipitação é altamente dependente da temperatura, da composição química da liga e da sua história térmica.

Nos AID, bastonetes de Cr₂N, ou plaquetas de CrN precipitam a partir da ferrita. Durante o resfriamento, a partir do campo ferrítico, ocorre uma competição entre precipitação de austenita e de nitreto de cromo. Se a quantidade de austenita formada for próxima do valor de equilíbrio, praticamente todo o nitrogênio estará dissolvido nela. Como consequência, a quantidade de nitreto de cromo precipitado na ferrita será praticamente nula. Por outro lado, se a precipitação da austenita for retardada ou impedida, a ferrita torna-se supersaturada em nitrogênio, precipitando nitreto de cromo. Cálculos termodinâmicos mediante a utilização do programa de computador Thermo-calc® verificaram que, no caso do AID UNS S31803, ainda que as condições de resfriamento permitissem a formação da austenita, o Cr₂N é termodinamicamente estável a temperaturas abaixo de 900°C. Portanto, a presença dos nitretos é esperada quando o material é submetido por longos períodos de tempo a temperaturas abaixo de 900°C.

Quanto à influência dos elementos de liga na cinética de precipitação dos nitretos nos AID, o Cr, Mo e W aceleram a sua cinética de precipitação. Da mesma maneira, o Mo e o W estendem o campo de precipitação destas fases para temperaturas mais elevadas. O Ni aumenta a fração da austenita e, portanto, diminui e retarda a precipitação de nitretos. Já o efeito do N deve ser visto com maior cuidado, como este é um elemento fortemente austenitizante, pode chegar a retardar e diminuir a precipitação de nitretos. Mas, por outro lado, este elemento faz parte da composição do nitreto, e pode ter o efeito contrário. A figura 9 mostra a quantidade de nitreto extraído da ZAC de um AID (Fe-27,5Cr-3,8Mo-Ni-N) em função do teor de nitrogênio e da fração volumétrica de ferrita na liga. Para uma dada fração volumétrica de ferrita, a quantidade de nitretos precipitados na ZAC aumenta com o teor de nitrogênio no aço.

A grande maioria dos autores reporta a precipitação do Cr₂N nos AID na faixa de temperatura de 700°C a 900°C. No entanto, a sua precipitação a 400°C foi verificada na liga fundida CF8M (Fe-20Cr-10Ni-2Mo-0,15N) nas interfaces ferrita-austenita, após tempos de 30.000 horas.



Assim, a precipitação de Cr₂N pode-se converter em outro tipo de fragilização a baixas temperaturas.

A precipitação de nitretos de cromo pode levar à diminuição da resistência à corrosão dos AID, sendo que, ao redor destes precipitados pode-se iniciar um tipo de corrosão localizada. O teor de cromo da matriz ferrítica adjacente aos nitretos é aproximadamente 3% menor que no restante da matriz. Como a difusão do cromo na ferrita é facilitada, esta diferença tende a diminuir para velocidades de resfriamento menores durante a soldagem. Este pequeno empobrecimento em cromo não parece justificar totalmente a corrosão localizada gerada nestas regiões.

Portanto, outros fenômenos como a corrosão galvânica entre a zona empobrecida e a matriz, o desarranjo interfacial nitreto-matriz ou os esforços internos podem contribuir para que a corrosão localizada aconteça.

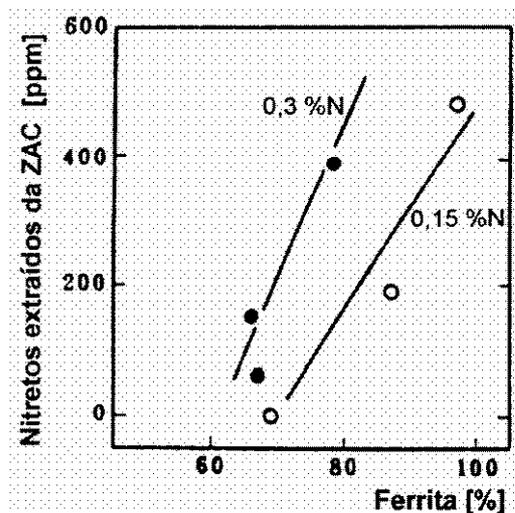


Figura 9. Efeito do Teor de Nitrogênio e da Fração de Ferrita na Quantidade de Cr₂N Precipitado na ZAC de um AID

As propriedades mecânicas dos AID também podem ser afetadas pela precipitação dos nitretos. Esta precipitação pode levar a uma redução significativa da tenacidade. A figura 10 apresenta a energia absorvida no ensaio Charpy de um AID (Fe-27,5Cr-3,8Mo-Ni-N) em função da massa de nitreto extraída da ZAC, para frações volumétricas de ferrita maiores que 70%vol. Em corpos de prova Charpy de AID testados a baixas temperaturas (-200°C, -20°C), fraturas por clivagem tem sido observadas na presença de Cr₂N.

De uma maneira geral, devido às suas frações volumétricas menores, a presença dos nitretos de cromo nos AID é menos prejudicial que a de outras fases intermetálicas, como a fase sigma.

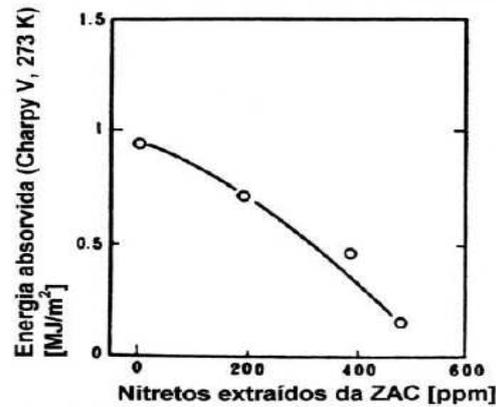


Figura 10 – Relação entre a Energia Absorvida no Ensaio Charpy (273 K) e a Quantidade de Nitretos na ZAC de um AID

3.3.3. FASE SIGMA

Temperaturas maiores das que produzem precipitação alfa linha (figura 7), produzem precipitação de compostos intermetálicos. O composto intermetálico mais importante é a fase sigma (que é aproximadamente FeCr), embora a fase chi (Fe₃₆Cr₁₂Mo₁₀ ou aproximadamente Fe₃CrMo) também possa se formar.

A formação de componentes intermetálicos se inicia a aproximadamente 570°C e a dinâmica de formação é maior de 800°C a 850°C. Acima de aproximadamente 1000°C, dependendo da composição da liga, os componentes intermetálicos se dissolvem novamente (figura 11).

Nos AID, a ferrita é termodinamicamente metaestável na faixa de temperatura de precipitação da fase sigma. A ferrita também possui um teor mais elevado dos elementos formadores de fase sigma, como por exemplo o Cr e o Mo. Desta maneira, a precipitação da fase sigma dá-se principalmente pela decomposição da ferrita. Essa decomposição geralmente ocorre através de uma reação eutetóide, formando sigma e austenita, esta com teores mais baixos dos elementos Cr e Mo. A reação ocorre por nucleação e crescimento, apresentando uma curva de transformação em "C". A figura 11 mostra o diagrama TTT de precipitação de fase sigma no AID UNS S31803.

Não é a difusão o fator que controla a precipitação da fase sigma, mas sim o rearranjo atômico em pequena escala para formar a complexa estrutura desta fase. O local preferencial para a nucleação da sigma nos AID são as interfaces ferrita-austenita. Devido ao pequeno desarranjo atômico que gera a relação de orientação adotada entre a sigma e a austenita, a fase sigma nucleia epitaxialmente na austenita e cresce para a ferrita.

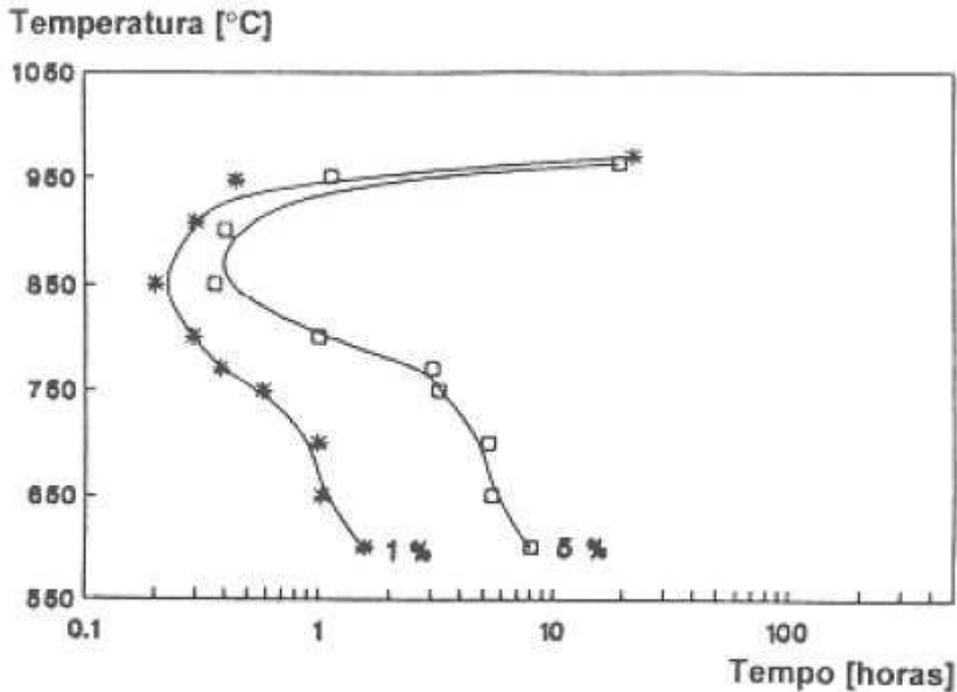


Figura 11 – Diagrama TTT de Precipitação de Fase Sigma No AID UNS S31803

A morfologia da fase sigma precipitada é resultante de uma reação eutetóide. Para temperaturas de transformação mais baixas, a morfologia é lamelar, decorrente do crescimento competitivo. Para temperaturas mais elevadas, a morfologia é não lamelar, produto de uma reação eutetóide divorciada.

As adições de W e Cu aos AID aceleram a cinética de precipitação de fases intermetálicas como sigma e chi. No caso da fase sigma, este comportamento tem sido explicado pela mudança na morfologia da fase sigma com a adição do W.

A precipitação da fase sigma reduz a resistência à corrosão dos AID. A presença desta fase pode aumentar a velocidade de corrosão de um AID em até oito vezes.

Quando submetido a ambientes ácidos (HNO₃, H₂SO₄), o ataque preferencial da matriz empobrecida em Cr e Mo perto das partículas de fase sigma tem sido uma das explicações mais comuns para este comportamento. A resistência à CST também é reduzida pela precipitação de fase sigma.

As propriedades mecânicas dos AID também são seriamente prejudicadas com a precipitação da fase sigma. O limite de escoamento e o limite de resistência à tração aumentam ligeiramente, mas o alongamento pode cair de 40% para 7%, com a precipitação desta fase. A tenacidade também é bastante afetada pela precipitação da fase sigma. Apenas 1% de precipitação de fase sigma conduz a uma queda de 50% do valor inicial da energia absorvida no ensaio Charpy.



A ZAC e metal de solda reaquecidos, invariavelmente possuem áreas em que foram experimentadas simples ou múltiplas exposições à faixa de temperatura de 570°C a 1000°C, temperaturas onde a fase sigma e outras fases intermetálicas se formam.

Em um AID 22%Cr, a formação de fases intermetálicas na condição “como soldado” é normalmente não significativa. Entretanto, no AID 25%Cr, a formação de fases intermetálicas é mais rápida, e é improvável evitar totalmente a formação destas fases na condição “como soldado”. Mas, quando estas fases são confinadas em zonas de pequenas e descontínuas, elas têm pequeno efeito nas propriedades da solda.

Soldagens de AID, especialmente aquelas envolvendo fundidos, podem requerer recozimento para otimizar suas microestruturas. Os materiais ASTM A240 e ASTM 890 requerem recozimento com temperatura mínima de 1040°C, seguido do por resfriamento à água. Entretanto, para a seleção de temperatura de recozimento, é necessário levar em conta a utilização de metais de adição ricos em níquel para soldagem de AID, pois o incremento de níquel em AID incrementa a temperatura máxima em que a fase sigma é estável (figura 12).

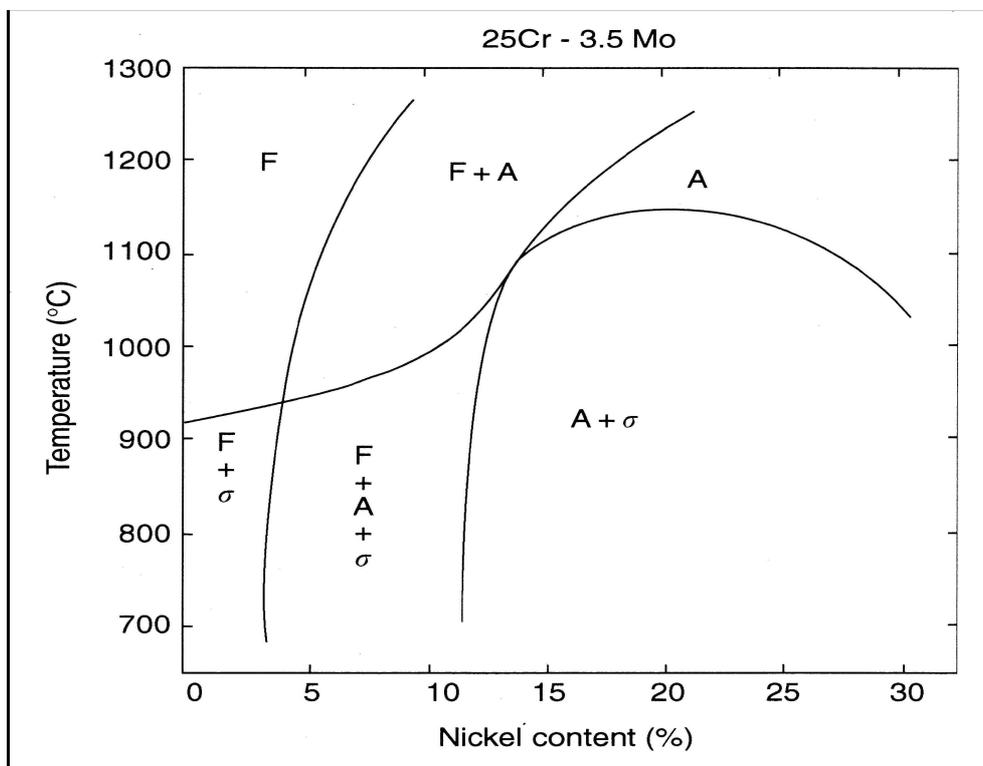


Figura 12 – Diagrama de Grobner mostrando o Incremento da Temperatura da Estabilidade da Fase Sigma com o Incremento do Conteúdo de Níquel na Liga 25Cr3,5Mo



Nos metais de solda contendo 8 a 10%Ni das ligas AID 2205 e 255, foi encontrada extensiva fase sigma após recozimento a 1040°C (figura 13) que mostra a fase sigma misturada à ferrita e austenita. Alguma fase sigma ainda persistiu após recozimento a 1095°C. Recozimento a 1120°C a 1150°C eliminou completamente a fase sigma .

As altas temperaturas de recozimento necessárias para eliminar a fase sigma no metal de solda enriquecidos com níquel não são sempre desejáveis pelo ponto de vista de resistência à corrosão, porque a ferrita retém muito nitrogênio em solução.

Têmpera de 1120°C a 1150°C pode resultar em alguma precipitação de nitreto. Para prevenir a precipitação de nitretos, um procedimento para recozimento deve ser planejado, consistindo em manter a temperatura a 1150°C para dissolver toda a fase sigma formada durante o aquecimento, resfriamento em forno até 1040°C, e resfriamento rápido após 2 horas a 1040°C. Uma vez dissolvida a 1150°C a fase sigma formada pelo aquecimento, ela volta a se nuclear a 1040°C, temperatura em que a dinâmica de nucleação é lenta. O resfriamento rápido é então aplicado antes que a nucleação da fase sigma possa ocorrer, e o resultado no metal de solda é alta ductilidade e tenacidade. É importante salientar que a resistência mecânica dos AID é muito baixa na faixa de temperatura de recozimento, sendo necessário tomar precauções com a suportaçãõ do componente durante o tratamento térmico.

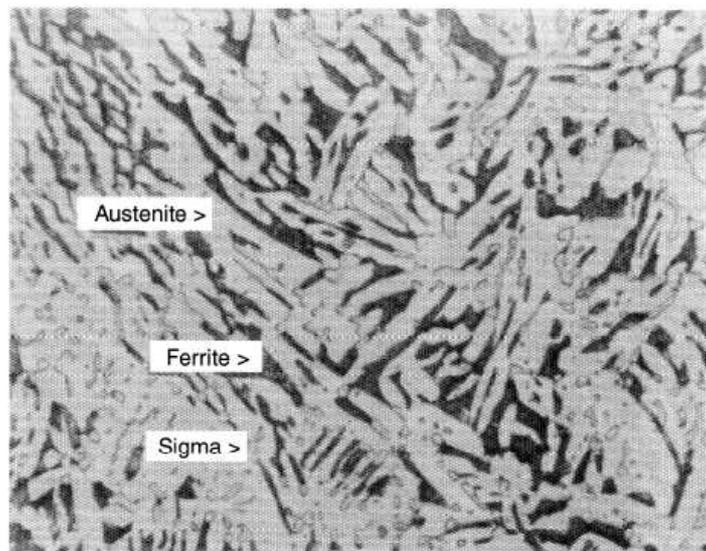


Figura 13 – Metal de Solda da Liga 2205 contendo 8,3%Ni, Recozido por 4 horas a 1065°C

3.4. RESISTÊNCIA À CORROSÃO

Os AID são desenvolvidos principalmente para melhorar a resistência à corrosão sob tensão (CST). Em comparação aos aços inoxidáveis austeníticos convencionais, os AID são



claramente superiores (figura 14). Eles são especialmente resistentes à CST em meios contendo cloretos devido aos seus baixos conteúdos de níquel e alto conteúdo de cromo, como por exemplo: a liga 2205 (UNS S31803) possui uma resistência superior à liga 2304 (UNS S32304). Já a liga AISD 2507 (UNS S32750) não apresenta susceptibilidade à CST.

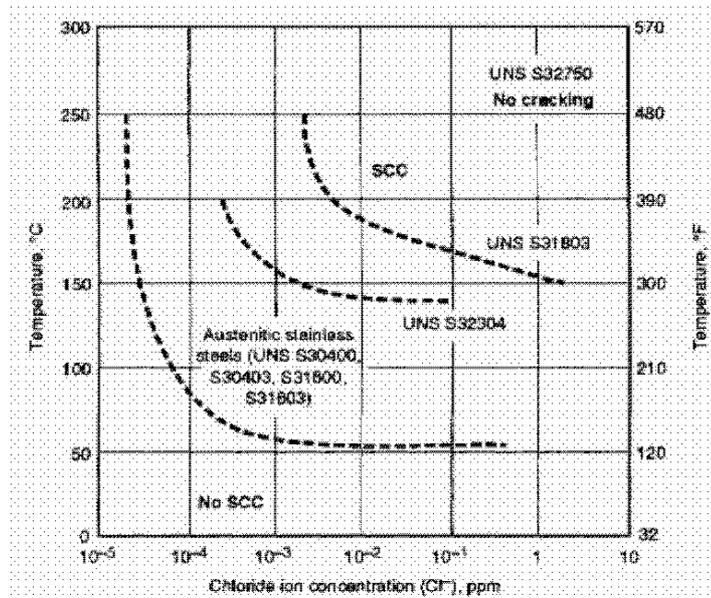


Figura 14 — Resistência à Corrosão Sob Tensão em Função da Temperatura e Concentração de Cloretos dos AID S31803, S32304, S32750 e Aços Inoxidáveis Austeníticos S30400, S30403, S31600, S31603. Duração do Teste: 1.000h. Tensão aplicada igual à Tensão de Escoamento

A resistência à corrosão localizada e generalizada em meios ácidos são, geralmente, aceitáveis (figuras 15 e 16), mas estes materiais são suscetíveis à trinca em ambientes contendo H₂S ou cloretos. O limite tolerável de H₂S para cada grau depende de fatores ambientais adicionais, como PH, temperatura, concentração de íons de cloreto, etc; e não são facilmente identificados.

Apesar disto, pressões parciais de H₂S, tipicamente entre 3,5 a 10 KPa, dependendo do grau, têm sido reportado como limites de serviço para os AID.

Sem levar em consideração a pressão parcial de H₂S e concentração de íons de cloreto, a resistência ao trincamento por H₂S e cloretos aparenta alcançar o mínimo em torno de 60 a 100 °C.

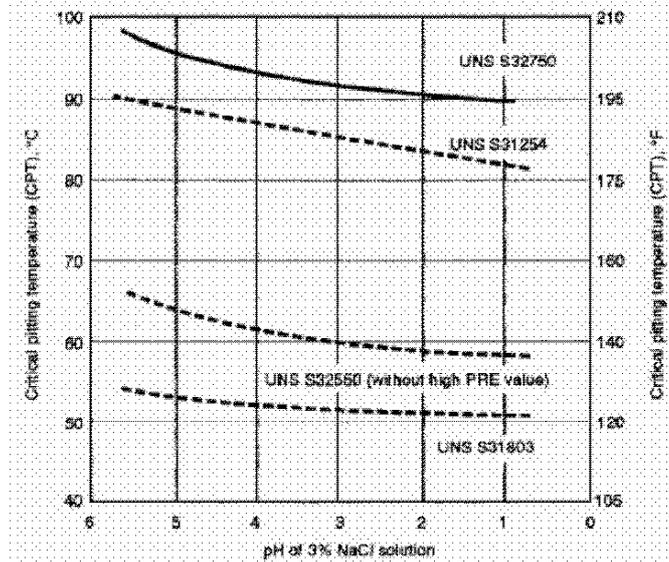


Figura 15 - Temperatura Crítica de Pite dos AID S31803, S32750, S32550 e do AIA S31254.

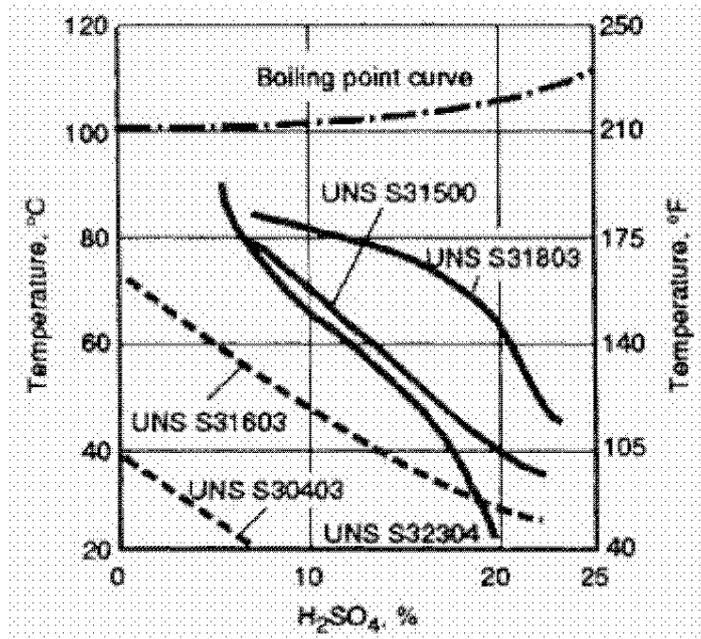


Figura 16 - Diagrama Isocorrosão dos AID S31803, S32304, S31500 e dos AIA S30403 e S31603.



3.5. SOLDABILIDADE

Os aços inoxidáveis duplex de forma geral apresentam boa soldabilidade e são enquadrados como “P number” 10H, conforme o ASME BPVC Section IX.

Atenção deve ser dada ao aporte térmico e controle da temperatura interpasse, em especial na soldagem multipasse, pelo risco de precipitação de carbeto, nitreto e fases intermetálicas devido à permanência na faixa de temperaturas críticas.

No processo de soldagem busca-se alcançar o correto balanço entre ferrita e austenita, no metal de solda e ZTA e evitar a precipitação de fases secundárias deletérias, na ZTA ou no metal de solda.

Os metais de adição com maiores teores de Ni garantem propriedades do metal de solda compatíveis com o metal de base.

4. SOLDAGEM

4.1. SELEÇÃO DE MATÉRIA PRIMA

A resposta dos AID à soldagem pode ser substancialmente mudada por variações na composição química ou processamento. A importância da matéria prima contendo nitrogênio suficiente tem sido enfatizado repetidamente. Se a matéria- prima é resfriada lentamente através da faixa de 705°C a 980°C, ou se é permitido o resfriamento ao ar nesta faixa, mesmo por tempo curto, antes do resfriamento rápido (resfriamento à água), então estas ações já devem ter usado algum tempo de que o soldador teria para completar a solda sem que qualquer reação de precipitação deletéria ocorra. Portanto, é importante que a condição metalúrgica do material utilizado na fabricação atual seja de mesma qualidade, com relação à composição e práticas de produção, do material utilizado para qualificação do procedimento de soldagem.

4.2. LIMPEZA ANTES DA SOLDAGEM

É conhecida a necessidade de limpeza de todas as regiões que deverão ser aquecidas antes da realização da soldagem, não apenas para AID, mas para todos os aços inoxidáveis. A composição química do metal de base e metal de adição tem sido desenvolvida para que não existam fontes adicionais de contaminação. A sujeira, graxa, óleo, tinta, e fontes de umidade de qualquer tipo irão interferir com as operações de soldagem, e afetar negativamente a resistência à corrosão e propriedades químicas da solda. Nenhuma qualificação de procedimento de soldagem será efetiva se o material não for totalmente limpo antes da soldagem



4.3. PROJETO DA JUNTA

Para os AID, o projeto da junta deve facilitar a penetração total e evitar falta de diluição do metal de solda no metal de solda solidificado. É recomendada a usinagem do bisei ao invés de se realizar o esmerilhamento, pois desta forma haverá a promoção de uniformidade da junta. Na impossibilidade de se realizar usinagem, atenção especial deve ser tomada para a uniformidade na preparação do bisei e ajustes do chanfro. Qualquer rebarba deve ser removida para manter penetração e fusão completa. Soldadores qualificados podem superar algumas deficiências da preparação de junta com a manipulação do eletrodo. Para os AID, algumas destas técnicas podem causar uma esperada longa exposição em uma faixa de temperatura prejudicial, conduzindo a resultados fora daqueles do procedimento de qualificação. Alguns projetos de juntas utilizados para AID são descritos na figura 17. Outros projetos são possíveis desde que garantam a penetração total e que minimizem o risco de perfuração.

GROOVE	Process	Thickn. th(mm)	GAP d (mm)	ROOT K (mm)	BEVEL $\alpha(^{\circ})$
	GTAW	3 - 5	1 - 3	-	-
	GMAW	3 - 6	1 - 3	-	-
	SMAW	3 - 4	1 - 3	-	-
	SMAW	4 - 16	1 - 3	1 - 2	55 - 85
	GTAW	3 - 8	1 - 3	1 - 2	60 - 70
	GMAW	5 - 12	1 - 3	1 - 2	60 - 70
	SAW	6 - 12	0	5	90
	SMAW	> 10	1.5 - 3	1 - 3	55 - 65
	GMAW	> 10	1.5 - 3	1 - 3	60 - 70
	SAW	> 10	0	3 - 5	90
	GMAW	> 25	1 - 3	1 - 3	10 - 15
	GMAW	> 25	1 - 3	1 - 3	10 - 15
	SAW	> 25	0	3 - 5	10 - 15
	GTAW	> 3	0 - 2	-	-
	GMAW	> 3	0 - 2	-	-
	SMAW	> 3	0 - 2	-	-
	SMAW	3 - 16	2 - 3	1 - 2	60 - 70
	GTAW	2.5 - 9	2 - 3	1 - 2	60 - 70
	GMAW	2 - 12	2 - 3	1 - 2	60 - 70
	SAW	4 - 12	2 - 3	1 - 2	70 - 80
	GMAW	12 - 60	1 - 2	2 - 3	10 - 15
	GTAW	> 9	1 - 2	1 - 2	10 - 15
	GMAW	> 12	1 - 2	2 - 3	10 - 15
	SAW	> 10	1 - 2	1 - 3	10 - 15

Figura 17 — Exemplos de Projetos de Junta utilizados para AID



4.4. PRAQUECIMENTO

Como uma regra geral, o preaquecimento não é recomendado devido ao efeito deletério, e não deve ser parte do procedimento, a não ser que haja uma justificativa específica. O preaquecimento pode ser benéfico quando utilizado para eliminar umidade de um aço, como pode ocorrer em condições de ambiente frio ou condensações da noite.

Quando o preaquecimento é realizado para eliminar a umidade, o aço deve ser aquecido até cerca de 95°C uniformemente, e apenas após a preparação e limpeza da junta. O preaquecimento também pode ser benéfico se a solda em questão é um dos casos onde existe o risco de formação de ZAC altamente ferrítica devido ao rápido resfriamento. Estes casos são relativamente raros, mas podem ocorrer em seleção de chapas grossas.

4.5. APORTE DE CALOR E TEMPERATURA INTERPASSE

Os AID podem tolerar relativamente altos aportes de calor. A estrutura de solidificação do metal de solda é resistente à trinca a quente, muito maior que dos metais de solda austeníticos. AID com alta condutividade térmica e baixo coeficiente de expansão térmica não possuem a mesma alta intensidade de tensão térmica como as soldas de AIA. Quando é necessário limitar a severidade da restrição de uma solda, a trinca a quente não é um problema comum. Extremos baixos aportes de calor podem resultar em zonas de fusão e ZAC excessivamente ferríticas, com correspondente perda de tenacidade e resistência à corrosão. Altos aportes de calor incrementam o risco de formação de fases intermetálicas.

Para evitar problemas na ZAC, o procedimento de soldagem deve permitir resfriamento rápido desta região após a soldagem. A temperatura da peça de trabalho é importante, porque ela provê um grande efeito no resfriamento da ZAC. Como um guia geral, a máxima temperatura interpasse deve ser limitada em 150°C. Esta limitação deve ser imposta no momento da qualificação do procedimento de soldagem.

A soldagem de produção deve ser monitorada para assegurar que a temperatura interpasse não seja maior que aquela utilizada para qualificação.

Termômetros com mira infravermelha e termopares são instrumentos preferenciais para o monitoramento da temperatura interpasse.

Quando uma grande quantidade de solda está para ser realizada, o planejamento da soldagem deve prever tempo suficiente para resfriamento entre os passes.

4.6. TTAT

O Alívio de tensão pós soldagem não é necessário para os AID, e é próximo a ser prejudicial, porque durante o tratamento térmico pode precipitar fases intermetálicas ou fragilização alfa linha, causando perdas de tenacidade e resistência à corrosão. Para qualquer TTAT a realizar, deve ser de solubilização completa, seguida por resfriamento rápido.



O tratamento térmico deve ser considerado uma parte do procedimento de soldagem. A solubilização pode eliminar os problemas associados com excessiva ferrita e fases intermetálicas, e os processos de manufatura podem tolerar algumas destas condições menos desejadas como um estado intermediário antes da solubilização final.

4.7. METAL DE ADIÇÃO

Para a maioria dos graus de AID existem dois tipos de metais de adição:

- Mesma (ou próxima a) composição do metal base;
- Metais de adição com adição de liga, principalmente níquel.

O metal de adição de mesma composição do metal base é utilizado onde o tratamento térmico pós soldagem é necessário, enquanto soldas realizadas com metal de adição enriquecidos com níquel é para a condição “como soldado”. A microestrutura do metal de solda com a mesma composição do metal de base conterà um alto conteúdo de ferrita. A adição de níquel é realizada para proporcionar o balanço de fase na condição “como soldado”, incrementando o conteúdo de austenita. O conteúdo de ferrita, de uma solda realizada com consumíveis enriquecidos de níquel, vai diminuir significativamente se esta solda for submetida a um TTPS. Isto pode ocasionar em pequena redução da resistência mecânica do metal de solda e pode também ter maior susceptibilidade à formação de fase sigma durante tratamento térmico.

O nível de incremento de níquel no metal de solda será de 2,5 a 3,5% maior que no material base (por exemplo: o AID Fe-22Cr-5,5Ni-3Mo-0,15N contém 5,5% Ni, enquanto o metal de adição 8,0 a 9,0% Ni (dependendo do fabricante do consumível).

Composições nominais de metal de adição para o AID grau Fe-22Cr-5,5Ni-3Mo- 0,15N, nomes comerciais, e classificação AWS, onde apropriados, são reportados na tabela 4 e propriedades na tabela 5..

Tabela 4. Composição típica e Especificação AWS para Metais de Adição com incremento de Níquel para a Liga AID Fe-22Cr-5,5Ni-3Mo-O,1 5N

MANUFACTURER	TRADE NAME	COMPOSITION, %				
		C	Cr	Ni	Mo	N
COVERED ELECTRODES						
METRODE	SUPERMET 2205	0.02	25	9.5	3.5	0.17
SANDVIK	22.9.3.L	0.03	22	9.5	3.0	0.15
AVESTA	2205-PW	0.025	22	9.5	3.0	0.13
LINCOLN NORWELD	AROSTA 4462	0.025	22.0	9.0	3.0	0.14
THYSSEN	THERMANIT 22/09	<0.04	22.5	9.0	3.0	...
AWS A5.4	E2209	0.04 ^(A)	21.0-24.0	8.0-10.0	2.5-4.0	0.08-0.20
BARE WIRE						
SANDVIK	22.8.3.L	<0.02	22.5	8.0	3.0	0.14
METRODE	ER329N	0.015	22.3	8.3	3.0	0.15
THYSSEN	22/09/SG	<0.025	23.0	9.0	3.0	...
LINCOLN NORWELD	LNT/LNM 4462	0.015	22.5	8.5	3.0	0.15
AWS A5.9 ^(B)	ER 2209	0.04 ^(A)	21.0-24.0	8.0-10.0	2.5-4.0	0.084-0.20

(A) MAXIMUM.
(B) PENDING.



Tabela 5. Propriedades de Metais de Adição para AID

DESIGNATION	UNS NO.	ASTM SPECIFICATION	TENSILE STRENGTH		YIELD STRENGTH		ELONGATION, %	MATCHING METALS			FILLER
			MPA	KSI	MPA	KSI		A5.4	A5.9 ^(A)	A5.22	
XM-26	S31100	A 276	620	90	450	65	20	...	...	...	...
...	S31200	A 240	690	100	450	65	25	...	...	...	...
...	S31260	A 240	690	100	480	70	20	...	...	...	...
...	S31500	A 790	635	92	440	64	30	...	...	...	...
2205	S31803	A 240, A 790	620	90	450	65	25	E2209-XX	ER2209	...	...
2304	S32304	A 790	600	87	400	58	25	...	...	...	...
255	S32550	A 240, A 790	760	110	550	80	15	E2553-XX	ER2553	...	...
2507	S32750	A 790	800	116	550	80	15	...	...	...	...
329	S32900	A 240, A 790	620	90	480	70	15	...	...	...	...
...	S32950	A 240, A 790	690	100	480	70	15	...	...	...	...
CD-4MCU	...	A 743	690	100	480	70	16	E2553-XX	ER2553	...	...

(A) METAL-CORED ELECTRODES, INDICATED BY A "C" IN PLACE OF THE "R" IN THE CLASSIFICATION, ARE ALSO INCLUDED.

Os metais de adição altamente ligados são, algumas vezes, utilizados para soldagem de material de base menos ligados (por exemplo, um metal de adição com 25% Cr pode ser utilizado para o passe de raiz de um AID Fe-22Cr-5,5Ni-3Mo-0,15N). Isto é usualmente realizado para proporcionar resistência à corrosão no metal de soda da raiz, e através disto, aprovação dos requisitos dos testes de qualificação. Na maioria dos casos, isto não conduz a uma perda de propriedades mecânicas; de fato, o metal de adição altamente ligado, como no caso acima, é próprio para proporcionar boa resistência. A figura 18 mostra como o uso do metal de adição de AISD com um valor de PRE de aproximadamente 40 no aço Fe-22Cr-5,5Ni-3Mo-0,15N (que tipicamente possui um PRE variando de 33 a 35) vai melhorar a resistência à corrosão por pite no metal de solda, como estimado pelo teste ASTM G48, para aproximadamente os valores do metal base.

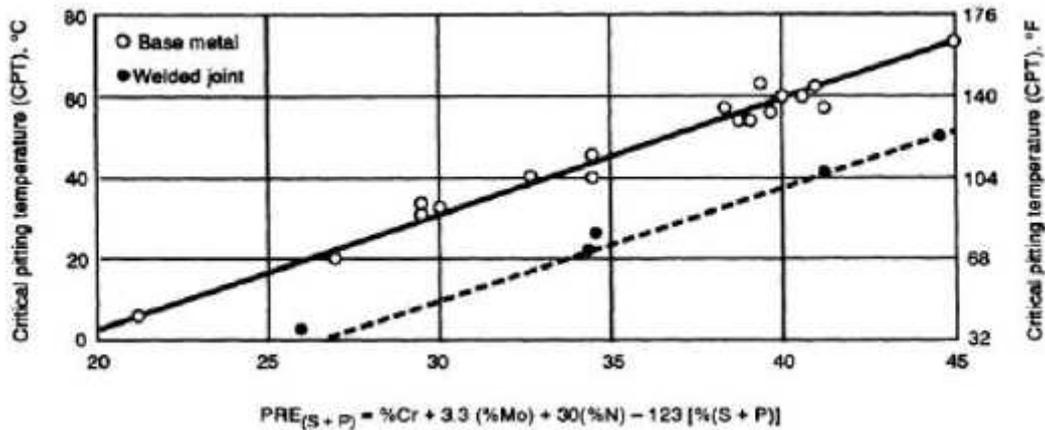


Figura 18 — Resistência à Corrosão por Pite do Metal Base em relação ao Metal de Solda— Solução FeCl3 por 24 Horas — ASTM G48 (Método A)

Para garantir que todos os requisitos de balanço de fase para os metais de solda e controle necessário da microestrutura com metais de adição AID, consumíveis de ligas de níquel tem sido utilizados (por exemplo, AWS A 5.14 ER Ni-CrMo3).



O limite de escoamento, entretanto, é levemente inferior à maioria dos graus de alta liga, e a falta de nitrogênio e a presença de nióbio no metal de adição pode contribuir para uma reação metalúrgica desfavorável, a formação de precipitados intermetálicos e áreas de alto conteúdo de ferrita na ZAC.

A utilização de consumíveis inadequados pode ocasionar em perda de tenacidade e/ou redução da resistência à corrosão da junta soldada (figura 19).

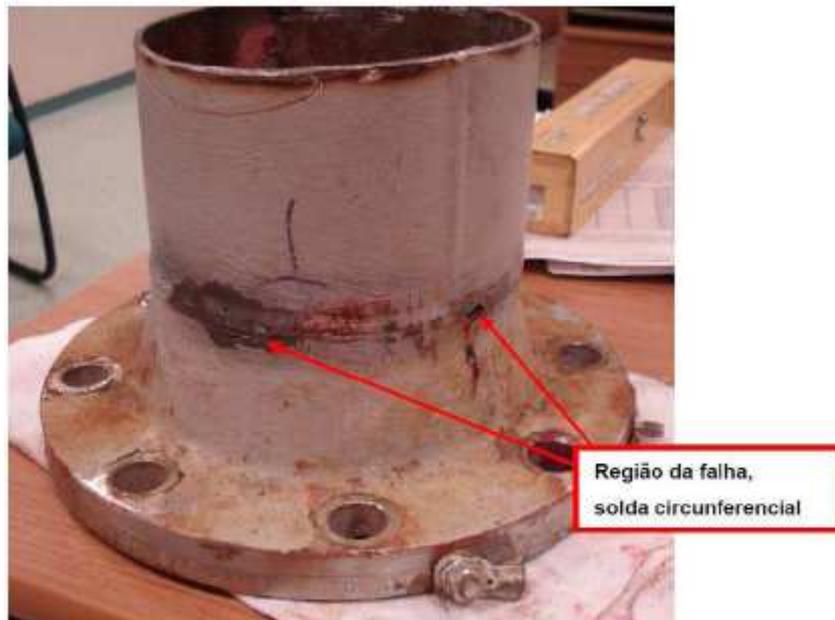


Figura 19 — Falha em Tubo de AISD UNS S32750 por Corrosão Localizada na região da Solda devido utilização de Consumível Inadequado (316L)

Para soldagem de AIA, os metais de solda austeníticos com baixo carbono e molibdênio intermediário entre os dois aços são tipicamente utilizados. O AWS E309MoL/ER309LMo é freqüentemente utilizado para estas juntas. O mesmo metal de adição, ou o AWS E309L/ER309L, é comumente utilizado para unir AID aos aços carbono ou aços baixa liga. Se o metal de adição com base de níquel é utilizado, ele deve ser livre de nióbio.

Devido aos AIA terem menor resistência mecânica que os AID, juntas soldadas feitas com metais de adição austeníticos não terão a mesma resistência que o metal de base duplex. A tabela 6 mostra os metais de adição freqüentemente utilizados em soldagem de AID e soldagem dissimilar de AID com aço carbono, aços liga ou AIA.



Tabela 6. Consumíveis de Soldagem utilizados para Soldagem de AID

	2304	2205	25 Cr	Superduplex
2304	2304 E2209 E309L	E2209	E2209	E2209
2205	E2209	E2209	25Cr-10Ni-4Mo-N	25Cr-10Ni-4Mo-N
25 Cr	E2209	25Cr-10Ni-4Mo-N	25Cr-10Ni-4Mo-N	25Cr-10Ni-4Mo-N
Superduplex	E2209	25Cr-10Ni-4Mo-N	25Cr-10Ni-4Mo-N	25Cr-10Ni-4Mo-N
304	E309L E309MoL E2209	E309MoL, E2209	E309MoL, E2209	E309MoL
316	E309MoL E2209	E309MoL, E2209	E309MoL, E2209	E309MoL, E2209
Carbon steel Low alloy steel	E309L E309MoL	E309L, E309MoL	E309L, E309MoL	E309L, E309MoL

Estes exemplos mostram a especificação AWS para eletrodos (E), mas dependendo do processo, geometria de junta e outras considerações, vareta (ER) e arame tubular podem ser considerados.

4.8. PROCESSOS DE SOLDAGEM APLICÁVEIS

Quase todos os processos de soldagem a arco elétrico que são empregados para outros aços inoxidáveis podem ser utilizados nos AID, exceto onde as características do processo é para solda autógena, como soldagem por feixe de elétrons e soldagem a laser. Em tal circunstância, o TTPS é quase sempre necessário para restabelecer o balanço de fase correto ao metal de solda e remover quaisquer precipitados indesejáveis.

Existem algumas diferenças reportadas quanto à resistência à corrosão entre processos de soldagem. Na maioria dos casos de soldagem de tubulação, onde se tem apenas acesso por um lado, o GTAW é quase exclusivamente utilizado para o passe de raiz. Isto proporciona uma alta qualidade do passe de raiz, que dita à performance de corrosão final da solda, pois o gás de purga pode ser controlado com mais rigor com este processo.

Processos de soldagem que produzem altos conteúdos de oxigênio no metal de solda (protegidos por fluxos) também produzem soldas com baixa tenacidade, principalmente devido ao tamanho e distribuição de inclusões não metálicas. Processos com gás de proteção possuem menor potencial de oxigênio e, geralmente, exibem maiores propriedades de tenacidade Charpy (figuras 6 e 20).

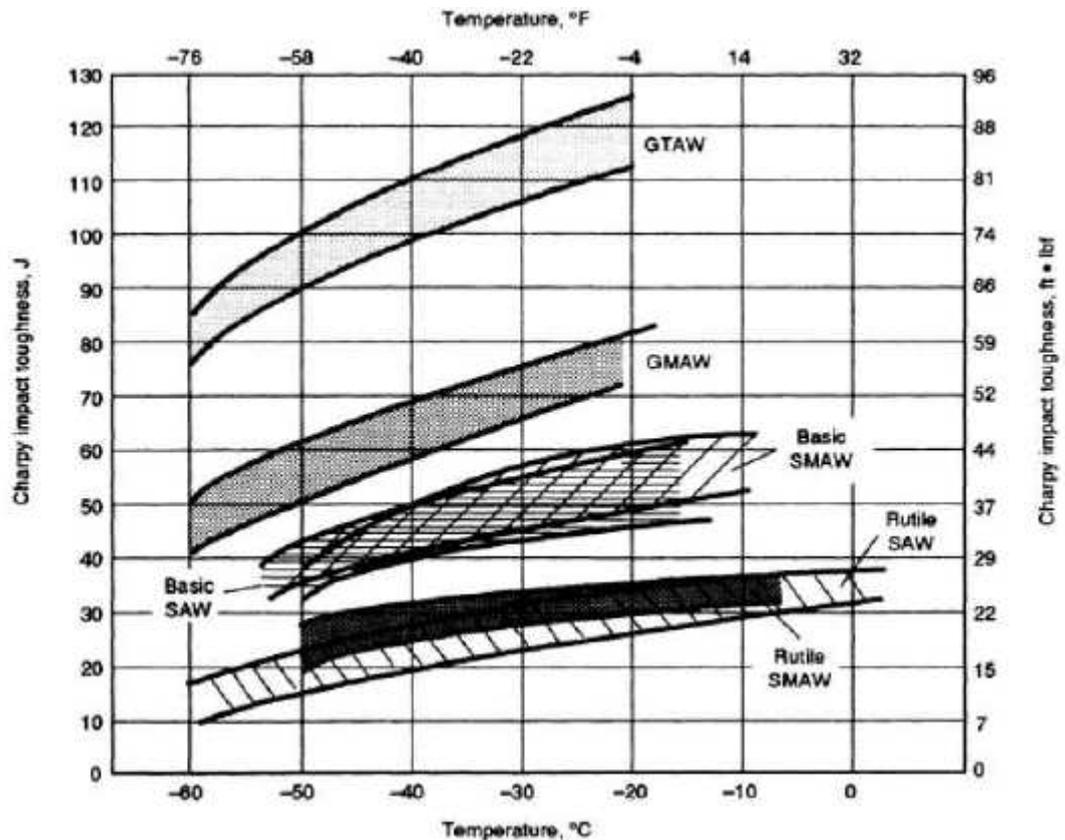


Figura 20 — Gráfico Charpy X Temperatura em função do Processo de Soldagem para a Liga UNS S32760

À parte desta preferência, a seleção do processo será provavelmente ditada pela maior disponibilidade de fabricação dos consumíveis e considerações econômicas e logísticas do que pelas propriedades desejadas para particular processo de soldagem.

Soldas em AID tem sido realizadas por todos os mais importantes processos de soldagem por fusão e foram executadas satisfatoriamente. Entretanto, em alguns poucos casos, a aplicação final pode necessitar especificar um processo de soldagem particular.

Onde é requerida excepcional tenacidade à baixa temperatura, processos com proteção gasosa podem ser especificados, porque eles produzem maiores propriedades de tenacidade no metal de solda do que os processos protegidos por fluxos (figura 20).

Algumas formas de consumíveis ainda não foram desenvolvidas para todos os graus de AID. No entanto, GTAW, SMAW, SAW e GMAW são comumente utilizados com sucesso para a maioria das classes de liga. Neste trabalho vamos descrever parâmetros e boas práticas para soldagem de aço inoxidável duplex pelo processo GTAW, embora a grande maioria possa e deve ser aplicada aos demais processos.



4.8.1. PARÂMETROS DE SOLDAGEM DO PROCESSO GTAW

A performance do GTAW é melhor com CC, com um circuito de alta frequência para ajudar a iniciar o arco. GTAW deve ser realizado com polaridade direta (CC-). O uso de CC+ irá conduzir à deterioração do eletrodo. O eletrodo deverá ser 2% tungstênio toriado (Especificação AWS 5.12: EWTh-2).

O controle do arco é conseguido através de afiação do eletrodo a uma ponta cônica, com 30 a 60 graus, e com uma pequena parte lisa na ponta. O ângulo ideal para conseguir penetração no GTAW automatizado deve ser determinado por alguns testes em produção. A proteção pelo gás de proteção é mais tipicamente alcançada com gás inerte, argônio + 2% Nitrogênio (valor máximo). É importante que o sistema de operação seja limpo, seco e livre de vazamentos, e que as condições de vazão sejam ajustadas para prover cobertura adequada, para evitar turbulência e aspiração de ar para dentro do gás de proteção. A vazão de gás deve ser iniciada alguns segundos antes do início do arco, e deve ser mantida por alguns segundos após a extinção do arco, no tempo suficiente para que a solda e a ZAC esfrie abaixo da faixa de oxidação dos aços inoxidáveis.

Para cobertura do eletrodo, sugere-se taxas de 12 a 18 l/min, quando se utiliza filtro difusor normal de gás, e com metade desta taxa para bocal normal.

Taxas de vazão de gás de purga, que deve ter a mesma composição do gás de proteção, dependem do volume da raiz, mas deve ser suficiente para assegurar completa inundação de gás e proteção completa da solda, como indicado pela ausência de coloração devido à oxidação do inox. Devido ao argônio ser mais pesado que o ar, a alimentação deve ser de baixo para cima do volume enclausurado, com purga de no mínimo sete vezes o volume. Soldas satisfatórias têm sido obtidas com argônio puro, mas sem dúvida é observado melhorias com a composição acima descrita, pois a adição de nitrogênio irá ajudar na retenção do mesmo no metal de solda, particularmente na maioria dos AID alta liga. Enquanto a adição de nitrogênio incrementa o desgaste do eletrodo, a adição de hélio compensa parcialmente este efeito. Adições de oxigênio e dióxido de carbono para o gás de proteção deve ser evitado, porque eles irão reduzir a resistência à corrosão da solda. O hidrogênio não deve ser utilizado em gás de proteção ou purga, por causa da possibilidade de trinca pelo hidrogênio ou fragilização pelo hidrogênio na fase ferrita nos AID. A purga na raiz deve ser mantido até a terceira camada de solda ou 6,35 mm, o que for maior.

Existe uma substancial liberdade para seleção do aporte de calor para tratar de uma vasta faixa de espessuras e projeto de junta. O aporte de calor é tipicamente na faixa de 5 a 25 KJ/cm, e pode ser calculado conforme mostrado na figura 21.



$$HI = \frac{(I.V)}{v_s} 0,06, \text{ onde:}$$

HI – Heat Input, Kj/cm;

I – Intensidade de Corrente, ampères;

V – Tensão de Soldagem, Volts;

v_s – Velocidade de Soldagem, cm/minuto.

Figura 21— Fórmula de Cálculo de Aporte de Calor (HI – Heat Input)

5. BOAS PRÁTICAS NA SOLDAGEM DE AÇO INOXIDÁVEL DUPLEX E SUPERDUPLEX

É de extrema importância que todo pessoal envolvido no processo de soldagem de aços inoxidáveis duplex sejam conscientizados sobre os cuidados necessários para o manuseio e soldagem dos mesmos. Abaixo são elencadas “boas práticas” que devem ser aplicadas no dia a dia para que possamos alcançar bons resultados na soldagem, obtendo assim, uma junta íntegra, com boa resistência mecânica, tenacidade e com as propriedades corrosivas desejada.

5.1. SOLDABILIDADE

- 5.1.1. *Os aços inoxidáveis duplex de forma geral apresentam boa soldabilidade e são enquadrados como “P number” 10 H, conforme o ASME Section IX.*
- 5.1.2. *Na qualificação de procedimentos de soldagem, alguns aspectos devem ser considerados adicionalmente aos requisitos do ASME Section IX. A conforme mostrado na Tabela 7.*
- 5.1.3. *Atenção deve ser dada ao aporte térmico e controle da temperatura interpasse, em especial na soldagem multipasse, pelo risco de precipitação de carbeto, nitreto e fases intermetálicas devido à permanência na faixa de temperaturas críticas.*
- 5.1.4. *No processo de soldagem busca-se alcançar o correto balanço entre ferrita e austenita, no metal de solda e ZTA e evitar a precipitação de fases secundárias deletérias, na ZTA ou no metal de solda.*



- 5.1.5. Os metais de adição com maiores teores de Ni garantem propriedades do metal de solda compatíveis com o metal de base. O consumível deve ter em sua composição de 2% a 4% de Ni acima do metal de base. A Tabela 8 mostra os consumíveis utilizados em aços inoxidáveis duplex e superduplex.
- 5.1.6. Na soldagem não deve ser realizado preaquecimento. Porém a temperatura da superfície a ser soldada não pode ser inferior a 10 °C. Caso ocorra esta situação, a superfície deve ser preaquecida a 50 °C.
- 5.1.7. A temperatura de interpasse máxima é de 150 °C, exceto para materiais de PREN >= 35, que não devem exceder a 100 °C;
- 5.1.8. Pós aquecimento e TTAT não são aplicáveis;
- 5.1.9. Não é permitido mais do que dois reparos no mesmo local;
- 5.1.10. Os passes de raiz, reforço de raiz e acabamento devem ser 100% inspecionados por líquido penetrante. Todas as juntas soldadas devem ser radiografadas ou inspecionadas por ultra som onde aplicável;
- 5.1.11. A água para teste hidrostático deve apresentar controle de cloreto (menos que 50 ppm);

Tabela 7. Ensaios adicionais ao ASME SECTION IX

Ensaio	Nº de ensaios	Norma	Aceitação
Visual	100 % soldas	ASME BPVC Section IX	ASME BPVC Section IX
Radiografia	100 % soldas de topo	ASME BPVC Section IX	ASME BPVC Section IX
Líquido penetrante	100 % das soldas	ASME BPVC Section VIII Div. 1 Ape. 8	ASME BPVC Section VIII Div. 1 Ape. 8
Dobramento	Duas faces + duas raízes, ou quatro dobramentos laterais	ASME BPVC Section IX	ASME BPVC Section IX
Charpy V (-46 °C) (6 mm de espess e maior) ou temperatura mínima de projeto	Três corpos-de-prova cada Metal de Solda (MS) Linha de Fusão (LF)	NORSOK M-601	10 mm x 10 mm 10 mm x 7,5 mm; 0,83 x acima 10 mm x 5,0 mm; 0,66 mm x acima 27 Joules e expansão mínima de 0,3 8 mm nenhum valor individual inferior a 70 % da média requerida
Exame microestrutural (+ fotos)	MS, ZTA, Metal de Base (MB)	NORSOK M-601	Sem precipitações – 400X
Contagem ferrita	MS, ZTA, MB	ASTM E 562	35 % a 65 %
Corrosão "pitting"	1 corpo-de prova, MS, ZTA, MB	ASTM G 48 A, 24HRS, 20 °C para Duplex; 40 °C para Super e Hiper duplex (como soldado)	Sem pitting, 20X Perda de massa não exceder, 4,0 g/m ²
<p>NOTA 1 Processo GTAW é obrigatório para o passe de raiz. NOTA 2 Gases de Proteção: Argônio (Ar) + 2 % N₂ ou mistura Ar e Hélio (He). NOTA 3 O consumível deve ter em sua composição de 2 % a 4 % de Ni acima do metal de base.</p>			



Tabela 8. Consumíveis de Aços Inoxidáveis Duplex e Superduplex

Material tipo Nº UNS (Grau)	Espec. AWS	Eletrodo revestido (SMAW)		Espec. AWS	Eletrodo nu e vareta (GMAW / GTAW / SAW)	
		Classificação AWS			Classificação AWS	
		Preferida	Alternativa		Preferida	Alternativa
S32003	A5.4	E2209	-	A5.9	ER2209	-
S31803 (2205)	A5.4	E2209	-	A5.9	ER2209	-
S32205 (2205)	A5.4	E2209	-	A5.9	ER2209	-
S32304 (2304)	A5.4	E2209	-	A5.9	ER2209	-
S32520	A5.4	E2553	-	A5.9	ER2553	-
S32550 (F255)	A5.4	E2553	-	A5.9	ER2553	-
S32750 (2507)	A5.4/A 5.11	E2594	-	A5.9	ER2594	-
S32760 (Z100)	A5.4/A 5.11	E2594	-	A5.9	ER2594	-
S39274 (DP3W)	A5.4/A 5.11	E2594	-	A5.9	ER2594	-
S32101	A5.4	LDX2101 E2209	-	A5.9	LDX2101 ER2209	-

5.2. MATERIAIS:

- 5.2.1. Todos os materiais deverão ser estocados em locais limpos, secos, separados de outros materiais e cobertos para evitar contaminação por partículas suspensas de outros materiais ferrosos e não ferrosos.
- 5.2.2. Os locais de estocagem (estrados, estantes, "pallets", "racks" e etc), deverão ser protegidos de forma adequada para evitar contato direto entre o local de estocagem e a tubulação em Duplex;
- 5.2.3. Pequenos acessórios de tubulação e flanges fornecidos em "pallets" ou em caixas, após sua conferência e inspeção, deverão ser recolocados em suas embalagens originais e mantidos até o momento de uso;
- 5.2.4. Caso sejam utilizadas empilhadeiras para o manuseio dos materiais de Aço Inoxidável Duplex os garfos deverão estar devidamente protegidos para evitar contato direto com o material em super duplex;



5.3. PREPARATIVOS:

- 5.3.1. *O corte da tubulação e acessórios deverá ser realizado a frio usando-se ferramentas novas, ou em bom estado de conservação, limpas e de uso específico para material em Duplex;*
- 5.3.2. *O uso de máquina para corte e biselamento é permitido desde que seja utilizado óleo lubrificante para evitar aquecimento excessivo da região. Após corte as superfícies internas e externas deverão ser limpas de forma a remover todo o resíduo de óleo;*
- 5.3.3. *O corte a quente por Plasma é permitido, porém as extremidades aquecidas, em uma extensão de 0,5 mm, deverão ser removidas;*
- 5.3.4. *A preparação de biseis por esmerilhamento deverá ser realizada de forma gradual e suave evitando assim o aquecimento excessivo da região. Os discos a serem utilizados deverão ser específicos para uso em material Duplex. Os discos de corte e desbaste devem ser feitos de óxido de alumínio com alma de nylon ou fibra de vidro;*
- 5.3.5. *A rastreabilidade do material deverá ser garantida antes do corte (subdivisão). A identificação deverá ser realizada por meio de caneta elétrica;*
- 5.3.6. *Devido a maior viscosidade dos consumíveis, a preparação do bisel deve prever um maior ângulo de junta comparado aos aços C-Mn, minimizando o risco de falta de fusão. A figura 17 exemplifica alguns tipos de chanfro*

5.4. FABRICAÇÃO E MONTAGEM:

- 5.4.1. *Os aços inoxidáveis duplex devem ser claramente segregados dos aços inoxidáveis austeníticos durante a fabricação.*
- 5.4.2. *Discos e escovas utilizadas na fabricação da tubulação em duplex deverão ser de material adequado e de uso específico. As ferramentas de remoção de escória e limpeza devem ser de aço inoxidável ou revestido com este material. Os discos de corte e desbaste devem ser feitos de óxido de alumínio com alma de nylon ou fibra de vidro.*
- 5.4.3. *Não é permitido pontear dispositivos de montagem no corpo da tubulação, salvo se, detalhado no procedimento de soldagem a ser submetido à aprovação prévia da PETROBRAS. Quando usado os dispositivos auxiliares devem ser feitos de material do mesmo "P number" do material de base ou revestido com consumível especificado para soldagem do metal com no mínimo duas camadas.*
- 5.4.4. *Deve ser evitada a abertura de arco fora do chanfro. Se ocorrer, a região deverá ser esmerilhada com discos de granulação mais fina, tendo o local inspecionado por líquido penetrante, adicionando material de solda, se necessário.*
- 5.4.5. *Atenção especial deverá ser tomada no ajuste da junta, evitando desalinhamentos. O ajuste deverá ser checado por uso de gabarito adequado.*



- 5.4.6. Os metais de adição deverão ser armazenados em locais limpos e secos e manuseados sempre com luvas limpas. Os arames devem ser limpos com acetona ou produto similar, antes do uso.
- 5.4.7. É recomendável que as superfícies das peças sejam protegidas contra a aderência, respingos e demais projeções resultantes da soldagem, principalmente quando é empregado o processo GMAW.
- 5.4.8. A identificação das peças por meio de tinta poderá ser utilizada, porém o material deverá estar livre de cloretos e sulfetos.
- 5.4.9. A área para fabricação da tubulação de Duplex deverá ser específica e livre de contaminantes potenciais (materiais em aço carbono, aço liga, ferrosos e não ferrosos). A área deverá ser coberta e com ventilação livre e as recomendações citadas para estocagem e manuseio de materiais devem ser mantidas.

5.5. SOLDAGEM:

5.5.1. CONTROLE DO HEAT INPUT

5.5.1.1. O aporte térmico não deve exceder a 1,5 KJ/mm para aço inoxidável Super Duplex. Maiores valores podem provocar a precipitação de fases secundárias deletérias, reduzindo às propriedades mecânicas e a resistência a corrosão. Caso ocorra necessidade de uso de aporte acima do valor especificado para aço inoxidável Duplex, deve ser consultado especialista, limitando o valor a 2,5 HJ/mm. O valor mínimo de aporte recomendado é 0,5 KJ/mm, pois valores inferiores aumentam muito a velocidade de resfriamento, resultando em baixa formação de austenita. O mínimo de austenita aceitável é 35%;

5.5.1.2. O aporte de calor deve ser controlado dentro dos valores estabelecidos nas qualificações dos procedimentos de soldagem. Variações devido a condições diferenciadas no campo e pipe-shop, podem ocorrer principalmente pelo fato da aplicação das faixas de qualificações permitidas pelos códigos ASME seção IX. Neste caso é recomendado que a IEIS seja aprovado pelo especialista de soldagem.

5.5.1.3. Para valores de espessuras de metais de base mostrados na tabela 9, segue uma referência de aporte de calor praticado para o processo GTAW. Os mesmos poderão ser utilizados nas IEISs, desde que tenham embasamento nos valores testados nos respectivos RQPSs de referência para o processo de soldagem.



Tabela 9. Referência de Aporte de Calor para o Processo GTAW

Espessura do Metal de Base (T) – (mm)	Material de Base	Aporte de Calor (KJ/cm)	Local
<u>2,0 < T < 4,8</u>	Duplex	12,5 a 13,5	Raiz
		8,0 a 10,0	Enchimento/Acabamento
<u>4,8 ≤ T < 7,0</u>	Duplex	13,5 a 14,5	Raiz
		9,0 a 11,0	Enchimento/Acabamento
<u>7,0 ≤ T ≤ 11,08</u>	Duplex	14,5 a 15,5	Raiz
		10,0 a 12,0	Enchimento/Acabamento
<u>2,0 < T < 4,8</u>	Superduplex	11,5 a 12,5	Raiz
		8,0 a 9,0	Enchimento/Acabamento
<u>4,8 ≤ T < 7,0</u>	Superduplex	12,5 a 13,5	Raiz
		9,0 a 10,0	Enchimento/Acabamento
<u>7,0 ≤ T ≤ 11,08</u>	Superduplex	13,5 a 14,5	Raiz
		10,0 a 11,0	Enchimento/Acabamento

5.5.1.4. A medição do heat input deverá ser realizada utilizando os instrumentos apropriados para a obtenção das grandezas: intensidade de corrente, tensão e velocidade de avanço. Estes instrumentos podem ser: amperímetros, volímetros, multímetros, medidores de energia (true energy), trenas e cronômetros.

5.5.1.5. As medições deverão ser realizadas em todos os passes de soldagem (raiz, enchimento e acabamento) das primeiras 03 (três) juntas efetuadas por cada soldador/operador de soldagem e, após estas juntas, as medições deverão ser aleatórias, exceto que nos passes de raiz, as medições deverão ser 100% realizadas.

5.5.1.6. Os valores limites deverão ser os estabelecidos nas IEISs aplicáveis das juntas.

5.5.1.7. Os soldadores deverão estar ajustados aos parâmetros estabelecidos nas IEISs específicas antes das respectivas soldagens.

5.5.1.8. Os limites estabelecidos deverão ser seguidos, objetivando evitar alterações nos resfriamentos das juntas e, com isto, possibilitar a formação de fases deletérias e/ou desbalanceamento do percentual de ferrita e austenita, além do aumento da dureza. É importante observar que o comportamento metalúrgico dos aços inoxidáveis duplex é diferente dos aços inoxidáveis superduplex durante a soldagem e, portanto, o que pode ser realizado para um tipo, não pode ser realizado para outro. Desta forma, se os resultados das medições não atenderem aos limites estabelecidos, a junta deverá ser segregada para avaliação. Neste caso, deverá ser realizada uma avaliação pelo especialista de soldagem para determinação das ações a serem realizadas seja para corte total da junta e/ou possibilidade de reparo.

5.5.1.9. Deverá ser emitido um registro dos resultados obtidos em formulário próprio de acompanhamento da soldagem.



5.5.1.10. Após a medição dos parâmetros, deverá ser calculado o aporte de calor (Heat Input - HI) conforme fórmula apresentada na Figura 21.

5.5.1.11. A relação entre os aportes térmicos do primeiro e segundo passe deve estar em torno de 85%, conforme exemplo da figura 22.

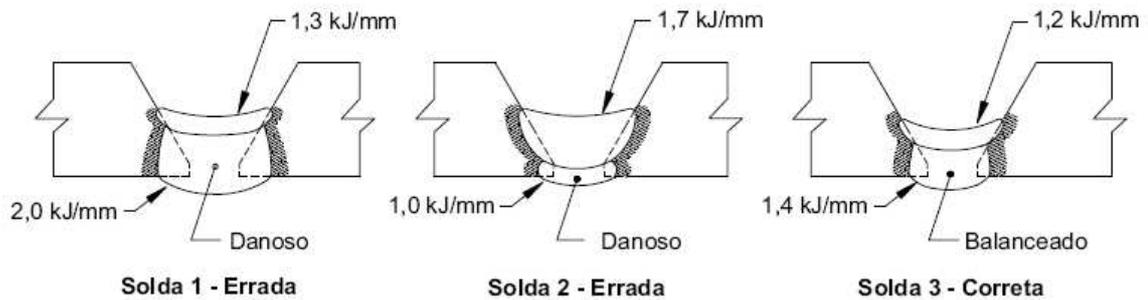


Figura 22— Aporte Térmico e Resistência à Corrosão

5.5.2. MEDIÇÃO DE FERRITA

5.5.2.1. As medições dos teores de ferrita deverão ser realizadas utilizando o Ferritoscópio. A Figura 23 ilustra o equipamento da marca Fischer Modelo FMP 30 mas pode ser utilizado outro similar.



Figura 23— Medidor de Ferrita – Fischer FMP 30



5.5.2.2. As medições deverão ser ajustadas para o modo percentual. Os resultados encontrados deverão estar entre 35% e 65% de ferrita.

5.5.2.3. Deverão ser realizadas medições na raiz, sempre que possível, exceto quando a junta não permitir o acesso, e no acabamento.

5.5.2.4. Deverão ser realizadas 03 (três) medições a cada 1,5 metros lineares de solda de produção acabada, no metal de solda, na raiz (quando houver acesso) e no acabamento, para a soldagem em pipe-shop.

5.5.2.5. Deverá ser emitido um registro dos resultados obtidos em formulário próprio de acompanhamento da soldagem.

5.5.2.6. Caso os resultados das medições não atendam aos percentuais estabelecidos, a junta deverá ser segregada para avaliação. Neste caso, deverá ser realizada uma avaliação pelo especialista de soldagem para determinação das ações a serem realizadas seja para corte total da junta e/ou possibilidade de reparo.

5.5.3. MEDIÇÃO DE DUREZA

5.5.3.1. As medições de dureza deverão ser realizadas utilizando o durômetro portátil. A Figura 24 ilustra o equipamento da marca Equotip 3, mas pode ser utilizado outro similar.



Figura 24— Medidor de Dureza Portátil – Equotip 3

5.5.3.2. As medições deverão ser executadas na escala Vickers com carga 10 Kg.

5.5.3.3. Os valores limites máximos deverão ser de 225 HV para valores individuais e 250 HV para valores médios.

5.5.3.4. Deverão ser realizadas no metal de solda e na ZTA em ambos os lados do metal de base.

5.5.3.5. As medições deverão ser executadas conforme percentual estabelecido na IEIS aplicável.



5.5.3.6. Caso os resultados das medições não atendam aos percentuais estabelecidos, a junta deverá ser segregada para avaliação. Neste caso, deverá ser realizada uma avaliação pelo especialista de soldagem para determinação das ações a serem realizadas seja para corte total da junta e/ou possibilidade de reparo.

5.5.4. CONTROLE DA PROTEÇÃO GASOSA NA RAIZ

5.5.4.1. Para o processo GTAW o gás de proteção recomendado é argônio (Ar) + 2% Nitrogênio (valor máximo). O Nitrogênio é um importante formador de austenita e forte contribuinte na elevação da resistência a corrosão por pites e a perda deste elemento através da poça de fusão e difusão da ZTA para o metal de solda deve ser evitada.

5.5.4.2. A soldagem de campo por um só lado deve ser realizada pelo processo GTAW com gás de proteção livre de hidrogênio para se evitar trinca e fragilização do metal de solda. O gás de purga deve ser da mesma composição do gás de proteção. Deve ser mantido a purga até a terceira camada de solda ou 6,35 mm, o que for maior.

5.5.4.3. Antes de iniciar a soldagem da raiz, deve-se iniciar a purga para garantir toda expulsão do oxigênio desta região. A soldagem não deve ser iniciada antes que o conteúdo de oxigênio esteja menor ou igual a 50 ppm. A vazão de gás varia em função da junta, mas em geral possui valores entre 10 l/min e 15 l/min. As taxas deverão ser estabelecidas na IEIS.

5.5.4.4. As medições do teor de oxigênio na purga deverá ser através de oxímetro, conforme mostrado na figura 25, podendo ser utilizado outro equipamento similar.



Figura 25 - Oxímetro marca Toxipro O2 e Instrutherm

5.5.4.5. Durante o passe de raiz, sempre que a soldagem é iniciada, pode ocorrer um pico de oxigênio. A soldagem deve ser interrompida se o conteúdo for maior que 100 ppm. Este controle deve ser feito com analisador de oxigênio, capaz de detectar teores entre 0 e 1000 ppm. Sempre que possível, a raiz da solda deve ser submetida à inspeção visual para determinação do nível de oxidação antes de qualquer ensaio destrutivo. É admitida oxidação máxima de grau 3 conforme AWS C5.5.



No. 1—10 ppm	No. 6—500 ppm
No. 2—25 ppm	No. 7—1000 ppm
No. 3—50 ppm	No. 8—5000 ppm
No. 4—100 ppm	No. 9—12 500 ppm
No. 5—200 ppm	No. 10—25 000 ppm

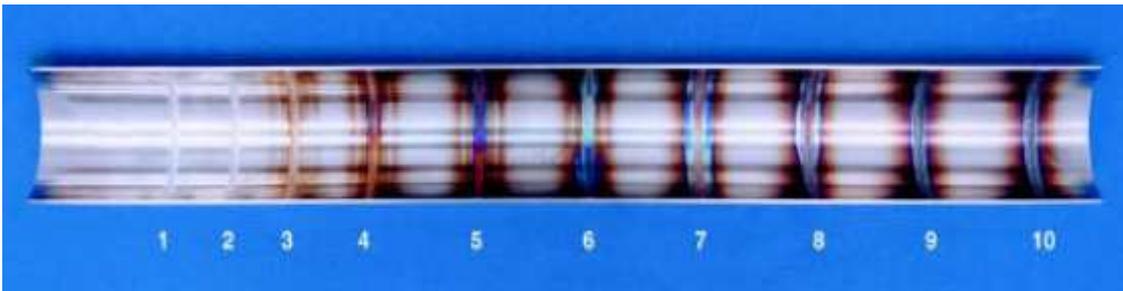


Figura 26— Exemplos de Contaminação do Gás de Purga em Função de Diferentes Teores de O₂, Conforme AWS C5.5

5.5.4.6. As medições das taxas de vazão deverão ser através de fluxômetro (bibímetro), conforme mostrado na figura 27, podendo ser utilizado outro equipamento similar.



Figura 27— Fluxômetro (Bibímetro)

5.5.4.7. Não há necessidade de registro dos resultados das medições, entretanto é necessário que todos os soldadores possuam os respectivos bibímetros e oxímetros para realização das medições e estejam conscientes de sua utilização.



5.5.5. CONTROLE DA TEMPERATURA DE INTERPASSE

5.5.5.1. As medições das temperaturas de interpasse deverão ser realizadas com termômetros de contato (desejável) ou lápis térmico, apropriados para os aços inoxidáveis, nas temperaturas limites, conforme figura 28, podendo ser utilizadas outras marcas similares.



Figura 28— Termômetro Digital com Sensor de Contato (Vecterm) e Lápis Térmico

5.5.5.2. As medições da temperatura de interpasse devem ser realizadas no metal de solda, na região em que será depositado o passe seguinte. No caso de uso de lápis térmico, a mesma deve ser feita em uma zona adjacente para evitar contaminação do passe seguinte.

5.5.5.3. As medições deverão ser realizadas imediatamente antes da deposição de um cordão de solda

5.5.5.4. Todos os soldadores deverão portar os lápis térmicos, conforme as temperaturas indicadas nas IEISs aplicáveis

5.5.5.5. As medições deverão ser realizadas em todas as juntas pelos soldadores. Os inspetores de soldagem deverão realizar avaliações aleatórias, entretanto todos os soldadores deverão ser avaliados em conjunto com as medições de Heat Input.

5.5.5.6. Os valores estabelecidos são máximos, desta forma deverão ser seguidas as recomendações das IEISs, objetivando evitar resfriamentos lentos das juntas e, com isto, possibilitar a formação de fases deletérias e/ou desbalanceamento do percentual de ferrita e austenita, além do aumento da dureza.

5.5.5.7. Não existe a necessidade de registro dos resultados das medições, entretanto é necessário que todos os soldadores possuam os lápis térmicos para as medições e estejam conscientes de sua utilização

5.5.6. TÉCNICA DE SOLDAGEM

5.5.6.1. A soldagem de tubulação deve ser realizada em quadrantes alternados para evitar distorções. Os passes de soldagem deverão ser retilíneos, exceto na execução dos passes de raiz, onde serão permitidos aos soldadores oscilações até 3 vezes o



diâmetro do eletrodo de tungstênio. O comprimento de cada passe não deve ser superior a 150 mm ou exceder a um quarto da circunferência do tubo.

5.5.6.2. Os eletrodos de tungstênio deverão ser utilizados conforme os diâmetros estabelecidos na tabela 10, caso não tenha nenhuma recomendação específica na IEIS.

Tabela 10. Diâmetro do Eletrodo de Tungstênio

Espessura do Metal de Base (T) – (mm)	Diâmetro do Eletrodo de Tungstênio (mm)
<u>T < 7,0</u>	2,4
<u>T ≥ 7,0</u>	3,2

5.5.6.3. As varetas de soldagem deverão ser conforme mostrado na tabela 11, caso não tenha nenhuma recomendação específica na IEIS.

Tabela 11. Diâmetro das Varetas

Espessura do Metal de Base (T) – (mm)	Diâmetro da Vareta (mm)
<u>2,0 < T < 4,8</u>	1,6
<u>4,8 ≤ T < 7,0</u>	2,4
<u>T ≥ 7,0</u>	3,2

5.5.6.4. A quantidade de passes no acabamento pode variar em função das condições de abertura da junta, desvios oriundos do acoplamento. Na tabela 12 é mostrada a quantidade mínima recomendada, caso não tenha nenhuma recomendação específica na IEIS.

Tabela 16— Quantidade Mínima de Passes no Acabamento

Espessura do Metal de Base (T) – (mm)	Quantidade de passes no acabamento
<u>2,0 < T < 4,8</u>	1 – retilíneos – ver nota
<u>4,8 ≤ T < 7,0</u>	2 – retilíneos – ver nota
<u>7,0 ≤ T ≤ 11,08</u>	3 – retilíneos – ver nota

5.5.7. LIMPEZA APÓS FABRICAÇÃO

5.5.7.1. A limpeza de pós fabricação de AID não é diferente das limpezas requeridas para outros aços inoxidáveis. A limpeza de pós fabricação é muito importante, assim como o controle de temperatura interpasse ou o uso de gás de proteção durante a



soldagem. Os aços inoxidáveis que não tenham sido limpos adequadamente após a fabricação, podem falhar em temperaturas mais baixas ou em ambientes muito menos agressivos em comparação com o metal de base. Isto significa que o custo extra para uma maior resistência à corrosão é desperdiçado, caso não se realize a limpeza necessária. Respingos, coloração azulada, aberturas de arco e mordeduras (figura 29), possuem diferentes potenciais do que a superfície do AID, então interações galvânicas podem ocorrer. Portanto, é importante a remoção destas rupturas de filmes protetivos, com uso de lixadeira e também a aplicação de solução decapante e apassivadora apropriada para Aço Inoxidáveis. Normalmente a solução contém 15% de ácido Nítrico e nos casos onde existe oxidação pesada adicionar 0,5% a 1,5% de ácido hidrofúorídrico. A limpeza com ácido requer cuidados quanto à contaminação do meio ambiente e a saúde do aplicador.

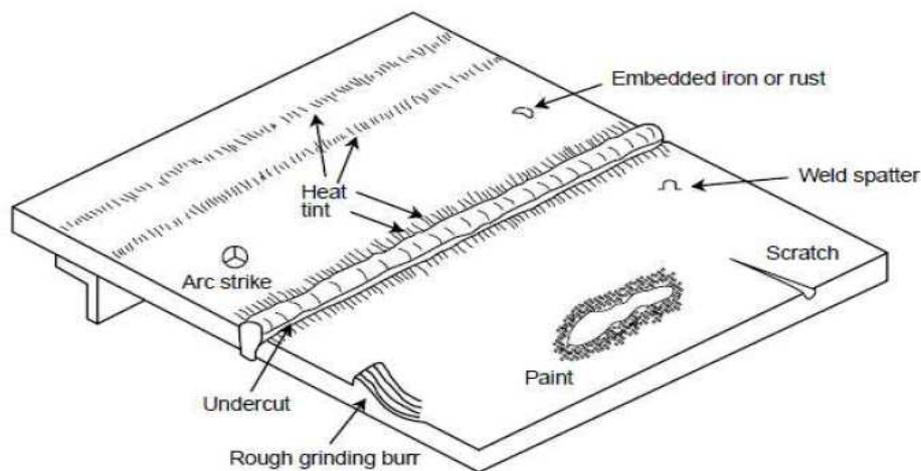


Figura 29— Exemplos de Descontinuidades que devem ser removidas ao final da Soldagem por Esmerilhamento e/ou Decapagem

5.5.8. ANÁLISE DE DESVIOS

5.5.8.1. Na ocorrência de quaisquer desvios quanto ao controle do heat input, medição de ferrita e ensaio de dureza deverão ser considerados todos os aspectos envolvidos na soldagem dos aços duplex e superduplex, tais como: procedimento de soldagem empregado, temperatura de interpasse, temperatura de pico de soldagem, velocidade de resfriamento, teores de ferrita dos metais de base e consumíveis, dureza máxima obtida nos metais de base e solda, bem como o a energia de soldagem aportada.

5.5.8.2. Após a análise dos dados acima citados, levando em conta a junta ou desvio apresentado, o especialista em soldagem, que deverá ter conhecimento na soldagem de aços duplex e superduplex, poderá recomendar o corte da mesma ou o reparo de soldagem.



6. BIBLIOGRAFIA

- 6.1. *NORMA PETROBRAS N-133 - SOLDAGEM*
- 6.2. *DR-ENGP-1.1-R.5 – PIPING STANDARD AND MATERIAL FOR OIL PRODUCTION AND PROCESS FACILITIES - APPENDIX 16 – WELDING REQUIREMENTS.*
- 6.3. *RAMIREZ A.J., 2001, P.H.D. DISSERTATION, UNIVERSITY OF SÃO PAULO, SÃO PAULO, BRASIL.*
- 6.4. *RAMIREZ, A. J., PRECIPITAÇÃO DE FASES INTERMETÁLICAS E AUSTENITA SECUNDÁRIA NA ZAC DE SOLDAGENS MULTIPASSE DE AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX. SÃO PAULO, 2001. 240P.*
- 6.5. *ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA – ET-3010.78-1200-955-UTE-067 – INSTRUÇÃO OPERACIONAL DE CONTROLE DA SOLDAGEM DOS AÇOS DUPLEX E SUPERDUPLEX DA P-58*
- 6.6. *APOSTILA DO CURSO DE “ESPECIALIZAÇÃO EM SOLDAGEM” DA UNIVERSIDADE PETROBRAS*