

Orientações práticas para processamento dos aços inoxidáveis Duplex

Orientações práticas para processamento dos aços inoxidáveis Duplex

2ª edição 2009, atualização 2012

© IMOA 1999–2012

ISBN 978-1-907470-07-3

Publicada pela Associação Internacional do Molibdenio (IMOA International Molybdenum Association), Londres, UK
www.imoa.info
info@imoa.info

Preparada por TMR Stainless, Pittsburgh, PA, USA
Projeto de circa drei, Munique, Alemanha

Agradecimentos:

IMOA agradece ao 'International Stainless Steel Forum' e ao 'Euro Inox' por seu suporte e revisão deste manual. Também gostaríamos de agradecer às empresas a seguir, por seus comentários e contribuições detalhadas: Acerinox, Allegheny Ludlum, Aquatech, ArcelorMittal, Baosteel, Columbus Stainless, JSL Limited, Nippon Yakin Kogyo, North American Stainless, Outokumpu Stainless, Sandvik, Swagelok, e Yieh United Steel Corporation.

A Associação Internacional do Molibdênio (IMOA) fez todos os esforços para garantir que a informação aqui apresentada é tecnicamente correta. No entanto, IMOA não representa nem garante a exatidão das informações contidas neste manual ou a sua adequação para qualquer uso geral ou específico. O leitor é avisado de que o material aqui contido é apenas para fins de informação e não pretende ser um substituto para os procedimentos de qualquer pessoa, e não deve ser utilizado ou invocado para qualquer aplicação específica ou geral, sem antes obter aconselhamento competente. IMOA, seus membros, funcionários e consultores não assumem especificamente toda e qualquer responsabilidade por qualquer tipo de perda, dano ou lesão resultante da utilização da informação contida na presente publicação. Especificações internacionais ASTM e EN foram utilizadas predominantemente nesta publicação, no entanto, as especificações de material podem variar entre países.

Foto da capa: Meads Reach, Temple Quai, Bristol, UK.
© www.m-tec.uk.com (fabricante), www.photo-genics.com (foto)

Índice

1	Introdução	4	11	Usinagem dos aços inoxidáveis duplex	32
2	História dos aços inoxidáveis duplex	5	11.1	Orientações gerais para usinagem dos aços inoxidáveis duplex	32
3	Composição química e papel dos elementos de liga	8	11.2	Torneamento e faceamento	33
3.1	Composição química dos aços inoxidáveis duplex	8	11.3	Fresagem com metal duro	34
3.2	O papel dos elementos de liga nos aços inoxidáveis duplex	8	11.4	Perfuração helicoidal com brocas de aço rápido	34
4	Metalurgia dos aços inoxidáveis duplex	10	12	Soldagem dos aços inoxidáveis duplex	36
5	Resistência à corrosão	13	12.1	Orientações gerais de soldagem	36
5.1	Resistência aos meios ácidos	13	12.1.1	Diferenças entre aços inoxidáveis duplex e austeníticos	36
5.2	Resistência aos meios básicos	14	12.1.2	Seleção do material de partida	36
5.3	Resistência à corrosão por pites e corrosão em frestas	14	12.1.3	Limpeza antes da soldagem	36
5.4	Resistência à corrosão sob tensão (SCC)	16	12.1.4	Projeto da junta	36
6	Especificações do usuário final e controle de qualidade	18	12.1.5	Pré-aquecimento	38
6.1	Requisitos padrão de ensaios	18	12.1.6	Aporte térmico e temperatura de interpasse	38
6.1.1	Composição química	18	12.1.7	Tratamento térmico após a soldagem	38
6.1.2	Solubilização e têmpera	18	12.1.8	Equilíbrio de fases desejado	38
6.2	Requisitos especiais de ensaios	19	12.1.9	Soldagem de metais diferentes	39
6.2.1	Ensaio de Tração e Dureza	19	12.2	Qualificação do procedimento de soldagem	40
6.2.2	Ensaio de dobramento	19	12.3	Processos de soldagem	40
6.2.3	Testes de impacto e exame metalográfico para as fases intermetálicas	20	12.3.1	Processo de soldagem a arco com eletrodo de tungstênio (GTAW/TIG)	40
6.2.4	Equilíbrio de fases, determinada por metalografia ou mensurações magnéticas	20	12.3.2	Processo de soldagem a arco elétrico e eletrodo consumível (GMAW/MIG)	42
6.2.5	Ensaio de corrosão	21	12.3.3	Soldagem a arco com arame tubular (FCW)	44
6.2.6	Soldagem em produção e Inspeção	22	12.3.4	Soldagem a arco com eletrodo revestido (SMAW)	44
7	Propriedades mecânicas	23	12.3.5	Soldagem a arco submerso (SAW)	46
8	Propriedades físicas	26	12.3.6	Soldagem por feixe de electron e laser	46
9	Corte	28	12.3.7	Soldagem por resistência	46
9.1	Corte a serra	28	13	Outras técnicas de união	47
9.2	Corte por cisalhamento	28	13.1	Preparação da união	47
9.3	Corte longitudinal	28	13.2	Adesivos	47
9.4	Puncionamento	28	13.3	Solda fraca (soldering)	47
9.5	Corte por plasma e a laser	28	13.4	Brasagem	48
10	Conformação	29	14	Limpeza pós-trabalho	49
10.1	Conformação a quente	29	14.1	Marcas de giz, tinta, sujeira, óleo	49
10.1.1	Recozimento de solubilização	29	14.2	Ferro incrustado (contaminação ferrosa)	49
10.2	Conformação a morno	30	14.3	Respingos de solda, descoloração da solda, fundente, escória, marcas de abertura de arco	50
10.3	Conformação a frio	30	15	Aplicações do aço inoxidável duplex	51
10.4	Conformação em prensa	31	Sugestão de leituras complementares	54	
10.5	Conformação por repuxo	31	Referências	57	
			Anexo 1:		
			Nomenclatura do aço inoxidável duplex e nomes de produtos	58	
			Anexo 2:		
			Resumo das especificações	60	

1 Introdução

Os aços inoxidáveis Duplex são uma família que combina uma boa resistência à corrosão com alta resistência e facilidade de fabricação. Suas propriedades físicas estão entre aquelas dos aços inoxidáveis austeníticos e ferríticos, mas tendem a estar mais próximas dos aços ferríticos e do aço carbono. A resistência à corrosão

por pites e em frestas dos aços inoxidáveis duplex, é uma função do teor de cromo, molibdênio, tungstênio e nitrogênio. Pode ser similar ao do Tipo 316 ou superior à dos aços inoxidáveis para aplicações marinhas, como os aços inoxidáveis austeníticos com 6% Mo. Todos os aços inoxidáveis duplex apresentam resistência

à corrosão sob tensão na presença de cloretos, muito superior à dos aços inoxidáveis austeníticos da série 300. Todos eles possuem resistência mecânica significativamente maior que os tipos austeníticos, além de boa ductilidade e tenacidade.

Existem muitas similaridades no trabalho com os aços inoxidáveis austeníticos e duplex, mas há diferenças importantes. O alto teor de liga e a alta resistência dos tipos duplex exigem algumas mudanças na forma de trabalho. Este manual destina-se aos fabricantes e usuários finais com responsabilidade no trabalho com o aço inoxidável duplex. Ele apresenta, em uma única fonte, informações práticas para o trabalho bem sucedido com os aços inoxidáveis duplex. Esta publicação assume que o leitor já tem experiência com o trabalho com aços inoxidáveis; portanto, ela fornece dados comparativos entre as propriedades e práticas de trabalho dos aços inoxidáveis duplex e daqueles aços inoxidáveis austeníticos da série 300 e do aço carbono.

O trabalho com os aços inoxidáveis duplex é diferente, mas não difícil.



Ponte em aço inoxidável duplex em Estocolmo, Suécia. © Outokumpu

2 História dos aços inoxidáveis duplex

Os aços inoxidáveis duplex, que significa aços com uma microestrutura mista com proporções similares de austenita e ferrita, existem há aproximadamente 80 anos. Os primeiros tipos eram ligas de cromo, níquel e molibdênio. Os primeiros aços inoxidáveis duplex laminados foram produzidos na Suécia em 1930 e utilizados na indústria de papel sulfite. Estes tipos foram desenvolvidos para reduzir os problemas de corrosão intergranular nos primeiros aços inoxidáveis austeníticos com alto teor de carbono. Peças fundidas de duplex foram produzidas na Finlândia em 1930, e uma patente foi concedida na França em 1936 para o pioneiro que depois seria conhecido como o Urano 50. O tipo AISI 329 se consolidou depois da 2ª Guerra Mundial e foi usado de forma extensiva em tubulações de trocadores de calor para uso com ácido nítrico. Um dos primeiros tipos de duplex desenvolvido para melhorar a resistência à corrosão sob tensão em presença de cloretos (SCC) foi o 3RE60. Nos anos seguintes, os tipos duplex laminados e fundidos foram usados para uma série de aplicações na indústria de processamento, incluindo tanques, trocadores de calor e bombas.

Estes aços inoxidáveis duplex da primeira geração ofereciam boas características de desempenho mas também apresentavam limitações nas regiões soldadas. A zona termicamente afetada (ZTA) das soldas tinha baixa tenacidade devido ao excesso de ferrita, e uma resistência à corrosão significativamente menor que a do metal de base. Estas limitações restringiram o uso da primeira geração de aços inoxidáveis duplex, geralmente na condição de não-soldados, a algumas poucas aplicações específicas. Em 1968 a invenção do processo de refino do aço inoxidável com argônio e oxigênio, processo AOD, ampliou o espectro de utilização dos novos aços inoxidáveis. Entre os avanços possíveis através do

processo AOD, estava a adição deliberada de nitrogênio como elemento de liga. A adição de nitrogênio nos aços inoxidáveis duplex torna possível que a tenacidade da ZTA e a resistência à corrosão da união soldada sejam similares às do metal base. Juntamente com o aumento da estabilidade da austenita, o nitrogênio também reduz a velocidade de formação de fases intermetálicas prejudiciais.

A segunda geração de aços inoxidáveis duplex é definida pela adição de nitrogênio. Este novo desenvolvimento comercial, que começou no final dos anos 70, coincidiu com o desenvolvimento das plataformas offshore de gás e petróleo no Mar do Norte e a demanda por aços inoxidáveis com excelente resistência à corrosão por cloretos, boa trabalhabilidade e alta resistência. O 2205 se tornou o carro-chefe da segunda geração de tipos duplex e foi amplamente utilizado em tubulações de linha de gás e aplicações de processo nas plataformas offshore. A alta resistência destes aços permitiu a redução da espessura, com peso menor nas plataformas, oferecendo vantagens consideráveis para o seu uso.

Assim como os aços inoxidáveis austeníticos, os aços inoxidáveis duplex são uma família de tipos, que variam em desempenho frente à corrosão, dependendo do teor da liga. O desenvolvimento dos aços inoxidáveis duplex continuou e os aços inoxidáveis duplex modernos podem ser divididos em cinco grupos:

- Lean Duplex como o 2304, que não contém adição deliberada de Mo;
- Duplex padrão como o 2205, o carro-chefe responsável por mais de 80% do uso de duplex;
- Duplex 25 Cr como a Liga 255 com PREN* inferior a 40;



Torre de impregnação e digestão contínua de polpa de sulfato em aço duplex 2205, Sodra Cell Mönsterås, Suécia. © Kvaerner Pulping

- Super Duplex (PREN 40-45), com 25-26 Cr e mais Mo e N, comparado com os tipos 25 Cr, como o 2507;
- Hiper Duplex, definido como um aço inoxidável duplex de liga alta com PREN acima de 45.

* PREN
= Pitting Resistance Equivalent Number
(Índice de Resistência à Corrosão por Pites)
$$= \%Cr + 3.3(\%Mo + 0.5\%W) + 16\%N$$

A **Tabela 1** lista as composições químicas da segunda geração de aços inoxidáveis duplex laminados ou fundidos. A primeira geração de tipos duplex e os aços inoxidáveis austeníticos comuns são incluídos para comparação.

Obs.: Cada aço inoxidável mencionado pelo nome ou pela designação da indústria no texto pode ser encontrado na Tabela 1 ou Anexo 1.

Tabela 1: Composição química (% em peso) dos aços inoxidáveis duplex laminados e fundidos* (os tipos austeníticos apresentados para efeito de comparação)

Tipo	UNS No.	EN No.	C	Cr	Ni	Mo	N	Mn	Cu	W
Aços inoxidáveis duplex conformados										
Tipos de duplex da primeira geração										
329	S32900	1.4460	0.08	23.0–28.0	2.5–5.0	1.0–2.0	–	1.00	–	–
**	S31500	1.4424	0.03	18.0–19.0	4.3–5.2	2.5–3.0	0.05–0.1	–	–	–
	S32404		0.04	20.5–22.5	5.5–8.5	2.0–3.0	0.20	2.00	1.0–2.0	–
Tipos de duplex da segunda geração										
Lean										
	S32001	1.4482	0.03	19.5–21.5	1.0–3.0	0.6	0.05–0.17	4.0–6.0	1.0	–
	S32101	1.4162	0.04	21.0–22.0	1.35–1.7	0.1–0.8	0.20–0.25	4.0–6.0	0.1–0.8	–
	S32202	1.4062	0.03	21.5–24.0	1.0–2.8	0.45	0.18–0.26	2.00	–	–
	S82011		0.03	20.5–23.5	1.0–2.0	0.1–1.0	0.15–0.27	2.0–3.0	0.5	–
2304	S32304	1.4362	0.03	21.5–24.5	3.0–5.5	0.05–0.6	0.05–0.20	2.50	0.05–0.60	–
		1.4655	0.03	22.0–24.0	3.5–5.5	0.1–0.6	0.05–0.20	2.00	1.0–3.0	–
Padrão										
	S32003		0.03	19.5–22.5	3.0–4.0	1.5–2.0	0.14–0.20	2.00	–	–
2205	S31803	1.4462	0.03	21.0–23.0	4.5–6.5	2.5–3.5	0.08–0.20	2.00	–	–
2205	S32205	1.4462	0.03	22.0–23.0	4.5–6.5	3.0–3.5	0.14–0.20	2.00	–	–
25 Cr										
	S31200		0.03	24.0–26.0	5.5–6.5	1.2–2.0	0.14–0.20	2.00	–	–
	S31260		0.03	24.0–26.0	5.5–7.5	2.5–3.5	0.10–0.30	1.00	0.2–0.8	0.1–0.5
	S32506		0.03	24.0–26.0	5.5–7.2	3.0–3.5	0.08–0.20	1.00	–	0.05–0.30
	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	–
255	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	–
Super duplex										
2507	S32750	1.4410	0.03	24.0–26.0	6.0–8.0	3.0–5.0	0.24–0.32	1.20	0.5	–
	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
	S32808		0.03	27.0–27.9	7.0–8.2	0.8–1.2	0.30–0.40	1.10	–	2.1–2.5
	S32906		0.03	28.0–30.0	5.8–7.5	1.5–2.6	0.30–0.40	0.80–1.5	0.8	–
	S32950		0.03	26.0–29.0	3.5–5.2	1.0–2.5	0.15–0.35	2.00	–	–
	S39274		0.03	24.0–26.0	6.8–8.0	2.5–3.5	0.24–0.32	1.0	0.2–0.8	1.5–2.5
	S39277		0.025	24.0–26.0	6.5–8.0	3.0–4.0	0.23–0.33	0.80	1.2–2.0	0.8–1.2
		1.4477	0.03	28.0–30.0	5.8–7.5	1.5–2.6	0.30–0.40	0.80–1.50	≤0.8	–
Hiper duplex										
	S32707		0.03	26.0–29.0	5.5–9.5	4.0–5.0	0.30–0.50	1.50	1.0	–
	S33207		0.03	29.0–33.0	6.0–9.0	3.0–5.0	0.40–0.60	1.50	1.0	–

Tabela 1 (continuação): Composição química (% em peso) dos aços inoxidáveis duplex laminados e fundidos*
(os tipos austeníticos apresentados para efeito de comparação)

Tipo	UNS No.	EN No.	C	Cr	Ni	Mo	N	Mn	Cu	W
Aços Inoxidáveis austeníticos conformados										
304L	S30403	1.4307	0.03	17.5–19.5	8.0–12.0	–	0.10	2.00	–	–
316L	S31603	1.4404	0.03	16.0–18.0	10.0–14.0	2.0–3.0	0.10	2.00	–	–
317L	S31703	1.4438	0.03	18.0–20.0	11.0–15.0	3.0–4.0	0.10	2.00	–	–
317LMN	S31726	1.4439	0.03	17.0–20.0	13.5–17.5	4.0–5.0	0.10–0.20	2.00	–	–
904L	N08904	1.4539	0.02	19.0–23.0	23.0–28.0	4.0–5.0	0.10	2.00	1.0–2.0	–
Aços inoxidáveis duplex fundidos										
CD4MCu Grade 1A	J93370		0.04	24.5–26.5	4.75–6.0	1.75–2.25	–	1.00	2.75–3.25	–
CD4MCuN Grade 1B	J93372		0.04	24.5–26.5	4.7–6.0	1.7–2.3	0.10–0.25	1.00	2.7–3.3	–
CD3MCuN Grade 1C	J93373		0.03	24.0–26.7	5.6–6.7	2.9–3.8	0.22–0.33	1.20	1.4–1.9	–
CE8MN Grade 2A	J93345		0.08	22.5–25.5	8.0–11.0	3.0–4.5	0.10–0.30	1.00	–	–
CD6MN Grade 3A	J93371		0.06	24.0–27.0	4.0–6.0	1.75–2.5	0.15–0.25	1.00	–	–
CD3MN Cast 2205 Grade 4A	J92205		0.03	21.0–23.5	4.5–6.5	2.5–3.5	0.10–0.30	1.50	–	–
CE3MN Cast 2507 Grade 5A	J93404	1.4463	0.03	24.0–26.0	6.0–8.0	4.0–5.0	0.10–0.30	1.50	–	–
CD3MWCuN Grade 6A	J93380		0.03	24.0–26.0	6.5–8.5	3.0–4.0	0.20–0.30	1.00	0.5–1.0	0.5–1.0
Aços inoxidáveis austeníticos fundidos										
CF3 (cast 304L)	J92500	1.4306	0.03	17.0–21.0	8.0–12.0	–	–	1.50	–	–
CF3M (cast 316L)	J92800	1.4404	0.03	17.0–21.0	9.0–13.0	2.0–3.0	–	1.50	–	–

* Máximo, a menos que a faixa ou o mínimo seja indicado.

– Não definido nas especificações.

** Este tipo foi produzido originalmente sem adição deliberada de nitrogênio; sem esta adição ele seria considerado um duplex de primeira geração.

3 Composição química e função dos elementos de liga

3.1 Composição química dos aços inoxidáveis duplex

É geralmente aceito que as propriedades favoráveis dos aços inoxidáveis duplex podem ser atingidas com equilíbrio de fases na faixa de 30 a 70% de ferrita e austenita. Todavia, os aços inoxidáveis duplex apresentam mais comumente teores praticamente iguais de ferrita e austenita, com a produção comercial atual favorecendo levemente a austenita para melhores características de tenacidade e processamento. As interações dos principais elementos de liga, principalmente o cromo, molibdênio, nitrogênio e níquel, são bastante complexas. A fim de atingir uma estrutura duplex estável, que responda bem ao processamento e trabalho, deve-se tomar cuidado para obter o nível correto de cada um destes elementos.

Além do equilíbrio da fases, existe uma outra preocupação importante em relação aos aços inoxidáveis duplex e sua composição química: a formação de fases intermetálicas prejudiciais em temperaturas elevadas. As fases sigma e chi se formam em aços inoxidáveis de alto teor de cromo e molibdênio e precipitam preferencialmente na ferrita. A adição de nitrogênio retarda significativamente a formação destas fases. Portanto, é essencial que haja a presença de nitrogênio suficiente na solução sólida. A importância de limites estreitos de composição tornou-se clara conforme a experiência com os aços inoxidáveis duplex foi aumentando. A faixa de composição que foi originalmente definida para o 2205 (UNS S31803, Tabela 1) era muito ampla. A experiência demonstrou que para uma resistência à corrosão ideal e para evitar as fases intermetálicas, os níveis de cromo, molibdênio e nitrogênio deveriam ser mantidos na metade da faixa superior do S31803.

Com isso, um 2205 modificado com uma faixa de composição mais estreita foi introduzido com denominação UNS número S32205 (tabela 1). A composição do S32205 é típica da produção comercial atual do 2205. A menos que mencionado de forma diferente nesta publicação, o 2205 se refere à composição S32205.

3.2 O papel dos elementos de liga nos aços inoxidáveis duplex

A seguir temos uma rápida revisão do efeito dos elementos de liga mais importantes sobre as propriedades mecânicas, físicas e de corrosão dos aços inoxidáveis duplex.

Cromo: um mínimo de cerca de 10,5% de cromo é necessário para formar uma película passiva de cromo estável, suficiente para proteger um aço contra a corrosão atmosférica leve. A resistência à corrosão de um aço inoxidável aumenta com o teor mais alto de cromo. O cromo é um formador de ferrita, o que significa que a adição de cromo promove a estrutura cúbica de corpo centrado do ferro. Com teores mais altos de cromo, mais níquel é necessário para formar uma estrutura austenítica ou duplex (austenítica-ferrítica). O teor mais alto de cromo também promove a formação de fases intermetálicas. Normalmente o conteúdo mínimo de Cr dos aços inoxidáveis austeníticos é de 16% e nos tipos duplex de 20%. O cromo também aumenta a resistência à oxidação em temperaturas elevadas. Este efeito do cromo é importante devido à sua influência sobre a formação e remoção de carepa de óxido ou coloração térmica resultante do tratamento térmico ou soldagem. Os aços inoxidáveis duplex são mais difíceis de decapar e a remoção de coloração térmica é mais difícil que nos aços inoxidáveis austeníticos.

Molibdênio: O molibdênio age para dar apoio ao cromo, oferecendo resistência à corrosão por pites aos aços inoxidáveis. Quando o teor de cromo de um aço inoxidável é de pelo menos 18%, adições de molibdênio se tornam cerca de três vezes mais efetivas que as adições de cromo contra a corrosão por pites e em frestas nos ambientes que contém cloretos. O molibdênio é um formador de ferrita e também aumenta a tendência de um aço inoxidável formar fases intermetálicas prejudiciais. Portanto, é geralmente restrito a menos de cerca de 7,5% nos aços inoxidáveis austeníticos e 4% nos aços inoxidáveis duplex.

Nitrogênio: o nitrogênio aumenta a resistência à corrosão por pites e em frestas dos aços inoxidáveis austeníticos e duplex. Ele também aumenta significativamente a sua resistência e, na verdade, é o elemento de fortalecimento da solução sólida mais eficaz e um elemento de liga de baixo custo. A tenacidade aprimorada dos aços inoxidáveis duplex com nitrogênio ocorre devido ao seu maior teor de austenita e teor intermetálico reduzido. O nitrogênio não evita a precipitação das fases intermetálicas, mas retarda a formação de intermetálicos o suficiente para permitir o processamento e trabalho dos tipos duplex. O nitrogênio é adicionado aos aços inoxidáveis duplex e austeníticos altamente resistentes à corrosão que contém altos teores de cromo e molibdênio para compensar a sua tendência em formar a fase sigma.

O nitrogênio é um forte formador austenita e pode substituir parcialmente o níquel nos aços inoxidáveis austeníticos. O nitrogênio reduz a energia dos defeitos de empilhamento e aumenta a velocidade de endurecimento por deformação da austenita. Ele também aumenta a resistência mecânica da

austenita por endurecimento da solução sólida. Nos aços inoxidáveis duplex normalmente adiciona-se nitrogênio e o níquel é ajustado para atingir o equilíbrio de fases desejado. Os formadores de ferrita, cromo e molibdênio, são equilibrados pelos formadores de austenita, níquel e nitrogênio, a fim de desenvolver a estrutura duplex.

Níquel: o níquel é um estabilizador da austenita que promove uma mudança da estrutura cristalina do aço inoxidável de

cúbica de corpo centrado (ferrítica) para cúbica de face centrada (austenítica). Os aços inoxidáveis ferríticos contêm pouco ou nenhum níquel, os aços inoxidáveis duplex contêm quantidade baixa a média de níquel, como 1,5 a 7%, e os aços inoxidáveis austeníticos da série 300 contêm pelo menos 6% de níquel (ver **Figuras 1, 2**). A adição de níquel retarda a formação de fases intermetálicas prejudiciais nos aços inoxidáveis austeníticos mas é bem menos eficiente que o nitrogênio para retardar sua formação

nos aços inoxidáveis duplex. A estrutura cúbica de face centrada é responsável pela excelente tenacidade dos aços inoxidáveis austeníticos. Sua presença em cerca de metade da microestrutura dos tipos duplex aumenta significativamente a sua tenacidade em relação aos aços inoxidáveis ferríticos.

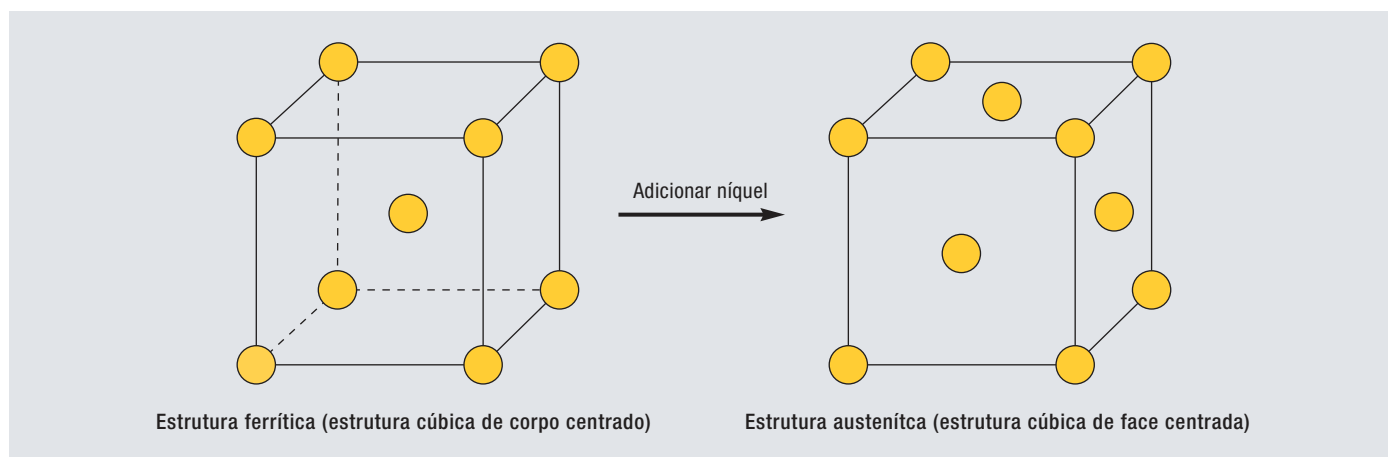


Figura 1: Ao adicionar níquel a estrutura cristalográfica muda de estrutura cúbica de corpo centrado (pouco ou nenhum níquel) para a estrutura cúbica de face centrada (pelo menos 6% de níquel – série 300). Os aços inoxidáveis duplex, com teor médio de níquel, tem uma microestrutura na qual alguns grãos são ferríticos e alguns austeníticos. Idealmente, em quantidades similares (figura 2).

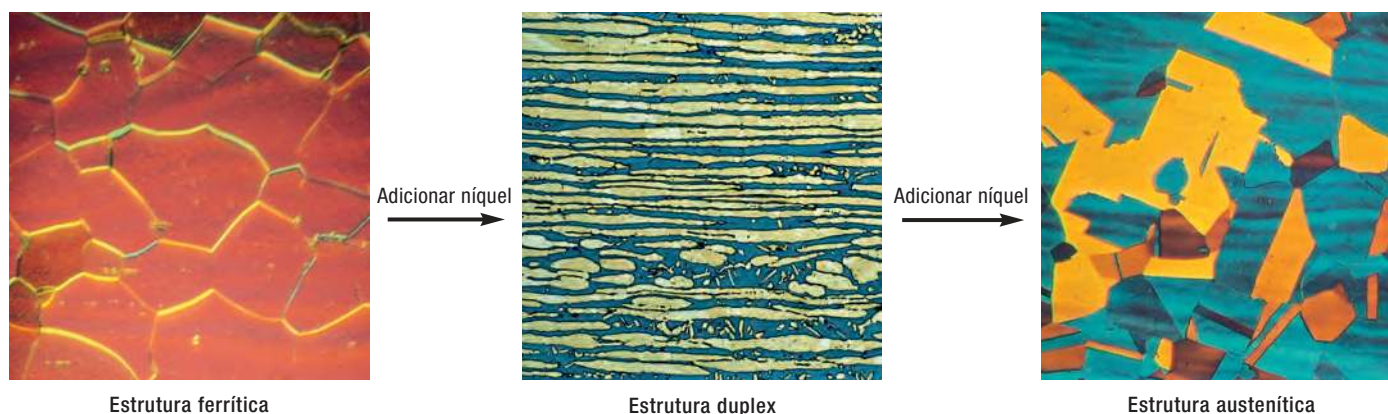


Figura 2: Aumentar o teor de níquel muda a microestrutura do aço inoxidável de ferrítico (à esquerda) para o duplex (no meio) para austenítico (à direita). (Estas imagens, cortesia da Outokumpu, apresentam amostras polidas e atacadas, ampliadas sob um microscópio óptico. Na estrutura duplex, a ferrita foi manchada e aparece como a fase mais escura.)

4 Metalurgia dos aços inoxidáveis duplex

O diagrama da fase ternária ferro-cromo-níquel é um roteiro do comportamento metalúrgico dos aços inoxidáveis duplex. Uma seção com 68% de ferro (**Figura 3**) ilustra que estas ligas se solidificam como ferrita (α), algumas delas se transformam em austenita (γ) conforme a temperatura cai para cerca de 1000°C (1832°F), dependendo da composição da liga. Há pouca mudança no equilíbrio ferrita-austenita em temperaturas mais baixas. O efeito do aumento de nitrogênio também é demonstrado na Figura 3 (Ref. 1). Termodinamicamente, porque a austenita se forma a partir da ferrita, é impossível que a liga ultrapasse o nível de equilíbrio da austenita. Todavia, ao atingir temperaturas mais baixas, carbonetos, nitretos, fase sigma e outras fases intermetálicas são todos possíveis constituintes microestruturais.

As quantidades relativas de ferrita e austenita presentes em um produto produzido ou trabalhado dependem da composição e história térmica do aço.

Pequenas mudanças na composição podem ter um efeito significativo sobre a fração de volume relativo destas duas fases, como mostra o diagrama de fase. As tendências dos elementos individuais para promover a formação da austenita ou ferrita se aplicam relativamente bem aos tipos duplex. O equilíbrio da fase ferrita/austenita na microestrutura pode ser prevista com a regressão linear multivariável, como se segue:

$$Cr_{eq} = \%Cr + 1.73 \%Si + 0.88 \%Mo$$

$$Ni_{eq} = \%Ni + 24.55 \%C + 21.75 \%N + 0.4 \%Cu$$

$$\% \text{ Ferrita} = -20.93 + 4.01 Cr_{eq} - 5.6 Ni_{eq} + 0.016 T$$

onde T (em graus Celsius) é a temperatura de recozimento variando de 1050–1150°C e as composições dos elementos em % em peso (Ref. 2). O objetivo de manter o equilíbrio de fase desejado em um aço inoxidável duplex é

atingido principalmente ajustando-se os teores de cromo, molibdênio, níquel e nitrogênio, e em seguida controlando o histórico térmico. Todavia, considerando que a taxa de resfriamento determina a quantidade de ferrita que pode se transformar em austenita, as taxas de resfriamento após exposições à alta temperatura influenciam o equilíbrio da fase. Devido ao fato das taxas de resfriamento rápido favorecerem a retenção da ferrita, é possível ter mais que a quantidade equilibrada da ferrita. Por exemplo, solda com baixo aporte de de uma seção grossa pode resultar em ferrita excessiva na Zona Termicamente Afetada (ZTA).

Outro efeito benéfico do nitrogênio, demonstrado na figura 3, é que ele aumenta a temperatura na qual a austenita começa a se formar a partir da ferrita. Isto aumenta a velocidade da transformação de ferrita em austenita. Entretanto, mesmo em velocidades relativamente rápidas de resfriamento, o nível de equilíbrio da austenita pode ser quase atingido. Nos aços inoxidáveis duplex da segunda geração, este efeito reduz o problema de excesso de ferrita na ZTA.

Devido ao fato da fase sigma se precipitar em temperaturas abaixo da formação de austenita a partir da ferrita no resfriamento (**Figura 4**), o objetivo de evitar a fase sigma nos produtos laminados é atingido através do controle da temperatura de recozimento e da garantia de que o aço seja resfriado o mais rápido possível a partir desta temperatura de recozimento para evitar a formação de sigma durante o resfriamento. A velocidade exigida de resfriamento é bem rápida, permitindo o uso de têmpera com água. Velocidades excessivas de resfriamento durante a fabricação, somente ocorrem quando se soldam tamanhos de seções com grandes diferenças ou seções grossas com aporte de calor muito baixo.

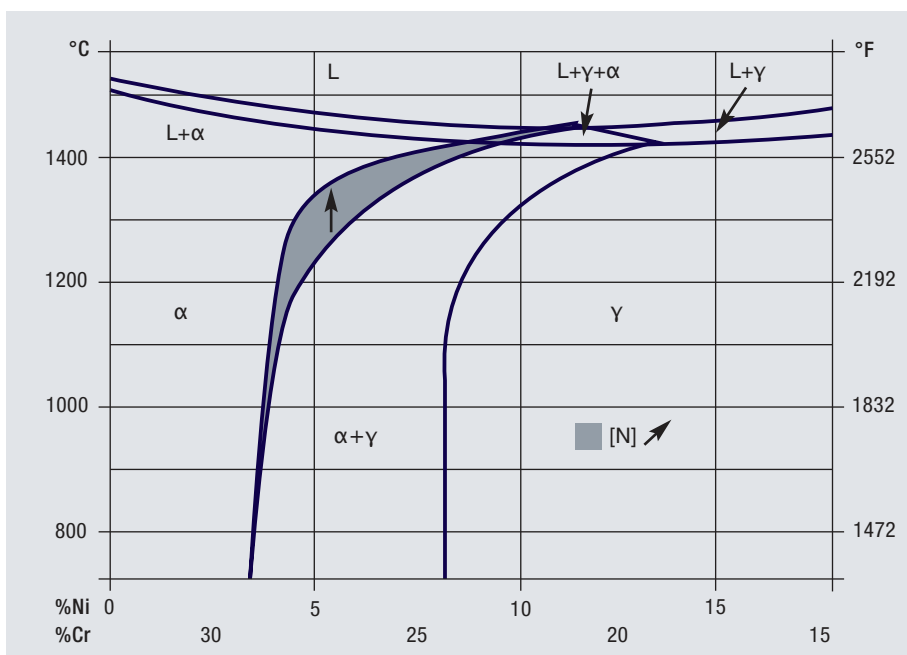


Figura 3: Seção através do diagrama de fase ternária Fe-Cr-Ni a 68% de ferro (pequenas mudanças no teor de níquel e cromo exercem uma grande influência sobre a quantidade de austenita e ferrita nos aços inoxidáveis duplex.)

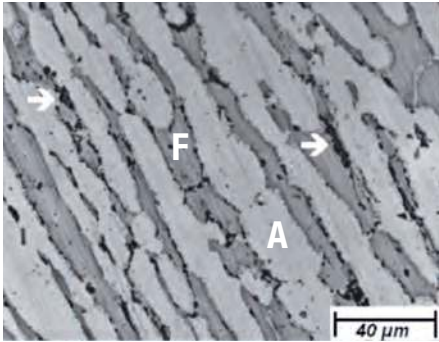


Figura 4: Microestrutura de uma amostra de 2205 envelhecida a 850°C (1560°F) por 40 minutos, mostrando precipitação da fase sigma (flechas) nos contornos de grão austenita/ferrita. A fase ferrita (F) parece mais escura que a fase austenita (A) no micrográfico (Ref. 3).

A fase alfa linha também é uma fase estável nas ligas duplex, formando-se na fase ferrita abaixo de 525°C (950°F) da mesma maneira que se forma nas ligas totalmente ferríticas. A alfa linha causa a perda da tenacidade em temperatura ambiente do aço inoxidável ferrítico após exposição extensa às temperaturas em torno de 475°C (885°F); este comportamento é conhecido como fragilização 475°C/885°F.

O uso do nitrogênio como um elemento de liga nestes aços inoxidáveis significa que nitretos de cromo podem estar presentes nos contornos do grão ferrita-ferrita e nos contornos austenita-ferrita na zona termicamente afetada das soldas. Se formados em frações de volume grande e sob condições nas quais as áreas pobres em cromo não tem tempo para se homogeneizar durante o recozimento, estes nitretos de cromo podem reduzir a resistência à corrosão. Todavia, como teores mais altos de nitrogênio promovem a austenita, que tem uma alta solubilidade para o nitrogênio, os aços inoxidáveis duplex da segunda geração raramente contém teores significativos de nitretos de cromo. Além disso, os aços inoxidáveis duplex de segunda geração são produzidos com teor muito baixo de carbono para que a formação de carbeto em níveis prejudiciais não seja normalmente uma preocupação prática.

Fases prejudiciais como sigma, alpha linha, carbonetos e nitretos podem se

formar em uma questão de minutos em certas temperaturas. Consequentemente, os tratamentos térmicos exigidos para o processamento e trabalho, assim como os ciclos de serviço, devem levar em consideração a cinética da reação da formação de fase para garantir que a resistência à corrosão desejada e as propriedades mecânicas sejam obtidas. Estes tipos duplex foram desenvolvidos para maximizar a resistência à corrosão e retardar as reações de precipitação ao máximo, a fim de permitir um trabalho bem sucedido.

Um diagrama de precipitação isotérmica para os aços inoxidáveis duplex 2304, 2205, e 2507 é mostrado na **Figura 5** (Ref. 4, 5, 6, 7). O início da precipitação de carbonetos de cromo e nitretos começa em um tempo relativamente “lento” de 1–2 minutos na temperatura. Este tempo é mais lento que nos tipos ferríticos ou nos tipos austeníticos altamente ligados e ocorre, em parte, devido à alta solubilidade do carbono e nitrogênio na

fase austenita de baixo teor de níquel e possivelmente devido ao efeito de retardamento do nitrogênio sobre a precipitação de carbonetos. Como resultado disto, os tipos duplex são relativamente resistentes à sensitização no resfriamento. A cinética de formação de carbonetos e nitretos é somente marginalmente afetada pelo cromo, molibdênio e níquel nestes tipos, portanto todos os tipos de aço inoxidável duplex ligados ao nitrogênio tem cinética similar ao 2205 no que concerne estes precipitados. A precipitação sigma e chi ocorre em temperaturas levemente mais altas, mas aproximadamente no mesmo momento da precipitação de carbonetos e nitretos. Os tipos Duplex que tem liga mais alta em cromo, molibdênio e níquel terão cinéticas sigma e chi mais rápidas que o 2205; aqueles com teor de liga menor são mais lentos. Isto é ilustrado pelas curvas pontilhadas na Figura 5, mostrando um início prematuro da formação de sigma e chi no 2507 com liga mais alta e um início mais lento para o 2304.

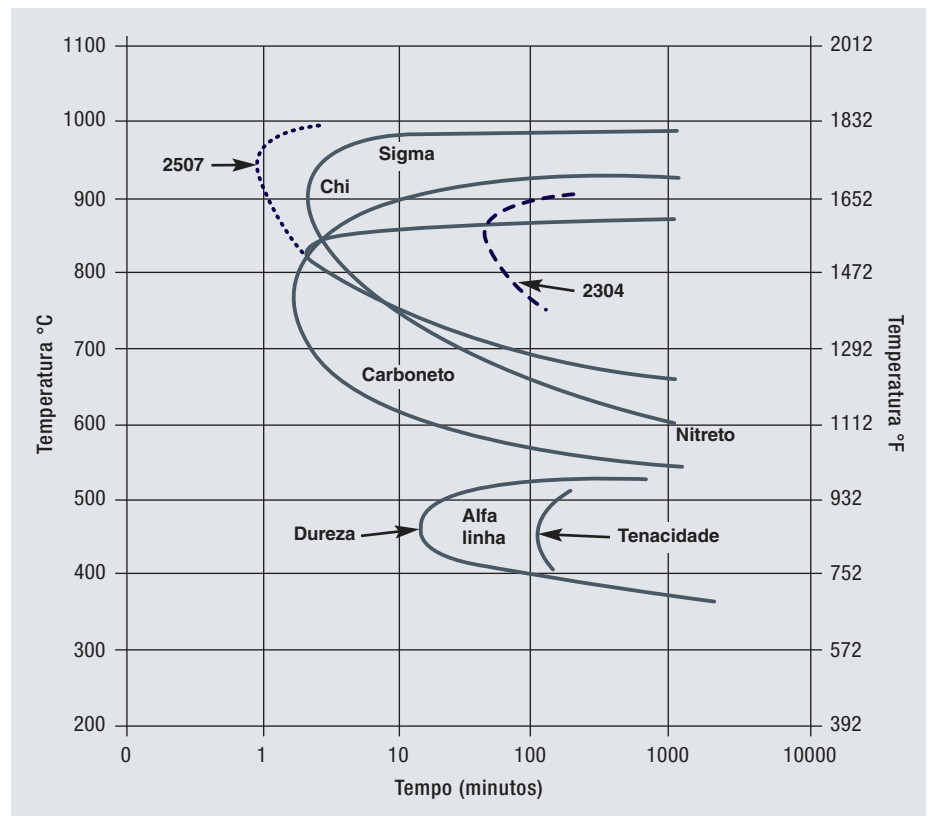


Figura 5: Diagrama de precipitação isotérmica para o aço inoxidável duplex 2205, recozido a 1050°C (1920°F). (tipos duplex 2304 e 2507 são mostrados a título de comparação)



Peças em aço inoxidável duplex 2507. © Swagelok

A fase alfa linha precipita dentro da fase ferrita, e seus efeitos são endurecer e fragilizar a ferrita. Felizmente, porque os aços inoxidáveis duplex contém 50% de austenita, este efeito de endurecimento e fragilização não é tão prejudicial quanto é nos aços totalmente ferríticos. A perda de tenacidade (fragilização) devido à precipitação alfa linha é mais lenta que

a velocidade do endurecimento (Figura 5). A fragilização alfa linha raramente consiste em uma preocupação durante os trabalhos devido aos períodos longos exigidos para que a fragilização ocorra. Todavia, o limite máximo de temperatura para o serviço é controlado pela formação da fase alfa linha.

Porque a exposição à temperatura elevada por um longo período de tempo pode resultar em perda da tenacidade em temperatura ambiente, os códigos de projeto de vasos de pressão estabelecem limites de temperatura máxima para a tensões máximas admissíveis de projeto. O código alemão TÜV distingue entre construções soldadas e não-soldadas e é mais conservador em seus limites de temperatura máxima que o Código ASME Boiler and Pressure Vessel. Os limites de temperatura nestes códigos de projeto de vasos de pressão para vários aços inoxidáveis duplex estão resumidos na **Tabela 2**.

A **Tabela 3** resume uma série de reações de precipitação e limites de temperatura importantes para os aços inoxidáveis duplex.

Tabela 2: Limites máximos de temperatura para aços inoxidáveis duplex para valores de tensões admissíveis máximas em códigos de projeto de vasos de pressão

Tipo	Condição	ASME		TüV	
		°C	°F	°C	°F
2304	Não soldado	315	600	300	570
2304	Soldado, material de adição similar	315	600	300	570
2304	Soldado com 2205/2209	315	600	250	480
2205	Não soldado	315	600	280	535
2205	Soldado	315	600	250	480
2507	Tubos sem costura	315	600	250	480
Liga 255	Soldado ou não soldado	315	600		

Tabela 3: Temperaturas típicas para as reações da precipitação e outras reações características nos aços inoxidáveis duplex

	2205		2507	
	°C	°F	°C	°F
Faixa de solidificação	1470 a 1380	2680 a 2515	1450 a 1350	2640 a 2460
Temperatura de oxidação no ar	1000	1830	1000	1830
Formação da fase Sigma	700 a 950	1300 a 1740	700 a 1000	1300 a 1830
Precipitação de carbonetos	450 a 800	840 a 1470	450 a 800	840 a 1470
Fragilização 475°C/885°F	300 a 525	575 a 980	300 a 525	575 a 980

5 Resistência à corrosão

Os aços inoxidáveis Duplex exibem um alto nível de resistência à corrosão na maioria dos ambientes onde os tipos austeníticos padrão são utilizados. Todavia, existem algumas exceções notáveis nas quais eles são decididamente superiores. Isto é resultado do seu alto teor de cromo, que é benéfico em ácidos oxidantes, juntamente com molibdênio e níquel suficientes para oferecer resistência em ambientes ácidos levemente redutores. O teor relativamente alto de cromo, molibdênio e nitrogênio também oferece a eles muito boa resistência à corrosão por pites e em frestas induzida por cloretos. Sua estrutura duplex é uma vantagem em ambientes com potencial de fratura por corrosão sob tensão. Se a microestrutura contém pelo menos 20 a 30% de ferrita, os aços inoxidáveis duplex são muito mais resistentes à corrosão sob

tensão por cloretos que os aço inoxidáveis austeníticos dos tipos 304 ou 316. A ferrita é, todavia, suscetível à fragilização por hidrogênio. Assim, os aços inoxidáveis duplex não apresentam alta resistência em ambientes ou aplicações nas quais o hidrogênio possa estar incorporado no metal e causar fragilização por hidrogênio.

5.1 Resistência aos ácidos

Para ilustrar a resistência à corrosão dos aços inoxidáveis duplex em ácidos fortes, a **Figura 6** apresenta dados de corrosão para soluções de ácido sulfúrico. Este ambiente varia de levemente redutor com concentrações baixas de ácido, até oxidante com concentrações elevadas, com uma faixa de composição média fortemente redutora em soluções mornas e quentes. Ambos os aços inoxidáveis duplex

2205 e 2507 superam o desempenho de vários aços inoxidáveis austeníticos com alto teor de níquel nas soluções que contém até cerca de 15% de ácido. Eles são melhores que os tipos 316 ou 317 através de pelo menos um 40% de ácido. Os tipos duplex também são muito úteis com ácidos oxidantes que contenham cloretos. Os aços inoxidáveis duplex não tem níquel suficiente para resistir às fortes condições redutoras das soluções de ácido sulfúrico com concentrações médias, ou ácido clorídrico. Nas interfaces molhadas/secas em ambientes redutores onde há concentração do ácido, a corrosão, especialmente da ferrita, pode ser ativada e ocorrer rapidamente. Sua resistência às condições oxidantes torna os aços inoxidáveis duplex bons candidatos para uso com ácido nítrico e com os ácidos orgânicos fortes.

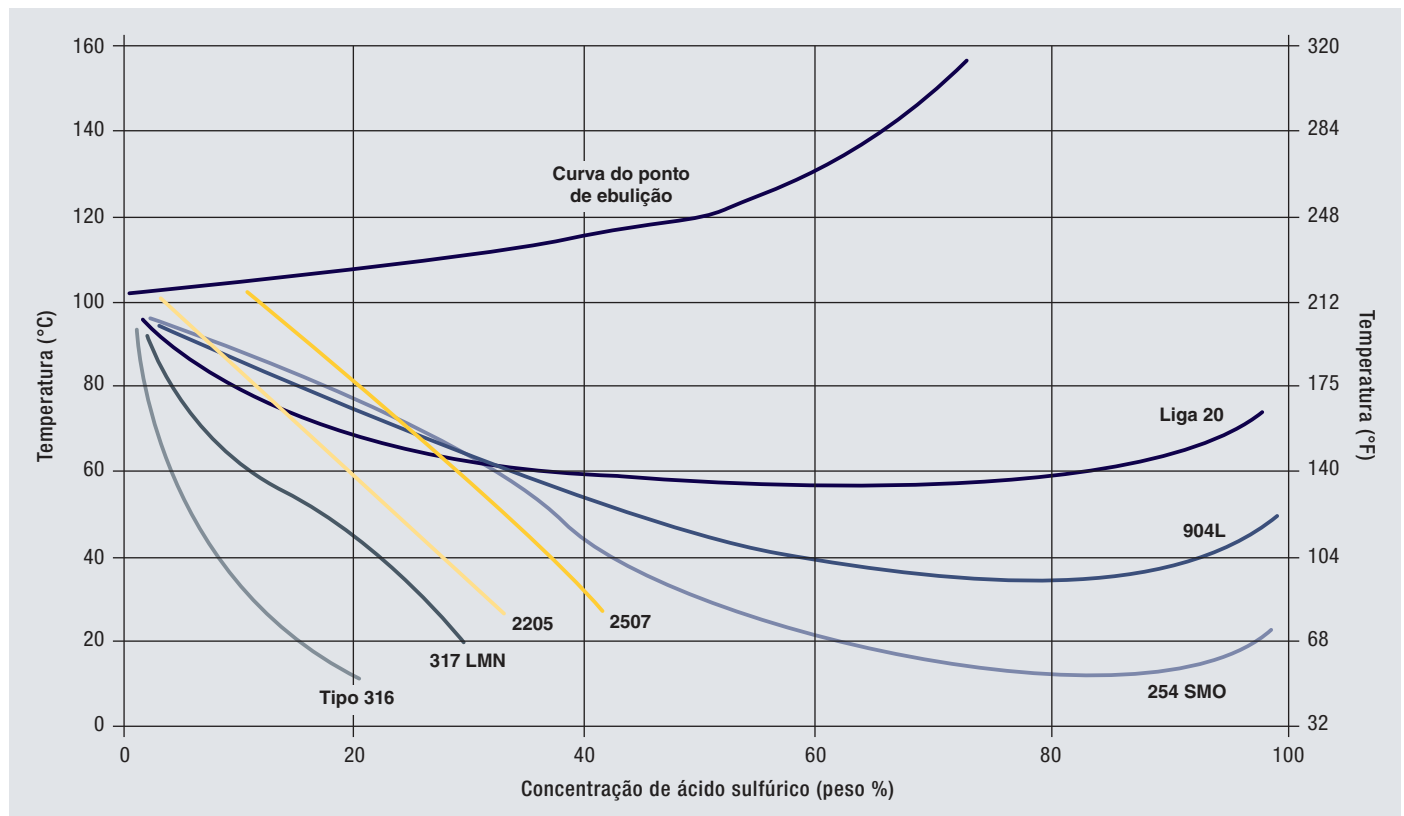


Figura 6: Diagrama de isocorrosão em ácido sulfúrico não aerado, 0.1 mm/ano (0.004 inch/yr) (testes de laboratório usando ácido sulfúrico de tipo reagente). Fonte: Planilhas do produtor, 254 SMO é uma marca registrada da Outokumpu

Isto está ilustrado na **Figura 7** para soluções de ácido acético a 50% e quantidades variadas de ácido fórmico nas temperaturas de ebulição. Embora os tipos 304 e 316 lidem com estes ácidos orgânicos fortes em temperaturas ambiente e moderada, o 2205 e outros tipos duplex são superiores em muitos processos que envolvem ácidos orgânicos em temperatura alta. Os aços inoxidáveis duplex também são utilizados em processos que envolvem hidrocarbonetos halogenados devido à sua resistência à corrosão por pites e à corrosão sob tensão.

5.2 Resistência aos meios básicos

O alto teor de cromo e a presença de ferrita oferece um bom desempenho dos aços inoxidáveis duplex em ambientes cáusticos. Em temperaturas moderadas, as velocidades de corrosão são mais baixas do que aquelas dos tipos austeníticos padrão.

5.3 Resistência à corrosão por pites e em frestas

Para discutir a resistência à corrosão por pites e em frestas dos aços inoxidáveis, é necessário introduzir o conceito de temperaturas críticas de corrosão por pites. Para um ambiente de cloretos específico, cada aço inoxidável pode ser caracterizado por uma temperatura acima da qual a corrosão por pites irá se iniciar e propagar a uma extensão detectada visualmente dentro de cerca de 24 horas. Abaixo desta temperatura, o início da corrosão por pites não irá ocorrer em períodos de tempo indefinidamente longos. Esta temperatura é conhecida como a temperatura crítica de pites (CPT). Ela é uma característica de cada tipo de aço inoxidável e de um ambiente específico. Visto que o início do pite é estatisticamente aleatório, e por causa da sensibilidade da CPT às variações mínimas dentro de um mesmo tipo de aço, a CPT é geralmente expressa para os diferentes tipos de aço como

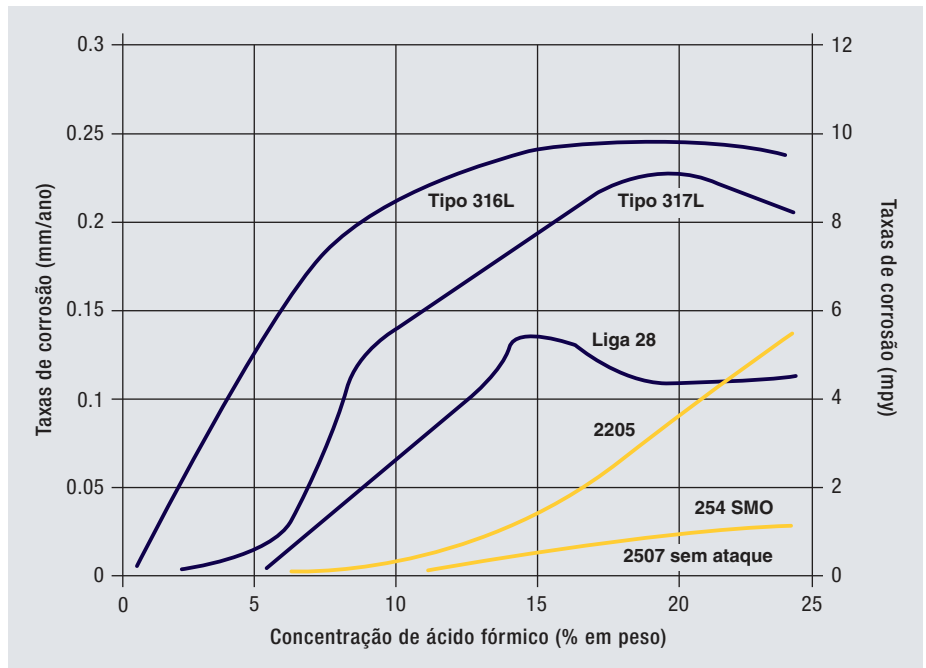


Figura 7: Corrosão dos aços inoxidáveis duplex e austeníticos em misturas em ebulição de 50% ácido acético e proporções variáveis de ácido fórmico. Fonte: Sandvik

uma faixa de temperatura. Todavia, com a ferramenta de pesquisa descrita no ASTM G 150¹, é possível determinar a CPT de forma precisa e confiável, através de medições eletroquímicas.

Existe uma temperatura crítica similar para a corrosão em frestas, chamada de temperatura crítica de frestas (CCT). A CCT depende da amostra individual de aço inoxidável, o ambiente de cloretos e a natureza (espessura, comprimento, etc.) da fresta. Devido à dependência da geometria da fresta e à dificuldade de se reproduzir frestas na prática, há mais dispersão para a medição da CCT do que da CPT. Geralmente, a CCT será de 15 a 20°C (27 a 36°F) mais baixa que a CPT para o mesmo aço e para o mesmo ambiente corrosivo.

Os altos teores de cromo, molibdênio e nitrogênio nos tipos duplex promovem resistência muito boa à corrosão localizada induzida por cloretos em ambientes aquosos. Dependendo do teor da liga,

alguns tipos duplex estão entre os aços inoxidáveis de melhor desempenho. Devido ao teor relativamente alto de cromo, os aços inoxidáveis duplex oferecem um alto nível de resistência à corrosão de forma muito econômica. Uma comparação da resistência à corrosão por pites e em frestas para uma série de aços inoxidáveis no estado recozido, conforme aos procedimentos ASTM G 48² (6% cloreto férrico) é apresentada na **Figura 8**. Espera-se que as temperaturas críticas para os materiais na condição de soldados sejam menores. As temperaturas críticas de pite ou frestas mais altas indicam maior resistência ao início destas formas de corrosão. A CPT e CCT do 2205 estão bem acima das do Tipo 316. Isto torna o 2205 um material versátil em aplicações nas quais os cloretos estão concentrados pela evaporação, como nos espaços de vapor dos trocadores de calor ou abaixo do isolamento. A CPT do 2205 indica que ele pode lidar com águas salobras e salmouras desaeradas. Ele foi usado com sucesso em aplicações

1 Método de teste padrão ASTM G 150 para avaliar eletroquimicamente a temperatura crítica de pites dos aços inoxidáveis

2 Método de teste padrão ASTM G 48 para avaliar a resistência à corrosão por pites e em frestas dos aços inoxidáveis e ligas relacionadas por solução de cloreto férrico.

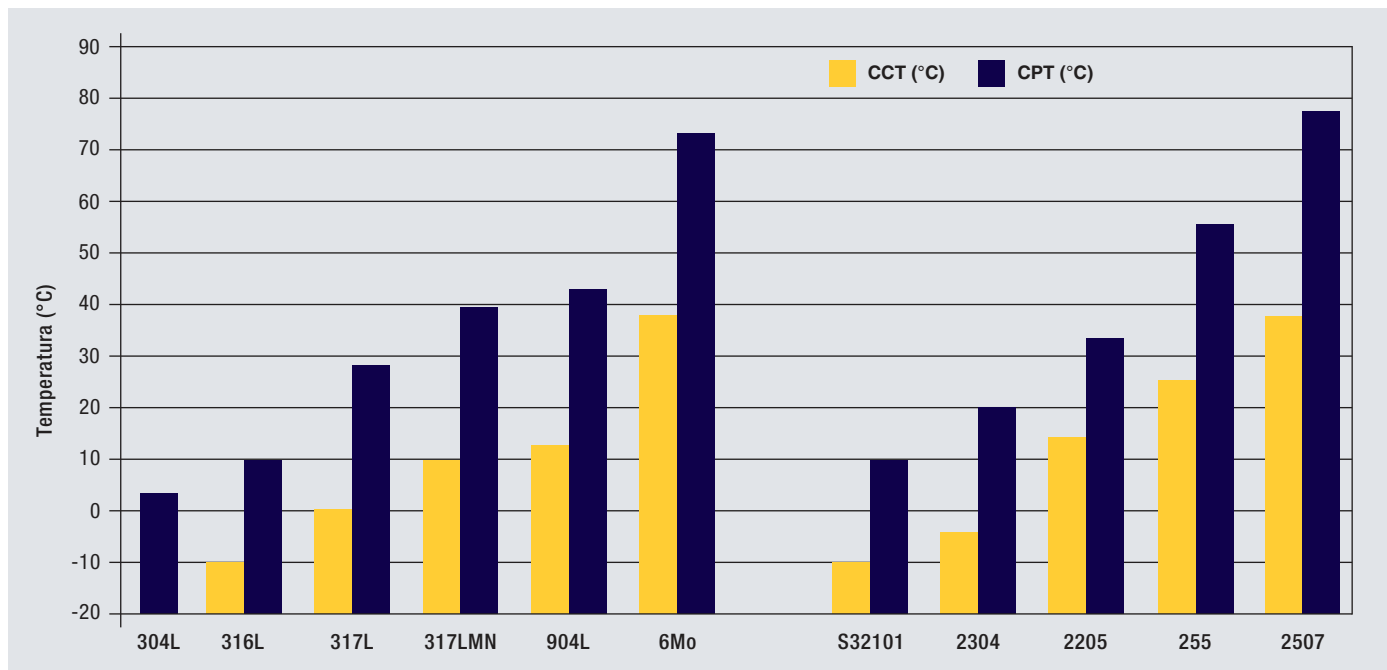


Figura 8: Temperaturas críticas da corrosão por pites e em frestas para aços inoxidáveis austeníticos não soldados (à esquerda) e aços inoxidáveis duplex (à direita) no estado de recozido de solubilização (avaliada em cloreto férrico a 6% pelo ASTM G 48)

na água do mar desaerada, onde a superfície foi mantida sem depósitos através de velocidades altas de fluxo ou de outras maneiras. O tipo 2205 não apresenta resistência à corrosão em frestas suficiente para suportar a água do mar em aplicações críticas como tubos de trocador de calor com parede fina ou onde existem depósitos ou frestas. Entretanto, os aços inoxidáveis duplex mais ligados, com CCT mais alta que o 2205, por exemplo, os tipos super duplex, têm sido utilizados em muitas situações críticas com água do mar, onde tanto a resistência mecânica como a resistência aos cloretos são necessárias.

Devido ao fato da CPT ser uma função do material e do ambiente em particular, é possível estudar o efeito de cada elemento. Usando a CPT conforme determinado pela ASTM G 48 Practice A, a análise de regressão estatística foi aplicada para as composições dos aços (cada elemento considerado como uma variável independente) e a CPT medida (a variável dependente). O resultado foi que somente cromo, molibdênio, tungstênio e nitrogênio demonstraram efeito mensurável consistente sobre a

CPT de acordo com a relação:

$$CPT = \text{constante} + \%Cr + 3.3 (\%Mo + 0.5\%W) + 16\%N.$$

Nesta relação, a soma das quatro variáveis do elemento da liga, multiplicado por suas constantes de regressão, é comumente chamado de Número Equivalente de Resistência a Pites (PREN). O coeficiente para nitrogênio varia entre os investigadores, e 16, 22, e 30 são comumente utilizados (Ref. 8). O PREN é útil para classificar os tipos dentro de uma única família de aços. Todavia deve-se tomar cuidado para evitar uma super confiança inadequada sobre esta relação. As “variáveis independentes” não eram verdadeiramente independentes porque os aços testados tinham composições equilibradas. As relações não são lineares e relações cruzadas, tais como as sinergias do cromo e molibdênio, foram ignoradas. A relação assume um material processado, em condições ideais mas não aborda o efeito das fases intermetálicas, fases não metálicas ou tratamento térmico inadequado que pode afetar negativamente a resistência à corrosão.

5.4 Resistência à corrosão sob tensão

Alguns dos primeiros usos dos aços inoxidáveis duplex foram baseados na sua resistência à corrosão sob tensão fraturante (SCC). Comparados aos aços inoxidáveis austeníticos, com similar resistência à corrosão por pites e em frestas, os aços inoxidáveis duplex apresentam resistência SCC significativamente melhor. Muitos dos usos dos aços inoxidáveis duplex nas indústrias de processo químico são substituições ao uso dos tipos austeníticos em aplicações com risco significativo de SCC. Todavia, assim como muitos materiais, os aços inoxidáveis duplex podem ser suscetíveis à corrosão sob tensão em determinadas condições. Isto pode ocorrer em alta temperatura, ambientes com cloretos ou quando as condições favorecem uma fratura induzida por hidrogênio. Exemplos de ambientes nos quais a SCC dos aços inoxidáveis duplex pode ser esperada incluem o teste de cloreto de magnésio a 42% em ebulição, a evaporação de gotas quando a temperatura do metal é alta e a exposição aos sistemas aquosos de

cloretos pressurizados nos quais a temperatura é mais alta que a possível à pressão atmosférica.

Uma ilustração da resistência relativa à corrosão sob tensão fraturante para uma série de aços inoxidáveis austeníticos e duplex recozidos em um ambiente de cloretos severo é dada na **Figura 9** (Ref. 9). O teste de evaporação de gotas utilizado para gerar estes dados é muito agressivo porque ele é conduzido em uma temperatura alta de 120°C (248°F) e a solução de cloretos é concentrada por evaporação. Os dois aços duplex mostrados, o 2205 e o 2507, irão em algum momento apresentar fissuras neste teste em alguma fração de seu limite elástico, mas esta fração é muito mais alta que a do aço inoxidável tipo 316. Devido à sua resistência à SCC em

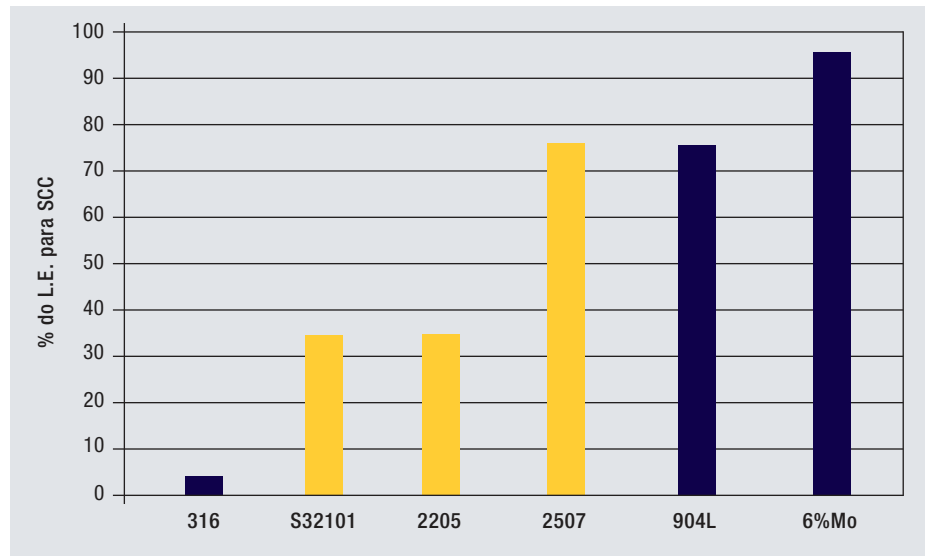


Figura 9: Resistência à fratura por corrosão sob tensão de aços inoxidáveis austeníticos e duplex no teste de evaporação de gotas com soluções de cloreto de sódio a 120°C (248°F) (a tensão que causou a fratura, demonstrada como um percentual do limite elástico). Fonte: Outokumpu

Tabela 4: Comparação da resistência à fratura por corrosão sob tensão de aços inoxidáveis austeníticos e duplex não soldados em testes de laboratório acelerados. Fonte: várias fontes de literatura

Tipo	Type 304L Type 316L	3RE60	S32101 S32202	2205	25 Cr Duplex	Superduplex
42% MgCl ₂ , ebulição, 154°C, dobrado em U	■	■	■	■	■	■
35% MgCl ₂ , ebulição, 125°C, dobrado em U	■	■	■	■	■	■
Evap. gota, 0.1M NaCl, 120°C, 0.9 x L.E.	■	■	■	■	■	■
Teste Wick 1500 Cl como NaCl 100°C	■	■	■	■	■	■
33% LiCl ₂ , ebulição, 120°C, dobrado em U	■	■	■	■	■	■
40% CaCl ₂ , 100°C, 0.9 x L.E.	■	■	■	■	■	■
25–28% NaCl, ebulição, 106°C, dobrado em U	■	■	■	■	■	■
26% NaCl, autoclave, 155°C, dobrado em U	■	■	■	■	■	■
26% NaCl, autoclave, 200°C, dobrado em U	■	■	■	■	■	■
600 ppm Cl (NaCl), autoclave, 300°C, dobrado em U	■	■	■	■	■	■
100 ppm Cl (sal marinha + O ₂), autoclave, 230°C, dobrado em U	■	■	■	■	■	■

■ Fissura prevista ■ Fissura possível ■ Fissura não prevista ■ Dados insuficientes

ambientes aquosos de cloretos, à pressão atmosférica, por exemplo, corrosão sob isolamento, os aços inoxidáveis duplex podem ser utilizados em ambientes fraturantes por cloretos onde se sabe que os tipos 304 e 316 apresentam fissuras. A **Tabela 4** resume o comportamento da corrosão sob tensão fraturante de diferentes aços inoxidáveis em uma variedade de ambientes de teste, com vários graus de severidade. Os ambientes no lado esquerdo da tabela são severos devido aos seus sais ácidos, enquanto que aqueles do lado direito são severos devido às altas temperaturas. Os ambientes no meio são menos severos. Os aços inoxidáveis austeníticos padrão, aqueles com menos de 4% Mo, passam por corrosão sob tensão por cloretos em todos estes ambientes, enquanto que os aços inoxidáveis duplex são resistentes no intervalo médio em condições moderadas dos testes.



Tubos de aço inoxidável duplex. © Butting

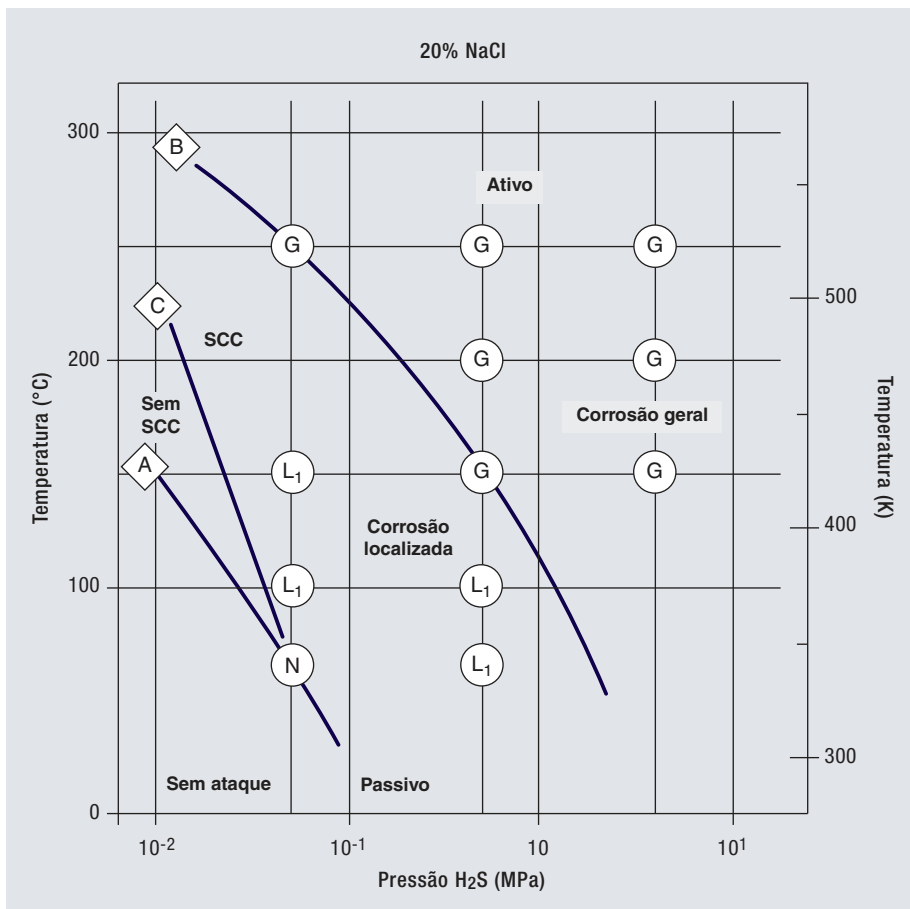


Figura 10: Corrosão do aço inoxidável duplex 2205 em ambientes de cloreto de sódio-sulfeto de hidrogênio 20% com base em previsão eletroquímica e resultados experimentais.

A resistência à corrosão sob tensão induzida por hidrogênio é uma função complexa, não somente do teor de ferrita, mas também da resistência mecânica, temperatura, condições de carga e tensão aplicada. Apesar de sua suscetibilidade à fratura por hidrogênio, pelas vantagens de resistência mecânica, os aços inoxidáveis duplex são usados em ambientes que contêm hidrogênio, contanto que as condições de operação sejam cuidadosamente avaliadas e controladas. A mais notável destas aplicações são tubos de alta resistência que trabalham com misturas de gás levemente ácido e salmoura. Uma ilustração mostrando regimes de imunidade e suscetibilidade para o 2205 em ambientes ácido que contêm cloreto de sódio é mostrada na **Figura 10** (Ref. 10).

6 Especificações do usuário final e controle de qualidade

Uma questão prática importante na especificação e no controle de qualidade dos produtos de aço inoxidável duplex é a manutenção das propriedades após a soldagem. É essencial que o material de partida de aço inoxidável duplex tenha uma composição e seja processado mediante um procedimento qualificado, para obter boas propriedades depois da soldagem.

6.1 Requisitos Padrão de Testes

6.1.1 Composição química

As especificações ASTM ou EN são o ponto de partida adequado para selecionar um aço inoxidável duplex de segunda geração. O nitrogênio é benéfico, tanto para evitar ferrita excessiva na Zona Termicamente Afetada (ZTA) como para uma maior estabilidade metalúrgica. O limite superior do nitrogênio em um aço inoxidável duplex é a solubilidade do nitrogênio na massa fundida, e isso se reflete no limite máximo da faixa de nitrogênio determinado nas especificações padrão. Entretanto, o mínimo de nitrogênio listado pode ou não refletir o nível necessário para oferecer a melhor resposta na soldagem. Um exemplo disto é o S31803, a especificação original do 2205 (Ref. 11).

No extremo inferior da faixa 0,08–0,20% permitida de N no S31803, o 2205 apresentava resposta inconsistente ao tratamento térmico e soldagem.

Experiências práticas levaram ao reconhecimento de que um mínimo de “0,14% de nitrogênio” é necessário para os trabalhos soldados de 2205. Visto que esta exigência era frequentemente especificada, a versão S32205 do 2205 o introduziu na sua especificação para atender os usuários finais que precisam

soldar. O aço inoxidável super duplex também tem faixas de nitrogênio mais altas, refletindo o reconhecimento da sua importância.

Há algumas especificações de usuário final para o aço inoxidável duplex baseadas na relação “PREN”. Enquanto um valor PREN pode ser eficaz para classificar a resistência de corrosão de vários tipos dentro de uma família de composições corretamente equilibradas, uma composição modificada para atender um PREN específico não necessariamente leva a um equilíbrio metalúrgico correto. O índice PREN pode ajudar na seleção de um dos tipos listados, mas quando aplicado a variações dentro de um tipo, ele sugere que o cromo e o molibdênio são substituíveis pelo nitrogênio. Mas, metalurgicamente, o cromo e o molibdênio promovem ferrita e fases intermetálicas, enquanto que o nitrogênio promove austenita e inibe a formação de fases intermetálicas.

Portanto, a seleção de composição para os tipos duplex é melhor baseada nos tipos padrão listados na especificação, possivelmente com restrição ao nitrogênio no extremo superior da faixa especificada para cada tipo. Qualquer que seja a composição especificada, o material deve ser o mesmo utilizado na qualificação dos procedimentos de solda, a fim de que as qualificações sejam significativas em termos dos resultados que podem ser esperados do produto fabricado.

6.1.2 Recozimento de solubilização e têmpera

Além da composição química, a condição real de recozido dos produtos laminados também é importante para uma resposta consistente na soldagem.

Em um aço inoxidável austenítico, o objetivo do recozimento é recrystalizar o metal e colocar o carbono na solução. Com os tipos L de baixo carbono, o aço inoxidável pode ser temperado em água ou resfriado ao ar de forma relativamente lenta, porque o tempo para a formação de quantidades prejudiciais de carbonetos é bastante longo. No entanto, no caso dos aços inoxidáveis duplex, mesmo com o teor ideal de nitrogênio, exposições de poucos minutos em uma faixa de temperatura crítica são prejudiciais para a corrosão e tenacidade (Ref. 12). Quando um produto laminado é resfriado lentamente, o tempo que o material leva para passar através da faixa de 700–980°C (1300–1800°F) não permite outras exposições térmicas, por exemplo, a soldagem. Portanto, o soldador terá menos tempo para fazer uma solda que seja livre de fases intermetálicas na Zona Termicamente Afetada (ZTA).

Embora especificações como a ASTM permitam que alguns tipos de duplex sejam “temperados em água ou resfriados rapidamente de outras formas”, a melhor condição metalúrgica para a soldagem é alcançada pela têmpera mais rápida a partir da temperatura de recozimento. Todavia, isto ignora a deformação e o aumento da tensão residual, induzidas pela têmpera em água. No caso de produto em chapas, o resfriamento ao ar é altamente eficaz em linhas modernas de processamento de bobinas; mas em chapa grossa, a têmpera em água produz a melhor condição metalúrgica para a soldagem. Permitir que uma placa ou uma peça esfrie na faixa de 700–980°C (1300–1800°F) antes da têmpera pode levar à formação de fases intermetálicas.

Uma outra abordagem para garantir uma ótima condição inicial é exigir que os produtos laminados sejam testados para verificar a ausência de fases intermetálicas prejudiciais. A ASTM A 923³ utiliza um exame metalográfico, teste de impacto, ou teste de corrosão para demonstrar a ausência de um nível prejudicial de fases intermetálicas. Este teste considera somente se ocorreu uma precipitação prejudicial. As normas EN não incluem nenhum procedimento de ensaio similar. Com este tipo de teste é verificado o procedimento de fabricação para garantir que as fases intermetálicas prejudiciais não sejam formadas durante o processamento. Este teste é análogo ao teste ASTM A 262⁴ ou EN ISO 3651-2⁵ dos aços inoxidáveis austeníticos para sensibilização, devido à precipitação de carbonetos de cromo. O ASTM A 923 cobre somente o 2205 (S31803 e S32205), 2507, 255, e S32520, mas outros tipos de duplex podem ser adicionados futuramente. Muitos fabricantes adotaram estes e outros testes similares ou outros critérios de aceitação, como parte de sua qualificação para procedimentos de soldagem.

6.2 Requisitos especiais de ensaios

6.2.1 Ensaio de tração e dureza

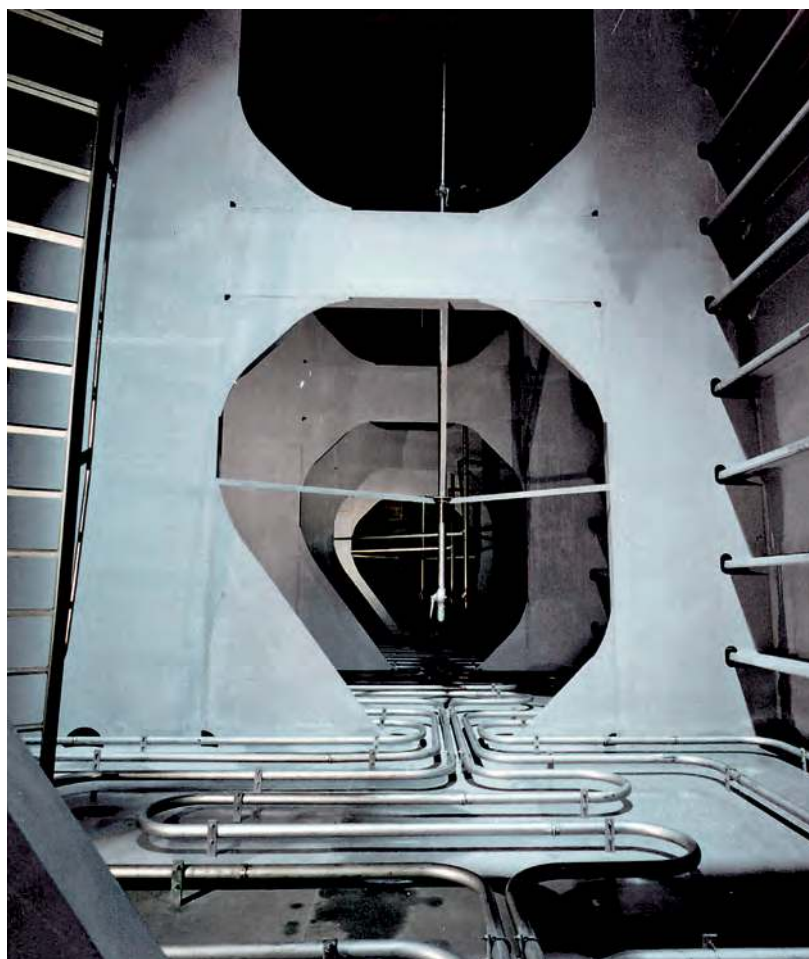
Os aços inoxidáveis duplex apresentam alta resistência, quando comparados aos aços inoxidáveis austeníticos. Todavia, há especificações ocasionais de usuários finais em que um máximo é imposto na resistência ou dureza. Impor máximos sobre a resistência ou dureza é provavelmente um resquício da experiência com aços inoxidáveis martensíticos, nos quais a resistência ou dureza altas são causadas por martensita não revenida. Todavia, os aços inoxidáveis duplex não formam martensita durante o resfriamento.

Resistência e dureza altas em um aço inoxidável duplex são o resultado de alto teor de nitrogênio, da estrutura duplex em si, e do endurecimento em trabalho que pode ocorrer nas operações de conformação ou endireitamento.

Os testes de dureza podem ser uma forma eficaz de demonstrar que houve trabalho a frio excessivo na fabricação; mas é importante que quando o teste de dureza estiver sendo utilizado para este fim, a mensuração seja realizada em um local no meio do caminho entre a superfície e o centro da seção, e não em uma superfície que foi endurecida localmente e superficialmente.

6.2.2 Ensaio de dobramento

Os ensaios de dobramento podem demonstrar se os produtos fabricados estão livres de trincas de laminação, mas podem ser complicados em seções grossas, peças pequenas ou certas geometrias. Os ensaios de dobramento não são uma indicação conservadora de qualidade no aço inoxidável duplex porque o ponto de dobramento pode não coincidir com o local em que haja uma condição inaceitável. Algumas condições como uma fase intermetálica no centro da linha são difíceis de serem detectadas, devido ao direcionamento do dobramento.



Interior de um tanque de 2205 (1.4462) em um navio de transporte de substâncias químicas. © Outokumpu

3 Norma ASTM A 923 Métodos de ensaio para detectar as fases intermetálicas prejudiciais nos aços inoxidáveis duplex austenítico/ferrítico

4 Norma ASTM A 262 Procedimento padrão para detectar a suscetibilidade a um ataque intergranular nos aços inoxidáveis austeníticos

5 EN ISO 3651-2 Determinação de resistência à corrosão intergranular dos aços inoxidáveis – Parte 2: aços inoxidáveis ferríticos, austeníticos e ferríticos-austeníticos (duplex) – teste de corrosão em meio contendo ácido sulfúrico

A utilidade dos ensaios de dobramento para detectar problemas de integridade da solda é amplamente reduzida devido à solidificação ferrítica do aço inoxidável duplex, assim como a condutividade térmica mais alta e a expansão térmica menor. Os testes de dobramento poderiam detectar excesso de ferrita de forma bruta se o local do teste coincidir precisamente com a região afetada, mas os testes de dobramento muito provavelmente não conseguem detectar a ocorrência de fases intermetálicas em níveis baixos, conhecidos como sendo prejudiciais à resistência da corrosão e tenacidade de um produto.

6.2.3 Teste de impacto e exame metalográfico para as fases intermetálicas

Existem duas formas nas quais um teste de impacto pode ser utilizado para especificar material ou qualificar um procedimento:

- teste em condições conhecidas para detectar material inaceitável, por exemplo ferrita em excesso ou a presença de fases intermetálicas;
- demonstrar que um produto apresenta propriedades suficientes para um determinado serviço.

Para o primeiro uso, a ASTM A 923 oferece um teste para o 2205. A perda de tenacidade descrita no Método B da ASTM A 923, em um teste Charpy longitudinal padrão a -40°F/C para menos de 54J (40 ft-lb) é indicativa de uma condição inaceitável para um produto laminado recozido. A fim de garantir que o tratamento térmico e a têmpera sejam satisfatórios, o Método B ASTM A 923 (ou o Método C, o teste de corrosão) deve ser exigido para cada lote de corrida do produto laminado, como uma medida de controle da produção. Todavia o ASTM A 923 permite o uso de exame metalográfico (Método A), como um teste de classificação para a aceitação, mas não rejeição. Por causa do alto nível de habilidade metalográfica exigida para

realizar o Método A, pode ser prudente que o usuário final exija o teste de corrosão Método C ao invés do exame metalográfico. Uma forma de determinar isso é solicitar que a taxa de corrosão seja relatada.

Uma vantagem do ASTM A 923 Método A é a identificação de fase intermetálica central, como mostra a Figura 7 do ASTM A 923. A fase intermetálica central irá desqualificar um material no que se refere ao rastreamento pelo Método A, mas não irá necessariamente resultar em rejeição do material pelo teste de impacto da ASTM A 923 Método B. Pelo fato desta fase intermetálica central levar à delaminação da chapa durante a conformação, corte a quente ou soldagem, o usuário deve solicitar a realização do Método A além do Método B ou C, e também deve exigir que qualquer material que apresentar fase intermetálica central seja rejeitado. Embora o ASTM A 923 declare que o Método A pode não ser usado para a rejeição, um usuário final tem a permissão de impor restrições mais rígidas. O material que apresentar fase intermetálica próxima do centro da espessura, como indicado pela Figura 7, o ASTM A 923 deve ser rejeitado.

O segundo uso do teste de impacto, avaliando o metal base, zona de fusão e ZTA em condições mais severas que aquelas pretendidas para o serviço, pode ser eficaz em termos de custo e ser também conservador. Para a avaliação da solda, tanto a temperatura de teste como critérios de avaliação devem ser específicos para o tipo de solda e relacionados significativamente às condições de serviço. A tenacidade não será tão alta quanto a de um produto laminado de aço inoxidável duplex recozido solubilizado. Uma tenacidade inferior do metal da solda não é necessariamente indicativa de fases intermetálicas, mas é mais frequentemente resultado de teor mais elevado de oxigênio, especialmente nos procedimentos de solda com fluxo de proteção.

A ASME publicou novos requisitos aplicáveis aos aços inoxidáveis duplex com espessura da seção maior que 9,5 mm (0.375 pol.) (Ref. 13). Estes requisitos utilizam ensaios de impacto Charpy a ou abaixo da temperatura mínima de projeto do metal (MDMT), com critérios de aceitação expressos como expansão lateral, para demonstrar que o material de partida e as soldas são tenazes o suficiente para o serviço em questão. O teste ASME difere do teste ASTM A 923 visto que o teste ASME exige que o teste Charpy consista em três amostras (a abordagem mais comum para mensurar a tenacidade, para melhor adequação ao serviço) e exige o relato dos resultados mínimos e médios. A ASME exige ensaio do metal base, metal da solda e ZTA para cada corrida de material base e para cada lote do metal de aporte.

Para reduzir testes com resultados conservadores, é possível usar a temperatura mais baixa das duas temperaturas de teste (-40°C/F na ASTM A 923 ou MDMT no Código ASME), e medir a tenacidade através de energia de impacto e expansão lateral para amostras triplicadas.

6.2.4 Equilíbrio de fases determinado por metalografia ou medições magnéticas

O equilíbrio de fase austenita-ferrita dos produtos laminados de aço inoxidável duplex apresenta variação muito pequena de corrida a corrida ou de lote a lote, porque eles são produzidos em faixas de composição química muito estreitas e práticas de recozimento bem definidas. Geralmente, o 2205 contém 40–50% de ferrita. Por este motivo, a determinação do equilíbrio de fase em produtos recozidos tem pouco valor.

Todavia, a determinação de ferrita pode ser apropriada para qualificação dos procedimentos de soldagem, a fim de evitar um excesso ferrita na Zona Termicamente Afetada (ZTA). Uma



Instalação de vergalhão de aço inoxidável duplex em um amplo deck de ponte. © Hardesty & Hanover, LLP

determinação precisa do equilíbrio de fases para um aço inoxidável duplex exige um exame metalográfico e contagem de pontos, por exemplo ASTM E 562 (manual) ou E 1245 (automatizado). Devido ao fato dos aços inoxidáveis duplex serem ferromagnéticos com um espaçamento excessivamente fino de austenita e ferrita, o uso de métodos de detecção magnética limita a confiabilidade sem padrões de referência de identidade geométrica e equilíbrio de fases medido metalograficamente. AWS A4.2-91 e EN ISO 82496 descrevem procedimentos para instrumentos magnéticos de calibração para medir a quantidade de ferrita nas soldas de aço inoxidável duplex e reportar os resultados em Número de Ferrita (FN). A variação aceitável do equilíbrio de fase para uma solda é substancialmente maior que a do metal base. Se a tenacidade e a resistência à corrosão da solda e a ZTA são aceitáveis, de acordo com ensaios

como ASTM A 923, uma faixa de 25–75% de ferrita pode oferecer as propriedades desejadas do aço inoxidável duplex. As medições magnéticas na faixa de FN 30–90 são consideradas aceitáveis.

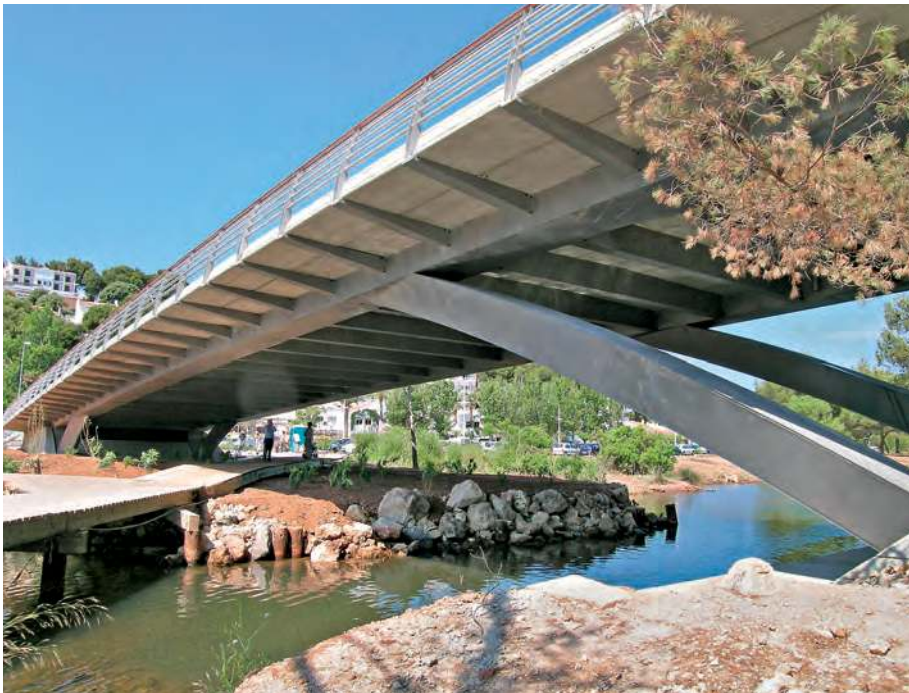
Solicitar a determinação do equilíbrio de fases do material que já está em serviço ou no estoque é mais caro que impor a mesma exigência sobre o material enquanto este está sendo produzido em uma usina. Obter a amostra e realizar um teste separado também pode reduzir a disponibilidade do material.

Devido ao fato das fases intermetálicas não serem magnéticas, o teste magnético não pode ser usado para detectar as fases sigma e chi.

6.2.5 Ensaios de corrosão

O teste de corrosão de produtos laminados recozidos solubilizados, de acordo

com o ASTM A 923 Método C, é um dos métodos de teste com o melhor custo para detectar condições prejudiciais. A precipitação das fases intermetálicas, e possivelmente de nitreto de cromo em um equilíbrio de fase excessivamente ferrítico, são detectados como perda de resistência à corrosão por pite. Estas fases causam perdas de 15°C, ou mais, da temperatura crítica de pite (CPT) normalmente esperada para o material adequadamente recozido. A medição da temperatura crítica de pite real de uma amostra é relativamente cara porque exige múltiplos ensaios ASTM G 48 ou ASTM G 150 de uma amostra única. Todavia, realizar um único ensaio de corrosão (ASTM A 923 Método C) 10 a 15°C abaixo da CPT típica para um aço inoxidável duplex irá revelar a presença de fases prejudiciais. Quando se utiliza um teste de corrosão para detectar a presença de fases nocivas, qualquer corrosão por pite nas faces ou nas



Ponte em Cala Galdana, em Menorca fabricada com aço inoxidável duplex 2205. © PEDELTA

bordas deve ser incluída como uma referência para rejeição. Mesmo que a borda não esteja exposta no serviço em questão, este teste destina-se a detectar fases intermetálicas e estas apresentam mais chances de estar presentes no centro da espessura, que é avaliado quando o ataque das bordas é incluído.

Antes do desenvolvimento da ASTM A 923, o teste de corrosão era geralmente chamado pela referência ao teste “ASTM G 48 modificado”. Todavia, o G 48 é uma descrição de procedimento de pesquisa em laboratório, e não um teste de aceitação de material. Um requisito de teste pelo G 48 não está completo sem determinar que a Prática G 48 deve ser realizada, e estabelecer as outras variáveis de ensaio, incluindo:

- preparação da superfície,
- temperatura do ensaio,
- duração do ensaio,
- inclusão ou exclusão da corrosão na borda,
- definição de critérios de aceitação.

O ASTM A 923 é um teste de aceitação projetado para demonstrar a ausência de fases intermetálicas prejudiciais em produtos laminados, de forma econômica e relativamente rápida. O Método C da ASTM A 923, expressa os critérios de aceitação como taxa de corrosão. Isto pode parecer surpreendente quando a questão é detectar corrosão por pite; todavia, esta abordagem foi utilizada por duas razões:

1. Ao basear a aceitação na perda de peso, elimina-se o problema potencialmente subjetivo e complicado de definir o que é um pite na superfície do metal. A perda de peso exigida para determinar rejeição é grande o suficiente para ser facilmente medida, mas pequena o suficiente para detectar facilmente o tipo de pite associado com a presença de fases intermetálicas em um teste de 24 horas.
2. Ao usar uma taxa de corrosão, praticamente qualquer tamanho ou formato de amostra pode ser testado, contanto que a área de superfície total possa ser determinada.

O teste de corrosão é conservador e não é sensível à geometria e localização da amostra, diferentemente do teste Charpy, que é sensível à orientação e localização do entalhe. O teste de corrosão é adequado como parte da qualificação dos procedimentos de solda, e como um teste de controle de qualidade econômico, aplicado às amostras de soldas de produção quando elas podem ser obtidas. Todavia, deve-se definir uma tolerância para a diferença de resistência à corrosão de produtos recozidos e juntas soldadas brutas. Até mesmo uma solda feita adequadamente pode apresentar uma CPT de 5 a 15°C menor que a do metal base, dependendo do procedimento de soldagem, gás de proteção e o tipo de aço inoxidável duplex que está sendo soldado.

6.2.6 Soldagem em produção e inspeção

Os problemas que podem ocorrer com o aço inoxidável duplex não são prontamente observados pelo soldador, nem são detectáveis por um ensaio não destrutivo. O soldador deve considerar que a qualidade total da solda, com base na sua tenacidade e resistência à corrosão em serviço, depende principalmente de seguir corretamente o procedimento de soldagem. Desvios do procedimento qualificado não serão necessariamente detectáveis no ponto de venda, mas cada desvio representa um risco para um serviço seguro e econômico.

7 Propriedades mecânicas

Os aços inoxidáveis duplex apresentam propriedades mecânicas excepcionais. Eles se encontram listados para os tipos de duplex padrão na **Tabela 5**. Seu limite de escoamento em temperatura ambiente na condição recozido solubilizado é mais que o dobro dos aços inoxidáveis austeníticos sem nitrogênio. Isto pode permitir ao engenheiro de projeto diminuir a espessura de parede em algumas aplicações. Os limites de escoamento típicos de vários aços inoxidáveis duplex são comparados com os do aço inoxidável austenítico 316L entre temperatura ambiente e 300°C (570°F) na **Figura 11**. Devido ao perigo de fragilização a 475°C (885°F) da fase ferrítica, os aços inoxidáveis duplex não devem ser usados em serviços em temperaturas acima daquelas permitidas pelo código de projeto aplicável de vasos de pressão por períodos prolongados de tempo (ver Tabela 2).

As propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis forjados são altamente anisotrópicas, ou seja, elas podem variar dependendo da orientação. Esta anisotropia é causada pelos grãos alongados e a textura cristalográfica que resulta da laminação a quente ou a frio (ver Figura 2). Enquanto que a estrutura

de solidificação do aço inoxidável duplex é tipicamente isotrópica, ele é laminado ou forjado e subsequentemente recozido com ambas as fases presentes. A aparência das duas fases no produto final revela a direção do processamento. A resistência é mais alta perpendicularmente à direção de laminação do que na direção de laminação. A tenacidade ao impacto é maior quando o entalhe é

posicionado perpendicular à direção da laminação do que na direção da laminação. A tenacidade medida será mais alta para uma amostra do ensaio Charpy “longitudinal” (L-T) do que para outras direções do ensaio. A energia de impacto de uma amostra transversal proveniente de uma placa de aço inoxidável duplex será geralmente de 1/2 a 2/3 daquela de uma amostra longitudinal.

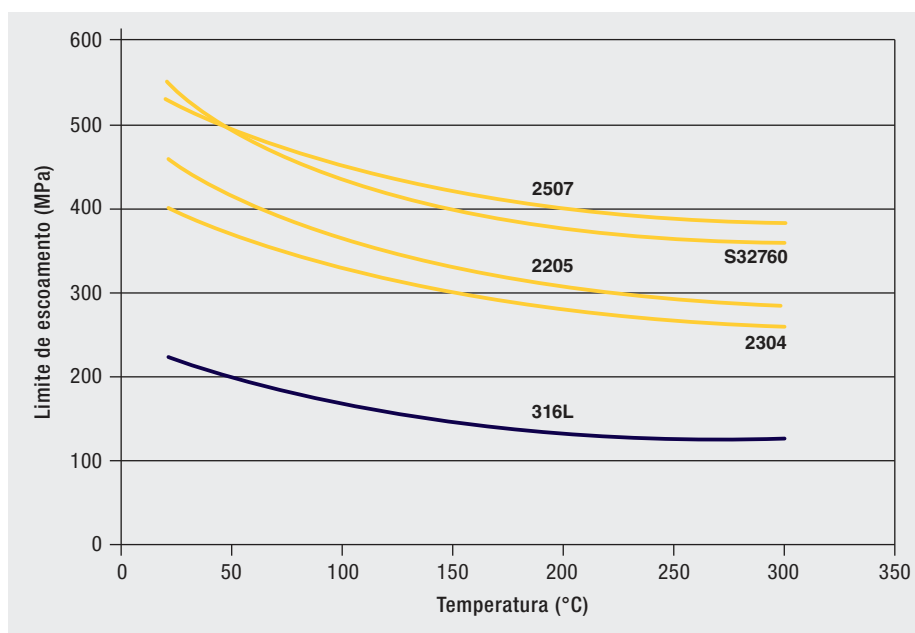


Figura 11: Comparação de limite de escoamento normal dos aços inoxidáveis duplex e tipo 316L entre a temperatura ambiente e 300°C (572°F). Fonte: planilhas do produtor

Tabela 5: Limites mínimos de propriedade mecânica ASTM e EN para chapa de aço inoxidável duplex

Tipo	ASTM				EN			
	UNS No.	Limite de escoamento 0.2% MPa (ksi)	Resistência à tração MPa (ksi)	Alongamento in 2" %	EN No.	Tensão de escoamento Rp0.2 MPa (ksi)	Resistência à tração Rm MPa (ksi)	Alongamento A5 %
2304	S32304	400 (58)	600 (87)	25	1.4362	400 (58)	630 (91)	25
2205	S32205	450 (65)	655 (95)	25	1.4462	460 (67)	640 (93)	25
2507	S32750	550 (80)	795 (116)	15	1.4410	530 (77)	730 (106)	20



Instalação de tubo de 2205 de 24 pol. isolado sobre elementos de suporte verticais em Prudhoe Bay. © Arco Exploration and Production Technology

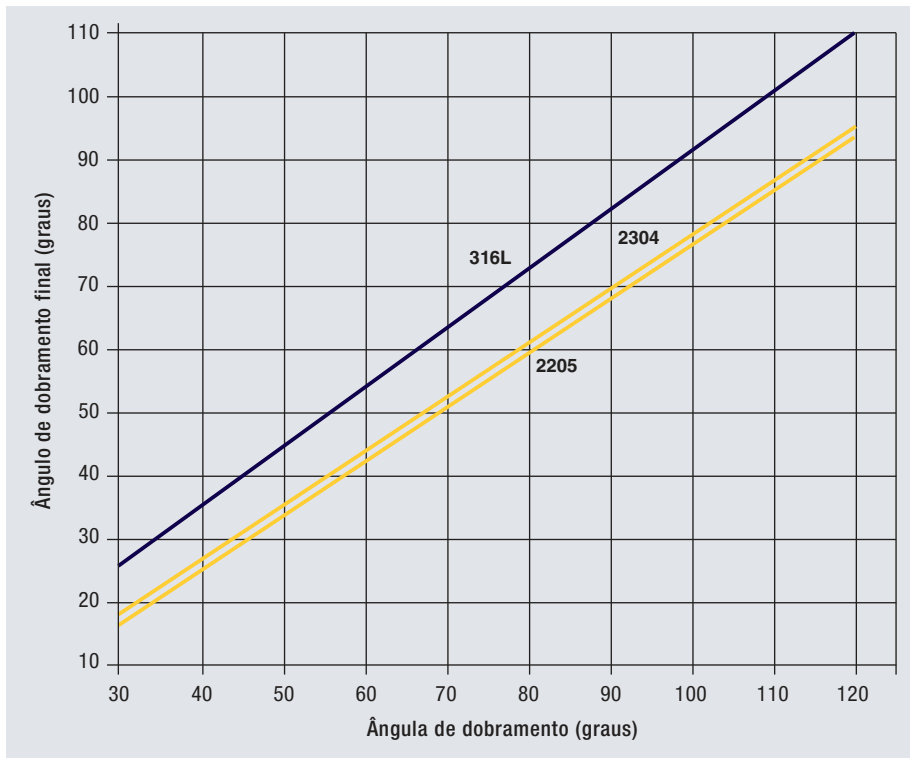
Apesar da alta resistência dos aços inoxidáveis duplex, eles apresentam boa ductilidade e tenacidade. Comparados ao aço carbono ou aos aços inoxidáveis ferríticos, a transição dúctil a frágil é mais gradual. Os aços inoxidáveis duplex mantêm boa tenacidade mesmo em temperaturas ambiente baixas, por exemplo, $-40^{\circ}\text{C}/\text{F}$; entretanto, a ductilidade e tenacidade dos aços inoxidáveis duplex são em geral menores que aquelas dos aços inoxidáveis austeníticos. Os aços inoxidáveis austeníticos geralmente não apresentam uma transição dúctil-frágil e mantêm excelente tenacidade até em temperaturas criogênicas. Uma comparação de alongamento mínimo no teste de tração para os aços inoxidáveis austeníticos padrão e duplex é apresentada na **Tabela 6**.

Embora o alto limite de escoamento do aço inoxidável duplex pode permitir redução da espessura, dependendo do encurvamento e limitações do Módulo Young, ele também pode apresentar alguns desafios durante o processamento. Devido à sua resistência mais alta, a deformação plástica exige forças maiores. A recuperação elástica em operações de dobramento é maior que com os aços inoxidáveis austeníticos por causa das forças de dobramento mais altas exigidas pelos aços inoxidáveis duplex. Uma comparação de recuperação elástica de dois aços inoxidáveis duplex e do aço inoxidável austenítico tipo 316L é apresentada na **Figura 12**. Os aços inoxidáveis duplex têm menor ductilidade que os aços inoxidáveis austeníticos e raios de dobramento maiores podem ser solicitados para evitar trincas.

Tabela 6: Comparação da ductilidade dos aços inoxidáveis duplex e austeníticos de acordo com os requisitos da ASTM A 240 e EN 10088-2

ASTM A 240			EN 10088-2			
UNS No.	Tipo	Alongamento, min. (%)	EN No.	Alongamento, min. (%)*		
				P	H	C
S32003		25				
S32101		30	1.4162	30	30	30
S32202		30	1.4062			
S32304	2304	25	1.4362	25	20	20
S32205	2205	25	1.4462	25	25	20
S32750	2507	15	1.4410	20	15	15
S30403	304L	40	1.4307	45	45	45
S31603	316L	40	1.4404	45	40	40

P = placa laminada a quente H = bobina laminada a quente C = chapa e bobina laminada a frio e * direção transversal



Devido à sua maior dureza e a alta velocidade de endurecimento por deformação, os aços inoxidáveis duplex geralmente reduzem a vida útil da ferramenta nas operações de usinagem ou então exigem tempos de usinagem mais longos comparados aos tipos austeníticos padrão. Ciclos de recozimento podem ser necessários entre as operações de conformação ou dobramento porque a ductilidade dos aços inoxidáveis duplex é aproximadamente metade da dos aços inoxidáveis austeníticos. O efeito da deformação a frio nas propriedades mecânicas do 2205 é demonstrado na **Figura 13**.

Figura 12: Comparação da recuperação elástica dos aços inoxidáveis duplex e o tipo 316L para uma chapa de 2 mm (0.08 polegada). Fonte: Outokumpu

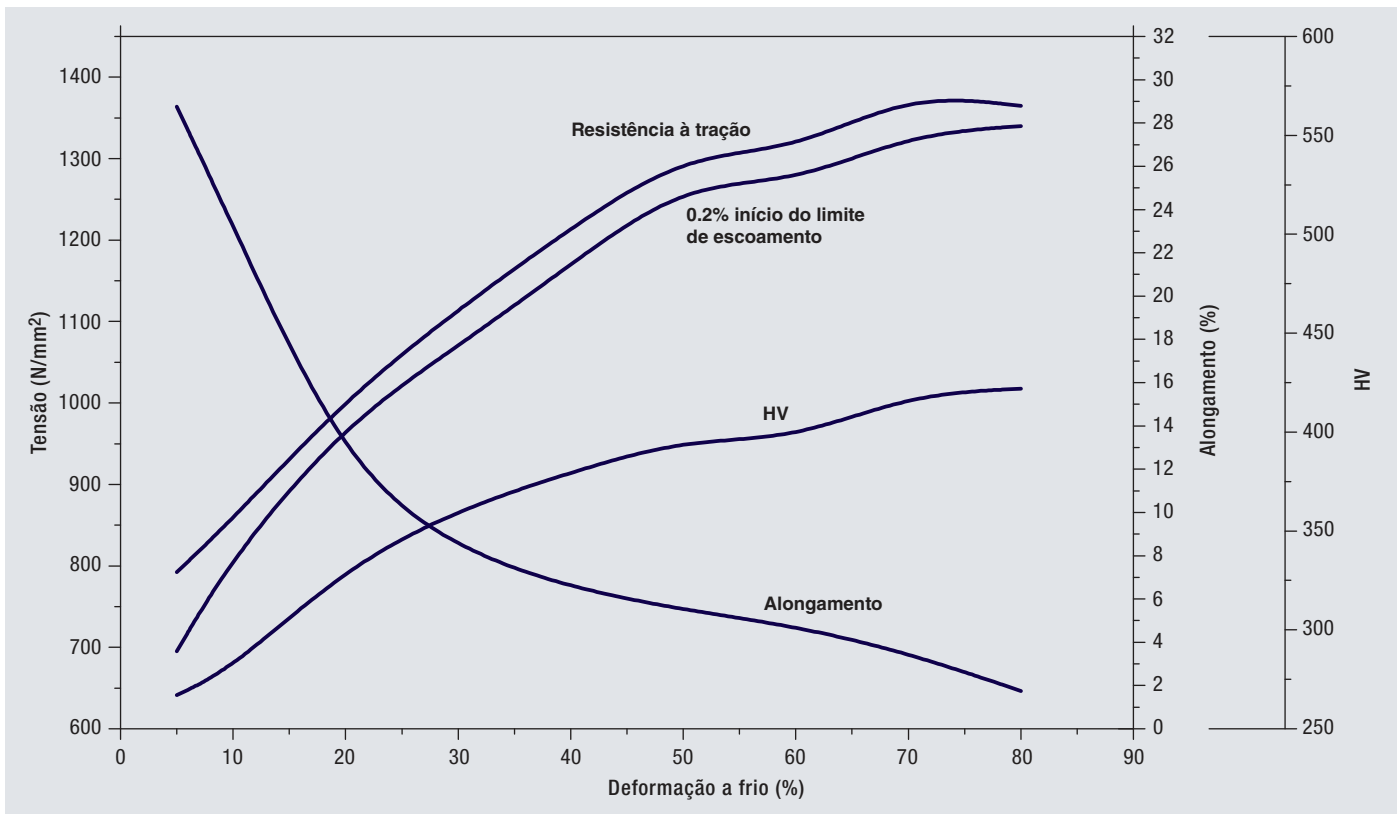


Figura 13: Efeito da deformação a frio nas propriedades mecânicas do aço inoxidável duplex 2205. Fonte: Baosteel

8 Propriedades físicas

As propriedades físicas em temperatura ambiente para uma seleção de aços inoxidáveis duplex são mostradas na **Tabela 7**, e valores selecionados em diferentes temperaturas elevadas são apresentados na **Tabela 8**. Os dados incluídos para aço carbono e aços

inoxidáveis austeníticos, são para fins de comparação.

Em todos os casos, as diferenças nos valores de propriedades físicas entre os tipos duplex são muito pequenas e provavelmente refletem diferenças

nos procedimentos dos ensaios. As propriedades físicas dos tipos duplex ficam entre aquelas dos aços inoxidáveis austeníticos e do aço carbono, mas tendem a ficar mais próximas daquelas dos aços inoxidáveis.

Tabela 7: Propriedades físicas em temperatura ambiente dos aços inoxidáveis duplex comparadas com as do aço carbono e dos aços inoxidáveis austeníticos. Fonte: planilhas do produtor

Tipo	UNS No.	Densidade		Calor específico		Resistência elétrica		Módulo de Young	
		g/cm ³	lb./in ³	J/kg K	Btu/lb./°F	micro Ω m	micro Ω in.	GPa	x10 ⁶ psi
Aço carbono	G10200	7.64	0.278	447	0.107	0.10	3.9	207	30.0
Tipo 304	S30400	7.98	0.290	502	0.120	0.73	28.7	193	28.0
Tipo 316	S31600	7.98	0.290	502	0.120	0.75	29.5	193	28.0
Tipo 329	S32900	7.70	0.280	460	0.110	0.80	31.5	200	29.0
	S31500	7.75	0.280	482	0.115			200	29.0
	S32101	7.80	0.281	500	0.119	0.80	31.5	200	29.0
2304	S32304	7.75	0.280	482	0.115	0.80	31.5	200	29.0
	S31803	7.80	0.281	500	0.119	0.80	31.5	200	29.0
2205	S32205	7.80	0.281	500	0.119	0.80	31.5	200	29.0
	S31260	7.80	0.281	502	0.120			200	29.0
	S32750	7.85	0.285	480	0.114	0.80	31.5	205	29.7
255	S32550	7.81	0.282	488	0.116	0.84	33.1	210	30.5
	S39274	7.80	0.281	502	0.120			200	29.0
	S32760	7.84	0.281			0.85	33.5	190	27.6
	S32520	7.85	0.280	450	0.108	0.85	33.5	205	29.7
2507	S32750	7.79	0.280	485	0.115	0.80	31.5	200	29.0

Tabela 8: Propriedades físicas em temperatura elevada dos aços inoxidáveis duplex comparadas às do aço carbono e aços inoxidáveis austeníticos.
Fonte: planilhas do produtor

Tipo	UNS No.	20°C (68°F)	100°C (212°F)	200°C (392°F)	300°C (572°F)	400°C (754°F)	500°C (932°F)
Módulo elástico em tensão como uma função da temperatura nas unidades de GPa (ksi x 1,000)							
Aço carbono	G10200	207 (30.0)					
Tipo 304	S30400	193 (28.0)	192 (27.9)	183 (26.6)	177 (25.7)	168 (24.4)	159 (23.0)
Tipo 329	S32900	200 (29.0)	195 (28.0)	185 (27.0)			
	S31500	200 (29.0)	190 (27.6)	180 (26.1)	170 (24.7)	160 (23.2)	150 (21.8)
	S32101	200 (29.0)	194 (28.0)	186 (27.0)	180 (26.1)		
2304	S32304	200 (29.0)	190 (27.6)	180 (26.1)	170 (24.7)	160 (23.2)	150 (21.8)
	S31803	200 (29.0)	190 (27.6)	180 (26.1)	170 (24.7)	160 (23.2)	150 (21.8)
2205	S32205	200 (29.0)	190 (27.6)	180 (26.1)	170 (24.7)	160 (23.2)	150 (21.8)
255	S32550	210 (30.5)	200 (29.9)	198 (28.7)	192 (27.8)	182 (26.4)	170 (24.7)
	S32520	205 (29.7)	185 (26.8)	185 (26.8)	170 (24.7)		
2507	S32750	200 (29.0)	190 (27.6)	180 (26.1)	170 (24.7)	160 (23.2)	150 (21.8)
Coefficiente de expansão térmica – de 20°C (68°F) a T em unidades de 10⁻⁶/K (10⁻⁶/°F)							
Aço carbono	G10200	NA	12.1 (6.70)	13.0 (7.22)		14 (7.78)	
Tipo 304	S30400	NA	16.4 (9.10)	16.9 (9.40)	17.3 (9.60)	17.6 (9.80)	18.0 (10.0)
Tipo 329	S32900	NA	10.9 (6.10)	11.0 (6.30)	11.6 (6.40)	12.1 (6.70)	12.3 (6.80)
	S31500	NA	13.0 (7.22)	13.5 (7.50)	14.0 (7.78)	14.5 (8.06)	15.0 (8.33)
	S32101	NA	13.0 (7.22)	13.5 (7.50)	14.0 (7.78)		
2304	S32304	NA	13.0 (7.22)	13.5 (7.50)	14.0 (7.78)	14.5 (8.06)	15.0 (8.33)
	S31803	NA	13.0 (7.22)	13.5 (7.50)	14.0 (7.78)	14.5 (8.06)	15.0 (8.33)
2205	S32205	NA	13.0 (7.22)	13.5 (7.50)	14.0 (7.78)	14.5 (8.06)	15.0 (8.33)
255	S32550	NA	12.1 (6.72)	12.6 (7.00)	13.0 (7.22)	13.3 (7.39)	13.6 (7.56)
	S32520	NA	12.5 (6.94)	13.0 (7.22)	13.5 (7.50)		
2507	S32750	NA	13.0 (7.22)	13.5 (7.50)	14.0 (7.78)	14.5 (8.06)	15.0 (8.33)
Condutividade térmica como uma função da temperatura em unidades de W/m K (Btu in/hr ft² °F)							
Aço carbono	G10200	52 (360)	51 (354)	49 (340)		43 (298)	
Tipo 304	S30400	14.5 (100)	16.2 (112)	17.8 (123)	19.6 (135)	20.3 (140)	22.5 (155)
Tipo 329	S32900						
	S31500	16.0 (110)	17.0 (118)	19.0 (132)	20.0 (138)	21.0 (147)	22.0 (153)
	S32101	15.0 (105)	16.0 (110)	17.0 (118)	18.0 (124)		
2304	S32304	16.0 (110)	17.0 (118)	19.0 (132)	20.0 (138)	21.0 (147)	22.0 (153)
	S31803	16.0 (110)	17.0 (118)	19.0 (132)	20.0 (138)	21.0 (147)	22.0 (153)
2205	S32205	16.0 (110)	17.0 (118)	19.0 (132)	20.0 (138)	21.0 (147)	22.0 (153)
255	S32550	13.5 (94)	15.1 (105)	17.2 (119)	19.1 (133)	20.9 (145)	22.5 (156)
	S32520	17.0 (118)	18.0 (124)	19.0 (132)	20.0 (138)		
2507	S32750	16.0 (110)	17.0 (118)	19.0 (132)	20.0 (138)	21.0 (147)	22.0 (153)

9 Corte

Os mesmos processos normalmente aplicados aos aços inoxidáveis austeníticos e aos aços carbono podem ser usados para cortar os aços inoxidáveis duplex, mas alguns ajustes nos parâmetros são necessários, a fim de acomodar as diferenças das propriedades mecânicas e a resposta térmica.

9.1 Corte a serra

Devido à alta resistência, alta taxa de endurecimento em trabalho e à virtual ausência de inclusões que serviriam como quebradores de cavacos, os aços inoxidáveis duplex são mais difíceis de serem serrados que os aços carbono. Os melhores resultados são obtidos com máquinas potentes, sistemas de alinhamento de lâminas resistentes, lâminas com dentes grossos, velocidades de corte de lentas a moderadas, avanços grandes e um fluxo generoso de refrigeração, de preferência uma emulsão sintética que facilite a lubrificação e o resfriamento, inserida de forma que a lâmina carregue o resfriante para a peça de trabalho. As velocidades de corte e alimentações devem ser similares às utilizadas para o aço inoxidável austenítico tipo 316.

9.2 Corte por cisalhamento

Os aços inoxidáveis duplex são cisalhados no mesmo equipamento utilizado para cisalhar os tipos 304 e 316, geralmente sem nenhum ajuste especial. Entretanto, devido à resistência maior ao cisalhamento dos aços inoxidáveis duplex, a potência do corte deve ser mais alta ou a espessura a ser cisalhada deve ser reduzida.

A resistência ao cisalhamento dos aços inoxidáveis é cerca de 54% do limite da resistência à tração tanto para chapa laminada a quente como para uma chapa laminada a frio. Os aços inoxidáveis duplex comportam-se da mesma forma



Corte de tiras de aço inoxidável duplex.
© Outokumpu

esperada para uma peça mais espessa de aço inoxidável tipo 316, dependendo da proporção de sua real resistência ao cisalhamento. Portanto, a espessura máxima do aço inoxidável duplex 2304 ou 2205 que pode ser cisalhada é cerca de 85% daquela para o tipo 304 ou 316. A espessura máxima dos aços inoxidáveis super duplex que pode ser cisalhada é cerca de 65% daquela dos tipos austeníticos comuns.

9.3 Corte logitudinal

Para corte de bobinas em chapas ou tiras de aços inoxidáveis duplex são utilizadas linhas de corte de tiras convencionais. O aço inoxidável em bobina é alimentado a partir de um rolo através de um eixo superior e inferior na linha de corte de tiras que contêm facas circulares e num outro rolo são rebobinadas as tiras cortadas. A posição das facas da guilhotina pode ser ajustada com base na largura desejada para as tiras cortadas. Devido à resistência maior dos aços inoxidáveis duplex, comparada à dos

aços inoxidáveis austeníticos, o desgaste da faca de corte e a consistência das bordas do corte são mais difíceis de serem controlados. Manter uma boa qualidade das bordas do corte nas bobinas de aço inoxidável duplex exige o uso de facas de aço ferramenta ou de carbonetos.

9.4 Puncionamento

O puncionamento pode ser visto como uma forma difícil de cisalhamento. A alta resistência, rápido endurecimento por deformação e resistência a rasgar tornam os aços inoxidáveis duplex relativamente difíceis de serem perfurados e abrasivos ao ferramental. A experiência nesta operação é limitada, mas a informação de que o aço inoxidável duplex irá se comportar como um aço inoxidável austenítico com o dobro de espessura oferece um bom ponto de partida para esta operação. Os aços inoxidáveis duplex mais ligados, com níveis mais elevados de nitrogênio são ainda mais difíceis.

9.5 Corte por plasma e a laser

Os aços inoxidáveis duplex são rotineiramente processados com o mesmo equipamento de corte por plasma e a laser utilizado para processar os aços inoxidáveis austeníticos. A condutividade térmica ligeiramente mais alta e o teor de enxofre tipicamente baixo nos aços inoxidáveis duplex podem afetar levemente os parâmetros ideais, mas resultados aceitáveis podem ser atingidos sem ajustes especiais. A Zona Termicamente Afetada (ZTA) do processo de corte por plasma é tipicamente estreita, cerca de 0,25 mm (0,010 polegada) porque o corte é feito rapidamente em um único passe, com rápido resfriamento da placa ou chapa. A usinagem normal de uma preparação de solda e o derretimento do metal base adjacente durante a soldagem irá remover a ZTA do processo de corte por plasma.

10 Conformação

10.1 Conformação a quente

Os aços inoxidáveis duplex apresentam excelente conformabilidade a quente com cargas relativamente baixas até pelo menos 1230°C (2250°F). Todavia, se a conformação a quente acontece em temperatura muito baixa, a deformação se acumula na ferrita mais fraca mas menos dúctil, o que pode resultar em trincamento da ferrita na região deformada. Além disso, uma grande quantidade de fase sigma pode ser precipitada quando a temperatura de trabalho é muito baixa.

A maioria dos produtores recomenda uma temperatura máxima de conformação a quente entre 1100°C (2000°F) e 1150°C (2100°F). Este limite superior da temperatura é sugerido devido ao efeito de temperaturas altas na estabilidade dimensional de uma peça e ao aumento da tendência a formação de carepa com o aumento da temperatura. Em temperaturas altas, o aço inoxidável duplex se torna mole e as peças trabalhadas como fundos de tanques ou tubulações deformam-se ou cedem no forno se elas não estiverem apoiadas. Nestas temperaturas o aço pode também se tornar muito mole para certas operações de conformação a quente. A **Tabela 9**

resume as faixas de temperatura sugeridas para a conformação a quente e as temperaturas mínimas de homogeneização. Não é necessário, mas é sempre aconselhável, começar a conformação a quente à temperatura mais alta da faixa. No entanto, o aço deve atingir pelo menos a temperatura mínima de homogeneização antes do início da conformação. O forno deve ser carregado já quente para evitar o aquecimento lento na faixa de temperaturas onde a fase sigma é formada.

A uniformidade da temperatura é importante para uma satisfatória conformação a quente do aço inoxidável duplex. Se o formato da peça não é compacto, as bordas podem ficar significativamente mais frias que o centro, e há o risco de trincas nestas regiões mais frias. Para evitar estas trincas é necessário reaquecer a peça quando estas regiões estão correndo o risco de esfriar abaixo da temperatura mínima para trabalho a quente. O limite inferior da faixa de temperatura sugerida para a conformação a quente pode ser um tanto quanto estendido, mas somente se a uniformidade da temperatura na peça, principalmente nas bordas ou seções mais finas, for mantida.

Com seções grossas, é adequado considerar se a têmpera em água é rápida o suficiente para evitar a precipitação das fases intermetálicas. Para chapa grossa, este limite de espessura é de cerca de 150 mm a 200 mm (6–8 polegadas) para chapa de 2205 forjada e de 75 mm a 125 mm (3–5 polegadas) para chapa de super duplex forjada, os limites exatos variam de acordo com a composição do aço inoxidável duplex e a eficiência do equipamento de têmpera. Para um formato cilíndrico simples, o limite do diâmetro é de cerca de 375 mm (15 polegadas). Se a peça acabada tiver um furo interno passante, o resfriamento da peça depois do recozimento final é bastante aprimorado quando este furo é usinado antes do tratamento térmico final.

10.1.1 Recozimento de solubilização

Após a conformação a quente, é necessário realizar um recozimento de solubilização completo, seguido de uma têmpera rápida para recuperar totalmente as propriedades mecânicas e a resistência à corrosão. A temperatura da peça deve ser acima da temperatura mínima de recozimento de solubilização e mantida por tempo suficiente para dissolver qualquer precipitado intermetálico.

Tabela 9: Faixa de temperaturas de conformação a quente e temperatura mínima de homogeneização para os aços inoxidáveis duplex (os tipos austeníticos comuns são incluídos para fins de comparação). Fonte: planilha do produtor

Tipo	UNS No.	EN No.	Faixa de temperatura para a conformação a quente		Temperatura mínima de homogeneização	
			°C	°F	°C	°F
	S32101	1.4162	1100 a 900	2000 a 1650	950	1750
2304	S32304	1.4362	1150 a 950	2100 a 1740	980	1800
2205	S32205	1.4462	1230 a 950	2250 a 1740	1040	1900
2507	S32750	1.4410	1230 a 1025	2250 a 1875	1050	1920
	S32520	1.4507	1230 a 1000	2250 a 1830	1080	1975
	S32760	1.4501	1230 a 1000	2250 a 1830	1100	2010
304	S30400	1.4301	1205 a 925	2200 a 1700	1040	1900
316	S31600	1.4401	1205 a 925	2200 a 1700	1040	1900

Uma dica conservadora é que o tempo de permanência na temperatura deve ser comparável ao tempo total que a peça se manteve na faixa de temperatura de 650–980°C (1200–1800°F) após o recozimento completo anterior. A peça deve ser temperada em água a partir da temperatura de solubilização. Não deve ser permitido permanecer muitos minutos na faixa de 700–1000°C (1300–1830°F) enquanto estiver sendo transferida para o local de têmpera, após este recozimento final. As temperaturas mínimas de recozimento de solubilização para os aços inoxidáveis duplex estão resumidos na **Tabela 10**.

Em temperaturas de recozimento de solubilização, os aços inoxidáveis duplex são bem moles, e há a chance de deformações e distorções se a peça não estiver adequadamente apoiada. Este pode ser um problema importante em produtos tubulares, especialmente aqueles com diâmetros grandes e paredes finas. Reformatar ou endireitar produtos duplex deformados é mais difícil que nos aços inoxidáveis austeníticos por causa da alta resistência em temperatura ambiente dos aços inoxidáveis duplex. Tentativas de minimizar esta distorção através de tempos curtos de recozimento,

aquecimento lento para alcançar a faixa de temperatura de recozimento ou o uso de uma temperatura de recozimento mais baixa que a recomendada podem não dissolver as fases intermetálicas ou podem causar a formação de quantidades adicionais de fases intermetálicas. Isto irá reduzir a resistência à corrosão e a tenacidade.

O uso de tratamento de alívio da tensões para reduzir no trabalho a frio em operações de conformação e endireitamento não é recomendado. Os aços inoxidáveis duplex apresentam de forma inerente uma resistência à corrosão sob tensão por cloretos muito boa e isto pode ser aprimorado somente marginalmente, reduzindo o trabalho a frio residual. Não há temperatura satisfatória abaixo da temperatura de recozimento de solubilização, na qual um alívio de tensões possa ser realizado sem o perigo de formação de fases intermetálicas, que irão con-sequentemente diminuir a resistência à corrosão e a tenacidade.

10.2 Conformação a morno

Às vezes é útil aquecer suavemente uma peça de metal para ajudar as operações de conformação. Todavia, o aquecimento

prolongado de aços inoxidáveis duplex acima de 315°C (600°F) pode resultar em alguma perda da tenacidade ou resistência à corrosão em temperatura ambiente, devido à fragilização a 475°C (885°F) (ver Figura 5). Em temperaturas mais elevadas, há o risco de um efeito mais rápido e nocivo a partir da precipitação das fases intermetálicas. Como estas fases não interferem no processo de conformação, é possível aquecer os aços inoxidáveis duplex para a conformação. Todavia, quando a temperatura de trabalho excede cerca de 300°C (570°F), a conformação morna deve ser seguida de um recozimento de solubilização completo e uma têmpera rápida (ver Tabela 10).

10.3 Conformação a frio

Os aços inoxidáveis duplex demonstram boa conformabilidade em uma variedade de produtos. A maioria das aplicações dos aços inoxidáveis duplex exige conformação relativamente simples, como calandrado, estampado, e conformação de corpo e fundo de tanque por estampagem ou laminação. Na maioria destas aplicações, uma preocupação importante é a alta resistência do aço inoxidável duplex e a potência dos equipamentos de conformação. Uma estimativa comum e inicial é a de que um aço inoxidável duplex irá responder à conformação de forma similar a um tipo austenítico da série 300, com o dobro de espessura. Uma comparação da força mínima necessária para iniciar a deformação plástica no dobramento é mostrada na **Figura 14** para vários aços inoxidáveis. As reduções de espessura são possíveis, usando-se os aços inoxidáveis duplex, mas as reduções serão menores que as previstas como resultado do aumento do limite de escoamento. Mesmo quando o equipamento tem potência suficiente, deve-se dar uma margem para uma recuperação elástica maior causada pela alta resistência dos tipos duplex (ver Figura 12).

A ductilidade menor dos aços inoxidáveis duplex comparada ao aço inoxidável austenítico também deve ser levada em consideração. Os tipos duplex tem um alongamento mínimo exigido na maioria

Tabela 10: Temperaturas mínimas de recozimento de solubilização para os aços inoxidáveis duplex. Fonte: planilhas do produtor e ASTM A 480

Tipo	UNS No.	Temperatura mínima de recozimento	
		°C	°F
2304	S32304	980	1800
	S32003	1010	1850
	S32001	1040	1900
	S32101	1020	1870
	S32202	980	1800
2205	S32205	1040	1900
	S32506	1020 a 1120	1870 a 2050
	S32520	1080 a 1120	1975 a 2050
255	S32550	1040	1900
2507	S32750	1025 a 1125	1880 a 2060
	S32760	1100	2010
	S82011	1010	1850

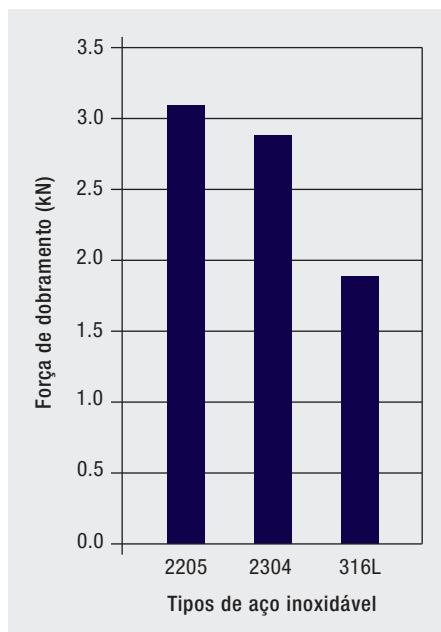


Figura 14: Força mínima necessária para começar a deformação plástica no dobramento de amostras para teste de 2304, 2205, e 316L 50 mm (2 polegadas) de largura e 2 mm (0.08 polegada) de espessura. Fonte: Outokumpu

das especificações de 15 a 30% em comparação com o mínimo de 40% de alongamento exigido para vários tipos austeníticos. Embora os alongamentos reais possam ser de certa forma maiores, a relação sugerida por estes valores mínimos é adequada e serve de guia para as operações de conformação a frio. Os tipos duplex exigem um raio de dobramento maior que os tipos austeníticos ou precisam de recozimento intermediário para uma conformação severa ou complexa, devido a sua ductilidade menor.

10.4 Conformação em prensa

Os aços inoxidáveis são facilmente conformados em prensa. Entretanto, em muitos casos o aço inoxidável duplex é utilizado como substituto otimizado de peças de aço inoxidável austenítico, aço carbono ou aço inoxidável ferrítico. A primeira tentativa é geralmente feita sem uma mudança de espessura. Enquanto que a resistência mais alta do tipo duplex justificaria uma redução de espessura, o custo de um novo projeto pode anular as vantagens de redução de custo e peso. Na maioria dos casos, reduzir a espessura

iria facilitar a conformação. No entanto, nos testes iniciais de conformação de um aço inoxidável duplex, considera-se que gera alguma “dificuldade”.

Quando a comparação é feita com a conformação de aço carbono ou aço inoxidável ferrítico, os problemas se concentram quase que inteiramente na resistência e na recuperação elástica. Os aços inoxidáveis duplex têm limite de escoamento cerca de 30 a 50% mais alto. Os aços ferríticos mostram um endurecimento por deformação limitado e a carga de trabalho pode ser relativamente baixa. Os aços inoxidáveis duplex partem de uma resistência elevada e endurecem progressivamente, e por isso a recuperação elástica será um problema. Por outro lado, a ductilidade dos aços inoxidáveis duplex é maior e um excesso de dobramento irá compensar a recuperação elástica. Além disso, em comparação com os aços ferríticos, os aços inoxidáveis duplex são menos sensíveis à direção do dobramento em relação à direção de laminação. Os aços inoxidáveis duplex apresentam alguma anisotropia das propriedades mecânicas devido à laminação da estrutura duplex, mas seu efeito prático é menor que nos aços ferríticos devido à maior ductilidade do duplex.

A conformação do aço inoxidável ferrítico tem em muitos casos a vantagem de embutimento profundo. Nesta operação uma chapa se deforma no plano da chapa com afinamento mínimo, visto que a chapa é repuxada no molde. Nos aços inoxidáveis ferríticos, este tipo de conformabilidade é muito aprimorada pelo desenvolvimento da textura metalográfica. Pouca atenção tem-se dado a este comportamento na chapa de aço inoxidável duplex, mas parece ser improvável que o mesmo grau de comportamento favorável possa ser atingido na estrutura duplex. A tecnologia de repuxo profundo para o aço inoxidável duplex tende a ser significativamente diferente das práticas de aço inoxidável ferrítico e austenítico.

No caso mais frequente, onde os aços inoxidáveis duplex são comparados aos

aços inoxidáveis austeníticos, os ajustes devem considerar a resistência mais alta e a ductilidade mais baixa dos tipos duplex. As propriedades de conformação por estiramento do aço inoxidável duplex são limitadas pela fase ferrita e não possuem o alto endurecimento do trabalho que permite aos aços inoxidáveis austeníticos serem conformados por estiramento de forma tão extensiva.

10.5 Conformação por repuxo

A resistência mecânica e à corrosão dos aços inoxidáveis duplex, especialmente a sua resistência à corrosão sob tensão na presença de cloretos, os torna candidatos para aplicações em peças rotativas como as centrífugas. A conformação por repuxo é um método econômico e frequentemente utilizado para fabricar estas peças.

A conformação por repuxo é uma operação complexa com uma dependência significativa dos equipamentos e das habilidades do operador. Os aços inoxidáveis austeníticos são regularmente conformados por repuxo, mas eles geralmente precisam de múltiplos tratamentos intermediários de recozimento para recuperar a ductilidade durante a sequência de conformação. A experiência limitada em conformação por repuxo dos aços inoxidáveis duplex indica que as cargas de trabalho são muito altas, especialmente quando não há nenhuma redução em espessura em relação aos aços inoxidáveis austeníticos. Com potência e resistência suficientes no equipamento, os tipos duplex se conformam bem, mas a ductilidade menor deles pode exigir recozimentos intermediários mais frequentes que os tipos austeníticos. A planicidade e minimização da “coroa” do blank inicial são importantes para a resposta no repuxo. Todavia, o aplainamento mecânico, por exemplo, por nivelamento com rolos, pode reduzir parte da ductilidade no primeiro estágio do repuxamento. Alguns componentes de aço inoxidável duplex foram repuxados em temperaturas acima de 650°C (1200°F) seguido de recozimento de solubilização completo.

11 Usinagem dos aços inoxidáveis duplex

Os aços inoxidáveis duplex apresentam limites de escoamento normalmente duas vezes maiores aos dos tipos austeníticos sem nitrogênio, e a taxa inicial de endurecimento em trabalho é pelo menos comparável à dos tipos austeníticos comuns. O cavaco formado quando usinamos o aço inoxidável duplex é forte e abrasivo ao ferramental, e isso acontece especialmente com os tipos duplex mais ligados. Devido ao fato dos aços inoxidáveis duplex serem produzidos com o teor de enxofre mais baixo possível, há pouco a se fazer para resolver o problema da quebra do cavaco.

Por estas razões os aços inoxidáveis duplex são tipicamente mais difíceis de serem usinados que os aços inoxidáveis austeníticos da série 300 com resistência à corrosão similar. São necessárias forças de corte mais altas e o desgaste mais rápido da ferramenta é típico da usinagem dos aços inoxidáveis duplex.

A usinabilidade mais difícil, comparada aos austeníticos, é mais evidente quando se utilizam ferramentas de carbonetos. Isto está ilustrado na **Figura 15** com uma comparação do índice relativo de usinabilidade para alguns aços inoxidáveis duplex e o Tipo 316. Observe a taxa mais alta de usinabilidade do aço inoxidável lean duplex S32101, comparado com o aço inoxidável 316.

11.1 Orientações gerais para usinagem dos aços inoxidáveis duplex

As orientações a seguir para usinagem são geralmente aplicáveis a todos os aços inoxidáveis, mas a sua importância é ainda maior no caso dos aços inoxidáveis duplex.

- Utilizar máquinas potentes e rígidas, com montagem extremamente forte e robusta das ferramentas e da peça de trabalho. (As forças de corte para

cortes similares serão normalmente mais altas para os aços inoxidáveis duplex do que para os aços inoxidáveis austeníticos correspondentes.)

- Minimizar a vibração, mantendo a extensão da ferramenta a menor possível.
- Não utilize um raio de ponta da ferramenta maior que o necessário.
- Favorecer uma geometria de borda para os carbonetos que promova uma borda “afiada” enquanto oferece resistência adequada.
- Projete sequências de usinagem de forma que a profundidade de corte esteja abaixo da camada endurecida por deformação resultante de passes anteriores.
- Usar velocidade adequada, mas não excessiva, para evitar a formação de rebarba e desgaste excessivo.
- Trocar as ferramentas ou reafia-las em intervalos programados para garantir bordas com corte preciso.

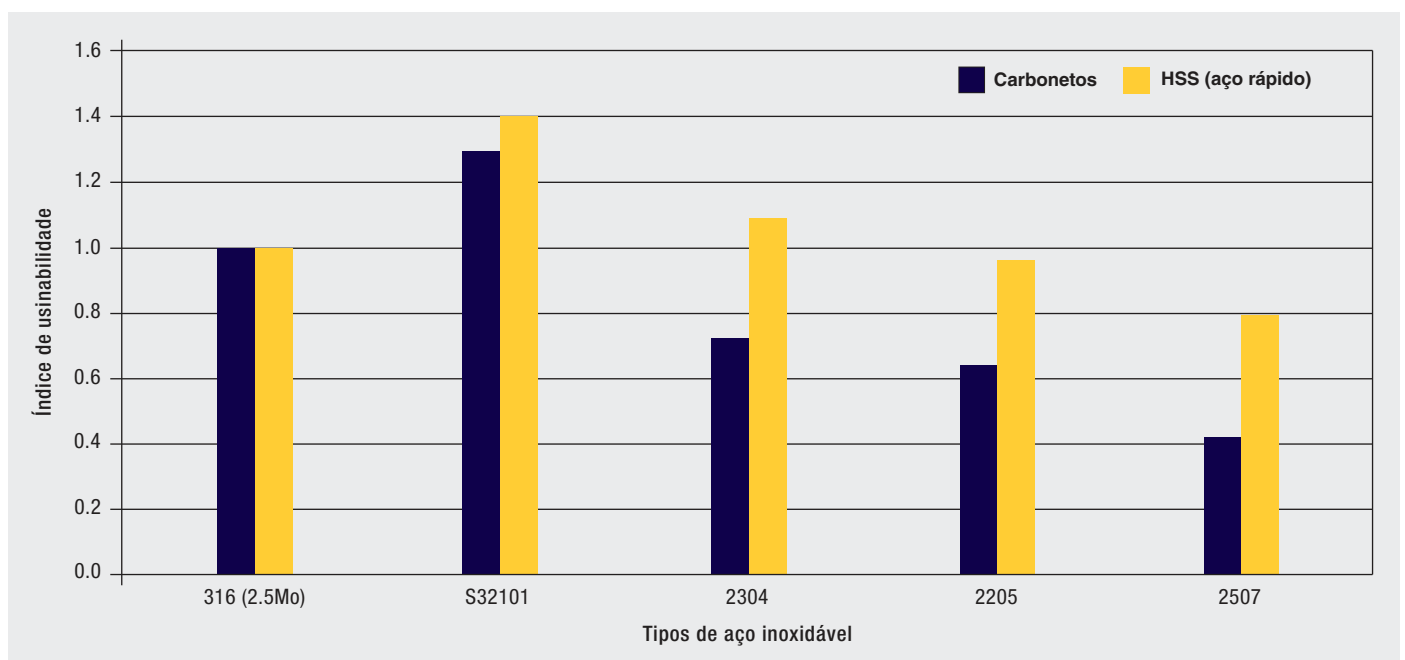


Figura 15: Usinabilidade relativa de aços inoxidáveis duplex comparada com o Tipo 316 (2.5Mo) para ferramentas de carboneto cementado e para ferramentas de aço rápido. Fonte: Outokumpu

- Usar fluxos abundantes de resfriante/lubrificante, utilizando óleos ou emulsões com aditivos de pressão extrema (EP).
- Usar componentes revestidos de carboneto com geometria de quebra de carepas positiva.

11.2 Torneamento e faceamento

As operações de tornar e facear envolvem tantas variáveis que é impossível fazer recomendações específicas que se aplicariam a todas as condições. As orientações gerais para tornar e facear são fornecidas na **Figura 16** e na **Tabela 11**. As ferramentas de carbonetos podem ser usadas nas operações de tornar e permitem velocidades mais altas que com aços rápidos. Todavia o ferramental de carbonetos exige ainda mais atenção em relação à rigidez do ferramental e da peça, e os cortes interrompidos devem ser evitados.

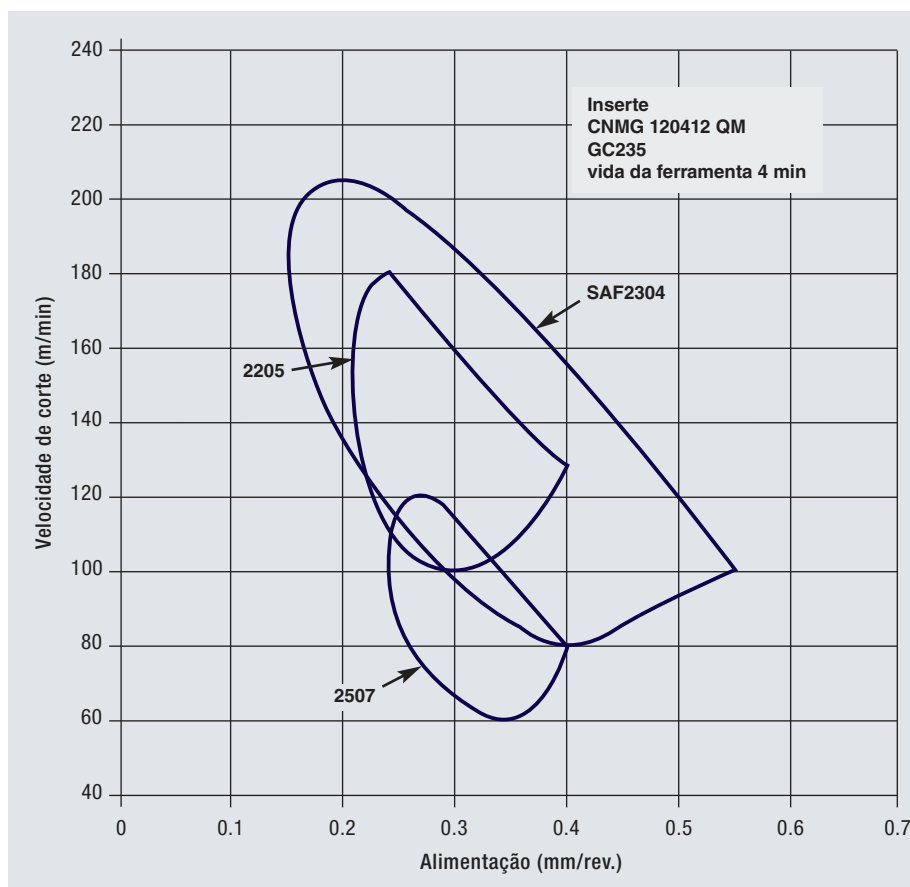
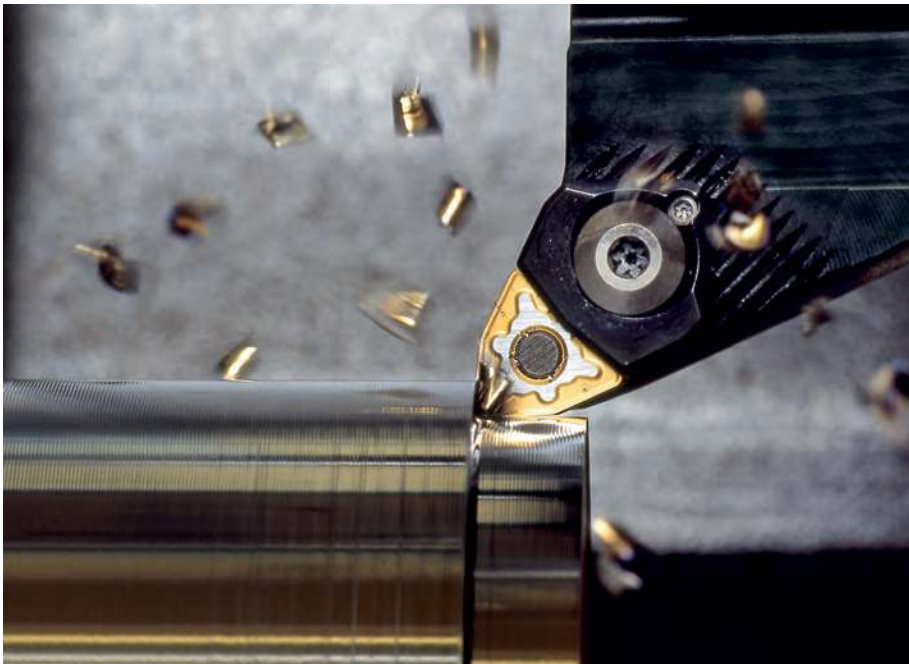


Figura 16: Comparação dos parâmetros de usinagem para torneamento de aços inoxidáveis duplex com um inserto de carboneto cementado com uma vida útil para a ferramenta de quatro minutos. Fonte: Sandvik

Tabela 11: Instruções de usinagem para facear aços inoxidáveis duplex. Fonte: Outokumpu

Aço inoxidável (ou dados de usinagem)	Carbonetos				Ferramentas de aço rápido	
	Rugosidade		Acabamento		Velocidade (m/min)	Velocidade (sfm)
	Velocidade (m/min)	Velocidade (sfm)	Velocidade (m/min)	Velocidade (sfm)		
S32101	170–240	560–790	200–280	660–925	20–30	65–100
2304	120–160	400–525	150–210	500–680	18–25	60–85
2205	90–120	300–400	120–160	400–525	15–20	50–65
2507	50–70	165–230	70–105	230–350	10–15	35–50
Alimentação (por virada)	0.3–0.6mm	0.012–0.024 in.	0.05–0.3mm	0.002–0.012 in.	0.05–0.2mm	0.002–0.008
Profundidade do corte	2–5 mm	0.080–0.200 in.	0.5–2 mm	0.020–0.080	0.5–2 mm	0.020–0.080
Tipo	2101, 2304, 2205: ISO P20-P35 (C5) Superduplex: ISO P30-P50		2101, 2304, 2205: ISO P10-P15 (C6-C7) Superduplex: ISO P25-P35		Alta qualidade	



Operação de torneamento. © Seco Tools

11.3 Fresagem com carbonetos cementados

As orientações para fresagem dos aços inoxidáveis duplex com carbonetos cementados são apresentadas na **Tabela 12**.

- Usar insertos revestidos ou um tipo tenaz de componente para o desbaste. Um inserto mais duro deve ser usado para obter um acabamento mais fino.
- Usar trepanadora com uma profundidade de cavaco média de pelo menos 0,1 mm (0.004 polegadas). Ajuste a alimentação a um fator proporcional de 1,0 to 0,7 visto que o ângulo de entrada é ampliado de 45° a 90°.
- Não usar nenhum resfriante, principalmente durante o desbaste, para obter uma boa expulsão do cavaco da ferramenta.

Tabela 12: Orientações de usinagem para fresagem dos aços inoxidáveis duplex com carbonetos cementados. Fonte: Outokumpu

Aço Inoxidável (ou dados de usinagem)	Desbaste		Acabamento	
	Velocidade (m/min)	Velocidade (sfm)	Velocidade (m/min)	Velocidade (sfm)
S32101	180–230	595–760	200–250	660–825
2304	100–130	330–425	130–150	425–525
2205	50–80	165–260	80–110	260–360
2507	30–50	100–165	50–70	165–230
Alimentação (por dente)	0.2–0.4 mm	0.008–0.016 in.	0.1–0.2 mm	0.004–0.008 in.
Profundidade de corte	2–5 mm	0.080–0.200 in.	1–2 mm	0.040–0.080 in.
Tipo de carboneto	2101, 2304, 2205: ISO P20-P40 Superduplex: ISO P25-P40		2101, 2304, 2204: ISO P10-P25 Superduplex: P20-P30	

11.4 Furação helicoidal com brocas de aço rápido

As orientações para furação helicoidal dos aços inoxidáveis duplex com brocas de aço rápido (HSS) são apresentadas nas **Tabelas 13 e 14**.

- Geometria da broca: ângulo 130°; recomenda-se geometria de ponta de broca com auto centrado e afinamento da alma para brocas de grande diâmetro.

- Resfriante; emulsão a 10% com fluxo abundante no ponto da ferramenta; para profundidade maior que 2 vezes o diâmetro, remover os cavacos periodicamente com injeção de resfriante no furo.
- Velocidades aumentadas: revestimento de TiN permite 10% de aumento; resfriante através da broca permite 10–20% de aumento.

Tabela 13: Parâmetros da furação helicoidal com aço rápido para os aços inoxidáveis duplex em unidades SI. Fonte: Outokumpu

Diâmetro da broca (mm)	Velocidade (m/min)				Alimentação (mm/rev)	
	S32101	2304	2205	2507	S32101, 2304, 2205	2507
1–3	12–37	6–10	6–8	5–8	0.05	0.04
5	12–37	10–12	10–12	9–11	0.10	0.08
10	12–37	12–15	10–12	9–11	0.20	0.15
15	12–37	12–15	10–12	9–11	0.25	0.20
20	12–37	12–15	10–12	9–11	0.30	0.25
30	12–37	12–15	10–12	9–11	0.35	0.30
40	12–37	12–15	10–12	9–11	0.41	0.35

Tabela 14: Parâmetros de perfuração helicoidal com aço rápido para os aços inoxidáveis duplex em unidades inglesas. Fonte: Outokumpu

Diâmetro da broca (in.)	Velocidade (sfm)				Alimentação (in./rev)	
	S32101	2304	2205	2507	S32101, 2304, 2205	2507
0.040–0.120	40–120	20–33	20–25	16–25	0.002	0.0015
0.20	40–120	33–40	33–40	30–36	0.004	0.003
0.40	40–120	40–50	33–40	30–36	0.008	0.006
0.60	40–120	40–50	33–40	30–36	0.010	0.008
0.80	40–120	40–50	33–40	30–36	0.012	0.010
1.20	40–120	40–50	33–40	30–36	0.014	0.012
1.60	40–120	40–50	33–40	30–36	0.016	0.014

12 Soldagem de aços inoxidáveis duplex

12.1 Orientações gerais de soldagem

12.1.1 Diferenças entre os aços inoxidáveis duplex e austeníticos

Quando há problemas com a soldagem dos aços inoxidáveis austeníticos, os problemas são mais frequentemente associados ao próprio metal de solda, especialmente a tendência de ocorrerem trincas a quente em uma solidificação completa ou predominantemente austenítica. Para os aços inoxidáveis austeníticos mais comuns, ajustar a composição do metal de adição para oferecer um teor significativo de ferrita minimiza estes problemas. Para os aços inoxidáveis austeníticos mais ligados onde o uso de um metal de adição com base de níquel é necessário e a solidificação austenítica não pode ser evitada, o problema é contornado com aporte de calor baixo, geralmente exigindo vários passes para completar a soldagem.

Os aços inoxidáveis duplex têm muito boa resistência a trincas a quente devido ao alto teor de ferrita e por isso a ocorrência de trincas raramente é uma consideração a ser feita quando soldamos estes aços. Os problemas de maior preocupação com os aços inoxidáveis duplex estão associados à Zona Termicamente Afetada (ZTA), e não com o metal de adição. Os problemas da ZTA são perda de resistência à corrosão, tenacidade, ou trincas pós-soldagem. Para evitar estes problemas, o procedimento de soldagem deve ter como foco minimizar o tempo total na temperatura da faixa de “vermelho vivo” mais do que com o aporte de calor de cada passe. A experiência prova que esta abordagem pode levar a procedimentos que são técnica e economicamente viáveis.

Com esta introdução em mente, é possível dar algumas orientações gerais para a soldagem dos aços inoxidáveis duplex e em seguida aplicar este contexto e estas orientações em métodos de soldagem específicos.

12.1.2 Seleção do material de partida

A resposta dos aços inoxidáveis duplex à soldagem pode ser alterada significativamente pelas variações químicas ou no processamento. A importância do metal de base conter nitrogênio suficiente tem sido repetidamente enfatizada. Se o material de partida é resfriado lentamente na faixa de 700 a 1000°C (1300 to 1800°F), ou é resfriado ao ar nesta faixa por um minuto antes da têmpera em água, estas ações consomem parte do tempo que tem o soldador para completar a soldagem sem que ocorram reações de precipitação prejudiciais. É importante que a condição metalúrgica do material usado no trabalho seja da mesma qualidade, no que se refere à composição e prática de produção, que o material usado para qualificar o procedimento de solda. A seleção da composição e a especificação de ensaios adequados para o material de partida são apresentadas na seção sobre especificação do usuário final e controle de qualidade (Seção 6).

12.1.3 Limpeza antes da soldagem

A prática de limpar antes da soldagem todas as regiões que serão aquecidas se aplica não somente aos aços inoxidáveis duplex, mas a todos os aços inoxidáveis. As composições químicas do metal base e do metal de adição foram desenvolvidas assumindo-se que não há fontes adicionais de contaminação. Sujeira, graxa, óleo, tinta ou fontes de umidade de qualquer tipo irão interferir nas operações de

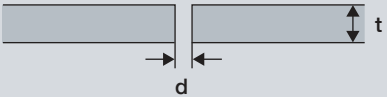
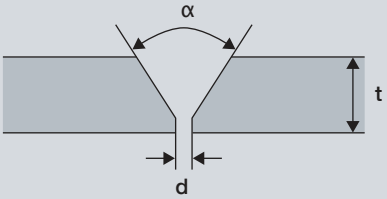
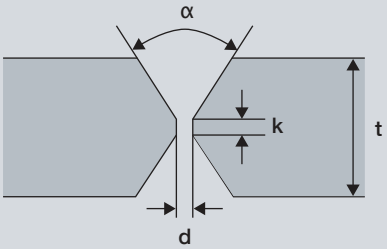
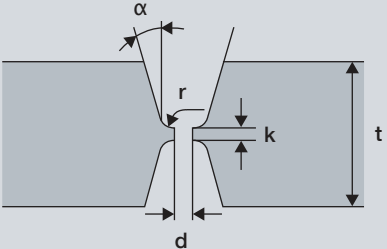
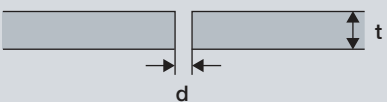
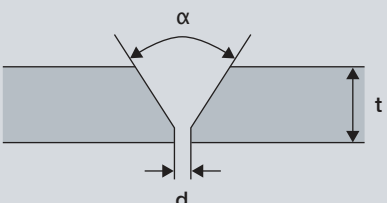
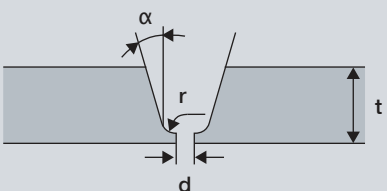
soldagem e afetar de forma negativa a resistência à corrosão e as propriedades mecânicas da solda. Nenhuma qualificação de procedimento será eficaz se o material não for completamente limpo antes da solda.

12.1.4 Projeto da junta

Para os aços inoxidáveis duplex, o projeto da junta deve facilitar a penetração completa e evitar metal de base não diluído no metal de solda solidificado. É melhor usar ao invés de esmerilhar a preparação da borda de solda para proporcionar uniformidade da espessura e espaço entre as peças. Quando há necessidade de se efetuar o esmerilhamento, atenção especial deve ser dada à uniformidade da preparação da solda e à montagem. Qualquer rebarba de esmerilhamento deve ser removida para manter uma fusão e penetração completa. Com um aço inoxidável austenítico, um soldador experiente consegue superar algumas deficiências na preparação da junta, manipulando a tocha. Com o aço inoxidável duplex, algumas destas técnicas podem causar uma exposição mais longa que a esperada na faixa de temperatura prejudicial, levando a resultados diferentes daqueles do procedimento qualificado.

Alguns projetos de junta usados com os aços inoxidáveis duplex estão ilustrados na **Figura 17**. Outros projetos são possíveis, contanto que eles assegurem soldas de penetração completa e minimizem o risco de perfuração com vazamento.

Figura 17: Exemplos de projetos de junta utilizados com os aços inoxidáveis duplex. Fonte: ArcelorMittal

Projeto de junta	Processo	Espessura t (mm)	Abertura da raiz d (mm)	Raiz k (mm)	Ângulo do chanfro α (°)
	GTAW	3-5	1-3	-	-
	GMAW	3-6	1-3	-	-
	SMAW	3-4	1-3	-	-
	SMAW	4-15	1-3	1-2	55-65
	GTAW	3-8	1-3	1-2	60-70
	GMAW	5-12	1-3	1-2	60-70
	SAW	9-12	0	5	80
	SMAW	>10	1.5-3	1-3	55-65
	GMAW	>10	1.5-3	1-3	60-70
	SAW	>10	0	3-5	90
	SMAW	> 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	3-15	2-3	1-2	60-70
	GTAW	2.5-8	2-3	1-2	60-70
	GMAW	3-12	2-3	1-2	60-70
	SAW	4-12	2-3	1-2	70-80
	SMAW	12-60	1-2	2-3	10-15
	GTAW	> 8	1-2	1-2	10-15
	GMAW	>12	1-2	2-3	10-15
	SAW	>10	1-2	1-3	10-15



Reator de deslignificação com oxigênio fabricado com 2205, Enterprise Steel Fab, Kalowna, Prince George, British Columbia, Canadá. © Outokumpu

12.1.5 Pré-aquecimento

Como regra geral, o pré-aquecimento não é recomendado porque ele pode ser prejudicial. Ele não deve ser parte do procedimento, a menos que haja uma justificativa específica. O pré-aquecimento pode ser benéfico quando utilizado para eliminar a umidade do aço, como pode ocorrer em condições de ambiente frio ou devido à condensação durante a noite. Quando pré-aquecer para lidar com a umidade, o aço deve ser aquecido a cerca de 100°C (210°F) de forma uniforme e somente depois que a preparação de solda for limpa.

12.1.6 Aporte térmico e temperatura de interpasse

Os aços inoxidáveis duplex podem tolerar entradas de calor relativamente altas. A estrutura de solidificação duplex do metal de solda é mais resistente a trincas a quente, que os metais de solda austeníticos. Os aços inoxidáveis duplex, com condutividade térmica mais alta e menor coeficiente de expansão térmica, não apresentam a mesma alta intensidade de tensões térmicas locais nas soldas que os aços inoxidáveis austeníticos. Embora seja necessário limitar a severidade da rigidez da solda, o trincamento a quente não é um problema habitual.

Um aporte térmico excessivamente baixo pode resultar em zonas de fusão

e ZTAs com excesso de ferrita, com correspondente perda de tenacidade e resistência à corrosão. O aporte térmico excessivamente alto aumenta o perigo de formação de fases intermetálicas. Para evitar problemas na ZTA, o procedimento de solda deve permitir resfriamento rápido desta região após a soldagem. A temperatura da peça é importante porque afeta sensivelmente o resfriamento da ZTA. Como regra geral, a temperatura máxima de interpasse está limitada a 150°C (300°F) para aços inoxidáveis lean duplex e padrão e 100°C (210°F) para os aços inoxidáveis super duplex. Esta limitação deve ser imposta na qualificação do procedimento de solda, e a soldagem na produção deve ser monitorada para garantir que a temperatura interpasse não seja mais alta que a usada para a qualificação. Sondagens de temperatura eletrônicas e termopares são os instrumentos preferidos para monitorar a temperatura de interpasse. Não seria prudente na qualificação do procedimento de soldagem permitir que um corpo de prova para uma solda multipasses chegue a uma temperatura de interpasse mais baixa daquela que pode ser razoavelmente ou economicamente atingida durante o trabalho real. Quando um grande volume de solda é realizado, deve-se planejar a soldagem para que haja tempo suficiente para o resfriamento entre passes do ponto de vista de qualidade e econômico.

12.1.7 Tratamento térmico após a soldagem

O alívio da tensão pós-solda não é necessário para os aços inoxidáveis duplex e tende a ser prejudicial porque o tratamento térmico pode precipitar as fases intermetálicas ou a fragilização alfa linha (475°C/885°F) causando perda de tenacidade e resistência à corrosão. As temperaturas do tratamento térmico pós-solda acima de 315°C (600°F) podem afetar negativamente a tenacidade e a resistência à corrosão dos aços inoxidáveis duplex.

Qualquer tratamento térmico pós-solda deve incluir um recozimento completo seguido de têmpera em água (ver Tabela 10). Um recozimento completo de solubilização deve ser considerado após a soldagem autógena, visto que a microestrutura será altamente ferrítica se um metal de adição com alta liga não é usado durante a soldagem.

Se houver um recozimento de solubilização e têmpera completos após a soldagem, por exemplo na produção de um acessório, este tratamento térmico deve ser considerado uma parte do procedimento de soldagem. O tratamento de recozimento pode eliminar os problemas associados ao excesso de ferrita e fases intermetálicas, e o processo de fabricação pode tolerar algumas destas condições menos desejáveis como um estado intermediário antes do recozimento final.

12.1.8 Equilíbrio de fases desejável

O equilíbrio de fases dos aços inoxidáveis duplex é geralmente considerado como sendo "50-50;" quantidades iguais de austenita e ferrita. Todavia, isto não é totalmente verdadeiro porque os aços inoxidáveis duplex modernos são equilibrados para ter 40 – 50% de ferrita com o resto sendo austenita. É geralmente aceito que os benefícios característicos dos aços inoxidáveis duplex são atingidos quando há pelo menos 25% de ferrita e o resto de austenita. Em alguns dos processos de soldagem, principalmente aqueles com fluxo de proteção, o equilíbrio da fases foi ajustado para mais

austenita, a fim de melhorar a tenacidade, compensando a perda desta propriedade associada ao pickup de oxigênio do fluxo. A tenacidade destes metais de adição fica bem abaixo dos valores altos que são possíveis para uma chapa ou tubo recozido, mas a tenacidade do metal de solda pode ainda ser adequado para o serviço pretendido. Nenhum dos métodos de soldagem irá produzir tenacidade tão alta quanto aquela alcançada no produto forjado totalmente recozido. Restringir o teor de ferrita do metal de solda para mais que o mínimo exigido para o aço inoxidável duplex recozido pode resultar em uma limitação desnecessária sobre os métodos de soldagem aplicáveis.

O equilíbrio de fases na ZTA, partindo de chapa trabalhada ou tubo com um ciclo térmico adicional, é geralmente um pouco mais ferrítica que o material original. É quase impossível realizar uma determinação metalográfica precisa do equilíbrio da fases na ZTA. Se esta região é altamente ferrítica, isso pode ser indicativo de uma não usual têmpera extremamente rápida que leva a um excesso de ferrita e perda de tenacidade.

Tabela 15: Consumíveis de soldagem usados para a soldagem de metais diferentes

	2304, S32101, S32202, S82011	2205 S32003, S82441	25% Cr Duplex Superduplex
2304 S32101 S32202 S82011	23Cr-7Ni-N E2209 E309L	E2209	E2209
2205 S32003	E2209	E2209	25Cr-10Ni-4Mo-N
25% Cr duplex Superduplex	E2209	25Cr-10Ni-4Mo-N	25Cr-10Ni-4Mo-N
304	E309L E309LMo E2209	E309LMo E2209	E309LMo E2209
316	E309LMo E2209	E309LMo E2209	E309LMo E2209
Aço carbono Aço de baixa liga	E309L E309LMo E2209	E309L E309LMo E2209	E309L E309LMo E2209



Estrutura metalográfica do metal de solda duplex 2205, 500x. © Lincoln Smitweld bv

12.1.9 Soldagem de metais diferentes

Os aços inoxidáveis duplex podem ser soldados a outros aços inoxidáveis duplex, aos aços inoxidáveis austeníticos e ao aço carbono e de baixa liga.

Os metais de adição do aço inoxidável duplex com alto teor de níquel em relação ao metal base são frequentemente utilizados para soldar os aços inoxidáveis

duplex a outros tipos de duplex. O teor maior de níquel do metal de adição garante que um nível adequado de austenita seja formada na solda durante o resfriamento.

Quando são soldados aos tipos austeníticos, normalmente são utilizados metais de adição austeníticos com baixo teor de carbono e molibdênio intermediário entre os dos aços; AWS E309LMo/ER309LMo é frequentemente utilizado para estas uniões. O mesmo metal de adição, ou o AWS E309L/ER309L, é comumente utilizado para ligar os aços inoxidáveis duplex aos aços carbono e de baixa liga. Se os metais de adição a base de níquel são usados, eles devem ser isentos de nióbio (columbium). Como os aços inoxidáveis austeníticos apresentam menor resistência que os tipos duplex, as juntas soldadas feitas com metais de adição austeníticos não serão tão fortes como o metal base duplex.

A Tabela 15 resume os metais de adição frequentemente usados para soldar os aços inoxidáveis duplex a metais diferentes. Estes exemplos mostram a designação de eletrodo AWS (E), mas dependendo do processo, da geometria da junta e outras considerações, arame não revestidos AWS designação (ER) e arames tubulares podem ser considerados.

12.2 Qualificação do procedimento de soldagem

Com os aços inoxidáveis austeníticos padrão, o ensaio de qualificação habituais para os procedimentos de soldagem são relativamente simples, são necessários somente alguns ensaios, o material a soldar, metal de adição e o procedimento de soldagem. Com os ensaios de dureza e ensaios de dobramento (para avaliar a martensita e o trincamento a quente, respectivamente), estes ensaios de qualificação refletem a longa experiência para o que pode acontecer de errado com os aços ferríticos, martensíticos ou austeníticos. Os aços inoxidáveis duplex não tendem a apresentar dificuldades nestas exigências, mas não há muitas chances destes ensaios apontarem fases intermetálicas ou ferrita em excesso, que seriam problemas possíveis com os aços inoxidáveis duplex. Além disso, devido à necessidade de limitar o tempo total na temperatura da ZTA, as propriedades dos tipos duplex serão sensíveis à espessura da seção e detalhes da prática de soldagem. Portanto, a “qualificação” deve ser considerada de forma mais ampla, ou seja, uma

demonstração de que os procedimentos de soldagem que serão aplicados durante o trabalho não irão produzir uma perda inaceitável de propriedades, especialmente tenacidade e resistência à corrosão.

Seria conveniente qualificar o procedimento de soldagem a cada espessura e geometria da soldagem porque pequenas diferenças na configuração podem afetar os resultados alcançados na produção. Todavia, a natureza complexa das construções atuais torna estes ensaios muito caros. É possível economizar, qualificando os procedimentos (definidos pela espessura da seção, metal de adição e processo de soldagem) nas condições mais exigentes para o aço inoxidável duplex.

12.3 Processos de soldagem

Os aços inoxidáveis duplex de segunda geração tiveram um desenvolvimento comercial significativo no início dos anos 80 do século XX. Com uma compreensão limitada sobre o papel do nitrogênio no controle da estabilidade de fases, as primeiras opiniões sobre a soldagem

tinham como foco limitar o aporte térmico. Com tais limitações sérias sobre o aporte térmico, muitos dos processos mais econômicos de soldagem com altas taxas de deposição, como a soldagem a arco submerso, eram considerados inadequados para os aços inoxidáveis duplex. Entretanto, as propriedades dos aços inoxidáveis duplex são tão desejáveis que muitos esforços foram feitos para poder utilizar os processos mais econômicos. O resultado foi que praticamente todos os processos de soldagem, exceto o oxiacetileno devido à contaminação por de carbono da solda, são agora aplicáveis aos aços inoxidáveis duplex.

12.3.1 Processo de soldagem a arco com eletrodo de tungstênio (GTAW/TIG)

A soldagem a arco com gas inerte e eletrodo de tungstênio (GTAW), também conhecida como solda TIG, é especialmente útil para cordões curtos de soldagem manual. Ela pode ser automatizada para geometrias simples, mas geralmente não é economicamente viável como principal procedimento em equipamentos de grandes dimensões com muitas soldas. Visto que muitos trabalhos irão necessitar de algumas soldas TIG mesmo quando um outro procedimento é o principal procedimento de soldagem, considera-se geralmente adequado qualificar os procedimentos GTAW para os reparos ou acabamentos locais.

Equipamentos

A solda TIG é melhor realizada com uma fonte de energia de corrente constante, com circuito de alta frequência para ajudar a iniciar o arco. A soldagem TIG deve ser realizada com corrente contínua polaridade direta (CCPD), eletrodo negativo. O uso de corrente contínua polaridade invertida (CCPI) provocará a deterioração do eletrodo.

O eletrodo deve ser de tungstênio forjado a 2% (especificação AWS 5.12 Classificação EWTh-2). Para facilitar o controle do arco a ponta do eletrodo é retificada de forma cônica com ângulo de 30 a 60 graus, e com uma pequena parte



Equipamentos de recuperação de petróleo aprimorados em aço inoxidável 2507. © Aquatech



Soldagem mecanizada de uma tubulação de aço inoxidável duplex de grande diâmetro.
© Arco Exploration and Production Technology

plana na extremidade. O ângulo do vértice ideal para atingir a penetração na solda TIG automática deve ser determinado através de ensaios na produção real.

Metais de adição

A maioria dos metais de adição para a soldagem do aço inoxidável duplex é descrita como “coincidentes”, mas normalmente eles são super ligados com níquel em relação aos produtos trabalhados, com os quais deveriam coincidir. Geralmente há cerca de 2–4% mais níquel que no produto transformado. O teor de nitrogênio é geralmente um pouco menor no metal de adição do que no metal base. É geralmente aceito que os metais de adição de solda do aço inoxidável duplex com alta liga são adequados para a soldagem de produtos de aço inoxidável duplex menos ligados. Há relatos de que os metais de adição “coincidentes” apresentam resultados aceitáveis quando unem aços inoxidáveis duplex aos aços inoxidáveis austeníticos ou aos aços carbono e ligados.

Proteção

Na solda TIG, assim como em todos os processos de soldagem com proteção de gás, é essencial que a poça de fusão

seja protegida contra a oxidação e contaminação atmosféricas. Esta proteção é frequentemente alcançada com gás inerte, argônio, um tipo de solda seca com pureza superior a 99,5% de argônio. É importante que o sistema de manuseio do gás seja limpo, seco e livre de vazamentos, e que as condições de fluxo sejam ajustadas para oferecer cobertura adequada, assim como deve-se evitar turbulências e aspiração de ar no gás de proteção. O fluxo de gás deve ser iniciado vários segundos antes da abertura do arco, e deve ser mantido por vários segundos após o arco ser extinguido, idealmente bem depois para que a solda e a ZTA se resfriem abaixo da faixa de oxidação do aço inoxidável. Para proteção do eletrodo, as taxas de fluxo sugeridas são 12–18 l/min (0.4–0.6 cfm) quando usamos uma tela difusora de gás normal (lentes de gás), e com metade daquela taxa exigida para um bico de gás normal.

As taxas de fluxo de gás de purga (também argônio puro) depende do volume da raiz, mas deve ser suficiente para garantir a descarga completa de ar e a proteção total da solda, indicado pela ausência de coloração térmica. Como o argônio é mais pesado que o ar, a alimentação deve ser do fundo para o topo do volume fechado, com purga mínima de sete vezes o volume.

Soldas satisfatórias são obtidas com argônio puro, mas outras melhorias são possíveis. A adição de até 3% de nitrogênio seco irá ajudar na retenção de nitrogênio no metal de solda, principalmente dos aços inoxidáveis duplex altamente ligados. Enquanto que a adição de nitrogênio mostrou aumentar o desgaste do eletrodo, a adição de hélio compensa parcialmente este efeito. Adições de oxigênio e dióxido de carbono ao gás de proteção devem ser evitadas porque elas reduzem a resistência à corrosão da solda. O hidrogênio não deve ser usado no gás de proteção ou de purga por causa da possibilidade de fragilização ou trincamento por hidrogênio da fase ferrita nos aços inoxidáveis duplex.

O sistema de manuseio do gás e o sistema de resfriamento com água, se a

tocha estiver assim equipada, deve ser inspecionado regularmente para garantir que a natureza seca e limpa do gás seja preservada.

Técnica e parâmetros

Com os aços inoxidáveis duplex, é especialmente importante estabelecer uma boa e consistente preparação da borda, alinhamento e abertura da raiz. Enquanto que os aços inoxidáveis austeníticos podem aceitar algum uso de técnica de soldagem para superar as deficiências nestas áreas, com os aços inoxidáveis duplex existe o risco do tempo de exposição na temperatura quando estas técnicas são usadas. Recomenda-se evitar cobre-juntas, se possível, porque os aços inoxidáveis duplex são sensíveis à contaminação superficial por cobre.

Qualquer abertura do arco fora da zona de soldagem irá criar pontos locais de soldagem autógena com altas velocidades de têmpera, resultando em altos teores locais de ferrita e possível perda de resistência à corrosão nestes pontos. As aberturas do arco devem ser feitas na própria junta de solda para evitar este problema.

Os pontos de solda devem ser feitos com proteção total de gás. Não deve haver pontos de solda no início do passe de raiz. Idealmente, para evitar trincas no passe de raiz associadas com pontos de solda, a solda dura deve ser interrompida e o ponto de solda deve ser eliminado por esmerilhamento, ou esmerilhar parcialmente o ponto de solda antes do passe de raiz. A abertura da raiz deve ser cuidadosamente mantida para garantir um aporte térmico e diluição consistentes no passe de raiz. O início e fim do passe de raiz deve ser esmerilhado antes dos passes de preenchimento. A peça de trabalho deve poder resfriar entre passes abaixo de 150°C (300°F) para os aços inoxidáveis duplex padrão e abaixo de 100°C (210°F) para os aços inoxidáveis super duplex, a fim de promover o resfriamento adequado da ZTA nos passes subsequentes.

Na solda TIG, o metal de adição mais comumente utilizado para ligar o aço inoxidável duplex é o de aporte “coincidente,” com adição de níquel. Os metais de aporte coincidentes também tem sido usados de forma satisfatória para soldar aços inoxidáveis duplex de alta liga, como o super duplex 2205. Tamanhos de arame de 1,6, 2,4 e 3,2 mm (1/16, 3/32, e 1/8 pol) de diâmetro são comumente usados. O arame de aporte deve ser limpo e seco e deve ser armazenado em um recipiente fechado até o momento do uso. Resultados melhores são obtidos quando a solda é feita na posição horizontal. A tocha deve ser mantida o mais próximo possível da posição vertical para minimizar a aspiração de ar no gás de proteção.

Há uma grande liberdade na escolha do aporte térmico para trabalhar com uma série de espessuras de material e projetos de junta. O aporte térmico fica geralmente na faixa de 0,5–2,5 kJ/mm (15–65 kJ/inch), calculado na seguinte fórmula:

$$\text{Aporte Térmico (kJ/mm)} = (V \times A) / (S \times 1000)$$

onde V = voltagem (volts)
A = corrente (amperes)
S = velocidade (mm/s)

ou

$$\text{Aporte Térmico (kJ/inch)} = (V \times A \times 6) / (S \times 100)$$

onde V = voltagem (volts)
A = corrente (amperes)
S = velocidade (in/min)

Recomendações gerais para o aporte térmico:

2304*: 0.5–2.0 kJ/mm (15–50 kJ/in)
2205: 0.5–2.5 kJ/mm (15–65 kJ/in)
2507: 0.3–1.5 kJ/mm (8–38 kJ/in)

* ou lean duplex

A soldagem TIG, quando realizada com boa proteção e controle adequado do tempo e temperatura, promove uma solda de boa tenacidade e resistência à corrosão, além de ser versátil nas diversas situações para as quais ela pode ser usada. Esta solda é geralmente utilizada para complementar e finalizar



Caminhão cisterna para transporte de asfalto de aço inoxidável lean duplex. © Outokumpu

construções maiores, montadas com o uso de outros métodos de soldagem. É importante que os procedimentos TIG sejam qualificados considerando a variedade de situações nas quais ela pode ser utilizada.

12.3.2 Processo de soldagem a arco e eletrodo consumível (GMAW/MIG)

A soldagem a arco elétrico com gás de proteção (GMAW), denominada soldagem de metal com gás inerte (MIG), é particularmente útil para cordões de solda longos com baixo custo, quando são depositados volumes relativamente grandes de metal de solda. Ela pode ser automatizada para geometrias simples. A GMAW é geralmente utilizada para cordões de solda mais longos e em seguida complementada com a solda TIG para um melhor controle durante as operações de acabamento complexas.

Equipamentos

A GMAW exige equipamento especializado, incluindo um fornecimento constante de voltagem com controle de inclinação e de indutância variáveis ou com corrente de arco pulsado. A GMAW deve ser realizada com corrente contínua de polaridade invertida (CCPI),

electrodo positivo. Existem três modos de transferência de arco possíveis com a GMAW.

Transferência por curto circuito

Este modo, que exige controle de rampa e de indutância secundária independentes, é útil para materiais de até cerca de 3 mm (1/8 pol) de espessura. Este modo oferece o menor aporte térmico para a GMAW e é particularmente útil para seções finas, nas quais há o risco de distorções com um aporte térmico mais alto. Ela pode ser utilizada para a soldagem fora de posição.

Transferência por arco pulsado

Este modo exige duas fontes de energia para oferecer as duas faixas de saída, com a troca de fontes oferecendo o pulso. A transferência de metal é alta durante a faixa de transferência por jato, mas menor na faixa globular. Esta combinação oferece o benefício de taxas de deposição de metal mais altas enquanto que ainda restringe o aporte térmico.

Transferência por jato

Este modo oferece altas taxas de deposição com um arco estável, mas ele também ocorre com alto aporte térmico. Ele é geralmente limitado à soldagem na

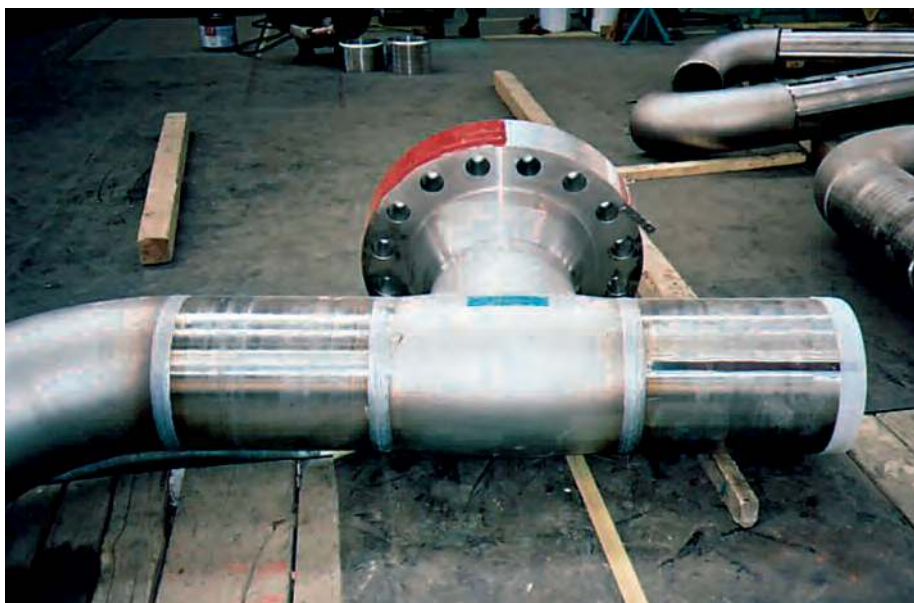
posição horizontal. É econômico quando há cordões de solda longos e retos, com aportes razoavelmente grandes.

Metais de adição

A GMAW utiliza um eletrodo consumível na forma de um arame contínuo alimentado através da tocha por um sistema de alimentação automático. Os metais de adição para a GMAW dos aços inoxidáveis duplex são composições “coincidentes” com alto teor de níquel para atingir o equilíbrio de fases desejado e as propriedades na condição de soldado.

Proteção

A seleção de gás de proteção para a GMAW é algo mais complexo que para a GTAW, e depende de forma significativa se o fabricante utiliza misturas de gás comerciais ou se ele tem capacidade de misturar gases em suas instalações. Os gases de proteção da GMAW vão do argônio puro e misturas de cerca de 80% de argônio com hélio, nitrogênio e oxigênio, selecionadas para otimizar a soldabilidade e as propriedades finais da estrutura soldada. As taxas de fluxo dependem do modo de transferência, velocidade de trabalho e diâmetro do arame, mas ficam geralmente na faixa de 12–16 l/min (0.4–0.6 cfm) para arames de diâmetro de 1 a 1.6 mm (0.035 a 0.063 polegada). Deve-se evitar excesso de arame aparente para permitir que a



Peça em T flangeada em 2205. © Arco Exploration and Production Technology

proteção seja mantida durante toda a soldagem. Como observado para a GTAW, a integridade do sistema de manuseio do gás é essencial, e cuidados devem ser tomados contra a aspiração de ar no gás de proteção. Como a soldagem é feita com cordões mais longos, a proteção contra as correntes de ar é importante para manter a qualidade da solda. O hidrogênio não deve ser usado no gás de proteção ou de purga por causa da possi-

bilidade de fragilização ou trincamento por hidrogênio da fase ferrita nos aços inoxidáveis duplex.

Técnicas e parâmetros

Os parâmetros normais de soldagem para transferência a arco de curto circuito e para a transferência a jato estão resumidas na **Tabela 16**.

Assim como a GTAW dos aços inoxidáveis duplex, a GMAW exige preparação consistente da borda, alinhamento e abertura da raiz. As cobre-juntas devem ser evitadas se possível porque os aços inoxidáveis duplex são sensíveis à contaminação da superfície por cobre e as cobre-juntas podem causar têmpera muito rápida em algumas situações.

Qualquer abertura do arco fora da zona de soldagem irá criar pontos locais de soldagem autógena com altas velocidades de têmpera, resultando em alto teor local de ferrita e possível perda de resistência à corrosão nestes pontos. As aberturas do arco devem ser feitas na própria junta da solda para evitar este problema. Qualquer jato do arco fora da zona de solda deve ser removido através do esmerilhamento fino.

Tabela 16: Parâmetros da Soldagem por arco com gás (GMAW) com transferência gçobular e por jato para aços inoxidáveis duplex com vários tamanhos de arame. Fonte: Avesta Welding

Transferência por curto circuito			
Diâmetro do arame		Corrente	Voltagem
mm	Inch	A	V
1.0	0.035	90–120	19–21
1.2	0.045	110–140	20–22
Transferência por jato			
1.0	0.035	170 – 200	25–28
1.2	0.045	210 – 280	26–29
1.6	0.063	270 – 330	27–30



Soldagem automatizada de tubulação em aço inoxidável duplex de grande diâmetro na montanha norte de Alaska. © Arco Exploration and Production Technology

Os pontos de solda de posicionamento devem ser feitos com proteção total de gás. Não deve haver ponto de solda no ponto de partida do passe de raiz. Idealmente, para evitar trincas no passe de raiz associadas com ponto de solda, a solda do passe de raiz deve ser interrompida e o ponto de solda deve ser esmerilhado, ou o ponto pode ser parcialmente esmerilhado antes do passe de raiz. A largura da abertura da raiz deve ser cuidadosamente mantida para garantir um aporte térmico e diluição consistentes no passe de raiz. O início e término do passe de raiz devem ser esmerilhados antes do começo dos passes de preenchimento. A peça deve poder resfriar abaixo de 150°C (300°F) entre os passes, a fim de promover o resfriamento adequado da ZTA nos passes subsequentes.

Arares de 1,6, 2,4 e 3,2 mm (1/16, 3/32, e 1/8 pol) de diâmetro são comumente usados. O arame de aporte deve ser limpo e seco e deve ser armazenado em um recipiente fechado até o momento do uso. Resultados melhores são obtidos quando a solda é feita na posição horizontal. A tocha deve ser mantida o mais próximo possível da posição vertical para minimizar a aspiração de ar no gás de proteção.

12.3.3 Soldagem a arco com arame tubular (FCW)

A soldagem a arco com arame tubular é um dos mais recentes desenvolvimentos comerciais para os aços inoxidáveis duplex. Seu sucesso demonstra o alcance e a rapidez com que se desenvolve a tecnologia dos aços inoxidáveis duplex. Na FCW, o arame preenchido com fundentes é alimentado automaticamente através da tocha, usando o mesmo equipamento comumente usado para a GMAW. O pó dentro do arame oferece alguns dos elementos de liga do metal de solda e a escória protege a solda da atmosfera, colaborando com o gás de proteção na proteção da ZTA. A FCW é econômica porque oferece taxas de deposição altas e é adequada para a soldagem em todas as posições e para uma grande variedade de espessuras.

Equipamentos

A soldagem a arco com arame tubular é realizada com o mesmo equipamento usado para a GMAW.

Metais de adição

Como os processos de soldagem com proteção com fundentes tendem a produzir soldas com uma tenacidade um tanto reduzida, provavelmente devido

ao maior teor de oxigênio no metal de solda, o metal de adição da FCW tem alto teor de níquel para que o metal de solda seja mais austenítico que a estrutura quase equilibrada do metal de base. Como a composição dos fluxos e a produção de arame FCW são patenteados, pode haver diferenças significativas entre os metais de adição FCW de diferentes fornecedores. É importante que a soldagem de produção através da FCW utilize arame da mesma fonte que a utilizada na qualificação dos procedimentos para evitar variações na produção.

Proteção

Os gases de proteção mais comumente utilizados para a FCW são 80% argônio-20% dióxido de carbono e 100% dióxido de carbono para posições de solda horizontal e vertical, respectivamente. A vazão de fluxo para cada gás ou posição é 20–25 l/min (0.7–0.9 cfm). O controle do prolongamento do arame é importante para limitar a absorção de carbono, especialmente se 100% de dióxido de carbono é utilizado.

Técnicas e parâmetros

Para o arame com diâmetro de 1,2 mm (0.045 inch), os ajustes de corrente e voltagem típicos são 150–200 A a 22–38 V e 60–110 A a 20–24 V, para soldagem horizontal e vertical, respectivamente. As demais recomendações sobre técnicas de soldagem para a FCW é idêntica àquelas dadas para a GMAW.

12.3.4 Soldagem a arco com eletrodo revestido (SMAW)

A soldagem a arco com eletrodo revestido, é um processo extremamente versátil para soldagem de geometrias complexas em situações onde as posições ou possibilidades de proteção são relativamente difíceis. Embora seja possível utilizar o processo SMAW em todas as soldas de uma estrutura, particularmente em estruturas pequenas e complexas, a SMAW é utilizada frequentemente em grandes estruturas em combinação com outros processos de soldagem mais eficientes.

Equipamentos

O equipamento necessário para a SMAW é uma fonte de alimentação de corrente contínua. A SMAW é realizada com corrente contínua com polaridade invertida (CCPI), eletrodo positivo.

Metais de adição

O eletrodo SMAW consiste de um eletrodo consumível com um revestimento de fundente. O revestimento pode ou não conter elementos de liga adicionais que se incorporam na solda. O revestimento é uma mistura complexa patenteada que oferece estabilidade ao arco, proteção do metal durante a transferência e proteção da solda contra a atmosfera durante e depois da solidificação. Devido à natureza patenteada do revestimento, pode haver diferenças significativas entre produtos nominalmente similares provenientes de diferentes fornecedores. Os revestimentos podem ter como ponto principal uma melhora da tenacidade da solda ou melhor aparência física, e podem ser especialmente projetados para um melhor desempenho em uma determinada posição, tal como horizontal, na posição vertical.

Os revestimentos dos eletrodos SMAW são higroscópicos e a presença de água irá degradar significativamente o seu desempenho. Os eletrodos devem ser mantidos em seu recipiente selado de fábrica até o momento do uso. Uma vez que a embalagem é aberta, os eletrodos devem ser armazenados em um forno



Manifold de 2205. © Arco Exploration and Production Technology)

aquecido a 95°C (200°F) ou acima para evitar o acúmulo de umidade que pode levar à porosidade ou trinca da solda. Como o fluxo aumenta o teor de oxigênio da solda e, com isso, reduz a tenacidade, é comum que os eletrodos SMAW sejam equilibrados perto do nível máximo de austenita no qual o metal ainda terá os efeitos benéficos da estrutura duplex. A tenacidade da solda é bem abaixo da do metal base, mas geralmente é bem acima dos níveis de tenacidade considerados adequados para os aços carbono e ligados. Um erro que geralmente ocorre na qualificação das soldas SMAW é o uso do ensaio ASTM A 923 sem os ajustes apropriados dos critérios de aceitação. A tenacidade mais baixa observada para as soldas SMAW não é indicativa de fases intermetálicas, mas é atribuída ao oxigênio proveniente do fundente de proteção. Solicitar o mínimo de 54 J/40 ft-lb at 40°C/°F, que é necessário para o metal base, pode gerar uma desqualificação inadequada deste procedimento altamente versátil, que

tem sido usado há anos com excelentes resultados práticos. De acordo com o ASTM A 923 a energia de impacto mínima para o metal de solda é 34 J/25 ft-lb e 54 J/40 ft-lb para a zona termicamente afetada

Proteção

A proteção não é geralmente um problema na SMAW porque este método se baseia no fundente e nos gases protetores criados pelo revestimento dos eletrodos.

Técnicas e parâmetros

Os parâmetros de soldagem para a SMAW são em grande parte uma função do diâmetro do eletrodo, como mostra a **Tabela 17**.

A fim de maximizar a proteção oferecida pelo fundente, o soldador deve manter um arco o mais curto possível. Um espaço muito largo, chamado de “arco longo”, pode promover porosidade da solda, oxidação excessiva, aporte térmico excessivo e propriedades mecânicas reduzidas.

O passe de raiz deve ser feito com eletrodos de menor dimensão, sendo os eletrodos maiores usados para as passes de preenchimento. A abertura do arco deve sempre ser feita dentro da própria zona de solda. Qualquer outro jato do arco ou borrfio deve ser removido através do esmiralhamento fino.

Tabela 17: Parâmetros típicos da soldagem a arco com eletrodo revestido (SMAW) para soldar aços inoxidáveis duplex com vários tamanhos de eletrodos. Fonte: Outokumpu

Diâmetro do eletrodo			
Diâmetro do arame		Corrente	Voltagem
mm	Inch	A	V
2.0	0.078	35–60	22–28
2.5	0.094	60–80	22–28
3.25	0.125	80–120	22–28
4.0	0.156	100–160	22–28

A SMAW não deve ser usada nos aços inoxidáveis duplex com menos de 2 mm (0.08 inch) de espessura. A peça de trabalho deve ser posicionada na horizontal, se possível, mas podem ser escolhidos eletrodos que permitem a soldagem em praticamente qualquer posição. O eletrodo deve ser mantido a um ângulo de 20° (ângulo de arrasto) em relação à peça, com o porta-eletrodo inclinado para frente na direção de trabalho. O metal deve ser depositado com cordões retos e mínima oscilação. A corrente deve ser definida somente para oferecer um arco suave e boa fusão da solda e do metal base.

12.3.5 Soldagem a arco submerso (SAW)

A soldagem a arco submerso permite a deposição de soldas relativamente grandes com tempo total menor na temperatura para a ZTA do que seria possível para um grande número de passes com menor deposição por passe. Devido à solidificação ferrítica e à transformação duplex do metal de solda, os aços inoxidáveis duplex podem ser soldados desta forma com um risco mínimo de trincamento a quente. Todavia, é necessário fazer alguns ajustes no projeto da junta ou nos parâmetros da soldagem com relação aos aços inoxidáveis austeníticos, para obter soldas de penetração completa. As soldas SAW feitas com velocidades elevadas combinadas com projetos de juntas desfavoráveis podem levar a trincas centrais, mas a redução da velocidade geralmente resolve o problema de trincas. Para grandes construções e para cordões retos e longos, a SAW é economicamente rentável e tecnicamente satisfatória na soldagem dos aços inoxidáveis duplex. A SAW é geralmente usada para fabricar tubulações em aço inoxidável duplex de grandes espessuras.

Metais de adição e proteção

Para a SAW, o metal de adição coincidente duplex é adequado. Todavia, é importante selecionar um fundente correto para atingir as propriedades desejadas. Há relatos

Tabela 18: Parâmetros típicos da soldagem a arco submerso (SAW) para aços inoxidáveis duplex com vários tamanhos de arame. Fonte: Outokumpu

Diâmetro do arame		Corrente	Voltagem
mm	Inch	A	V
2.5	0.094	250–450	28–32
3.25	0.125	300–500	29–34
4.0	0.156	400–600	30–35
5.0	0.203	500–700	30–35

Obs.: A velocidade de trabalho é normalmente 30–60 cm/minuto

de que fundentes altamente básicos proporcionam a melhor resistência ao impacto para os aços inoxidáveis duplex.

Técnicas e parâmetros

Os parâmetros típicos para a soldagem SAW do aço inoxidável duplex estão resumidos na **Tabela 18**.

12.3.6 Soldagem por feixe de electrons e laser

A experiência com estes processos de soldagem, aplicados aos aços inoxidáveis duplex, tem sido positivas. Estes procedimentos produzem zonas termicamente afetadas muito limitadas e resfriamentos rápidos que impedem a formação de fases intermetálicas. Todavia, a alta taxa de resfriamento associada a estes processos pode provocar a formação de um excesso de ferrita na solda, pelo que a qualificação do procedimento de soldagem pode ser um aspecto crítico. O recozimento de solubilização após a soldagem reduz o nível de ferrita e melhora a proporção das fases austenita/ferrita da solda.

12.3.7 Soldagem por resistência

Quando é utilizada soldagem por resistência de pulso único para soldas por pontos, a ZTA é temperada rapidamente. Esta têmpera é ainda mais rápida para os aços inoxidáveis duplex do que para

os aços inoxidáveis austeníticos devido à maior condutividade térmica do aço duplex. Nesta situação, haverá uma fina camada de material imediatamente adjacente à linha de fusão, que atinge a faixa de temperatura na qual a estrutura duplex é convertida totalmente em ferrita. O resfriamento é tão rápido que mesmo os aços inoxidáveis duplex com maior teor de nitrogênio não tendem a formar novamente austenita nesta região. É possível então ter um material base tenaz e uma solda com uma camada contínua de ferrita de tenacidade limitada.

Com um equipamento de solda por resistência programável, pode ser possível desenvolver um ciclo de soldagem de dois pulsos que irá desacelerar o resfriamento o suficiente para evitar esta camada contínua de ferrita. Novamente, pode ser necessário qualificar diferentes espessuras de seção.

Um equipamento de solda por resistência de emendas tem menos chances de ter este mesmo problema, e é muito improvável ter tempos de exposição longos o suficiente para a formação de fases intermetálicas, mas a qualificação da soldagem deve considerar especialmente o possível excesso de ferrita.

13 Outras técnicas de união

As vantagens das técnicas de união diferentes da soldagem (nas quais o material de base é derretido para produzir uma união) incluem um empenamento mínimo e tensões residuais baixas. As uniões podem ser vedadas e muito resistentes. Entretanto, a ligação nunca chega perto das propriedades de uma união por soldagem, na qual a resistência à corrosão e a resistência do metal de solda são tão altos, ou quase tão altos, quanto as do material base. Esta é uma consideração importante para os aços inoxidáveis duplex, que são superiores aos aços inoxidáveis austeníticos da serie 300 tanto em resistência mecânica como em resistência à corrosão.

13.1 Preparação da união

Para todas as operações de união, é muito importante limpar totalmente o aço inoxidável antes de ligar as partes. As

superfícies devem estar livres de óleo, graxa, sujeira, pó ou marcas de dedos. Deve ser utilizado um solvente para remover estes contaminantes da superfície. O óleo ou a graxa podem evitar que o fundente remova a camada de óxido na solda fraca e brasagem. Os contaminantes soltos da superfície reduzem a área da superfície a ser unida. Geralmente uma superfície levemente rugosa produz melhores uniões que as superfícies lisas. Às vezes raspar com um abrasivo fino pode ajudar a aumentar a capacidade de absorção de uma superfície, que é crítica para uma boa união.

13.2 Adesivos

Existe uma grande variedade de adesivos comerciais para a união de superfícies metálicas. Para a união com adesivos, os aços inoxidáveis duplex são tratados da mesma forma que qualquer outro metal.

Os fabricantes de adesivos podem ajudar na seleção do adesivo adequado para uma determinada resistência, temperatura e ambiente de serviço.

13.3 Solda Fraca (Soldering)

A solda fraca (Soldering) se diferencia da brasagem pela temperatura de fusão do material de adição. A temperatura da solda fraca é geralmente abaixo de 450°C (840°F). Em geral, as uniões feitas por solda fraca não são tão fortes e suas temperaturas de serviço são mais baixas que para as uniões feitas por brasagem. Os materiais de adição típicos para solda branca incluem ligas de estanho-chumbo, estanho-antimônio, estanho-prata, e estanho-chumbo-bismuto. Estes materiais de adição de baixo ponto de fusão produzem uniões de colorações variáveis de diferentes resistências mecânicas e à corrosão.



Evaporador em aço inoxidável 2507. © Gary Carinci, TMR Stainless



Unidade de dessulfurização de gases de combustão, fabricada com aço inoxidável 2205. © ArcelorMittal

Para produzir uma boa união por solda fraca, a camada de óxido superficial do aço inoxidável deve ser removida com um fundente. A alta estabilidade da camada protetora de óxido nos aços inoxidáveis e especialmente nos aços inoxidáveis duplex ligados com molibdênio, pode tornar difícil o trabalho do fundente. Os fundentes do tipo ácido típicos podem conter cloretos. Se se utilizam fundentes contendo cloretos, eles devem ser limpos com água e/ou um neutralizador, imediatamente após a soldagem fraca. Falhas na remoção completa do fundente podem produzir corrosão por pites, até mesmo antes do equipamento ser colocado em uso.

13.4 Brasagem

O material de adição da brasagem tem um ponto de fusão acima de 450°C (840°F). Os tipos de metais de adição da brasagem incluem ligas de prata, ligas de níquel e ligas de cobre. As ligas de

prata têm ponto de fusão mais baixo, de 618–705°C (1145–1300°F), e as ligas de cobre de 1100–1150°C (2000–2100°F), enquanto que as ligas de níquel fundem em temperaturas mais altas, de até 1175°C (2150°F). As uniões soldadas com níquel podem suportar uma temperatura de serviço mais alta que as uniões soldadas com cobre e prata.

A faixa de temperatura de 705–980°C (1300–1800°F) deve ser evitada com os aços inoxidáveis duplex. Portanto, é importante realizar a solda a uma temperatura acima de 1040°C (1900°F) ou abaixo de 705°C (1300°F). As uniões soldadas podem ser temperadas a partir de temperaturas superiores a 1040°C (1900°F).

O material de brasagem adequado deve ser escolhido de acordo com a resistência à corrosão, temperatura de serviço e resistência da união, requeridas. Os materiais de brasagem de níquel que

contém até 25% de cromo, apresentam certa resistência inferior ao aço inoxidável duplex, 2205.

Há relatos de que os aços inoxidáveis que contêm nitrogênio são difíceis de unir por brasagem. Isto pode afetar os aços inoxidáveis duplex de segunda geração que contêm níveis mais altos de nitrogênio. Existem poucos dados disponíveis sobre a brasagem dos aços inoxidáveis duplex, portanto o fabricante deve realizar experimentos, a fim de definir os parâmetros de brasagem ideais.

Assim como com a solda fraca, a camada de óxido deve ser removida antes e durante a operação de brasagem para criar uma união sólida. Novamente, isto é realizado com um fundente que deve ser removido depois da brasagem. O procedimento é similar à limpeza após a solda fraca e inclui lavagem com água quente ou com uma substância química neutralizante.

14 Limpeza pós-trabalho

A limpeza pós-trabalho dos aços inoxidáveis duplex não é diferente da limpeza exigida para outros aços inoxidáveis. A limpeza pós-trabalho é muito importante, tão importante quanto o controle da temperatura de interpasse ou o uso de gás de proteção durante a soldagem. Um aço inoxidável que não foi adequadamente limpo após o trabalho pode falhar em temperaturas muito mais baixas ou em um ambiente muito menos agressivo que o material-base. Isto significa que o custo superior de um material mais resistente à corrosão é desperdiçado, a menos que após a fabricação seja mantida ou restaurada uma superfície ótima. Respingos de solda, coloração térmica da solda, marcas de giz, marcas de abertura de arco e mordeduras podem funcionar como frestas em um ambiente aquoso. Ao mesmo tempo, eles podem ter um potencial diferente ao da superfície de aço inoxidável, portanto interações galvânicas podem ocorrer. É importante remover estas distorções da camada passiva protetora. A **Figura 18** mostra um resumo destas distorções que podem ocorrer durante o trabalho e que devem ser removidos antes de colocar qualquer aço inoxidável em uso.

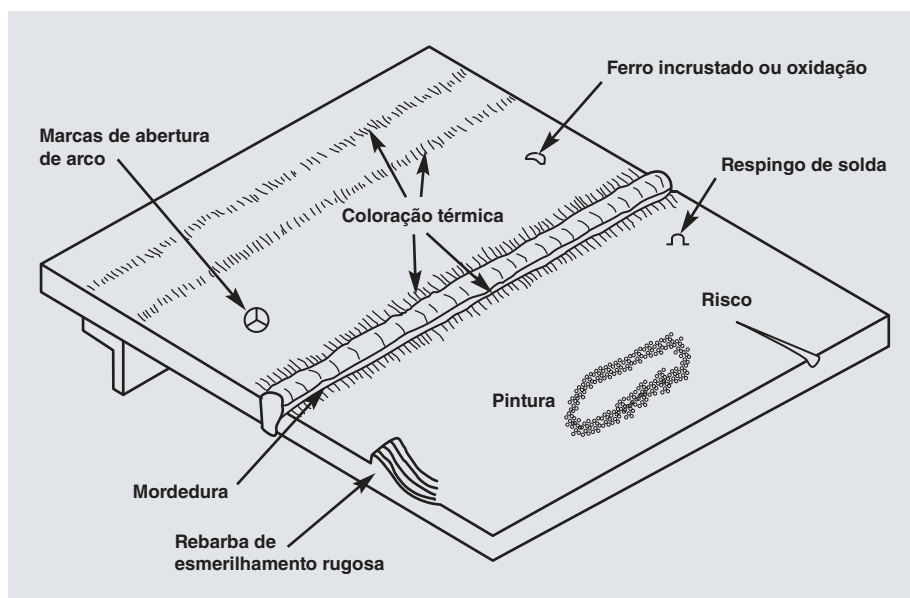


Figura 18: Defeitos ou condições de superfícies típicas do trabalho que podem ser encontrados.
Fonte: Nickel Institute Publication 10 026

14.1 Marcas de giz, tinta, sujeira, óleo

Todos estes contaminantes de superfícies podem funcionar como frestas e podem ser pontos de início de corrosão por pite ou em frestas de um aço inoxidável.

Além disso, eles podem levar a uma contaminação carbônica. Se houver mais uma soldagem, pode ocorrer precipitação de carbonetos. O aço pode então ser sensibilizado e a corrosão intergranular pode ocorrer no serviço. A contaminação deve ser removida com solventes.

14.2 Ferro incrustado (contaminação ferrosa)

O ferro incrustado, ou ferro livre, é resultado do trabalho ou do transporte do aço inoxidável com ferramentas de aço carbono. Se as ferramentas de aço são usadas nos aços inoxidáveis ou se o aço carbono é trabalhado próximo ao local onde o aço inoxidável é armazenado, o ferro pode ser transferido para a superfície do aço inoxidável. O ferro se oxida em um ambiente úmido e pode iniciar a corrosão na superfície de aço inoxidável. Uma solução é evitar todo o contato entre o aço inoxidável e o aço carbono. Somente ferramentas de aço inoxidável, escovas de aço inoxidável, grampos de aço inoxidável e discos de esmerilhamento novos e descontaminados devem



Ferro incrustado em trabalho com placa de aço inoxidável duplex laminada.
© Gary Carinci, TMR Stainless

ser usados com o aço inoxidável. Geralmente as ferramentas são diferenciadas com códigos de cores na fábrica.

Normalmente, não é prático ou econômico evitar completamente o uso de ferramental de aço carbono e evitar a ocorrência de contaminação de ferro no ambiente da fábrica. Nestes casos, admite-se que haverá transferência de ferro mas deve-se trabalhar para garantir que seja eliminado antes que o aço inoxidável seja colocado em serviço. O método para remover o ferro pode envolver limpeza mecânica, limpeza química ou uma combinação de ambas. O melhor método de limpeza depende do tamanho e formato do equipamento, o serviço previsto e certas questões práticas que incluem a eliminação dos resíduos da limpeza. Um método de limpeza comum tem sido o tratamento químico com ácido nítrico, que dissolve o ferro livre sobre a superfície de aço inoxidável sem atacar o aço inoxidável ou a camada passiva protetora. Mas existem muitas abordagens diferentes de limpeza química que podem chegar aos resultados desejados. Detalhes dos métodos de limpeza são discutidos exaustivamente no ASTM A 3807. É especialmente importante que o usuário esteja familiarizado com as questões de segurança discutidas no ASTM A 380.

O ASTM A 967⁸ (que substitui a US Federal Specification QQP-35c) fornece informações sobre a seleção do teste adequado para demonstrar que o tratamento de passivação do aço inoxidável foi eficaz. Nesta especificação, espera-se que o comprador defina o nível de passivação a ser atingido e permita à empresa que realiza o tratamento de superfície selecionar o procedimento adequado que seja econômico e eficaz.

14.3 Respingos de solda, descoloração da solda, fundente, escória, marcas de abertura de arco

Todos estes problemas podem ocorrer durante a soldagem. Eles podem agir como frestas e dar início a uma corrosão em frestas em ambientes que contém cloreto e por isso devem ser evitados ou removidos após a soldagem. O respingo de solda pode ser evitado durante o trabalho através do uso de um composto anti-respingos. A descoloração da solda causa uma perda de resistência à corrosão devido à destruição da camada passiva. A descoloração da solda intensa ou a coloração térmica devem ser evitadas pela proteção de gás inerte e através da purga do reverso das soldas com um gás inerte. Em muitos casos, entretanto, a coloração térmica não pode

ser completamente evitada e deve ser removida durante a limpeza pós-soldagem. As inclusões de fundente e escória, assim como, marcas de abertura de arco devem ser removidas antes de se colocar o equipamento em uso. Respingos de solda, coloração térmica, fundente, escória, marcas de abertura de arco e mordeduras podem ser todos removidos através da limpeza mecânica, tal como esmerilhamento abrasivo fino ou com um disco ou escova de aço inoxidável. É importante realizar um esmerilhamento fino, visto que marcas grosseiras no esmerilhamento podem por si próprias causar a corrosão durante o serviço, ao permitir que os depósitos grudem e as frestas se formem.

A característica diferencial do aço inoxidável duplex é que a coloração térmica da solda tende a ser fina, aderente e mais resistente à remoção química que a dos aços inoxidáveis austeníticos de resistência à corrosão comparável. A descoloração da solda pode ser removida quimicamente através da decapagem; por exemplo: decapar 2205 com uma solução de 20% ácido nítrico-5% ácido fluorídrico. Esta solução dissolve o óxido de cromo e também ataca o aço inoxidável, fazendo com que a camada que perdeu cromo seja removida. Semelhantes em seus efeitos, mas mais fácil de ser trabalhada em peças grandes, as pastas de decapagem podem ser usadas em substituição à solução ácida. Todavia, deve-se reconhecer que a pasta de decapagem irá produzir uma solução prejudicial quando for enxaguada e é de responsabilidade do usuário os procedimentos adequados de segurança, manuseio e descarte. Dependendo da resistência à corrosão do aço inoxidável duplex, um ácido mais ou menos agressivo pode ser necessário para a remoção da coloração térmica.

As pesquisas demonstram que a melhor resistência à corrosão depois da soldagem é atingida através do uso de passivação química após a limpeza mecânica.



Navio-tanque para produtos químicos, com tanques de 2205. © ArcelorMittal

7 Norma ASTM A 380 para limpeza, remoção de carepa e passivação de peças, equipamentos e sistemas de aço inoxidável

8 Norma ASTM A 967, especificação para os tratamentos de passivação química de peças em aço inoxidável

15 Aplicações do aço inoxidável duplex

Dessulfurização de gases de combustão

Plantas termoelétricas a carvão enfrentam um futuro incerto em função das normativas da qualidade do ar em todo o mundo. Serão necessárias reduções adicionais nas emissões de SO_2 , e a dessulfurização de gás de combustão (FGD) é um método para se chegar a estas emissões baixas de dióxido de enxofre. O uso de borras de cal ou calcário para a “depuração úmida” do dióxido de enxofre de um gás de combustão é uma tecnologia madura, visto que o sistema básico tem sido aplicado aos sistemas de caldeiras desde os anos 1970s. As depuradoras modernas são agora capazes de remover mais de 90% do SO_2 do gás de exaustão. Unidades modernas FGD consistem em várias zonas com diferentes temperaturas, concentrações de cloreto e pH. O aço inoxidável do tipo 2205, S32205, tem sido usado para aplicações FGD na Europa e na Ásia por causa de seu custo inferior e melhor resistência à corrosão quando comparado aos aços inoxidáveis austeníticos. Recentemente, o uso do aço inoxidável duplex ganhou aceitação na América do Norte, e este tipo se tornou a escolha mais popular para a absorção FGD devido à sua alta resistência mecânica, boa resistência à corrosão e alta tenacidade após a soldagem.

Dessalinização

A dessalinização apresenta um dos desafios mais duros para os materiais devido a ser um processo corrosivo com alto teor de cloretos e temperaturas elevadas. A história da dessalinização é em grande parte uma história de desenvolvimento de materiais, visto que os clientes procuram equilibrar as necessidades de resistência à corrosão com o controle dos custos de investimento, a fim de tornar os projetos de dessalinização viáveis. No início da dessalinização, os evaporadores, tanto



Unidade de dessalinização de água do mar por flash multi estágios construída com aço inoxidável duplex S32101 e S32205. © Outokumpu

por flash multi estágios (MSF) como os de efeito múltiplo (MED) eram fabricadas com aço doce. Em um estágio posterior, os evaporadores MSF eram revestidos normalmente com aço inoxidável austenítico 316L (EN 1.4404). As câmaras MED foram primeiramente revestidas com epóxi e posteriormente com aço inoxidável.

Os benefícios do aço inoxidável duplex para esta aplicação são alta resistência mecânica – o dobro dos tipos austeníticos convencionais – combinado à alta resistência à corrosão. Como resultado disso, os evaporadores de aço inoxidável duplex podem ser construídos com espessuras mais finas, o que exige menos material e menos soldagem. Outros benefícios incluem manuseio mais fácil e menor impacto ambiental geral.

Uma evolução decisiva para o aço inoxidável duplex ocorreu em 2003, quando o aço inoxidável duplex 2205 (EN 1.4462) foi especificado para os evaporadores totalmente em aço duplex instalados na planta Melittah MSF PE e na planta Zuara MED na Líbia. A planta com capacidade para 4 milhões de galões por dia (MIGD) iniciou sua operação em 2004.

A etapa seguinte na evolução da dessalinização utilizando aço inoxidável duplex iniciou-se em 2004 quando dois tipos diferentes de aço inoxidável duplex foram usados na estrutura dos evaporadores – aplicando o 2205 altamente resistente à corrosão para as peças expostas às condições mais hostis, e o 2304 (EN 1.4362) para as peças expostas a condições menos hostis.

Três plantas MSF foram recentemente construídas usando este conceito, com uma combinação de 2205 e UNS S32101 (EN 1.4162): Taweelah B (Abu Dhabi, capacidade de 69.2 MIGD), Jebel Ali L2 (Dubai, 55 MIGD) e Ras Abu Fontas B2 (Qatar, 30 MIGD). Este conceito de uso do 2304 e 2205 foi aplicado desde 2003 nas plantas MED e mais recentemente na construção da maior planta MED do mundo até o momento, Al Hidd in Bahrain com capacidade de 60 MIGD.

Óleo e gás

No setor de Óleo e Gás, o duplex tem exercido um papel essencial, ajudando a suportar condições extremas. Isto se deve não somente à sua resistência à corrosão e resistência mecânica, mas

também à sua resistência à corrosão por pites e em frestas que é superior à das ligas austeníticas padrão, com índices equivalentes de resistência à corrosão por pites (PREN) geralmente superando 40.

As principais aplicações dos aços inoxidáveis duplex são as linhas de fluxo, sistemas de tubulação de processo e equipamentos como separadores, depuradoras e bombas. No fundo do mar os materiais são usados em tubulações de produção no fundo do poço, conduções e manifolds, componentes de árvore de natal, linhas de fluxo e tubulações que transportam óleo e gás corrosivos. Os aços inoxidáveis super duplex (25% cromo) são úteis por sua resistência às tensões de projeto, e por isso são geralmente utilizados em elementos como barras, peças forjadas e fundidas, folhas, chapas, tubos e acessórios. Os aços inoxidáveis super duplex também apresentam excelente resistência à fadiga e compatibilidade galvânica com outros aços inoxidáveis de alta liga.

Os cabos umbilicais usados para controlar as funções do poço, usando linhas hidráulicas, podem também ser usados para injeção química. Desde que estes cabos de aço foram introduzidos no mercado, os aços inoxidáveis duplex tem sido os mais utilizados. Recentemente tem havido uma tendência de explorar

campos em maiores profundidades e cabos mais longos passaram a ser necessários. Aumentando a resistência do material o peso do cabo é reduzido, o que permite comprimentos maiores. A tendência também é utilizar os cabos umbilicais em águas mais quentes e desenvolver conceitos onde um tubo de subida (riser) é introduzido no cabo. Assim, a exigência de resistência à corrosão e resistência mecânica é aumentada. Novos aços inoxidáveis hiper duplex foram desenvolvidos para uso em cabos com melhor resistência à corrosão e maior resistência mecânica que a dos aços inoxidáveis duplex.

Biocombustíveis

Em terra, os biocombustíveis (especialmente, o etanol) são um setor em que os tipos de duplex estão ganhando espaço. O aço inoxidável 2205 tem sido usado para plantas de biomassa a líquido NExBTL em Singapura, e o S32101 foi escolhido pela empresa holandesa construtora de tanques Oostwouder Tank- & Silobouw BV para o parque de tanques da Noba Vetveredeling BV em um projeto de biocombustível de grande escala no Porto de Amsterdam. O S32101 também foi especificado para tanques e tubulações da expansão da planta de etanol da Agroetanol na ilha

de Händelö, Suécia. Os tipos de aço inoxidável lean duplex tem sido usados para substituir os aços inoxidáveis austeníticos da série 300 em muitas aplicações de serviço com etanol.

Alimentos e Bebidas

Na indústria de alimentos e bebidas também o aço inoxidável lean duplex se mostra interessante. O material está sendo usado para dois projetos na Espanha, um depósito para armazenamento de alimentos e um de vinho. No porto de Barcelona Emypro SA construiu tanques de estocagem de alimentos totalmente em S32101 em substituição ao EN 1.4301/1.4307 (304/304L). O depósito de armazenagem de vinho, construído pelo construtor de tanques espanhol Martinez Sole para a Garcia Carrión em Daimiel, no sul da Espanha, é o primeiro a usar o aço inoxidável duplex: S32101 e 2304 foram usados nas construções do teto e do nível superior de todos os novos tanques, sendo uma alternativa de custo mais baixo aos 1.4301/1.4404 (304/316L).

Arquitetura

O aço inoxidável duplex continua a exercer um papel importante na construção de pontes, onde as condições de corrosão e salinidade se combinem com a necessidade de de alta resistência para suportar cargas. Dois exemplos recentes, da Ásia, são a ponte 'Stonecutters Bridge' em Hong Kong e a passarela de pedestres 'Helix Pedestrian Bridge' em Singapura, ambas usando aço inoxidável duplex tipo 2205. Para a Stonecutters Bridge, 2000 toneladas de chapas e tubos de duplex 2205 foram usados em 2006. Os segmentos do revestimento foram acabados por um fabricante na China com chapas customizadas. As chapas foram polidas e jateadas para obter um nível de reflexão perfeito durante o dia e a noite.

O Helix, passarela de pedestres sobre a Marina Bay de Singapura também utilizou 570 toneladas de aço inoxidável duplex. O projeto deslumbrante da ponte inclui dois elementos tubulares em



Tubos umbilicais de 2507 para aplicações de petróleo e gás offshore. © Sandvik



“The Helix” Passarela de pedestres, Singapura, construída com aço inoxidável duplex 2205. © Financial Dynamics/C. F. Jones

espiral em aço inoxidável que lembra a estrutura do DNA, na sua hélice dupla e nas estruturas de apoio foram utilizados tubos e chapas de duplex 2205, respectivamente. As superfícies de aço inoxidável oferecem iluminação à noite ao refletir as luzes programadas para valorizar ainda mais o design.

O maior telhado em aço inoxidável do mundo no novo New Doha International Airport no Qatar foi construído com um aço inoxidável lean duplex com molibdênio (S32003). O atributo mais impressionante do terminal é o seu telhado ondulado. A área do telhado do terminal é de aproximadamente 195.000 metros quadrados e usou aproximadamente 1600 toneladas de aço inoxidável duplex. Vários fatores foram considerados na escolha do tipo de aço inoxidável. O mais importante destes foi a localização do aeroporto muito próxima ao mar. O telhado teria que resistir não somente ao calor e umidade encontrados no Oriente Médio, mas também teria que suportar a corrosão pelo sal. Outros fatores da escolha incluíram custo e a relação favorável resistência/ peso para o aço inoxidável duplex comparados a outros tipos.



Stonecutters Bridge, Hong Kong. © Ove Arup & Partners



Aeroporto Internacional de New Doha com telhado de aço inoxidável duplex. © Qatar Airways

Sugestão de leitura adicional

Informações gerais

- P. Johansson, M. Liljas, A New Lean Duplex Stainless Steel for Construction Purposes, Proceedings of 4th European Stainless Steel Conference Science and Market, Paris 2002.
- M. Liljas, J.Y. Jonsson, S.Wessman, Stress Relief Treatment of 22Cr Duplex Stainless Steel EN 1.4462, Proceedings of Stainless Steel World Conference, Maastricht, Netherlands, 2005
- M. Liljas, 80 Years with Duplex Steel, a Historic Review and Prospects for the Future, Proceedings of 6th European Stainless Steel Conference Science and Market, Helsinki, Finland 2008
- H. Liu, P.Johansson, M.Liljas , Structural Evolution of LDX 2101 During Isothermal Ageing at 600–850°C, Proceedings of 6th European Stainless Steel Conference Science and Market, Helsinki, Finland 2008
- Z. Wei, J. Laizhu, H. Jincheng, S. Hongmei, Study of Mechanical and Corrosion Properties of a Fe-21.4Cr-6Mn-1.5Ni-0.24N-0.6Mo Duplex Stainless Steel, Materials Science and Engineering A, 2008, 497: 501–504
- J. Charles, Why and Where Duplex Stainless Steels, Proceedings of the 5th World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 29.
- M.G. Mecozzi, M. Barteri, Effect of Alloying Elements and Impurity on Hot Ductility of 23% Cr 4% Ni Stainless Steel, 5th World Conference Duplex Stainless Steels, Conference Proceedings, KCI Publishing, 1997, p. 1011–1016.
- J. Charles, Super Duplex Stainless Steels: Structure and Properties, Proceedings of Duplex Stainless Steels '91, Les Editions de Physique, F-91944 Les Ulis Cedex, France, 1991, p. 3 and p. 151.
- F. Dupoirion, S. Faucheur, and G. Varvat, Fabrications of Process Equipment in Duplex Stainless Steels, Proceedings of Duplex Stainless Steels '91, Les Editions de Physique, F-91944 Les Ulis Cedex, France, 1991, p. 621.
- C. W. Kovach, High-Performance Stainless Steels, Nickel Development Institute Reference Book Series No 11021, Toronto, Canada, 2000

Metalurgia física

- R. Sanchez, I. Moreno, J. Amagro, J. Botella, Effects of Composition and Thermal History on the Phase Balance and Elements Distribution of Standard and Modified Duplex Stainless Steel, 4th Stainless Steel Science and Market Congress, Conference Proceedings, Paris 2002, p. 108–113.
- J.-O. Nilsson, The Physical Metallurgy of Duplex Stainless Steels, Proceedings of the 5th World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 73.
- J.-O. Nilsson, The Use of Modern Physical Metallurgy in the Development and Characterization of Special Stainless Steels, Journal de Physique, 4, 1993, Vol. 3, Number 7/V1, p. C7-67–C76.
- B. Josefsson, J.-O. Nilsson and A. Wilson, Phase Transformations in Duplex Steels and the Relation Between Continuous Cooling and Isothermal Heat Treatment, Proceedings of Duplex Stainless Steels '91, Les Editions de Physique, F-91944 Les Ulis Cedex, France, 1991, p. 67.

Usinagem

C. Bergqvist, J. Olsson, Machining in the New Duplex Grade LDX 2101-Easier Than Expected. Proceedings of Duplex 2007, Grado, Italy 2007.

B. Pellegrini, B.N. Di Caprio and R. Pacagnella, Tool Performance in Continuous Cutting of Duplex Stainless Steel, Proceedings of the 5th World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 175.

C.G. Carlborg, Å. Nilsson and P-Å. Frandlind, Machinability of Duplex Stainless Steel, Proceedings of Duplex Stainless Steels '91, Les Editions de Physique, F-91944 Les Ulis Cedex, France, 1991, p. 685.

Soldagem

F. Hägg, M.Liljas, B.Holmberg, The welding consequences of replacing austenitic with duplex stainless steel. Proceedings of Stainless Steel World Conference, Maastricht, Netherlands, 2007

C. Baxter, M.Young, Practical aspects for production welding and control of duplex stainless steel pressure and process plants. Proceedings of Duplex America, Houston, TX, 2000

C. Baxter, N.A McPherson, High-productivity welding of duplex stainless steel. Proceedings of Duplex America, Houston, TX, 2000

B. Holmberg, M.Larén, Welding and applications of the new lean duplex steel LDX 2101. IIW Annual meeting, Prague, Czech Republic, 2005.

C. Eriksson, P.Johansson, M.Liljas, E.M. Westin, Mechanical properties of welds in the new lean duplex stainless steel LDX 2101. Proceedings of Stainless Steel World Conference, Maastricht, Netherlands, 2003

L. Duprez, B. De Cooman, N. Akudt, Microstructure Evolution During Isothermal Annealing of a Standard Duplex Stainless Steel Type 1.4462, Steel Research, 71, 2000, No.10, p. 417–422

L. van Nassau, H. Meelker, F. Neessen and J. Hilkes, Welding duplex and superduplex stainless steel, an update of the guide for industry, Proceedings of the 5th World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 17.

L. Karlsson, Duplex stainless steel weld metal – effects of secondary phases, Proceedings of the 5th World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 43.

C. Baxter, L. Tuveson-Carlström, L. Svensson and A. Brorson, The significance of filler metal type on the stress corrosion cracking and fracture toughness of welded 2205 duplex stainless steel, Proceedings of the 5th World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 279.

B. Holmberg, How to Perform Welding in Duplex Stainless Steels to Obtain Optimum Weld Metal Properties, Stainless Steel World, March 1997, p. 28.

P. Rouault and C. Bonnet, A new shielding gas range for the TIG, plasma and MIG welding of duplex and superduplex stainless steels, Proceedings of the 5th World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 289.

R.N. Gunn, Intermetallic formation in superduplex stainless steel heat affected zone, Proceedings of the 5th World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 335.

L. Karlsson, S.L. Andersson and S. Rigdal, Welding superduplex stainless steels with Ni-base consumables, Proceedings of the 5th World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 433.

B. Bonnefois, J. Charles, A. Bruyere, and R. Cozar, Welding of super duplex steels: new efficient solutions for joining using Ni alloys filler materials, Proceedings of the 5th World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 499.

D.N. Noble, W. A. Bruce, and R.N. Gunn, Hot tapping 22% Cr duplex stainless steel, Proceedings of the 5th World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 471.

K. Yasuda, R.N. Gunn, and T.G. Gooch, Prediction of austenite content in duplex stainless steels weld metals, Paper 26, Proceedings of 4th International Conference Duplex Stainless Steels, TWI, Abington Hall, Abington, Cambridge, UK, 1994.

L. Odegard, C-O Pettersson and S-A Fager, The selection of welding consumables and properties of dissimilar welded joints in the superduplex stainless steel Sandvik SAF 2507 to carbon steel and highly alloyed austenitic and duplex stainless steels, Paper 94, Proceedings of 4th International Conference Duplex Stainless Steels, TWI, Abington Hall, Abington, Cambridge, UK, 1994.

V. van der Mee, H. Meelker, and L. van Nassau, How to avoid hydrogen cracking in (super) duplex stainless steel weldments, Paper 119, Proceedings of 4th International Conference Duplex Stainless Steels, TWI, Abington Hall, Abington, Cambridge, UK, 1994.

M. Liljas, The welding metallurgy of duplex stainless steels, Paper KV, Proceedings of 4th International Conference Duplex Stainless Steels, TWI, Abington Hall, Abington, Cambridge, UK, 1994.

D.J. Kotecki and J.L. P. Hilkes, Welding processes for duplex stainless steels, Paper KVI, Proceedings of 4th International Conference Duplex Stainless Steels, TWI, Abington Hall, Abington, Cambridge, UK, 1994.

Inspeção

F.H. Dijkstra and J.A. de Raad, Non-destructive testing of duplex welds, Proceedings of the 5th World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 509.

D.J. Kotecki, Ferrite measurement in duplex stainless steel, Proceedings of the 5th World Conference on Duplex Stainless Steels, KCI Publishing, Zutphen, The Netherlands, 1997, p. 957.

C.I.K. Sinclair and B.W.O. Shepherd, Non-destructive testing of welds in duplex stainless steels, Paper 63, Proceedings of 4th International Conference Duplex Stainless Steels, TWI, Abington Hall, Abington, Cambridge, UK, 1994.

J.D. Redmond and R.M. Davison, Critical Review of Testing Methods Applied to Duplex Stainless Steels, Stainless Steel World, April 1998, p. 37–45

Referências

- 1 J. Charles, Super duplex stainless steels: structure and properties, Proceedings of Duplex Stainless Steels '91, Les Editions de Physique, F-91944 Les Ulis Cedex, France, p. 3, 1991.
- 2 R. Sánchez, I. Moreno, J. Almagro, J. Botella, X. Llovet, Effects of Composition and Thermal History on the Phase Balance and Elements Distribution of Standard and Modified Duplex Stainless, Fourth Stainless Steel Science and Market Congress, Paris 2002, Conference Proceedings
- 3 I. Zucato, M. C. Moreira, I. F. Machado and S. M. Giampietri Lebrão, Microstructural Characterization and the Effect of Phase Transformations on Toughness of the UNS S31803 Duplex Stainless Steel Aged Treated at 850 °C, Materials Research Print version ISSN 1516-1439, Mat. Res. vol.5 no.3 São Carlos July/Sept. 2002
- 4 B. Josefsson, J.-O. Nilsson and A. Wilson, Phase Transformations in duplex steels and the relation between continuous cooling and isothermal heat treatment, Proceedings of Duplex Stainless Steels '91, Les Editions de Physique, F-91944 Les Ulis Cedex, France, 1991, p. 67.
- 5 C. Hounглу and S. Hertzman, Kinetics of Intermetallic Phase Formation in Duplex Stainless Steel and Their Influence on Corrosion Resistance, Report IM-2689, Swedish Institute of Metals Research, Stockholm, Sweden.
- 6 G. Herbsleb and P. Schwaab, Precipitation of Intermetallic Compounds, Nitrides and Carbides in AF 22 Duplex Steel and their Influence on Corrosion Behavior in Acids, Proceedings of Duplex Stainless Steels Conference, ASM, Metals Park, Ohio, 1983, p.15
- 7 L. Iturgoyen and M. Anglada, The Influence of Aging at 475°C on the Fatigue Crack Propagation of a Duplex Stainless Steel, Proceedings of Stainless Steels '91, The Iron and Steel Institute of Japan, Tokyo, Japan, Vol. 2, p. 746, 1991.
- 8 D. Bauernfeind and G. Mori, Corrosion of Superaustenitic Stainless Steels in Chloride- and Sulfate-Containing Media-Influence of Alloying Elements Cr, Mo, N, and Cu, Proceedings of NACE Corrosion 2003 Conference, Paper 03-257
- 9 P.-E. Arnvig, and W. Wasielewska, Stress Corrosion Behaviour of Highly Alloyed Stainless Steels under Severe Evaporative Conditions, ACOM 3-1993, Avesta Sheffield AB, 1993.
- 10 A. Miyasaka, K. Denpo and H Ogawa, Prediction of Application Limits of Stainless Steels in Oilfield Equipment, Proceedings of Stainless Steels '91, The Iron and Steel Institute of Japan, Tokyo, Japan, Vol. 1, p. 241, 1991.
- 11 J.J. Eckenrod, et al, "Effects of Chemical Composition and Thermal History on the properties of Alloy 2205 Duplex Stainless Steel", New Developments in Stainless Steel Technology, R. A Lula, Ed., ASM 1985.
- 12 R.M. Davison and J.D. Redmond, Paper No. 302, CORROSION/91, NACE International, Houston, Texas, 1991.
- 13 ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 1, Paragraph UHA 51.

Anexo 1: Designações do aço inoxidável duplex e nomes dos produtos

UNS No.	Tipo	EN No.	Nome EN	JIS/Japão	GB/PR China	KS/Coréia	Nome do produto
S31200					022Cr25Ni6Mo2N		44LN
S31260					022Cr25Ni7Mo3 WCuN		DP3 DP12
S31500							3RE60
S32001		1.4482	X2CrMnNiMoN21-5-3				Nitronic 19D
S32003							ATI 2003
S32101		1.4162	X2CrMnNiN21-5-1				LDX 2101 B2101
S32202							UR 2202
S31803 S32205	2205*	1.4462	X2CrNiMoN22-5-3	SUS 329 J3L	022Cr22Ni5Mo3N	STS 329J3L	SAF 2205 UR 2205 UR 2205+ UR 2205Mo DMV 22-5 ATI 2205 2205 Code Plus Two NAS 329J3L NSSC DX1 DP8 B2205
S32304	2304*	1.4362	X2CrNiN23-4		022Cr23Ni5Mo3N		SAF 2304 UR 2304 B2304
S32506							NAS 64
S32520		1.4507	X2CrNiMoCuN25-6-3				UR 2507Cu
S32550	255*				03Cr25Ni6Mo3Cu2N		Ferrallium 255 UR 2507Cu
S32707							SAF 2707 HD
S32750	2507*	1.4410	X2CrNiMoN25-7-4	SUS 329 J4L	022Cr25Ni7Mo4N	STS 329 J4L	AF 2507 UR 2507 NAS 74N SAF 2507
S32760		1.4501	X2CrNiMoCuWN25-7-4				Zeron 100 UR 2507W NAS 75N
S32808							DP28W
S32900	329	1.4460	X3CrNiMoN27-5-2	SUS 329 J1	0Cr26Ni5Mo2	STS 329 J1	
S32906							SAF 2906

UNS No.	Tipo	EN No.	Nome EN	JIS/Japão	GB/PR China	KS/Coréia	Nome do produto
S32950							7-Mo Plus
S32960							
S33207							SAF 3207 HD
S39274							DP-3W
S39277							AF918
S82011							ATI 2102
		1.4655	X2CrNiCuN23-4				
		1.4477	X2CrNiMoN29-7-2				
		1.4424	X2CrNiMoSi18-5-3				

* Nome comum, não uma marca registrada, usada amplamente mas não associada a nenhum produtor em particular

Anexo 2: Resumo das especificações

Especificações ASTM/ASME

UNS No.	Tipo	A 815	A 959	A 480/M SA 480	A 314	A 240/M SA 240	A 484/M SA 484	A 276 SA 276	A 479/M SA 479	
		Acessórios de tubulação	Tipos forjados	Exigências gerais	Tarugos	Laminação plana	Exigências gerais	Barra, formatos	Barra, formatos	
S31200			X	X		X				
S31260			X	X		X				
S31803		X	X	X		X	X	X	X	
S32001			X	X		X				
S32003			X	X		X				
S32101		X	X	X		X	X	X	X	
S32202		X		X	X	X	X	X	X	
S32205	2205	X	X	X		X	X	X	X	
S32304	2304		X	X		X	X	X		
S32506			X	X		X	X	X	X	
S32520			X	X		X				
S32550	255	X	X	X		X	X	X	X	
S32707										
S32750	2507	X	X	X		X	X	X	X	
S32760		X	X	X	X	X	X	X	X	
S32900	329		X	X		X	X			
S32906			X	X		X	X		X	
S32950		X	X	X	X	X	X		X	
S39274		X	X	X		X				
S39277			X				X		X	
S33207										
S82011				X		X				

Especificações EN

EN No.	Nome EN	EN 10028-7	EN 10088-2	EN 10088-3	EN 10088-4	EN 10088-5	EN 10095	EN 10216-5	
1.4362	X2CrNiN23-4	X	X	X	X	X	X	X	
1.4655	X2CrNiCuN23-4		X						
1.4460	X3CrNiMoN27-5-2			X		X			
1.4477	X2CrNiMoN29-7-2		X	X	X	X			
1.4462	X2CrNiMoN22-5-3	X	X	X	X	X		X	
1.4507	X2CrNiMoCuN25-6-3	X	X	X				X	
1.4410	X2CrNiMoN25-7-4	X	X	X	X	X		X	
1.4501	X2CrNiMoCuWN25-7-4	X	X	X				X	
1.4424	X2CrNiMoSi18-5-3		X	X	X	X		X	
1.4062	X2CrNiN22-2								
1.4162	X2CrMnNiN21-5-1				X	X			

Aços inoxidáveis duplex fundidos

UNS No.	Fundições em ASTM 890, gerais	Fundições em ASTM A 995, peças de pressão
J93370	X	
J93372	X	X
J93373	X	
J93345	X	X
J93371	X	X
J92205	X	X
J93404	X	X
J93380	X	X

Especificações Normas USA

Títulos de especificação	
A 182/A 182M	Forged or Rolled Alloy-Steel Pipe Flanges, Forged Fittings, and Valves and Parts for High-Temperature Service
A 240/A 240M	Heat-Resisting Cr and Cr-Ni Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels
A 270	Seamless and Welded Austenitic and Ferritic / Austenitic Stainless Steel Sanitary Tubing
A 314	Stainless Steel Billets and Bars for Forging
A 276	Stainless Steel Bars and Shapes
A 479/A 479M	Stainless Steel Bars and Shapes for Use in Boilers and Other Pressure Vessels
A 480/A 480M	General Requirements for Flat-Rolled Stainless and Heat-Resisting Steel Plate, Sheet, and Strip
A 484/A 484M	General Requirements for Stainless Steel Bars, Billets, and Forgings
A 580/A 580M	Stainless Steel Wire
A 789/A 789M	Seamless and Welded Ferritic / Austenitic Stainless Steel Tubing for General Service
A 790/A 790M	Seamless and Welded Ferritic / Austenitic Stainless Steel Pipe
A 815/A 815M	Wrought Ferritic, Ferritic / Austenitic, and Martensitic Stainless Steel Fittings
A 890/A 890M	Castings, Fe-Cr-Ni-Mo Corrosion-Resistant, Duplex for General Application
A 923	Detecting Detrimental Intermetallic Phase in Wrought Duplex Stainless Steels
A 928/A 928M	Ferritic / Austenitic Stainless Steel Pipe Electric Fusion Welded with Addition of Filler Metal
A 959 A 988/A 988M A 995/A 995M	Harmonized Standard Grade Compositions for Wrought Stainless Steels Hot Isostatically-Pressed Stainless Steel Flanges, Fittings, Valves, and Parts for High Temperature Service Castings, Austenitic-Ferritic (Duplex) Stainless Steels for Pressure-Containing Parts
API 650	Welded Steel Tanks for Oil Storage
NSF/ANSI 61	Drinking Water System Components
NACE MR0175	Sulphide stress cracking resistant material for oil field equipment

Especificações Normas Europa

Títulos de especificação	
EN 10028-7	Flat products made of steels for pressure purposes – Part 7: Stainless steels
EN 10088-2	Stainless steels – Part 2: Technical delivery conditions for sheet/plate and strip of corrosion resisting steels for general purposes
EN 10088-3	Stainless steels – Part 3: Technical delivery conditions for semi-finished products, bars, rods, wire, sections and bright products of corrosion resisting steels for general purposes
EN 10095	Heat resisting steels and nickel alloys
EN 10216-5	Seamless steel tubes for pressure purposes – Technical delivery conditions – Part 5: Stainless steel tubes
EN 10217-7	Welded steel tubes for pressure purposes – Technical delivery conditions – Part 7: Stainless steel tubes
EN 10222-5	Steel forgings for pressure purposes – Part 5: Martensitic, austenitic and austenitic-ferritic stainless steels
EN 10250-4	Open die steel forgings for general engineering purposes – Part 4: Stainless steels
EN 10263-5	Steel rod, bars and steel wire for cold heading and cold extrusion – Part 5: Technical delivery conditions for stainless steels
EN 10272	Stainless steel bars for pressure purposes
EN 10296-2	Welded circular steel tubes for mechanical and general engineering purposes – Technical delivery conditions – Part 2: Stainless steel
EN 10297-2	Seamless circular steel tubes for mechanical and general engineering purposes – Technical delivery conditions – Part 2: Stainless steel
EN 10312	Welded stainless steel tubes for the conveyance of aqueous liquids including water for human consumption – Technical delivery conditions
EN ISO 8249	Welding – Determination of Ferrite Number (FN) in austenitic and duplex ferritic-austenitic Cr-Ni stainless steel-weld metals
VdTÜV WB 418	Ferritisch-austenitischer Walz- und Schmiedestahl, 1.4462
VdTÜV WB 496	Ferritisch-austenitischer Walz- und Schmiedestahl, 1.4362
VdTÜV WB 508	Ferritisch-austenitischer Walz- und Schmiedestahl, 1.4410



Com o apoio do:
International Stainless Steel Forum (www.worldstainless.org)
Euro Inox (www.euro-inox.org)
Villares Metals SA (www.villaresmetals.com.br)
ABINOX (www.abinox.org.br)

ISBN 978-1-907470-07-3