

Copyright 2010, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2010, em Fortaleza/CE no mês de maio de 2010.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Especificações e ensaios para fornecimento de tubos sem costura em aços inoxidáveis duplex

¹Antonio Carlos Tomaselli, ²Fausto C. Camargo, ³Rodrigo Faveret Signorelli.

Abstract

Duplex stainless steels are frequently used for equipment fabrication for the process industries in general. They possess good mechanical strength, low thermal expansion and high resistance to chloride induced corrosion, like pitting crevice and stress corrosion cracking. Normally, the duplex stainless steels are evaluated and selected based on their unique properties. However, one should be prepared to specify them correctly, in order to ensure a long and secure equipment lifetime. A good quality product is essential to fully utilize the great potential of duplex stainless steels in various applications. When a duplex is evaluated for its quality, various types of tests may be performed, in order to certify that the desired mechanical and corrosion properties are being delivered. The proper mechanical and corrosion properties are critical for achieving the expected lifetime, lower maintenance costs and reduced downtime of the plant. In this paper the duplex stainless steels properties are presented together with suitable test methods and proposed pre-qualification and delivery testing program. Both manufacturer and customer will benefit from reasonable and technically justified specifications and test programs. Valuable time and money can be saved if the specification reflects the application and is focused on material properties. The scope of this paper is to present a test program that verifies a good quality material.

Resumo

Os aços inoxidáveis duplex (AID) são frequentemente usados para a fabricação de equipamentos para as indústrias de processo em geral. Eles possuem boas propriedades mecânicas resistentes, baixa dilatação térmica, e alta resistência à corrosão induzida por cloretos, como pite, fresta e corrosão sob tensão fraturante. Normalmente os AID são avaliados e selecionados com base em suas propriedades exclusivas. Todavia, deve-se estar preparado para especificá-los corretamente, a fim de assegurar que a vida do equipamento seja longa e segura. A boa qualidade do produto é essencial e permite um ótimo aproveitamento dos materiais em suas diversas aplicações. Para a avaliação de um AID vários tipos de ensaios podem ser realizados, com o objetivo de certificar que as propriedades mecânicas e de corrosão desejadas estão sendo fornecidas. Tais propriedades são essenciais para o alcance da vida em serviço esperada, menores custos de manutenção e redução no tempo de parada da planta. Neste trabalho são apresentados ensaios a serem realizados em AID, em conjunto com métodos adequados de teste e o inerente programa proposto de pré-

¹ Marketing Técnico – Sandvik

² Marketing Técnico – Sandvik

³ Marketing Técnico – Sandvik

qualificação e testes de fornecimento. Tanto fabricantes, como usuários, beneficiam-se com a utilização de especificações e programas de testes razoáveis e tecnicamente comprovados. O objetivo deste trabalho é apresentar um programa de testes que comprova a boa qualidade de um material da família duplex.

Introdução

Os aços inoxidáveis duplex são frequentemente utilizados como materiais de construção nas indústrias de processos em geral, como por exemplo, as Indústrias de Petróleo e Gás, Petroquímica e de Fertilizantes.

Para assegurar longa vida útil de equipamentos em uma determinada planta, a especificação de materiais corretamente, no que diz respeito às propriedades que o mesmo deve apresentar, é de extrema importância. Quando os AID(S) são avaliados por sua qualidade como um determinado produto, por exemplo, tubo, barra, chapa, etc., vários tipos de testes podem ser realizados, sendo a maioria deles de acordo com as normas internacionais.

O objetivo deste trabalho é apresentar as características, os métodos e o objetivo de cada ensaio, relacionando valores para cada tipo de aço duplex, baseado em testes laboratoriais e referências práticas. Estes ensaios serão apresentados de acordo com a seguinte divisão: ensaios de fornecimento para avaliar os AID e ensaios para aplicações específicas. Também serão contemplados no texto fatores que devem ser considerados no momento da seleção da usina fornecedora dos AID(S).

Revisão Bibliográfica

Propriedades dos aços inoxidáveis duplex

Composição química e normas

A composição química nominal dos aços inoxidáveis duplex SAF 2304, SAF 2205, SAF 2507 e SAF 2707 HD são mostradas na tabela 1. As denominações padronizadas aplicadas para cada um desses aços são apresentadas na tabela 2. O sistema de nomenclatura mais usado e divulgado é o UNS (Unified Numbering System) que foi desenvolvido pela ASTM e, desde então, estão sempre presentes nas especificações ASTM/ASME.

Para os aços duplex 22Cr (Sandvik SAF 2205) existem dois UNS, sendo o UNS S32205 uma versão recente do duplex tipo 22Cr que possui um estreitamento e aprimoramento nas faixas de composições químicas em relação ao pioneiro UNS S31803. Este aspecto garante uma resistência à corrosão notoriamente melhorada para o UNS S32205. [9,10,11,12]

Microestrutura

Um aço inoxidável do tipo duplex é a um material que apresenta duas fases, ferrita e austenita. O balanço de fases depende da composição química e do tratamento térmico realizado no material. Uma grande quantidade de ferrita pode prejudicar as propriedades mecânicas e de resistência à corrosão. Contrariamente, uma baixa porcentagem desta fase reduziria a resistência à corrosão sob tensão.

Estudos laboratoriais e aplicações práticas mostram que um teor de ferrita na faixa de 40-45% seria o mais adequado para os AID. A figura 10 mostra a microestrutura típica de um aço duplex moderno. [1, 2]

Propriedades mecânicas

O balanço adequado das fases austenítica e ferrítica, bem como a microestrutura refinada, confere propriedades mecânicas resistentes muito elevadas aos AID. A tabela 3 apresenta as propriedades mecânicas mais importantes. Os valores típicos de resistência ao impacto dos mesmos são apresentados na figura 9.

Corrosão

Os aços inoxidáveis duplex apresentam alta resistência à corrosão em via úmida em geral, especialmente aos processos de corrosão localizada em meios contendo cloretos. É importante fazer a distinção entre a seleção do material e os ensaios a serem realizados no material selecionado.

Para selecionar materiais quanto à resistência a corrosão em meios contendo cloretos são usados diagramas adequados para avaliar a resistência à corrosão por pite e por frestas disponíveis na literatura como, por exemplo, as figuras 3, 4 e 5. [1,2, 16]

Corrosão por pite e fresta

A resistência à corrosão por pite e fresta é primariamente determinada pelo conteúdo de cromo, molibdênio e nitrogênio da liga. A fórmula do PRE (Pitting Resistance Equivalent – $PRE = \%Cr + 3,3*\%Mo + 16*\%N$) é comumente empregada para descrever a resistência a corrosão por pite de um material. A tabela 4 apresenta uma comparação entre os AID(S), contemplando os valores mínimos de PRE e as temperaturas mínimas de resistência a corrosão por pite e por fresta sugeridas pela ASTM G 48. [1,2, 16, 17]

Corrosão sob Tensão

A resistência a corrosão sob tensão dos aços duplex em meios com a presença de cloretos é excelente. Todavia, em meios contendo ácido sulfídrico, H_2S , a resistência a CST é suficiente para determinadas aplicações.

De acordo com a ISO 15156/NACE MR 0175, o SAF 2507 recozido solubilizado e resfriado bruscamente é adequado para uso a temperaturas até 232 °C em meios ácidos com H_2S na produção de petróleo e gás, se a pressão parcial do H_2S não exceder 3 psi.

Os diagramas de CST podem auxiliar na avaliação de materiais quanto à resistência a corrosão sob tensão, como será demonstrado adiante neste trabalho.

A resistência a corrosão sob tensão depende da composição básica da liga e é influenciada pelo processo de fabricação. Consequentemente, não existe a necessidade de testar individualmente os lotes de produção de um determinado produto pertencentes a uma mesma corrida. Diversos métodos de testes de CST para aços duplex tem sido usados durante os últimos anos e comentaremos a seguir neste trabalho os mais recomendáveis. [9,10,11,12, 17]

Ensaio de fornecimento para avaliar os AID

Uma vez decida qual a usina que vai receber o pedido, testes de fornecimento e certificados devem ser realizados para garantir que a usina tem um nível de qualidade adequado.

Por razões práticas e econômicas, os testes são normalmente restritos a alguns poucos testes básicos para provar que o material é de boa qualidade.

Nas normas ASTM A789 e A790 estão descritas as especificações para tubos sem costura de aço inoxidável duplex. Alguns requisitos importantes destas especificações, em conjunto com alguns comentários, estão relacionados a seguir. [1]

Composição química

O controle da composição química é importante para manter um balanço adequado entre as fases presentes na microestrutura do material, sendo elas as fases ferrítica e austenítica, além de garantir um valor de PRE adequado para a aplicação. Os limites para a composição química das ligas duplex são apresentados nas ASTM A789 e A790, no entanto, estes limites são apresentados em uma faixa de valores relativamente larga. Desta forma, estabelecendo-se um valor mínimo de PRE, é possível otimizar a resistência a corrosão por pite.

Sendo assim, para aplicações que apresentam condições severas de trabalho e, portanto, que exigem resistência à corrosão elevada, os valores mínimos de PRE para cada um dos aços inoxidáveis duplex apresentados anteriormente são: 24 para o SAF 2304, 35 para o SAF 2205 e 41 para o SAF 2507.

A análise química de produtos em aço inoxidável duplex deve ser feita de acordo com a ASTM A751, a qual se refere a todos os métodos de análise química para produtos em aço. [9,10,11,12, 7]

Ensaio de resistência mecânica

O ensaio de tração é conduzido na direção axial do tubo e tem como objetivo apresentar os resultados dos valores das propriedades mecânicas principais, ou seja: limite de escoamento, limite de resistência a tração, alongamento e dureza. Além disso, também são feitos testes de dureza. No entanto, testes de dureza não são considerados importantes para tubos, visto que a medição é feita na superfície curvada do tubo, esta sujeita a grandes imprecisões, tornando-se mais significativa para tubos de pequeno diâmetro. Estes resultados não devem ser usados como critério de rejeição do material.

Os valores das propriedades mecânicas dos aços duplex são apresentados na tabela 3. Convém ressaltar que os testes de dureza não revelam a presença de fases intermetálicas de modo a prevenir falhas, para tal recomenda-se a norma ASTM A923. [1,8,13]

Teste hidrostático

No teste hidrostático de tubos ocorre o preenchimento dos mesmos com líquido pressurizado. Portanto, qualquer defeito penetrante existente na parede do tubo será revelado. É um método simples e preciso o suficiente para detectar defeitos pontuais na superfície do tubo. [1,2]

Teste de corrente parasita (eddy-current)

Testes elétricos não destrutivos, tais como o teste de corrente parasita ou o teste de ultrassom, podem detectar defeitos internos e externos da parede do tubo.

O teste de corrente parasita é um método rápido e confiável, podendo substituir o teste hidrostático no processo de fabricação de tubos. O princípio desse teste é a geração de uma corrente alternada de alta frequência na bobina primária, que desenvolve um campo magnético no tubo. Este campo magnético gera uma tensão na bobina secundária e, se os

tubos não apresentarem nenhum defeito, ocorre um equilíbrio elétrico entre as duas bobinas. Se um defeito estiver presente, a voltagem será diferente entre as duas bobinas e, dependendo da intensidade dessa diferença, o material pode ser reprovado. [2]

Para tubos de trocadores de calor e tubos de pequeno diâmetro, o teste de corrente parasita é o método mais utilizado. Apesar de muito eficaz, este método não deve ser utilizado para avaliar tubos com espessura de parede acima de 4-5 mm. Além disso, para tubos sem costura, o teste de corrente parasita é sempre feito com uma bobina circular que passa em volta do tubo.

Ultrassom

O ensaio de ultrassom é um ótimo método para detectar pequenos defeitos na parede do tubo. Todavia, é um método de teste relativamente lento, cuja calibração é demorada, o que o torna um ensaio de custo mais elevado quando comparado ao eddy-current.

Consequentemente este ensaio somente é recomendado para aplicações que sejam muito exigentes.

Com o teste de ultrassom é possível detectar defeitos internos e externos no tubo, assim como defeitos dentro da parede, conhecidos como “mid-wall defects”. Este teste também pode ser usado para confirmar características dimensionais do produto. Para tanto, toda a superfície do tubo é escaneada.

As normas utilizadas para testes de ultrassom são ASTM E213, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Seção III, artigo NB-2551. [6]

Ensaio de Achatamento

O ensaio de achatamento é basicamente um teste de ductilidade, no qual um anel, cortado de um tubo, é achatado até revelar heterogeneidades, trincas e outros defeitos no material.

É realizado colocando-se a amostra entre duas placas planas e achatado até uma determinada distância a ser atingida, a qual é calculada levando em conta as dimensões do tubo e o tipo de material. As superfícies interna e externa nos pontos sujeitos às maiores tensões não podem apresentar trincas ou falhas. O teste então é continuado até a amostra fraturar ou as duas paredes opostas se encontrarem e então a superfície é analisada visualmente.

No caso dos aços inoxidáveis duplex, o bom balanceamento e homogeneidade das fases presentes no material ajuda a garantir a ausência de falhas e trincas durante o teste. As figuras 1 e 2 apresentam o procedimento do teste e a amostra após a realização do mesmo. [2, 8]

Ensaio para aplicações específicas

Testes adicionais podem ser realizados para garantir a qualidade e rendimento do material, quando este é submetido a certas aplicações mais exigentes, como, por exemplo, algumas aplicações críticas na indústria de Óleo e Gás.

Estes testes podem evitar falhas importantes no projeto, porém é fundamental que o fabricante do material esteja preparado para realizá-lo, pois a falta de preparação para executá-los certamente vai demandar maior prazo de entrega e acrescentar custos extras ao material.

Microestrutura

O conteúdo de ferrita dos aços inox duplex deve ser mantido dentro dos limites expostos na tabela 1, a fim de obter o equilíbrio adequado entre boa resistência a corrosão e propriedades mecânicas.

A medição de quantidade de fase ferrítica presente na estrutura dos aços inoxidáveis é normalmente feita através de análise metalográfica ou com um ferritoscópio. Este equipamento, baseado na medição de permeabilidade magnética do material, é usado no produto durante a inspeção final. No caso dos AID(S), a medição é feita utilizando práticas metalográficas, com preparação, ataque de amostras e realização de contagem manual de pontos, de acordo com a norma ASTM E562. A identificação de fases intermetálicas é feita de acordo com a ASTM A923 com micrografias e utilização de ataques metalográficos indicados.

Como a distribuição dos elementos de liga nos aços inoxidáveis duplex não é homogênea, sendo a ferrita enriquecida em Cr e Mo, enquanto a austenita apresenta maiores teores de Ni e N, o desbalanceamento das quantidades de fase austenita e ferrita pode acarretar alteração nas propriedades mecânicas e de resistência a corrosão. [2, 5, 13]

Corrosão por pite e por fresta

Para testar um material contra processos de corrosão localizada, como por pite e por fresta, e se estabelecer um ranking de desempenho entre diferentes materiais, a norma ASTM G48 é a mais comumente empregada.

Este ensaio é um dos mais severos testes de corrosão por pite e fresta aplicado aos aços inoxidáveis. Ele consiste basicamente na exposição do material sem e com frestas (práticas A e B respectivamente), a uma solução de FeCl_3 a 6%. Esta solução é muito agressiva devido à presença simultânea do ânion cloreto e do cátion férrico, sendo este último extremamente oxidante e assim intensificando o ataque anódico.

A finalidade é determinar a temperatura crítica de pite (TCP) e a temperatura crítica de fresta (TCF) dos materiais que estão sendo analisados, objetivando principalmente uma comparação ou ranking entre os mesmos.

Em uma versão modificada do teste ASTM G48A a amostra é exposta por períodos de 24 horas. Quando, ao fim do período de 24 horas, são detectados pites e há perda substancial de peso (> 5 mg), o teste é interrompido. Caso contrário, aumenta-se a temperatura em 5°C e o teste é continuado por outro período com a mesma amostra. A figura 3 mostra as TCP e TCF obtidas através deste ensaio, objetivando a comparação e ranqueamento entre vários tipos de materiais.

A aplicação do ensaio de corrosão em solução de FeCl_3 com finalidade de avaliar e correlacionar a resistência à corrosão com a microestrutura do material (quanto à presença de intermetálicos) é detalhado na ASTM A923. [13,16,17]

Os testes de corrosão por fresta podem ser realizados com uma fresta artificial montada na amostra com um torque de $0,28\text{N}\cdot\text{m}$, de acordo com o procedimento MTI-2.

Ensaio potencioestático para determinar a TCP em soluções com teores de cloreto de sódio variando de 3 a 25% são mostrados na figura 4. A figura 5 mostra o efeito da elevação da acidez do meio sobre a TCP.

Em ambos os casos o potencial aplicado é 600 mV em relação ao eletrodo de calomelano saturado (ECS), que é um potencial muito alto e comparado ao potencial normalmente associado com água do mar não clorada. Portanto, este ensaio resulta em temperaturas críticas de pite e de fresta mais baixas em relação às atuantes nas condições práticas de trabalho em água do mar não clorada.

Corrosão Intergranular

Este teste é realizado de acordo com a ASTM A262, em uma ou mais de suas práticas, que sejam aplicáveis respectivamente a cada caso prático em particular.

O objetivo é garantir que não há a ocorrência de susceptibilidade a corrosão intergranular em decorrência do fenômeno conhecido como sensitização. A sensitização consiste na precipitação de carbonetos de cromo nos contornos de grão e o consequente empobrecimento de teor de cromo nas regiões adjacentes. Isto ocorre quando o aço inoxidável é submetido por períodos prolongados a temperaturas normalmente entre 550 e 850 °C, por exemplo, durante tratamento térmico ou soldagem. [1,3,17]

O teste feito conforme ASTM A262 pratica E, ensaio de Strauss, consiste na exposição de uma amostra do aço inoxidável em uma solução em ebulição de 16% de H₂SO₄ + 6% CuSO₄, com adição de limalha de cobre, por 24h. Após a exposição, a amostra é curvada e inspecionada visualmente, a fim de avaliar a presença de trincas originárias devido ao ataque intergranular. Os aços duplex SAF 2304, SAF 2205, SAF 2507 e SAF 2707 HD passam neste teste sem nenhuma restrição.

Corrosão sob tensão fraturante

Para analisar a resistência a corrosão sob tensão fraturante, geralmente utiliza-se a norma ASTM G36, a qual utiliza uma solução de 45% MgCl₂ em ebulição, a 155°C.

Todavia, testes feitos com a ASTM G36 modificada, a qual utiliza uma solução de 40% CaCl₂ a 100°C com pH 6,5, que é menos severa que a G36 original, tem apresentado as melhores correlações entre os resultados dos testes e os resultados da experiência prática em relação à ASTM G36.

Acidificando esta solução de teste a pH 1,5, a tensão limite para o SAF 2205 é reduzida significativamente, no entanto o mesmo não ocorre com o SAF 2507. A figura 7 ilustra o que foi exposto acima. Nota-se que a tensão limite para o SAF 2507 pela ASTM G36 modificada após 500 horas de teste sem sofrer corrosão, está acima de 90% da resistência a ruptura por tração, tanto para o metal base como para juntas soldadas.

A resistência a CST dos aços duplex em soluções neutras e aeradas contendo cloretos é apresentada na figura 6, onde o SAF 2507 e SAF 2707 HD não apresentaram sinais de CST para até 1.000 ppm de Cl⁻ a 300°C e para até 10.000 ppm de Cl⁻ a 250°C.

A tabela 5 mostra a máxima carga aplicável no material sem risco de apresentar CST, no meio proposto pela ASTM G36 modificada e pela solução definida na NACE TM 0177.

A figura 8 mostra o resultado de testes de CST à temperatura ambiente na solução A da NACE TM 0177 (5% NaCl e 0,5% de ácido acético saturado com H₂S). Nota-se que a tensão limite para o SAF 2507 após 500 horas de teste, está acima de 90% da resistência a ruptura por tração.

Em soluções aquosas contendo H₂S e cloretos a CST também pode ocorrer a temperaturas abaixo de 60°C para os aços inoxidáveis comuns. A corrosividade de tais soluções é afetada pela acidez e pelo conteúdo de cloretos. Em contraste direto com o que ocorre com a clássica CST induzida por cloretos, os aços ferríticos são mais sensíveis a este tipo de CST do que os austeníticos.[9,10,11,12,17]

É importante citar que para algumas aplicações, como ambientes contendo ácido sulfídrico, caso da indústria de óleo e gás, sugere-se a utilização das normas NACE MR0103 e MR0175.

No caso da corrosão sob tensão associada a sulfetos, a norma estabelece um valor máximo de dureza para cada AID.

Presença de fases intermetálicas - ASTM A923

Para identificar a presença de possíveis fases intermetálicas nos AID(s), é recomendável utilizar a norma ASTM A923, tendo em vista que a tenacidade e a resistência a corrosão são significativamente afetadas pela presença dos intermetálicos.

Os aços duplex são susceptíveis a formação de compostos intermetálicos durante a exposição a temperaturas no intervalo de aproximadamente 320 a 955 C. A velocidade das reações de precipitação é uma função da composição química e da história térmica ou termomecânica de cada peça individual e a presença destas fases intermetálicas é prejudicial à tenacidade e resistência a corrosão dos AID(S).

O tratamento térmico correto dos AID(S) pode eliminar a presença destas fases prejudiciais. Mesmo o material estando de acordo com os requisitos de composição química e de propriedades mecânicas para a especificação da peça em aço duplex, a ausência de fases intermetálicas no produto não é garantida.[13,17]

Três ensaios são propostos nesta norma:

- Prática A - Ataque eletrolítico com hidróxido de sódio: permite classificar a microestrutura do AID através de análise metalográfica, em relação a micrografias de referência apresentadas na norma. Esta prática é usada para aceitação do material, mas não para sua rejeição. Portanto, se houver rejeição nesta prática, as outras duas práticas obrigatoriamente deverão ser executadas.

- Prática B - Ensaio de resistência ao impacto Charpy: Este ensaio é diferente do ensaio padrão de resistência ao impacto Charpy e, por ser realizado em condições pré-determinadas por esta norma, tem como objetivo determinar a existência ou não de fases intermetálicas prejudiciais. A fim de ilustrar o efeito drástico da presença de intermetálicos no material na tenacidade, a figura 11 apresenta a relação entre a porcentagem de fase sigma e o resultado da prática B.

- Prática C - Ensaio de corrosão em solução de cloreto férrico: Ensaio relativamente semelhante ao proposto na ASTM G48, com critérios de aceitação e aplicabilidade apresentados na tabela 7. [13]

Teste de líquido penetrante

Este teste pode ser usado para detectar trincas na superfície do material. Defeitos internos não podem ser encontrados. O método é lento e é recomendado para analisar pequenas áreas, por exemplo, áreas de difícil acesso para os ensaios supracitados, para certificar a ausência de trincas. [2]

Qualificação da Usina

Para avaliar a oferta de diferentes fabricantes, especialmente na compra de tubos, é sempre essencial avaliar a capacidade de produção do mesmo. Um modo de garantir a capacidade do fabricante de produzir um material de boa qualidade é pedir e verificar detalhadamente suas referências de aplicações relevantes do material. Se estas informações não estiverem disponíveis ou forem julgadas insuficientes, a pré-qualificação do material pode ser uma boa alternativa. Três requisitos, além dos testes de fornecimento já descritos, são importantes para garantir a competência de uma usina na fabricação de AID(S): [1]

- ASTM G36, para garantir a resistência a corrosão sob tensão na presença de cloretos.
- NACE TM-0177, para garantir a resistência a corrosão sob tensão na presença de sulfetos (H₂S)
- Utilização do método AOD (Argon Oxygen Decarburisation) ou equivalente. Na produção do aço inoxidável o refino do aço em um conversor AOD ou equivalente permite maior controle da porcentagem de carbono e de outros elementos que não são controlados nas etapas anteriores de fabricação, como o nitrogênio. A adição do nitrogênio nos duplex modernos torna possível que a resistência a corrosão e a tenacidade da ZTA sejam muito próximas entre o metal base e as juntas soldadas na condição após soldagem. O nitrogênio também reduz a velocidade em que se formam as fases metálicas prejudiciais.

Discussão

Os aços duplex têm sido selecionados para substituir vários materiais em aplicações em ambientes severos, muitas vezes em equipamentos críticos de um determinado processo produtivo. Portanto, é necessário verificar não só a composição química da liga, mas também o equilíbrio de fases e todas as propriedades inerentes ao material.

Alguns métodos simples para garantir tal qualidade do produto são o PRE calculado pela composição química da liga, a determinação pela ASTM G48 da temperatura crítica de pite (TCP) e da temperatura crítica de fresta (TCF) e a verificação da presença de possíveis fases intermetálicas prejudiciais através da análise microestrutural pela ASTM A923. Desta maneira, evita-se materiais com quantidades substanciais de fases intermetálicas prejudiciais, teores inadequados de fases ferrítica ou austenítica, fragilidades e defeitos originários de processos de fabricação.

É possível economizar tempo e recursos se os testes forem criteriosamente escolhidos. Para isto, as especificações dos materiais devem estar de acordo com a aplicação e propriedades do mesmo, possibilitando assim, escolher um método direcionado para avaliar a qualidade do material.

Conclusões

Uma vez escolhida a usina que possua um conversor AOD ou equivalente e que seja capaz de realizar os testes necessários para a fabricação de AID(S) de boa qualidade, as propriedades descritas neste trabalho são analisadas com os seguintes testes e ensaios:

- Ensaios de fornecimento e normas de fabricação:
 - Normas ASTM A789, 790 e 751
 - Resistência mecânica
 - Teste hidrostático
 - Teste de corrente parasita (eddy-current)
 - Ultrassom
 - Ensaio de achatamento
- Ensaios específicos:
 - Intermetálicos prejudiciais ASTM A923
 - Determinação de fases ASTM E562
 - Resistência a corrosão por pite e fresta ASTM G48, práticas A e B
 - Resistência a corrosão Intergranular A262, prática E
 - Resistência a corrosão sob tensão G36 (modificada ou não), NACE TM 0177, MR 0175, MR 0103.
 - Líquido penetrante

Referências bibliográficas

- [1] ERIKSSON, H., NICHOLLS, M. Testing and selection of duplex stainless steels for sour environments. **R&D Centre AB Sandvik Steel**, Sandviken, Apr. 1994, 10 p.
- [2] SANDVIK MATERIALS TECHNOLOGY. **Sales Training Manual**. 182p.1998.
- [3] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **A 262**: Standard Practices for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steels1. 2008.
- [4] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **A 789/790**: Standard Specification for Seamless and Welded Ferritic/Austenitic Stainless Steel Pipe1.2008
- [5] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E 562**: Standard Test Method for Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point Count1. 2008
- [6] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E 213**: Standard Specification for Seamless Ferritic and Austenitic Alloy-Steel Boiler, Superheater, and Heat-Exchanger Tubes1. 2009
- [7] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **A 751**: Standard Test Methods, Practices, and Terminology for Chemical Analysis of Steel Products1.2008
- [8] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **A 370**: Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products1.2009
- [8] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **A 1016**: Standard Specification for General Requirements for Ferritic Alloy Steel, Austenitic Alloy Steel, and Stainless Steel Tubes1. 2008
- [9] SANDVIK MATERIALS TECHNOLOGY. **Sandvik SAF 2507 Material Datasheet**. Sandviken, Sweden. 8p. 2008.
- [10] SANDVIK MATERIALS TECHNOLOGY. **Sandvik SAF 2205 Material Datasheet**. Sandviken, Sweden. 8p. 2008.
- [11] SANDVIK MATERIALS TECHNOLOGY. **Sandvik SAF 2304 Material Datasheet**. Sandviken, Sweden. 8p. 2008.
- [12] SANDVIK MATERIALS TECHNOLOGY. **Sandvik SAF 2707 HD Material Datasheet**. Sandviken, Sweden. 6p. 2008.
- [13] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **A 923**: Standard test method for detection detrimental intermetallic phase in duplex austenitic/ferritic stainless steels. 2008.
- [14] R.S. TRESEDER, T.F. DEGNAN, MTI-2 Test Method, Corrosion testing of Iron and Nickel- based alloys – Test methods, St. Louis, MO, 1995.
- [15] NILSSON, J.-O., WILSON, A. , JOSEFSSON, B. & THORVALDSSON, T. Relationship between pitting corrosion, toughness and microstructure for isothermally heat treated super duplex stainless steel. **Applications of Stainless Steel '92**, Jernkontoret, The Institute of Metals, ASM International, Estocolmo, Suécia, vol 1, 280-89, junho 1992.
- [16] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **G48**: Standard test methods for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Stainless steels and related alloys by use of ferric chloride solution.. 2008.
- [17] SANDVIK MATERIALS TECHNOLOGY. **Corrosion Handbook for stainless steels**. 140p.1999.

Figuras e Tabelas

Sandvik Grade	% Cr	% Ni	% Mo	% N	% C	% Si	% Mn	% P	% S	Conteúdo de ferrita - % vol
SAF 2304	21,5-24,5	3,0-5,5	-	0,05-0,20	0,02	0,8	1,2	0,03	0,015	40-60
SAF 2205	22,0-23,0	4,5-6,5	3,0-3,5	0,14-0,20	0,03	1,0	2,0	0,03	0,015	40-60
SAF 2507	24,0-26,0	6,0-8,0	3,0-5,0	0,24-0,32	0,03	0,5	1,2	0,03	0,015	35-55
SAF 2707 HD	26,0-29,0	5,5-9,5	4,0-5,0	0,30-0,50	0,03	0,5	1,5	0,035	0,010	35-55

Tabela 1 – Composição química nominal dos aços inoxidáveis duplex. [1, 9,10,11,12]

Sandvik Grade	UNS	EN Nr	W. Nr	EN name / DIN
SAF 2304	S32304	1.4362	1.4362	X 2 CrNiN 23 4
SAF 2205	S31803/S32205	1.4362	1.4362	X 2 CrNiMoN 22 5 3
SAF 2507	S32750	1.4410	1.4410	X 2 CrNiMoN 25 7 4
SAF 2707 HD	S32707 HD	-	-	-

Tabela 2 – Denominações padronizadas para os aços duplex. [1, 9,10,11,12]

Sandvik Grade	Limite de escoamento - Rp 0.2% - Mpa min.	Limite de escoamento - Rp 1.0% - MPa min.	Resistência a tração - R _m - Mpa	Alongamento - A5 - % min.	Dureza HRC max.
SAF 2304	400	450	600-820	25	30,5
SAF 2205	450	500	680-880	25	28
SAF 2507	550	640	800-1000	25	32
SAF 2707 HD	700	800	920-1100	25	34

Tabela 3 – Valores de propriedades mecânicas e dureza para aços inoxidáveis duplex. Os valores são para materiais na condição recozido. [1, 9,10,11,12]

Unified Numbering System	PRE - Valores mínimos	PRE for equivalent Sandvik grades	Temp. mínima de resit. Corr. pite sugerida ASTM G48A	TCP material Sandvik	Temp. mínima de resit. Corr. fresta sugerida ASTM G48B – MTI-2	TCF material Sandvik
UNS S32304	24	24	-	-	-	-
UNS S32205	35	>35	25 °C	30 °C	15 °C	20 °C
UNS S32750	41	42,5	45 °C	80 °C	35 °C	50 °C
USN S32707	48	49	-	97,5 °C	-	70 °C

Tabela 4. Aços duplex Sandvik - valores mínimos de PRE, temperatura crítica de pite (TCP) e temperatura crítica de fresta (TCF). [1, 9,10,11,12]

Sandvik Grade	Carga Max. - 40% CaCl ₂ - pH = 6.5 - 100 °C	Carga Max. - NACE TM 0177
SAF 2304	80 % do R _m	Não testado
SAF 2205	80 % do R _m	90 % do R _{p0.2}
SAF 2507	90 % do R _m	90 % do R _m
SAF 2707 HD	-	-

Tabela 5 – Teste com carga constante para aços inoxidáveis duplex Sandvik. Valores máximos de tensões admissíveis em porcentagem do limite de escoamento (R_{p0.2}) ou do limite de resistência a tração (R_m), quando testado em 40% CaCl₂ pH 6.5 a 100°C e testado de acordo com a NACE TM 0177. [1, 9,10,11,12]

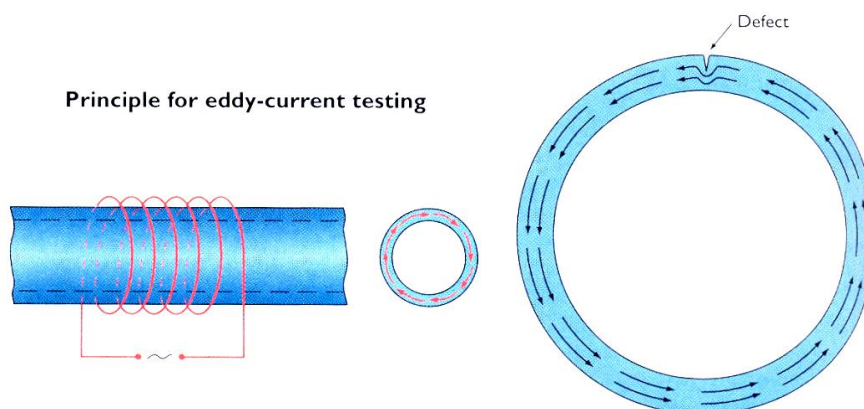


Figura 1. Ilustração esquemática do teste de corrente parasita, com a geração de corrente no tubo pela bobina (esquerda) e a presença de um defeito alterando a corrente no tubo (direita).
[2]

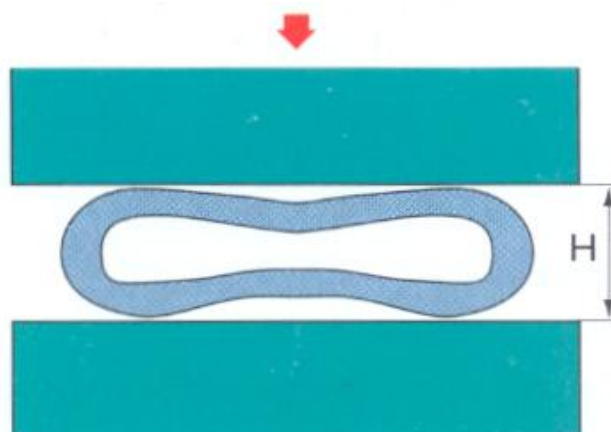


Figura 1 – Teste de achatamento [2]



Figura 2 – Amostra de teste de achatamento [2]

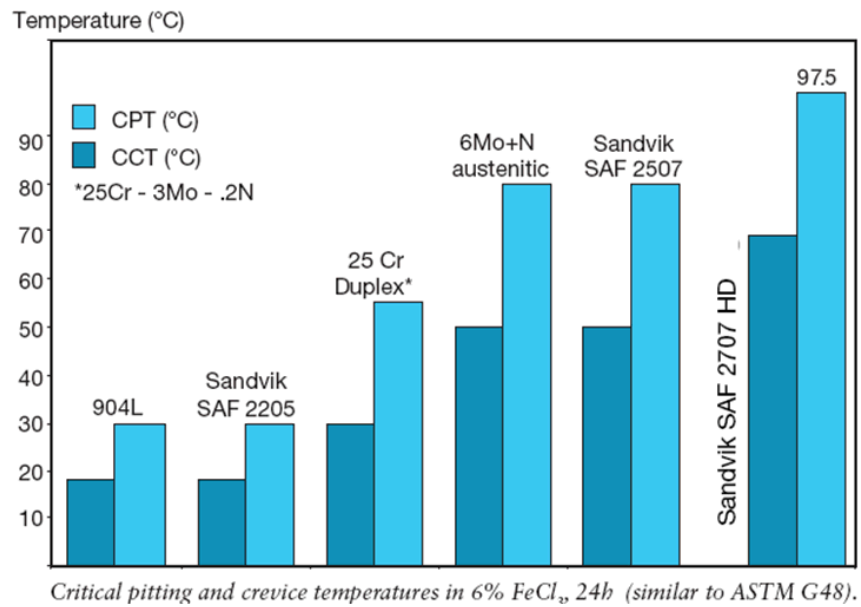


Figura 3. TCP e TCF em 6% FeCl₃, 24 horas (similar a ASTM G48). [12]

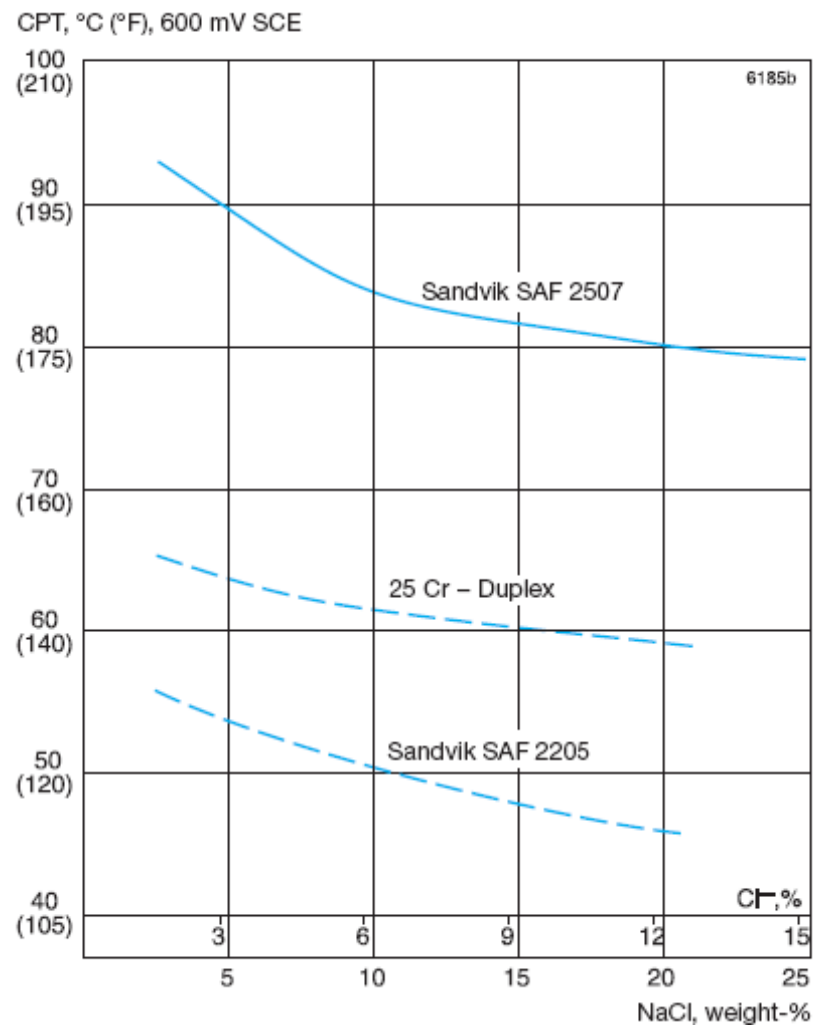


Figura 4. CPT a concentrações de NaCl variando de 3 a 25% (determinação potenciostática a +600 mV ESC com superfície lixada com papel grana 600).[9]

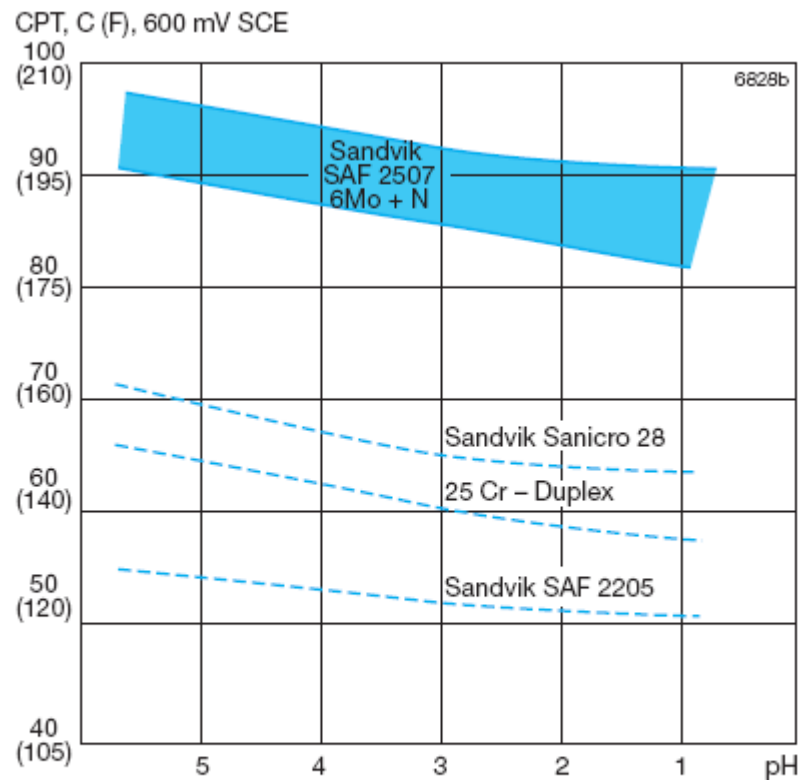


Figura 5. CPT em 3% NaCl com variação do pH (determinação potenciostática a +600 mV ESC com superfície lixada com papel grana 600). [9]

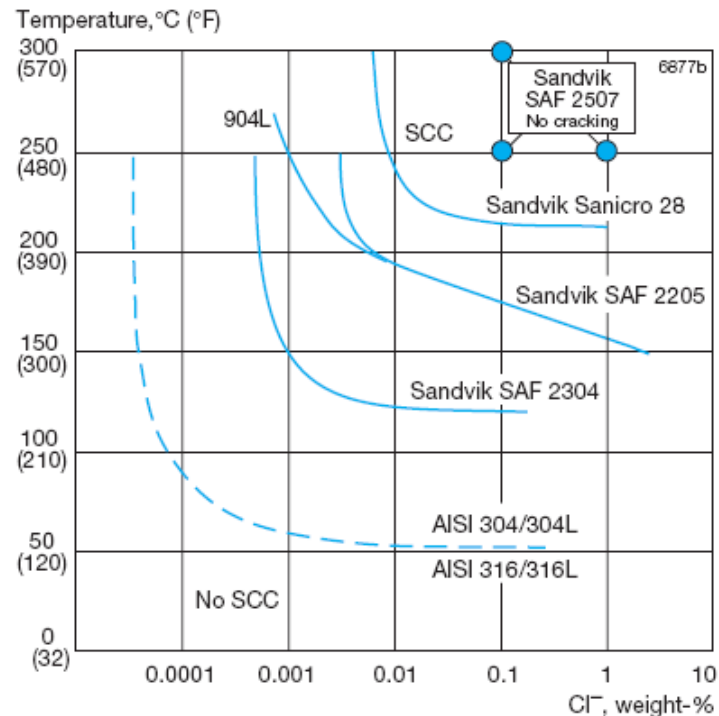


Figura 6. Resistência a CST em soluções com cloretos, neutras e aeradas (cerca de 8 ppm de O₂). Tempo de teste 1000 horas. Tensões aplicadas iguais ao limite de escoamento na temperatura de teste. [9]

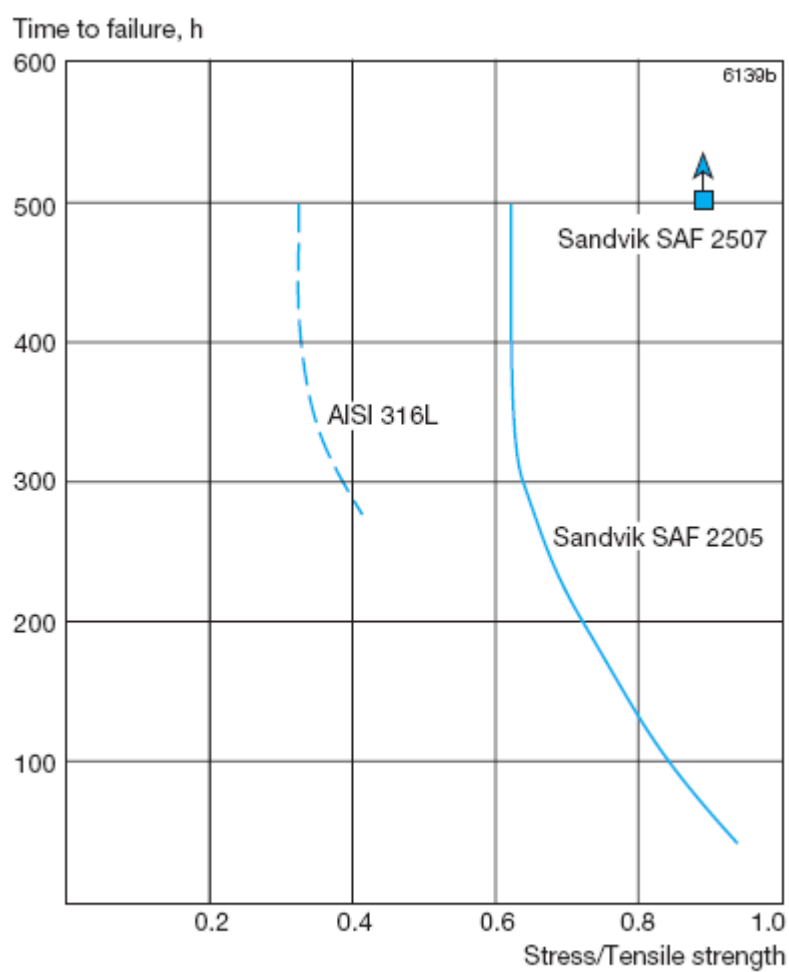


Figura 7. Resultados de testes de CST com carga constante em 40% CaCl₂, pH = 1,5, a 100°C com solução de teste aerada. [9]

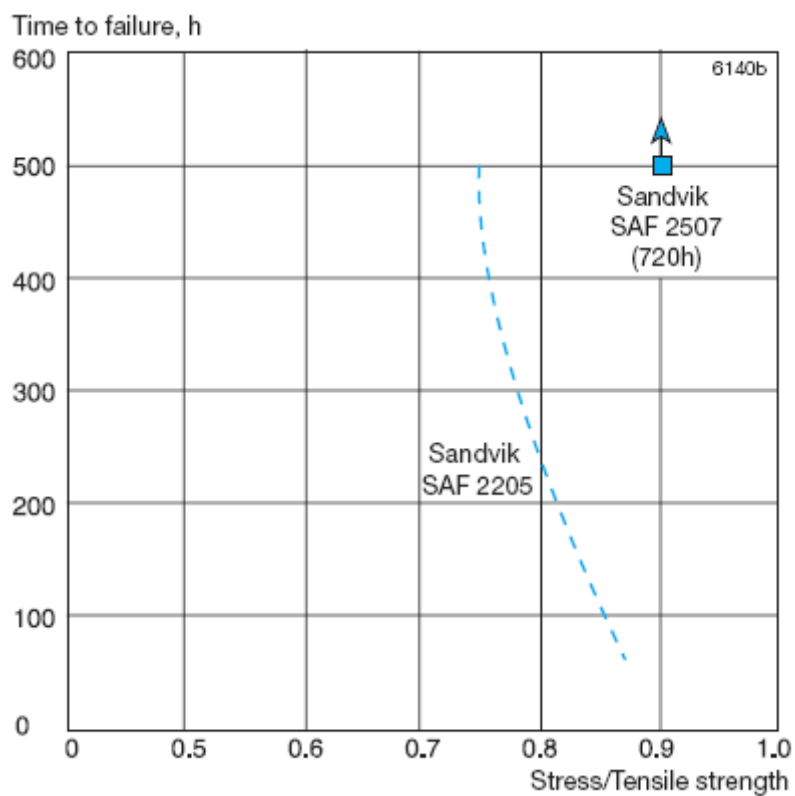


Figura 8. Testes de CST com carga constate na solução NACE a temperatura ambiente (NACE 0177). [9]

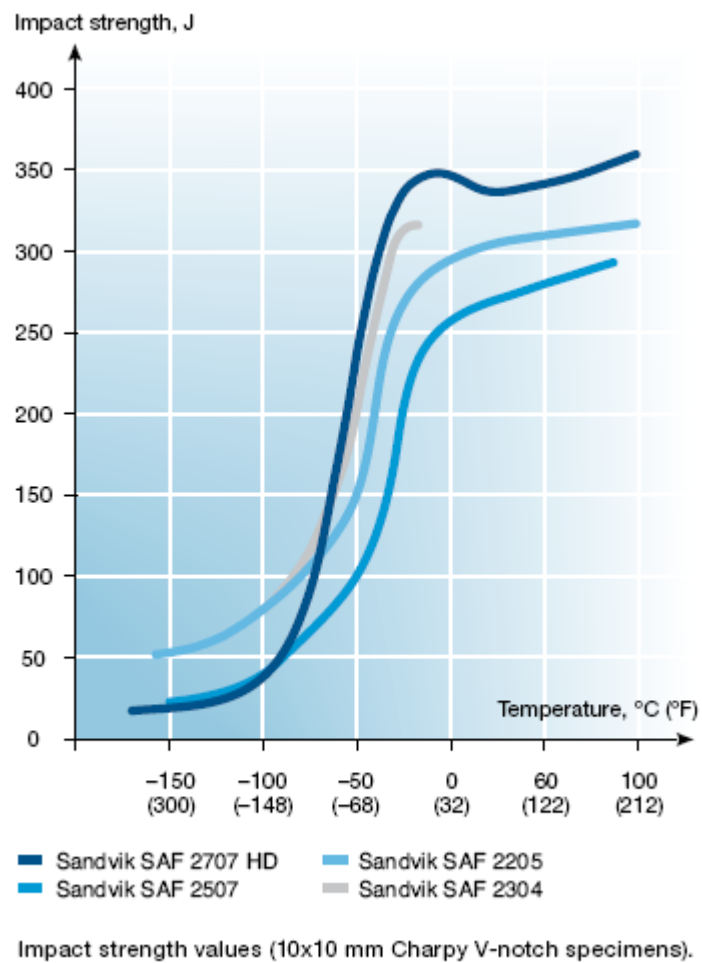


Figura 9. Requisitos de resistência ao impacto para aços inoxidáveis duplex. Valores médios para 3 amostras para cada temperatura; Charpy-V 10x10mm. [17]

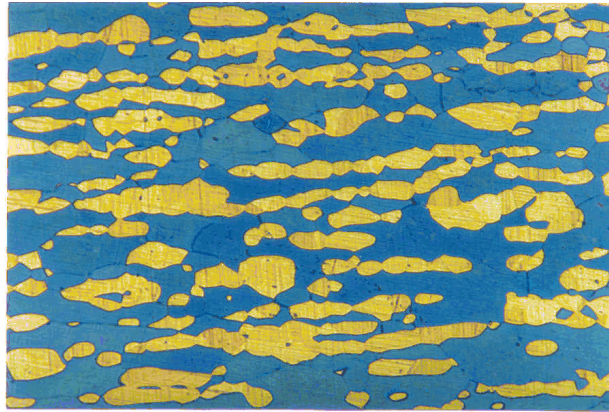


Figura10. Microestrutura típica de um aço duplex moderno. Áreas em azul: matriz ferrítica; Áreas em amarelo: ilhas de austenita. [2]

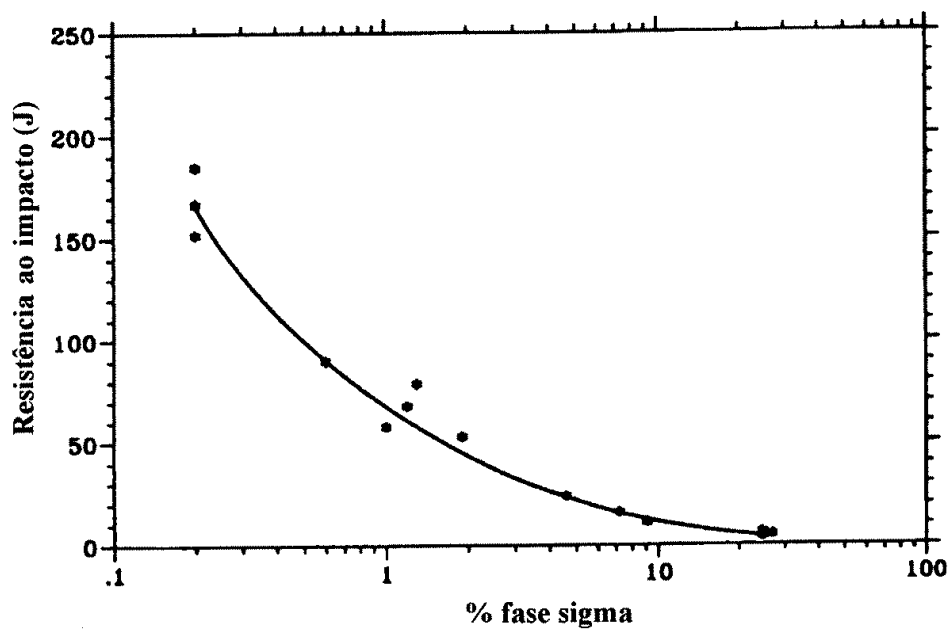


Figura 11. Influência do volume de fase sigma na resistência ao impacto de um SAF 2507. [15]

Grade	Condition	Test Temperature	Minimum Impact Energy ^A
S31803, S32205, J92205	base metal	−40°F (−40°C)	40 ft-lb (54 J) ^A
	heat-affected zone	−40°F (−40°C)	40 ft-lb (54 J) ^A
	weld metal	−40°F (−40°C)	25 ft-lb (34 J) ^A
S32750	base metal	−40°F (−40°C)	^B
J93404	base metal	−50°F (−46°C)	40 ft-lb (54 J) ^A

^A Energy for a full-size specimen. Required energy for a subsize specimen is reduced in direct proportion to the reduced area of the subsize specimen relative to that of the full-size specimen.

^B The acceptable minimum impact energy shall be agreed upon by seller and purchaser.

Tabela 6. Critério de aplicabilidade e aceitação para a prática B da ASTM A923.[13]

Grade	Condition	Test Temperature	Maximum Acceptable Corrosion Rate Calculated from Weight Loss
S31803, S32205	base metal	25°C (77°F)	10 mdd
	weld metal	22°C (72°F)	10 mdd
S32750	base metal	40°C (104°F)	10 mdd
S32550	base metal	40°C (104°F)	10 mdd
S32520	base metal	40°C (104°F)	10 mdd

Tabela 7. Critério de aplicabilidade e aceitação para a prática C da ASTM A923.[13]