

# ÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX E SUPERDUPLEX: ASPECTOS DE METALURGIA FÍSICA, SOLDAGEM E CORROSÃO<sup>1</sup>

Nívea Boechat dos Santos<sup>2</sup>  
Frederico de Carvalho Nunes<sup>3</sup>  
Toseli de Farias Matos<sup>4</sup>  
Anderson Zuin Salustiano<sup>5</sup>  
Rafael Oliveira da Mota<sup>6</sup>

## Resumo

O objetivo deste trabalho é apresentar uma revisão sobre os aços inoxidáveis duplex e superduplex. Sua microestrutura é constituída de ferrita e austenita, apresentando uma combinação da boa resistência mecânica e da corrosão sob tensão (principalmente em meios contendo cloretos) da fase ferrítica e da tenacidade e resistência à fragilização pelo hidrogênio da fase austenítica. Em vista de suas características, esses aços têm sido amplamente empregados na indústria de petróleo, em condições severas de serviço. Nessa revisão foram levantados os principais aspectos dos aços duplex e superduplex relacionados à metalurgia física – balanço ferrita-austenita e precipitação de fases intermetálicas; soldagem – processos utilizados e influência das principais variáveis; e corrosão – principais mecanismos e fatores que influenciam a resistência à corrosão desses aços. De forma geral, a combinação entre ferrita e austenita confere aos aços duplex resistência mecânica e resistência à corrosão superiores às dos aços inoxidáveis convencionais. O balanço entre as fases é um fator extremamente importante. Durante a soldagem, entretanto, esse balanço é alterado e a precipitação de fases deletérias às propriedades mecânicas e de corrosão do material pode ocorrer. Em vista disso, durante esse procedimento os parâmetros de soldagem devem ser monitorados e controlados rigorosamente.

**Palavras-chave:** Aços duplex e superduplex; Metalurgia física; Soldagem; Corrosão

## DUPLEX AND SUPERDUPLEX STAINLESS STEELS: ASPECTS OF PHYSICAL METALLURGY, WELDING AND CORROSION

### Abstract

The goal of this work is to present a review on duplex and superduplex stainless steels. Their main microstructural constituents are ferrite and austenite. They combine the high mechanical strength and stress corrosion cracking resistance (especially in chloride-containing environments) of the ferrite and the high toughness and resistance to hydrogen embrittlement of the austenite. Due to their characteristics, these steels are largely used in the petroleum industry, under severe service conditions. The main aspects of the duplex steels were taken into consideration: physical metallurgy – balance ferrite-austenite and precipitation of intermetallic phases, welding – processes and influence of welding variables, and corrosion – main mechanisms and factors which influence the corrosion resistance of these steels. In general, the combination of ferrite and austenite confer better mechanical strength and corrosion resistance in comparison to conventional stainless steels. The balance of the phases is an extremely important factor. However, during welding this balance is altered and the precipitation of deleterious phases regarding mechanical and corrosion properties can result. Consequently, during this procedure the welding parameters shall be monitored and strictly controlled.

**Key words:** Duplex and superduplex stainless steels; Physical metallurgy; Welding; Corrosion.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheira de Materiais (Fundação Coppetec), e-mail: nivea@metalmat.ufrj.br

<sup>3</sup> Engenheiro Metalúrgico e de Materiais, D.Sc. (Fundação Coppetec)

<sup>4</sup> Engenheiro Mecânico, M.Sc. (Fundação Coppetec)

<sup>5</sup> Engenheiro de Materiais (Fundação Coppetec)

<sup>6</sup> Engenheiro Metalurgista (Fundação Coppetec)

## 1 INTRODUÇÃO

Os aços duplex apresentam como principal característica a matriz composta de ferrita e austenita, geralmente na proporção de 1:1. O início de sua utilização industrial data de 1912, mas considera-se que seu uso comercial extensivo iniciou-se na década de 70. Essa só foi considerada uma classe separada de aços inoxidáveis a partir dos anos 80.<sup>(1)</sup> Os principais elementos de liga presentes são cromo e níquel. As vantagens desses aços em relação aos aços austeníticos residem nas melhores propriedades mecânicas de tensão de escoamento e resistência à tração, além da maior resistência à corrosão sob tensão. Em relação aos aços ferríticos, os aços duplex apresentam maior resistência à fragilização pelo hidrogênio, além de possuir uma elevada tenacidade devido à grande fração volumétrica de austenita. Sua boa resistência à corrosão deve-se principalmente ao teor elevado de cromo. Dessa forma, esses aços podem substituir as superligas de níquel em muitas aplicações, com menor custo.<sup>(2)</sup>

Na indústria *offshore* os aços duplex são utilizados tanto na produção quanto no processamento e transporte de óleo e gás, na produção de água e sistemas de água do mar, na fabricação de umbilicais submarinos, em componentes submersos sem proteção catódica, entre outros.<sup>(3)</sup> Essas aplicações apresentam condições severas de serviço, como meio altamente agressivo e altas temperaturas. De forma a satisfazer essas condições foram desenvolvidos os aços superduplex, que apresentam como principal característica um elevado índice equivalente de resistência ao pite (*PRE*), que para esses aços é acima de 40. Para isso lançou-se mão da utilização de maior teor de nitrogênio além de molibdênio e tungstênio, dependendo da liga. O *PRE* é definido da seguinte forma:<sup>(4)</sup>

$$PRE_N = (\%Cr) + 3,3.(\%Mo) + 16.(\%N)$$

ou

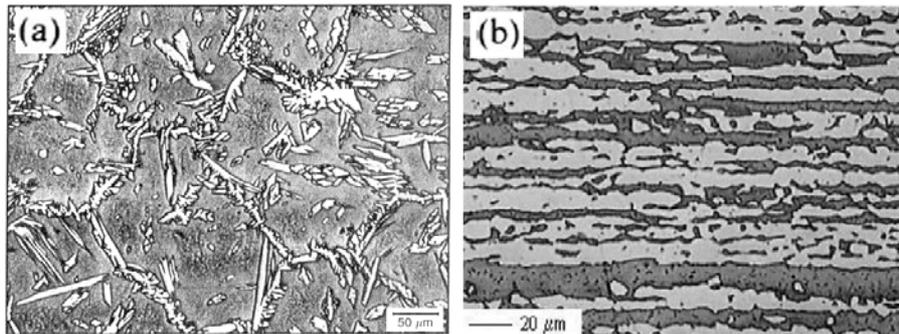
$$PRE_W = (\%Cr) + 3,3.(\%Mo + 0,5.(\%W)) + 16.(\%N), \text{ nas ligas com adição de W}$$

O objetivo do trabalho é apresentar uma revisão sobre as principais características dos aços inoxidáveis duplex trabalhados, em termos de metalurgia física, características de soldagem e propriedades de corrosão.

## 2 METALURGIA FÍSICA

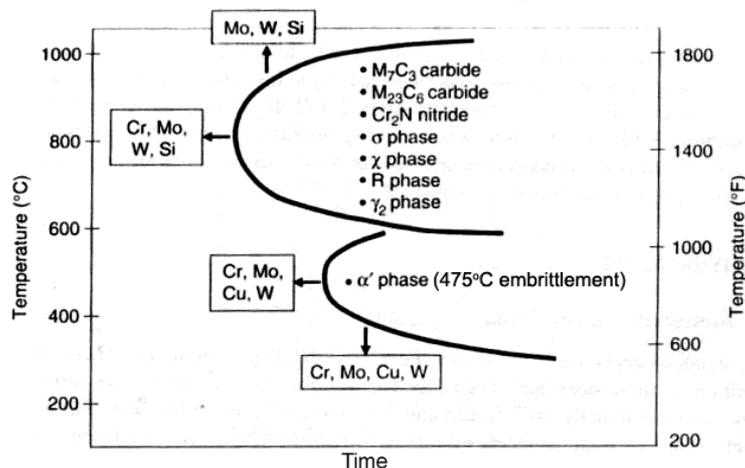
O balanço ferrita/austenita dos aços inoxidáveis duplex depende das proporções dos elementos estabilizadores de ferrita (Cr, Mo, Ti, Nb, W) e de austenita (Ni, C, N, Mn, Co).

O material se solidifica com 100% de ferrita e a austenita é formada durante o resfriamento subsequente, nos contornos de grão da ferrita primária por um processo de nucleação e crescimento. Austenita adicional pode ser formada intragranularmente na ferrita primária.<sup>(2)</sup> A Figura 1 apresenta a microestrutura típica dos aços duplex.



**Figura 1.** Microestrutura dos aços duplex: a) austenita nos contornos de grão e intergranular na matriz ferrítica<sup>(2)</sup>, b) textura de laminação<sup>(5)</sup>

Devido à complexidade das muitas adições de elementos de liga aos aços duplex, um elevado número de precipitados intermetálicos pode se formar abaixo de 1000°C, conforme mostrado na Figura 2. Desta forma, deve-se evitar o processamento do material a temperaturas abaixo deste valor.



**Figura 2.** Precipitados que podem ser formados nos aços duplex, em função da temperatura e da composição química<sup>(2)</sup>

Os principais tipos de precipitados encontrados em aços duplex e suas características são apresentados a seguir:

- fase  $\sigma$  (FeCr ou FeCrMo): é a fase mais deletéria para os aços duplex, pois sua ocorrência acarreta a depleção de Cr em volta dos precipitados, prejudicando as propriedades mecânicas e de corrosão. Nucleia-se nos contornos de grão ferríticos e nas interfaces ferrita/austenita, crescendo na ferrita. Formação favorecida pelos teores de Cr e Mo;<sup>(6)</sup>

- Fase  $\chi$  ( $\text{Fe}_{36}\text{Cr}_{12}\text{Mo}_{10}$  ou  $\text{Fe}_{18}\text{Cr}_6\text{Mo}_5$ ): é uma fase metaestável, sendo prejudicial por se transformar em fase  $\sigma$  após exposição entre 400 e 950°C;<sup>(7)</sup>

- Fase  $\alpha'$  (fragilização a 475°C): formada pela decomposição espinoidal da ferrita após exposição a 475°C. Fase rica em Cr, que causa perda de ductilidade do aço;<sup>(8)</sup>

- Nitretos de cromo ( $\text{Cr}_2\text{N}$ ): deletérios às propriedades mecânicas e à resistência à corrosão devido à depleção de Cr em volta dos precipitados. Forma-se na ferrita em condições de taxa de resfriamento elevadas. Formação estimulada pela presença de elementos ferritizantes.<sup>(8)</sup>

Além dos tipos apresentados acima também há os carbonetos de cromo, que são prejudiciais se formados nos contornos de grão. Porém estes são pouco frequentes nos aços duplex, devido a seu baixo teor de carbono.

### 3 SOLDAGEM

As diversas variáveis relacionadas ao processo de soldagem têm influência direta sobre a microestrutura e as propriedades mecânicas e de corrosão das juntas soldadas de aços duplex. Processos de soldagem com fontes de calor de elevada densidade devem ser evitados, devido à alta taxa de resfriamento, visto que esse é um dos principais parâmetros ligados ao balanço ferrita-austenita. Altas taxas de resfriamento favorecem uma estrutura predominantemente ferrítica.<sup>(2)</sup>

Nos procedimentos de soldagem usados em aços duplex as taxas de resfriamento são inerentemente altas, o que ocasiona um resfriamento fora das condições de equilíbrio. O reaquecimento causado pela aplicação de outro passe de soldagem resulta na formação da chamada austenita secundária. Esta pode se formar nos contornos de grão ferríticos, intragranularmente ou associada a carbonetos e nitretos. A presença da austenita secundária é indesejável, pois essa fase diminui a resistência ao pite do aço. Por outro lado, taxas de resfriamento mais baixas favorecem a formação de precipitados intermetálicos indesejáveis, em especial nos aços superduplex, que apresentam maior teor de elementos de liga.

Em vista das mudanças microestruturais introduzidas pela soldagem, as fórmulas de índice equivalente de resistência ao pite (*PRE*) só são válidas para aços duplex na condição de solubilizados.

Com o intuito de minimizar os problemas ocasionados pela complexa soldagem de aços duplex, Kotecki<sup>(9)</sup> propôs um tratamento térmico pós-solda em etapas, que consiste no aquecimento a 1150°C e manutenção a essa temperatura por tempo suficiente para dissolver os precipitados intermetálicos (em especial a fase  $\sigma$ ), resfriamento ao forno até 1040°C – de modo a formar quantidade adequada de austenita – e manutenção a essa temperatura por 2h, seguida de têmpera. Como a nucleação de fase  $\sigma$  é muito lenta a 1040°C, a têmpera é realizada após um tempo que não é suficiente para nuclear essa fase, permitindo também um correto balanço ferrita-austenita.

Dentre os métodos de soldagem, aqueles que resultam em metal de solda com teor de oxigênio reduzido são os mais indicados. Dessa forma devem ser usados preferencialmente os métodos TIG ou MIG. Recomenda-se que a solda de raiz de aços duplex seja realizada usando TIG.<sup>(10)</sup>

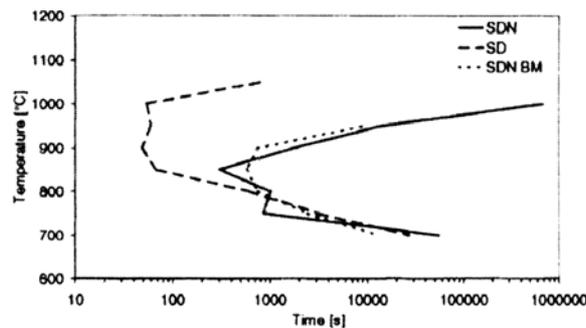
As faixas de aporte térmico para aços duplex e superduplex são, respectivamente: 0,5 a 2,5 kJ/mm e 0,2 a 1,5 kJ/mm.<sup>(11)</sup> O segundo passe da solda deve ser feito a frio, após o resfriamento da solda de raiz. A temperatura de interpasse para esses aços deve ser no máximo de 150°C, de forma a prevenir a formação de precipitados intermetálicos indesejáveis.<sup>(12)</sup>

Com as faixas de aporte térmico recomendadas para esses aços ocorrem problemas com a penetração da solda. Ames et al.<sup>(13)</sup> conseguiram realizar soldas de qualidade com menor valor de aporte térmico através do uso de um tipo de fluxo em pasta. O uso desse fluxo permitiu o aumento da penetração da solda em até 300% em comparação com o uso do método TIG sem fluxo na soldagem do aço duplex SAF 2507.

O gás de proteção usado na soldagem evita a presença de oxigênio na poça de fusão. Para os aços duplex é adicionado nitrogênio a esse gás, que por ser

elemento austenitizante, melhora o balanço ferrita-austenita do metal de solda<sup>(2)</sup>. O teor de nitrogênio ideal é de 2%. O excesso desse elemento – teores mais altos do que 5% – aumenta a probabilidade da formação de nitretos de cromo, o que é indesejável.<sup>(14)</sup>

A correta escolha do consumível é de extrema importância. Devido às altas taxas de resfriamento, o consumível deve apresentar teores maiores de elementos de liga austenitizantes – níquel e nitrogênio – do que o metal de base.<sup>(2)</sup> A composição química do consumível de soldagem também apresenta influência na fração volumétrica de precipitados intermetálicos. Gregori e Nilsson<sup>(7)</sup> compararam dois consumíveis para a soldagem de um aço duplex e constataram diferença significativa na susceptibilidade à formação de fase  $\sigma$ , conforme mostrado nas curvas TTT da Figura 3.

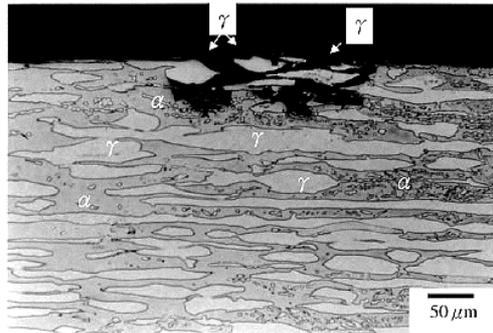


**Figura 3.** Curvas TTT para a formação de fase  $\sigma$  para os consumíveis – SD (29%Cr; 8%Ni; 2%Mo; 0,39%N) e SDN (25%Cr; 10%Ni; 4%Mo; 0,28%N) – onde SDN BM representa o metal de base.<sup>(7)</sup>

No caso da soldagem de dutos de aços duplex, deve-se tomar o cuidado de realizar purga com gás inerte no interior do duto. Esse procedimento visa reduzir o nível de oxigênio nessa região, que não é protegida no processo de soldagem.<sup>(15)</sup> A prática recomendada AWS C5.5<sup>(10)</sup> apresenta os métodos de purga a serem utilizados. Um dos problemas relacionados à presença de oxigênio é a diminuição da resistência ao pite da junta soldada. Um valor tão baixo quanto 25 ppm de  $O_2$  em argônio pode reduzir significativamente a resistência à corrosão por pite do aço duplex.<sup>(16)</sup>

#### 4 ASPECTOS DE CORROSÃO

A microestrutura bifásica dos aços duplex introduz alguns fatores especiais relacionados ao comportamento dos aços duplex quanto à corrosão galvânica, uma vez que a interação das duas fases, que apresentam diferentes resistências à corrosão, deve ser levada em conta. Symnietis-Barrdahl<sup>(17)</sup> constatou que a ferrita é anódica em relação à austenita em soluções 4 N  $H_2SO_4$ , com adições de até 2 N HCl, levando ao efeito de corrosão seletiva, uma vez que a taxa de dissolução da ferrita no aço duplex é maior que a do material puramente ferrítico. A Figura 4 mostra a dissolução preferencial da fase ferrítica de um aço duplex.



**Figura 4.** Dissolução seletiva da fase ferrítica de um aço duplex solubilizado após ensaio de corrosão sob tensão em solução de 40%p  $\text{CaCl}_2$  <sup>(18)</sup>

Os aços duplex congregam a resistência à corrosão sob tensão dos aços ferríticos e a resistência à fragilização pelo hidrogênio dos aços austeníticos. No entanto, também agregam algumas limitações dessas fases, como a susceptibilidade à fragilização pelo hidrogênio dos aços ferríticos e a sensibilidade à corrosão sob tensão dos aços austeníticos. Ainda assim, o desempenho dos aços duplex é superior ao dos aços inoxidáveis convencionais.

Em aços duplex solubilizados pode ocorrer pite tanto na austenita como na ferrita. Porém, como os aços duplex atuais contêm nitrogênio, que se apresenta em maiores teores na austenita, a resistência à formação por pite será maior nessa fase. <sup>(19,20)</sup> Tshai e Chen <sup>(21)</sup> estudaram o aço SAF 2205 em 26% NaCl a 90°C e verificaram que os pites eram resultado de corrosão seletiva da ferrita, mantendo-se a austenita pouco corroída dentro dos pites formados.

Potgieter <sup>(22)</sup> mostrou que o aço SAF 2205 com frações volumétricas crescentes de fase  $\sigma$  apresentava redução proporcional na resistência à corrosão por pite. A partir de 6% de fase sigma, em solução 3,5% NaCl, pites se formam facilmente, tanto na ferrita como na austenita. De fato, o autor afirmou que a presença de fase sigma é mais deletéria para a resistência à corrosão por pite do que para a resistência à corrosão generalizada. Sob esse aspecto, Nilsson e Wilson, <sup>(23)</sup> estudando o aço SAF 2507 afirmaram que a presença de fase  $\sigma$  é o principal fator para a redução da resistência à corrosão por pite se comparada a outros precipitados, como nitretos, por exemplo.

Em se tratando de aços duplex soldados, sabe-se que a austenita secundária é mais susceptível à corrosão por pite que as fases ferrita e austenita primárias. Isto se deve ao fato de a austenita secundária possuir um baixo teor de N, Cr e Mo. <sup>(24)</sup>

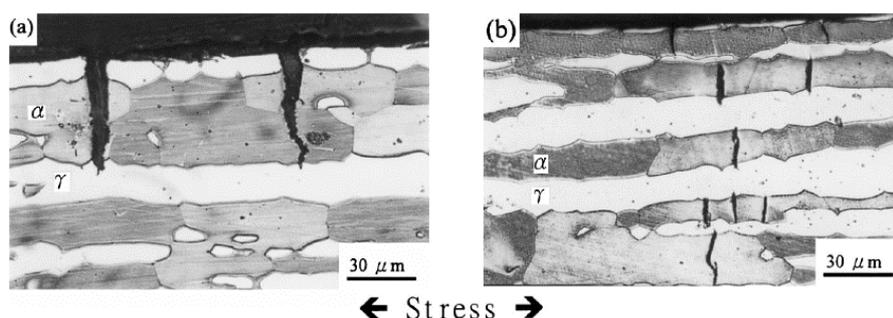
Ura et al. <sup>(25)</sup> estudaram a influência da precipitação de fase  $\alpha'$  (fragilização a 475°C) na resistência à corrosão por pite de diversos aços duplex envelhecidos a essa temperatura por 100 horas. Constatou-se que a presença desta fase diminuiu sensivelmente a resistência à corrosão por pite de todos os aços estudados (UR35N, UR45N, UR50, AV2205 e 3RE60). Uma explicação para isso é que a fase  $\alpha'$  é rica em cromo, e por isso a sua precipitação leva ao empobrecimento em cromo da ferrita presente no material.

Segundo Cândido e Villegas, <sup>(26)</sup> a vantagem desses aços é comumente atribuída à presença da ferrita, que ocasiona um aumento de resistência à corrosão sob tensão em relação aos aços austeníticos. Sabe-se que o limite elástico da austenita é menor que o da ferrita, de modo tal que algum grau de deformação é concentrado na austenita. Com isso, espera-se que a corrosão sob tensão ocorra nessa fase. Contudo, a austenita é protegida catodicamente pela ferrita em meios que causam corrosão sob tensão. Assim, o comportamento mecânico-eletrorquímico

das duas fases dependerá de suas composições e quantidades presentes. Nos aços inoxidáveis duplex, a corrosão sob tensão se dá, portanto, preferencialmente na fase ferrítica, porém, em condições extremas, as trincas ocorrerão também na austenita.<sup>(26)</sup> De maneira geral, um teor elevado de ferrita diminui a tenacidade e a resistência ao pite, e um teor de ferrita muito baixo diminui a resistência à corrosão sob tensão.

Em muitos casos, os aços duplex necessitam estar sujeitos à proteção catódica, principalmente para diminuir o potencial de corrosão do material para valores substancialmente abaixo do potencial de pite.<sup>(27)</sup> Por causa da natureza passiva desses aços, isso pode ser atingido com densidades de correntes muito baixas e a potências entre -700 e -500 mV<sub>Ag/AgCl</sub>. A aplicação de um potencial de -1050 mV<sub>Ag/AgCl</sub> irá “superproteger” componentes em CRA não isolados do sistema de proteção catódica, levando à geração de hidrogênio na superfície do material, podendo gerar problemas de fragilização.

A susceptibilidade dos aços duplex à fragilização pelo hidrogênio aumenta com o teor de ferrita. Essa fase possui um valor de limite de resistência à tração mais elevado que a austenita, porém é mais frágil. Além disso, a fase ferrítica é anódica em relação à austenita. Apesar desses fatores, Chou e Tsai<sup>(28)</sup> mostraram que sob a condição de polarizado catodicamente e solicitado mecanicamente, a iniciação das trincas no aço duplex se dá tanto na ferrita quanto na austenita, concluindo que nessa condição as duas fases apresentaram a mesma tendência à iniciação de trincas (figura 6a). No entanto para trincas encontradas no interior do material, a maior parte se formou na ferrita e propagou principalmente por essa fase e parcialmente pela interface ferrita/austenita (Figura 6b).



**Figura 6.** a) Iniciação de trincas na superfície do aço duplex 2205, que se propagam tanto pela ferrita quanto pela austenita; b) Iniciação e propagação de trincas no interior do material, preferencialmente pela ferrita, após ensaio de SSRT em solução de 26%ρ NaCl a um potencial aplicado de -1500mV<sup>(28)</sup>

Esses aços apresentam uma combinação da susceptibilidade à corrosão sob tensão dos aços inoxidáveis austeníticos e da sensibilidade à fragilização por hidrogênio dos aços ferríticos. Normalmente a sensibilidade à corrosão sob tensão é máxima a temperaturas elevadas, enquanto que a fragilização pelo hidrogênio é máxima à temperatura ambiente e decresce com o aumento da temperatura em função da maior mobilidade do hidrogênio. A combinação desses dois efeitos nos aços inoxidáveis duplex resulta em uma resistência mínima ao trincamento induzido sob tensão na presença de H<sub>2</sub>S a uma temperatura em torno de 80°C.<sup>(29)</sup>

Como as diversas formas de corrosão anteriormente discutidas têm forte ligação com a microestrutura, é de se esperar que estruturas soldadas apresentem comportamento quanto à corrosão diferenciado. Nesse sentido, Walker e Gooch<sup>(30)</sup> mostraram que a resistência à corrosão por pite na região da solda do aço UNS S31803 (SAF 2205) não é afetada diretamente pelo balanço de ferrita e austenita

presentes (para frações de ferrita entre 25% e 70%), mas é reduzida pelo reaquecimento da junta soldada durante operações multipasse, que levam à formação de austenita secundária. Segundo os autores, aumentos no teor de níquel do metal de adição não são tão significativos para o aumento da resistência à corrosão por pite se comparados ao aumento dos teores de cromo e molibdênio.

## 5 COMENTÁRIOS FINAIS

Os aços duplex e superduplex apresentam maior resistência mecânica e maior resistência à corrosão sob tensão em comparação aos aços inoxidáveis austeníticos; e maior resistência à fragilização pelo hidrogênio do que os aços inoxidáveis ferríticos, além de possuírem elevada tenacidade devido à grande quantidade de austenita.

Contudo, a principal dificuldade encontrada na utilização desses aços está em estabelecer parâmetros corretos para os procedimentos de soldagem. Em função do elevado teor de elementos de liga nesses aços, é inevitável a precipitação de fases deletérias à resistência à corrosão nas regiões próximas à solda. Além disso, o balanço ferrita-austenita também é alterado nas operações de soldagem.

## Agradecimentos

Os autores agradecem aos professores João Marcos Alcoforado Rebello e Oscar Rosa Mattos, da UFRJ, pela valorosa contribuição e à Petrobras pelo suporte financeiro obtido através do projeto PEMM-8113.

## REFERÊNCIAS

- 1 POHL, M. The Ferrite/Austenite Ratio of Duplex Stainless Steels. *Zeitschrift für Metallkunde*, v. 86, n. 2, p. 97-102, 1995.
- 2 LIPPOLD, J.C., KOTECKI, D.J. *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels*. Hoboken: Wiley-Interscience, 2005.
- 3 TYSTAD, M. Application of duplex stainless steel in the offshore industry, *Stainless Steel World 97*, KCI Publishing, 1997.
- 4 GUNN, R.N. *Duplex Stainless Steels – Microstructure, Properties and Applications*, Cambridge: Abington Publishing, 2003.
- 5 TAVARES, S.S.M., PEDROSA, P.D.S., TEODÓSIO, J.R., DA SILVA, M.R., NETO, J.M., PAIRIS, S. Magnetic properties of the UNS S39205 duplex stainless steel, *Journal of Alloys and Compounds*, v. 351, n. 1-2, p. 283–288, 2003.
- 6 RAVINDRANATH, K., MALHOTRA, S.N. The Influence of Aging on the Intergranular Corrosion of 22 Chromium-5 Nickel Duplex Stainless Steel, *Corrosion Science*, v. 37, n. 1, p. 121-132, 1995.
- 7 GREGORI, A., NILSSON, J.O. Decomposition of ferrite in commercial superduplex stainless steel weld metals, microstructural transformations above 700°C, *Metallurgical and Materials Transactions*, v. 33A, n. 4, p. 1009-1018, 2002.
- 8 SHEK, C.H., WONG, K.W., LAI, J.K.L. Review of temperature indicators and the use of duplex stainless steels for life assessment, *Materials Science and Engineering*, v. R19, n. 5-6, p. 153-200, 1997.

- 9 KOTECKI, D.J. Heat Treatment of Duplex Stainless Steel Weld Metals. *Welding Journal*, v. 68, n. 11, p. 431s-441s, 1989.
- 10 AWS C5.5/C5.5M - Recommended Practices for Gas Tungsten Arc Welding, 2003.
- 11 ISO-TR 17671-3 - Welding – Recommendations for welding of metallic materials – Part 3: Arc welding of stainless steels, 2002.
- 12 ISO 13847 - Petroleum and natural gas industries – Pipeline transportation systems – Welding of pipelines, 2000.
- 13 AMES, N., RAMBERG, M., JOHNSON, M., JOHNS, T. Comparison of Austenitic, Superaustenitic and Super Duplex Weld Properties Produced Using GTAW Flux. *Stainless Steel World*, 2001.
- 14 GOOCH, T.G. Welding New Stainless Steels for the Oil and Gas Industry. *Corrosion 2000*, Paper no. 00138, 2000.
- 15 POWELL, C, JORDAN, D. Fabricating Stainless Steels for the Water Industry – Guidelines for Achieving Top Performance, NI Reference Book Series 11026, Nickel Institute, 2005.
- 16 FAGER, S.A., ÖDEGARD, L. Welding of the Super Duplex Stainless Steel Sandvik SAF 2507 (UNS S32750). *Stainless Steel Europe*, v. 5, n. 10, p. 40-45, 1993.
- 17 SYMNIOTIS-BARRDAHL, E. Selective corrosion of duplex stainless steels. *Stainless steels'87 Conference proceedings York, Inglaterra*, p.176-185, 1988.
- 18 LIOU, H., HSIEH, R., TSAI, W. Microstructure and stress corrosion cracking in simulated heat-affected zones of duplex stainless steels, *Corrosion Science*, v. 44, p. 2841-2856, 2002.
- 19 SRIRAM, R., TROMANS, D. Pitting corrosion of duplex stainless steels, *Corrosion*, v.45, n. 10, p. 804-810, 1989.
- 20 STILL, J.R. The Use of Duplex Stainless Steel in the Offshore Oil and Gas Industry – Part 1, *Welding and Metal Fabrication*, p. 293-297, 1994
- 21 TSAI, W-T., CHEN, M-S. Stress corrosion cracking behavior of 2205 duplex stainless steel in concentrated NaCl solution, *Corrosion Science*, v. 42, n. 3, p. 545-559, 2000.
- 22 POTGIETER, J.H. Influence of s phase on general and pitting corrosion resistance of SAF 2205 duplex stainless steels. *British Corrosion Journal*, v. 27, n. 3, p. 219-223, 1992.
- 23 NILSSON, J.-O., WILSON, A. Influence of Isothermal Phase Transformations on Toughness and Pitting Corrosion of Super Duplex Stainless Steel SAF-2507, *Materials Science and Technology*, v. 9, n. 7, p. 545-554, 1993.
- 24 NILSSON, J.O., KARLSSON, L., ANDERSSON, J.-O. Secondary austenite formation and its relation to pitting corrosion in duplex stainless steel weld metal. *Materials Science and Technology*, v. 11, n. 3, p. 276-283, 1995.
- 25 URA, M.M., PADILHA, A.F., ALONSO, N. Influência da fase alfa linha sobre a resistência à corrosão por pite de aços inoxidáveis dúplex, 1º Congresso Internacional da ABM, São Paulo, v. 8, p. 337-349, 1994.
- 26 CÂNDIDO, L. C., VILLEGAS, E. A. Corrosão sob tensão em aço inoxidável dúplex, em solução aquosa. *Metalurgia e Materiais, ABM*, p. 734-738, 1995.
- 27 MARSH, J., WALSH, M., GIBSON, G. T. Hydrogen Embrittlement of Corrosion Resistant Alloys under Cathodic Protection Conditions, *Corrosion*, paper 4104, New Orleans, Estados Unidos, 2004.

- 28 CHOU, S.-L., TSAI, W.-T. Hydrogen embrittlement of duplex stainless steel in concentrated sodium chloride solution, *Materials Chemistry and Physics*, v. 60, n. 2, p. 137-142, 1999.
- 29 SMITH, L.M., CELANT, M., POURBAIX, A. A Guideline to the successful use of duplex stainless steels for flowlines, Duplex America 2000 Conference, Houston, Estados Unidos, 2000.
- 30 WALKER, R.A., GOOCH, T.G. Pitting resistance of weld metal for 22Cr-5Ni ferriticaustenitic stainless steels. *British Corrosion Journal*, v. 26, n. 1, p. 51-59, 1991.