



SUSCETIBILIDADE À CORROSÃO SOB TENSÃO POR SULFETO DE AÇOS INOXIDÁVEIS DUPLEX 2205 PRODUZIDOS POR METALURGIA DO PÓ E LAMINAÇÃO A QUENTE

¹Barros, T. S.; ^{1,2,*}Tavares, S. S. M.; ³Pimenta, A. R.; ⁴Baptista, R. T.; ⁴Velasco, J. A.
C.

¹Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca – Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, Avenida
Maracanã, 229, CEP 20271-110, Rio de Janeiro/Brasil;

²Universidade Federal Fluminense-Departamento de Engenharia Mecânica, Rua
Passo da Pátria, 156, CEP 24210-240, Niterói/Brasil.

*Autor para correspondência: ssmtavares@id.uff.br

³Instituto Federal do Rio de Janeiro, Laboratório de Instrumentação e Simulação
Computacional LISCOMP, Rua Sebastião Lacerda, s/n, Paracambi, RJ, Brasil

⁴Instituto Nacional de Tecnologia-LAH2S, Av. Venezuela, 82, CEP 20081-312, Rio
de Janeiro/Brasil

RESUMO

Os aços inoxidáveis duplex (AIDs) são uma boa opção para ambientes com H₂S devido às suas propriedades. Os limites de operação não são claramente definidos e variam de acordo com os processos de fabricação. Neste trabalho, foram investigadas as suscetibilidades à corrosão sob tensão por sulfetos (SSC) em soluções salinas com três níveis de pH de dois AIDs 2205. Os aços foram provenientes de tubos e tarugos fabricados por laminação a quente (HR) e metalurgia do pó com compactação e sinterização por prensagem isostática a quente (PM-HIP). Os resultados mostraram que ambos os materiais sofreram fragilização em soluções com pH mais baixo, mas na solução com pH 5,5, o material HR apresentou comportamento dúctil durante a fratura, enquanto o PM-HIP foi mais frágil. Isso pode ser atribuído às características

microestruturais do material, como o tamanho de grão e o espaçamento entre as ilhas de austenita.

Palavras-chave: aço inoxidável duplex, laminação a quente, metalurgia do pó, corrosão sob tensão.

INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis duplex (AID's) são ligas de Fe-Cr-Ni-N que apresentam, em sua microestrutura, quantidades aproximadamente iguais das fases ferrita (δ) e austenita (γ). Esses materiais atendem, assim, às exigências tanto do aço inoxidável ferrítico quanto do austenítico. A composição dos AID's é cuidadosamente equilibrada para garantir a microestrutura bifásica, e consequentemente, uma excelente resistência à corrosão em diferentes ambientes (GUNN, 1997).

Métodos de fabricação convencionais, como fundição, forjamento e laminação, têm sido usados por muitos anos para manufatura de componentes na indústria de petróleo e gás. No entanto, novas técnicas avançadas de fabricação, como metalurgia do pó com prensagem isostática a quente (PM-HIP), estão ganhando destaque (BECKER *et al.*, 2022; MATIAS *et al.*, 2019; SHULGA, 2015). Os materiais PM-HIP oferecem inúmeras vantagens sobre os métodos tradicionais, incluindo homogeneidade química, menos defeitos de fabricação e menor dependência de usinagem e soldagem (CLEMENT *et al.*, 2022; LOH; SIA, 1992). Aços obtidos por PM-HIP apresentam um nível muito baixo de porosidade com uma microestrutura isotrópica. Por outro lado, a laminação a quente para produção de tubos (processo Mannesman) produz grãos de ambas as fases alongados e alinhados na direção da laminação.

Graças à sua resistência à corrosão sob tensão e à fadiga por corrosão, especialmente em meios que contêm cloreto, que é superior aos aços inoxidáveis austeníticos, os AID's são amplamente empregados na indústria do petróleo e gás, em petroquímicas, ambientes marinhos e em outras aplicações similares. Embora possua uma notável tenacidade e resistência à corrosão, o aço inoxidável duplex pode ser suscetível à fragilização por hidrogênio. As trincas por hidrogênio podem ocorrer na zona afetada pelo calor produzida durante o processo de soldagem, associadas à proteção catódica e à fadiga por estresse induzida por hidrogênio (HISC) (DA SILVA

et al., 2015; KAN *et al.*, 2021; ŁABANOWSKI *et al.*, 2019; VÁŇOVÁ; SOJKA, 2014). A fragilização em ambientes contendo H_2S é chamada de corrosão sob tensão por sulfeto (SSC), e a expressão “serviço ácido” é usada para descrever o serviço em soluções com alta pressão parcial de H_2S e baixo pH. Esta é a situação mais crítica para a aplicação de ligas resistentes à corrosão (CRAs) na produção offshore de petróleo e gás (NACE, 2015).

Trautmann e colaboradores (TRAUTMANN *et al.*, 2021) investigaram a resistência à fragilização por hidrogênio e a absorção de hidrogênio de diferentes tipos de materiais, e em vários meios de alta pressão. Os testes foram realizados em aços carbono L80 e P110, e em ligas resistentes à corrosão (CRAs) Super 13Cr, Duplex 2205 e Alloy 28. As amostras foram retiradas de seções de tubos de revestimento disponíveis comercialmente. Os testes foram realizados com duas pressões parciais diferentes de gás hidrogênio: 20 bar e 100 bar, com uma solução aquosa de NaCl (salmoura) com uma concentração de cloreto de 15.000 mg/l, e conduzidos a 25 °C e a 80 °C. Os resultados apontaram que o duplex 2205 foi a CRA contendo a maior quantidade de hidrogênio absorvido após 30 dias de testes em autoclave em 100 bar H_2 a 80 °C com salmoura. O teor de hidrogênio de 14,21 ppm não causou uma fragilização substancial. Segundo os autores, uma explicação para esse comportamento pode estar na natureza de sua microestrutura ferrítica-austenítica.

Abdo e colaboradores (ABDO *et al.*, 2021) estudaram o comportamento de corrosão eletroquímica do aço inoxidável duplex 2205 soldado a laser em ambiente de água do mar artificial (soluções de NaCl a 3,5%) com diferentes valores de pH (2, 5, 7, 10 e 13). O comportamento eletroquímico e o crescimento do filme passivo foram investigados. Com base nos resultados obtidos, foi encontrada uma relação proporcional entre o valor do pH do meio da solução e a resistência do filme gerado devido aos processos de transferência de carga, que afetam diretamente a formação de pites e suas especificações. À medida que o tamanho e a quantidade dos pites aumentaram com a diminuição do valor do pH, pode-se concluir que a propriedade de resistência à corrosão da amostra de aço inoxidável duplex 2205 soldada a laser é melhorada na direção da alcalinidade da solução.

Kan e colaboradores (KAN *et al.*, 2021) estudaram o efeito da pressão (0,1 e 10 MPa) e dois ambientes de pH (3 e 7) no comportamento de corrosão do aço inoxidável duplex 2205 em solução de NaCl a 3,5% em peso. Os resultados mostraram que a 0,1 MPa e pH = 7, nenhuma corrosão por pites foi encontrada na

superfície. A 0,1 MPa e pH = 3, uma leve corrosão por pites apareceu. O número de corrosão por pites aumenta a 10 MPa e pH = 7 em comparação com 0,1 MPa e pH = 3. Quando a amostra foi imersa a 10 MPa e pH = 3, não apenas o número de pites aumenta, mas também o tamanho da corrosão por pites. Indicando que tanto a alta pressão quanto o baixo pH promovem a corrosão por pites.

O objetivo deste trabalho é comparar um 2205 AID produzido por metalurgia do pó e HIP com outro 2205 AID produzido por laminação a quente, com relação à suscetibilidade ao SSC. O estudo foi baseado em experimentos realizados com baixa taxa de deformação (BTD) em ambientes salinos contendo H₂S e CO₂ com três níveis de pH (3,5, 4,5 e 5,5).

MATERIAIS E MÉTODOS

As composições químicas dos dois AIDs estudados são apresentadas na Tabela 1, assim como os valores determinados pela norma NACE MR0175 (NACE, 2015). A análise química foi realizada pelo método de combustão para C, S e N e por espectroscopia de emissão óptica de plasma acoplado indutivo (ICP-OES) para os demais elementos.

Tabela 1: Composição química dos AID estudados

Material (AID)	Composição química (% em peso)											
	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	N	Cu	W	C	P	S	Fe
HR	21,64	5,29	2,83	1,16	0,55	0,133	0,18	0,22	0,028	0,01	<0.001	Balanço
PM-HIP	21,57	5,23	2,94	1,42	0,69	0,140	0,17	0,16	0,030	0,02	0,005	Balanço
NACE MR0175	21 - 23	4,5 - 6,5	2,5 - 3,5	≤ 2	≤ 1	0,08 - 0,20	–	–	≤ 0,03	≤ 0,03	0,02	Balanço

Ambos os materiais podem ser classificados como UNS S31803 e possuem composições semelhantes. A amostra PM-HIP foi proveniente de um tarugo cilíndrico com 100mm de diâmetro. Os corpos de prova do material laminado a quente (HR) são originários de um tubo sem costura com 100mm de diâmetro externo e 15mm de espessura, produzido pelo processo Mannesman. Os aços foram solubilizados a 1060°C por 1 hora e resfriados em água até a temperatura ambiente.

A microscopia ótica foi utilizada para caracterizar a superfície dos corpos de prova após o ensaio de BTD. As microestruturas foram reveladas com solução Behara

(20 ml de HCl, 80 ml de H₂O e 0,3 g de metabissulfito de potássio) de acordo com as recomendações da norma ASTM E 407 (ASTM, 2015). As distâncias médias entre ilhas de austenita foram medidas utilizando diferentes imagens e diferentes linhas perpendiculares à direção de laminação.

Os corpos de prova para o ensaio de BTDC foram usinados com 3,80 mm de diâmetro e 25 mm de comprimento útil. Ambos os materiais foram ensaiados ao ar e com uma solução de teste simulando o meio corrosivo. Os corpos de prova em meio corrosivo foram ensaiados no interior de uma autoclave conectada à solução de teste e a um sistema de aquecimento, com temperatura de 80 ± 2 °C, pressão parcial de H₂S de 10 kPa (0,1 bar), taxa de deformação inicial de 10^{-6}s^{-1} e mistura gasosa 10% de equilíbrio H₂S/CO₂. A solução teste consistiu em uma base de 120 g/L de NaCl (72.800 ppm Cl⁻) e 0,4 g/L de C₂H₃NaO₂ (acetato de sódio), que corresponde à solução C da norma NACE TM0177 (NACE, 2016). Os níveis de pH 3,5, 4,5 e 5,5 foram ajustados com HCl e NaOH.

Propriedades de tração (limite de escoamento a 0,2% (σ_e), limite de resistência à tração (σ_R), alongamento uniforme e total) foram obtidas a partir das curvas de tensão nominal (σ_N) versus deformação plástica nominal (ϵ_{N-P}). A superfície de fratura de espécimes após ensaio de BTDC foi preservada e observada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), a fim de analisar os micromecanismos de fratura e medir a área final dos espécimes.

Os resultados utilizados para a avaliação da resistência do material a fratura assistida pelo ambiente (Environment assisted cracking (EAC)) em ensaios de BTDC podem depender da aplicação pretendida e do desempenho em serviço. As Equações (A), (B), (C) e (D) a seguir, apresentam as taxas de suscetibilidade que são utilizadas na avaliação dos resultados dos ensaios de BTDC.

$$RE = E_{H_2S}/E_{AIR} \quad (A)$$

$$REU = UEL_{H_2S}/UEL_{AIR} \quad (B)$$

$$RRA = RA_{H_2S}/RA_{AIR} \quad (C)$$

$$R_{AREA_{\sigma_{xe}}} = AREA_{\sigma_{xe}H_2S}/AREA_{\sigma_{xe}AIR} \quad (D)$$

onde: RE é a relação dos alongamentos (EI); REU é a relação entre os alongamentos uniformes (UEI); RRA é a relação entre as reduções de áreas dos corpos de prova;

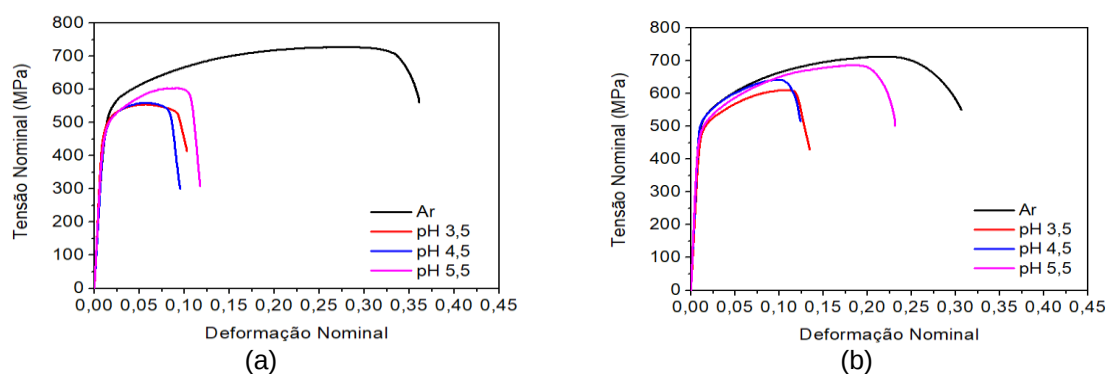
R_{AREA} é a razão entre as áreas das curvas tensão versus deformação; os índices H_{2S} são dos ensaios feitos na solução de H_2S ; e o índice AIR são dos ensaios feitos ao ar.

Portanto, para maximizar a resistência ao EAC, é desejável obter valores de taxas BTD o mais próximo possível de “1”. Valores mais baixos, geralmente indicam aumento da suscetibilidade ao EAC.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 mostra as curvas de tensão nominal versus deformação nominal do ensaio BTB dos materiais PM-HIP e HR ensaiados no ar e nas soluções de teste com os níveis de pH 3,5, 4,5 e 5,5. Para esta comparação, apenas uma curva representativa por condição foi incluída. A Tabela 2 apresenta as propriedades mecânicas obtidas de todas as curvas BTB e a Tabela 3 mostra as razões de suscetibilidade calculadas, comparando os dados de cada curva na solução de teste com os valores médios dos espécimes testados no ar. Para amostras testadas no ar, ambos os materiais mostram comportamento dúctil e propriedades típicas do aço 2205 solubilizado. Quando submetidos a testes com pH 3,5 e 4,5, ambos os materiais (HR e PM-HIP) experimentaram uma perda considerável de ductilidade e tenacidade. A comparação das curvas e parâmetros de suscetibilidade com pH 5,5 é interessante porque o material HR não foi afetado significativamente, enquanto o material PM-HIP foi bastante. O BTB realizado neste trabalho sugere que o AID produzido por HR é menos suscetível à corrosão sob tensão por sulfeto (SSC) nas soluções de teste do que o aço PM-HIP.

Figura 1 – Curvas de tensão nominal versus deformação nominal do BTB. (a) PM-HIP; (b) HR.



A Figura 2 apresenta as macrografias com o detalhe dos corpos de prova BTB fraturados sob as condições de pH 3,5 e 5,5, que são, respectivamente, a condição mais e a menos severa, segundo a Norma NACE MR0175 (NACE, 2015). Foram observadas trincas secundárias resultantes da fragilização do material. Trincas secundárias são mais pronunciadas em amostras com pH 3,5 devido à maior severidade do ambiente. A amostra HR testada com pH 5,5 apresentou comportamento dúctil com aparência da fratura na forma taça e cone e nenhuma trinca secundária.

Tabela 2: Propriedades mecânicas do HR e PM-HIP

Material - pH	σ_e (MPa)	σ_R (MPa)	Alongamento (%)		Redução de área (%)	Área $\sigma \times \epsilon$ (MPa)
			Total	Uniforme		
PM-HIP (Ar)	485	728	37,7	26,8	73,3	257
HR (Ar)	488	714	33,5	21,6	82,1	219
PM-HIP (pH 3.5)	458	555	9,7	4,6	15,6	53
HR (pH 3.5)	465	613	13,9	9,0	24,0	80
PM-HIP (pH 4.5)	482	566	7,3	3,1	11,0	35
HR (pH 4.5)	502	642	9,4	8,0	23,4	57
PM-HIP (pH 5.5)	447	610	11,6	7,4	9,1	64
HR (pH 5.5)	463	687	23,6	17,2	77,4	149

Tabela 3 - Razões de suscetibilidade obtidas a partir de dados BTB (a suscetibilidade ao SCC é maior quando RE, REU, RRA e RÁrea- $\sigma\epsilon$ são menores).

Material	pH	RE	REU	RRA	RÁrea- $\sigma\epsilon$
PM-HIP	3,5	0,257	0,171	0,213	0,206
	4,5	0,193	0,116	0,149	0,136
	5,5	0,308	0,276	0,124	0,249
HR	3,5	0,416	0,417	0,292	0,367
	4,5	0,282	0,366	0,285	0,263
	5,5	0,705	0,794	0,943	0,681

A Figura 3 mostra trincas secundárias na microestrutura dos corpos de prova que apresentaram fratura frágil. Nas micrografias, a fase ferrita apresenta cores mais escuras, e a fase austenita cores mais claras. Para ambos os materiais, a dissolução seletiva da fase ferrita é o modo preferencial de propagação das trincas. Observa-se que a fase ferrita se deteriorou preferencialmente, assim como é visível que alguns grãos de austenita preservados dentro das trincas, indicando que esta fase foi mais resistente ao ambiente de teste. A propagação de trincas através dos contornos de austenita e austenita/ferrita também foi observada.

Figura 2 – Macrografia dos corpos de prova de BTB fraturados. (a) PM-HIP 3,5; (b) HR 3,5; (c) PM-HIP 5,5; (d) HR 5,5.

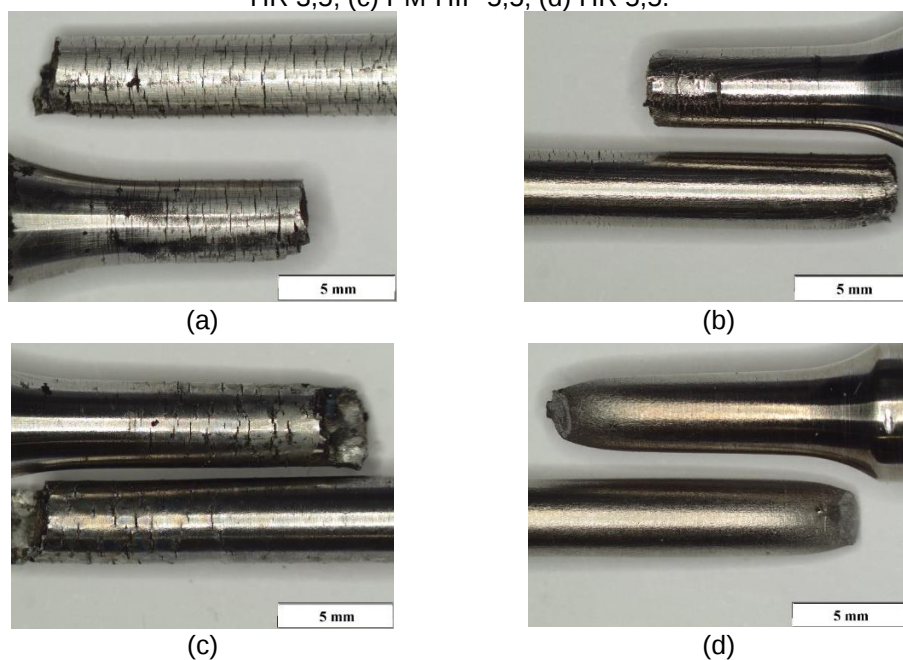
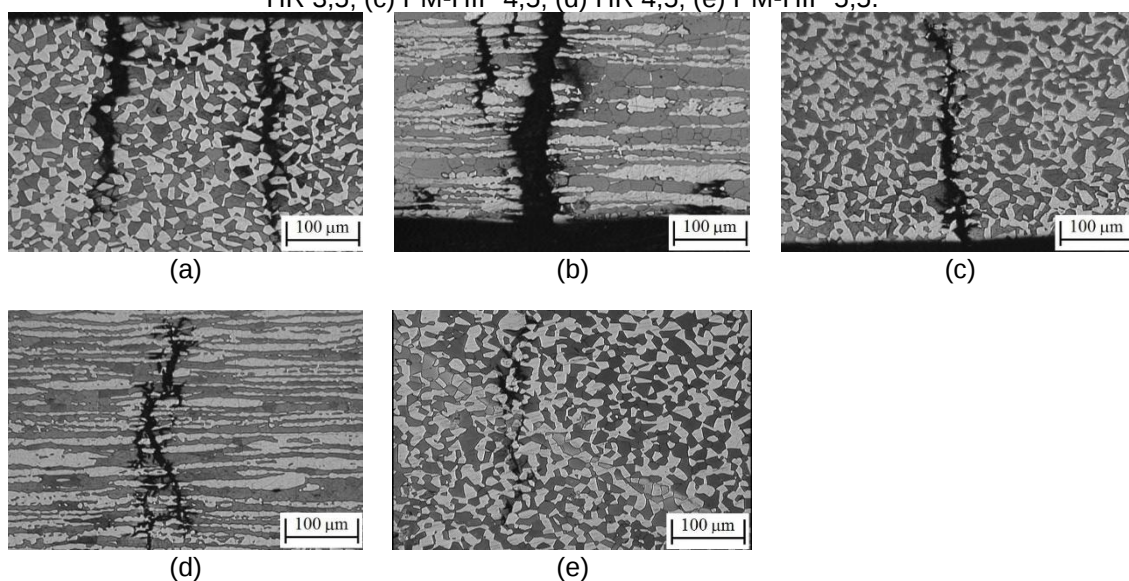


Figura 3 - Micrografias dos AIDs 2205 depois BTB revelados com ataque: (a) PM-HIP 3,5; (b) HR 3,5; (c) PM-HIP 4,5; (d) HR 4,5; (e) PM-HIP 5,5.



A observação das superfícies de fraturas foi conduzida no MEV, e algumas imagens selecionadas são mostradas na Figura 4a–h. Para amostras testadas no ar, ambos os materiais (PM-HIP e HR) apresentaram microvazios (dimples) em todas as regiões da superfície da fratura (Figura 4a,b). As amostras HR testadas em pH 5,5 (Figura 4h) mostraram comportamento semelhante às amostras testadas no ar. As superfícies de fratura dos espécimes HR e PM-HIP testados em pH 3,5 e 4,5 e os espécimes PM-HIP testados em pH 5,5 mostraram comportamento frágil. Em geral, a

superfície dessas fraturas frágeis apresentou algumas regiões contendo apenas microvazios na parte central do corpo de prova, sugerindo que o hidrogênio não atingiu essa região. As regiões frágeis são caracterizadas por trincas intergranulares e facetas de clivagem, eventualmente com alguns pequenos microvazios. A Figura 4d do espécime HR, pH 3,5 mostra um exemplo com facetas de clivagem e microvazios, onde a clivagem é típica da ferrita, enquanto microvazios e quase clivagem estão associados à austenita. Nas Figuras 4e,g, dos espécimes de PM-HIP, é possível observar a coexistência de clivagem e trincas intergranulares.

Usando imagens como as da Figura 5a,b, o espaçamento da austenita na direção da propagação das trincas foi encontrado como sendo $7,8 \pm 1,6 \mu\text{m}$ em amostras HR e $9,9 \pm 1,9 \mu\text{m}$ em amostras PM-HIP. O limite de espaçamento da austenita é $30,0 \mu\text{m}$ (DNV, 2018), o que significa que ambos os materiais têm esse parâmetro significativamente abaixo do valor máximo. O aço HR apresentou grãos de ferrita e austenita alongados na direção de laminação (longitudinal) do tubo, e o PM-HIP tem uma microestrutura isotrópica com grãos equiaxiais. A microestrutura do aço HR com ilhas de austenita alongadas, atuou como uma barreira mais eficaz à propagação de trincas do que a microestrutura isotrópica do aço PM-HIP.

Figure 4 – Superfícies de fratura das amostras de BTd. (a) PM-HIP ar; (b) HR ar; (c) PM-HIP 3,5; (d) HR 3,5; (e) PM-HIP 4,5; (f) HR 4,5; (g) PM-HIP 5,5; (h) HR 5,5.

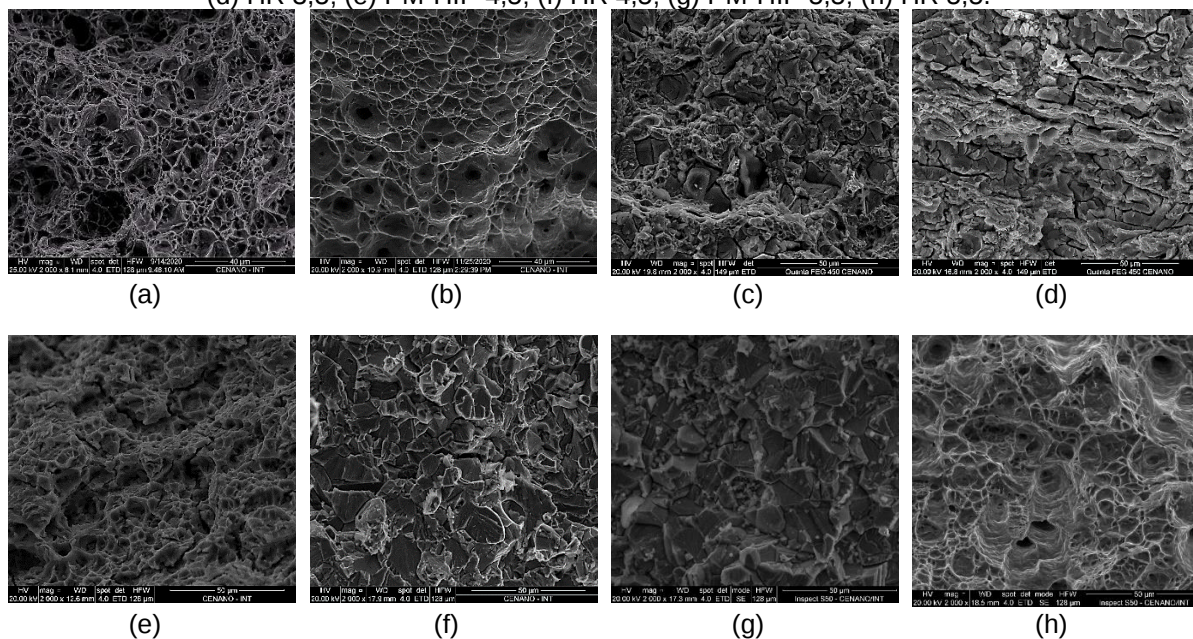
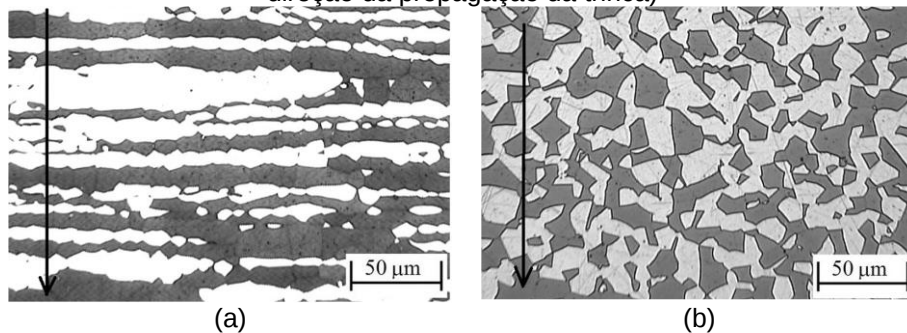


Figura 5 - Microestruturas de aços (a) PM-HIP e (b) HR. (As setas indicam a direção da propagação da trinca)



CONCLUSÃO

O BTB foi usado para comparar a suscetibilidade ao SSC de dois AIDs, um produzido por metalurgia do pó (PM-HIP) e o outro a partir de um tubo sem costura laminado a quente (HR). As soluções de teste continham 120 g/L de NaCl, pressão parcial de H₂S (p_{H₂S}) de 1,5 psi e níveis de pH 3,5, 4,5 e 5,5. As principais conclusões do estudo são:

- Os espécimes de PM-HIP e HR foram fragilizados em testes com pH 3,5 e 4,5, mas as razões de suscetibilidade (RE, REU, RRA e RArea-σ_{xe}) foram maiores para o HR, indicando menor suscetibilidade deste material.
- Os testes com pH 5,5 confirmaram a maior resistência do aço HR ao SSC. Os espécimes de PM-HIP apresentaram comportamento frágil, enquanto as amostras de HR foram fraturadas com altos parâmetros de ductilidade.
- A propagação de trincas ocorre preferencialmente através da fase ferrita, principalmente no aço PM-HR. Clivagem e trincas intergranulares foram encontradas na análise da superfície de fratura.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às agências de pesquisa brasileiras CAPES e CNPq pelo apoio financeiro e ao MCTI/SISNANO/INT-CENANO pelo uso das instalações de microscopia eletrônica e ao MCTI/INT/DICOR/LAH2S pelos testes de BTB. E a FAPERJ (E-26/211.412-2021; E26-200.122/2023; e E-26/200.423/2023).

REFERÊNCIAS

ABDO, H. S.; SEIKH, A. H.; ABDUS SAMAD, U.; FOULY, A.; MOHAMMED, J. A. Electrochemical Corrosion Behavior of Laser Welded 2205 Duplex Stainless-Steel in Artificial Seawater Environment under Different Acidity and Alkalinity Conditions. **Crystals**, [s. l.], v. 11, n. 9, p. 1025, 2021. Disponível em: Acesso em: 2 ago. 2024.

ASTM. **ASTM E 407 - Standard Practice for Microetching Metals and Alloys** ASTM International, , 2015.

BECKER, L.; LENTZ, J.; KRAMER, B.; ROTTSTEGGE, A.; BROECKMANN, C.; THEISEN, W.; WEBER, S. Validation of the Powder Metallurgical Processing of Duplex Stainless Steels through Hot Isostatic Pressing with Integrated Heat Treatment. **Materials**, [s. l.], v. 15, p. 6224, 2022.

CLEMENT, C.; PANUGANTI, S.; WARREN, P. H.; ZHAO, Y.; LU, Y.; WHEELER, K.; FRAZER, D.; GUILLEN, D. P.; GANDY, D. W.; WHARRY, J. P. Comparing structure-property evolution for PM-HIP and forged alloy 625 irradiated with neutrons to 1 dpa. **Materials Science and Engineering: A**, [s. l.], v. 857, p. 144058, 2022. Disponível em: Acesso em: 31 jul. 2024.

DA SILVA, B. R. S.; SALVIO, F.; SANTOS, D. S. dos. Hydrogen induced stress cracking in UNS S32750 super duplex stainless steel tube weld joint. **International Journal of Hydrogen Energy**, [s. l.], v. 40, n. 47, Special issue on 1st International Conference on Hydrogen Storage, Embrittlement and Applications (Hy-SEA 2014), 26-30 October 2014, Rio de Janeiro, Brazil, p. 17091–17101, 2015. Disponível em: Acesso em: 13 ago. 2024.

DNV. **DNV-RP-F112 Duplex stainless steel – design against hydrogen induced stress cracking**. , 2018.

GUNN, R. **Duplex Stainless Steels: Microstructure, Properties and Applications**. [S. l.]: Woodhead Publishing, 1997. 1997.

KAN, B.; WU, W.; YANG, Z.; ZHANG, X.; LI, J. Effects of hydrostatic pressure and pH on the corrosion behavior of 2205 duplex stainless steel. **Journal of Electroanalytical Chemistry**, [s. l.], v. 886, p. 115134, 2021. Disponível em: Acesso em: 2 ago. 2024.

ŁABANOWSKI, J.; RZYCHOŃ, T.; SIMKA, W.; MICHALSKA, J. Sulfate-reducing bacteria-assisted hydrogen-induced stress cracking of 2205 duplex stainless steels. **Materials and Corrosion**, [s. l.], v. 70, n. 9, p. 1667–1681, 2019. Disponível em: Acesso em: 13 ago. 2024.

LOH, N. L.; SIA, K. Y. An overview of hot isostatic pressing. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 30, n. 1, p. 45–65, 1992. Disponível em: Acesso em: 31 jul. 2024.

MATIAS, J. V. S.; DE LIMA, H. M. L. F.; ARAUJO, W. S.; PARDAL, J. M.; TAVARES, S. S. M. Comparison Between Hot Rolled and PM/HIP Processed Duplex Stainless Steel UNS S31803. *Em*: SILVA, Lucas F. M. da (org.). **Materials Design and Applications II**. Cham: Springer International Publishing, 2019. p. 17–28. Disponível em: Acesso em: 31 jul. 2024.

NACE. **NACE MR0175 Petroleum and Natural Gas Industries-Materials for Use in H₂S-Containing Environments in Oil and Gas Production. Parts 1, 2, and 3**. , 2015.

NACE. **NACE TM0177 Laboratory Testing of Metals for Resistance to Sulfide Stress Cracking and Stress Corrosion Cracking in H₂S Environments.** , 2016.

SHULGA, A. V. Enhancing the ductility of ferritic/martensitic stainless steel through the use of PM HIP manufacturing techniques. **Engineering Failure Analysis**, [s. l.], v. 56, The Sixth International Conference on Engineering Failure Analysis, p. 512–519, 2015. Disponível em: Acesso em: 31 jul. 2024.

TRAUTMANN, A.; MORI, G.; LODER, B. Hydrogen Embrittlement of Steels in High Pressure H₂ Gas and Acidified H₂S-saturated Aqueous Brine Solution. **BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte**, [s. l.], v. 166, n. 9, p. 450–457, 2021. Disponível em: Acesso em: 13 ago. 2024.

VÁŇOVÁ, P.; SOJKA, J. Hydrogen embrittlement of duplex steel tested using slow strain rate test. **Metalurgija**, [s. l.], v. 53, p. 163–166, 2014.

SULFIDE STRESS CORROSION (SSC) SUSCEPTIBILITIES OF DUPLEX STAINLESS STEELS 2205 PRODUCED BY POWDER METALLURGY (HIP) AND HOT ROLLING

ABSTRACT

Duplex stainless steels (DSS) are a good option for H₂S environments due to their properties. Operational limits are not defined and depend on fabrication processes. In this work, the susceptibilities to sulfide stress corrosion cracking (SSC) in saline solutions with three pH levels of two 2205 DSSs were investigated. The steels were obtained from tubes and billets manufactured by hot rolling (HR) and powder metallurgy with compaction and sintering by hot isostatic pressing (PM-HIP). The results showed that both materials embrittlement in solutions with lower pH, but in the solution with pH 5.5, the HR material presented ductile behavior during fracture, while the PM-HIP was brittle. The better resistance of HR to SSC can be explained by microstructural features, such as the lower grain size and austenite island interspace.

Keywords: duplex stainless steel, powder metallurgy, hot rolled, stress corrosion