



XXVI Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica – 19 à 23 de Agosto de 2019 – Ilhéus, BA

ANÁLISE COMPARATIVA DA INFLUÊNCIA DA SOLDAGEM DE TUBOS DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 304 NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO

Davi Souza Santos Ribeiro, davissribeiro2@gmail.com

Centro Universitário do Distrito Federal – UDF, SEP/SUL EQ 704/904 - CONJ A, Brasília/DF - CEP: 70390-045

Resumo. A utilização de aços inoxidáveis é frequente nas indústrias, principalmente nas que trabalham com substâncias corrosivas, e ao realizar processos com elevado aporte térmico nestes aços, como a soldagem, é necessária a análise das características relacionadas a resistência à corrosão da liga. Desse modo, foi realizada a corrosão de tubos de aço inoxidável austenítico AISI 304 em solução 50% ácido sulfúrico (v-v) por um período de 24 h, para em seguida ser realizada análise comparativa entre as taxas de corrosão. Estas foram calculadas a partir da perda de massa dos corpos de prova de referência e dos que passaram por soldagem por eletrodo revestido. Assim, foi observado um aumento de 20,9 % na taxa de corrosão média dos conjuntos, e 12,1 % quando analisados os corpos de prova críticos de cada conjunto, indicando que de fato a soldagem prejudicou a resistência a corrosão do aço inoxidável estudado. Este resultado foi corroborado pela análise das micrografias ópticas dos corpos de prova críticos, os quais apresentaram elevada presença de carbonetos precipitados na região afetada pela soldagem.

Palavras chave: Taxa de corrosão; Aço inoxidável austenítico; Soldagem; Micrografia óptica.

1. INTRODUÇÃO

As aplicações de aços inoxidáveis nas indústrias são relacionadas a sua principal característica, a resistência a corrosão, sendo um dos mais utilizados o AISI 304. Este aço austenítico tem alta resistência a meios oxidantes devido a sua composição de Cromo e Níquel, mantendo esta característica a altas temperaturas, além disso apresenta boas propriedades mecânicas e boa soldabilidade, o que garante sua versatilidade em aplicações (Santos e Andrade, 2008).

Em caldeiras, trocadores de calor, recipientes de armazenamento e tubos para transporte é comum se utilizar a soldagem como alternativa a métodos de união que permitem frestas, eliminando o risco de ocorrência de corrosão intersticial. Porém, tal processo deve ser observado cuidadosamente visto que seu aporte térmico favorece à precipitação de intermetálicos, aumentando a propensão à corrosão intergranular (Iacoviello et al., 2017).

As soldagens por arco elétrico são as mais indicadas para este tipo de liga, tanto por processo com eletrodo de tungstênio, TIG, como por eletrodo revestido. Este último se apresenta como mais versátil, podendo ser utilizado em espaços reduzidos, e demanda menor custo de investimento devido ao tipo de proteção (Groover, 2010).

Como a aplicação do processo de soldagem neste tipo de material pode resultar em prejuízo da sua característica de resistência a corrosão, reduzindo a vida útil do equipamento, é necessário analisar esta interação. Para tal, utilizam-se ensaios destrutivos e que demandam longo tempo de exposição, dificultando uma avaliação em campo. Dentre os métodos normatizados, destacam-se tanto aqueles que analisam tipos específicos de corrosão, como a intergranular e por pites, quanto os de análise da corrosão em geral, como a ASTM G1-03 (2017) que propõe a análise da taxa de corrosão por perda de massa e acompanhamento desta por análise metalográfica.

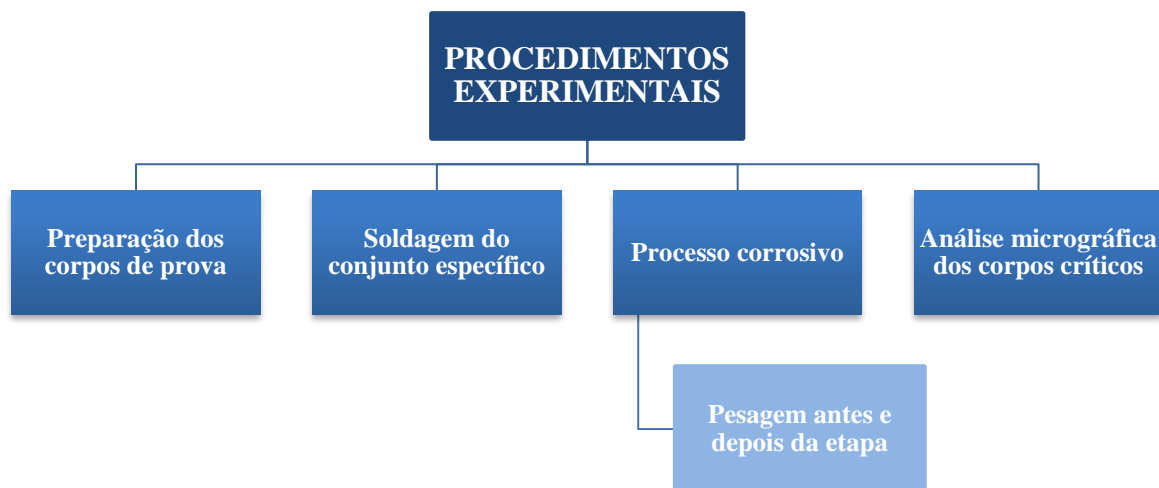
Para esta análise é necessária a utilização de meio corrosivo para acelerar o processo. Destacam-se na indústria os ácidos, muitas vezes utilizados como parte de processos químicos. O ácido sulfúrico, por exemplo, é largamente empregado na produção de fertilizante, baterias e tratamento de água, tendo também grande importância na indústria petroquímica, como parte do tratamento de impurezas das frações destiladas e como catalizador do processo de alquilação (Mariano, 2001).

2. METODOLOGIA

A metodologia do presente estudo é dividida entre procedimentos experimentais e análise dos dados obtidos a partir destes. A parte experimental é exposta no organograma da Fig. 1, sendo iniciada pela preparação dos corpos de prova,

em seguida é realizada a soldagem do conjunto específico e o processo corrosivo em ambos os conjuntos. Por fim é realizada a análise micrográfica dos corpos de prova críticos para a obtenção das imagens ampliadas a serem analisadas.

Figura 1. – Metodologia prática empregada (autoria própria)



2.1. Preparação

A preparação compreende o corte dos tubos de aço inoxidável de 1 in de diâmetro com serra de fita horizontal e ajuste em torno mecânico para a obtenção de corpos de prova com comprimento de 15 cm, assim como o dimensionamento destes corpos de prova a partir do cálculo das áreas a serem expostas ao meio corrosivo.

Cada conjunto é composto por dois corpos de prova para que seja analisada a média dos resultados obtidos para estes.

2.2. Soldagem

O processo de soldagem realizado seguiu os parâmetros estipulados pelo fabricante do eletrodo, posição 5G (tubo na horizontal) e corrente alternada de 80 A. Além disso, o processo se apoiou na norma AWS A5.4/5.4M (2012), referente aos consumíveis revestidos para solda de aço inoxidável, na norma AWS D10.4 (2000), referente a práticas recomendadas para solda de tubos de aços inoxidáveis austeníticos e na norma ANSI Z49.1 (2012), a qual diz respeito à segurança durante soldagem.

O eletrodo utilizado no estudo foi o WI 8 LR AC, compatível com o AWS E 308/ E 308L – 16 padronizado pela norma anteriormente citada. Este é indicado para solda do aço AISI 304 por apresentar baixo teor de carbono, diminuindo o risco de corrosão intergranular na região fundida.

A limpeza pré soldagem dos corpos de prova foi feita com álcool, para remoção de possíveis contaminantes como óleo, graxa ou tinta. Já após a soldagem, foi realizada a limpeza mecânica da peça com uma escova de aço inoxidável, para remoção da escória formada pelo revestimento do eletrodo.

2.3. Processo corrosivo

A corrosão foi realizada com solução 50% (v-v) de ácido sulfúrico, aproximadamente 9,2 Mol/L, preparada a partir da adição de 125 mL da solução do ácido (P.A.) em uma proveta com 125 mL de água destilada.

Com base no estudo da ASTM G1-03 (2017), norma utilizada para o cálculo da taxa de corrosão e reafirmada pela norma Petrobras N-2785 (2018) – Monitoração, interpretação e controle da corrosão interna em dutos –, foi determinado o ataque químico por submersão dos corpos de prova durante 24 h, dentro das provetas mencionadas.

O processo foi precedido e seguido de pesagem por balança de precisão com sensibilidade de 1 mg, para a realização da análise da taxa de corrosão anteriormente mencionada. Estes procedimentos foram realizados o mais próximo possível do processo corrosivo, de modo a garantir que outros fatores não interferissem no resultado encontrado.

2.3.1. Análise da taxa de corrosão

A análise da taxa de corrosão é determinada a partir da já citada ASTM G1-03 (2017), sendo calculada pela Eq. (1), na qual “A” representa a área superficial exposta em centímetros quadrados, “D” a densidade do material em gramas por centímetros cúbicos, “T” o tempo de corrosão em horas e “W” a massa perdida em gramas.

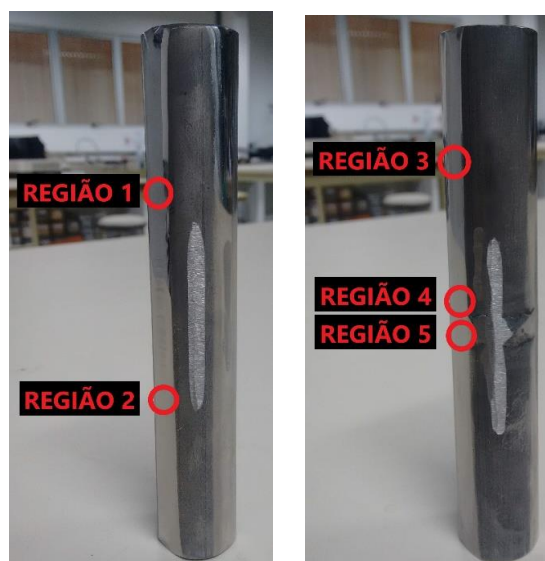
$$\text{Taxa de corrosão} \left(\frac{\text{mm}}{\text{ano}} \right) = \frac{8.76 \times 10^4 \times W}{A \times D \times T} \quad (1.)$$

2.4. Micrografia Óptica

As imagens micrográficas da seção tangencial longitudinal dos corpos de prova foram obtidas a partir de microscópio metalográfico, com ampliação de 100x.

Foram selecionados os corpos de prova que apresentaram comportamento crítico em cada conjunto e nestes foram analisadas regiões distintas, como pode ser visto nas Fig. 2 a e b, respectivamente corpo de controle e soldado.

Figura 2. – Regiões analisadas dos corpos de prova de (a) controle e (b) soldado (autoria própria)



Para a realização dos procedimentos pré metalográficos – limpeza, lixamento e polimento – foi utilizada como base a norma ASTM E3-11 (2017), referente a preparação de corpos de prova para metalografia. O processo foi iniciado com a utilização de lixas abrasivas, com aumento progressivo de granulometria, e finalizado com pano de polimento e pasta diamantada de 1 μm .

2.3.1. Análise das imagens micrográficas

A análise das imagens obtidas foi realizada com base no livro ASM Handbook (2004). Em seu 9º volume é discutida a metalografia e microestruturas de metais, sendo indicadas as características comumente observadas neste tipo de estudo.

3. RESULTADOS

3.1. Procedimentos práticos

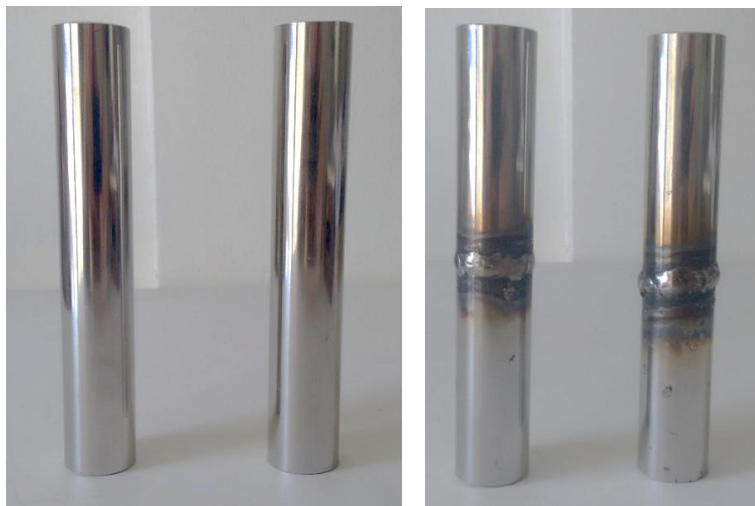
O dimensionamento realizado apresentou os resultados da Tab. 1. Devido a irregularidade do cordão de solda, este foi desconsiderado no cálculo da área dos corpos de prova soldados.

Tabela 1. – Dimensões dos corpos de prova (autoria própria)

Corpo	Comprimento (cm)	Diâmetro Ext (cm)	Diâmetro Int (cm)	A (cm ²)
C1	15,04	2,54	2,24	228,105
C2	15,07	2,54	2,24	228,556
ER1	14,85	2,54	2,24	225,252
ER2	14,84	2,54	2,24	225,102

Os corpos de prova de controle podem ser observados na Fig. 3.a, já os soldados são apresentados na Fig. 3.b. Como consequência do processo de soldagem, as peças apresentam respingos, associados a provável umidade do eletrodo, armazenados fora dos parâmetros de estufa. Além disso, não foi observada contaminação pela atmosfera, caracterizada pela falta de proteção da poça de fusão e visível pela coloração do metal.

Figura 3. – Conjuntos de (a) controle e (b) solda por eletrodo revestido (autoria própria)



Em relação ao processo corrosivo realizado, os resultados são apresentados nas Fig. 4.a e 4.b, sendo possível observar que a corrosão se deu uniformemente.

Figura 4. – Conjuntos de (a) controle e (b) eletrodo revestido oxidados (autoria própria)



A partir dos valores obtidos nas pesagens realizadas antes e depois da corrosão, foram calculadas as massas perdidas apresentadas na Tab. 2.

Tabela 2. – Peso dos corpos de prova antes e depois da corrosão (autoria própria)

Corpo	Peso Anterior (g)	Peso Posterior (g)	W (g)
C1	122,085	121,610	0,475
C2	122,768	122,141	0,627
ER1	118,340	117,647	0,693
ER2	123,142	122,521	0,621

3.2. Análise da corrosão

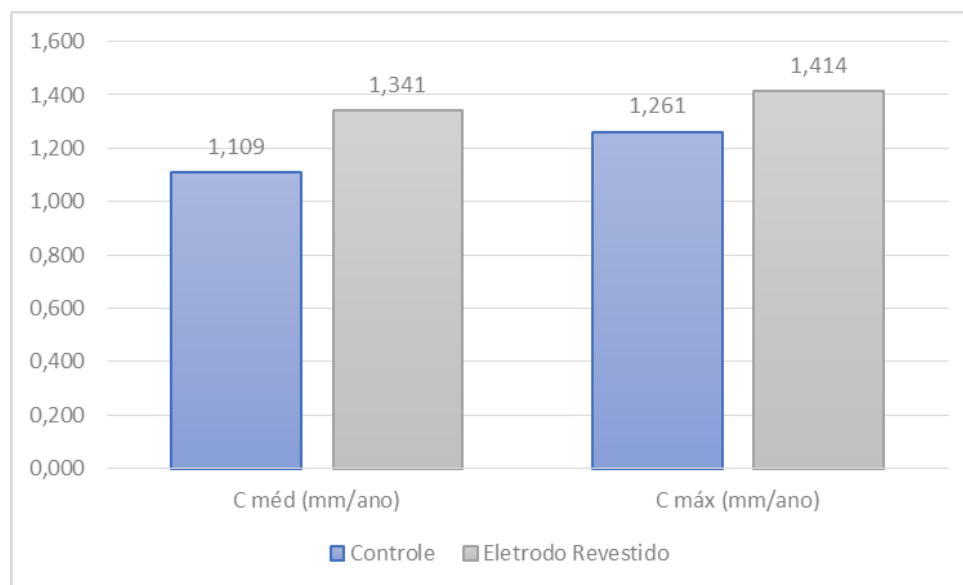
Com os resultados obtidos para a área superficial exposta e massa perdida, além do tempo de submersão aplicado e a densidade do aço inoxidável utilizado, com valor de 7,94 g/cm³ de acordo com a própria norma ASTM G1-03 (2017), temos os resultados das taxas de corrosão, C, da Tab. 3.

Tabela 3. – Taxa de corrosão dos corpos de prova (autoria própria)

Corpo	A (cm ²)	W (g)	D (g/cm ³)	T (h)	C (mm/ano)
C1	228,105	0,475	7,94	24	0,957
C2	228,556	0,627	7,94	24	1,261
ER1	225,252	0,693	7,94	24	1,414
ER2	225,102	0,621	7,94	24	1,268

A comparação entre as taxas de corrosão dos conjuntos, tanto médias como críticas, pode ser observada no gráfico da Fig. 5. Com aumento de 20,9% da taxa de corrosão quando analisamos o valor médio e 12,1% ao observarmos os valores máximos.

Figura 5. – Taxas de corrosão comparadas, médias e máximas, dos dois conjuntos (autoria própria).



Tendo como base a norma Petrobras N-2785 (2018), que apresenta como um dos métodos de classificação para potencial de corrosividade a relação exposta na Tab. adaptada 4, a corrosão em questão pode ser classificada como severa.

Tabela 4. – Potencial de corrosividade pela taxa de corrosão (modificado – Petrobras N-2785, 2018)

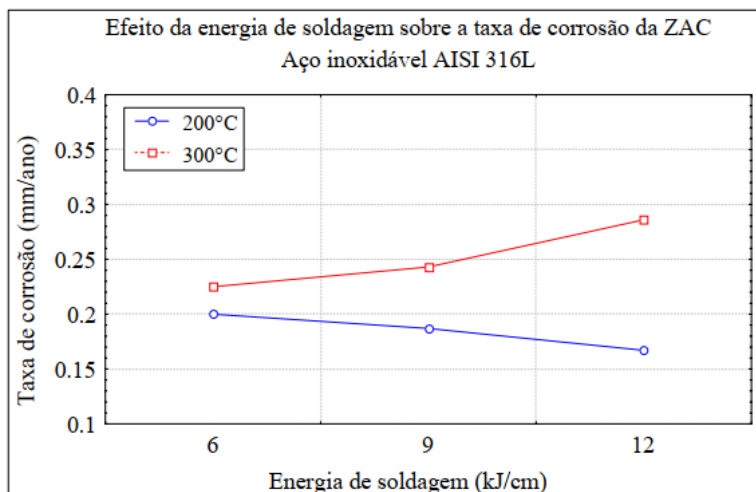
Potencial de corrosividade	Taxa uniforme (mm/ano)
Baixo	< 0,025
Moderado	0,025 a 0,125
Severo	> 0,125

O fato da taxa de corrosão ter se mostrado muito superior ao parâmetro estipulado pela norma pode ser atribuído ao meio corrosivo utilizado, que diferente dos abordados na norma - óleos, gases, produtos derivados claros líquidos e etanol - é um meio extremamente agressivo.

Em relação aos resultados obtidos por Silva et al. (2009), representados pela Fig. 6, é possível notar que os valores encontrados de taxa de corrosão estão mais próximos dos índices da classificação, mesmo que ainda classificados como severos.

Visto que este estudo foi realizado com aço AISI 316, soldado por eletrodo revestido AWS E 309MoL – 16 e submerso em petróleo à 200 e 300 °C por 30 h, cabe concluir que o grande fator diferenciador entre os estudos é o meio corrosivo.

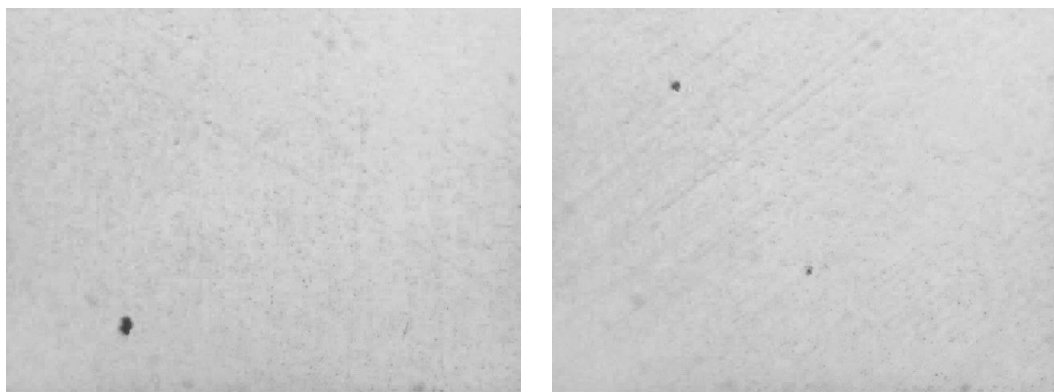
Figura 6. – Resultados de referência para taxa de corrosão (Silva et al., 2009)



3.3. Análise das micrografias ópticas

Como exposto na metodologia, os corpos de prova analisados foram os que apresentaram maior taxa de corrosão, corpo de controle 2 e o corpo soldado 1. Sendo possível observar na Fig. 7.a e 7.b as regiões 1 e 2 do corpo de prova de controle.

Figura 7. – Micrografia óptica do corpo de prova de controle 2 na (a) região 1 e (b) região 2 (autoria própria)



Já nas Fig. 8.a, 8.b e 8.c é possível observar o comportamento corrosivo nas três regiões características de um corpo de prova que passou por soldagem, material de base, zona termicamente afetada e região de fusão, respectivamente as regiões 3, 4 e 5.

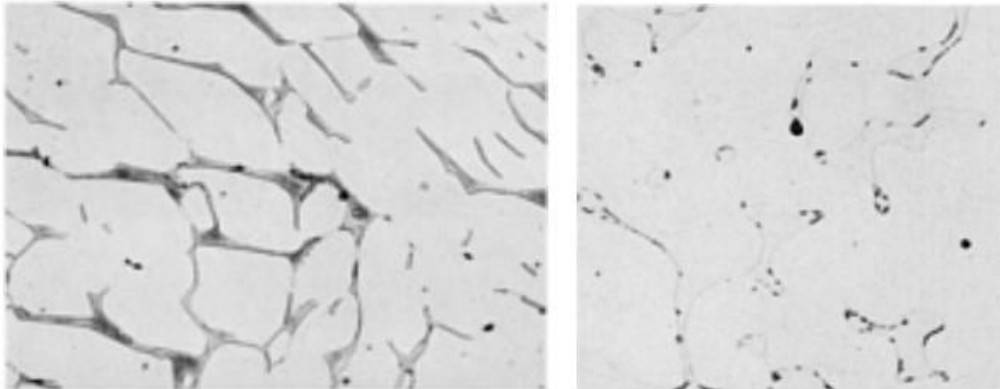
Figura 8. – Micrografia óptica do corpo de prova soldado 1 nas regiões (a) 3, (b) 4 e (c) 5 (autoria própria)



Uma primeira análise a ser realizada é entre os corpos de prova e suas regiões. É possível notar que as duas regiões do corpo de controle se apresentam uniformes, enquanto no corpo de prova soldado a presença de inclusões aumenta à medida que a região se aproxima da zona afetada pelo aporte térmico. Estas observações corroboram o resultado obtido para as taxas de corrosão.

Em seguida, tendo como base as Fig. 9.a e 9.b retiradas do volume 9 do livro ASM Handbook (2004), os pontos de inclusão apresentados pelas peças podem ser analisados. Levando em conta o material e processo utilizados neste estudo, assim como a frequência com que estas falhas aparecem em cada região, é possível correlacioná-las com os carbonetos precipitados apresentados no material de referência.

Figura 9. – Referência de micrografia do aço (a) AISI 304 e (b) AISI 316 (ASM, 2004)



4. CONCLUSÕES

Fica claro, a partir dos resultados obtidos, que o processo de soldagem de fato influenciou negativamente na resistência a corrosão dos corpos de prova, tanto pelos valores das taxas de corrosão como pela análise das micrografias ópticas. Apesar de ambos os conjuntos serem classificados com potencial de corrosividade severo, o aumento obtido de 20,9% para os valores médios e 12,1% para os valores máximos é suficiente para tal conclusão.

Com relação as inclusões observadas das micrografias, a interpretação destas como carbonetos precipitados é válida, visto que o aporte térmico do processo de soldagem tende a favorecer tal precipitação de intermetálicos, diretamente relacionados a corrosão intergranular.

Cabe assim concluir que a vida útil de equipamentos de aço inoxidável, como os tubos de transporte de material utilizados no estudo, será reduzida pela utilização de soldagem por eletrodo revestido em sua fabricação ou reparo.

5. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

- AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE, 2012. ANSI Z49.1: Safety in Welding, Cutting, and Allied Processes. American National Standards Institute.
- ASM international, 2004. ASM Handbook, volume 9: Metallography and Microstructures. ASM International.
- ASTM international, 2017. ASTM G1-03: Standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens. ASTM international.
- ASTM international, 2017. ASTM E3-11: Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. ASTM international.
- AMERICAN WELDING SOCIETY, 2000. AWS D10.4: Recommended Practices for Welding Austenitic Chromium-nickel Stainless Steel Piping and Tubing. American Welding Society.
- AMERICAN WELDING SOCIETY, 2012. AWS A5.4/5.4M: Specification for Stainless Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding. American Welding Society.
- GROOVER, Mikell P., 2010. Fundamentals of modern manufacturing: materials processes, and systems. 4ª edição. John Wiley & Sons.
- IACOVIELLO, Francesco; DI COCCO, Vittorio; D'AGOSTINO, Laura, 2017. Interganular corrosion susceptibility analysis in austeno-ferritic (duplex) stainless steels. Procedia Structural Integrity, v. 3, p. 276-282.
- MARIANO, Jacqueline B., 2001. Impactos ambientais do refino de petróleo. Rio de Janeiro (RJ): Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- PETRÓLEO BRASILEIRO S.A, 2018. Petrobras N-2785: Monitoração, Interpretação e Controle da Corrosão Interna em Dutos. PETRÓLEO BRASILEIRO S.A.

RIBEIRO, Davi

Análise Comparativa da Influência da Soldagem de Tubos de Aço Inoxidável AISI 304 na Resistência à Corrosão

SANTOS, T. F. A.; ANDRADE, M. S., 2008. Avaliação dilatométrica da reversão das martensitas induzidas por deformação em um aço inoxidável austenítico do tipo ABNT 304. Revista Matéria, v. 13, n. 4, p. 587-596.

SILVA, Cleiton C. et al., 2009. Estudo da corrosão na ZAC do aço inoxidável austenítico AISI 316L causada por petróleo pesado da bacia de campos. Congresso brasileiro de P&D em petróleo e gás, 3^o edição.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.