



AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO AÇO AISI 316L PARA APLICAÇÃO COMO *LINING* EM TORRES DE DESTILAÇÃO

Víctor Moita Pinheiro¹, Rodrigo Freitas Guimarães²

¹Graduando do Curso de Tecnologia da Manutenção Industrial – IFCE. e-mail: victor.moitapinheiro@gmail.com

²Professor Doutor - IFCE. e-mail: rodrigofg18@gmail.com

Resumo: O trabalho analisou o comportamento de corpos de prova de aço AISI 316L, aplicado como *lining*, quando soldado sobre o aço ASTM A-516 Gr60 e submetido a ensaios que simulam as condições de operação observadas nas torres de destilação de petróleo da Petrobras. As condições críticas analisadas foram a resistência aos ciclos de Fadiga Térmica e a resistência a corrosão do *lining*. Para tanto, corpos de prova de aço AISI 316L, soldados com os eletrodos AWS E309MoL-16 e AWS E316L-17 sobre chapas de aço ASTM A-516 Gr60, foram submetidos à simulação de Fadiga Térmica através de 20 ciclos de aquecimento e resfriamento ao forno. Ao final de cada ciclo, os corpos de prova foram inspecionados para verificar a existência de trincas e em seguida foi feita a caracterização microestrutural da ZAC. Após os ensaios de Fadiga Térmica, também foram retiradas amostras para serem submetidas a tratamentos em petróleo na temperatura de 300°C para determinar a perda de massa provocada pelo ambiente corrosivo. Os resultados indicaram que o aço AISI 316L não apresentou trincas após os ensaios de Fadiga Térmica e nem após o tratamento em petróleo.

Palavras chaves: aço aisi 316l, corrosão, fadiga térmica

1. INTRODUÇÃO

O petróleo, devido a sua composição química e a presença de diversas impurezas, tais como: compostos orgânicos sulfurados, nitrogenados, oxigenados, organo-metálicos, água, sais minerais e areia, apresenta um elevado grau de corrosividade (Cosultchi, 2001; Turnbull e Griffiths, 2003). Este elevado grau de corrosividade, característico do petróleo, exige dos diversos tipos de materiais, empregados nas unidades de destilação e de processamento do petróleo, uma elevada resistência à corrosão, principalmente resistência à corrosão naftênica.

Este tipo de corrosão é verificado em várias áreas dos equipamentos responsáveis pelo refino do petróleo. Esta situação torna-se especialmente grave quando se utiliza petróleo de mais baixa qualidade (como por exemplo, o marlim e o bachaquero). Estes tipos de petróleo, com baixa aceitação internacional, terminam sendo empregados nas diversas unidades de refino da Petrobras e danificam as paredes das torres de destilação que não foram previamente projetadas para resistir à corrosão naftênica (Guimarães, 2005) acarretando custo na manutenção dos equipamentos deteriorados onde, muitas vezes, é necessária a total parada da unidade de refino.

As torres que atualmente operam nas unidades de refino da Petrobras são constituídas pelo aço ASTM A-516 Gr60 onde este é revestido internamente com chapas de aço inoxidável AISI 405 ou AISI 410S, no entanto os elevados teores de enxofre presentes nos petróleos de baixa qualidade atacam, por corrosão naftênica, o *clad* de aço inoxidável AISI 405 ou 410S, expondo o aço estrutural da torre.

Uma alternativa para a recuperação dessas torres seria a aplicação de um *lining* de aço inoxidável austenítico AISI 316L. Seu elevado teor de cromo proporciona melhor resistência à oxidação e a presença de níquel resulta em boas propriedades mecânicas. Os baixos teores de carbono e nitrogênio proporcionam um aumento considerável tanto na tenacidade como na soldabilidade.

Desta forma este trabalho avaliou o comportamento do aço AISI 316L aplicado como *lining*, na condição como soldado, quando submetido a ensaios que simulam as condições de



operação observadas nas torres de destilação de petróleo para verificar a viabilidade de sua aplicação.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para este trabalho foi utilizado como *lining* o aço inoxidável austenítico 316L com 3mm de espessura e como estrutural o aço ASTM A-516 Gr60 com 19 mm de espessura. A composição química dos aços é apresentada nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Composição química do aço AISI 316L (% em massa)

C	Mn	Cr	P	S	Mo	Si	Ni	N
0,022	1,36	16,93	0,03	0,003	2,09	0,47	10,11	411*

* valor em ppm.

Tabela 2 - Composição química do aço ASTM A516 Gr60 (% em massa)

C	Mn	S	Cr	Si	Al	P
0,18	0,99	0,008	0,004	0,20	0,041	0,023

Para soldagem foram utilizados dois tipos de eletrodos revestidos com 2,5 mm de diâmetro cuja composição química é mostrada na Tabela 3. Estes são os eletrodos empregados na Petrobras na soldagem de *linings*.

Tabela 31. Composição química dos eletrodos segundo o fabricante (% em massa)

Eletrodos	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si
AWS E316L-17*	<0,03	18,3	11,8	2,5	0,7	0,9
AWS E309MoL-16	<0,03	23	13	2,5	**	**

*Ressecado a 250°C durante 3 horas. **De acordo com a AWS A5.4-92 o eletrodo AWS E309MoL-16 deve ter um teor de Mn=0,5% – 2,5 e Si=0,90%.

Foi utilizado um petróleo pesado oriundo da região da Bacia de Campos no Rio de Janeiro, sem qualquer pré-processamento, fornecido pelo Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo M. de Mello - CENPES/Petrobras, cujas propriedades físico-químicas do petróleo utilizado estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4. Propriedades físico-químicas do petróleo utilizado

Propriedades	Petróleo	
Densidade (20/40)	0,91	
API ^o *	16,8	
Viscosidade (mm ² /s)	30°C	920
	50°C	240
Acidez (mg KOH/g)*	2,73	
Composição Global (%m/m)*	Saturados	44,8
	Aromáticos	31,3
	Resinas	21,6
	Asfaltenos	2,3
Enxofre (%m/m)*	0,56	

* Dados fornecidos pela Petrobras.

Os ensaios consistiram em simulação de fadiga térmica, análise metalográfica e corrosão. Para estes foram confeccionados corpos de provas de chapa de aço inoxidável austenítico AISI 316L de 3,0 mm de espessura e diâmetro de 400 mm soldados sobre bases de aços ASTM A516

Gr60 com 19,0 mm de espessura e 440 mm de diâmetro. Foram soldados dois corpos de prova utilizando os eletrodos supracitados na Tabela 3.

As soldagens foram realizadas por um soldador qualificado disponibilizado pela unidade de refino de petróleo da Petrobras – LUBNOR.

O procedimento de soldagem consistiu na simples deposição de um cordão de solda, na posição plana, ao longo do comprimento da circunferência da chapa de diâmetro menor (AISI 316L) sobre a de diâmetro maior (ASTM A516 Gr60), empregando-se o processo de soldagem manual com eletrodo revestido (corrente contínua eletrodo no positivo). O procedimento foi realizado com controle da velocidade, em torno de 20 cm/min, tensão de 24V e energia de soldagem aproximadamente de 5kJ/cm. Os parâmetros de soldagem estão na Tabela 5.

Os corpos de prova foram divididos em quatro quadrantes. A soldagem dos cordões foi feita inicialmente no primeiro quadrante, em seguida no terceiro quadrante, depois no segundo quadrante e por último no quarto quadrante para tentar minimizar as tensões na chapa (*lining*).

Tabela 5. Parâmetros de soldagem utilizados para os dois eletrodos

Ensaio	<i>Lining</i>	Eletrodo	Corrente (A)	Energia de soldagem (kJ/cm)
1	AISI 316L	AWS E309MoL-16	70	5,0
2	AISI 316L	AWS E316L-17	65	4,7



Figura1. Cordão de solda depositado no terceiro quadrante do corpo de prova.

Após a realização das soldagens cada corpo de prova foi submetido a ciclos de simulação de Fadiga Térmica com aquecimento desde a temperatura ambiente até 400°C (máxima temperatura atingida na torre de destilação) utilizando uma taxa de aquecimento de 10°C/min. Em cada ciclo, o tempo foi de 30 minutos. Em seguida o forno foi desligado até os corpos atingirem de 300°C. Após isso os corpos de prova foram resfriados ao ar calmo até temperatura ambiente. Após isso os corpos de prova foram submetidos à inspeção por líquido penetrante (LP) nas regiões da solda (ZAC e MS) para verificar o surgimento ou não de trincas. Não havendo trincas os corpos de prova foram submetidos a um novo ciclo de simulação de Fadiga Térmica até que fosse observado algum indício de trincas e/ou completados os vinte ciclos.

A soldagem foi inspecionada ao término de todos os ciclos, mas ao completar o primeiro, o quinto e o décimo ciclo, a inspeção foi feita por um Inspetor de LP disponibilizado pela unidade de refino de petróleo da Petrobras – LUBNOR.

Após os ensaios de LP, foram retiradas três amostras dos corpos de prova (Figura 2), de cada condição mostrada na Tabela 5, para a realização de análises metalográficas por eletrônica de varredura (MEV). Na região correspondente ao número 1 da Figura 2 foram feitas as análises de microscopia ótica e eletrônica de varredura. A região 1 corresponde ao metal de solda (MS) e ao *lining* (aço AISI 316L). As regiões 2 e 3 correspondem ao aço ASTM A516 Gr60.

As análises microestruturais das amostras de aço AISI 316L foram feitas com ácido oxálico 10%, densidade de corrente de 1,0mA/cm² durante 180 segundos.

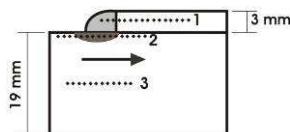


Figura 2. Desenho esquemático da seção transversal dos corpos de prova em que foram realizados ensaios de simulação de Fadiga Térmica.

Concluídas as análises metalográficas, foi feita a avaliação da taxa de corrosão do metal de solda e do *lining* retirados dos corpos de prova (Figura 2). Para tanto foi necessária a remoção da parte inferior dos corpos de prova (correspondente ao aço ASTM A516 Gr60), uma vez que esta parte não fica exposta ao petróleo nas condições reais que ocorrem na torre de destilação. A presença do aço ASTM A-516 Gr60 poderia fazer com que a corrosão atacasse com uma maior intensidade este aço e não o *lining*, mascarando o resultado.

As amostras com dimensões de 15 x 25 x 3,0 mm, compreendendo o metal de solda, a região da ZAC e do *lining* não afetado pelo calor da soldagem (aços AISI 316L e AISI 444) foram submetidas a tratamentos térmicos imersas em petróleo cru. Para cada uma das condições apresentadas na Tabela 5, foram retiradas 3 amostras, totalizando 6 amostras.

A realização do ensaio propriamente dito se deu com a imersão das amostras em petróleo, uma amostra de cada condição, na temperatura de 300°C durante 30 horas (tempo necessário para perda de massa nas condições estudadas) com três repetições para cada condição. O objetivo deste ensaio foi verificar a resistência à corrosão de corpos de prova soldados de aço AISI 316L, após os ensaios de simulação de Fadiga Térmica. Para os tratamentos térmicos foi utilizado um aparelho de medida de ponto de fulgor com termostato.

Após o tratamento em petróleo a 300°C por 30 horas, as amostras passaram por uma limpeza em querosene para uma avaliação superficial por meio de MEV e análise dispersiva de raios-X (EDX). As amostras permaneceram em um recipiente fechado, imersas em querosene, até o momento de sua caracterização no MEV. Esta medida foi tomada para evitar um contato prolongado com o ar, que poderia causar um processo de corrosão atmosférica.

Para determinar a velocidade do processo corrosivo dos materiais e a agressividade do meio corrosivo foram medidas as massas dos corpos de prova antes e após o tratamento em petróleo pesado para determinar a massa dos produtos da corrosão. Em seguida, os corpos de prova foram submetidos a uma decapagem química, utilizando uma solução alcoólica com 10% de ácido nítrico durante 10 minutos. Logo após a decapagem, os corpos de prova foram novamente pesados para determinar a perda de massa provocada pelo processo corrosivo. Uma amostra de cada material como soldado (sem tratamento em petróleo) foi colocada no ácido juntamente com as amostras tratadas, para verificar se ocorre perda de massa pela decapagem.

A determinação da taxa de corrosão foi obtida pela Equação 1, de acordo com a norma N-2364 da Petrobras.

$$\text{Taxa de corrosão} = \frac{K \cdot \Delta M}{S \cdot t \cdot \rho} \quad \text{Equação 1}$$

Onde: K é uma constante $8,76 \times 10^4$ (mm/ano), ΔM (g) é a diferença de massa antes e após a exposição ao meio corrosivo, S (cm²) é a área exposta da amostra, t (horas) é o tempo de exposição e ρ (g/cm³) é a massa específica do aço.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos ensaios de líquido penetrante, realizados após cada ciclo de Fadiga Térmica, teve o mesmo comportamento em todas as situações. A Figura 3 mostra que não houve a ocorrência de trincas ao longo das regiões da solda após a realização das soldagens e da exposição dos corpos de prova aos ciclos de simulação de Fadiga Térmica. É importante ressaltar que a existência de mordeduras é do encontro entre o início de um cordão de solda e o

final do outro e não dos ciclos de simulação de Fadiga Térmica. As condições observadas não comprometeram o procedimento de soldagem, de acordo com o laudo emitido pelo inspetor qualificado da Petrobras.

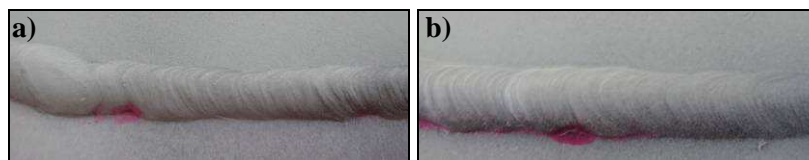


Figura 3. Ensaio de LP após o 20º ciclo de simulação de Fadiga Térmica. a) Soldada com eletrodo AWS E 309MoL-16. b) Soldada com eletrodo AWS E 316L-17

Os corpos de prova submetidos aos ensaios de simulação de Fadiga Térmica chegaram até o 20º ciclo de simulação de Fadiga Térmica sem apresentarem nenhum indício do surgimento de trincas ao longo das regiões próximas ao MS.

Tinoco e Nogueira Jr (2002) fizeram um estudo sobre a análise através da simulação numérica de esforço de Fadiga Térmica em *linings* para as torres de destilação da Petrobras onde foram empregadas chapas de aços AISI 316L e/ou AISI 317 com 3mm de espessura, largura de 100, 200 e 300mm e comprimento de 1500, 2000 e 3000mm. Tinoco e Nogueira Jr (2002) verificaram que as chapas com largura de 100 mm atingiram 138 ciclos de Fadiga Térmica até ocorrer a falha. Os *linings* com 200mm de largura chegaram a 36 ciclos e os com 300 mm chegaram a 37 ciclos de Fadiga Térmica antes da falha, justificando o não surgimento de trincas após o 20º ciclo de simulação de Fadiga Térmica.

Com o propósito de verificar a existência de trincas ao longo da ZAC e confirmar, ou não, os resultados obtidos nos ensaios de LP, foram feitas análises através de MEV nas regiões entre o MS (AWS E316L-17 e AWS E309MoL-16) e a ZAC dos *linings* do aço. Contudo, como pode ser verificado na Figura 4, não foi verificado nenhum indício da ocorrência de trincas nestas regiões, mesmo após os corpos de prova terem sido submetidos a vinte ciclos de simulação de Fadiga Térmica, confirmando os ensaios de LP.

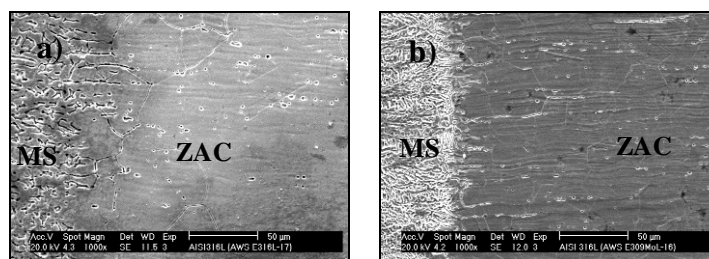


Figura 4. Região entre MS e *lining* de aço AISI 316L. a) Eletrodo AWS E316L-17. b) Eletrodo AWS E309MoL-16

O fato da ZAC do aço AISI 316L não ter apresentado trinca não implica na validação da viabilidade da sua aplicação como *lining*, embora elas surjam durante a operação nas torres de destilação. Deve-se ressaltar que além da variação da temperatura, o *lining* também fica exposto ao petróleo com variação da temperatura na torre de destilação. Assim faz-se necessário uma nova simulação de Fadiga Térmica, mas, desta vez, expondo o *lining* ao petróleo.

Quando o petróleo é submetido a temperaturas entre 230 e 400°C maior é a probabilidade de ocorrer corrosão naftênica, com a máxima taxa de corrosão ocorrendo na temperatura de 370°C (BABAIAK-KIBALA, 1993).

Uma vez que o petróleo utilizado tem índice de acidez igual a 2,73 (Tabela 4) e a temperatura na qual ele foi submetido neste trabalho se encontra dentro da faixa de 230 a 400°C, fica caracterizado que a ocorrência de corrosão do tipo naftênica. Segundo a literatura,

quando o valor da acidez do petróleo for superior a 0,5, este petróleo contém uma quantidade de ácidos naftênicos suficiente para causar um potencial problema de corrosão (BABAIAN-KIBALA et al., 1993; MEDVEDEVA, 2000).

Na Figura 5, é apresentado o resultado da média da taxa de corrosão, obtido através da análise de perda de massa de 3 amostras, retiradas dos corpos de prova submetidos aos ensaios de simulação de Fadiga Térmica, tratadas em petróleo a 300°C durante 30 horas para cada uma das condições apresentadas na Tabela 5. O resultado revela que ambas as amostras apresentaram uma taxa de corrosão considerada severa de acordo com a norma N-2364 da Petrobras, estando acima do valor aceitável (0,125 mm/ano). Considerando os valores da taxa de corrosão apresentados na Figura 5 é possível prever a durabilidade das chapas de aço com os dois tipos de eletrodo. O *lining* soldado com o eletrodo AWS 309 MoL-16 tem durabilidade de 9 anos e 8 meses. Já o *lining* soldado com o eletrodo AWS 316L-17 de 8 anos.

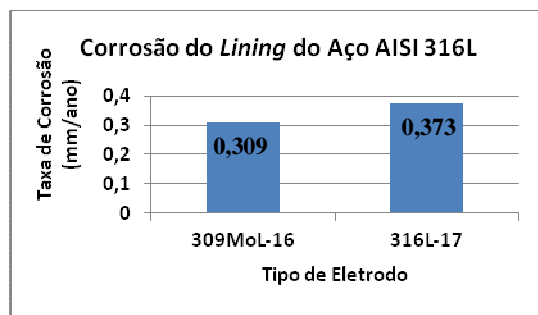


Figura 5. Taxa de corrosão do MS e dos *linings* tratados a 300°C durante 30 horas.

3.1 Caracterização superficial do MS diluído com o aço AISI 316L - tratado em petróleo a 300°C.

A Figura 6 mostra a superfície do MS depositado pelo eletrodo AWS E316L-17 diluído com o *lining* de aço AISI 316L, após tratamento em petróleo a 300°C por 30 horas. Pode-se observar a presença de produtos do ataque corrosivo pela análise feita no MEV, como está apresentado na Figura 6(a) e que é confirmado pelo EDX mostrado na Figura 6(b). Através da análise do EDX foi detectada a existência de elementos característicos do MS e ainda a presença de oxigênio e enxofre, caracterizando a presença dos produtos da corrosão, óxido de ferro e/ou sulfeto de ferro.

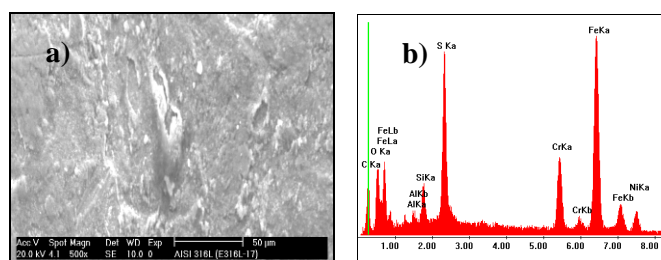


Figura 6. (a) Superfície do MS (AWS E316L-17) diluído com aço AISI 316L tratado em petróleo a 300°C. Aumento: 500x. (b) EDX da superfície do MS

A avaliação da superfície do MS depositado pelo eletrodo AWS E309MoL-16 diluído com o *lining* de aço AISI 316L é apresentada na Figura 7. Como já fora observado para o MS depositado pelo eletrodo AWS E316L-17, a superfície do MS depositado pelo eletrodo AWS E309MoL-16 também apresentou a presença dos produtos corrosivos identificados através da análise no MEV da Figura 7(a) e que são confirmados pelo EDX mostrado na Figura 7(b). A Figura 7(b) mostra a existência de elementos típicos do MS e ainda a presença de oxigênio e

enxofre, característicos de produtos da corrosão, indicando que estes produtos são formados pela presença de óxido de ferro e/ou sulfeto de ferro. Contudo quando comparado com a Figura 6(b) verifica-se que os picos de enxofre para o MS do eletrodo AWS E316L-17 são maiores que os observados para o MS do eletrodo AWS E309MoL-16.

Deve-se ressaltar que o resultado apresentado no EDX é apenas qualitativo. Todavia, esta diferença já é um indício de que o MS depositado pelo eletrodo AWS E316L-17 sofreu mais com o ataque corrosivo do que o depositado pelo eletrodo AWS E309MoL-16.

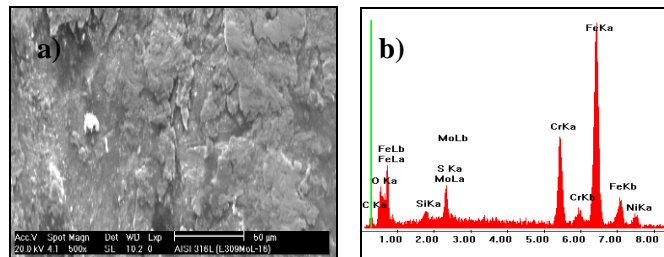


Figura 7. (a) Superfície do MS depositado (AWS E309MoL-16) diluído com aço AISI 316L tratado em petróleo a 300°C. (b) EDX da superfície do MS.

3.2 Caracterização superficial da ZAC do aço AISI 316L - tratados em petróleo à 300°C.

Após tratamento em petróleo a 300°C por 30 horas, a ZAC do *lining* de aço AISI 316L soldado com o eletrodo AWS E316L-17 foi marcada pela presença de uma intensa camada de produtos de corrosão, como está mostrado na Figura 8(a). O EDX da Figura 8(b) comprova que, realmente, a ZAC está coberta por uma camada de produtos de corrosão.

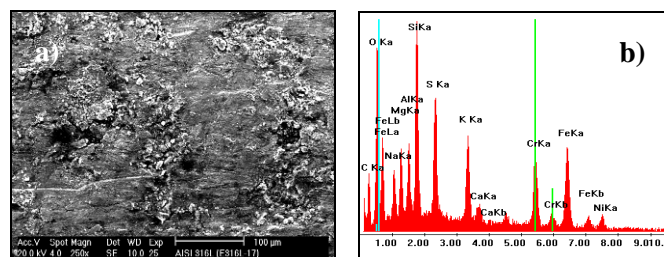


Figura 8. (a) ZAC do aço AISI 316L soldado com o eletrodo AWS E316L-17. (b) EDX da região mostrada na Figura 8(a).

O mesmo comportamento pode ser verificado na ZAC do aço AISI 316L soldado com o eletrodo AWS E309MoL-16 como pode ser verificado na Figura 9.

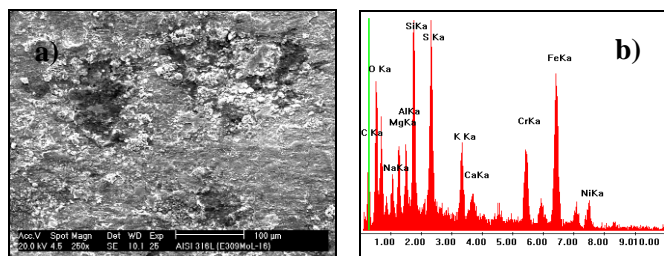


Figura 9. (a) ZAC do aço AISI 316L soldado com o eletrodo AWS E309MoL-16. (b) EDX da região mostrada na Figura 9(a).



4. CONCLUSÕES

Nenhuma amostra submetida ao tratamento em petróleo a 300°C durante 30 horas apresentou indício do surgimento de trincas ao longo da ZAC dos *linings*.

Ao final dos ensaios de simulação de Fadiga Térmica nenhum indício de trincas foi observado. Os mesmos após a exposição ao tratamento em petróleo a 300°C durante 30 horas, também não apresentaram nenhum indício do surgimento de trincas.

A microestrutura da ZAC do aço AISI 316L, para ambos os eletrodos, após os ensaios de simulação de Fadiga Térmica, não apresentou nenhuma modificação que favorecesse o surgimento de trinca.

O tipo de eletrodo foi determinante no valor da taxa de corrosão fazendo com que o MS depositado pelo eletrodo AWS E309MoL-16 apresentasse melhor resultado que o eletrodo AWS E316L-17.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao ENGESOLDA, Laboratório de Engenharia de Soldagem, ao LACAM, Laboratório de Caracterização de Materiais, pela preparação das amostras, a UFC – Universidade Federal do Ceará, ao IFCE – Campus Maracanaú, a FUNCAP, CAPES e Petrobras pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

BABAIAN-KIBALA, E., Craig Jr., H. L., Rusk, G. L., Blanchard, K. V., Rose, T. J., B. L. Uehlein, 1993, Naphthenic Acid Corrosion in a Refinery Setting. **Corrosion**, paper n. 631.

COSULTCHI, A., GARCIAFIGUEROA, E., GARCIA-BORQUEZ, A., REGUERA, E., YEE-MADEIRA, H., 2001, Petroleum Solid Adherence on Tubing Surface. **Fuel**, vol. 80, pp. 1963.

GUIMARÃES, R. F. **Avaliação Comparativa do Linings dos Aços AISI 444 e AISI 316L para Aplicação em Torres de Destilação de Petróleo**. 2005. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) – UFC, 2005.

MEDVEDEVA, M. L., 2000, Specifics of High-Temperature Corrosion Processes During Oil Recovery. **Chemical and Petroleum Engineering**, v. 36, pp. 749-754.

NORMAS Petrobras. N – **2364**: Avaliação de corrosão interna através de cupom de perda de massa. – Petrobras, 2003.

TINOCO, E. B., NOGUEIRA JR., **Simulação Numérica de Linings para Torres de Destilação de Petróleo Via Método dos Elementos Finitos**, CENPES/PDEAB/EBE (Engenharia Básica de Equipamentos) Petrobras, 2002.

TURNBULL, A., GRIFFITHS, A., 2003. Corrosion and Cracking of Weldable 13 wt-%Cr Martensitic Stainless Steels for Applications in the Oil and Gas Industry. **Corrosion Engineering, Science and Technology**. Vol. 38, n. 1, pp. 21-49.