

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO À FADIGA E À CORROSÃO-FADIGA DE JUNTAS SOLDADAS DA LIGA INCONEL 625 TESTADA PARA USO EM PLATAFORMAS OFF-SHORE

M.E. Pflingstag, R. M. Schroeder, I. L. Müller

*LAPEC(Laboratório de Pesquisa em Corrosão)- Departamento de Metalurgia-
Universidade Federal do Rio Grande do Sul.*

Av. Bento Gonçalves, 9500- Setor 4- Prédio 75 – Sala 232- Cep 91501-970

maiquel10@walla.com

RESUMO

Estudou-se neste trabalho o comportamento a fadiga e a corrosão-fadiga de juntas soldadas de Inconel 625 que podem ser empregadas em plataformas off-shore como alimentadores (“risers”). Essas tubulações podem ser usadas integralmente desta liga mas também na forma de “Clads” juntamente com o aço API 5LX 60.

Um dos pontos mais susceptíveis a sofrer esses processos de degradação é a solda circunferencial entre os tubos, uma vez que são geradas tensões devido ao processo de soldagem, e fluem no interior destes, elementos agressivos como cloretos, gás carbônico, entre outros.

Os testes utilizados para avaliação desses fenômenos, consistiram em curvas de polarização para caracterização do comportamento à corrosão, ensaios de tração ao ar e em presença do meio corrosivo, ensaios de fadiga e corrosão fadiga. Esta liga na condição depositada demonstrou uma excelente resistência a corrosão e um bom comportamento em relação à fadiga e a corrosão-fadiga.

Palavras-Chave: Inconel 625, Fadiga, Corrosão-Fadiga, Plataformas “off-shore”.

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de tecnologia para a perfuração e produção de petróleo em plataformas “off-shore” em águas profundas e ultra profundas em condições adversas, leva à necessidade de estudos buscando o desenvolvimento de novos materiais ou realizando novas avaliações para diferentes situações, dos materiais já existentes. A liga de alto níquel (Inconel 625) que será estudada neste trabalho poderia ser empregada como material estrutural sofrendo ação de esforços estáticos como seu próprio peso, e esforços cíclicos como movimento de vagas e marés, que quando associados ao meio corrosivo (água do mar do lado externo e produtos contendo além do petróleo, cloretos, pH baixo, gás carbônico e possivelmente bactérias do lado interno), podem conduzir, entre outras formas de corrosão, à corrosão-fadiga. As soldas circunferenciais entre os tubos aparecem como uma região crítica para o surgimento desse tipo de degradação, tanto pela presença de defeitos inerentes a este processo de fabricação como também devido às tensões residuais de soldagem que podem conjuntamente com as demais tensões, concentrar a degradação nesses pontos.

A presença de hidrogênio no interior desse material pode alterar o seu comportamento modificando as suas propriedades mecânicas, podendo a liga sofrer fraturas frágeis inesperadas, dependendo de certas características do material, do meio e do teor de hidrogênio absorvido.

Um fator acelerador do processo de entrada de hidrogênio é a redução do teor de oxigênio dissolvido na água do mar a medida que a profundidade aumenta, pois este gás, quando presente, compete com o hidrogênio em termos de adsorção sobre a superfície reduzindo o efeito do segundo. Por outro lado as reações que levam a corrosão, na ausência de oxigênio, também são freadas, neste caso reduzindo a oferta de hidrogênio para a fissuração.

Quando os esforços são cíclicos, o ingresso de hidrogênio no material, é através de um processo corrosivo na superfície do tubo ou mesmo pela operação de soldagem, pode reduzir o limite de fadiga a valores bastante baixos, colocando

a estrutura em riscos de sofrer falhas por esse processo principalmente na junta soldada.

Uma das formas habituais de prevenir a corrosão da estrutura submersa da plataforma é a proteção catódica. Dependendo, porém, do potencial aplicado para exercer essa proteção, pode-se incrementar a entrada de hidrogênio no interior da estrutura e acelerar o processo de fragilização como efeito colateral indesejável do combate à corrosão.

A água do mar e os elementos que acompanham o petróleo são eletrólitos sabidamente bastante agressivos, com diversos sais e gases dissolvidos, podendo através de um processo de corrosão-fadiga causar fissuração envolvendo um mecanismo de dissolução anódica, ou envolvendo fragilização pelo hidrogênio a partir de uma corrosão localizada como pites ou frestas, que funcionariam como nucleantes do processo, ou ainda a partir de corrosão generalizada onde uma das reações catódicas é a redução do hidrogênio à gás.

O estudo do Inconel 625 quanto ao seu comportamento em relação à presença do hidrogênio e a participação de outros mecanismos na corrosão fadiga seria de grande importância para o conhecimento desse material visando futuras aplicações em plataformas com maior grau de confiabilidade.

Desde que se tornou material em “evidência”, o Inconel vem sendo extensivamente estudado por vários grupos de pesquisa de todo o mundo. Não somente a liga 718, mas todos os tipos de Inconel têm sido investigados no que se refere à resistência a corrosão por tensão, corrosão em altas temperaturas, mecanismos de permeação de hidrogênio, morfologia dos filmes, efeitos do tratamento térmico, dentre tantos outros estudos que dão as reais características destas superligas.

Dentre vários estudos de corrosão por tensão (SCC), cabe destacar o trabalho de Mintz e Devine⁽¹⁾, que estudaram a influência dos filmes superficiais na suscetibilidade do Inconel 600 a corrosão por tensão. Os autores sugerem que para que ocorra este tipo de corrosão é necessária a presença de filmes superficiais particulares. Usando a técnica de espectroscopia Raman *in situ*, verificaram que não houve a formação de filmes no Inconel 600 em potenciais

abaixo da região de potencial em que ocorre corrosão sob tensão. Óxido de cromo se formava na região da corrosão por tensão e NiO quando o potencial é elevado após a região da suscetibilidade a SCC. A potenciais mais altos ainda filmes de $(\text{Fe,Cr})_2\text{O}_3$ e $\text{Ni}_{3-x}\text{Fe}_x\text{O}_4$ se formaram.

Na corrosão por tensão do Inconel, um fator muito importante a ser considerado é a permeação de hidrogênio intergranular. Diversos trabalhos como esses podem ser encontrados na literatura. Trabalhos como o de Magnin, Noel e Rios⁽²⁾, Cizelj *et al.*⁽³⁾ ou Gonzalez e Fionova⁽⁴⁾ tentaram chegar a um melhor conhecimento sobre os mecanismos de propagação de trincas por SSC em reatores nucleares de água pressurizada. Outro grupo de pesquisa, liderado por Shen e Shewmon⁽⁵⁾ propôs um mecanismo interessante para este fenômeno. Estudando Inconel 600 em alta temperatura, na presença de água deaerada, sugeriram que essas fissuras são iniciadas pela nucleação de uma alta densidade de bolhas no contorno de grão sob uma ação combinada de tensão aplicada e alta pressão.

Devido ao seu grande uso por indústrias nucleares e petrolíferas, o Inconel 718 também tem sido bastante estudado, e trabalhos científicos são facilmente encontrados na literatura⁽⁶⁻¹⁰⁾. Sabe-se que a expansão do uso de Inconel 718 para aplicações acima citadas está, de certa forma, restrita a sua suscetibilidade a corrosão por tensão intergranular. Reduzir esse fenômeno, que está diretamente ligada à formação das fases intermetálicas Υ'' (tetragonal de corpo centrado Ni_3Nb) e Υ' (cúbico de face centrada Ni_3Al), é um grande desafio para pesquisadores. Pode-se citar, por exemplo, os trabalhos de Chen, Kawagoishi e Nisitani⁽⁶⁾ que estudaram a taxa de crescimento da corrosão por fadiga e vida útil do Inconel 718 em diversas temperaturas. Verificou-se que esta taxa poderia ser estimada pela lei de crescimento das pequenas fissuras em altos níveis de stress e que a fadiga é maior em temperaturas mais elevadas. Os autores mencionam que, mesmo que o Inconel seja considerado resistente a altas temperaturas, a repetição por stress em condições ambientais específicas pode causar outros comportamentos no crescimento de trincas e que esses problemas deveriam ser estudados no futuro. Uma condição ambiental estudada, interessante a este

projeto, foi feito por Cooper, Slebodnick e Thomas⁽⁷⁾, na qual utilizaram o Inconel 625 com sua superfície modificada por laser sob influência de água do mar não filtrada. Concluem que a injeção de partículas por laser resulta na formação de diferentes fases com diferentes morfologias e que a resistência a corrosão inerente a liga é diminuída devido as mudanças microestruturais que diminuem sua homogeneidade.

Em um estudo similar, Bache, Evans e Hardy⁽⁸⁾ também estudaram certos efeitos ambientais no aumento de trincas provocadas por fadiga. O trabalho traz algumas evidências que as taxas de propagação de trincas em Inconel 718 são significativamente aumentadas dependendo da situação ambiental, que pode determinar o mecanismo das fraturas trans e intergranulares. Nos resultados, observa que a combinação do teste de fadiga, temperatura e situação simulada de ambiente contribuíram para o rápido crescimento da trinca, inicialmente de $\cong 1$ mm até dimensões críticas em até 2000 ciclos. Segundo os autores, outros fatores são determinantes na formação e propagação das trincas, dentre as quais pode-se citar: a influência do tempo gasto no pico de stress e a o efeito da taxa de stress.

Vale ressaltar que não foram encontrados muitos estudos em Inconel sob o enfoque específico de corrosão-fadiga em soluções que simulassem ambientes marítimos⁽¹¹⁾. Um estudo nesse sentido foi realizado no próprio LAPEC⁽¹²⁾, na qual se realizaram ensaios de fadiga e corrosão-fadiga em presença de solução contendo íon cloretos saturado com CO₂ para avaliação da liga inconel 625 obtida por soldagem. Este estudo interessa diretamente às indústrias petrolíferas, que utilizam essa liga em plataformas marítimas e têm tido muitos problemas principalmente em plantas off-shore, uma vez que o movimento das vagas e marés pode causar corrosão por fadiga sobre os *risers*, que saem das plataformas em direção ao fundo do mar.

MATERIAIS E MÉTODOS

O eletrólito a ser usado nos ensaios propostos será a solução de NaCl 3,5%. Poderá ser usada solução que simula água do mar, segundo a norma ASTM

D1141-90⁽¹³⁾. Para todas as soluções se utilizará reagentes p.a. e água bidestilada ou deionizada.

Inconel 625 foi empregado como eletrodo de trabalho em ensaios de polarização após polimento com lixas d'água de granulometria decrescente e suspensão de óxido de alumínio de 0,3 μm em panos de polimento. Nos ensaios de tração, fadiga e corrosão-fadiga os corpos de prova usados nos testes seguirão padrões de dimensões estabelecidos pela norma ABNT 304⁽¹⁴⁾, sendo que após usinagem sofrerão tratamento com lixas de granulometria #100 até #1000. Uma amostra padronizada para este teste é dada na figura a seguir:

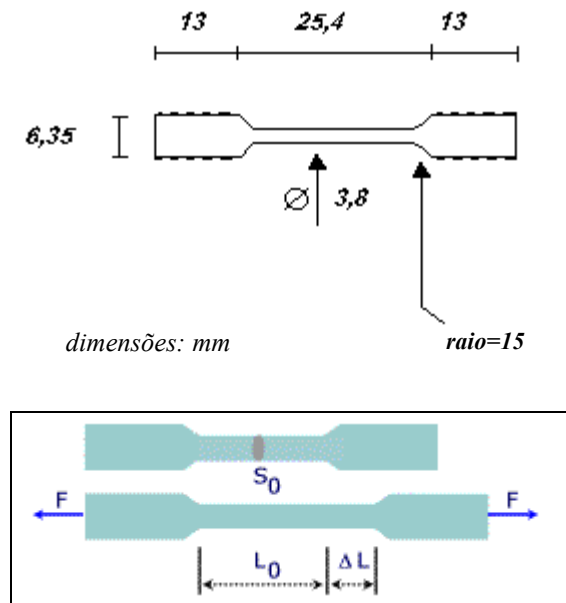


Figura 1 – Aspecto e medidas do corpo de prova utilizado nos ensaios.

Os corpos de prova antes de serem usinados foram soldados manualmente com eletrodos revestidos conforme a figura 2 e cortados por processo de eletro-erosão pois apresentaram extrema dureza na região afetada pelo calor da solda.

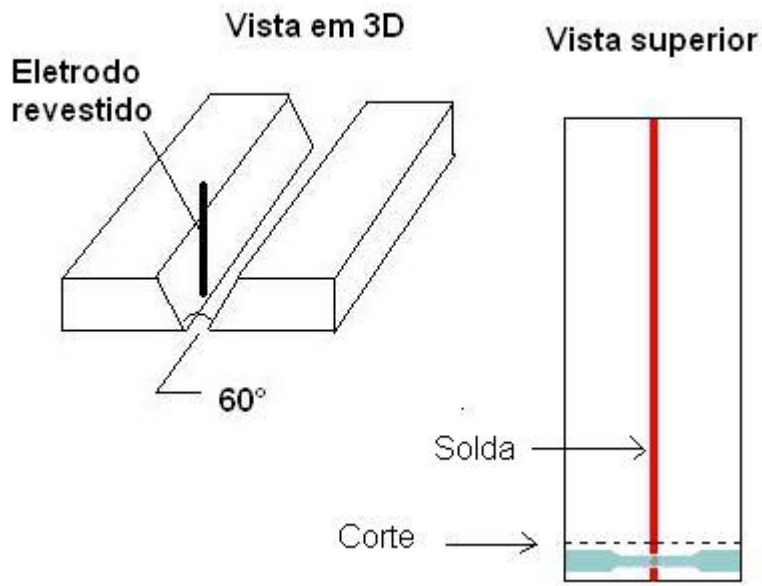


Figura 2 – Procedimento de soldagem e confecção dos corpos de prova.

Os parâmetros usados na soldagem foram os seguinte: Corrente = 115 A;
Secagem do eletrodo = 2 h à 180 °C;

Este trabalho teve o objetivo de avaliar o comportamento à fadiga e a corrosão-fadiga do material de solda e da liga Inconel 625 soldada, em uma solução contendo 115000 ppm de cloreto. Os testes foram feitos em uma máquina de fadiga tipo excêntrica, com 20 KN de capacidade conforme mostra o esquema da figura 3.

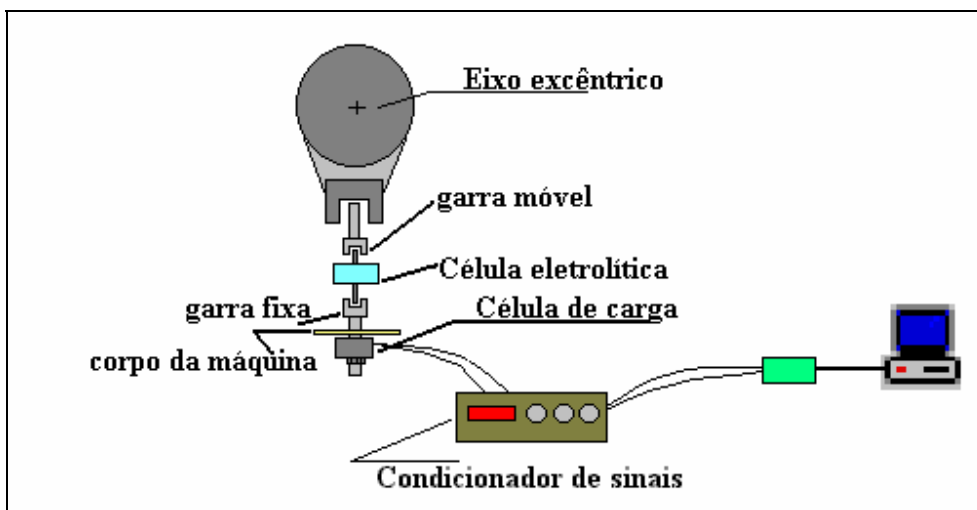


Figura 3 – Desenho esquemático da máquina de fadiga.

Nos ensaios de fadiga e corrosão-fadiga, as amostras utilizadas serão as mesmas que as usadas nos ensaios de tração, sendo que acoplados à máquina de fadiga, traz como resposta uma curva de Wöhler (S-N), tensão vs. número de ciclos (N, vida em fadiga) que mostra os efeitos da corrosão. Os testes realizados ao ar foram feitos em alta frequência (7.2 Hz) (tendo em vista que a frequência não exerce influência apreciável no comportamento à fadiga ao ar) e na presença do meio já descrito, baixa frequência (0.3 Hz)., sendo este valor da ordem de grandeza da frequência das vagas e marés. Os testes foram feitos à temperatura ambiente e no potencial de corrosão. Os ciclos de carga foram ajustados com um inversor de frequência para a redução da velocidade do motor a 18 rpm (0.3Hz) e monitorado com um software desenvolvido no laboratório, permitindo seguir os ciclos de carga diretamente na tela de um computador. Os valores de carga foram ajustados com uma célula de carga com a mesma capacidade da máquina de fadiga.

Para os ensaios eletroquímicos o eletrodo de referência adotado foi o eletrodo de calomelano saturado. Como eletrodo auxiliar será utilizado uma espiral de platina de grande área.

A célula eletroquímica usada na polarização foi construída em vidro Pyrex e desenhada de modo a permitir o emprego de eletrodos na forma de chapas ou discos cuja área exposta à solução pode ser escolhida em diferentes pontos da chapa da amostra. A célula usada nos ensaios de tração e de fadiga foi construída em acrílico com aberturas para passagem dos eixos.

Nos ensaios de tração, uma amostra padronizada é submetida a um esforço longitudinal conforme a figura 1 mostrada anteriormente. A força aplicada F é continuamente aumentada até a ruptura da peça, que se dá evidentemente na parte mais fina. Os resultados são traçados na forma de um gráfico de tensão x deformação.

RESULTADOS

A liga foi avaliada quanto a seu comportamento mecânico através de testes de tração (fig. 4). Os resultados a tração apresentaram uma certa dispersão que deve estar associada ao fato de os corpos de prova terem sido usinados a partir de depósitos de solda de eletrodos revestidos (conforme Fig.2), conseqüentemente com as irregularidades, imperfeições e heterogeneidades inerentes a este processo de soldagem.

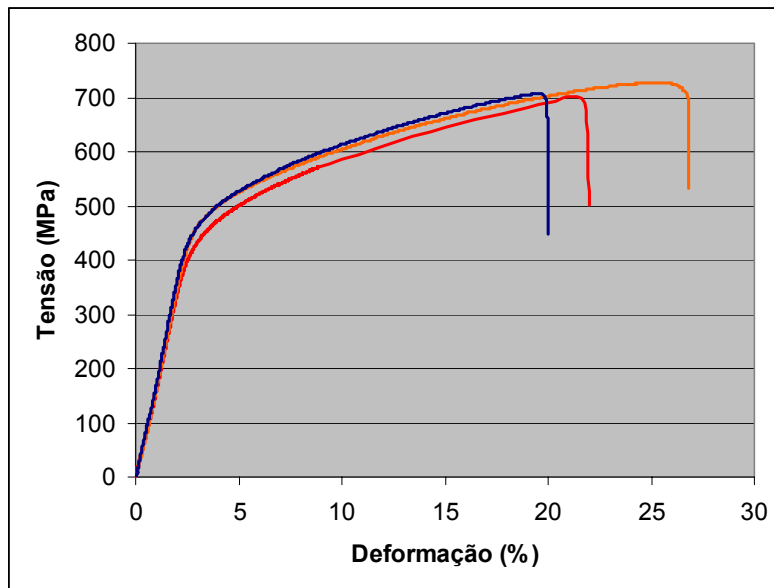


Fig 4. Curva Tensão X Deformação da junta soldada de Inconel 625.

Em relação aos ensaios de corrosão-fadiga, onde os resultados podem ser vistos na figura 5, observa-se que até a carga de 375 MPa não há ruptura por fadiga em nenhum dos testes realizados pelo menos até 500.000 ciclos . Para cargas maiores há uma grande dispersão de resultados, e este comportamento, da mesma forma que para os testes de tração, está relacionado com a condição soldada dos corpos de prova e seus defeitos internos.

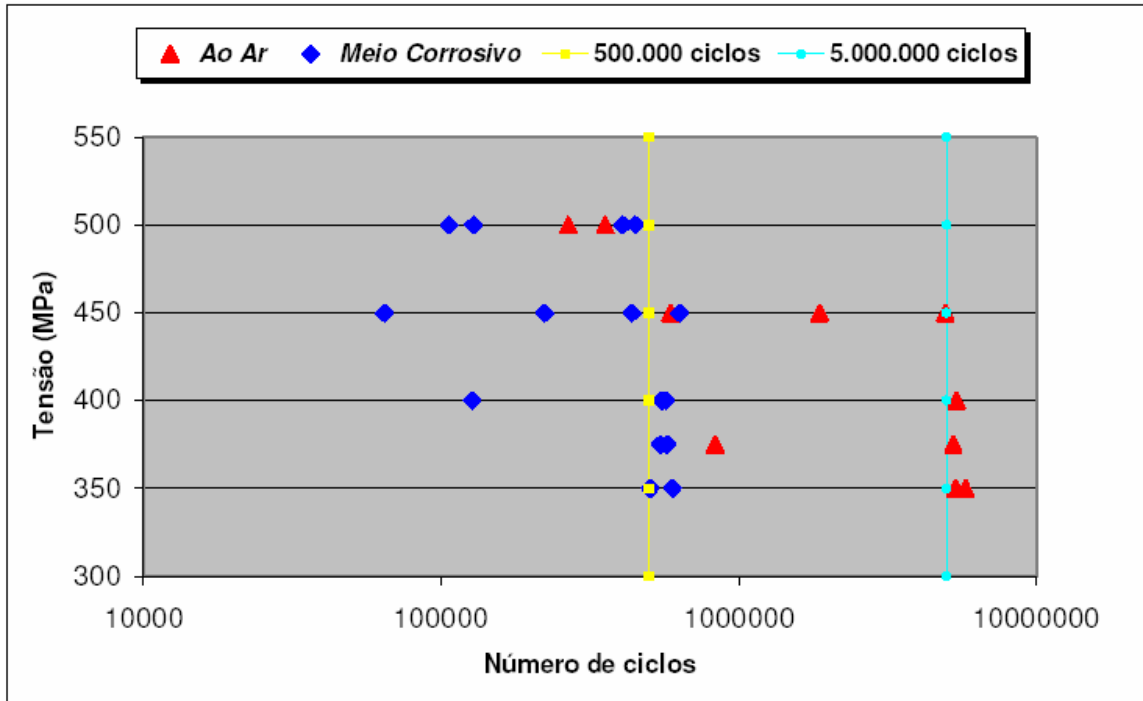


Fig. 6 – Corrosão-fadiga do metal de solda, Inconel 625

CONCLUSÕES

-O comportamento da liga soldada de Inconel 625 é fortemente influenciada pela forma e tamanho das inclusões de escória nos processos de fadiga e corrosão-fadiga.

O metal depositado a partir de eletrodos revestidos de Inconel 625 mostrou melhor comportamento à corrosão-fadiga entre os materiais já testados neste laboratório (aço inoxidável duplex; aço 13% cromo), mesmo que a resistência a este processo seja afetada pelos defeitos de soldagem.

Os corpos de provas usinados a partir das chapas soldadas mostraram melhor reprodutibilidade nos ensaios de tração ao ar que os obtidos a partir do inconel 625 apenas depositado.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 1) 1- MINTZ, T.S.; DEVINE, T.M. Influence of surface films on the susceptibility of Inconel 600 to stress corrosion cracking. **Engineering Materials**. V.261-263, p.875-884, 2004.
- 2) MAGNIN, T.; NOEL, D.; RIOS, R. Microfractographic aspects of stress corrosion cracking of Inconel 600 in a pressurized water reactor environment. **Materials Science & Engineering A: Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing**. V.A177, p. L11-L14, 1994.
- 3) CIZELJ, L.; HAUER, I.; ROUSSEL, G.; CUVELLIEZ, C. Probabilistic assessment of excessive leakage through steam generator tubes degraded by secondary side corrosion. **Nuclear Engineering and Design**. V.185, p. 347-359, 1998.
- 4) GONZALEZ, J.G.; FIONOVA, L. The effect of structural evolution in Inconel 601 on intergranular corrosion. **Material Chemistry and Physics**. V.56, p.70-73, 1998
- 5) SHEN,C.H.; SHEWMON, P.G. Mechanism for hydrogen-induced intergranular stress corrosion cracking in Alloy 600. **Metallurgical Transactions A (Physical Metallurgy and Materials Science)**. V.21A, p.1261-1271, 1990
- 6) CHEN, Q.; KAWAGOISHI, N.; NISITANI, H. Evaluation of fatigue crack growth rate and life prediction of Inconel 718 at room and elevated temperatures. **Materials Science and Engineering**, V. A277, p. 250-257, 2000.
- 7) COOPER, K.P.; SLEBODNICK, P.; THOMAS, E.D. Seawater corrosion behavior of laser surface modified Inconel 625 alloy. **Materials Science and Engineering**, V.A206, p.138-149, 1996.
- 8) BACHE, M.R.; EVANS W.J.; HARDY, M.C. The effects of environment and loading waveform on fatigue crack growth in Inconel 718. **International Journal of Fatigue**. V.21, p. S69-S77, 1999.
- 9) CZYRYCA, E.J. Fatigue and corrosion Fatigue properties of alloys 625 plus, 718, 725 and K-500. In: **4th International Symposium on Superalloys 718, 625, 706 and derivatives**, 1997, Pittsburgh. **Anais...** p.639-652.
- 10) KIM, J.; MOON J. C-ring stress corrosion test for Inconel 600 and Inconel 690 sleeve joint welded by Nd:YAG laser. **Corrosion Science**. V.46, p. 807-818, 2004.

- 11) AMAYA, M.; MARTINEZ, R.; MARTINEZ, L. Corrosion induced for a Novel Aerobic Bactéria isolated in a offshore injection system. **The Journal of Science and Engineering Corrosion**. V.57, n.11, p.999-1003, 2001.
- 12) SCHROEDER, R.M.; MÜLLER, I.L. 7º COTEC – Conferência em Tecnologia de Equipamentos – Setembro 9-12 Florianópolis, Brasil (2003) (CD-rom).
- 13) AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1141-90**: Standard Specification for substitute ocean water West Conshohocken, 1996. 2p.
- 14) METALS HANDBOOK, American Society for Metals. Properties and selection – Tool materials and special purpose metals. V.3, p.143, 1980.

The fatigue and corrosion fatigue behavior of welded Inconel 625 alloy employed in off-shore plataforms

Abstract

The fatigue and corrosion fatigue behavior of welded Inconel 625 employed live like risers in off-shore platforms was studied .

These risers may be employed integrally of this alloy, or combined with API 52 X60 steel in the form of clads.

One of the most susceptibles points in these structures is the circumferential weld that joint the pipes together. In these regions, stresses and defects are generated by the welding process, and these material remind in contact with aggressive species like, chlorides and Co_2 .

Polarization curves, slow strain rate fatigue and corrosion fatigue tests were used to characterize the Inconel alloy behavior.

In the welded deposit condition, this alloy shows an excellent resistance corrosion and a good fatigue and corrosion-fatigue behavior.

Key-words: Inconel 625, Fatigue, Corrosion-Fatigue, plataforms off-shore.