



2º CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO & GÁS

EVOLUÇÃO DO ESTADO DE TENSÕES RESIDUAIS INTRODUZIDAS POR SHOT-PEENING EM AÇOS INOXIDÁVEIS MARTENSÍTICOS

Bruno Roberto de Moraes Barbosa¹, Joel Regueira Teodósio², Theodoro Antoun Netto³.

¹ Bolsista Graduação ANP – PRH35, DEMM, UFRJ, brmoraes@metalmat.ufrj.br

²DEMM, COPPE, UFRJ, teodosio@metalmat.ufrj.br

³PENO, COPPE, UFRJ, tanetto@lts.coppe.ufrj.br

Resumo – As tensões residuais influenciam, substancialmente, nas características da resistência e do funcionamento dos elementos de uma estrutura. Como resultado dos processos, de produção das estruturas e, posteriormente, sua montagem e funcionamento, freqüentemente ocorrem tensões residuais que contribuem para o surgimento de trincas. Para a preservação da segurança e da capacidade de trabalho dos diversos elementos das estruturas, o conhecimento da magnitude e das direções de atuação dessas tensões é de grande importância. O tratamento superficial dos metais, através de shot-peening, é largamente utilizado para aumentar a resistência à corrosão sobre tensão e à fadiga. Neste tratamento são introduzidas tensões residuais compressivas na superfície da estrutura. O presente trabalho visa o estudo da evolução do estado de tensões residuais compressivas, introduzidas por shot-peening, em aços inoxidáveis martensíticos, durante o desenvolvimento de deformação plástica por tração uniaxial. O trabalho se encontra no início da fase experimental, de forma que não existe nenhum resultado concreto a ser apresentado. Posteriormente, será estudada a evolução do estado de tensões durante ciclos de fadigas.

Palavras-Chave: tensões residuais, shot-peening, aço inoxidável.

Abstract – Residual stress plays a major role on the strength characteristics and functionality of structural elements. Resulting from processing, production and further assembling, this residual stress often contributes to the nucleation and propagation of cracks. For safety reasons and working capabilities of several structural elements, the knowledge of magnitude and orientation of residual stresses is of great concern. The surface treatment of metals by shot-peening is largely used to enhance the corrosion resistance under stress and fatigue. In this treatment, compressive residual stress is introduced in the structure surface, since the nucleation of fatigue cracks and stress corrosion is evident during mechanical loading in a corrosive environment. The resulting stress will be the sum of the external loading and residual stress. The current work is a study of the evolution of the compressive residual stress induced in martensitic stainless steels by shot-peening during the plastic deformation state. The results are compared to other studies with austenitic stainless steel and duplex steel, since stainless steels have been used in large amounts in oil rigs and oil refineries, in steam generators, thermoelectric powerplants and nuclear powerplants. In the future, the stress states in fatigue cycles will be studied.

Keywords: residual stress, shot-peening, stainless steels.

1. Introdução

O aço inoxidável está presente em muitas áreas da vida cotidiana e novas aplicações são encontradas a cada dia nos mais diferentes campos. As razões do crescimento e da atratividade para aplicações diversas residem na ampla faixa de requisitos que este material é capaz de atender.

O aço inox, se comparado com outros materiais, tem conseguido taxas de crescimento de sua utilização muito expressivas. Com um crescimento médio anual da ordem de 7% nos últimos anos [6], situa-se acima do alumínio e ligas de alumínio. A média per capita de consumo de aço inox nos países industrializados é de 10 kg/habitante/ano [6]. No Brasil, foram consumidas 204.000 toneladas de inox em 2001, equivalente a 1,2 kg/habitante/ano [6]. O setor de petróleo é um dos principais consumidores dos aços inoxidáveis produzidos no Brasil, com uma fatia de aproximadamente 20% do aço produzido.

Os aços inoxidáveis vêm preenchendo bem os requisitos necessários para a aplicação em equipamentos do setor petrolífero onde as principais falhas ocorrem devido à fadiga e corrosão sobre tensão.

O presente trabalho visa o estudo da evolução do estado de tensões residuais compressivas, introduzidas por shot-peening, em aços inoxidáveis martensíticos (AISI-410), durante o desenvolvimento de deformação plástica por tração uniaxial. O trabalho se encontra no início da fase experimental, de forma que não existe nenhum resultado concreto a ser apresentado. Os futuros resultados serão comparados com outros estudos em aços inoxidáveis austenítico e duplex. Posteriormente, será estudada a evolução do estado de tensões durante ciclos de fadiga.

2. Definições

2.1. Características dos Aços Inoxidáveis

2.1.1. Aços Inoxidáveis

Os aços inoxidáveis podem ser definidos como sendo ligas ferrosas contendo pelo menos 12% de cromo, isto porque o cromo é o elemento chave que confere resistência a corrosão ao aço inox, pois forma uma camada superficial muito fina, aderente e protetora, de óxido de cromo (Cr_2O_3). Adições de molibdênio e níquel expandem a faixa de passividade e tornam o inox mais resistentes a corrosão. Em teores iguais ou superiores a 24%, o cromo também confere excelente resistência à oxidação em altas temperaturas.

Não se deve pensar, entretanto, que os aços inoxidáveis não sofrem qualquer tipo de corrosão. Sob certas condições severas de serviço (meios agressivos, temperaturas elevadas, presença de tensões trativas, etc.), o filme de cromo pode ser dissolvido ou se romper localizadamente.

2.1.2. Aços Inoxidáveis Martensíticos

Os aços inoxidáveis martensíticos possuem composição química balanceada de modo a serem austeníticos por volta de 1000°C a 1100°C. No resfriamento em óleo, e até mesmo ao ar, a austenita não se transforma em ferrita porque, contendo %Cr \geq 12% e %C alto, esses aços possuem boa temperabilidade. O aço então se transforma em martensita quando cruza as temperaturas M_i e M_f que devem estar acima da temperatura ambiente.

2.1.3. Tratamento Térmico dos Aços Inoxidáveis Martensíticos

Recozimento para usinagem: Quando se deseja preparar o material para usinagem deve-se realizar um recozimento para produzir uma estrutura de ferrita com carbonetos esferoidizados. Assim, deve-se aquecer o material uniformemente até a faixa de 700-750°C e então resfriar ao forno.

Têmpera: a temperatura de têmpera ideal depende do aço, mas se situa na faixa de 950 a 1100°C (930 – 1010°C para AISI 410). Ela é selecionada para fornecer dureza máxima ao produto temperado. A utilização de temperaturas superiores podem provocar o crescimento excessivo do grão austenítico e também o aparecimento de fase delta, o que faz a dureza cair. Por outro lado, temperaturas inferiores não são suficientes para dissolver a quantidade máxima de carbonetos e homogeneizar a estrutura.

O meio de resfriamento pode ser óleo ou ar, sendo este último mais utilizados em peças menores.

Revenido: O revenido dos aços inoxidáveis martensíticos pode ser feito nas seguintes faixas:

200- 350°C – quando se deseja elevada resistência mecânica.

600- 650°C – quando se deseja elevada ductilidade e tenacidade, em detrimento da dureza e resistência mecânica.

O revenido na faixa de 400 a 600°C não deve ser realizado porque provoca perda acentuada de resistência a corrosão e queda da tenacidade (fragilidade do revenido).

2.1.4. Propriedades e Aplicações

A liga mais comumente utilizada da família dos aços inoxidáveis martensíticos é a 410, que contém em torno de 12% Cr e 0,1% C (em relação ao peso). A quantidade de carbono, e conseqüentemente a resistência mecânica

aumentam nas ligas 420, 440A, 440B, e 440C. As três últimas ligas, em particular, apresentam uma quantidade crescente de cromo com o objetivo de aumentar a resistência a corrosão.

Molibdênio pode ser adicionado com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas assim como a resistência à corrosão, assim como ocorre na liga 422. Níquel pode ser adicionado por razões parecidas nas ligas 414 e 431. Quando níveis elevados de cromo são usados para melhorar a resistência a corrosão, o níquel também tem a função de manter a estrutura desejada.

Os aços inoxidáveis martensíticos são especificados para aplicações que requerem boa resistência mecânica, boas propriedades para fadiga e fluência, em combinação com moderada resistência a corrosão.

A liga 410 tem como principais aplicações válvulas e hastes de registros para vapor, porcas, parafusos e prisioneiros para a indústria do petróleo.

2.2. Tensões Residuais

2.2.1. Definição e Origem

As tensões que permanecem em um material, após ter cessado o esforço externo que lhe deu origem, são denominadas de tensões residuais.

As tensões residuais influenciam, substancialmente, nas características da resistência e do funcionamento dos elementos de uma estrutura. Como resultado dos processos de produção das estruturas e, posteriormente, sua montagem e funcionamento, freqüentemente ocorrem tensões residuais que contribuem para o surgimento de trincas. Para a preservação da segurança e da capacidade de trabalho dos diversos elementos das estruturas, o conhecimento da magnitude e das direções de atuação dessas tensões é de grande importância.

Os materiais, amostras ou peças que contenham tensões residuais, não possuem nenhuma indicação externa de suas existências, e desta maneira, não se diferenciam das amostras onde as tensões residuais não existem. Entretanto as tensões residuais podem influenciar nas características físicas e mecânicas. À ação externa ao material, as tensões residuais e aplicadas se somam linearmente no regime elástico. Porém, a influência do estado de tensões residuais é bem mais complexa. Geralmente, considera-se que ele pode afetar a resistência à fadiga e a corrosão sob tensão, quando forem tensões de tração, mesmo que não seja atingido o limite de escoamento do material.

Algumas das causas de surgimento de tensões residuais são: deformação plástica, tensões de origem térmica, transformação de fase, tensões de soldagem, e tratamento mecânico superficial.

O surgimento de tensões residuais com tratamentos mecânicos de usinagem é causado fundamentalmente por dois processos: deformação plástica da camada superficial, por causa da ação mecânica da ferramenta e aquecimento local com tratamento das peças (que podem atingir valores importantes, levando a transformação de fases de algumas ligas). A distribuição final das tensões residuais depende muito da velocidade de tratamento e da qualidade da ferramenta.

2.2.2. Tratamento Superficial dos Aços

O tratamento superficial dos metais é largamente utilizado para aumentar a resistência à corrosão sobre tensão e à fadiga. Neste tratamento são introduzidas tensões residuais compressivas na superfície da estrutura. O surgimento de trincas de fadiga ocorre quando o material é submetido a uma tensão aplicada flutuante dentro do campo trativo, que é amenizado pelas tensões residuais compressivas, já que as tensões se somam linearmente. Da mesma forma a corrosão sobre tensão, que ocorre quando existe uma sollicitação mecânica trativa associada a um meio corrosivo, é suprimida.

Um dos métodos de tratamento superficial utilizado é o shot-peening. Este método pode ser considerado como um trabalho a frio onde pequenas esferas ou granalhas de metal são jateados contra a superfície a ser tratada. Este processo é equivalente a pequenos martelos se chocando contra a superfície e com isso provocando deformação plástica localizada e conseqüentemente a introdução de tensões residuais compressivas. O valor das tensões residuais introduzidas depende dos parâmetros de shot-peening: velocidade, amperagem e tamanho das partículas. Por outro lado, as tensões residuais dependem das propriedades mecânicas do material tratado.

2.2.3. Métodos de Medição das Tensões Residuais

Todos os métodos de determinação das tensões residuais podem ser divididos em dois grupos: métodos destrutivos e métodos não destrutivos. Entre os métodos destrutivos mais usados podemos citar os métodos da amostragem, método da trepanação, método da perfuração e o método da remoção de camadas. Os métodos não destrutivos mais usados são os métodos eletromagnéticos, métodos acústicos, métodos elétricos e os métodos por raios-X.

A metodologia adotada no presente trabalho é a tensometria por difração de raios-x. A tensometria por raios-x é um ensaio não destrutivo que determina o valor das tensões atuantes em materiais cristalinos. No estado inicial, não deformado, o material metálico possui distância interplanar d_0 entre seus planos cristalinos. Um feixe paralelo de raios-x, de comprimento de onda λ , incide na superfície do material segundo um determinado ângulo de incidência θ_0 . Este feixe é difratado sob o mesmo ângulo θ_0 , desde que seja satisfeita a relação de Bragg (Equação 1).

$$2d_0 \sin \theta_0 = \lambda \quad (1)$$

Nessas condições, ao utilizar raios-x monocromático ($\lambda = \text{constante}$), o valor do ângulo θ_0 , referente a uma intensidade máxima de difração, depende da distância interplanar d_0 .

Com o material sob tensão σ , a distância interplanar, d , varia de um valor $\Delta d = d - d_0$, sendo d a distância interplanar no material tensionado, o que ocasiona a deformação $\epsilon = \Delta d / d$ na rede cristalina do material. Nessas condições, a variação do ângulo de difração é igual a $\Delta\theta = \theta - \theta_0$, que pode ser medida pela técnica da tensiometria por raios-x.

Fazendo a diferenciação da lei de Bragg obtém-se a relação entre a deformação ϵ , e o ângulo θ_0 de difração, conforme Equação 2.

$$\epsilon = \Delta d / d = - \Delta\theta \cdot \cotg \theta_0 \quad (2)$$

Quanto maior o ângulo de difração θ , maior é a precisão de determinação da deformação.

Ao se medir o ângulo de difração, determina-se as deformações elásticas e através das constantes de elasticidade do material chega-se aos valores das tensões atuantes. No caso mais simples de tração (compressão) uniaxial, temos pelas Equações 3 e 4:

$$\epsilon_{\perp} = - \mu \sigma / E = - \Delta\theta \cdot \cotg \theta_0 \quad (3)$$

$$\sigma = (E/\mu) \Delta\theta \cdot \cotg \theta_0 \quad (4)$$

Além de possibilitar a determinação de tensões, a tensiometria por raios-x possui uma característica que a torna inigualável: em materiais polifásicos, cada fase produz seus próprios ângulos dos feixes difratados, possibilitando a determinação das tensões atuantes em cada uma das respectivas fases. Da mesma forma, isso é factível para materiais compostos.

3. Próximos Passos do Projeto

Para os próximos seis meses estão planejadas as seguintes etapas do projeto:

Tratamento térmico das amostras para o ensaio de tração uniaxial.

Tratamento superficial através de shot-peening das amostras para o ensaio de tração uniaxial.

Medição dos estado de tensão residual das amostras prontas para o ensaio de tração uniaxial.

4. Agradecimentos

ANP

FINEP

5. Referências

- [1] GUROVA, T, 1997, Variação do Estado de Tensões Residuais Introduzidas por Shot-peening, Durante Deformação Plástica por Tração Uniaxial, em Aços. Tese de D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [2] ASM Specialty Handbook, Sless Steels, ASM International. The Materials Information Society, 1996.
- [3] CALLISTER, W. D. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução 1a ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora, 2002.
- [4] GENTIL, VICENTE, “Corrosão”, Rio de Janeiro, 3a. Edição, 1996.
- [5] DIETER, Mechanical Metallurgy, 2a edição.
- [6] NÚCLEO INOX, Guia Brasileiro do Aço Inox, 2001.