

Copyright 2014, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2014, em Fortaleza/CE no mês de maio de 2014.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Materiais para Vasos de Pressão em Meio com H₂S/H₂ Aplicáveis a Unidades de Hidrotratamento em Refinarias

Aline Raquel Vieira Silva^a, Ana Emília Diniz Silva Guedes^b

Abstract

The hydrotreating is a process that occurs through the reaction of oil fractions with hydrogen in the presence of a heterogeneous catalyst, operating under controlled conditions. Applying the principles of material selection in pressure vessels in a hydrotreater unit is not a simple task, since the characteristics of the fluids vary with the geographic location of reservoirs, with the temperature and the partial pressures of gaseous species such as H₂S and H₂, which can completely change the effect upon the material and hence a very rapid degradation occurs. However, the selection of appropriate materials in the basic design of this pressurized equipment ensures good system performance, preventing or delaying the formation damage, increasing lifespan and reducing the steps of corrective maintenance, and avoid unnecessary costs related to the use of oversized materials. This paper presents an overview of the adopted selection criteria, which will describe the procedures for the selection of appropriate materials, and aiming to avoid or delay the effect of corrosion in pressure vessels in service with H₂S/H₂ within a hydrotreater unit at a refinery, taking into account the mechanical properties of materials, corrosion resistance, ease of fabrication and obtaining the expected useful life.

Keywords: materials, vases, H₂S, H₂.

Resumo

O hidrotratamento é um processo que ocorre por reação de frações de petróleo com hidrogênio em presença de um catalisador heterogêneo e sob condições operacionais controladas. A aplicação dos princípios de seleção de materiais em vasos de pressão em uma unidade de hidrotratamento não é uma tarefa simples, pois as características dos fluidos variam com a localização geográfica dos reservatórios, com a temperatura e as pressões parciais de espécies gasosas como o H₂S e o H₂, podendo modificar totalmente o efeito sobre o material e, conseqüentemente, ocorrer uma degradação muito rápida. Entretanto, uma correta seleção de materiais no projeto básico destes equipamentos pressurizados assegura um bom desempenho do sistema prevenindo ou retardando a formação de danos, aumentando a vida útil e reduzindo etapas de manutenção corretiva, além de evitar custos desnecessários relacionados ao uso de materiais superdimensionados. Este artigo apresenta uma visão geral dos critérios de seleção adotados, onde serão descritos os procedimentos para uma correta seleção de materiais, visando evitar e ou retardar o efeito da corrosão em vasos de pressão em

^a Mestranda UFRJ/COPPE/Engenharia Metalúrgica e de Materiais, alinemateriais@hotmail.com

^b Doutoranda UFRN/ Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, aedsguedes@gmail.com

serviço com H_2S/H_2 dentro de uma unidade de hidrotratamento em uma refinaria, levando em consideração as propriedades mecânicas dos materiais, resistência à corrosão, facilidades de obtenção de fabricação e a vida útil esperada.

Palavras-chave: materiais, vasos, H_2S , H_2 .

Introdução

O hidrotratamento (HDT) é um processo de hidrogenação que atualmente tem operado nas refinarias com um rendimento de degradação de cerca de 90% dos compostos de enxofre, nitrogênio e oxigênio das frações líquidas dos destilados petrolíferos (1,2).

Os vasos de pressão constituem não só são os equipamentos mais importantes da maioria das indústrias de processo, como também são geralmente os itens de maior tamanho, peso e custo unitário, representando em média 60% do custo total dos materiais e equipamentos de uma unidade de processo. O projeto e a construção de vasos de pressão envolvem uma série de cuidados especiais e exige o conhecimento de normas e materiais adequados para cada tipo de aplicação, pois as falhas em vasos de pressão podem acarretar consequências catastróficas até mesmo com perda de vidas, sendo considerados equipamentos de grande periculosidade (3).

Para suportar altos níveis de pressão, temperatura e corrosividade a custos de construção não proibitivos, alguns equipamentos utilizados nas unidades de hidrotratamento são fabricados em materiais bimetálicos, isto é, compõem-se de uma espessa camada de metal base e uma camada mais fina de revestimento metálico, que tem por objetivo a combinação de resistência mecânica, resistência à corrosão e custo. Como revestimento, os aços inoxidáveis austeníticos podem ser utilizados para garantir resistência à corrosão por misturas H_2/H_2S e ao ataque ao hidrogênio em alta temperatura (4).

Este trabalho tem como objetivo descrever os procedimentos para uma correta análise e seleção de materiais, visando evitar e ou retardar o efeito da corrosão em vasos de pressão em serviço com H_2S/H_2 dentro de uma unidade de hidrotratamento em uma refinaria, levando-se em consideração as propriedades mecânicas dos materiais, resistência à corrosão, soldagem, facilidades de obtenção de fabricação e a vida útil esperada.

Hidrotratamento (HDT)

As unidades de hidrotratamento têm como finalidade melhorar as propriedades de um produto, ou remover contaminantes, tais como enxofre, nitrogênio, oxigênio e metais. É considerado um processo estratégico para o aproveitamento de cargas residuais e de óleos pesados. Trata-se de uma reação com hidrogênio que ocorre em ambiente de alta pressão, na presença de um catalisador que comumente contém óxidos de cobalto e de molibdênio, em suporte de alumina (4, 5).

A maioria dos esquemas de HDT emprega um reator de um ou mais estágios, com leito fixo de catalisador, operando sob alta pressão e com a condição de hidrogênio. Este hidrogênio é provido por unidades da própria refinaria, como a unidade de reforma catalítica, ou por

unidades específicas de produção de hidrogênio. Os produtos básicos do HDT são: gases de hidrocarbonetos leves, ácido sulfídrico, amônia e carga tratada (5).

No fluxograma de um processo simplificado de uma unidade de HDT (Figura 1), a carga derivada de petróleo a ser tratada é bombeada dos tambores acumuladores de carga passando nos pré-aquecedores. Do vaso de carga, a corrente a ser tratada é bombeada até a pressão de reação, recebendo em seguida uma grande vazão de hidrogênio, conhecida como corrente de hidrogênio de reciclo. A partir deste ponto, a mistura de hidrocarbonetos e hidrogênio é aquecida através de uma série de trocadores de calor, até receber o aquecimento final no forno, de onde a mistura segue para o reator. Essa mistura resultante é composta do produto tratado, H_2S e hidrogênio, alimentado em grande excesso antes da bateria de preaquecimento. Na saída do reator, a corrente se encontra em temperaturas bastante elevadas ($350\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $400\text{ }^{\circ}\text{C}$) necessitando ser resfriado, o que ocorre através do contato com a própria carga nos trocadores da bateria de preaquecimento. A corrente com aproximadamente $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ segue para o “separador a quente”, vaso onde ocorre a coleta dos hidrocarbonetos que se encontram em fase líquida, sendo encaminhados para a torre retificadora, onde serão removidos os componentes leves e pequenas quantidades de H_2 e H_2S dissolvidos no produto (6).

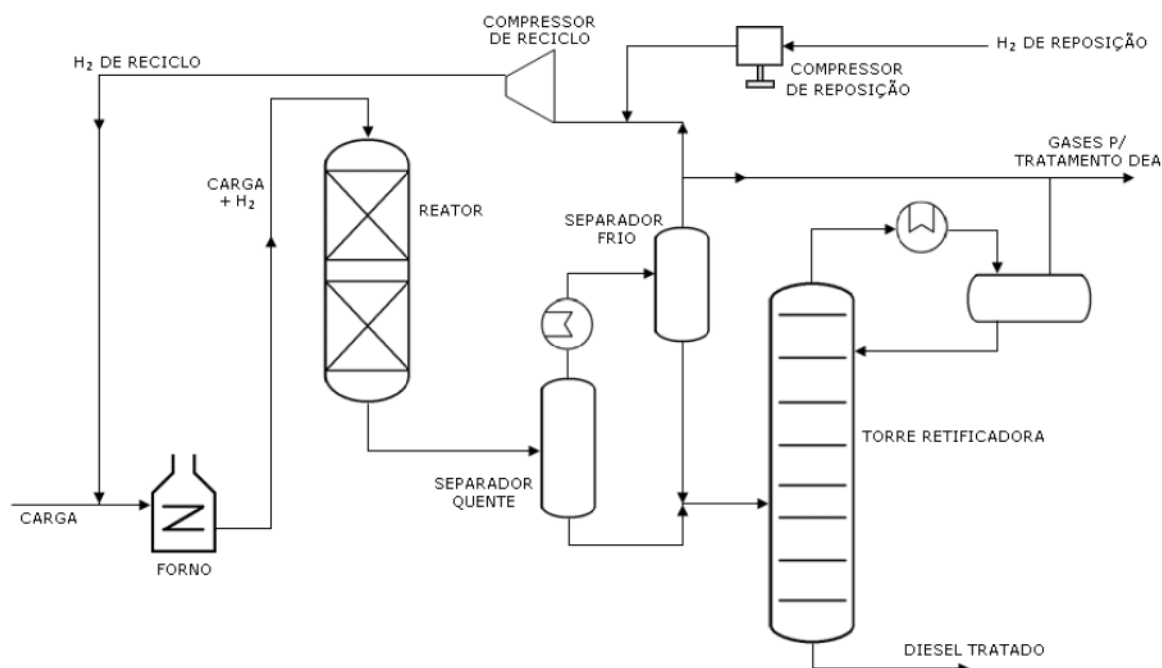


Figura 1 – Fluxograma de processo simplificado de uma unidade de hidrotratamento (6).

Independente do nível de contaminantes no petróleo, eles tendem a segregar-se nas frações mais pesadas e resíduos, observando-se ser o H_2S o principal responsável pela corrosão por sulfetação dos aços carbono e baixa liga ao Cr-Mo, a qual passa a ser importante apenas acima de cerca de 260°C , ocorrendo através da reação: $\text{Fe} + \text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{FeS} + \text{H}_2$. Por outro lado, encontrando-se solubilizado em água, o ácido sulfídrico, ou H_2S -úmido, proporciona além da corrosão, a fragilização e o trincamento do aço, o que se dá através de sua hidrogenação (7).

O hidrotratamento consiste num importante grupo de processos na indústria do refino do petróleo e tem sido usado amplamente ao longo de 40 anos. Os primeiros processos que surgiram foram os de hidropurificação, os quais consistiam basicamente em remover

heteroátomos como enxofre (S), nitrogênio (N), oxigênio (O), vanádio (V), níquel (Ni), entre outros, de moléculas orgânicas (1).

Vasos de Pressão

Vasos de pressão são todos os reservatórios, de qualquer tipo, dimensões ou finalidades, não sujeitos à chama, fundamentais nos processos industriais, que contenham fluidos e sejam projetados para resistir com segurança a pressões internas superiores a 100 kPa ou inferiores à pressão atmosférica, ou submetidos à pressão externa, cumprindo assim a função básica de armazenamento. Os vasos de pressão têm como finalidade separar vapor-líquido, separar vapor-líquido-líquido, separar líquido-líquido, prover tempo de resistência ao processo, prover tempo de estocagem de carga, fazer misturas, reações químicas e etc. (3).

Fatores para Seleção do Material

A seleção do material adequado a cada uma das partes de um equipamento de processo é, frequentemente, um dos problemas mais difíceis com que se defronta o projetista ou o usuário desses equipamentos. Para cada unidade de processo em projeto, é feita a especificação de materiais e caracterização de serviços, de maneira a atender com segurança as condições de serviço de uma determinada aplicação, com o menor custo possível, levando-se em conta as propriedades mecânicas dos materiais, resistência à corrosão, serviço, facilidades de fabricação do equipamento e montagem, disponibilidade e custo dos materiais, segurança, experiência prévia, variações toleradas na forma ou de dimensões da peça e o tempo de vida útil (3, 4, 8, 9).

De forma a exemplificar os métodos empregados para uma correta análise e seleção de materiais, tomou-se como exemplo um vaso de pressão de separação a quente de uma unidade de HDT com as seguintes condições de processo e serviço. Uma vez conhecidas as condições de projeto e o fluido que circulará no equipamento, é efetuada a seleção dos materiais para todas as partes do equipamento em contato com o fluido baseado na sua corrosividade.

- Serviço: Vaso de separação a quente
- Fluido: Hidrocarboneto (serviço com H_2S/H_2)
- Meio: Moderado a agressivo
- Condição de Projeto: 30 kgf/cm² a 250°C
- Sobreesspessura de corrosão: 3,2 mm

Danos por Corrosão em Vasos de Pressão

Alguns produtos e substâncias que operam nos vasos de pressão provocam tipos diferentes de corrosão, sendo a mais frequente a chamada "corrosão sob tensão". Vários são os fatores que afetam a probabilidade da ocorrência de corrosão sob tensão em materiais metálicos, tais como, concentração de H_2S , temperatura, pressão total, pH, tempo de exposição, tensão total aplicada, propriedades do material (composição química, resistência à tração, dureza, tratamento térmico, microestrutura), além de impurezas e defeitos que podem existir (10).

Característica importante da corrosão sob tensão é que não se observa praticamente perda de massa do material. O material permanece com bom aspecto até que ocorre a fratura. (11). Os principais danos relacionados ao hidrogênio e ao H_2S são: empolamento pelo hidrogênio, fissuramento pelo hidrogênio e fragilização pelo hidrogênio.

As trincas por corrosão sob tensão se manifestam em um tipo de falha na qual atuam efeitos combinados de um meio corrosivo e uma tensão trativa estática de uma liga. A tensão pode ser resultado de aplicações de cargas ou de tensões residuais existentes no componente. Somente combinações específicas de ligas e ambientes corrosivos levam a falha por corrosão sob tensão, tais como ligas de alumínio e água do mar, ligas de cobre e NH_3 , aço doce e $NaOH$, aços inoxidáveis e água salgada, dentre mais de 80 combinações que já foram mencionadas na literatura (12).

Serviços com H_2S

O ácido sulfídrico, em presença de umidade, provoca nos aços carbono corrosão sob tensão. A corrosão pelo H_2S ocorre basicamente pela presença ou geração do gás sulfídrico H_2S por causa do fluido circulante ou do meio ambiente em que o equipamento se encontra em operação. Este gás é cada vez mais presente na indústria do petróleo, obrigando a utilização de materiais chamados "comuns ou convencionais" (aço carbono) com alguns requisitos especiais, como: controle de Carbono Equivalente (CE), controle de enxofre (S) e de fósforo (P). Este tipo de corrosão pode se apresentar de maneira uniforme ou localizada. Possíveis formas de abrandamento da ação do H_2S podem incluir o uso de sequestrante de H_2S e uso de metalurgia especial (13).

Os danos causados pelo H_2S são trincamento assistido pelo meio (corrosão sob tensão por sulfetos e trincamento induzido pelo hidrogênio), corrosão por bactérias, corrosão fadiga e corrosão pelo CO_2/H_2S . O pior dos danos causado pelo H_2S nos materiais metálicos, não é perda de espessura de parede devido à corrosão, mas o risco de proporcionar um trincamento assistido pelo meio, podendo levar a estrutura a uma falha catastrófica.

A utilização de aços carbono de média e/ou de alta resistência mecânica, sujeitos a esforços de tração em meios contendo até pequenas quantidades de H_2S , pode ocorrer o processo de corrosão sob tensão em presença de sulfetos. Este tipo de corrosão decorre principalmente da interação do metal com o meio, resultando em modificações localizadas de suas propriedades mecânicas, implicando em fraturas frágeis, principalmente nas regiões de alta dureza dos equipamentos, como soldas e zonas termicamente afetadas (9, 10).

A suscetibilidade dos aços carbono a corrosão sob tensão é tanto maior quanto maiores forem o limite de elasticidade, a dureza do aço e a concentração de H_2S presente no eletrólito. A probabilidade de corrosão por H_2S varia inversamente com sua dureza, quanto maior a dureza menor resistência à corrosão (3).

A corrosão que ocorre nos vasos de pressão em serviço com H_2S pode ser generalizada com taxas médias de 0,15 a 0,30 mm/ano e localizada nos locais de concentração de tensão provocando trincas. As normas PETROBRAS aplicáveis são N-253 e N-1706.

Serviços com H₂

Em equipamentos de refinarias de petróleo que processam hidrogênio ou fluidos contendo hidrogênio, deve-se verificar a possibilidade do ataque pelo hidrogênio. O ataque dos metais pelo hidrogênio, sob pressão e temperatura elevadas, raramente resulta na formação de películas sobre a superfície (11).

O hidrogênio pode estar acessível na superfície do metal de várias fontes, incluindo a redução catódica do hidrogênio da água: $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$ / $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$. Estas reações catódicas podem ocorrer durante corrosão, proteção catódica, decapagem ácida, ou outro processo de limpeza. O hidrogênio penetra na rede como hidrogênio atômico, que é uma forma intermediária na formação da molécula de H₂ na superfície. Processos que envolvem polarização catódica aceleram a formação de hidrogênio. Deve-se, portanto, selecionar ligas e condições de operação para prevenir o dano causado pelo hidrogênio (11).

Alguns elementos, quando dissolvidos na liga, retardam a formação do H₂ aumentando o tempo de residência do hidrogênio nascente na superfície. Os elementos mais comuns que retardam a saída do hidrogênio são: P, Sb, As, S, Se e Te. O mais comum é o enxofre, por estar presente em fluidos como o petróleo, gás natural, águas de poços e vapores geotérmicos.

Pequenas quantidades de hidrogênio podem produzir fragilização severa em diversos metais. Os metais cúbicos de corpo centrado e hexagonal compacto são os mais suscetíveis à fragilização pelo hidrogênio. Percentagens tão pequenas quanto 0,0001% podem causar trincas no aço. Em geral os metais cúbicos de faces centradas não são sensíveis à fragilização pelo hidrogênio. O hidrogênio presente em solução sob a forma monoatômica se difunde muito rapidamente acima da temperatura ambiente, uma vez que é um átomo intersticial de tamanho muito reduzido. À medida que o hidrogênio se difunde para dentro dos poros, ocorre um aumento de pressão que leva à fratura (12).

O comportamento dos mais comuns aços utilizados em atmosferas ricas em hidrogênio foi representado pelas curvas de Nelson, as quais determinam um limite seguro ao ataque em termos de temperatura e pressão parcial de hidrogênio dos aços usados em serviços com o hidrogênio (14, 15, 16).

As curvas de Nelson (Figura 2) funcionam para o ataque pelo hidrogênio em alta temperatura, pois preveem as condições que pode haver descarbonetação superficial (acima das linhas tracejadas) ou trincas (acima das linhas cheias) para diferentes materiais. Com o aumento da pressão parcial do hidrogênio, o mesmo penetra no aço (na forma atômica), e se combina com o carbono formando o gás metano, com isso descarboneta o material, baixando sua resistência, gerando pressão interna, e com isso, levando à formação de trincas e à falha do material. De acordo com a Figura 2, ao aumentar o teor de cromo, aumenta a resistência do aço a altas temperaturas, possibilitando ao material ser utilizado em temperaturas cada vez mais altas, pois com o aumento da quantidade de Cr, o carboneto formado se torna mais estável, não ocorrendo a geração do metano, resultando em um material mais resistente à condição. Para os aços 2,25Cr-1Mo, a pressões parciais de hidrogênio mais baixas e temperaturas maiores, ocorre a descarburização superficial. Em pressão acima de 10 MPa e menores temperaturas, o ataque pelo hidrogênio é por descarburização interna.

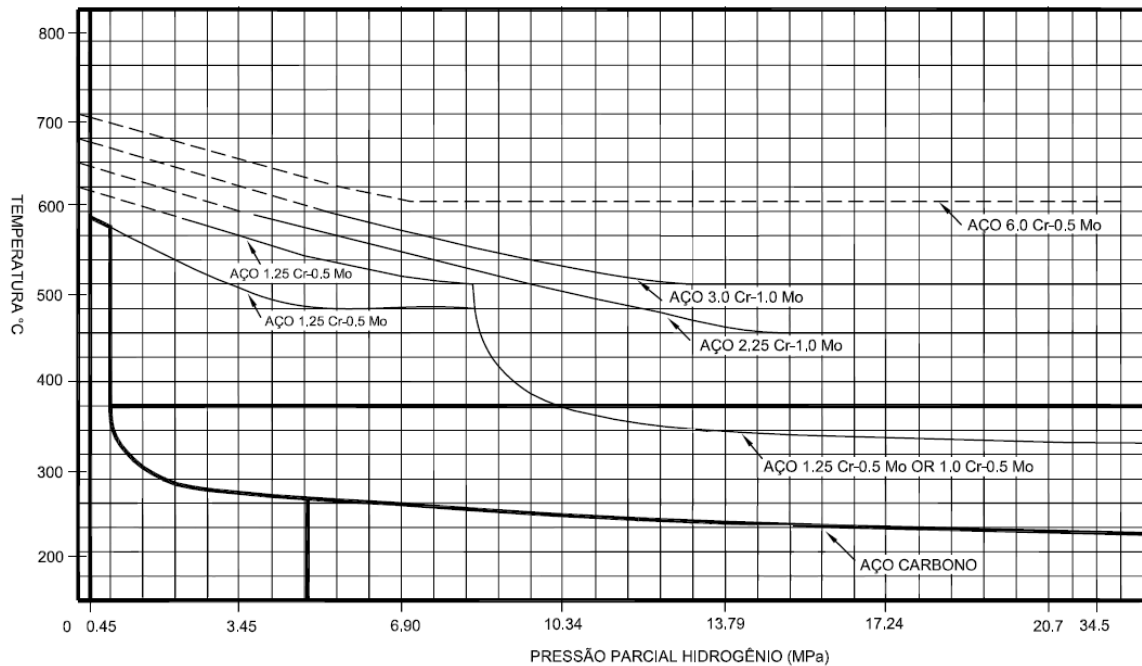


Figura 2 – Curvas de Nelson (adaptado). Valores limite de temperatura e pressão para evitar descarbonetação e fissuras em aços operando em presença de hidrogênio (15).

A corrosão que ocorre nos vasos de pressão com serviço com H_2 pode ser generalizada com taxas médias de 0,15 a 0,30 mm/ano, e localizada gerando empolamentos e fissuração. As normas PETROBRAS aplicáveis são as N-253 e N-1704. O material comumente usado para este serviço é aço carbono acalmado e normalizado ao Si, com máximo de 0,005% e máximo de 0,40% de carbono equivalente.

Principais Tipos de Materiais Usados em Vasos de Pressão

Muitos materiais podem ser empregados na construção de vasos de pressão e de seus componentes, sendo as seguintes as principais classes desses materiais:

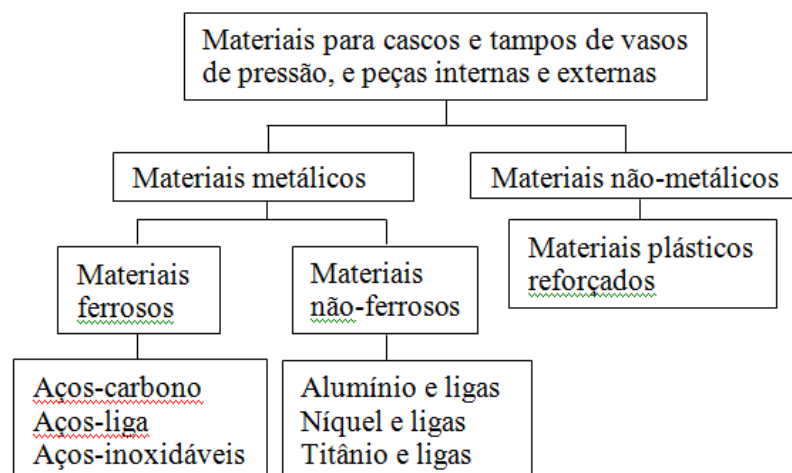


Figura 3 – Materiais empregados na construção de vasos de pressão.

De todos esses materiais o aço carbono é o de maior uso e empregado na construção da grande maioria dos vasos de pressão, abrangendo uma ampla faixa de temperatura entre 250 °C e 1100 °C. O aço carbono é denominado de “material para uso geral”, porque, ao contrário dos outros materiais, não tem casos específicos de emprego, sendo usado em todos os casos, exceto quando alguma circunstância não permitir o seu emprego. Todos os demais materiais são empregados justamente nesses casos em que, por qualquer motivo, não é possível o uso do aço carbono (4).

A norma NACE (National Association of Corrosion Engineers) MR 0175 estabelece requisitos para seleção de materiais em presença de H₂S baseados em dados de laboratório e de experiências de campo. Essa norma recomenda uso de aços com dureza máxima de 22 Rockwell C, entretanto, nem sempre é possível atender tal valor num equipamento industrial devido às soldagens, operações mecânicas e tratamentos térmicos ocorridos durante a fabricação e a montagem. Mesmo que sejam atendidas as normas de projeto durante a fabricação e/ou montagem é válido considerar a possibilidade de tensões localizadas muito elevadas devido principalmente às tensões residuais que normalmente ocorre durante o processo de soldagem. Também devem ser considerados as deformações localizadas, os defeitos geométricos e as impurezas ou imperfeições no material (17).

Quando aços de alta resistência e aços de baixo carbono estiverem expostos em concentrações superiores a 1ppm de H₂S e pressões superiores a 10.000 psi (690 MPa), o risco de falha por corrosão sob tensão é bastante significativo. A probabilidade de fratura nos aços inox ferríticos aumenta, consideravelmente, quando os mesmos apresentam durezas superiores a 29 Rockwell C, e/ou quando são expostos a fluidos com pH ácido. Baixos valores de pH (altos teores de H⁺) propiciam uma maior formação de hidrogênio atômico e consequentemente aumenta a probabilidade de fraturas nos materiais (10).

Segue abaixo um exemplo de uma especificação de materiais da ASTM (American Society for Testing and Materials) para as partes principais de um vaso de pressão para serviço com H₂S/H₂, que atende os critérios acima abordados e as respectivas normas citadas.

Tabela 1 – Especificação de materiais de componentes de vasos com serviço de H₂S/H₂.

COMPONENTE	MATERIAL		
	Aço Carbono	Aço Liga	Aço Inox
Casco e Tampos	A-516 Gr.60/ 70	A-204 Gr.B/ A-387 Gr.11	A-240 Gr.304
Bota	A-515 Gr.60/ 70	A- 204 Gr.B/ A-387 Gr.11	A-240 Gr.304
Flanges	A-105	A-182 Gr. F-11	A-182 Gr. F-304
Acessório de tubulação	A-234 Gr.WPB	A- 234 Gr. WP11	A-403 Gr. WP304
Parafusos Internos	AISI-304	AISI-304	AISI-304
Estojos/Parcas Externos	A-193 Gr.B7M/ A-194 Gr.2H	A-193 Gr.B7M/ A-194 Gr.2H	A-193 Gr.B8/ A-194 Gr.8

Conclusões

Com o objetivo de descrever os procedimentos para uma correta análise e seleção de materiais a serem utilizados em vasos de pressão, que atendessem com segurança as condições de serviço dentro de uma refinaria, baseados nas normas PETROBRAS, NACE, ASTM e API, foi elaborado um método que reuniu de uma forma sistemática as informações necessárias para se realizar a tarefa de especificar os materiais dos vasos de pressão de uma unidade de HDT, identificando cada possível serviço, selecionando o material-base apropriado, estabelecendo os requisitos de fabricação necessários, especificando o material padronizado mais conveniente para cada componente do equipamento.

Características dos principais materiais usados em vasos de pressão de uma unidade de HDT:

- Aços Carbono: apresentam taxas de corrosão permitidas com faixa de aplicação entre 50 °C e 400 °C e tensões admissíveis até 30 ksi na temperatura ambiente.
- Aços Liga: Aços Cr-Mo com diferentes teores de Cromo aplicados em diferentes temperaturas, com taxas de corrosão permitidas em altas temperaturas (até 600 °C).
- Aços Inoxidáveis: Aços com taxa de corrosão nula aplicados no combate às diferentes formas de corrosão.

Referências bibliográficas

- (1) GONZAGA, A.C., ARAÚJO, K. D. **Danos em Serviço em Unidades de Processo: Um Estudo de Caso**. Monografia apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Tubulação da PUC Rio. Rio de Janeiro, 2010.
- (2) LEAL, M. F. **Simulação de Diferentes Tratamentos Térmicos na Aceitação do Aço 2,25Cr-1Mo Adotado em Equipamentos para Hidrotratamento de Derivados de Petróleo**. Dissertação de Mestrado - Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia da Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008. 77p.
- (3) SILVA TELLES, P. C. **Vasos de Pressão**. Editora LTC, 2º ed., Rio de Janeiro, 2005.
- (4) SZKLO, A. S. **Fundamentos de Refino de petróleo**. Editora: Interciência, Pag. 208, 2005.
- (5) RNEST – Refinaria do Nordeste. **Relatório de impacto ambiental - 2006**. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/meio-ambiente-e-sociedade/preservando-meio-ambiente/licenciamento-ambiental/>> Acesso em Dezembro de 2013.
- (6) KRAUSE, B.B. **Simulação da Desativação de Catalisadores NiMo/Al₂O em uma Unidade Industrial de Hidrotratamento**. Dissertação UFRJ/COPPE-Programa de Engenharia Química, Rio de Janeiro, 2011.
- (7) ALVISI, P.P. **Nota Sobre a Seleção do Aço para o Serviço com H₂S**. Tecnol. Metal. Mater. Miner., São Paulo, v. 6, n. 4, p. 192-200, junho, 2010.

- (8) PETROBRAS N-253. **Projeto de Vaso de Pressão**. Rev. K, 12/2010.
- (9) FALCÃO, C. **Projeto Mecânico Vasos de Pressão e Trocadores de Calor de Casco e Tubos**. Texto registrado sob o número 65030 no Escritório de Direitos Autorais da Fundação Biblioteca Nacional do Ministério da Cultura, 2002.
- (10) MAINIER, F.B., SANDRES, G.C., TAVARES, S.S.M. **Corrosão por Sulfeto de Hidrogênio (H₂S) e suas Implicações no Meio Ambiente e na Segurança Industrial**. 8º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica. Cusco, Outubro de 2007.
- (11) GENTIL, V. **Corrosão**. 4a ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, p. 341, 2003.
- (12) DIETER, G.E. **Mechanical Metallurgy**. SI Metric ed., McGraw-Hill, UK, 1988.
- (13) JESUS, E.R.B. **Materiais para Fabricação de Equipamentos de Processo**. Revista Iluminart, Ano IV, nº9, Novembro de 2012.
- (14) API-941. **Steels for Hydrogen Service at Elevated Temperature and Pressures in Petroleum Refineries and Petrochemical Plants**. American Petroleum Institute, 1997.
- (15) N-1704. **Requisitos Adicionais para Vaso de Pressão em Serviço com Hidrogênio**. Rev. C, 09/2007.
- (16) CARTER, T.J., CORNISH, L.A. **Hydrogen in Metals**. Engineering Failure Analysis, v.8, pp. 113-121, 2001.
- (17) NACE, Standard Material Requirements. **Sulfite Stress Cracking Resistant Metallic Materials for Oilfield Equipment - MR0175-2000**. Houston, USA: National Association of Corrosion Engineers, 19p, 2000.