



MATERIAIS PARA FABRICAÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE PROCESSO

EDILSON ROSA BARBOSA DE JESUS

Doutor em Engenharia de Materiais pelo Instituto de Pesquisas Energéticas da Universidade de São Paulo (IPEN – USP), Mestre em Engenharia de Materiais (IPEN – USP) e Engenheiro Industrial Mecânico pela Universidade Santa Cecília dos Bandeirantes. Docente no Campus Bragança Paulista do Instituto Federal de São Paulo (IFSP).

Contato: erbjesus@ifsp.edu.br

MATERIAIS PARA FABRICAÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE PROCESSO

Edilson Rosa Barbosa de Jesus

RESUMO: A demanda pela otimização de processos e a necessidade do aumento da confiabilidade dos equipamentos de processo vêm merecendo atenção especial ao longo dos últimos anos, por conta da necessidade de aumento da competitividade das empresas e da diminuição dos custos com paradas das plantas para manutenção e troca de equipamentos. Na medida em que se deseja que os equipamentos operem com maior eficiência e por tempos mais prolongados, torna-se necessário que os materiais que os compõem possam suportar condições cada vez mais severas de trabalho; condições essas, consideradas críticas para materiais comuns (ditos convencionais). Tais condições de trabalho podem incluir, por exemplo, temperaturas e pressões elevadas e ambientes agressivos (corrosivos e/ou abrasivos) entre outros. Neste contexto, o presente trabalho objetiva apresentar uma revisão bibliográfica acerca dos materiais existentes e disponíveis para aplicações na construção de equipamentos de processo, além dos novos desenvolvimentos, suas principais características e particularidades.

PALAVRAS-CHAVES: equipamentos de processo; materiais; corrosão, aço carbono, aço inox, duplex.

MATERIALS FOR PROCESS EQUIPMENTS FABRICATION

ABSTRACT: The demand for process optimization and the need to increase the reliability of process equipments have been deserving special attention over the past years because of the need to increase the competitiveness of enterprises, mainly by costs reduction with plant shutdowns for maintenance and equipment replacement. It is desired that the equipments operate with higher efficiency and for longer time. Then, the materials used need to work in severe conditions that are considered critical for common materials (so-called conventional materials). The severe work conditions may include, for example, elevated temperatures and pressures and aggressive environments (corrosive and / or abrasive) among others. In this context, this study presents a review about existing and available materials for equipment process applications (construction), the new developments, their main characteristics and peculiarities.

KEYWORDS: process equipments; materials; corrosion; carbon steel; stainless steel; duplex

1. INTRODUÇÃO

Denominam-se equipamentos de processo os equipamentos estáticos em indústrias de processamento, que são as indústrias nas quais materiais sólidos ou fluidos sofrem transformações físicas e/ou químicas ou as que se dedicam à armazenagem, manuseio ou distribuição de fluidos. Dentre essas indústrias citam-se as refinarias de petróleo e suas precursoras (prospecção e extração de petróleo), as indústrias químicas e petroquímicas, grande parte das indústrias alimentícias e farmacêuticas, a parte térmica das centrais termoelétricas e os terminais de armazenagem e distribuição de produtos de petróleo, entre outras (TELLES, 1979).

Equipamentos estáticos tais como colunas de destilação, vasos de pressão, caldeiras, trocadores de calor, fornos, tanques e tubulações industriais, constituem não só a parte mais importante da maioria das indústrias de processamento, como também, são geralmente os itens de maior tamanho, peso e custo nessas indústrias (Fig. 1).

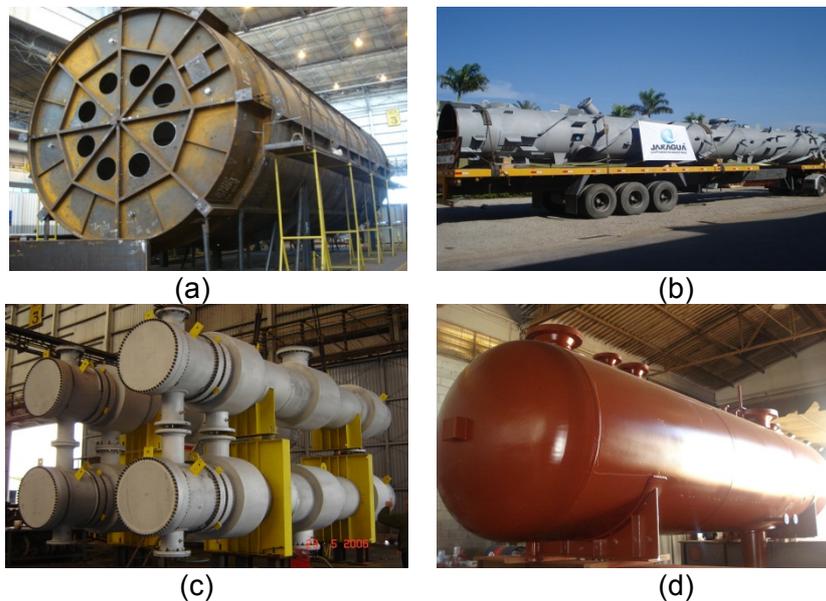


Figura 1- Equipamentos de processo. (a) forno cilíndrico; (b) coluna de destilação; (c) trocadores de calor; (d) vaso de pressão. (JESUS e BISCOLOLA, 2011)

Nas indústrias de processamento, algumas condições específicas fazem com que seja necessário um grau de confiabilidade mais apurado para os equipamentos, em comparação com o que normalmente é exigido para os equipamentos dos demais ramos industriais. Dentre estas condições citam-se:

- regime contínuo de operação, o que submete os equipamentos a condições severas de trabalho;

- equipamentos interligados entre si, com potencial risco de paralisação de toda a planta por conta da ocorrência de uma falha individual (de um único equipamento);
- operação em condições de grande risco, que envolvam fluidos inflamáveis, tóxicos, explosivos, corrosivos, etc.

A adequada seleção dos materiais a serem utilizados na construção destes equipamentos tem papel fundamental na garantia da confiabilidade dos mesmos quando em operação, daí, a importância de se conhecer não apenas as condições a que o equipamento estará sujeito quando em serviço, mas também o comportamento de cada material em tais condições; de modo que ao final do processo de seleção, a opção seja pelo material que possa propiciar a confiabilidade desejada, com os níveis de eficiência e segurança esperados e evidentemente com uma relação custo/benefício satisfatória.

2. CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DE MATERIAIS

Os fatores que devem ser considerados na seleção de materiais para a construção de um equipamento, envolvem os cuidados com a segurança; o conhecimento das condições e ambiente de trabalho do equipamento; localização da planta industrial; as condições e variáveis envolvidas no processo de industrialização do produto; disponibilidade e prazo de entrega; as características e propriedades químicas, físicas e mecânicas dos materiais disponíveis; facilidade operacional em atividades de inspeção e manutenção e também a viabilidade econômica da sua utilização.

Guias técnicos que descrevem as propriedades e comportamento de diversos tipos de liga são freqüentemente utilizados e necessários à seleção, entretanto, o comportamento dos materiais submetidos a condições e ambientes diversos é bastante complexo.

Tal comportamento, nem sempre pode ser completamente previsto somente através de testes em laboratório, tendo em vista a grande quantidade de variáveis envolvidas. Neste caso, a experiência em serviço (operação real) terá papel fundamental no julgamento definitivo do desempenho da liga na aplicação para a qual a mesma tenha sido selecionada ou desenvolvida (DOE/GO-102004-1974, 2004) e neste sentido as empresas utilizam recursos de monitoramento periódico dos mesmos para detecção e prevenção de eventuais danos que possam produzir resultados indesejados, sobretudo no que se refere à segurança. A seguir são listados diversos fatores que devem ser considerados na seleção de materiais:

2.1. TEMPERATURA DE OPERAÇÃO

A temperatura de operação é freqüentemente o primeiro e em muitos casos o único fator levado em conta na seleção da liga (DOE/GO-102004-1974, 2004). Relativo a este fator, diversos

outros sub-fatores devem ser observados, os quais estão intimamente relacionados com a resposta comportamental do material submetido à ação física do calor.

Resistência mecânica - Via de regra, a resistência mecânica da liga é inversamente proporcional à temperatura de operação do equipamento, ou seja, na medida em que a temperatura aumenta, diminui a capacidade da liga resistir a esforços mecânicos. Deve-se verificar também se o equipamento irá operar em condições de fluência, onde ocorre a deformação do material ao longo do tempo, mesmo que submetido a esforços com valores abaixo do seu limite de escoamento. Este fenômeno se torna mais proeminente com o aumento de tensões e temperaturas. Outro fenômeno que deve ser verificado é a falha por fadiga, pois se admite que 90% das rupturas das peças em serviço é atribuído a este fenômeno (CHIAVERINI, 1986). Novamente, este fenômeno ocorre sob tensões inferiores à resistência do material, em equipamentos expostos a esforços cíclicos.

Temperatura de oxidação - A temperatura de oxidação da liga também deve ser considerada, uma vez que a oxidação produz perda de material com conseqüente diminuição da espessura de parede do equipamento e da sua capacidade projetada de resistir a esforços. Esta avaliação deve ser realizada sempre em relação às condições atmosféricas a que o equipamento é exposto.

Estabilidade térmica - Normalmente a baixas temperaturas e mesmo em temperatura ambiente os materiais têm sua resistência ao impacto e ductilidade reduzidas, enquanto que em temperaturas mais elevadas tendem a ser mais maleáveis. Entretanto, muitas ligas compostas por cromo e molibdênio após longo tempo de exposição a temperaturas mais elevadas apresentam sua ductilidade diminuída em um processo conhecido como fragilização (do inglês: "embrittlement") (DOE/GO-102004-1974, 2004). Nestas condições, é necessário, portanto, que se esteja atento ao fator da estabilidade térmica da liga para a faixa de temperatura na qual a mesma será aplicada, sob o risco de que a liga possa ter sua resistência a esforços dinâmicos diminuída.

Expansão térmica - Mesmo com os avanços na área de projeto que consideram a utilização de juntas de expansão e detalhes construtivos com peças móveis, como meios de controle e atenuação dos efeitos de dilatação e contração térmica dos materiais; o relatório do Departamento de Energia Americano (DOE/GO-102004-1974, 2004), aponta que a maior causa de distorções e aparecimento de trincas em equipamentos que trabalham a altas temperaturas é devida a falhas na escolha da liga com adequada expansão térmica ou conjunto de ligas com expansão térmica diferenciais. O relatório alerta quanto aos cuidados que devem ser tomados em relação a esta questão, explicando que variações de temperatura da ordem de apenas 110 °C, são suficientes para causar deformações nos materiais além do seu limite de escoamento.

2.2. RESISTÊNCIA À CORROSÃO

A corrosão é particularmente um assunto a ser criteriosamente considerado, já que apresenta custos bastante elevados (cerca de 3 % a 4 % do PIB em cada país), custos estes associados com os reparos necessários e horas ociosas dos equipamentos (SBARAI, 2010). A corrosão pode causar uma extensa gama de problemas dependendo do tipo de aplicação e das condições para as quais o equipamento foi projetado. Como exemplos citam-se (ATLAS, 2003):

- perfurações em tanques e tubulações tendo como consequência o vazamento do fluido armazenado ou transportado;
- como no caso da oxidação, a corrosão pode também levar à perda de resistência mecânica do equipamento através da perda de espessura dos componentes sujeitos a esforços;
- alteração da aparência do equipamento, devido à degradação do acabamento superficial;
- formação de resíduos e fuligem que podem provocar o aumento da pressão no interior de tubulações, bloquear sistemas de passagem ou contaminar o fluido circulante ou armazenado.

Em equipamentos de processo, a corrosão pode se apresentar de formas variadas. De acordo com Henriques, 2008, os processos corrosivos se dividem em básicos e sinérgicos. Os processos básicos seriam aqueles em que ocorre uma interação direta entre o elemento corrosivo e o material, enquanto que nos processos sinérgicos tal interação geralmente envolve outros elementos, os quais em conjunto contribuem para a ocorrência do fenômeno.

Henriques (2008), considera como sendo processos corrosivos básicos, aqueles provocados por cloretos e oxigênio; pelo H_2S ; pelo CO_2 e por bactérias, enquanto que no grupo dos processos corrosivos sinérgicos enumera o processo de interação corrosão-fatiga; corrosão-erosão; corrosão sob tensão e fragilização pelo hidrogênio. Resumidamente, Henriques (2008), apresenta dados acerca da fonte (origem), efeitos e meios de controle de cada um dos processos corrosivos mencionados anteriormente, tendo apontado quase que por unanimidade o uso de metalurgia especial (entenda-se seleção adequada do material) como meio de atenuação para a grande maioria dos processos corrosivos enumerados.

Corrosão por cloretos e oxigênio (fig. 2) – o processo é deflagrado pela simples exposição ao ambiente, sendo potencializado pela presença de névoa salina (ambiente marinho). Em materiais a base de cromo, que é o caso por exemplo dos aços inoxidáveis, a corrosão pode ocorrer interna e/ou externamente ao equipamento, basicamente através da ruptura pelo Cl^- , do filme de óxido de cromo passivo existente na superfície do material; sendo auxiliado também em alguns casos pela presença de depósitos (orgânicos e inorgânicos), gerando pites ou alvéolos que comprometem a espessura do metal

e conseqüentemente a capacidade do mesmo resistir a esforços. Um caso particular deste tipo de corrosão é a chamada corrosão por “frestas” que ocorre justamente em regiões com frestas (aberturas), nas quais o meio corrosivo pode entrar e permanecer em condições estagnadas. A fresta pode ser oriunda de um detalhe de projeto, uma falha na execução da soldagem ou formação de depósito na superfície do material (ancoramento de sujeira, produtos contaminantes e incrustações diversas). De um modo geral os meios que contêm cloretos são particularmente perigosos na corrosão por frestas. Possíveis formas de controle deste tipo de corrosão incluem o uso de metalurgia especial, pintura externa, cuidados em detalhes de projeto e revestimento interno.

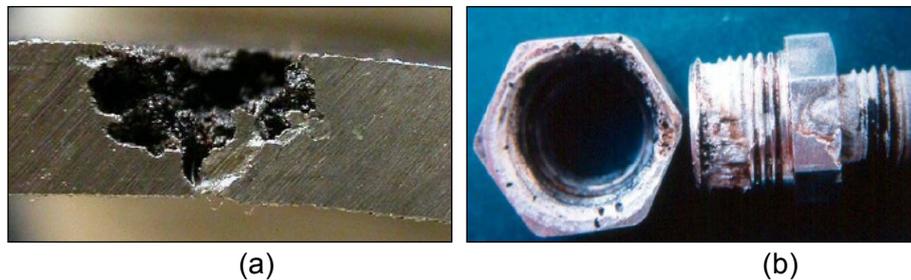


Figura 2 - (a) Corrosão típica provocada por cloreto; oxigênio; (b) Corrosão por frestas (HENRIQUES, 2008)

Corrosão pelo H_2S (fig. 3) – 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 S e controle de 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.

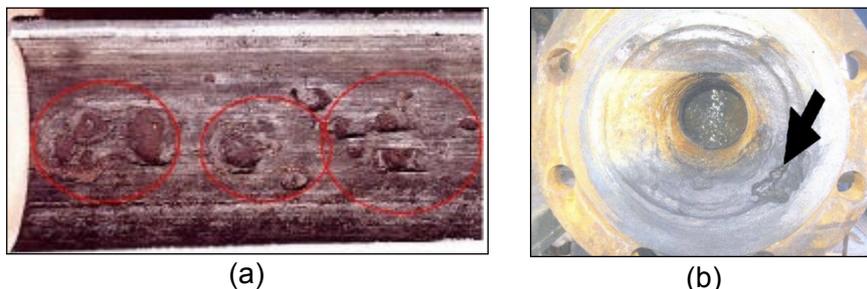


Figura 3 - Corrosão típica provocada por H_2S : (a) Corrosão por H_2S em água de formação (MAINIER e ROCHA, 2003); (b) corrosão/abertura na solda de ligação entre partes de circulação de fluidos de trocador de calor da unidade de recuperação de enxofre da REGAP (GUIMARÃES, 2006 - adaptação).

Corrosão sob tensão (fig. 4) – típico de ocorrência em materiais que estejam operando em meio corrosivo H_2S , e que cumulativamente apresentem altas tensões residuais (geralmente devidas ao processo de fabricação do equipamento) e susceptibilidade ao ataque corrosivo. Nestas condições, o resultado geralmente é o aparecimento de trincas induzidas pelo hidrogênio. Possíveis formas de mitigação deste tipo de ataque podem incluir o controle de dureza do material, tratamentos adequados de alívio de tensões (quando aplicável) e uso de metalurgia especial.



Figura 4 – Falha típica provocada pelo fenômeno de corrosão sob tensão (HENRIQUES, 2008)

Corrosão por CO_2 (fig. 5) – é um processo complexo que ocorre basicamente com a presença de gás carbônico (CO_2) no fluido circulante. A complexidade do processo está relacionada com o grande número de variáveis envolvidas tais como temperatura, pressão de CO_2 , velocidade, tipo de fluxo, teor de acetato e teor de bicarbonato entre outras. A presença de componentes e variáveis diversas leva a ocorrência de reações eletroquímicas complexas, que resultam em corrosão localizada. Possíveis formas de controle deste tipo de corrosão podem incluir o uso de inibidor de corrosão e o uso de metalurgia especial.

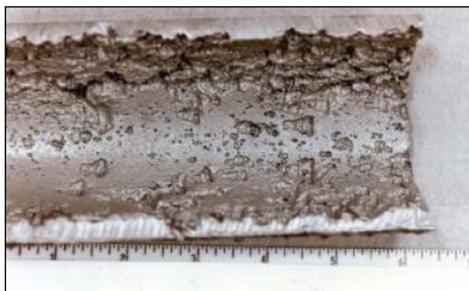


Figura 5 - Corrosão típica provocada pela presença de CO_2 (HENRIQUES, 2008)

Interação corrosão–fadiga – neste caso, considerando ligas a base de Cr por exemplo, tensões cíclicas atuantes no material movimentam as discordâncias existentes na estrutura cristalina do mesmo, as quais atingem a superfície e cisalham a camada passiva de óxido (neste caso óxido de Cr), que serve de barreira de proteção contra o ataque do elemento corrosivo. Uma possível forma de amenização neste caso é a utilização de ligas altamente resistentes a corrosão.

Interação corrosão-erosão (fig. 6) – é um processo basicamente mecânico geralmente associado com altas velocidades do fluido no interior do equipamento e/ou a presença de elementos abrasivos no mesmo. O uso de materiais e revestimentos resistentes à abrasão apresenta-se como a melhor opção para controle do problema.

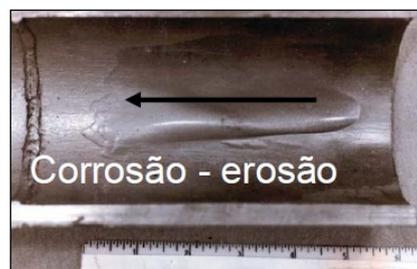


Figura 6 – Deterioração típica provocada por corrosão-erosão (HENRIQUES, 2008)

Cavitação (fig. 7) – Segundo o ASM Metals Handbook (2002), o processo de cavitação é definido como a formação e colapso de bolhas de vapor ou gás em uma fase líquida. Em geral, esta se origina em razão de um fenômeno que provoca a diminuição da pressão em uma região do líquido.

A cavitação é um processo muito danoso que ocorre em processos contendo uma fase líquida, na qual bolhas de tamanho microscópico são geradas e crescem devido às ondas alternadas de pressão positiva e negativa. As bolhas sujeitas às condições descritas acima crescem até atingir um tamanho crítico, e no momento logo após a implosão as bolhas concentram uma grande quantidade de energia. As implosões destas bolhas ocorrem em regiões nas quais a pressão volta a aumentar. Quando estas implosões ocorrem próximas de superfícies, as bolhas se transformam em jatos com um décimo do tamanho inicial da bolha e as velocidades podem atingir 400 km/h. Com a combinação da pressão, velocidade e temperatura no interior destas bolhas, as mesmas removem material da superfície.



Figura 7 – Arredondamento em face de flange provocada por cavitação (JESUS e BISCUOLA, 2011).

Fragilização por hidrogênio (fig.8) – hidrogênio livre oriundo do processo de fabricação e soldagem, de sistemas de proteção catódica e/ou ambientes com H_2S e suas espécies dissociadas, se acomoda e interage com discordâncias, contornos de grão e defeitos na estrutura cristalina do material. Uma vez instalado nestas regiões, o hidrogênio passa a exercer pressão, sobretudo, em condições de trabalho a temperaturas elevadas, culminando no aparecimento de trincas o que caracteriza a chamada “fragilização por hidrogênio”. A minimização deste efeito pode ser obtida por exemplo através do bloqueio do ingresso do hidrogênio pela aplicação de pintura, controle do potencial da proteção catódica (quando aplicável) e cuidados na soldagem, o que inclui além dos cuidados durante o processo em si, também os cuidados com a aquisição e a disposição adequada dos consumíveis de soldagem.



Figura 8 - Falha típica de fragilização por hidrogênio (HENRIQUES, 2008)

2.3. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

Este item relaciona basicamente as propriedades que devem ser conhecidas e consideradas sempre que se desejar especificar um material para determinada aplicação. Este quesito encontra-se intimamente relacionado aos aspectos tratados anteriormente (itens 2.1 e 2.2), sendo necessário, portanto, que no primeiro caso (temperatura de operação) se conheça a variação de cada propriedade em toda a faixa de temperatura previsível de utilização do material e no segundo caso

(resistência à corrosão), que se conheça com profundidade o fluido circulante e o ambiente de trabalho, suas relações com o material e suas possíveis influências nas propriedades.

- *Propriedades físicas*: peso específico, ponto de fusão, condutividade térmica, coeficiente de dilatação e temperatura de oxidação entre outras.
- *Propriedades mecânicas*: limites de resistência e de escoamento, alongamento, resistência à fluência e fadiga, tenacidade, dureza e módulo de elasticidade entre outras.

Os níveis de tensão atuantes no material é um fator que requer desempenho e eficiência das propriedades mecânicas do mesmo. Os materiais devem resistir às solicitações impostas, as quais nem sempre se limitam, por exemplo, às cargas de pressão, mas também a uma série de outras cargas advindas da ação do peso próprio, vento, reações de dilatação térmica, sobrecargas externas e esforços de montagem entre outros.

A natureza dos esforços também deve ser considerada (tração, compressão, flexão, esforços estáticos ou dinâmicos, choques, vibrações e esforços cíclicos, entre outros). Materiais muito frágeis, por exemplo, não podem ser utilizados em situações onde predominam cargas dinâmicas, choques e pancadas; materiais dúcteis por sua vez absorvem melhor as situações relacionadas anteriormente deformando-se localmente; por outro lado, existindo inversão cíclica das tensões aplicadas, tais deformações não podem ser toleradas, devido à possibilidade de surgimento de trincas por fadiga.

2.4. FLUIDOS DE CONTATO/CIRCULANTE E AMBIENTE DE TRABALHO

Com relação aos fluidos de contato/circulantes, diversos fatores importantes devem ser conhecidos, dentre os quais se mencionam: Natureza e concentração do fluido, impurezas/contaminantes existentes ou possíveis de existir; existência ou não de gases dissolvidos ou sólidos em suspensão, temperatura, acidez (pH), velocidade relativa em relação ao material do equipamento, faixas possíveis de variação de cada item mencionado anteriormente, valores de trabalho e seus máximos e mínimos; entre outros (TELLES, 1979).

2.5. CUSTO DO MATERIAL

Evidentemente, no meio industrial o custo do material é o fator para o qual na grande maioria das vezes maior atenção é dispensada, uma vez que qualquer tipo de investimento só é

viabilizado quando pelo menos um mínimo de retorno financeiro pode ser visualizado, quer seja a curto, médio ou a longo prazo (JESUS e BISCUOLA, 2011).

Para cada aplicação prática podem existir vários materiais possíveis de serem utilizados e o melhor neste caso será o que se apresentar mais economicamente viável, desde que obviamente alguns outros critérios também sejam rigorosamente observados, como é o caso da segurança. Para a verificação da viabilidade econômica, deve-se avaliar não somente o custo direto do material, mas também uma série de outros fatores, como por exemplo, os custos de fabricação do equipamento com este material, tempo de vida, custo de paralisação e de reposição do equipamento, entre outros (TELLES, 1979).

O custo direto do material é fortemente influenciado pelo custo unitário de cada um de seus componentes. Charles e Augusto (2008), citam como exemplo o preço do níquel entre 2006 e 2007 que chegou a alcançar o valor de 50 US\$/t, o que à época elevou drasticamente o custo dos materiais que utilizavam grande quantidade deste elemento em sua composição. Outra situação é apresentada também por Vigliano (2010), que estabelece uma relação entre o custo do aço cromo molibdênio e o aço carbono comum, sendo que o primeiro chega a ter um custo até 40% maior em relação a este último.

O custo por quilo de um aço inoxidável 304, por exemplo, é cerca de 3,7 vezes superior ao de um aço liga 1 ¼ Cr – ½ Mo, entretanto, a construção de um equipamento em aço inox 304 pode resultar em um menor custo por conta da facilitação do processo de soldagem e dispensa de tratamento térmico de alívio de tensões por exemplo (TELLES, 1979). Ainda, para certos ambientes agressivos o inox pode apresentar maior vida útil se comparado com um aço liga.

2.6. SEGURANÇA

Quando o risco potencial do equipamento ou do local onde o mesmo se encontra for grande, ou quando o equipamento for essencial ao funcionamento de uma instalação importante, há necessidade do emprego de materiais que ofereçam o máximo de segurança, de modo a evitar a ocorrência de acidentes que possam resultar em perdas de vida e/ou danos ao meio ambiente. São exemplos de elevado potencial de risco os equipamentos que trabalham com fluidos inflamáveis, tóxicos, explosivos, ou em temperaturas e pressões muito altas (TELLES, 1979).

3. MATERIAIS PARA CONSTRUÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE PROCESSO

Existe uma vasta gama de materiais que podem ser usados para a construção de equipamentos de processo, os quais podem ser divididos basicamente em 3 grandes grupos: metais ferrosos, metais não ferrosos e materiais não metálicos. Neste trabalho tratamos mais especificamente acerca dos avanços e desenvolvimentos feitos sobre os metais ferrosos e alguns não ferrosos, com o objetivo de aprimorar suas propriedades objetivando melhor desempenho e maior vida útil dos equipamentos.

Resumidamente, os materiais com maior frequência de uso podem ser elencados conforme segue, os quais serão melhor detalhados na sequência:

- Aço carbono
- Aço liga
- Aços inoxidáveis e suas ligas
- Níquel e suas ligas

3.1. AÇO CARBONO

Na linha de aços para construção de equipamentos de processo, pode-se definir metalurgicamente “aço-carbono” como sendo ligas de ferro e carbono contendo em sua composição uma quantidade máxima de carbono de até 0,35%. Além do ferro e carbono esses aços contêm sempre alguma quantidade de manganês, enxofre e fósforo e alguns podem apresentar ainda pequenas adições de silício, alumínio e cobre.

Embora aos poucos a situação esteja mudando como será visto ao longo deste trabalho, de todos os materiais disponíveis o aço carbono ainda continua sendo o material mais empregado, restando para os demais materiais aplicações mais restritas onde não é possível a utilização de aço carbono. O motivo de tal preferência se deve ao fato de que além de ser um material de boa soldabilidade, é de fácil obtenção e pode ser encontrado em várias dimensões e formatos.

Existem diversos tipos de aço carbono que podem ser distinguidos basicamente pelas suas características e aplicabilidade, são eles (TELLES, 1979):

- aços de baixo carbono (até 0,20 % C, até 0,90% Mn, até 0,1% Si em alguns aços);
- aços de médio carbono para temperaturas elevadas (até 0,35 % C, até 1% Mn, até 0,1% Si em alguns aços);
- aços para baixa temperatura (aprox. 0,23% C, até 1,2% Mn, acalmado em Al ou Si);

- aços de qualidade estrutural, destinados primordialmente à construção de estruturas metálicas;
- aços carbono de alta resistência.

A tabela 1 exemplifica algumas especificações de aço carbono para diversas aplicações conforme designação ASTM.

Tabela 1 – Diversos tipos de aço carbono conforme designação ASTM
(TELLES, 1979 – adaptação)

Formas de apresentação	Aços de baixo carbono	Aços de médio carbono (não acalmados)	Aços de médio carbono acalmados (para temperaturas elevadas)	Aços de médio carbono acalmados (baixas temperaturas)	Aços de qualidade estrutural
Chapas grossas	A-285 Gr A	A-285 Gr B,C	A-515 Gr 60, 70	A-516 Gr 60, 70	A-283 Gr C
Tubos condução (sem costura)	A-106 Gr A (com Si)	-	A-106 Gr B, C	-	-
Tubos para permutadores	A-179 (sem costura) A-214 (com costura)	-	-	A-334 Gr 6	-
Tubos para caldeiras	A-178	-	A-210 A-192	-	-
Peças forjadas	-	A-181	A-105	A-350 Gr LF1	-

3.2. AÇO LIGA

Recebem a denominação de aço liga todos os aços que possuem qualquer quantidade de outros elementos além daqueles que normalmente fazem parte da composição química dos aços carbono (TELLES, 1979). Os aços liga são classificados em aços de baixa liga, aços de média liga e aços de alta liga de acordo a porcentagem de elementos de liga presentes em sua composição. Aços liga são materiais caros aplicados geralmente em serviços de alta e baixa temperatura, alta corrosão e segurança entre outros.

Os aços inoxidáveis são casos particulares de aços de alta liga contendo altas quantidades de cromo, o que lhes confere a característica peculiar de não oxidar quando em exposição prolongada em atmosfera normal, isto, devido à formação de uma fina camada passiva de óxido de cromo na superfície do material, que impede a associação do oxigênio presente na atmosfera com o ferro presente na composição da liga. Estes materiais serão tratados com mais detalhe no próximo item.

Distinguem-se basicamente quatro grupos de aços liga: o aço liga molibdênio, o aço liga cromo molibdênio, o aço liga níquel e o aço liga de alta resistência. Os aço liga molibdênio e cromo molibdênio são mais adequados para serviços a altas temperaturas, serviços com hidrogênio e corrosivos; enquanto que os aços liga níquel são indicados para trabalhos a baixas temperaturas. Já os aços liga de alta resistência são muito específicos e não são apropriados para trabalho em baixas e elevadas temperaturas, mas tão somente em situações onde seja requerido altos valores de limite de resistência mecânica.

A tabela 2 exemplifica algumas especificações de aço liga para diversas aplicações conforme designação ASTM.

Tabela 2 – Diversos tipos de aço liga conforme designação ASTM
(TELLES, 1979 – adaptação)

Classe de material	Formas de apresentação					
	Chapas	Tubos para condução (sem costura)	Tubos para caldeiras	Tubos para permutadores	Peças forjadas	Acessórios para tubulação
Aço liga ½ Mo	A-204 Gr A,B	A-335 Gr P1	A-209 Gr T1	-	A-182 Gr F1	A-234 Gr WP 1
Aço liga 2 ¼ Cr – ½ Mo	A-387 Gr 22	A-335 Gr P22	A-213-Gr T22	A-199 Gr T22	A-182 Gr F22	A-234 Gr WP 22
Aço liga 9 Cr – 1 Mo	-	A-335 Gr P9	A-213 Gr T9	A-199 Gr T9	A-182 Gr F9	A-234 Gr WP 9
Aço liga 9 Ni	A-353	A-333 Gr 8	-	A-334 Gr 8	-	A-420 Gr WPL 8

3.3. AÇO INOXIDÁVEL

Denomina-se genericamente aço inoxidável os aços que não se oxidam mesmo em exposição prolongada a atmosfera normal (TELLES, 1979). Os tipos convencionais de aço inox, mais antigos, costumam ser classificados em três grandes grupos de acordo com a estrutura metalúrgica predominante em temperatura ambiente. Nestas condições, subdividem-se basicamente em austeníticos, ferríticos e martensíticos; sendo os primeiros conhecidos como os da série 300 e os dois últimos da série 400 conforme designação AISI.

Os desenvolvimentos na área de materiais para aplicação em equipamentos de processo têm ocorrido de forma bastante acentuada nos últimos anos principalmente no campo dos aços inoxidáveis. O contínuo trabalho de pesquisa e desenvolvimento tem possibilitado o surgimento de uma série de ligas variantes do aço inoxidável, ligas estas especialmente voltadas para aplicações em ambientes altamente corrosivos.

Alguns exemplos destes tipos de desenvolvimento podem ser mencionados, como é o caso por exemplo do inox superaustenítico e do inox alto Ni (Incoloy), que se enquadram na família de ligas conhecidas como LRCs-Ligas Resistentes à Corrosão em inglês CRAs “Corrosion Resistant Alloys” (BARBOSA, 2009).

Um caso particular das LRCs é o denominado aço inoxidável “duplex”, cujo desenvolvimento mais acentuado iniciou-se basicamente a partir da sua segunda geração por volta dos anos de 1970 (DAVIDSON e REDMOND, 1990), (MANTEL et ali., 2008). O termo “duplex” se origina de uma liga cuja estrutura é típica de partes igualmente balanceadas de ferrita e austenita (Alvarez-Armas, 2008).

Aços inoxidáveis duplex oferecem diversas vantagens sobre os aços inoxidáveis austeníticos comuns: são altamente resistentes a corrosão sob tensão, têm excelente resistência a corrosão por “pitting” e frestas, apresenta cerca do dobro da resistência e têm apenas cerca da metade da quantidade de níquel dos austeníticos comuns, portanto, são menos sensíveis às variações do preço do Ni (DAVIDSON e REDMOND, 1990).

Do original “duplex”, originaram-se também outras variantes como por exemplo o Superduplex, hyper-duplex (SOUZA et ali., 2008) e lean duplex (ALVAREZ-ARMAS, 2008) entre outras, cada uma delas desenvolvida para aplicações bem específicas.

O desenvolvimento de novos materiais para aplicações em equipamentos de processo é devido em parte pelo declínio da produção de hidrocarbonetos “onshore”, enquanto que ocorre um crescente aumento da necessidade de exploração e prospecção em campos remotos “offshore” ditos de águas profundas.

As principais solicitações presentes nos atuais ambientes produtivos e nas novas áreas a serem exploradas (campos de pré-sal) exigem dos materiais uma combinação bem estabelecida de resistência a corrosão e resistência mecânica, proteção contra CO₂, cloretos, H₂S e formação de condensados; daí a importância das LRCs (BARBOSA, 2009).

Após vários anos de testes de campo, análises de falhas e extensivos programas de avaliação, esses materiais alcançaram um alto nível de confiabilidade e o emprego de aços inoxidáveis duplex e ligas a base de níquel em condições de alta criticidade no golfo do México, Estados Unidos e Mar do Norte, consolidaram definitivamente estes materiais como uma solução que veio para ficar (BARBOSA, 2009).

A tabela 3 apresenta as principais famílias de LRC's frequentemente aplicadas em locais de prospecção de hidrocarbonetos, começando pelo grupo dos aços inoxidáveis 13Cr; passando pelo grupo dos duplex e superduplex com resistência mecânica superior em relação ao grupo anterior e utilização em limitadas condições de H₂S; na sequência aparece o grupo dos inoxidáveis de alto Ni, Cr e Mo para aplicação em crescentes temperaturas de operação e agressividade corrosiva, com destaque para as ligas 904 e 825; por fim, nas condições mais severas do poço surge o grupo das ligas de alto teor de Ni.

A figura 9 mostra a relação estabelecida entre as diversas famílias de LRCs em termos de pressões parciais de CO₂ e H₂S. O aumento da corrosividade causada pelos teores crescentes de CO₂ e H₂S aliada à agressividade salina nos remete às LRC's do quadrante superior direito.

Tabela 3 – Famílias de LRCs e suas principais ligas. A resistência mecânica é indicada com valores típicos e o valor de PREN = %Cr+3,3%Mo+16%N, indicativo da resistência a corrosão por pites (BARBOSA, 2009 - adaptação).

Família	Nome Comum	UNS	Cr	Ni	Mo	Cu	N	C	LE (MPa)	PREN
Inox Martensítico	13 Cr	S41000	13	–	–	–	–	0,2	550	13
	SuperCr	S41426	13	5,5	2,0	–	–	0,02	660	20
Inox Duplex e Superduplex	2205	S32205	22	5,5	3,3	–	0,15	0,03	450	35
	2507	S32750	25	7,0	4,0	0,5	0,28	0,03	550	41
Inox Superaustenítico	254	S31254	25	20	5,8	–	0,20	–	310	55
Inox Alto Ni (Incoloy)	904 L	N08904	20	25	4,5	1,5	–	–	220	34
	825	N08825	22	42	3,0	2,5	–	–	240	32
Ligas de Níquel	625	N06625	21	70	9,0	–	–	–	380	51
	C276	N10276	16	68	16	–	–	–	280	68

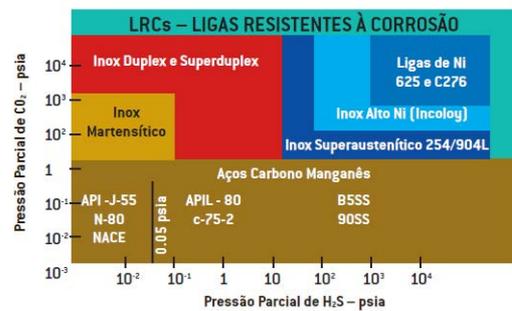


Figura 9 – Mapa de pressões parciais de CO₂ e H₂S e a adequabilidade de aplicação das LRCs (BARBOSA, 2009).

3.4. NIQUEL E SUAS LIGAS

São metais que apresentam simultaneamente excepcional resistência à corrosão e boas propriedades mecânicas e de resistência às temperaturas altas e baixas, o que os enquadra no topo da família das LRCs quando o assunto é resistência a corrosão (vide tabela 3 e figura 9). Algumas variações desta liga para aplicações diferenciadas lhe custou denominações diversas (marcas registradas) por seus fabricantes como por exemplo, “Monel, Inconel e Incoloy” de propriedade da “International Nickel Corp.” e os “Hastelloys” de propriedade da “Union Carbide” (TELLES, 1979).

4. CONSIDERAÇÕES QUANTO AO PROCESSAMENTO DOS MATERIAIS

O desempenho satisfatório da liga quando em serviço é sem dúvida o fator mais importante que deve ser levado em consideração durante o desenvolvimento de um novo material, entretanto, há de se considerar também a necessidade de avaliar a sua “trabalhabilidade”, no sentido de que seja possível ser processada com facilidade ao longo de todas as etapas de fabricação do equipamento, através da utilização dos métodos convencionais existentes, objetivando evidentemente acima de tudo, garantir a manutenção das propriedades da liga, afastando o risco de que o equipamento não responda satisfatoriamente ao desempenho esperado quando em serviço (JESUS e BISCUOLA, 2011).

No caso, por exemplo, dos aços liga Cr-Mo contendo até 2% e mais de 2 ½% Cr, Telles (1979), faz referência a situações em que para equipamentos de grande porte e trabalhos a alta temperatura, prefere-se substituir o aço liga pelo aço carbono, revestido-o internamente com refratário devido a dificuldade de soldagem dos aços ligados.

Tavares et ali. (2006), chamam a atenção para os prejuízos na tenacidade e resistência à corrosão de ligas duplex, devido a alterações microestruturais importantes nesses materiais provocadas pelo processo de fabricação por conformação a quente e soldagem. Smith e Cunha (2009), destacam a importância de se trabalhar com materiais resistentes em ambientes agressivos e também alertam para que se tenha atenção especial em relação ao processo de soldagem.

Uma outra situação também frequentemente enfrentada pelos fabricantes de equipamentos diz respeito ao uso de chapas cladeadas por explosão, as quais geralmente sofrem forte encruamento provocado pelo processo de explosão, sendo necessário principalmente nos casos de chapas mais finas, que as mesmas sejam submetidas a tratamentos térmicos adequados antes de serem utilizadas na construção dos equipamentos, sob o risco de aparecimento de trincas durante operações de conformação por prensagem ou calandragem e também na soldagem (JESUS e BISCUOLA, 2011).

5. CONCLUSÕES

A demanda por equipamentos que alcancem melhor desempenho e eficiência, maior vida útil e menores custos com manutenção tem colaborado para que novos desenvolvimentos sejam constantes na área de materiais. A evolução dos materiais para fabricação de equipamentos de processo pode ser notada pela grande quantidade de tipos e variações existentes; que vão desde o simples aço carbono o qual ainda hoje é largamente utilizado em aplicações com menores exigências (de corrosividade por exemplo), até alcançar as chamadas LRCs, que são ligas de alta tecnologia

concebidas em muitos casos para condições de trabalho muito específicas. Entretanto, é essencial que se esteja preocupado não só com a necessidade de desenvolvimento de materiais que atendam as condições críticas de trabalho dos equipamentos quando em serviço, como também e principalmente, com a trabalhabilidade destas ligas no sentido de que sejam possíveis de serem processadas por meio de métodos convencionais existentes; objetivando a redução de custos e, sobretudo a manutenção das propriedades do material ao longo de todo o processo produtivo, de modo a garantir que o equipamento responda satisfatoriamente ao desempenho esperado de projeto.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVAREZ-ARMAS, I., 2008, **Duplex Stainless Steels: Brief History and Some Recent Alloys**, Recent Patents on Mechanical Engineering, 2008, Vol. 1, No1, pp. 51-57.

ASM, 2002, **Failure Analysis and Prevention** Volume 11.

ATLAS, S. M., 2003, **Technical Handbook of Stainless Steel**, publicação do departamento de serviços técnicos da ATLAS Specialty Metals. Disponível em: <http://www.ATLASmetals.com.au>. Acesso em: 05 de setembro de 2011.

BARBOSA, C. A., 2009, **Revestimento de poços**. O desafio da exploração em águas profundas e a contribuição da LRCs-Ligas Resistentes a Corrosão, Inox 31, Núcleo Inox, Janeiro/Abril 2009, pp. 19-21

CHARLES, J., FARIA, R. A., **Aços Inoxidáveis Duplex e aplicações em óleo e gás**: Uma revisão incluindo a nova oferta da Arcelormittal, anais do IX Seminário Brasileiro do Aço Inoxidável. Disponível em <http://www.nucleoinox.org.br/upfiles/arquivos/downloads/inox08/pg_247-254.pdf>. Acesso em: 05 de setembro de 2011.

CHIAVERINI, Vicente, 1986, **Tecnologia Mecânica: Estrutura e Propriedades das Ligas Metálicas** Volume I, Ed. McGraw-Hill, São Paulo, Brasil.

DAVIDSON, R. M., REDMOND, J. D., 1990, **Practical guide to using duplex stainless steel**, NIDI Technical Series N° 10044, Nickel Development Institute, pp.1-6.

DOE/GO-102004-1974, 2004, **Materials Selection Considerations for Thermal Process Equipment**, Documento do Programa de Tecnologias Industriais emitido pelo Departamento de Energia Americano (DOE), 8 pág. Disponível em: <<http://www.osti.gov/bridge/purl.cover.jsp?purl=/15011683-XaZ157/native/>>. Acesso em: 5 de setembro de 2011.

GUIMARÃES, E. M., 2006, **Causas e formas de corrosão na unidade de recuperação de enxofre da refinaria Gabriel Passos (REGAP/PETROBRÁS)**, Dissertação de Mestrado, 2006, 160 pag.

HENRIQUES, C.C.D., 2008, **Desafios na seleção de materiais na indústria do petróleo**, Palestra apresentada no IX Seminário Brasileiro do Aço Inoxidável. Disponível em: <http://www.nucleoinox.org.br/upfiles/arquivos/downloads/apresent_petrobras_desafios_sele%C3%A7%C3%A3o_materiais_v2.pdf>. Acesso em: 5 de setembro de 2011.

JESUS, E. R. B., BISCOLOLA, V. B, 2011, **O estado da arte dos materiais para aplicação na fabricação de equipamentos de processo**, Anais do II Congresso Científico da Semana Nacional de Ciência e Tecnologia no IFSP (Concistec 2011), Bragança Paulista, 17-21 out/2011.

MAINIER, F. B., ROCHA, A. A., 2003, **H₂S**: Novas rotas de remoção química e recuperação de enxofre, Anais do 2º Congresso Brasileiro de P & D em Petróleo e Gás, Rio de Janeiro, 15-18 junho. Disponível em: <<http://www.portalabpg.org.br/PDPetro/2/6074.pdf>>. Acesso em: 5 de setembro de 2011.

MANTEL, M., CHAUVEAU, E., VIANA, A. S., PEULTIER, J. JACQUES, S., 2008, **Desenvolvimento de uma nova linha de aços inoxidáveis duplex ou como o nitrogênio pode reduzir o teor de níquel, melhorando simultaneamente a resistência à corrosão e propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis**, anais do IX Seminário Brasileiro do Aço Inoxidável. Disponível em: <http://www.nucleoinox.org.br/upfiles/arquivos/downloads/inox08/pg_255-261.pdf>. Acesso em: 5 de setembro de 2011.

SBARAI, C., 2010, **Tratamento de Superfície** – Uma Visão Atual e Dinâmica do Setor, Corrosão & Proteção, Março/Abril 2010, PP. 9-24.

SMITH, L., CUNHA, C., 2009, **À prova de corrosão**, Inox 31, Núcleo Inox, Jan./Abril 2009, pp. 8-10

SOUZA, A., PEREA, E., SIGNORELLI, R., 2008, SAF 2707 HD® (UNS S32707)-**Um aço inoxidável hiper-duplex para ambientes severos contendo cloretos**, anais do IX Seminário Brasileiro do Aço Inoxidável. Disponível em: <http://www.nucleoinox.org.br/upfiles/arquivos/downloads/inox08/pg_262-268.pdf>. Acesso em: 5 de setembro de 2011.

TAVARES, S. S.M., CASTRO, J. L. G., CÔRTE, R. R. A., SOUZA, V. M., PARDAL, J. M., 2006, **Detecção de pequenos teores de fase sigma e avaliação dos seus efeitos na resistência à corrosão do aço inoxidável duplex UNS S31803**, Engevista, Vol. 8, n.2, dezembro2006, pp. 77-82.

TELLES, P.C.S., 1979, **Materiais para equipamentos de processo**, Ed. Interciência, Rio de Janeiro, 2º edição, 230 pág.,

VIGLIANO, R., 2010, **Otimismo com mercado novo**, Energia hoje. Disponível em: <<http://www.energiahoje.com/index.php?ver=mat&id=403355>>. Acesso em: 5 de setembro de 2011.