

Deterioração devido ao Serviço com Hidrogênio

1. Introdução

1.1. Utilização

O Hidrogênio molecular (H_2) é um gás muito útil nas indústrias químicas e petroquímicas por conta de sua facilidade de reação com outros elementos químicos.

Nas refinarias é o principal insumo no processo de remoção do enxofre de diversos combustíveis como a gasolina e óleo diesel, tendo seu consumo aumentado por conta das novas legislações ambientalmente mais restritivas.

O Hidrogênio é matéria-prima importante na indústria petroquímica, sendo usado, por exemplo, na síntese de amônia e metanol e nos processos de hidrotreatamento e hidrocrackeamento das refinarias.

É comum instalar-se uma unidade de geração de Hidrogênio, a partir do processo conhecido por Reforma com Vapor d'Água (*Steam Reforming Process*), para se atender ao aumento da demanda pelo Hidrogênio em refinarias e petroquímicas.

Porém, um dos grandes problemas encontrados em refinarias de petróleo e petroquímicas é o controle da deterioração causada pelo Hidrogênio nas unidades de processamento.

A interação de Hidrogênio com metais, sobretudo o aço, é um tema de grande relevância em pesquisas e desenvolvimento.

O Hidrogênio é reconhecido como sendo um elemento residual sempre prejudicial ao aço.

Além de sua introdução durante a produção do aço nas aciarias, proveniente da dissociação da água durante as operações de refino e lingotamento do aço, o Hidrogênio pode entrar no metal através das seguintes fontes:

- Hidrogênio atômico pode ser adsorvido na superfície e subseqüentemente entrar no reticulado do metal durante os processos de decapagem e eletrodeposição.
- Durante um ataque corrosivo, onde o Hidrogênio está envolvido na reação catódica.
- Técnicas de prevenção de corrosão, como par galvânico e proteção catódica de corrente aplicada, podem resultar na introdução de Hidrogênio no aço, o que explica a fragilização em tubulações enterradas com proteção catódica.
- Através de corrosão promovida por gases ou líquidos contendo Sulfeto de Hidrogênio (H_2S), em solução aquosa.

Os danos relacionados ao Hidrogênio têm como implicações imediatas a redução da disponibilidade de operação de plantas industriais, aumento dos custos de parada por reparos e substituições, além dos riscos potenciais às pessoas, ao meio ambiente e às instalações, caso não haja a pronta detecção dos mecanismos de falha, dos equipamentos e tubulações, em operação.

Dos setores industriais, os que mais apresentam relatos sobre esses problemas são os de produção, transporte e refino de óleo e gás.

1.2. Potencial de problemas

A literatura técnica, particularmente as normas internacionais, do API - American Petroleum Institute e da NACE - The National Association of Corrosion Engineers, abordam vários tipos de ataque pelo Hidrogênio, que provocam danos aos equipamentos e tubulações de aço, como a Fragilização Induzida pelo Hidrogênio e o Ataque pelo Hidrogênio em Alta Temperatura

Por outro lado, o Hidrogênio é um produto muito perigoso, forma misturas explosivas com o ar e pode inflamar-se facilmente em caso de vazamento, pois se aquece quando se expande, levando à ignição espontânea.

1.2.1. Fragilização Induzida pelo Hidrogênio ou FIH

A presença do Hidrogênio no interior da estrutura dos aços, mesmo em pequenas quantidades, pode provocar modificações de suas propriedades mecânicas.

Esta deterioração está relacionada a mecanismos envolvendo, particularmente, a penetração de Hidrogênio no aço que se denomina Fragilização Induzida pelo Hidrogênio ou FIH.

A fragilização Induzida pelo Hidrogênio decorre da permeação do Hidrogênio, na verdade dos íons H^+ e átomos H^0 , gerados em um processo corrosivo do aço, através do metal e pode ocorrer em máquinas (bombas e compressores), vasos de pressão, tubulações, dutos ou outros equipamentos metálicos, utilizados na indústria de petróleo, refinarias, indústrias químicas, indústrias petroquímicas, unidades para produção, bombeamento, transporte e armazenamento de petróleo e gás.

A movimentação de Hidrogênio no interior do aço ocorre através da migração de átomos ou íons H^+ , permeando o reticulado cristalino. Os átomos de Hidrogênio, em função de seu pequeno tamanho, podem penetrar e se difundir no interior do aço com alta mobilidade. Já as moléculas de Hidrogênio, devido ao seu maior tamanho, não têm essa possibilidade.

Além de estar em solução sólida no reticulado cristalino do aço, o Hidrogênio tende a acumular-se em vários locais da microestrutura, como por exemplo: contornos de grãos, inclusões, segregações, vazios, discordâncias e duplas laminações. Esse fenômeno provoca danos severos que, dependendo das circunstâncias, podem ser descritos como: empolamento ou bolhas, flocos ou escamas, fragilização, fissuras e trincas internas e externas.

A fragilização causada pelo Hidrogênio acontece em qualquer nível de pressão, mesmo próximo à atmosférica, e temperaturas até $150^{\circ}C$, quando o fluido líquido ou gasoso contém o Sulfeto de Hidrogênio ou H_2S e outros contaminantes como os mercaptans e cianetos, em presença de água livre.

Esse caso de deterioração, com fluido aquoso que apresenta H_2S em sua composição, a literatura nomeia de Corrosão pelo H_2S úmido ou simplesmente Serviço com H_2S úmido *Wet H_2S Service*.

1.2.2. Ataque pelo Hidrogênio em Alta Temperatura (acima de $204^{\circ}C$)

Em temperaturas elevadas, acima de $204^{\circ}C$, o Hidrogênio molecular H_2 , presente na corrente do processo, dissocia-se na forma atômica H^0 , que pode entrar e se difundir pronta e rapidamente através do aço. Há de se considerar que a difusão do Hidrogênio aumenta de forma exponencial com a temperatura.

Os danos causados pela difusão e retenção do Hidrogênio no aço são perda de propriedades mecânicas, empolamentos e trincas, que levam a falhas prematuras do material, gerando muitos problemas para a indústria.

Esse caso de deterioração, em que as moléculas de Hidrogênio, presentes no fluido de processo se desassociam em seus átomos e íons, por efeito de alta temperatura, e que penetram na estrutura cristalina do aço, a literatura nomeia de Ataque pelo Hidrogênio em Alta Temperatura *High Temperatura Hydrogen Attack* ou simplesmente Serviço com Hidrogênio em Alta Temperatura.

O Serviço com Hidrogênio em Alta Temperatura se refere apenas a fluidos caracterizados pela presença de Hidrogênio molecular (H_2), na corrente de processo, sem conterem outros compostos e contaminantes corrosivos, e aborda apenas a resistência do aço ao ataque de Hidrogênio a altas temperaturas, não levando em conta outros fatores de danos em altas temperaturas, tais como:

- a. Efeitos de outros produtos corrosivos, como Enxofre, que podem estar no sistema e promovem perda de espessura por sulfetação e ataque pelo H_2S em alta temperatura.
- b. Fluência (*creep*), fragilização pelo revenido ou outros mecanismos de danos em altas temperaturas.
- c. Possíveis efeitos sinérgicos, como por ex. o ataque pelo Hidrogênio em altas temperaturas combinado com fluência.

1.2.3. Vazamento de Hidrogênio em alta pressão

Nas condições normais de pressão e temperatura-CNTP, o Hidrogênio é um gás não tóxico, não metálico, sem odor, nem gosto, nem cor, menos denso que o ar, extremamente inflamável e com fórmula molecular H_2 .

Pode inflamar-se facilmente em contato com o calor de superfícies aquecidas, centelhas ou faúlhas, queimando no ar em um amplo range de concentração, entre 4% a 75% em volume, e com chama se propagando rapidamente.

Forma misturas explosivas com o ar, que se deslocam rapidamente até a fonte de ignição, podendo provocar retrocesso de chamas.

O Hidrogênio é um gás que entra em combustão espontaneamente ao ser liberado, independentemente de haver presença de fonte de ignição conhecida (chama, centelha, faúlca, eletricidade estática etc.).

A temperatura de autoignição, ou seja, em que a combustão ocorre espontaneamente, é alta cerca de 500°C a 520°C.

Por outro lado, a energia mínima de ignição do Hidrogênio é baixíssima, assim o simples atrito de descarga do fluxo de gás através de furo ou trinca, pode criar uma micro-centelha, mesmo invisível, capaz de ignitar o gás no ar.

Nota:

Quando a energia de uma descarga eletroestática ou faúlca ou centelha for maior que Energia Mínima de Ignição de um produto que forma atmosfera inflamável, é possível ocorrer a ignição.

A energia de ignição é medida em milijoules (mJ).

Apenas para comparar, enquanto a energia mínima de ignição do H₂ é 0,02 mJ, a do GLP é 0,25 mJ e a energia da faúlca que se sente, ao tocar a porta de um carro em um dia seco, pode chegar a 50-60 mJ.

Uma outra explicação, sobre a combustão espontânea do Hidrogênio, é pelo fenômeno conhecido por “efeito Joule-Thomson”, que descreve a variação de temperatura de um gás ou líquido, quando ele é forçado a passar através de um orifício, expandindo-se e mantido isolado, de modo que nenhum calor seja trocado com o meio ambiente.

À temperatura ambiente, todos os gases exceto Hidrogênio e Hélio resfriam-se sob a expansão no experimento de Joule-Thomson. Já o Hélio e o Hidrogênio aquecem-se quando se expandem à entalpia constante e temperatura ambiente, o que pode levar à ignição espontânea.

Outro risco é que se trata de gás cuja queima pode provocar efeitos explosivos, sem que seja necessário o confinamento (como ocorre com os hidrocarbonetos em geral), o que o torna ainda mais perigoso.

O Hidrogênio pode queimar com chama praticamente invisível de baixa radiação térmica, pois, a chama do Hidrogênio & Oxigênio emite luz ultravioleta invisível a olho nu, por isso a detecção de vazamento de Hidrogênio requer detector específico de chama.

Assim, para não haver vazamento, além da estanqueidade total exigida nas ligações flangeadas e aparafusadas, também todas as soldas não podem conter defeitos nem tensões residuais, decorrentes da fabricação e montagem, que possibilitem a nucleação e propagação de trincas, que se tornem passantes.

2. Objetivos

Este trabalho visa identificar os equipamentos e sistemas de tubulação categorizados como em Serviço com Hidrogênio, o que contempla as seguintes condições de operação:

- Serviço com Hidrogênio em Alta Temperatura: temperaturas a partir de 204°C e pressão parcial de Hidrogênio, na operação, maior que 7 bar absoluto.
- Serviço com Hidrogênio em Baixa Temperatura: temperaturas inferiores a 204°C, com pressão parcial absoluta de Hidrogênio maior que as pressões correspondentes às das classes de pressão 400 e acima, da norma ASME B16.5 (ver Anexo 1 deste trabalho).

Outro objetivo é descrever os requisitos aplicáveis à seleção dos materiais de construção, ao projeto e à fabricação dos equipamentos e sistemas de tubulação, que operarem em Serviço com Hidrogênio.

O termo equipamento refere-se a vasos de pressão e sistemas de tubulações, fabricados de material de chapa de aço Carbono.

Os vasos de pressão de refinaria e petroquímica incluem itens tais como, mas não limitados a: colunas ou torres, reatores, trocadores de calor, tambores, reboilers, separadores, filtros e vasos, propriamente dito.

Nota:

Os equipamentos e sistemas de tubulação que operam em temperaturas até 150°C, com fluidos que contêm água livre e Sulfetos/H₂S, em que o Hidrogênio atômico é gerado no processo de ataque corrosivo ao aço pelo H₂S, são considerados em Serviço com H₂S úmido, e as normas aplicáveis são a norma Petrobras N-1706 e as normas NACE RP0103 e NACE RP0175. Conferir no trabalho intitulado “Serviço com H₂S em meio úmido - Trincamento de Aços Carbono promovido pelo H₂S dissolvido em Fase Aquosa ou em Fase Gasosa”.

Este procedimento se aplica às partes pressurizadas de equipamentos como vasos de pressão e tubulações em contato com o fluido que resulte na caracterização de “Serviço com Hidrogênio”. Nos trocadores de calor, quando somente um dos fluidos circulantes resulte na caracterização de “Serviço com H₂”, as exigências deste procedimento se aplicam apenas às partes em contato com esse fluido.

Nota:

As prescrições a seguir se referem apenas a fluidos caracterizados pela presença de Hidrogênio molecular (H₂), sem conterem outros compostos corrosivos ou contaminantes, como por ex. H₂S.

3. Definições

3.1. Serviço de uma instalação industrial

É a designação do serviço ou condição de operação de um sistema operacional, contemplando equipamentos e tubulações, combinando-se as características e propriedades do fluido processado ou transportado, contaminantes presentes, pressão e temperatura de operação e outros fatores, que estabelecem as bases para projeto e construção do sistema.

3.2. Serviço com Hidrogênio

O Serviço com Hidrogênio pode ser subdividido em:

- “Serviço com Hidrogênio em Alta Temperatura”, em que a temperatura é igual ou maior que 204°C;
- “Serviço com Hidrogênio em Baixa Temperatura”, em que a temperatura de operação é abaixo de 204°C.

O equipamento ou sistema em Serviço com Hidrogênio deve ser caracterizado levando-se em conta os seguintes fatores:

- a) teor de H₂ no fluido de processo;
- b) presença ou não de contaminantes como Enxofre, Sulfetos/H₂S e outros, no fluido de processo;
- b) pressão total;
- c) pressão parcial de H₂;
- d) temperatura.

3.2.1. Serviço com Hidrogênio em Alta Temperatura *High Temperature Hydrogen Attack*

Denomina-se Serviço com Hidrogênio em Alta Temperatura a operação de equipamentos e sistemas de tubulações com fluidos, como hidrocarbonetos líquidos ou gasosos, contendo Hidrogênio com pressão parcial acima de 7 bar absoluto, e em temperaturas acima de 204°C. Nessas condições ocorre a degradação dos aços pelo Hidrogênio através do fenômeno intitulado de Ataque pelo Hidrogênio à Alta Temperatura *High Temperature Hydrogen Attack*. Nesta situação é aplicável a norma API Recommended Practice 941- *Steels for Hydrogen Service at Elevated Temperatures and Pressures in Petroleum Refineries and Petrochemical Plants* e a norma Petrobras N-1704 Requisitos Adicionais para Vaso de Pressão em Serviço com Hidrogênio.

Notas:

- a. O limite de 204°C vem da própria Norma API RP 941 Steels for Hydrogen Service at Elevated Temperatures and Pressures in Petroleum Refineries and Petrochemical Plants que no seu escopo explicita:
 - Esta Norma resume os resultados de testes experimentais e dados reais adquiridos em plantas industriais, para estabelecer limites operacionais práticos para o aço Carbono e aços de baixa liga em serviço de Hidrogênio, em temperaturas e pressões elevadas.
 - Esta Norma não é aplicável ao Serviço com Hidrogênio em temperaturas abaixo de 204°C, como definido no escopo: “This RP does not address the resistance of steels to Hydrogen at lower temperatures [below about 400°F (204°C)]”.
- b. O limite de 7 bar absoluto provém das Curvas de Nelson, ilustradas também na Norma API RP 941.

3.2.2. Serviço com Hidrogênio em Baixa Temperatura

- Denomina-se Serviço com Hidrogênio em Baixa Temperatura a operação de equipamentos e sistemas de tubulações com fluidos, como hidrocarbonetos líquidos ou gasosos, contendo Hidrogênio com pressão parcial absoluta maior que as pressões correspondentes às das classes de pressão 400 e acima, da norma ASME B16.5 (ver Anexo 1 deste trabalho), e temperaturas inferiores a 204°C.

Neste caso, não há deterioração, mas sim alto potencial de dano físico às pessoas e ao meio ambiente, devido às características e riscos de vazamento do gás Hidrogênio H₂, em alta pressão.

4. Referências

- Normas Petrobras

N-1706 Requisitos adicionais para Vaso de Pressão em Serviço com H₂S Úmido

N-1704 Requisitos Adicionais para Vaso de Pressão em Serviço com Hidrogênio

N-115 Fabricação e Montagem de Tubulações Metálicas

N-76 Materiais de Tubulação para Instalações de Refino e Transporte

http://sites.petrobras.com.br/CanalFornecedor/portugues/requisitocontratacao/requisito_normastecnicas.asp

- Normas API

API RP 941- Steels for Hydrogen Service at Elevated Temperatures and Pressures in Petroleum Refineries and Petrochemical Plants

- Normas NACE

NACE MR 0103 Materials Resistant to Sulfide Stress Cracking in Corrosive Petroleum Refining Environments

NACE RP 0175 Petroleum and natural gas industries - Materials for use in H₂S-containing Environments in oil and gas production

- Normas ASME

ASME B16.5 Pipe Flanges and Flanged Fittings NPS 1/2 through NPS 24 Metric/Inch Standard

ASME Section VIII Rules for Construction of Pressure Vessels

ASME Section IX Welding and Brazing Qualifications

ASME B31.3 Process Piping

5. Serviço com Hidrogênio em Baixa Temperatura

5.1. Objetivos

- Análise das condições de operação de equipamentos e sistemas de tubulação, em que há a presença de Hidrogênio com pressão parcial absoluta maior que as pressões correspondentes às das classes de pressão 400 e acima, da norma ASME B16.5 (ver Anexo 1 deste trabalho), em temperaturas abaixo de 204°C;
- Estudo do Serviço com Hidrogênio em Baixa Temperatura, para a seleção dos materiais e requisitos de fabricação de equipamentos e sistemas de tubulações.

5.2. Requisitos aplicáveis ao Serviço com Hidrogênio em Baixa Temperatura (<204°C)

Em sistemas com fluido contendo Hidrogênio em pressão parcial absoluta maior que as pressões correspondentes às das classes de pressão 400 e acima, da norma ASME B16.5, em temperaturas baixas (<204°C), o risco maior é o potencial de vazamento.

Essas ocorrências de H₂ em temperaturas baixas (<204°C) e altas pressões (classes de pressão 400 e acima) são comuns em sistemas de Hidrogênio de "make-up" e de reciclo de Unidades de Reforma e Hidrotratamento.

Para as condições de operação, a seguir, temperatura até 204°C e pressão parcial máxima de Hidrogênio superior às das classes de pressão 400 e acima, da norma ASME B16.5, devem ser obedecidos os seguintes requisitos.

Requisitos aplicáveis ao Serviço com Hidrogênio em Baixa Temperatura (<204°C) e pressão parcial máxima de Hidrogênio superior às correspondentes da classe de pressão 400 e acima da Norma ASME B16.5	
Equipamentos e Vasos de pressão	Tubulações
<ul style="list-style-type: none"> • Materiais de construção Utilizar material de aço Carbono acalmado P-Number 1, As chapas devem ser de aço Carbono conforme especificação do código ASME BPVC Section II - Part A - SA516/SA516M, fornecidas na condição totalmente acalmadas e normalizadas. Inspeção das chapas, após conformação, com Exame Ultrassom de acordo com os requisitos da norma ASME Sec II SA-435 <i>Specification for Straight-Beam Ultrasonic Examination of Steel Plates</i>, para as chapas ≥ 2" (50 mm) de espessura. Não é permitido chapa de reforço de bocais e bocas de visita, utilizar reforço integral forjado, de material equivalente ao do corpo. Materiais de aço Carbono e aço de baixa liga para parafusos e estojos, com dureza superior a HRC 34 (HBW 321), não devem ser usados. • Fabricação e Inspeção RT-Exame com Radiografia total para soldas de qualquer espessura. TTAT- Tratamento Térmico de Alívio de Tensões após fabricação e soldagem. • Na qualificação do procedimento de soldagem, os valores de dureza não devem exceder a: <ol style="list-style-type: none"> a. Metal de solda ou cordão: média de 210HV5 e máximo de 248HV5 para valor individual (se medido conforme ASTM A1038 ou E384 para durômetro de bancada); b. ZTA: média 210HV5 e máximo de 248HV5 para valor individual (se medido conforme ASTM A1038 ou E384 para durômetro de bancada). c. Na solda pronta, isto é executada no equipamento ou tubulação, a dureza máxima admissível é de 200HBW (se medido conforme ASTM E10 ou A833). <ul style="list-style-type: none"> • ASTM A1038 Standard Test Method for Portable Hardness Testing by the Ultrasonic Contact Impedance Method • ASTM E384 Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials • ASTM E10 Standard Test Method for Brinell 	<ul style="list-style-type: none"> • Materiais de construção Utilizar material de aço Carbono acalmado P-Number 1, conforme especificação do código ASME BPVC Section II - Part A: SA-106 Gr. B (NPS ≤12) SA- 672 Gr C60 CL 22 (NPS>12) SA-105; SA- 266; SA-234 Gr. WPB; API 5L Gr. B. • Fabricação e Inspeção Conforme a Classe IV da norma Petrobras N-115 Tabela A2, reproduzida a seguir e complementando com as seguintes ações. <ul style="list-style-type: none"> • Executar o TTAT-Tratamento Térmico de Alívio de Tensões após a fabricação e soldagem. • Medição de dureza em 100% das soldas, de "pipe-shop" e de campo, e máxima dureza permitida 200 HBW, medida conforme norma ASTM E10 <i>Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials</i>. Cada medição deve conter 1 ponto no metal de solda, 2 pontos em cada ZTA e 1 ponto no metal base. Se alguma solda apresentar dureza superior a 200 HBW, todas as soldas executadas com o EPS-Especificação do Procedimento de Soldagem e o soldador identificados deverão ser ressubmetidas ao TTAT. • Aperto de montagem de ligações flangeadas com procedimento de torque controlado, conforme ASME PCC-1 <i>Guidelines for Pressure Boundary Bolted Flange Joint Assembly</i>.

<p>Hardness of Metallic Materials</p> <ul style="list-style-type: none"> • ASTM A833 Standard Test Method for Indentation Hardness of Metallic Materials by Comparison Hardness Testers • Atender ao Anexo 3 deste procedimento “Requisitos para Inspeção e Plano de Testes de Equipamentos Críticos”. • Aperto de montagem de ligações flangeadas com procedimento de torque controlado, conforme ASME PCC-1 <i>Guidelines for Pressure Boundary Bolted Flange Joint Assembly</i>. 	
--	--

Extrato da Tabela A2 da N-115 - Tipo e Extensão do Exame por Tipo de Solda – Classe IV

Classe	“P- Number”	Tipos de exame exigidos	Extensão exigida para cada tipo			
			Circunferenciais	Bocas-de-lobo e outras derivações	De suporte	Em angulo
iv	1	EV	100 %	100 %	100 %	100 %
		RX	100 %	-	-	-
		US	-	100 %	-	-
		PM	100 %	100 %	100 %	100 %
		Dureza	100 %	100 %	100 %	100 %

Quando aprovado pelo Proprietário o PM – Exame por Partículas Magnéticas pode ser substituído pelo UP – Exame por Líquido Penetrante

Legenda:

EV – Exame Visual

RX – Exame Radiográfico

US – Exame por Ultrassom

PM – Exame por Partículas Magnéticas

O alto risco envolvido em caso de vazamento, extremamente perigoso, de Hidrogênio (ver item 1.2.3 deste documento) justifica os requisitos de 100%RX e TTAT após fabricação, para se garantir soldas sem defeitos e de baixo nível de tensões residuais, decorrentes da fabricação e montagem.

Para complementar, é requerido o aperto controlado das ligações flangeadas, de modo a garantir a estanqueidade total.

5.3. Observação:

As condições de operação, temperatura até 204°C e pressão parcial máxima de Hidrogênio inferior às correspondentes da classe de pressão 400 da norma ASME B16.5, não são consideradas Serviço com Hidrogênio.

Porém, devido ao risco envolvido em caso de vazamento de Hidrogênio são recomendados os requisitos do Anexo 2, deste procedimento.

6. Serviço com Hidrogênio em Alta Temperatura $\geq 204^{\circ}\text{C}$

6.1. Objetivo

- Análise das condições de operação de equipamentos e sistemas de tubulação, em que há a presença de Hidrogênio, pressão parcial ≥ 7 bar absoluto, em temperaturas iguais ou acima de 204°C;
- Estudo do Serviço com Hidrogênio em Alta Temperatura, para a seleção dos materiais e requisitos de fabricação.

6.2. Descrição do mecanismo de Ataque pelo Hidrogênio em Alta Temperatura

Em certas combinações, de temperatura elevada e alta pressão parcial de Hidrogênio, ocorrem mudanças metalúrgicas e químicas no aço Carbono, que em estágios avançados podem torná-lo inadequado para operação segura.

O mecanismo de ataque por Hidrogênio em alta temperatura ou fragilização em alta temperatura se processa pela difusão do Hidrogênio atômico (H^0), oriundo da dissociação térmica da molécula de Hidrogênio (H_2) adsorvida na superfície do metal, que reage com os carbonetos presentes na microestrutura do aço, principalmente com a cementita da perlita, formando gás metano.

Esse é um processo que se desenvolve através da reação Hidrogênio-Carboneto gerando-se metano, isto é, desenvolve-se descarbonetando o aço.

Essa descarbonetação pode dar-se superficialmente ou não, embora seja muito mais grave se ocorrer internamente, pelo fato do metano não poder difundir-se na rede do aço, tendendo a se acumular em interfaces tais como os contornos de grão, tensionando o local e nucleando trincas intergranulares, devido às altas pressões de metano.

As principais variáveis que favorecem o ataque por Hidrogênio são:

- Pressão parcial de Hidrogênio (deve-se adicionar a esse valor a pressão parcial do H_2S , pois a reação direta do H_2S com o aço gera sulfeto de ferro e H_2 : ($ppH_2 + ppH_2S$);
- Temperatura, que tem efeito direto na taxa de difusão do Hidrogênio atômico e na dissociação térmica do Hidrogênio molecular em Hidrogênio atômico, que é adsorvido na superfície metálica.

O ataque pelo Hidrogênio ocorre nos seguintes estágios:

- Período de incubação, em que alterações nas propriedades mecânicas são extremamente lentas e indetectáveis;
- Estágio de rápida deterioração das propriedades mecânicas associada a um acelerado crescimento das fissuras;
- Estágio final, em que o carbono em solução sólida é exaurido e as propriedades mecânicas em degradação atingem seus valores finais.

Durante o período de incubação, a pressão do metano eleva-se em vazios submicroscópicos. Esses vazios crescem lentamente até um tamanho crítico, quando começam a coalescer e formar microfissuras. Nesse ponto, os efeitos deletérios nas propriedades mecânicas começam a ser evidenciados.

6.2.1. O Hidrogênio reage com os Carbonetos no aço, causando os seguintes danos em alta temperatura:

- Descarbonetação superficial ou
- Descarbonetação interna e fissuras, que podem levar às trincas.

Esse mecanismo é chamado de Ataque pelo Hidrogênio em Alta Temperatura.

A combinação de alta temperatura e baixa pressão parcial Hidrogênio favorece a descarbonetação da superfície do metal sem fissuração.

Já a combinação de temperaturas menores, mas acima de $220^{\circ}C$, e alta pressão parcial de Hidrogênio favorece a descarbonetação interna o que pode levar a fissuras.

Ambos os mecanismos são ativos em altas temperaturas e altas pressões parciais de Hidrogênio.

6.2.2. Em longos períodos de exposição a uma atmosfera rica em Hidrogênio e alta temperatura, pode ocorrer no interior dos aços a formação de gás metano (CH_4) na interface dos grãos e discordâncias, o que provoca um forte aumento da pressão no interior do aço.

Para que isso aconteça, o gás Hidrogênio- H_2 , presente no fluido de processo, se decompõe e o Hidrogênio atômico H^0 se difunde na microestrutura do aço, podendo atingir as cavidades, contorno de grãos e as interfaces entre a matriz e os carbonetos de Ferro, gerando gás metano. À medida que a concentração de gás metano aumenta, a pressão crescente começa a rasgar os contornos dos grãos, causando fissuras e, em seguida, trincas.

6.2.3. Além disso, o Hidrogênio atômico penetra em vazios do material recuperando a forma molecular (H_2) e com o aumento do volume pressuriza o vazio, criando as "laranjas", que são os empolamentos que surgem na superfície do aço.

6.2.4. Simultaneamente, a perda de Carbono diminui a resistência mecânica do aço.

6.2.5. Em serviços contendo Hidrogênio, em temperatura elevada, os materiais são selecionados com base em sua resistência ao ataque pelo Hidrogênio em alta temperatura, que é mais intenso acima de 220°C.

Uma vez que todo esse processo se origina com a decomposição de Carbonetos, é possível prevenir a fragilização em alta temperatura através do aumento da estabilidade do Carboneto de forma a minimizar ou mesmo cessar a reação com o Hidrogênio. É o caso do Mo_2C , presente nos aços Cr-Mo e Cr-Mo-V, possuidor de uma maior estabilidade do que o carboneto Fe_3C dos aços Carbono. As curvas de Nelson refletem esse fato, permitindo selecionar aços em função da pressão parcial de Hidrogênio e a temperatura.

Assim, a recomendação de material é baseada nas curvas de Nelson e o API RP 941 "Steels for Hydrogen Service at Elevated Temperatures and Pressures in Petroleum Refineries and Petrochemical Plants", para resistência ao ataque pelo Hidrogênio.

Sob as condições, de temperatura e pressão, ilustradas nas Curvas de Nelson, os aços de liga contendo Cromo e Molibdênio são normalmente utilizados.

Nota:

Em temperaturas acima de 204°C são aplicáveis as orientações da Norma API RP 941 Steels for Hydrogen Service at Elevated Temperatures and Pressures in Petroleum Refineries and Petrochemical Plants e da norma Petrobras N-1704 Requisitos Adicionais para Vaso de Pressão em Serviço com Hidrogênio.

6.3. Requisitos aplicáveis ao Serviço com Hidrogênio em Altas Temperaturas ($\geq 204^\circ C$)

A norma API RP 941 - *Steels for Hydrogen Service at Elevated Temperatures and Pressures in Petroleum Refineries and Petrochemical Plants* - e a norma Petrobras N-1704 - Requisitos Adicionais para Vaso de Pressão em Serviço com Hidrogênio - estabelecem regras para a seleção de materiais e requisitos de projeto, inspeção e fabricação, de Equipamentos e Vasos de Pressão, para operação em Serviço com Hidrogênio à Alta Temperatura, o que significa pressão parcial do Hidrogênio acima de 7 bar absoluto e temperatura igual ou acima de 204°C.

6.3.1. Equipamentos e Vasos de pressão

a. Seleção de materiais construtivos

A forma de prevenir o ataque pelo Hidrogênio em alta temperatura é através da seleção adequada do material e para tal, utiliza-se como referência as curvas de Nelson..

A Figura *Operating Limits for Steels in Hydrogen Service to avoid Decarburization and Fissuring*, em anexo, extraída e copiada da Norma API RP 941, é conhecida como Curvas de Nelson, e freqüentemente utilizada na seleção de materiais construtivos, para novos equipamentos em Serviço de Hidrogênio em Alta Temperatura.

O material é selecionado com base na temperatura máxima de operação e na pressão parcial máxima de Hidrogênio, com a margem de folga apropriada adicionada a cada uma dessas variáveis, para considerar vários possíveis modos de operação da planta industrial.

Nessa Figura são apresentadas curvas que indicam os limites operacionais de temperatura e pressão parcial de Hidrogênio, para desempenho satisfatório dos aços Carbono e Cr-Mo (Cromo-Molibdênio) em Serviço de Hidrogênio em Alta Temperatura.

Para se aumentar a resistência do material ao ataque pelo Hidrogênio em alta temperatura, utilizam-se aços ligados com Cr-Mo, que estabilizam os carbetos. O teor de Cr e Mo é função da pressão parcial de Hidrogênio ($ppH_2 + ppH_2S$) e da temperatura máxima de operação.

Ao usar essa Figura como subsídio para a seleção de materiais, é importante saber que ela aborda apenas a resistência de um material ao ataque de Hidrogênio a altas temperaturas, e não considera outros fatores importantes de danos em altas temperaturas, tais como:

- Outros produtos corrosivos que podem estar no sistema, como o Enxofre e Sulfeto de Hidrogênio H₂S;
- Fluência (creep), fragilização pelo revenido ou outros mecanismos de danos em altas temperaturas.
- Possíveis efeitos sinérgicos como ataque de Hidrogênio em altas temperaturas combinado com fluência ou outro mecanismo de danos em alta temperatura.

As curvas de linha tracejada da Figura representam a tendência para a descarbonetação da superfície dos aços, enquanto em contato com o Hidrogênio. Já as curvas de linha sólida representam a tendência para os aços descarbonizarem internamente com fissuras e trincas, criadas pela formação e acúmulo de gás Metano e do próprio Hidrogênio.

As temperaturas dos dados plotados na Figura representam uma faixa em condições de operação de $\pm 10^{\circ}\text{C}$, porque ela é baseada na experiência empírica, assim é conveniente adicionar uma margem de segurança, abaixo de cada curva relevante, ao selecionar os aços a utilizar.

Material base	Tipo Serviço H₂ enquadrado no critério do API RP 941 Nelson Curves
Aço Carbono acalmado	Hidrocarbonetos contendo Hidrogênio, com pressão parcial ≥ 7 bar absoluto e temperatura menor que 204°C.
Aço 1 ¼ Cr ½ Mo	Hidrocarbonetos contendo Hidrogênio, com pressão parcial ≥ 7 bar absoluto e temperaturas entre 425°C e 500°C.
Aço 2 ¼ Cr 1 Mo	Hidrocarbonetos contendo Hidrogênio, com pressão parcial ≥ 7 bar absoluto e temperaturas entre 500°C e 595°C.
Aço Inoxidável Austenítico Série 300 Grau H	Hidrocarbonetos contendo Hidrogênio, com pressão parcial ≥ 7 bar absoluto e temperaturas acima de 595°C.

b. Requisitos de projeto e fabricação

• Chapas

As chapas devem ser especificadas conforme código ASME BPVC Section II.

A inspeção das chapas não revestidas, após conformação, deve ser executada com UT-Exame Ultrassom de acordo com os requisitos do ASME Sec II SA-435 Suplemento S1 *Specification for Straight-Beam Ultrasonic Examination of Steel Plates*, para as chapas de qualquer espessura.

Caso sejam utilizadas chapas cladeadas ou revestidas por solda *welded overlay*, a fabricação deve ser conforme especificações do Proprietário, sendo que a chapa base e chapa *clad* devem seguir os requisitos da especificação código ASME Sec II SA-264 *Specification for Corrosion-Resisting Chromium-Nickel Steel Clad Plate, Sheet and Strip*,

A inspeção das chapas cladeadas, após conformação, deve ser executada com UT-Exame Ultrassom de acordo com os requisitos da norma ASME Sec II SA-578 Level C Suplementos S1, S3, S4, S5, *Straight-Beam Ultrasonic Examination of Rolled Steel Plates for Special Applications*, para verificar se existem descontinuidades ou vazios no revestimento, para as chapas de qualquer espessura.

Nos casos em que sejam utilizadas chapas cladeadas se deve utilizar aços inoxidáveis austeníticos estabilizados ou com baixo teor de Carbono, aprovados no teste de sensibilização ASTM A262 Prática E, inclusive na qualificação do procedimento de soldagem.

• Forjados, tubos e acessórios de tubulação

Tubos com costura fabricados a partir de chapa e qualquer acessório fabricado a partir de chapa devem atender aos requisitos próprios para as chapas.

Tubos sem costura, forjados e acessórios de tubulação padronizados devem estar de acordo com as especificações no ASME BPVC Section II.

- **Parafusos, estojos e porcas**

Quando em contato com o fluido contendo H₂, os parafusos, estojos e porcas devem ter dureza inferior a 237 HBW.

- **Vasos de pressão e Permutadores de calor**

Os tubos de troca térmica devem ser sem costura.

A ligação tubo x espelho, nos trocadores de calor, deve ser por solda de resistência total.

Todas as soldas de partes pressurizadas e soldas de acessórios internos ao casco devem ser de penetração total. Quando o uso de solda de penetração total não for tecnicamente viável, o detalhe construtivo deve ser submetido à aprovação prévia do Proprietário.

Não é permitido o uso de detalhes construtivos que resultem em frestas em contato com o fluido.

Para acessórios externos soldados ao casco, todo espaço confinado por soldas deve ser ventilado por um furo externo de $\varnothing 3\text{mm}$.

- **Bocais e bocas de visita**

Não é permitido, em nenhum caso, o emprego de flange sobreposto.

Todos os flanges devem ser forjados de pescoço ou de pescoço longo ("long welding neck").

Para os flanges com diâmetro de NPS14, ou maiores, admitem-se os flanges tipo anel ("ring type"), desde que a solda de ligação do flange no pescoço seja de penetração total, como o tipo mostrado na Figura 2-4 (7) do ASME BPVC Section VIII Division 1, APP 2.

Bocais pequenos ($D \leq \text{NPS}2$) devem ser de pescoço longo.

Para pescoços de bocais fabricados a partir de chapas calandradas, aplicam-se os mesmos requisitos para chapas das partes pressurizadas.

Conexões rosqueadas são proibidas.

- **Reforço de bocais e bocas de visita**

Não é permitido chapa de reforço, utilizar reforço integral forjado.

- **Soldagem**

As soldas devem atender ao código ASME Section IX.

A qualificação do procedimento de soldagem deve ser realizada de acordo com o Código de Projeto do vaso de pressão: os códigos ASME Section VIII e Section IX,

- **Inspecção e ENDS-Ensaio Não-Destrutivos**

Os procedimentos e os inspetores de END devem ser qualificados, de preferência, conforme requisitos das Normas Petrobras N-1593, N-1594, N-1595, N-1596, N-1597 e N-1598.

Todos os forjados com diâmetro interno nominal $\geq \text{NPS}12$ devem ser 100 % UT conforme ASME BPVC Section II SA-388 *Ultrasonic Examination of Heavy Steel Forgings*.

- **Tratamento Térmico de Alívio de Tensões após fabricação-TTAT**

Todos os vasos de pressão e permutadores de calor devem receber TTAT conforme código ASME Sec VIII.

Nenhuma solda pode ser realizada após o TTAT, mesmo quando permitido pelo código de Projeto.

- **Radiografia-RT**

Todas as soldas submetidas à pressão, em contato com o fluido contendo H₂, devem ter 100%RT, de acordo com os requisitos do ASME Section V.

Os critérios de aceitação devem ser conforme especificado em UW-51 do ASME Section VIII Division 1 ou Parte 7 do ASME Section VIII Division 2.

As soldas submetidas à pressão que não possam ser satisfatoriamente radiografadas devem ser submetidas a exame por UT.

- **Ultrassom-UT**

Para soldas de topo submetidas à pressão, a utilização de UT em substituição à radiografia é permitida, desde que em acordo com o ASME Section VIII Division 2 parágrafo 7.5.5 ou ASME

Section VIII Division 1 UW-51 (a)(4), em conjunto com ASME Code Case 2235. Neste caso, o fabricante deve submeter o procedimento para aprovação prévia do Proprietário.

As soldas que não possam ser satisfatoriamente radiografadas ou examinadas por UT, devem ser identificadas no plano de inspeção, que deve ser submetido à aprovação prévia do Proprietário.

O procedimento de inspeção de soldas deve conter os seguintes ensaios, internamente e externamente:

- a) MT no caso de aço Carbono e aço liga Cr-Mo;
- b) PT no caso de aço inoxidável austenítico, ou aço cladeado com aço inoxidável austenítico.

- **Partículas Magnéticas-MT e Líquido Penetrante-PT**

Os vasos de pressão devem ser submetidos ao exame de partícula magnética ou líquido penetrante em todas as suas soldas após o TTAT.

Quando não for possível a realização do ensaio por PM, deve ser executado ensaio por PT.

Esta substituição somente é possível após análise e aprovação pelo Proprietário.

Para os vasos de pressão cladeados, deve ser realizado ensaio de líquido penetrante na região de restauração do *clad*, de preferência, de acordo com a norma Petrobras N-1596.

- **Dureza**

O ensaio de dureza deve ser realizado de preferência, de acordo com a norma Petrobras N-268. A medição de dureza deve ser realizada, sempre que possível, na superfície em contato com o fluido de processo. Se o acesso for impraticável, como em vasos ou tubulações de pequeno diâmetro, a medição pode ser realizada pelo lado oposto, desde que o procedimento de soldagem tenha sido qualificado para esta situação.

Após o TTAT, realizar medições de dureza nas soldas acabadas do vaso de pressão, sendo:

- a) uma medição de dureza deve ser realizada para cada 3 metros de solda;
- b) no mínimo duas medições devem ser realizadas por cordão de solda longitudinal e por cordão de solda circunferencial. A medição de dureza na solda circunferencial deve ser feita em todos os cruzamentos com soldas longitudinais;
- c) no mínimo, uma medição de dureza deve ser realizada por bocal na solda flange-pescoço e uma na solda pescoço-casco/tampo;
- d) no mínimo, uma medição deve ser realizada para cada EPS utilizado;
- e) uma medição em cada região de remoção das soldas provisórias.

Cada medição deve conter um ponto no metal base e no metal de solda, 2 pontos em cada ZTA..

Os valores de dureza, na qualificação do procedimento de soldagem, não devem exceder os seguintes valores, medidos conforme ASTM A1038 ou E384 para durômetro de bancada, no MB - Metal Base, na ZF- Zona Fundida e na ZTA - Zona Termicamente Afetada:



- Para aço-carbono 248 HV5 ou HV10;
- Para aço liga Cromo-Molibdênio com Cr < 2 %: 235 HV5 ou HV10;
- Para aço liga Cromo-Molibdênio com Cr > 2 %: 235 HV5 ou HV10;
- Para aço liga Cromo-Molibdênio-Vanádio: 248 HV5 ou HV10.

- **Montagem de ligações aparafusadas**

Aperto de montagem de ligações flangeadas com procedimento de torque controlado descrito no código ASME PCC-1 Guidelines for Pressure Boundary Bolted Flange Joint Assembly.

6.3.2. Sistemas de tubulações

a. Seleção de materiais construtivos

Serviço	Temp. Mínima	Temp. Máxima	Material do Tubo
Hidrocarbonetos corrosivos em alta temperatura, mistura com hidrogênio.	0 °C	540 °C	AL 5 % Cr 1/2 % Mo
Hidrocarbonetos corrosivos em serviço com hidrogênio H ₂ .	-40 °C	425 °C	AI TP 304L
Hidrocarbonetos em serviço com hidrogênio.	0 °C	425 °C	AI TP 304L

b. Requisitos de projeto e fabricação

Executar o TTAT-Tratamento Térmico de Alívio de Tensões após a fabricação e soldagem. Inspeção de fabricação conforme a Classe IV da norma Petrobras N-115 Tabela A2, reproduzida a seguir.

Extrato da Tabela A2 da N-115 - Tipo e Extensão do Exame por Tipo de Solda – Classe IV

Classe	"P-Number"	Tipos de exame exigidos	Extensão exigida para cada tipo			
			Circunferenciais	Bocas-de-lobo e outras derivações	De suporte	Em angulo
IV	1	EV	100 %	100 %	100 %	100 %
		RX	100 %	-	-	-
		US	-	100 %	-	-
		PM	100 %	100 %	100 %	100 %
		Dureza	100 %	100 %	100 %	100 %
	3, 4, 5, 6, 7, 15E	EV	100 %	100 %	100 %	100 %
		RX	100 %	-	-	-
		US	-	100 %	-	-
		PM	100 %	100 %	100 %	100 %
		Dureza	100 %	100 %	100 %	100 %
	8, 9A, 9B, 10H, 11A-SG1, 11A-SG2, 41-45	EV	100 %	100 %	100 %	100 %
		RX	100 %	-	-	-
		US	-	100 %	-	-
		LP	100 %	100 %	100 %	100 %

Quando aprovado pelo Proprietário o PM – Exame por Partículas Magnéticas pode ser substituído pelo UP – Exame por Líquido Penetrante

Legenda:

EV – Exame Visual

RX – Exame Radiográfico

US – Exame por Ultrassom

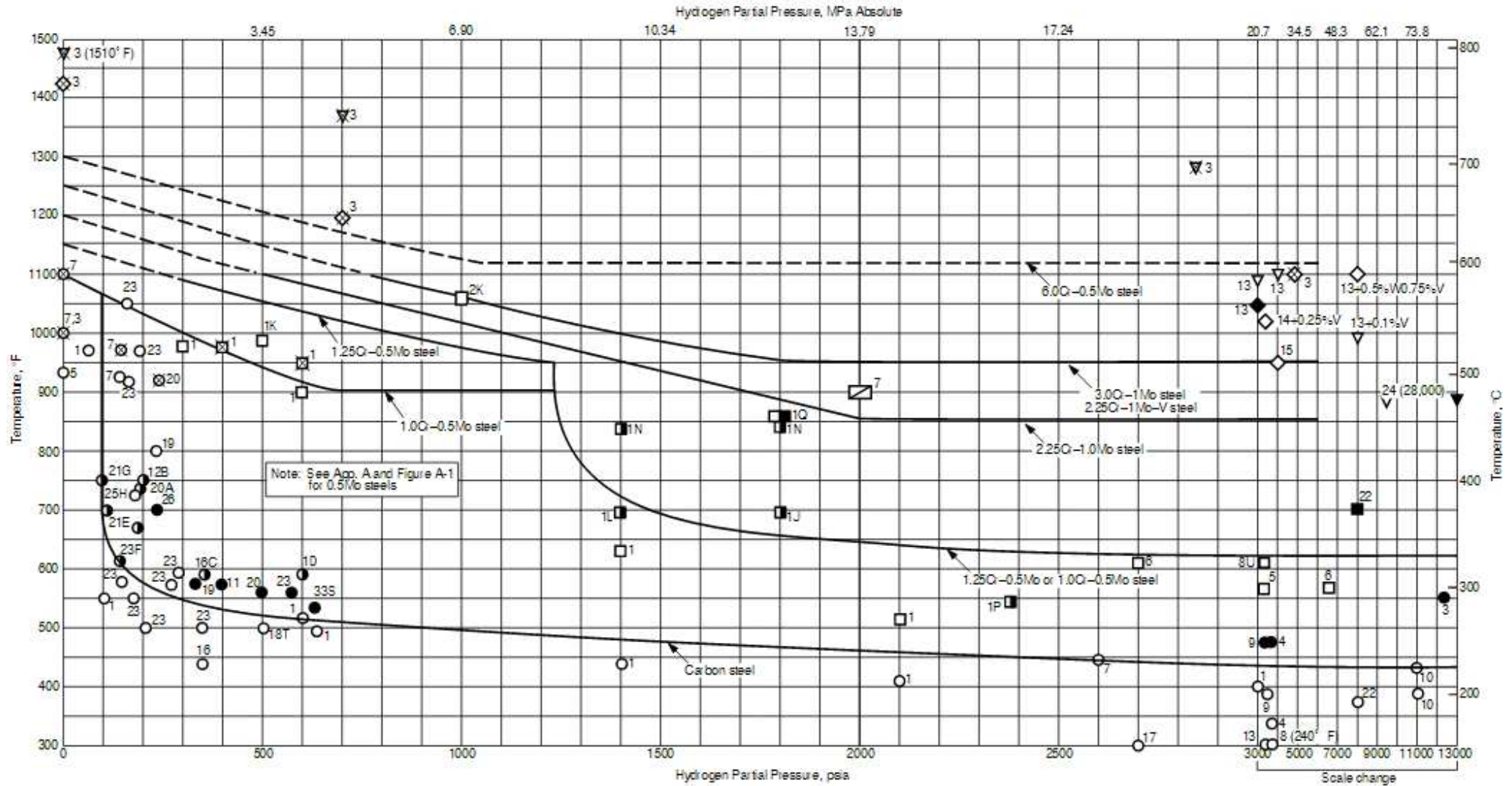
PM – Exame por Partículas Magnéticas

Para tubulações de aço carbono e aço Cr-Mo em serviço com H_2 deve ser efetuado o TTAT nas regiões de solda e áreas trabalhadas mecanicamente a frio, independentemente da espessura. Os parâmetros do Tratamento Térmico devem ser conforme ASME B31.3.

Aperto de montagem de ligações flangeadas com procedimento de torque controlado, conforme ASME PCC-1 Guidelines for Pressure Boundary Bolted Flange Joint Assembly.

Assim, além da estanqueidade total exigida nas ligações flangeadas, todas as soldas não podem conter defeitos nem tensões residuais decorrentes da fabricação e montagem.

API RP 941 – Figura - Operating Limits for Steels in Hydrogen Service to avoid Decarburization and Fissuring



Observação: Em função de experiências práticas com a utilização de aço C-0,5Mo, que apresentou diversos problemas em condição de uso, recomenda-se a não utilização desse aço.

ANEXOS

Anexo 1

Classes de Pressão para aço Carbono

Fonte: ASME B16.5 Pipe Flanges and Flanged Fittings NPS 1/2 Through NPS 24

Table 2-1.1 Pressure-Temperature Ratings for Group 1.1 Materials

Nominal Designation	Forgings	Castings	Plates
C-Si	A105 (1)	A216 Gr. WCB (1)	A515 Gr. 70 (1)
C-Mn-Si	A350 Gr. LF2 (1)	...	A516 Gr. 70 (1), (2)
C-Mn-Si-V	A350 Gr. LF6 Cl 1 (3)	...	A537 Cl. 1 (4)
3½Ni	A350 Gr. LF3

Working Pressure by Classes, bar							
Temp., °C	Class						
	150	300	400	600	900	1500	2500
-29 to 38	19.6	51.1	68.1	102.1	153.2	255.3	425.5
50	19.2	50.1	66.8	100.2	150.4	250.6	417.7
100	17.7	46.6	62.1	93.2	139.8	233.0	388.3
150	15.8	45.1	60.1	90.2	135.2	225.4	375.6
200	13.8	43.8	58.4	87.6	131.4	219.0	365.0
250	12.1	41.9	55.9	83.9	125.8	209.7	349.5
300	10.2	39.8	53.1	79.6	119.5	199.1	331.8
325	9.3	38.7	51.6	77.4	116.1	193.6	322.6
350	8.4	37.6	50.1	75.1	112.7	187.8	313.0
375	7.4	36.4	48.5	72.7	109.1	181.8	303.1
400	6.5	34.7	46.3	69.4	104.2	173.6	289.3
425	5.5	28.8	38.4	57.5	86.3	143.8	239.7
450	4.6	23.0	30.7	46.0	69.0	115.0	191.7
475	3.7	17.4	23.2	34.9	52.3	87.2	145.3
500	2.8	11.8	15.7	23.5	35.3	58.8	97.9
538	1.4	5.9	7.9	11.8	17.7	29.5	49.2

NOTES:

- (1) Upon prolonged exposure to temperatures above 425°C, the carbide phase of steel may be converted to graphite. Permissible but not recommended for prolonged use above 425°C.
- (2) Not to be used over 455°C.
- (3) Not to be used over 260°C.
- (4) Not to be used over 370°C.

Anexo 2

Para as condições de operação, temperatura até 204°C e pressão máxima inferior as correspondentes à classe de pressão 400 da norma ASME B16.5, são recomendados os seguintes requisitos.

Requisitos aplicáveis ao Serviço com Hidrogênio de Baixa Temperatura (<204°C) e pressão parcial máxima de operação igual ou menor que as correspondentes à classe de pressão 400 da Norma ASME B16.5	
Equipamentos e Vasos de pressão	Tubulações
<ul style="list-style-type: none"> • Materiais de construção Utilizar material de aço Carbono acalmado P-Number 1, As chapas devem ser de aço Carbono conforme especificação do código ASME BPVC Section II - Part A - SA-516/SA-516M, fornecidas na condição totalmente acalmadas e normalizadas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Materiais de construção Utilizar material de aço Carbono acalmado P-Number 1 ASTM A106 Gr. B; API 5L Gr. B; ASTM A672 Gr. C60 Cl22 ASTM A234 Gr. WPB • Inspeção de fabricação

<p>Inspeção das chapas, após conformação, com Exame Ultrassom de acordo com os requisitos da norma ASME Sec II SA-435 <i>Specification for Straight-Beam Ultrasonic Examination of Steel Plates</i>, para as chapas $\geq 2"$ de espessura.</p> <ul style="list-style-type: none"> Inspeção de fabricação RT parcial para soldas de espessuras ≤ 32 mm e RT total para espessuras maiores. TTAT para espessuras superiores a 38 mm. Aperto de montagem de ligações flangeadas com procedimento de torque controlado, conforme ASME PCC-1 <i>Guidelines for Pressure Boundary Bolted Flange Joint Assembly</i>. 	<p>Conforme a Classe II da norma Petrobras N-115 Tabela A2, reproduzida a seguir, complementando com as seguintes ações.</p> <ul style="list-style-type: none"> Medição de dureza das soldas circunferenciais de campo, por amostragem com o critério a seguir: <ul style="list-style-type: none"> Mínimo de 25% das soldas, de "pipe-shop" e de campo, deve ter medição de dureza, realizada por EPS utilizado e para cada soldador. Cada medição deve conter 1 ponto no metal de solda, 2 pontos em cada ZTA e 1 ponto no metal base. Máxima dureza medida 200 HBW, medido conforme norma ASTM E10 Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials. Se alguma solda apresentar dureza superior a 200 HBW, todas as soldas executadas com o EPS-Especificação de Procedimento de Soldagem e o soldador identificados devem ser submetidos ao TTAT-Tratamento Térmico de Alívio de Tensões da fabricação. As soldas de espessura do tubo e maior que 20 mm devem ter TTAT, devido à exigência da norma ASME B 31.3. Aperto de montagem de ligações flangeadas com procedimento de torque controlado, conforme ASME PCC-1 <i>Guidelines for Pressure Boundary Bolted Flange Joint Assembly</i>.
---	--

Extrato da Tabela A2 da N-115 - Tipo e Extensão do Exame por Tipo de Solda – Classe II

Classe	"P- Number"	Tipos de exame exigidos	Extensão exigida para cada tipo			
			Circunferenciais	Bocas-de-lobo e outras derivações	De suporte	Em angulo
II	1	EV	100 %	100 %	100 %	100 %
		RX	10 %	-	-	-
		US	-	10 %	-	-
		PM	-	10 %	-	10 %

Quando aprovado pelo Proprietário o PM – Exame por Partículas Magnéticas pode ser substituído pelo UP – Exame por Líquido Penetrante

Legenda:

EV – Exame Visual

RX – Exame Radiográfico

US – Exame por Ultrassom

PM – Exame por Partículas Magnéticas

Anexo 3

Requisitos para inspeção e plano de testes de equipamentos críticos

1. Inspeção e Recebimento dos Materiais

- PMI matéria prima: chapa "clad" e chapa metal base.
- Verificação espessuras: chapa "clad" e metal base.

- Visual (100%).
- Dimensional. (100%)
- Verificação certificados de qualidade dos materiais.
- Para todas as partes pressurizadas e materiais fixados a elas deve ser apresentado o certificado de usina.
- Inspeção visual, dimensional e por líquido penetrante (regiões conformadas) após a conformação.
- Verificar espessura mínima dos tampos, na região conformada.
- Procedimento de soldagem, qualificação de soldadores e operadores de solda de acordo com a Seção IX do Código ASME.
- ENDS de acordo com ASME Section V e critérios da aceitação do Código ASME Section VIII.
- Para Inspeção visual e dimensional deve ser preparado relatório com os registros.
- 100% MT na superfície externa conformada e no furo central do tampo rebordeado.

2. Inspeção de Fabricação e Montagem

Em locais de reparos executar o mesmo END--Exame Não Destrutivo original.

2.1. Exame de soldas por líquido penetrante: PT

A ser verificado:

- Carepa
- Porosidade
- Bordas afiadas
- Esmagamento local
- Fissuração
- Descontinuidades transversais à superfície
- Descontinuidades paralelas à superfície, acima de 50 mm em comprimento de cada lado
- Equipamento com TTAT
 - Teste por líquido penetrante na solda de acabamento nas partes pressurizadas e materiais afixados a elas, antes e após o tratamento térmico pós-soldagem e após o teste hidrostático.
- Equipamento sem TTAT
 - Teste por líquido penetrante na solda de acabamento nas partes pressurizadas e materiais afixados a elas, antes do teste hidrostático.
 - PT na região dos chanfros, inclusive trechos removidos do "clad".

2.2. Exame de soldas por radiografia: RT

RT Total ou full: extensão 100%

RT Parcial ou spot: extensão 85%

A extensão deve ser definida no projeto.

• Inspeção de soldas com requisito de 100% RT

- Soldas de topo longitudinais e demais soldas de topo, executadas em oficina.
 - 100% PT passe de raiz, de ambos os lados,
 - 100% RT soldas acabadas.
- Soldas de topo circunferenciais e demais soldas de topo, executadas na área:
 - 100% PT passe raiz, de ambos os lados,
 - 100% UT soldas acabadas,
 - 100% RT nos cruzamentos de solda, examinando 300 mm de cada solda.
 Estes exames devem ser realizados antes do depósito do revestimento "weld overlay", se houver.

- 100% MT soldas de topo acabadas externamente e PT internamente após revestimento "weld overlay", se houver.
- 100% PT soldas de ângulo e de "Tê" de acessórios internos e externos.
- 100% MT locais de remoção dos dispositivos de auxiliares de montagem e dos termopares de execução do TTAT.

- **Inspeção de soldas com requisito de 85% RT**

- Soldas de topo longitudinais e demais soldas de topo, executadas em oficina.
 - 100% PT passe de raiz, de ambos os lados,
 - 85% RT soldas acabadas.
- Soldas de topo circunferenciais e demais soldas de topo, executadas na área:
 - 100% PT passe raiz, de ambos os lados,
 - 100% UT soldas acabadas,
 - 100% RT nos cruzamentos de solda, examinando 300 mm de cada solda.
 Estes exames devem ser realizados antes do depósito do revestimento "weld overlay", se houver.
- 100% MT soldas de topo acabadas externamente e PT internamente após revestimento "weld overlay", se houver.
- 100% PT soldas de ângulo e de "Tê" de acessórios internos e externos.
- 100% MT locais de remoção dos dispositivos de auxiliares de montagem e dos termopares de execução do TTAT.

2.3. Inspeção de bocais e bocas de visita

- Ligação soldada: pescoço do bocal x flange de pescoço.

Bocal > 2"

- 100% MT ou PT nos passes de raiz e adjacências;
- 100% RT cordão de solda acabado;
- 100% MT ou PT cordão de solda acabado, externa e internamente, após o revestimento "weld overlay", se houver.

Bocal ≤ 2"

- 100% MT ou PT nos passes de raiz e adjacências;
- 100% RT cordão de solda acabado;
- 100% MT ou PT cordão de solda acabado, externa e internamente, após o revestimento "weld overlay", se houver.

Nota: Se o bocal é do tipo LWN não há essa ligação soldada.

- Ligação soldada: pescoço bocal x corpo.

Bocal ≥ 4"

- 100% UT do corpo na região de instalação do bocal;
- 100% MT ou PT nos passes de raiz e adjacências;
- 100% UT cordão de solda após esmerilhamento para o adoçamento da junta soldada;
- 100% MT ou PT cordão de solda acabado, externa e internamente, após o revestimento "weld overlay", se houver,

Bocal < 4"

- 100% MT ou PT nos passes de raiz e adjacências;
- 100% MT ou PT cordão de solda acabado, externa e internamente, após o revestimento "weld overlay", se houver.

- Teste estanqueidade para as soldas de chapa de reforço dos bocais, se houver.

2.4. Qualificação do procedimento de soldagem

Na qualificação do procedimento de soldagem, os valores de dureza não devem exceder a:

- Metal de solda ou cordão: média de 210HV5 e máximo de 248HV5 para valor individual (se medido conforme ASTM A1038 ou E384 para durômetro de bancada);
- ZTA: média 210HV5 e máximo de 248HV5 para valor individual (se medido conforme ASTM A1038 ou E384 para durômetro de bancada);
 - ASTM A1038 Standard Test Method for Portable Hardness Testing by the Ultrasonic Contact Impedance Method
 - ASTM E384 Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials

2.5. Inspeção após TTAT-Tratamento Térmico de Alívio de Tensões residuais da fabricação e soldagem

- 100% visual
- 100% MT externamente nas:
 - a) Juntas de topo;
 - b) Solda de conexão dos bocais com o corpo;
 - c) Solda de fixação de suportes de acessórios;
 - d) Locais de soldas de fixação de termopares e de suportes de isolamento após remoção;
 - e) Soldas de reparos.

2.6. Medição de dureza

- Após o tratamento térmico, devem ser conduzidos os testes de medidas de dureza no metal de solda e na ZTA.
- Definição dos pontos
 - A cada 5 metros; em cruzamentos de soldas; em regiões onde ocorrer defasagem superior a 30°C no TTAT; e em locais com TTAT localizado devido a reparos.
 - Pelo menos duas leituras de dureza devem ser realizadas para cada junta circunferencial e longitudinal.
- Medições em cada ponto:
 - (1) Metal adição
 - (1) ZTAs-Zonas Termicamente Afetadas (ambas)
 - (1) Metal de base
- As leituras de dureza não devem exceder os seguintes valores:
 - a) aço Carbono: 200 HBW.

Notas:

- a) *As soldas de pressão devem ser esmerilhadas para retirar o reforço (1,5 mm máximo).*
- b) *As tolerâncias de solda devem ser conforme Norma Petrobras N-268.*
- c) *As soldas de produção devem ser submetidas aos mesmos testes do procedimento de qualificação da soldagem.*

2.7. Inspeção após Teste Hidrostático

Teste hidrostático: pressão indicada nos desenho de fabricação.

- 100% Visual.
- Dimensional.
- Atender às condições de enchimento e esvaziamento previstas pela Norma Petrobras N-268 ou N-269.

2.8. Inspeção das soldas de suporte do vaso: pernas, berços e saia

- Soldas de topo e as dissimilares devem ter 100% RT, antes do TTAT;
- Soldas do suporte ao corpo devem ter:
 - Antes do TTAT;
 - a) 100% PT no passe de raiz;
 - b) 100% MT após passe final;
 - c) 100% UT soldas acabadas.

- Após Teste Hidrostático:
 - a) 100% PT soldas acabadas.

2.9. Critérios de Aceitação ENDs - Ensaios Não Destrutivos

- PT (dye penetrant test): ASME Sec VIII Div 1 Apêndice 8.
- MT (magnetic particle test): ASME Sec VIII Div 1 Apêndice 6.
- RT (radiographic test): ASME Seção VIII Div 1:
 - (full) 100% UW-51
 - (spot) 85% UW-52
- UT (Ultra-Sonic Test): ASME Seção VIII Divisão 1 Apêndice 12.

Anexo 4

ASME P-Numbers

<http://www.weldingengineer.com/ASME%20P-Numbers.htm>

Para reduzir o número de qualificações do procedimento de soldagem, foram atribuídos pelo código ASME *P-Numbers* aos metais básicos.

Essas atribuições foram baseadas em características comparáveis, como: composição, soldabilidade e propriedades mecânicas.

A tabela abaixo é um guia para fins instrutivos.

P-Numbers	Base Metal (Typical or Example)
1	Carbon Manganese Steels (four Group Numbers)
2	Not Used
3	Half Molybdenum or half Chromium, half Molybdenum (three Group Numbers)
4	One and a quarter Chromium, half Molybdenum (two Group Numbers)
5A	Two and a quarter Chromium, one Molybdenum
5B	Five Chromium, half Molybdenum or nine Chromium, one Molybdenum (two Group Numbers)
5C	Chromium, Molybdenum, Vanadium (five Group Numbers)
6	Martensitic Stainless Steels (Grade 410, 415, 429) (six Group Numbers)
7	Ferritic Stainless Steels (Grade 409, 430)
8	Austenitic Stainless Steels <ul style="list-style-type: none"> • Group 1 - Grades 304, 316, 317, 347 • Group 2 - Grades 309, 310 • Group 3 - High Manganese Grades • Group 4 - High Molybdenum Grades
9A, B, C	Two to four Nickel Steels
10A, B, C, F	Various low alloy steels
10H	Duplex and Super Duplex Stainless Steel (Grades 31803, 32750)
10I	High Chromium Stainless Steel
10J	High Chromium, Molybdenum Stainless Steel
10K	High Chromium, Molybdenum, Nickel Stainless Steel
11A	Various high strength low alloy steels (six Group Numbers)
11B	Various high strength low alloy steels (ten Group Numbers)
12 to 20	Not Used
21	High Aluminum content (1000 and 3000 series)
22	Aluminum (5000 series - 5052, 5454)

23	Aluminum (6000 series – 6061, 6063)
24	Not Used
25	Aluminum (5000 series - 5083, 5086, 5456)
26 to 30	Not used
31	High Copper content
32	Brass
33	Copper Silicone
34	Copper Nickel
35	Copper Aluminum
36 to 40	Not Used
41	High Nickel content
42	Nickel, Copper - (Monel 500)
43	Nickel, Chromium, Iron - (Inconel)
44	Nickel, Molybdenum – (Hastelloy B2, C22, C276, X)
45	Nickel, Chromium
46	Nickel, Chromium, Silicone
47	Nickel, Chromium, Tungsten
47 to 50	Not Used
51, 52, 53	Titanium Alloys
61, 62	Zirconium Alloys

Para mais detalhes conferir na Tabela QW-422 *P Number* Agrupamento dos Metais de Base para Qualificação no site ASME Seção IX em Português
<http://plenitudeeng.com.br/site/wp-content/uploads/2017/08/ASME-IX.pdf>