

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL**

AIRTON VINÍCIUS DE CARVALHO CAVALCANTE DA SILVA

**ESTUDO DE AVALIAÇÃO DE PRESSÃO DE FALHA EM DUTOS
DE TRANSPORTE DE HIDROGÊNIO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

RECIFE

2021

AIRTON VINÍCIUS DE CARVALHO CAVALCANTE DA SILVA

**ESTUDO DE AVALIAÇÃO DE PRESSÃO DE FALHA EM DUTOS
DE TRANSPORTE DE HIDROGÊNIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, em Engenharia Naval, do departamento de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Pernambuco.

Orientador: Prof. MSc Adriano Dayvson Marques Ferreira

RECIFE

2021

Espaço destinado a elaboração da ficha catalográfica sob responsabilidade exclusiva do Departamento de Biblioteca da UFPE



Ministério da Educação
Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Tecnologia e Geociência
Departamento de Engenharia Mecânica
Curso de Engenharia Naval



TERMO DE APROVAÇÃO

ESTUDO DE AVALIAÇÃO DE PRESSÃO DE FALHA EM DUTOS DE TRANSPORTE DE HIDROGÊNIO

por

AIRTON VINÍCIUS DE CARVALHO CAVALCANTE DA SILVA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado(a) em 01 de outubro de 2021 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Naval. O(a) candidato(a) foi arguido(a) pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Adriano Dayvson Marques Ferreira
Prof.(a) Orientador(a)

(escreva aqui o nome do membro titular)

Membro titular

(escreva aqui o nome do membro titular)

Membro titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por caminhar comigo por toda minha vida e por me dar a graça de ter tantas pessoas maravilhosas que me deram todo o apoio para a construção da pessoa que sou hoje.

Aos meus pais, Clovanildo e Elenir, por todo o trabalho e dedicação de suas vidas a mim. A minha irmã, Isabela, pelo suporte na minha preparação.

À Larissa, minha noiva e melhor amiga, por todo suporte, paciência e companheirismo durante todos os momentos da minha formação.

A todos os meus professores por todo apoio e suporte no meu desenvolvimento profissional e pessoal.

Aos meus amigos de curso por caminharem comigo durante todos os desafios desses longos anos.

RESUMO

Um dos maiores desafios que a humanidade deverá enfrentar no século 21 será a emergência climática. O desenvolvimento de novas tecnologias que habilitem a utilização de fontes renováveis de energia será essencial para suportar o desenvolvimento econômico mundial. Dessa forma, o hidrogênio como fonte energética é visto como o grande agente da descarbonização de setores como o de transporte marítimo. (IGU, 2020)

Para a transição energética ter o necessário interesse do mercado é necessário que os investimentos propostos sejam economicamente e estrategicamente viáveis, sobretudo se não dependerem de incentivos governamentais. Assim, as indústrias precisarão de muito suporte na implementação de sistemas que sejam seguros e econômicos.

Esse estudo tem como objetivo a avaliação de pressão de falha em tubulações já em operação, com graus de corrosão avançados para demonstrar a utilização de ferramentas disponíveis de modelagem e análise por Elementos Finitos. Oferecendo o máximo de contexto e informações para embasar a análise estrutural da conversão de tubulações de gás natural para operarem com hidrogênio. Será apresentado a revisão da literatura e das normas técnicas disponíveis que apresentem soluções para os principais desafios no transporte de hidrogênio.

Diversos desafios são apresentados na literatura como por exemplo os mecanismos de dano ativo na tubulação do aço devido ao hidrogênio. Porém, um outro mecanismo de dano comum nessas tubulações é a diminuição da resistência à tensão de escoamento e tensão última do aço, quando exposto ao hidrogênio gasoso. Esta se demonstra como um dos principais desafios quanto a conversão de tubulações de gás natural para o transporte de hidrogênio.

Os resultados desse trabalho demonstram a importância de avaliação do impacto do hidrogênio nas propriedades mecânicas do aço, quando executado uma análise de integridade estrutural e avaliação de pressão de falha de tubulações empregadas no transporte de hidrogênio.

Palavras-chave: Pressão de falha; Transporte de hidrogênio; Análise por Elementos Finitos.

ABSTRACT

One of the biggest challenges humanity will face in the 21st century will be the climate emergency. The development of modern technologies that enable the use of renewable energy sources will be essential to support world economic development. While, at the same time, the emission of carbon into the atmosphere must be reduced. In this way, hydrogen, as an energy source, is seen as a major agent of decarbonization in sectors such as maritime and air transport. (IGU, 2020)

For the energy transition to have the necessary market interest, the proposed investments must be economically and strategically viable. Above all, if they do not depend on government incentives, industries will need a lot of support in implementing systems that are safe and cost-effective.

This study aims to evaluate the failure pressure in pipelines already in operation, with advanced corrosion grades, to demonstrate the use of finite element modeling and analysis tools. Providing maximum context and information to support the structural analysis of converting natural gas pipelines to run on hydrogen. A review of the literature and available technical standards that present solutions to the main challenges in hydrogen transport will be presented.

Several challenges are presented in the literature, such as the active damage mechanisms in steel pipelines due to hydrogen. However, another common damage mechanism in these pipelines is the decrease in the resistance to yield stress and ultimate stress of the steel, when exposed to gaseous hydrogen. This proves to be one of the main challenges regarding the conversion of natural gas pipelines for the transport of hydrogen.

The results of this work demonstrate the importance of evaluating the impact of hydrogen on the mechanical properties of steel, when performing an analysis of structural integrity and failure pressure evaluation of pipelines used in the transport of hydrogen.

Keywords: Failure Pressure; Hydrogen transport; Finite Element Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Esquematização de tecnologias de baixo carbono por setor	9
Figura 2 Variação das propriedades do aço exposto a hidrogênio gasoso.....	15
Figura 3 Taxa de crescimento de fadiga de dutos de aço em diferentes ambientes .	16
Figura 4 Níveis de entrega de inspeções ultrassônicas em dutos	22
Figura 5 Ilustração do defeito TS 02	23
Figura 6 Ilustração do defeito TS 05	23
Figura 7 Curva tensão-deformação do modelo x42 exposto ao ar e ao hidrogênio ..	25
Figura 8 Curva tensão-deformação do modelo x52 exposto ao ar e ao hidrogênio ..	25
Figura 9 Curva tensão-deformação do modelo x60 exposto ao ar e ao hidrogênio ..	25
Figura 10 Curva tensão-deformação do modelo x65 exposto ao ar e ao hidrogênio	26
Figura 11 Curva tensão-deformação do modelo x70 exposto ao ar e ao hidrogênio	26
Figura 12 Materiais admitidos pelo código ASME B31.12 para dutos utilizados no transporte de hidrogênio	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Especificações dos modelo TS02 e TS05	24
Tabela 2 Propriedades mecânicas de aços expostos ao ar e ao hidrogênio gasoso	24
Tabela 3 Comparação da variação de pressão de falha do modelo de duto com defeito de corrosão TS02 exposto ao Ar ambiente e ao hidrogênio	28
Tabela 4 Comparação da variação de pressão de falha do modelo de duto com defeito de corrosão TS05 exposto ao Ar ambiente e ao hidrogênio	28
Tabela 5 Comparação de capacidade de resistência à pressão remanescente no duto corroído com o duto intacto para o modelo de defeito TS02	29
Tabela 6 Comparação de capacidade de resistência à pressão remanescente no duto corroído com o duto intacto para o modelo de defeito TS05	30
Tabela 7 Comparação de métodos de estimativa de pressão de falha para o modelo de defeito TS02.....	30
Tabela 8 Comparação de métodos de estimativa de pressão de falha para o modelo de defeito TS05.....	31

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

API: American Petroleum Institute;

ASME: The American Society of Mechanical Engineers;

DNV: Det Norske Veritas;

EF: Elementos finitos;

km: Quilômetro;

MPa: Mega Pascoal;

PADMEC: Grupo Processamento de Alto Desempenho em Mecânica Computacional da Universidade federal de Pernambuco;

LISTA DE SÍMBOLOS

P_f : Pressão de falha estimada;

t: Espessura da parede do duto;

σ_f : Tensão de escoamento do material;

d: profundidade máxima do defeito;

L: Comprimento longitudinal máximo do defeito;

D: Diâmetro do duto;

M: *Bulging factor*, fator de descrição do defeito;

A_d : Área efetiva de um perfil de efeito de corrosão complexa;

A_0 : Área transversal axial com o comprimento do defeito máximo;

σ_u : Tensão última do material;

Q: *Bulging fator*, fator de descrição do defeito desenvolvido para o modelo LPC;

P_{Fi} : Pressão de falha para o duto intacto.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
1.1	TRANSIÇÃO ENERGÉTICA.....	7
1.2	O PAPEL DO HIDROGÊNIO NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA.....	7
1.3	DESAFIOS	9
1.4	OBJETIVO.....	10
1.5	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	10
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1	O TRANSPORTE DE HIDROGÊNIO.....	11
2.2	CONVERSÃO DE TUBULAÇÃO DE GÁS PARA O TRANSPORTE DE HIDROGÊNIO.....	11
2.3	NORMAS TÉCNICAS.....	12
2.4	PROCEDIMENTOS DE AVALIAÇÃO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL EM TUBULAÇÕES USADAS NO TRANSPORTE DE HIDROGÊNIO.....	13
2.5	CORROSÃO EM DUTOS.....	17
2.6	MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE DEFEITOS DE CORROSÃO	18
3	METODOLOGIA.....	22
4	RESULTADOS	28
5	CONCLUSÃO.....	32
6	SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS	34
	REFERÊNCIAS	35
	ANEXO	36

1 INTRODUÇÃO

Esse capítulo introduz alguns conceitos pertinentes para o presente trabalho.

1.1 TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

A emergência climática é um dos maiores desafios que a humanidade deverá enfrentar no século 21. Para manter a segurança energética mundial, será essencial o investimento em tecnologias que habilitem a utilização de fontes energéticas renováveis. Estas devem suportar o constante aumento de demanda energética global e o desenvolvimento econômico, ao mesmo tempo que se reduz as emissões dos gases do efeito estufa, de acordo com as metas propostas entre diversos países no Acordo de Paris. (IGU, 2021)

Somado à essa necessidade, o setor energético global está passando por uma mudança em direção a tecnologias de baixo carbono, impulsionado pela queda do custo da energia limpa observada nos últimos anos, bem como pelas políticas que buscam mitigar as mudanças climáticas ou melhorar a qualidade do ar. Como exemplo, a geração de energia renovável que alcançou competitividade de custo em muitos mercados e aplicações. (IGU, 2020)

Grande parte da indústria de gás natural está se preparando para suportar mais ações de descarbonização, como a utilização de biogás e hidrogênio nas próximas décadas. (IGU, 2021)

O gás natural continuará a desempenhar um papel importante no futuro sistema de energia como combustível fóssil de baixa emissão de carbono, servindo de base para a transição energética mundial. No entanto, a ênfase na descarbonização da infraestrutura de gás existente levará, sem dúvida, a uma maior penetração de combustíveis mais verdes como o hidrogênio produzido por energia renovável. Nesse sentido, a conversão das redes de gás existentes para o uso no transporte de hidrogênio está cada vez mais em foco para os operadores de gasodutos. (GALLON *et al.*, 2020)

1.2 O PAPEL DO HIDROGÊNIO NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

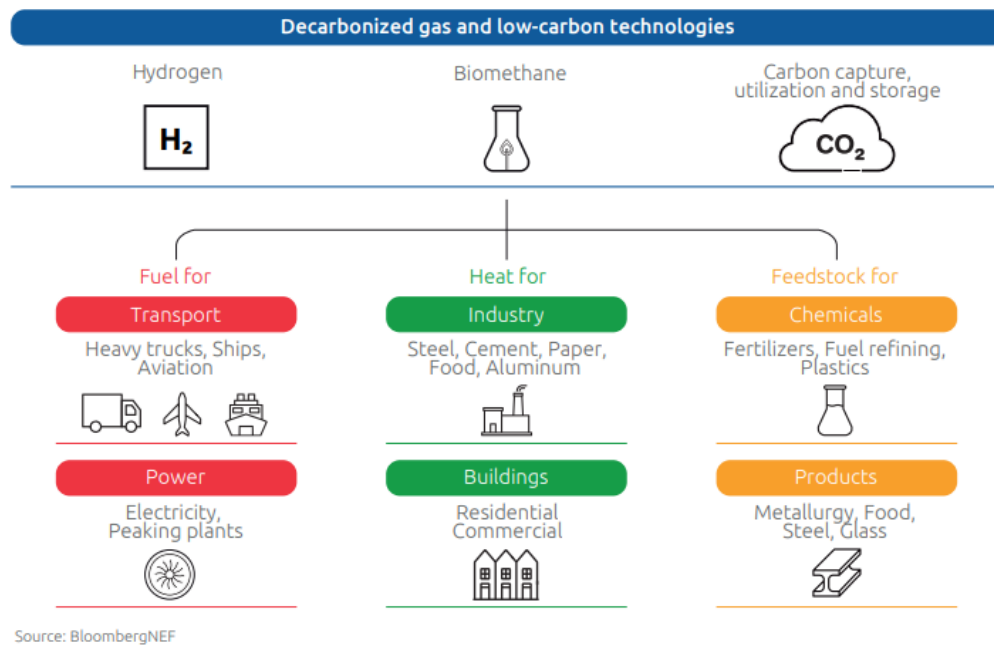
O hidrogênio é o elemento mais abundante no universo, entretanto, na Terra é quase inexistente em sua forma livre. Ele precisa ser produzido a partir de outras substâncias. Atualmente, ele é produzido principalmente utilizando combustíveis fósseis ou como subproduto de processos industriais. É usado hoje predominantemente como matéria-prima para produzir amônia e metanol e para remover impurezas do petróleo bruto (IGU, 2020).

No entanto, o hidrogênio pode ser produzido sem emissões através de tecnologias que utilizam o processo de eletrólise, no qual ele é separado do oxigênio da água (chamado "hidrogênio verde") ou com baixas emissões usando tecnologias de captura e armazenamento de carbono para reduzir as emissões do processo de produção baseado em combustíveis fósseis (o chamado "hidrogênio azul"). Com o uso dessas tecnologias, o hidrogênio poderia fornecer gás descarbonizado à economia global (IGU, 2020).

O hidrogênio é uma fonte de energia muito flexível que pode armazenar energia tanto em larga escala, ao longo de muito tempo, como também em pequenas capacidades sob espaço restrito para o uso, por exemplo, no setor de transporte. Globalmente, cerca de 50 milhões de toneladas de hidrogênio são produzidas a cada ano, em grande parte provenientes de combustíveis fósseis (cerca de 95%). Os 5% restantes são produzidos principalmente pela eletrólise da água (ASTIASO GARCIA, 2017).

De acordo com os especialistas, a descarbonização de vários setores passará por grandes desafios. O transporte marítimo é um deles. A utilização de energia elétrica armazenada em baterias sólidas com tecnologias atuais, torna inviável a operação comercial desses setores. O hidrogênio, portanto, é avaliado como sendo o principal ator da transição energética do mencionado setor. (IGU, 2020)

Além do já citado, é previsto também que o hidrogênio em breve será utilizado em setores como o de transporte rodoviário pesado e em usinas termoelétricas. Porém, especialistas apontam que o biometano será o precursor da transição energética para o uso industrial e residencial. Para setores como a indústria química e a de geração de produtos, como de metalurgia, aço, vidro, e alimentação é esperado que sejam adotados tecnologia de captura e armazenamento de carbono para atender as demandas de redução da emissão de gases do efeito estufa. A esquematização da divisão de tecnologias de baixo carbono que será mais promissor, por setor, está apresentado abaixo na figura 1. (IGU, 2020)

Figura 1 Esquemática de tecnologias de baixo carbono por setor

Fonte: (IGU, 2020, p. 51)

Dessa forma, a malha de suprimento de gás poderá ter uma atuação mista com outras tecnologias de baixo carbono, como exemplo o biometano. De modo que a avaliação da logística de suprimento e compartilhamento de linhas de distribuição e transporte será essencial para a otimização do uso dessas tecnologias (IGU, 2020).

1.3 DESAFIOS

Um estudo realizado por Astiaso & Garcia (2017), entre autoridades e especialistas do setor através de pesquisas estruturadas, apresenta os seguintes tópicos como sendo os principais desafios para a implantação de tecnologia e infraestrutura de hidrogênio:

- Complexidade de procedimentos entre as autoridades envolvidas;
- Falta de informação e assistência aos interessados;
- Falta de conhecimento público e consciência do hidrogênio como opção de mobilidade sustentável;
- Aceitação social da implantação da tecnologia de hidrogênio e infraestrutura como tecnologias seguras;
- Falta de iniciativas governamentais para aumentar as redes de transmissão e distribuição e o uso de veículos a hidrogênio.

1.4 OBJETIVO

À luz dos desafios apresentados no tópico anterior, esse trabalho tem como objetivo incentivar e conscientizar o mercado sobre as tecnologias de infraestruturas para serem utilizadas com hidrogênio, demonstrando, dessa forma, uma avaliação de pressão de falha em dutos que possa apoiar a indústria nos desafios abordados e na tomada de decisão estratégica de investimentos no setor.

Ao avaliar a reutilização de linhas já existentes de gás natural, esse trabalho visa promover o conhecimento do setor das ferramentas existentes para suportar os desafios e promover a celeridade da transição energética em setores como o naval, apoiando o desenvolvimento econômico deste e a segurança da operação.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este capítulo introduz os principais conceitos técnicos abordados e as motivações para o desenvolvimento do presente trabalho. O segundo capítulo, Revisão Bibliográfica, apresenta as principais referências da literatura sobre o transporte de hidrogênio e os principais desafios da conversão de dutos de gás natural para serem utilizados com hidrogênio. É também apresentado um resumo da principal norma técnica do setor, o código ASME B31.12, seguido de uma avaliação dos procedimentos necessários a serem analisados para conversão de dutos para o transporte de hidrogênio.

Em seguida, o capítulo de Metodologia apresenta os conceitos e ferramentas utilizados para executar análises de pressão de falha em dutos com defeitos de corrosão para diferentes materiais, levando em consideração a mudança das propriedades mecânicas do material quando exposto ao hidrogênio gasoso.

O capítulo de Resultados apresenta os principais dados obtidos da variação de pressão de falha de tubulações quando submetidas ao hidrogênio. Será mostrado, também, como algumas das principais fórmulas de estimativa de pressão de falha em dutos corroídos se comparam com a análise por elementos finitos.

O último capítulo, Conclusão, apresenta uma síntese geral de todo o trabalho desenvolvido.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esse capítulo apresenta a revisão dos conceitos disponíveis na literatura que serão abordados nesse trabalho.

2.1 O TRANSPORTE DE HIDROGÊNIO

A utilização de dutos para transportar hidrogênio não é algo recente. O gás que abastecia algumas cidades da Europa em 1960 era obtido a partir do carvão e continha uma mistura de hidrogênio, monóxido de carbono, metano e outros gases. (DODDS; DEMOULLIN, 2013)

Atualmente, existem 3.000 km de dutos de transporte de hidrogênio em estado gasoso no mundo, estes alcançam uma pressão de operação de até 10 MPa e geralmente são construídos com aços de baixa resistência. A depender do nível de penetração de mercado, estima-se que pode haver entre 15.000 km e 35.000 km de linhas de transmissão de hidrogênio até 2050 (BRIOTTET *et al.*, 2012).

Devido à baixa densidade do hidrogênio, espera-se que os dutos destinados ao seu transporte suportem pressões entre 15 e 20 MPa, para tornar mais eficiente a vazão do combustível na linha. Portanto, estudos desenvolvidos na área de avaliação de integridade estrutural serão extremamente importantes para o projeto e a manutenção de dutos a serem utilizados no transporte de hidrogênio, permitindo assim, a segura avaliação de pressão de falha para dimensionamento de dutos que suportem pressões maiores (BRIOTTET *et al.*, 2012).

2.2 CONVERSÃO DE TUBULAÇÃO DE GÁS PARA O TRANSPORTE DE HIDROGÊNIO

Atualmente existem diversos projetos de implantação de novas tubulações de transporte de hidrogênio. Grande parte da indústria permanece firme com a perspectiva da eficácia de reutilização das linhas atuais de gás natural, para serem utilizadas no transporte de hidrogênio. No entanto, em 2020 era conhecido apenas um único projeto de reutilização de tubulação para o transporte de hidrogênio, o duto de Gasuine que liga Dow Benelux e Yara na Holanda (GALLON *et al.*, 2020).

Em uma situação real, a malha de transporte já instalada consiste em dutos de diferentes materiais, idades e estados de conservação. Compreendendo tanto a malha de transporte de gás à alta pressão como a de distribuição a baixa pressão para consumidores finais. Com base nessa diversidade, não é possível definir condições de operação seguras que abranjam todos os casos (DODDS; DEMOULLIN, 2013).

2.3 NORMAS TÉCNICAS

O Código *ASME B31.12 Hydrogen Piping and Pipelines* é hoje uma das principais referências do mercado que apresenta requisitos para o projeto, construção, operação e manutenção de dutos e tubulações utilizados no transporte de hidrogênio. Foi gerado após os resultados de alguns estudos preliminares apontarem as lacunas presentes nos padrões e normas existentes para tubulações e dutos em aplicação para infraestruturas destinadas ao transporte de hidrogênio (ASME, 2011).

O código é aplicado tanto para o transporte de hidrogênio em estado líquido como gasoso. E é dividido nas seguintes partes:

- a. Requisitos Gerais: Contém as definições e requisitos para materiais, soldagem, brasagem, tratamento térmico, construção, teste, inspeção, exame, operação e manutenção;
- b. Tubulação Industrial: Inclui requisitos para componentes, design, fabricação, montagem, inspeção e teste de tubulações industriais.;
- c. Dutos de transporte: estabelece requisitos para componentes, projeto, instalação e testes de dutos de hidrogênio;
- d. Apêndices obrigatórios;
- e. Apêndices não-obrigatórios.

A norma estabelece limitações e qualificações necessárias para os materiais a serem utilizados em sistemas de hidrogênio. Porém, é importante destacar que a seleção de materiais para resistir à deterioração do serviço não é totalmente abordada no código (ASME, 2011).

Durante a escolha dos materiais, deverá ser avaliado as taxas de permeação de hidrogênio através destes e a suscetibilidade à fratura frágil ou falha por choque

térmico, quando exposto ao fogo ou às medidas de combate a incêndio e possíveis perigos da fragmentação do material em caso de falha (ASME, 2011).

O hidrogênio pode afetar materiais de forma diferente de outros fluidos. Os efeitos podem ser de natureza geral ou serem dependentes de condições de temperatura e/ou pressão específicas. Os materiais listados na figura 12 em anexo são os quais o código ASME B31.12 considera adequados para o uso nos gasodutos de transporte (ASME, 2011).

2.4 PROCEDIMENTOS DE AVALIAÇÃO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL EM TUBULAÇÕES USADAS NO TRANSPORTE DE HIDROGÊNIO

Os mecanismos de danos envolvidos no transporte de hidrogênio podem ser divididos em duas áreas principais (GALLON *et al.*, 2020):

- Mecanismos de dano direto por hidrogênio;
- Mecanismos de dano que afetem as propriedades mecânicas do material.

Ambos os mecanismos de dano à tubulação resultam da dissociação de hidrogênio gasoso na superfície interna do duto, levando à adsorção de hidrogênio na parede do duto. A quantidade de dissociação e adsorção dependerá em grande parte da pressão parcial do hidrogênio e da temperatura, enquanto a suscetibilidade a danos dependerá da quantidade de hidrogênio adsorvido e da microestrutura do material (GALLON *et al.*, 2020).

Dentre os principais mecanismos de dano direto estão:

- Bolhas de hidrogênio;
- Trinca induzida por hidrogênio;
- Trinca Induzida por Hidrogênio Orientado por tensão;
- Trinca por estresse de sulfeto;
- Trinca de hidrogênio relacionada à soldagem;
- Ataque de hidrogênio em alta temperatura;

Felizmente, para gasodutos construídos com materiais padrões, como da API 5L, nenhum dos mecanismos de dano direto apresentados acima podem ser gerados, como apresentado na norma ASME B31.12 (GALLON *et al.*, 2020).

O principal ponto de atenção é o efeito do hidrogênio nas propriedades mecânicas do aço, particularmente quando se considera o potencial de nucleação e/ou propagação de anomalias planas (semelhantes às trincas) existentes no duto (GALLON *et al.*, 2020).

As propriedades mecânicas mais importantes do aço para a integridade da tubulação são: a resistência ao limite de escoamento e à tração final, ductilidade, tenacidade e resistência à trinca por fadiga. A maioria dos códigos de projeto, incluindo o ASME B31.12, presumem que a resistência do aço da tubulação não é afetada pela presença de hidrogênio gasoso. Há algumas evidências na literatura de que este não é necessariamente o caso. Alguns dados publicados sugerem que pode haver uma ligeira diminuição tanto na resistência ao escoamento quanto na resistência à tração final do duto, quando exposto ao hidrogênio comparado com um ambiente de referência como o ar ou o nitrogênio (GALLON *et al.*, 2020).

Por exemplo, de acordo com Marchi & Somerday (2008), o limite de escoamento médio e tensão última dos aços em hidrogênio são entre 6,4 MPa e 9,1 MPa menores, respectivamente, do que no ambiente de referência, embora a diferença nos resultados não seja estatisticamente significativa (GALLON *et al.*, 2020).

Pode ser observado na figura 2 os resultados experimentais da avaliação da mudança das propriedades do material por efeito do hidrogênio. Os resultados mostram que a variação das propriedades do material não seguem um padrão constante para todos os tipos de materiais, podendo em alguns casos terem os limites de escoamento médio e tensão último até mesmo superiores quando expostos ao hidrogênio (GALLON *et al.*, 2020).

Figura 2 Variação das propriedades mecânicas de aço exposto a hidrogênio gasoso a temperatura ambiente

Steel Grade	Reference YS / MPa	H2 YS / MPa	Reference UTS / MPa	H2 UTS / MPa
A516	375	364	535	551
A516	364	359	566	571
A106 Gr B	462	503	559	576
1080	414	421	814	794
1080(T)*	414	407	814	787
X42	366	331	511	483
X42 (T)*	311	338	490	476
X52	414	429	609	597
X60	427	422	594	590
X65	504	506	605	611
X70	584	548	669	659
X70 (T)*	613	593	702	686
X70	626	566	693	653
X70 (Arctic Grade)	697	695	733	733

Fonte (GALLON *et al.*, 2020, p. 4)

A maioria dos dutos usados atualmente no transporte de hidrogênio são de grau X52 ou inferior, do padrão API 5L. No entanto, deve-se notar que a ASME B31.12 de fato permite materiais de alto grau, como pode ser visto na figura 12 em anexo. Porém, restrições adicionais são colocadas em materiais de alto grau em termos de testes adicionais e restrições sobre a pressão máxima de operação permitida (GALLON *et al.*, 2020).

Além disso, o Apêndice A não obrigatório do código ASME B31.12 faz referência a aços de grau inferior como tendo sido comprovados e recomendados para serviço de gás hidrogênio. Essas restrições implícitas são baseadas na aparente maior suscetibilidade dos aços de maior resistência à fragilização, embora se reconheça que a experiência industrial seja extensa, os dados laboratoriais são limitados (GALLON *et al.*, 2020).

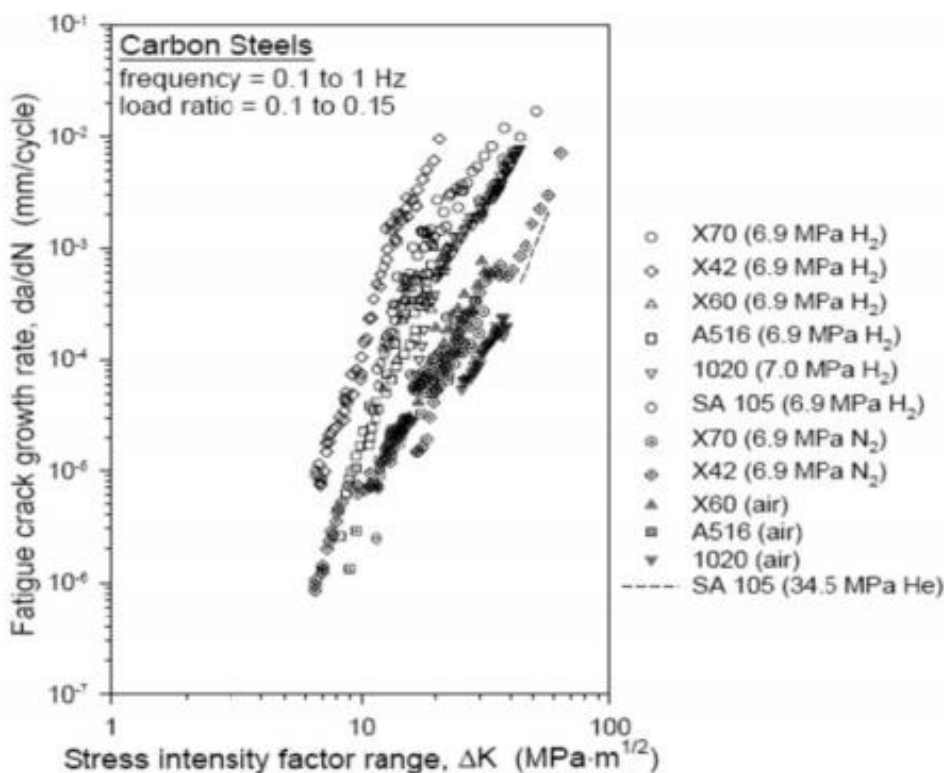
O fato de que o gás hidrogênio reduz a ductilidade e a tenacidade à fratura do aço é bem comprovado e referenciado em vários estudos, por exemplo AIGA (2014). O código API 579 de avaliação de integridade estrutural apresentado por ASME (2007) afirma explicitamente que o hidrogênio dissolvido em aço ferrítico pode reduzir significativamente a resistência à fratura aparente de um material. Existem inúmeros

artigos publicados que validam isso, por exemplo os dados do trabalho de Marchi & Somerday (2008). Como também, reduções de até 80% na resistência à fratura foram relatadas (GALLON *et al.*, 2020).

Se esses números forem usados na adequação padrão para cálculos de códigos de serviço como por exemplo o API 579 de ASME (2007), então o tamanho aceitável de defeitos gerais de corrosão em dutos operando com hidrogênio se torna rapidamente pequeno quando comparado à operação de gás natural (GALLON *et al.*, 2020).

Sabe-se, também, que as taxas de propagação de trincas por fadiga no hidrogênio gasoso são significativamente maiores do que no gás natural e existem diversos trabalhos que apresentam dados que quantificam isso. A Figura 3, extraída de um projeto financiado pelo departamento de transporte dos EUA, demonstra esse efeito, no qual a taxa de propagação da trinca pode ser vista como sendo maior para um mesmo fator de diferença de tensão cíclica, quando exposto ao hidrogênio (GALLON *et al.*, 2020).

Figura 3 Taxa de propagação de trinca por fadiga em aços para diferentes ambientes



Fonte (GALLON *et al.*, 2020, p. 6)

Dadas as limitações abordadas anteriormente, os códigos de projeto existentes para dutos de hidrogênio (por exemplo, ASME B31.12) tendem a ser mais conservadores do que seus equivalentes de gás natural. Exemplos típicos desse conservadorismo incluem restringir os graus de aço permitidos e o carregamento cíclico permitido. Por sua vez, isso significa que, se o hidrogênio for introduzido em um gasoduto de gás natural, as implicações de integridade precisam ser cuidadosamente consideradas e gerenciadas de forma adequada (GALLON *et al.*, 2020).

Conforme observado acima, várias implicações de integridade estão associadas ao risco potencial aumentado por defeitos no duto. Embora esse risco não seja desconhecido em dutos de gás natural e a geração de trincas por concentração de tensão devido à corrosão esteja cada vez mais disseminado, ele é claramente relevante para o serviço de hidrogênio e deve ser levado em consideração como parte de uma estratégia de gerenciamento de integridade (GALLON *et al.*, 2020).

Medidas de mitigação apropriadas podem ser implementadas para controlar o risco associado ao hidrogênio. Exemplos de medidas potenciais incluem a alteração dos parâmetros do processo e a otimização da composição do gás. Há, por exemplo, algumas evidências de que a introdução de traços de oxigênio em um duto de hidrogênio pode reduzir drasticamente o impacto nas propriedades do material do duto. Além disso, como acontece com qualquer estratégia de gerenciamento de integridade, a inspeção e o monitoramento regular ajudarão a garantir uma operação segura e contínua (GALLON *et al.*, 2020).

2.5 CORROSÃO EM DUTOS

Corrosão é um processo eletroquímico que depende do tempo e do ambiente ao qual o duto está exposto. A corrosão interna e externa em conjunto é uma das principais causas de falhas nos gasodutos. Dados dos gasodutos de transmissão de gás *onshore* na Europa Ocidental para o período de 1970 a 1997 indicam que 17% de todos os incidentes que resultaram em perda de gás foram devido à corrosão. Dados de incidentes do Escritório de Segurança de Gasodutos nos Estados Unidos da América para o ano de 2001, atribuem 29% dos incidentes em gasodutos líquidos, e 19% dos incidentes em gasodutos à corrosão (COSHAM; HOPKINS, 2003).

Corrosão em um duto pode ser difícil de caracterizar. Normalmente, ele terá um perfil de profundidade irregular e se estenderá em um padrão irregular tanto em direções longitudinais quanto circunferenciais. Pode ocorrer como um único defeito ou como um aglomerado de defeitos adjacentes separados por material de espessura não corroída (COSHAM; HOPKINS, 2003).

2.6 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE DEFEITOS DE CORROSÃO

Vários métodos foram desenvolvidos para prever a pressão de ruptura de dutos com perda de espessura, que caracterizam o comportamento de defeitos de corrosão típicos em dutos. Alguns desses métodos avaliam principalmente os efeitos da extensão longitudinal da área corroída e da carga de pressão interna. Os métodos podem ser empíricos ou semiempíricos. Os mais recentes se desenvolveram parcialmente a partir de extensos estudos numéricos validados contra dados de teste (COSHAM; HOPKINS, 2003).

O ASME B31G, um modelo de avaliação de corrosão, foi desenvolvido em 1981 pela American Society for Mechanical Engineers (ASME). Nesse modelo é assumida uma área de corrosão parabólica com um fundo curvo, e a pressão de falha do duto corroído é estimada a partir da equação 1 ou 2 dependendo da relação do comprimento do defeito com o diâmetro e espessura do duto. Na equação 3 é apresentado o fator de descrição do defeito, M (*bulging factor*) (ZHU, 2021).

$$P_f = \frac{2t\sigma_f}{D} \left[\frac{1 - \left(\frac{2}{3}\right)\left(\frac{d}{t}\right)}{1 - \frac{\left(\frac{2}{3}\right)\left(\frac{d}{t}\right)}{M}} \right], \quad \text{para } L \leq \sqrt{20Dt} \quad (1)$$

$$P_f = \frac{2t\sigma_f}{D} \left[1 - \frac{d}{t} \right], \quad \text{para } L > \sqrt{20Dt} \quad (2)$$

$$M = \sqrt{1 + 0,8 \left(\frac{L}{\sqrt{Dt}} \right)^2} \quad (3)$$

Onde:

P_f : Pressão de falha estimada;

- t: Espessura da parede do duto;
 σ_f : Tensão de escoamento do material;
d: profundidade máxima do defeito;
L: Comprimento longitudinal máximo do defeito;
D: Diâmetro do duto;
M: *Bulging factor*, fator de descrição do defeito.

Para melhor aproximar-se de uma área de corrosão real com um perfil *River Bottom* como apresentado em Miiller et Al. (2020), um modelo conhecido por PRCI RSTRENG (effective area model) foi proposto em 1989 por Kiefner e Vieth para estimar a pressão de falha do duto, onde a tensão de escoamento e o *bulging factor* do defeito (M) são os mesmos definidos no modelo B31G. No entanto, foi utilizado o parâmetro A_d que denota a área efetiva de um perfil de efeito de corrosão complexa *River Bottom* e A_0 que é a área transversal axial com o comprimento do defeito máximo (L). Este método permite determinar uma área corroída mais precisa e, assim, determinar uma pressão de falha mais precisa para defeitos de corrosão reais (ZHU, 2021).

$$P_f = \frac{2t\sigma_f}{D} \left[\frac{1 - \left(\frac{A_d}{A_0}\right)}{1 - \frac{\left(\frac{A_d}{A_0}\right)}{M}} \right] \quad (3)$$

Onde:

A_d : Área efetiva de um perfil de efeito de corrosão complexa;

A_0 : Área transversal axial com o comprimento do defeito máximo.

Na British Gas em 1995, os pesquisadores Fu e Batte apresentaram um critério de corrosão de tubo de linha conhecido por LPC para determinar a pressão de falha com base em um banco de dados de testes experimentais e uma grande quantidade de resultados numéricos obtidos através de análises por elementos finitos para dutos corroídos de material API 5L X65. O critério LPC está apresentado nas equações 4 e 5 a seguir (ZHU, 2021).

(4)

$$P_f = \frac{2t\sigma_u}{D-t} \left[\frac{1 - \left(\frac{d}{t}\right)}{1 - \frac{d}{Qt}} \right]$$

$$Q = \sqrt{1 + 0,31 \left(\frac{L}{\sqrt{Dt}}\right)^2} \quad (5)$$

Onde:

σ_u : Tensão última do material;

Q : *Bulging* fator desenvolvido para o critério LPC.

O critério LPC foi adotado pela DNV (Det Norske Veritas), no documento chamado de DNV RP-F-101 em 1999, importante referência de avaliação de integridade estrutural em tubulações corroídas (ZHU, 2021).

Paralelamente ao desenvolvimento do critério LPC, os pesquisadores Leis e Stephens fizeram um esforço semelhante para melhorar os modelos de corrosão. Com base nos resultados de análises por elementos finitos e dados experimentais de defeitos de corrosão para aços API 5L de X52 a X70, esses autores desenvolveram em 1997 o modelo PCORRC, apresentado na equação 6 (ZHU, 2021).

$$P_f = \frac{2t\sigma_u}{D} \left[1 - \frac{d}{t} \left(1 - e^{\left(-0,157 \frac{L}{\sqrt{\frac{D(t-d)}{2}}} \right)} \right) \right] \quad (6)$$

No entanto, a simulação computacional aplicada à análise de integridade de dutos com defeito de corrosão vem ganhando grande interesse na indústria de petróleo e gás. Em particular, a análise computacional através de elementos finitos é estabelecida como um método mais preciso e menos conservador, evitando paradas desnecessárias no sistema de dutos (MILLER *et al.*, 2020).

Mesmo com o grande avanço de estudos de geração de critérios de pressão de falha por métodos semiempíricos, estes podem ainda oferecer um certo grau de imprecisão da análise em casos particulares, como também gerar análises muito conservativas, que inviabilizam projetos ou geram gastos excessivos. O método de análise de elementos finitos é o mais empregado atualmente para desenvolver uma análise mais próxima do real, porém o desenvolvimento de estudos através deste necessita de grande conhecimento especializado para a execução correta. (CABRAL, 2007).

O grupo de pesquisa PADMEC (grupo Processamento de Alto Desempenho em Mecânica Computacional da Universidade Federal de Pernambuco), em parceria com a PETROBRAS, desenvolveu o programa PIPEFLAW com o objetivo de otimizar as simulações com elementos finitos (EF) em dutos com defeitos de corrosão, desenvolvendo uma ferramenta confiável, eficiente e de fácil utilização, que pudesse reduzir os erros humanos ao utilizar o método de EF. (CABRAL, 2007).

3 METODOLOGIA

De acordo com DNV GL (2017) existem diferentes níveis de entrega de uma inspeção de duto, como pode ser observado na figura 4. Para o nível 0 (Feature List) é entregue um relatório que contenha dados de perda de eco ao longo do tubo, a probabilidade de detecção de defeito, a acurácia de detecção de profundidade do defeito e uma margem aproximada de parâmetros do defeito, como profundidade, comprimento e largura. Para o nível 1 é entregue dados obtidos para WT (Wall thickness) e SO (Stand-off Data), que combinados apresentam dados mais precisos sobre a variação de espessura remanescente do duto ao longo de toda sua circunferência. Para o nível 2 é entregue dados mais precisos para a espessura mínima remanescente ao longo do comprimento longitudinal do duto, eliminando erros que podem ocorrer nas leituras do nível 1. (DNV GL, 2017)

Cada nível de entrega difere em complexidade e precisão de análise. Porém, estudos recentes defendem que é possível obter um grau de precisão elevado utilizando níveis de entregas de inspeção mais simples, como por exemplo o nível 1 ou 2 da figura 4, garantindo, dessa forma, a redução dos custos empregados na avaliação de integridade estrutural de tubulações. (MILLER *et al.*, 2020)

Figura 4 Níveis de entrega de inspeções ultrassônicas em dutos

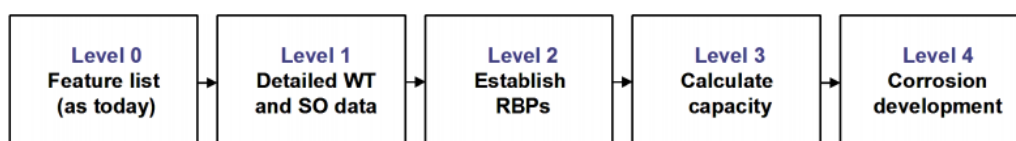


Figure D-1 Overview of the levels of deliveries from ultrasonic inspection (UT)

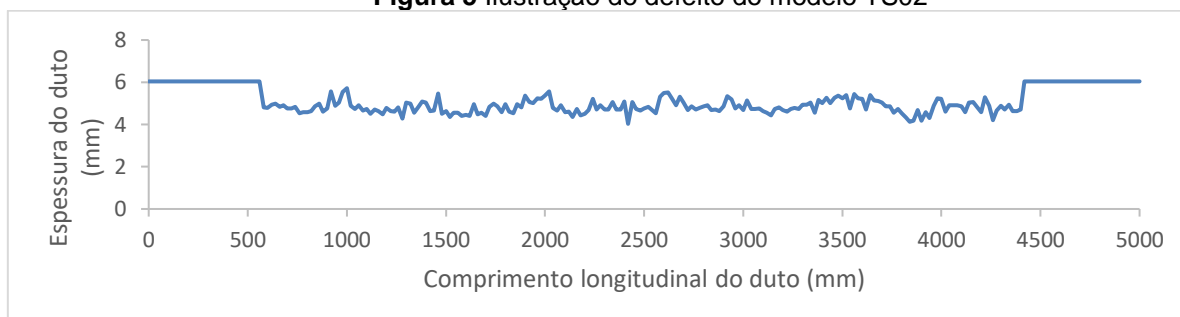
Fonte: (DNV GL, 2017, p. 96)

Foram utilizados, no presente trabalho, os dados de mapeamento de defeitos obtidos através da inspeção de dutos utilizados nos experimentos desenvolvidos por Souza (2007) e apresentado no trabalho de Miiller et al. (2020) para servir de base para a avaliação de integridade estrutural à luz dos desafios propostos para o transporte de hidrogênio.

A partir dos modelos de dutos com defeitos de corrosão denominados de TS02 e TS05 apresentado em Miiller et al. (2020), representados respectivamente nas figuras 5 e 6, foram desenvolvidas análises de pressão de falha, utilizando a

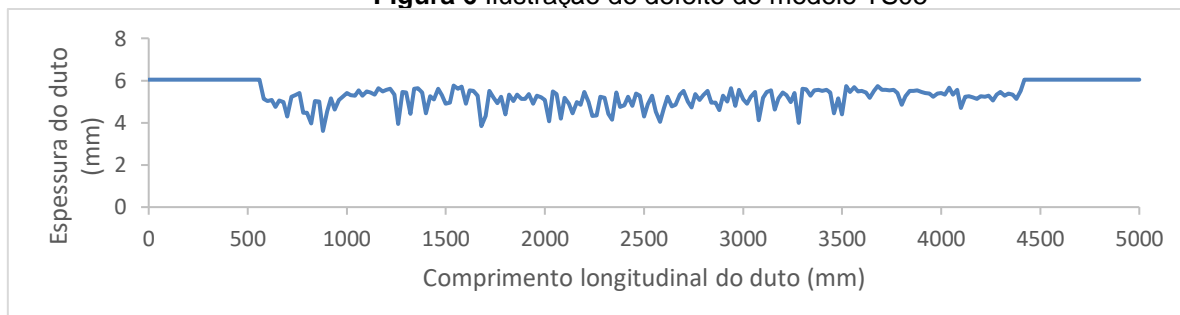
ferramenta PIPEFLAW desenvolvido por PADMEC para a geração do modelo e da malha para o duto e a ferramenta apresentada no trabalho de Miller et al. (2020) utilizando elementos lineares e condição de contorno axissimétrica para a análise que considera o defeito cobrindo o duto 360°, pelo comprimento longitudinal ser a dimensão mais importante para avaliação de pressão de falha interna.

Figura 5 Ilustração do defeito do modelo TS02



Fonte: O próprio autor (2021)

Figura 6 Ilustração do defeito do modelo TS05



Fonte: O próprio autor (2021)

A partir do software de análise não-linear por elementos finitos, Ansys, foi possível fazer a simulação de falha do duto submetido a pressão interna. Para as análises realizadas, as extremidades do duto foram deixadas sem restrição, simulando a condição mais próxima da qual o duto estivesse em uma operação na qual ele não estivesse enterrado. O critério de falha definido foi a tensão máxima de Von Mises quando um elemento da malha atingisse a tensão última do material estabelecido para cada caso a ser analisado.

As especificações dos modelos TS02 e TS05 são apresentados na tabela 1.

Tabela 1 Especificações dos modelos TS02 e TS05

Parâmetro	TS02	TS05
Diâmetro externo (mm)	457,7	457,7
Espessura do duto (mm)	6,03	6,04
Comprimento longitudinal do duto (mm)	5000	5000
Profundidades máxima do defeito (mm)	2,79	2,71
Comprimento longitudinal do defeito (mm)	2750	3820

Adaptado de Miller et al. (2020)

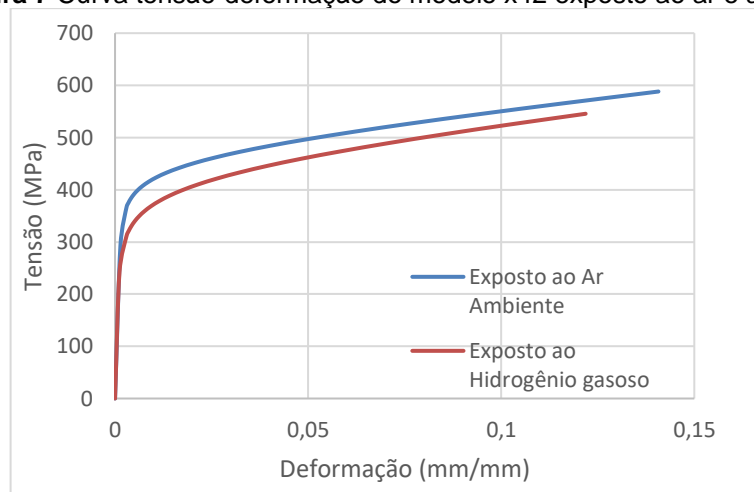
Ao saber que as propriedades mecânicas do material do duto podem mudar quando exposto ao hidrogênio gasoso, será desenvolvido as simulações para diferentes propriedades mecânicas. A partir disso foi adotado a variação das propriedades de acordo com os dados desenvolvidos no estudo de Marchi & Somerday (2008) e apresentados na tabela 2.

Tabela 2 Propriedades mecânicas de aços expostos ao ar e ao hidrogênio gasoso

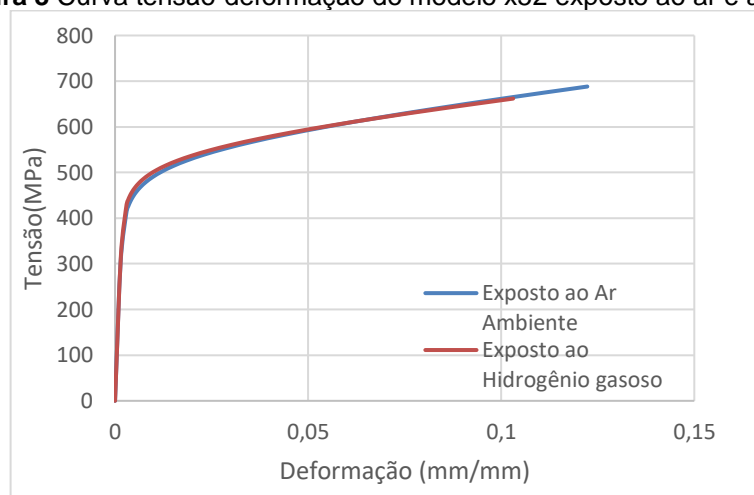
	Tensão de escoamento do material (MPa)		Tensão última do material (MPa)		Deformação máxima (%)	
	Ar ambiente	Hidrogênio	Ar ambiente	Hidrogênio	Ar ambiente	Hidrogênio
x42	366	311	511	483	21	20
x52	414	429	609	597	19	15
x60	427	422	594	590	13	10
x65	504	506	605	611	15	15
x70	584	548	669	659	16	14

Adaptado de Gallon (2020)

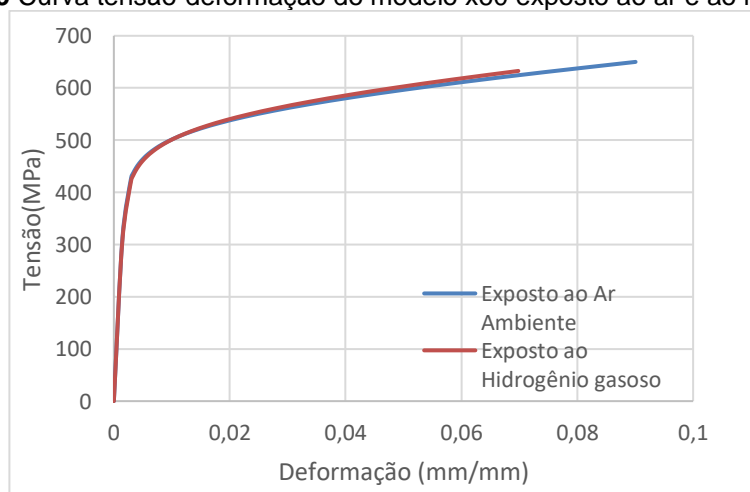
As propriedades apresentadas na Tabela 2 geram as curvas de tensão-deformação reais do material apresentado nas figuras 7, 8, 9, 10 e 11, para os materiais x42, x52, x60, x65 e x70, respectivamente. Para auxiliar a avaliação da variação das propriedades mecânicas do material quando exposto ao hidrogênio.

Figura 7 Curva tensão-deformação do modelo x42 exposto ao ar e ao hidrogênio

Fonte: O próprio autor (2021)

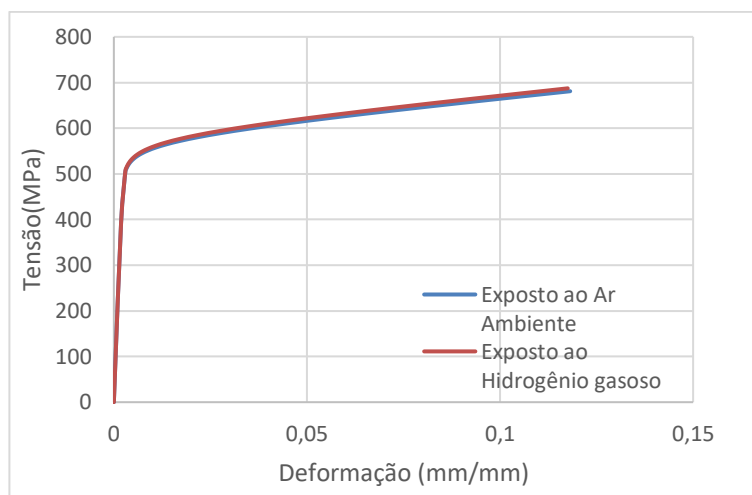
Figura 8 Curva tensão-deformação do modelo x52 exposto ao ar e ao hidrogênio

Fonte: O próprio autor (2021)

Figura 9 Curva tensão-deformação do modelo x60 exposto ao ar e ao hidrogênio

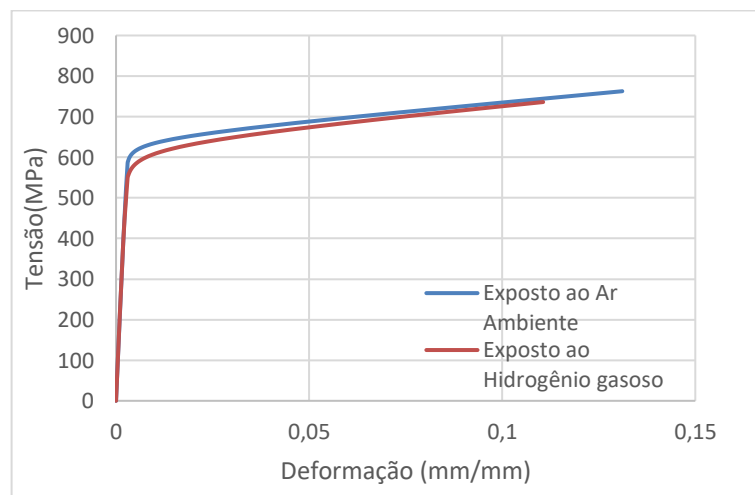
Fonte: O próprio autor (2021)

Figura 10 Curva tensão-deformação do modelo x65 exposto ao ar e ao hidrogênio



Fonte: O próprio autor (2021)

Figura 11 Curva tensão-deformação do modelo x70 exposto ao ar e ao hidrogênio



Fonte: O próprio autor (2021)

Como apresentado no capítulo anterior, esses dados foram obtidos em ensaios experimentais, apresentados por Gallon (2020), em que foi necessário obter o resultado de um experimento em um ambiente neutro para servir de base para os testes. Portanto, as curvas não são idênticas ao do material padrão da API 5L.

Os modelos TS02 e TS05 foram simulados através de análise de elementos finitos do modelo com defeito de perfil *River Bottom* com condição de contorno axissimétrica, como desenvolvido em Miiller et al. (2020), para cada uma das condições, com o intuito de demonstrar a importância de avaliação da variação das

propriedades mecânicas do material quando exposto ao hidrogênio gasoso. Uma segunda análise foi desenvolvida de modo a demonstrar a comparação da análise de elementos finitos com as fórmulas empíricas e semiempíricas de estimativa de pressão de falha.

As fórmulas de avaliação de pressão de falha foram introduzidas em um código desenvolvido em linguagem computacional *Python*, de acordo com os procedimentos apresentados por Zhu (2021) para os seguintes critérios:

- *ASME B31G*;
- *PRCI RSTRENG (effective area model)*;
- *LPC model (DNV RP-F-101)*;
- *PCORRC model*.

Sabendo que cada critério pode ter um grau de precisão diferente para cada tipo de defeito, condição de operação e/ou propriedade do material, as divergências entre os resultados obtidos são esperadas. No entanto, os resultados obtidos através deles demonstrarão a necessidade de avaliação do uso correto de critérios e fórmulas semiempíricas para estimar a pressão de falha de tubulações submetidas a defeitos de corrosão.

Para avaliar a perda de resistência do duto à pressão interna será utilizado o critério de falha de Von Mises, seguindo a fórmula para pressão de falha para duto intacto apresentado por Zhu (2021), conforme a equação 7.

$$P_{Fi} = \frac{4t}{\sqrt{3}D} \sigma_u \quad (7)$$

Onde:

P_{Fi} : Pressão de falha para o duto intacto.

4 RESULTADOS

A partir da análise por elementos finitos para cada condição estabelecida no capítulo anterior de metodologia, foi possível obter a diferença de pressão de falha para os dutos com defeito de corrosão quando expostos ao ar ambiente e ao hidrogênio. Os resultados estão apresentados nas tabelas 3 e 4 para os modelos TS02 e TS05 respectivamente.

Tabela 3 Comparação da variação de pressão de falha do modelo de duto com defeito de corrosão do modelo TS02 exposto ao Ar ambiente e ao hidrogênio

Material	Pressão de Falha (MPa)		Diferença (%)
	Ar ambiente	Hidrogênio	
X42	10,36	9,66	-6,8%
X52	12,27	11,96	-2,5%
X60	11,83	11,64	-1,6%
X65	12,36	12,47	0,9%
X70	13,84	13,46	-2,7%

Fonte: O próprio autor (2021)

Tabela 4 Comparação da variação de pressão de falha do modelo de duto com defeito de corrosão do modelo TS05 exposto ao Ar ambiente e ao hidrogênio

Material	Pressão de Falha (MPa)		Diferença (%)
	Ar ambiente	Hidrogênio	
X42	10,77	10,01	-7,1%
X52	12,74	12,45	-2,3%
X60	12,28	12,05	-1,9%
X65	12,84	12,98	1,1%
X70	14,26	14,01	-1,8%

Fonte: O próprio autor (2021)

Foi possível observar que a variação das propriedades mecânicas devido à exposição ao hidrogênio afeta cada material de forma diferente, indo desde a perda de capacidade de mais de 7% como no material X42 e chegando até a resistir mais do que quando exposto ao ar ambiente como no material X65. Para o aço X65, o resultado era o esperado devido a maior resistência a tensão de escoamento e tensão última do material para esse caso específico, de acordo com teste experimental realizado em Marchi & Somerdar (2008) representado na tabela 2.

Mais testes experimentais são necessários para o desenvolvimento de uma base estatística considerável possibilitando conclusões mais precisas com relação ao efeito do hidrogênio em diferentes tipos de aço.

No entanto, a partir dos dados obtidos experimentalmente da variação das propriedades mecânicas e pela avaliação da pressão de falha é possível observar que materiais de grau inferior como o X42 são os que sofrem maior perda de resistência a pressão do que os de grau superior. É importante reforçar que por sofrer menos os efeitos dos mecanismos de dano ativo do hidrogênio, esses materiais são os mais recomendados nas normas para serem utilizados. Entretanto, o efeito do hidrogênio nas propriedades mecânicas desses materiais se mostra extremamente importante a partir dessa análise.

É possível observar também, pela análise, a correlação entre a pressão de falha e a tensão última do material. O material X52 tem uma tensão de escoamento maior quando exposto ao hidrogênio, no entanto teve uma pressão de falha menor de acordo com a tensão última do material que também era menor quando exposto a esta condição.

As tabelas 5 e 6 apresentam a avaliação de perda de resistência dos dutos corroídos em comparação com dutos intactos de mesma especificação.

Tabela 5 Comparação de capacidade de resistência à pressão remanescente no duto corroído com o duto intacto para o modelo de defeito TS02

Material		Pressão de falha – duto intacto (MPa)	Pressão de Falha – duto corroído (MPa)	Perda de resis- tência (%)
Ar ambiente	X42	25,85	10,36	59,92%
	X52	30,8	12,27	60,16%
	X60	30,05	11,83	60,63%
	X65	30,6	12,36	59,61%
	X70	33,84	13,86	59,04%
Hidrogênio	X42	24,43	9,66	60,46%
	X52	30,2	11,96	60,40%
	X60	29,84	11,64	60,99%
	X65	30,91	12,47	59,66%
	X70	33,33	13,46	59,62%

Fonte: O próprio autor (2021)

Tabela 6 Comparação de capacidade de resistência à pressão remanescente no duto corroído com o duto intacto para o modelo de defeito TS05

Material		Pressão de falha – duto intacto (MPa)	Pressão de Falha – duto corroído (MPa)	Perda de resistência (%)
Ar ambiente	X42	25,89	10,77	59,92%
	X52	30,86	12,74	60,16%
	X60	30,1	12,28	60,63%
	X65	30,96	12,84	59,61%
	X70	33,9	14,26	61,35%
Hidrogênio	X42	24,47	10,01	60,46%
	X52	30,25	12,45	60,40%
	X60	29,89	12,05	60,99%
	X65	30,96	12,98	59,66%
	X70	33,39	14,01	59,62%

Fonte: O próprio autor (2021)

Os resultados apresentados nas tabelas 5 e 6 demonstram a importância de sua avaliação dos efeitos de corrosão para uma correta estimativa da pressão admissível em dutos, durante a execução de projetos de conversão de dutos de gás natural.

As tabelas 7 e 8 apresentam a diferença de estimativa de pressão de falha para diferentes fórmulas empíricas e semiempíricas e a comparação com a análise por elementos finitos (EF).

Tabela 7 Comparação de métodos de estimativa de pressão de falha para o modelo de defeito TS02

		Pressão de falha (MPa)				
		EF	B31G	Effective Area	LPC	PCORRD
Ar ambiente	x42	10,36	7,08	9,14	8,82	8,63
	x52	12,27	8,01	10,14	10,51	10,29
	x60	11,83	8,27	10,42	10,25	10,04
	x65	12,36	9,76	12,04	10,44	10,22
	x70	13,84	11,31	13,72	11,55	11,31
Hidrogênio	x42	9,66	6,024	7,98	8,34	8,16
	x52	11,96	8,31	10,46	10,31	10,09
	x60	11,64	8,17	10,31	10,19	9,97
	x65	12,47	9,8	12,08	10,55	10,32
	x70	13,46	10,61	12,96	11,38	11,14

Fonte: O próprio autor (2021)

Tabela 8 Comparação de métodos de estimativa de pressão de falha para o modelo de defeito TS05

		Pressão de falha (MPa)				
		EF	B31G	Effective Area	LPC	PCORRD
Ar ambiente	X42	10,77	6,35	9,47	7,92	7,73
	X52	12,74	7,18	10,51	9,43	9,22
	X60	12,28	7,4	10,8	9,2	8,99
	X65	12,84	8,74	12,47	9,47	9,25
	X70	14,26	10,13	14,21	10,36	10,13
Hidrogênio	X42	10,01	5,39	8,27	7,48	7,31
	X52	12,45	7,44	10,84	9,25	9,04
	X60	12,05	7,32	10,69	9,14	8,93
	X65	12,98	8,78	12,52	9,47	9,25
	X70	14,01	9,5	13,43	10,21	9,97

Fonte: O próprio autor (2021)

Com base em outros trabalhos como o de Miller et al. (2020), os resultados apresentados nas tabelas 7 e 8 demonstraram a efetividade e competitividade do uso do método de análise por elementos finitos para avaliação menos conservativa do que as fórmulas empíricas e semiempíricas. No entanto, é importante destacar que fórmulas de avaliação de pressão de falha para dutos com defeitos de corrosão estão cada vez mais precisas com o avanço do estudo na área. Destaca-se então, nesse trabalho, a importância de definição de novos critérios para serem utilizadas na avaliação de pressão de falha com as peculiaridades do transporte e efeitos do hidrogênio.

5 CONCLUSÃO

O hidrogênio como fonte de energia flexível irá desempenhar um papel muito importante para o desenvolvimento de setores como o de transporte marítimo, em que outras tecnologias de descarbonização são vistas com grande dificuldade de serem implementadas.

Dessa forma, estudos que contribuam para o desenvolvimento de tecnologias e infraestruturas de hidrogênio serão vitais para o avanço do setor. O setor de gás se prepara atualmente para a iminente necessidade de conversão dos seus gasodutos para serem utilizados no transporte de hidrogênio, para abastecimento de setores como o de transporte marítimo e de termoelétricas.

A conversão de dutos de gás natural será um instrumento de grande economia para a indústria, proporcionando assim uma maior celeridade e incentivo a adoção de tecnologias de hidrogênio. Porém, a conversão desses gasodutos passa por diversos desafios.

Os efeitos do hidrogênio gasoso no material do duto são alvos de muitos estudos recentes. Os efeitos danosos ao duto podem ser divididos em dois grupos: mecanismos de dano direto e mecanismos de modificação das propriedades mecânicas do aço quando exposto ao hidrogênio gasoso. Este último apesar de ser conhecido, ainda carece de resultados experimentais para desenvolver referências suficientes para serem introduzidos em normas de infraestrutura de hidrogênio.

O próprio código ASME B31.12, a principal referência técnica do setor, não avalia o efeito da variação das propriedades mecânicas do aço. Porém, ele adota procedimentos mais conservadores em comparação com as normas empregadas em dutos de gás natural.

Estudos experimentais realizados com corpos de prova de aços de diferentes materiais expostos ao hidrogênio gasoso, demonstraram o efeito de redução da resistência ao escoamento e tensão última do material quando comparado ao ser exposto ao ar ambiente.

Para demonstrar a variação de pressão de falha em dutos quando exposto ao hidrogênio gasoso, foi executado a simulação de pressão de falha de dutos com defeitos de corrosão através de programa de análise não linear por Elementos Finitos, variando as propriedades mecânicas do material de acordo com dados obtidos experimentalmente em estudos disponíveis na literatura.

Os resultados obtidos demonstraram a importância da avaliação da variação das propriedades mecânicas do material quando exposto ao hidrogênio, para obter uma estimativa mais precisa das condições de falha dos dutos empregados no transporte deste. A pressão de falha do duto quando exposto ao hidrogênio chegou a ser 7% menor do que quando exposto apenas ao ar ambiente para graus de material inferiores, como o X42, os quais são atualmente os mais recomendados pelas normas, como por exemplo o código ASME B31.12. Dessa forma, é observado a importância de maiores experimentos de avaliação da variação das propriedades mecânicas do duto quando exposto ao hidrogênio gasoso.

Foi possível observar uma variação dos resultados das análises quando avaliando a pressão de falha em dutos de materiais de graus superiores. Como por exemplo, o X65 que demonstrou suportar 2% a mais de pressão quando exposto ao hidrogênio. Mesmo considerando que o limite de precisão de engenharia dessa variação seja baixo, esse resultado demonstra a importância de maiores estudos de avaliação de pressão de falha de dutos expostos ao hidrogênio para diferentes modelos de corrosão, para assim, ser possível obter resultados mais conclusivos do efeito da variação das propriedades mecânicas em conjunto com a variação da geometria do defeito.

É relevante ressaltar também, que a análise pela comparação entre os resultados obtidos pela simulação por elementos finitos e critérios de avaliação de pressão de falha mostraram que algumas fórmulas conseguem oferecer um grau de precisão considerável para determinadas condições. No entanto, é possível observar que as análises por elementos finitos continua sendo uma das principais ferramentas para desenvolver estimativas mais precisas, oferecendo resultados menos conservativos, na maioria dos casos, quando comparado às fórmulas semiempíricas.

Dessa forma a avaliação de pressão de falha, utilizando a simulação por elementos finitos ou critérios mais precisos, poderá auxiliar engenheiros de integridade estrutural na avaliação da conversão de linhas de gás natural de diferentes proporções, de modo a reduzir os custos pertinentes às análises de integridade estrutural e proporcionar uma maior celeridade da implementação de infraestruturas de hidrogênio ao longo de toda a cadeia de suprimentos.

6 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão de trabalhos futuros é possível destacar a avaliação da aplicação desse estudo em estruturas reais da malha de transporte de gás brasileira em conjunto com avaliação de viabilidade econômica de aplicação de conversão de linhas de transporte e distribuição de gás natural para o uso com o hidrogênio, de modo a oferecer maior suporte e segurança às futuras decisões estratégicas rumo a transição energética nacional.

Como destacado no trabalho, é importante que seja desenvolvido maiores estudos e avaliações da variação das propriedades mecânicas dos materiais, quando expostos ao hidrogênio, e o seu impacto em diferentes modelos de dutos e defeitos de corrosão.

REFERÊNCIAS

- AIGA. Hydrogen Pipeline Systems. 2014. v. 14, p. 84. Disponível em: <www.eiga.eu>.
- ASME. API 579 Fitness-For-Service. 2007. v. 2007.
- ASME. Hydrogen Piping and Pipelines. 2011.
- ASTIASO GARCIA, D. Analysis of non-economic barriers for the deployment of hydrogen technologies and infrastructures in European countries. **International Journal of Hydrogen Energy**, 2017. v. 42, n. 10, p. 6435–6447. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.01.201>>.
- BRIOTTET, L. *et al.* Recommendations on X80 steel for the design of hydrogen gas transmission pipelines. **International Journal of Hydrogen Energy**, 2012. v. 37, n. 11, p. 9423–9430. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.02.009>>.
- CABRAL, H. Desenvolvimento de ferramentas computacionais para modelagem e análise automática de defeitos de corrosão em dutos. 2007.
- COSHAM, A.; HOPKINS, P. THE ASSESSMENT OF CORROSION IN PIPELINES – GUIDANCE IN THE PIPELINE DEFECT ASSESSMENT MANUAL (PDAM). 2003. v. 44, n. 0, p. 0–29.
- DNV GL. DNVGL-RP-F101 Corroded Pipelines. 2017. n. May, p. 123. Disponível em: <<http://rules.dnvgl.com/docs/pdf/dnvgl/RP/2017-05/DNVGL-RP-F101.pdf>>.
- DODDS, P. E.; DEMOULLIN, S. Conversion of the UK gas system to transport hydrogen. **International Journal of Hydrogen Energy**, 2013. v. 38, n. 18, p. 7189–7200.
- GALLON, N. *et al.* Pipeline Technology Conference 2020, Berlin Hydrogen getting into focus Neil Gallon, Lauren Guest, Adrian Horsley, Roy van Elteren, Roland Palmer-Jones ROSEN Group. 2020. p. 1–11.
- IGU. Global Gas Report 2020. **Global Gas Report 2020**, 2020. p. 2–56. Disponível em: <https://www.igu.org/app/uploads-wp/2020/08/GGR_2020.pdf>.
- IGU. 2021 WORLD LNG REPORT. 2021. p. 4.
- MARCHI, C. S.; SOMERDAY, B. P. Technical Reference for Hydrogen Compatibility of Materials. **Journal of Urology**, 2008. v. 180, n. 4 SUPPL., p. 1723.
- MIILLER, R. *et al.* Structural integrity analysis of pipelines with corrosion defects based on River-Bottom Profile model. 2020.
- ZHU, X.-K. A comparative study of burst failure models for assessing remaining strength of corroded pipelines. **Journal of Pipeline Science and Engineering**, 2021. v. 1, n. 1, p. 36–50. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jpse.2021.01.008>>.

ANEXO

Figura 12 Materiais admitidos pelo código ASME B31.12 para dutos utilizados no transporte de hidrogênio

Table GR-2.1.1-2 Material Specification Index for Pipelines

Spec. No.	Grade	Description
ASTM		
A53	A	Electric resistance welded, seamless 30,000 psi
A53	B	Electric resistance welded, seamless 35,000 psi
A106	A	Seamless 30,000 psi
A106	B	Seamless 35,000 psi
A106	C	Seamless 40,000 psi
A135	A	Electric resistance welded 30,000 psi
A135	B	Electric resistance welded 35,000 psi
A139	A	Electric fusion welded 30,000 psi
A139	B	Electric fusion welded 35,000 psi
A139	C	Electric fusion welded 42,000 psi
A139	D	Electric fusion welded 46,000 psi
A139	E	Electric fusion welded 52,000 psi
A333	1	Seamless, electric resistance welded 30,000 psi
A333	6	Seamless, electric resistance welded 35,000 psi
A333	10	Seamless, electric resistance welded 65,000 psi
A381	...	Class Y-35 double submerged-arc welded 35,000 psi
A381	...	Class Y-42 double submerged-arc welded 42,000 psi
A381	...	Class Y-46 double submerged-arc welded 46,000 psi
A381	...	Class Y-48 double submerged-arc welded 48,000 psi
A381	...	Class Y-50 double submerged-arc welded 50,000 psi
A381	...	Class Y-52 double submerged-arc welded 52,000 psi
A381	...	Class Y-56 double submerged-arc welded 56,000 psi
A381	...	Class Y-60 double submerged-arc welded 60,000 psi
A381	...	Class Y-65 double submerged-arc welded 65,000 psi [Note (1)]
API		
API 5L	A	Electric resistance welded, double submerged-arc welded 30,000 psi
API 5L	B	Electric resistance welded, seamless, double submerged-arc welded 35,000 psi
API 5L	X42	Electric resistance welded, seamless, double submerged-arc welded 42,000 psi
API 5L	X52	Electric resistance welded, seamless, double submerged-arc welded 52,000 psi
API 5L	X56	Electric resistance welded, seamless, double submerged-arc welded 56,000 psi
API 5L	X60	Electric resistance welded, seamless, double submerged-arc welded 60,000 psi
API 5L	X65	Electric resistance welded, seamless, double submerged-arc welded 65,000 psi [Note (1)]
API 5L	X70	Electric resistance welded, seamless, double submerged-arc welded 70,000 psi [Note (1)]
API 5L	X80	Electric resistance welded, seamless, double submerged-arc welded 80,000 psi [Note (1)]

GENERAL NOTES:

- (a) The maximum operating pressure (MOP) shall not exceed 3,000 psi for all materials unless otherwise noted, provided the material suitably is demonstrated by tests in hydrogen, such as per Article KD-10 of ASME BPV Code Section VIII, Division 3.
- (b) Grades containing Ni additions above 0.50 shall not be used.
- (c) See Mandatory Appendix II for reference dates of specifications.

NOTE:

- (1) MOP shall be less than 1,500 psi.