

**Comparação dos resultados de ensaios de pressurização em tubulação de aço carbono api-x70 com diferentes tipos de malhas por elementos finitos****Comparison of results of carbon pipeline pressurization tests api-x70 with different mesh of finite elements**

DOI:10.34115/basrv4n4-035

Recebimento dos originais: 17/07/2020

Aceitação para publicação: 17/08/2020

**Julio César de Almeida**

UFPR

j.cezar@ufpr.br

**Victor Matheus Martins**

UFPR

vm.martins09@gmail.com

**RESUMO**

Tubulações pressurizadas cada vez mais fazem parte da nossa realidade, desde os encanamentos que trazem água às nossas residências até aos oleodutos que atravessam países levando os mais variados tipos de combustíveis. Devido aos riscos de rupturas com prejuízos inestimáveis tanto materiais como pessoais, se tornam cada vez mais relevantes métodos que possam prever com maior precisão o estado de tensões nessas tubulações. Ensaios para essas estruturas em situação real de carregamento são dispendiosos e requerem laboratórios com infra-estrutura sofisticada nem sempre disponíveis. Neste trabalho é avaliado quão efetivos os modelos numéricos se mostram na determinação de tensões em tubulações pressurizadas. Para tal, foram realizados dois tipos de ensaios de pressurização em um trecho de tubulação de alta liga (API-X70), sendo determinadas as tensões por meio de extensômetros para comparação com os resultados obtidos por simulações numéricas em software. Para as simulações numéricas, foram desenvolvidos quatro modelos distintos com diferentes graus de complexidade. Por meio de tal procedimento, foi possível averiguar qual dos modelos apresenta melhores resultados para o caso estudado. Os resultados mostram que a utilização de modelos numéricos simplificados na determinação das tensões de tubulações sob pressão supre com aceitável acurácia a utilização de modelos complexos ou ainda realização de ensaios experimentais.

**Palavras-chave:** Comparação experimental, Simulação numérica, MEF, Comparação entre modelos.

**ABSTRACT**

Pressurized pipes are increasingly part of our reality, from pipelines that bring water to our homes to pipelines that cross countries carrying the most varied types of fuels. Due to the risks of ruptures with inestimable damages, both material and personal, methods that can more accurately predict the state of stresses in these pipes become more and more relevant. Testing for these load-bearing structures is expensive and requires laboratories with sophisticated infrastructure not always available. In this work we evaluate how effective the numerical models are in the determination of stresses in pressurized pipes. For this, two types of pressurizing tests were carried out in a high-alloy pipe section (API-X70), the tensions were

determined by means of strain gauges to later compare these results with those obtained by numerical simulations. For the numerical simulations, four distinct models with different degrees of complexity were developed. By means of such procedure it was possible to determine which of the models presents better results for the case studied. The results show that the use of simplified numerical models to determine the stresses of pipelines under pressure is acceptable would have led to the use of complex models or experimental tests.

**Keywords:** Experimental comparison, Numerical simulation, MEF, Comparison between models.

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, existem no mundo cerca de 3,5 milhões de quilômetros de tubulações que são utilizadas para transporte de petróleo e gás (CIA (acesso em abril de 2017)). Com tantos quilômetros de dutos espalhados pelo globo, são freqüentes os rompimentos ocasionados pelas mais variadas causas, sendo as mais comuns as sobrecargas de pressão e ausência de monitoramento da integridade estrutural das tubulações (*US Department of Transportation - Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration (PHMSA) (2017)*). Tendo isso em vista, a engenharia tem buscado desenvolver modelos computacionais que forneçam resultados com acuraria e agilidade.

Simulações numéricas são utilizadas há mais de 40 anos para avaliações e projetos de tubulações (Mackerle, 2005). Elas são ferramentas poderosas que têm possibilitado o projeto e avaliação de estruturas de uma forma muito mais abrangente e dinâmica do que as avaliações analíticas, experimentais ou de campo. Entretanto, nem todos os resultados são totalmente confiáveis. Isso se deve por falta de parâmetros e conhecimento sobre o que está sendo simulado de modo que os modelos podem ser incompatíveis com a realidade. Sendo assim, se tornam pertinentes os estudos comparativos entre simulações numéricas e ensaios experimentais ou situações de campo. Estudos como os de Fan et al. (2017), Song et al. (2016), Ryu et al. (2017), Mazurkiewicz et al. (2017) indicam que muito tem sido feito na busca de melhores modelos e indicam que as comparações numérico-experimentais ainda têm muito a se desenvolver.

Assim sendo, o presente artigo busca apresentar um comparativo de ensaios de pressurização realizados em um trecho real de gasoduto com os resultados obtidos em simulações realizadas, para a mesma situação, no software comercial ANSYS®, objetivando avaliar qual técnica de simulação irá apresentar melhores resultados com boa relação de custo computacional e acurácia dos valores obtidos.

## 2 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento da comparação proposta, o presente artigo apresenta duas abordagens sobre um trecho de tubulação pressurizada: Experimental e Computacional.

### 2.1 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Para as avaliações experimentais utilizou-se um trecho de tubulação API 5L X70 com 7 metros de comprimento, 406,4 mm de diâmetro e espessura de parede de 9,53 mm, a qual foi preenchida com água e pressurizada com uma pressão de 10 MPa para que pudessem ser avaliadas as deformações nas paredes externas dela. A medição das deformações se fez com sete rosetas extensométricas instaladas em pontos específicos e pré-determinados da parede da tubulação. Ao utilizar diversas rosetas, garantiu-se uma melhor cobertura do comportamento de deformações da tubulação, tornando-se possível se realizar ao final uma avaliação estatística das leituras obtidas.

Nos ensaios experimentais, foram avaliados dois cenários: um com o duto bi-apoiado em suportes fixos, e outro com o duto apoiado em uma camada de areia de compactação média empacotada em sacos de ráfia. O duto bi-apoiado pode ser observado na

Figura 1, abaixo do duto, é possível também observar os sacos de ráfia preenchidos de areia, os quais foram utilizados nos ensaios do segundo cenário.

Figura 1 – Duto bi-apoiado para simulação dos ensaios de pressurização.



A execução dos ensaios experimentais consistiu na pressurização da água dentro do duto até a pressão manométrica de 10 MPa, seguida da manutenção dessa pressão por alguns minutos. Nesse ponto, se avaliou as deformações máximas lidas pelos extensômetros. Em seguida a pressão interna foi removida. Primeiramente se fez esse procedimento com o duto

bi-apoiado e depois se ergueu o duto e se removeram os suportes, restando o duto posicionado sobre os sacos de areia, para que se retomasse na sequência o ciclo de pressurização, manutenção da pressão e despressurização.

## 2.2 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Os modelos computacionais foram feitos utilizando-se o software ANSYS®. Objetivando obter uma maior abrangência de dados, optou-se por variar os tipos de modelos, as propriedades dos elementos e as características de contato e suporte. Sendo assim, foram criados quatro modelos distintos: um bidimensional, dois tridimensionais simplificados (sendo um com elementos de casca e outro com elementos sólidos) e um tridimensional completo.

Nas Figuras **Erro! Fonte de referência não encontrada.**,

*Figura 3,*

*Figura 4 e*

*Figura 5 é possível observar cada um dos quatro modelos avaliados.*

Figura 2 – Modelo bidimensional.

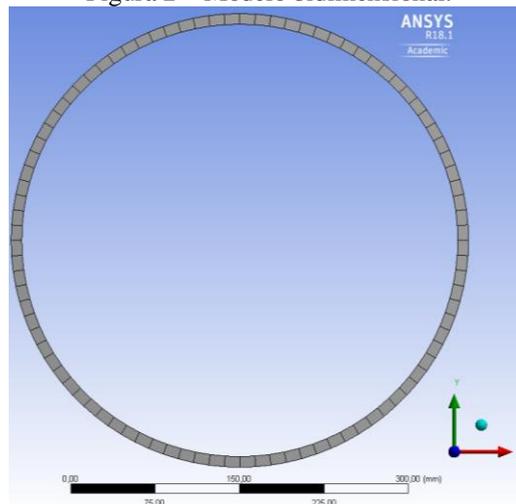


Figura 3 – Modelo tridimensional com elementos de casca.

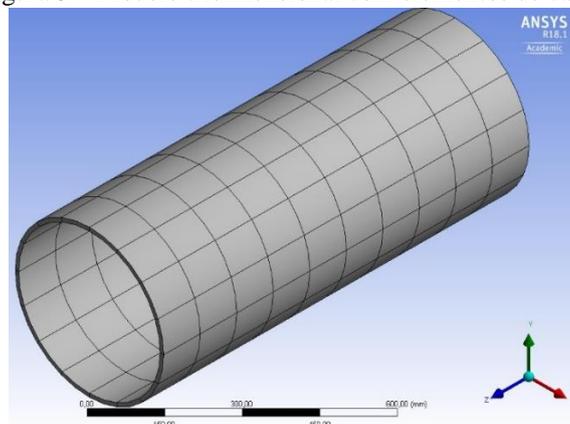


Figura 4 – Modelo tridimensional com elementos sólidos.

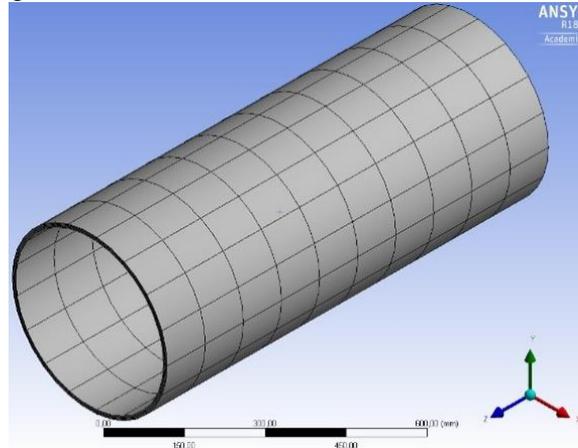
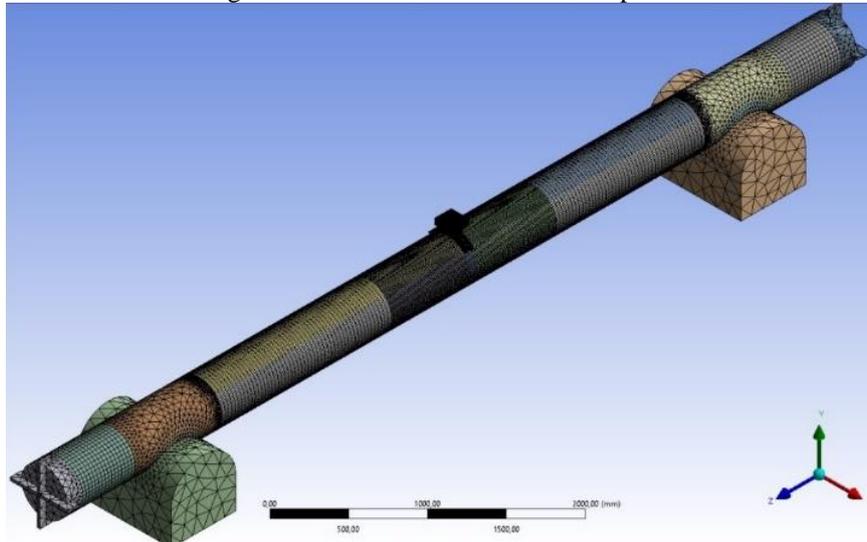


Figura 5 – Modelo tridimensional completo.



Na busca de modelos que representassem a realidade sem que houvesse excesso ou carência de elementos nas malhas, optou-se por realizar estudos de convergência de malha para cada um dos modelos simplificados. Após esta avaliação, selecionaram-se os números de elementos ao longo da parede dos modelos, do comprimento da circunferência e do comprimento da tubulação (nos casos tridimensionais) que apresentaram melhor convergência de malha.

Para estes três primeiros modelos simplificados, optou-se também por avaliar as suas respostas ao se variar o tipo de interpolação da solução das integrais entre os nós ao se alternar os tipos de elementos entre lineares e quadráticos.

Já para o modelo completo, optou-se por variar as características de fixação e suporte, inserindo as mesmas características presentes nos ensaios experimentais, como atrito nos contatos, influência da gravidade e rigidez dos suportes. Por fim, vale destacar que, em virtude da sua complexidade, para o modelo completo não se realizou um estudo de convergência de malha. Na *Tabela 1* são elencados todos os modelos realizados com as suas características principais.

Tabela 1 – Principais características dos modelos computacionais utilizados.

BIDIMENSIONAIS		TRIDIMENSIONAIS					
		Casca cilíndrica		Tubo sólido		Modelo completo	
Elementos de ordem linear	Elementos de ordem quadrática	Elementos de ordem linear	Elementos de ordem quadrática	Elementos de ordem linear	Elementos de ordem quadrática	Bi-apoiado	Apoiado na areia

### 2.3 AVALIAÇÃO ANALÍTICA

Para o caso de pressurização de tubulações de paredes finas, onde a razão  $r/t$  seja maior do que 20 (sendo  $r$  – raio interno da tubulação e  $t$  – a espessura da parede da tubulação), as formulações analíticas consagradas para as tensões que agem na estrutura são (1) e (2), como indicadas a seguir:

$$\sigma_c = \frac{P \cdot r}{t} \quad (1)$$

e

$$\sigma_L = \frac{P \cdot r}{2t}, \quad (2)$$

sendo:  $\sigma_c$  – tensão circunferencial;  $P$  – pressão interna da tubulação;  $\sigma_L$  – tensão longitudinal.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base nas leituras de deformação obtidas pelas rosetas extensométricas nos ensaios experimentais, calcularam-se as tensões nos pontos avaliados das paredes da tubulação. Com essas tensões, calcularam-se as tensões máximas e mínimas de *Mohr*. A opção por trabalhar com as tensões principais se fez pelo fato de, no caso de tubulações pressurizadas, as tensões principais mínimas e máximas coincidirem com as próprias tensões longitudinais e circunferenciais, respectivamente.

Na avaliação dos resultados das simulações numéricas é importante destacar que nos três modelos simplificados não foi possível avaliar as tensões longitudinais. Isso se deu em virtude de o carregamento de pressão ter sido aplicado somente na parede interna dos modelos e, como estes não contemplavam tampos nas extremidades em virtude de serem simplificados, não havia como o *software* gerar informações da tensão longitudinal. Todavia, a ausência desses dados não prejudicou a comparação entre os modelos, tendo em vista que a tensão circunferencial é a mais crítica para tubulações e vasos de pressão, conforme observado a partir das equações (1) e (2). Para as dimensões da tubulação e a pressão aplicada, os valores calculados para  $\sigma_C$  e  $\sigma_L$  calculados foram 213,3 MPa e 106,6 Mpa respectivamente.

Primeiramente, se comparou os resultados de tensão circunferencial dos três modelos simplificados. Cada modelo foi avaliado com elementos lineares e quadráticos. Apesar da variação no processo de interpolação para a solução das equações nos elementos, os resultados foram muito próximos, como pode ser observado na *Tabela 2*.

Tabela 2– Tensões circunferenciais nos modelos simplificados.

Modelos	Lineares	Quadráticos	Variação
2D	197,61 MPa	198,17 MPa	-0,28%
3D – Casca	202,60 MPa	197,45 MPa	2,61%
3D – Sólido	195,35 MPa	198,18 MPa	-1,38%

Vale notar duas coisas: primeiramente que a avaliação de tensão entre os modelos não apresentou diferenças significativas, tanto dos modelos entre si como entre as variações dos tipos de elementos. Isso se deve principalmente por conta de se estar em regime elástico e por isso não aparecerem grandes deformações. A principal diferença entre os modelos está no tempo computacional para a solução de cada modelo, que para os modelos mais simples é obviamente menor (Mackerle, 2005). É interessante notar também que os modelos simplificados apresentaram tensões circunferenciais muito próximas da previsão analítica, com diferenças menores que 10%.

Em seguida foram localizadas, no modelo completo, os pontos onde as sete rosetas extensométricas estavam instaladas. Nesses pontos, avaliaram-se também as tensões principais. Para a comparação dos resultados entre os modelos foi feita a média das leituras em cada cenário ensaiado/simulado. As médias das tensões podem ser observadas na *Tabela 3*

Tabela 3 – Média das tensões principais (MPa) das simulações e dos ensaios e comparação percentual.

	Pressurização bi-apoiado			Pressurização areia		
	SIMULAÇÃO	ENSAIO	PERCENTUAL	SIMULAÇÃO	ENSAIO	PERCENTUAL
Média Tens max	199,03	194,023	2,58%	198,97	191,38	3,96%
Média Tens min	97,8685	104,4343	-6,29%	99,5266	103,636	-3,97%

Calculou-se também o desvio padrão dos sete pontos avaliados, tanto para os resultados dos ensaios das simulações com os modelos completos, nos sete pontos avaliados. Os resultados estão indicados na *Tabela 4*.

Tabela 4 – Desvio padrão das tensões principais (MPa) das simulações e dos ensaios.

	Pressurização bi-apoiado		Pressurização areia	
	SIMULAÇÃO	ENSAIO	SIMULAÇÃO	ENSAIO
Desvio padrão Tens Max	0,301	21,0426	0,07982	13,9962
Desvio padrão Tens Min	0,43082	7,500682	0,05868	6,67489

A avaliação dos desvios padrão apresenta informações mais consistentes a favor da convergência dos dados entre os ensaios e as simulações. No caso do duto bi-apoiado, onde o desvio padrão resultou um pouco maior que 21 MPa, destaca-se que este desvio é de apenas 10,8% da média dos dados dos extensômetros.

Com isso é possível concluir que apesar das diferenças entre os resultados dos ensaios e das simulações, há convergência dos dados quando estes são avaliados pelo conjunto dos pontos. Pois estão dentro da divergência esperada para esse tipo de comparação, que é aceitável que seja entre 15% e 20% sem que perca a sua confiabilidade, e ficam muito abaixo do coeficiente de segurança normalmente aplicado nesse tipo de projeto. (ASCE, Whidden (2009)).

Por fim, ao se fazer a verificação com base na formulação analítica proposta para o caso em específico, a tensão circunferencial é de 213,3 MPa e a longitudinal é 106,6 MPa, como já indicado. Valores estes, próximos tanto das médias das simulações como dos ensaios experimentais. Todavia, é evidente que os resultados analíticos das tensões circunferenciais são um pouco maiores tanto dos modelos computacionais como dos resultados experimentais. Essa variação pode ser explicada tendo em vista que as tensões avaliadas tanto nos modelos computacionais como nos ensaios, foram medidas na superfície externa da tubulação. Já o modelo analítico, avalia as tensões na região mais crítica, que é na face interna do duto (pois utiliza o raio interno para a sua avaliação), aonde a pressão é efetivamente aplicada.

#### **4 CONCLUSÕES**

É possível concluir que para o caso estudado, modelos simplificados de tubulações pressurizadas suprem de forma razoável a utilização de modelos complexos ou ainda avaliações experimentais.

A comparação entre si dos resultados dos modelos propostos mostrou que modelos simplificados geram simulações com diferenças menores que 2% para as tensões circunferenciais quando comparados com o modelo completo. Isso indica que, para casos em que a pressão interna é o fator de maior influência nas tensões em uma tubulação, modelos simplificados podem suprir as necessidades de avaliações computacionais ao invés de modelos mais complexos. É evidente que modelos completos e bem calibrados irão apresentar resultados mais precisos, mas para a maioria dos casos, onde uma pequena variação não compromete os resultados esperados, a conveniência destes modelos já não é tão evidente, tendo em vista que levam muito tempo para serem montados e para realizar as simulações, não tendo uma boa relação de custo versus benefício.

Ao se fazer ainda uma análise estatística dos dados dos ensaios e das simulações, observou-se ainda que na média os dados convergiam com erros menores que 6,3% (aproximadamente 6,6 MPa) e com um desvio padrão máximo de 21 MPa, indicando assim a confiabilidade dos modelos utilizados.

Os resultados obtidos tanto com as simulações como com os ensaios foram considerados consistentes com a avaliação analítica proposta. Vale destacar que tantos os modelos experimentais, analíticos e numéricos possuem erros intrínsecos às suas formas de avaliação. Existem formas estatísticas de se avaliar esses erros e os próprios softwares comerciais fornecem ferramentas que avaliam a confiabilidade das simulações. Todavia, para o presente trabalho, tais avaliações não foram feitas.

Apesar dos grandes avanços que as avaliações computacionais têm permitido na engenharia, ainda não é possível afirmar que qualquer modelo numérico irá retornar valores adequados com a realidade do problema estudado. Sendo assim, estudos das correspondências entre avaliações computacionais com a realidade têm se mostrado ainda necessários e é um vasto campo a ser estudado, como foi possível se concluir no presente trabalho.

## REFERÊNCIAS

ASCE, W.W.R. *Buried Flexible Steel Pipe Design*,. 2009.

CIA, THE WORLD FACTBOOK: List of pipelines in the world. Disponível em: <<https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/fields/2117.html>>. Acesso em: 20/4/2017.

FAN, Z.; YU, J.; SUN, Z.; WANG, H. *Effect of axial length parameters of ovality on the collapse pressure of offshore pipelines*. *Thin-Walled Structures*, v. 116, n. February, p. 19–25, 2017.

MACKERLE, J. *Finite elements in the analysis of pressure vessels and piping, an addendum: A bibliography (2001-2004)*. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, v. 82, n. 7, p. 571–592, 2005.

MAZURKIEWICZ, L.; TOMASZEWSKI, M.; MALACHOWSKI, J.; et al. *Experimental and numerical study of steel pipe with part-wall defect reinforced with fibre glass sleeve*. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, v. 149, p. 108–119, 2017. Elsevier.

RYU, D.; WANG, L.; KIM, S.; LEE, J. *Comparative study on deformation and mechanical behavior of corroded pipe : Part I e Numerical simulation and experimental investigation under impact load*. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2017. Elsevier.

SONG, K.; LONG, Y.; JI, C.; GAO, F.; CHEN, H. *Experimental and numerical studies on the deformation and tearing of X70 pipelines subjected to localized blast loading*. *Thin-Walled Structures*, v. 107, p. 156–168, 2016. Elsevier.

## ***Brazilian Applied Science Review***

US DEPARTMENT OF TRANSPORTATION - PIPELINE AND HAZARDOUS MATERIALS SAFETY ADMINISTRATION (PHMSA). Pipeline Serious Incident 20 Year Trend. 2017