

## **MODELAGEM EM ELEMENTOS FINITOS DE ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO COLAPSO DE TUBO INTERNAMENTE DESGASTADO**

GUSTAVO TEIXEIRA DA SILVA<sup>1\*</sup>; LUCAS PEREIRA DE GOUVEIA<sup>2</sup>;  
EDUARDO TOLEDO DE LIMA JUNIOR<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Eng. de Petróleo, Pesquisador do LCCV, UFAL, Maceió-AL, gustavo.silva@lccv.ufal.br;

<sup>2</sup>Ms. em Estruturas, Prof. Assistente e Pesquisador do LCCV, UFAL, Maceió-AL, lucasgouveia@lccv.ufal.br;

<sup>3</sup>Dr. em Estruturas, Prof. Adjunto e Pesquisador do LCCV, UFAL, Maceió-AL, limajunior@lccv.ufal.br

Apresentado no  
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC 2018  
22 a 24 de agosto de 2018 – Maceió/AL - Brasil

**RESUMO:** Este trabalho realiza uma análise comparativa entre a resposta experimental ao colapso de um tubular de alta resistência ensaiado por Moreira Junior (2009) e a resposta obtida com um modelo de Elementos Finitos em Estado Plano de Tensões. O desgaste mecânico interno em revestimentos de poços de petróleo acontece essencialmente devido o atrito proporcionado pela rotação da coluna de perfuração durante a perfuração ou deslizamento ocasionado por operações de manobra no poço. O problema do desgaste em tubulares de revestimentos de poços pode ser verificado durante toda sua vida útil, podendo levar à diminuição considerável da resistência às solicitações mecânicas impostas, aumentando o risco de falhas, especialmente pela pressão externa, levando-o ao colapso. É comum o uso do Método dos Elementos Finitos em modelagens de problemas em mecânica estrutural, como o colapso de tubulares. Para a modelagem proposta, considera-se um modelo elastoplástico para o aço, condições de ensaio em câmara hiperbárica e seção transversal desgastada no formato de canaleta, penalizando a parede do revestimento em torno de 20%. Para o tubo intacto, sem desgaste, a pressão de colapso se mostra mais elevada em comparação com um tubo equivalente especificado pelas normas API (*American Petroleum Institute*), isso porque o tubo é do tipo *high collapse*, feito com uma liga de aço especial, apresentando uma performance superior aos produtos convencionais. Considerando-se o desgaste e aplicando-se as pressões de colapso experimentais, observa-se que a tensão equivalente de von Mises na parede dos tubos beira a tensão última do aço, gerando tensões mais elevadas em torno da região do desgaste, em congruência com a resposta obtida pelo autor. A análise realizada demonstra o potencial da modelagem numérica em estado plano para problemas de mecânica de tubulares, levando a resultados adequados com baixo custo computacional, como apoio a rotinas de ensaios destrutivos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Poços de petróleo, Desgaste de revestimentos, MEF, Tubo high collapse, Colapso.

### **FINITE ELEMENT MODELING OF COLLAPSE STRENGTH IN A WORN TUBE**

**ABSTRACT:** This work performs a comparison between the experimental response of a high collapse tube tested by Moreira Junior (2009) and the response obtained by using a plane stress Finite Element model. The internal mechanical wear on well casing tubes occurs essentially due to the friction provided by the rotation of the drilling column during drilling or sliding caused by maneuvering operations in the well. The problem of wear on casing tubes can be verified over its lifetime and can lead to a considerable reduction of strength to the

mechanical loads imposed, increasing the risk of failure, especially by external pressure, leading to collapse. It is common to use the Finite Element Method to modeling in structural mechanics, such as the analysis of thick tubes subjected to external pressure. Regarding the proposed modeling, it is adopted an elastoplastic law for the steel, the conditions of test in hyperbaric chamber are represented in the plane boundary constraints, and the wear groove reduces the thickness by 20%. For the perfect tube, the collapse pressure was higher than the value predicted by API (American Petroleum Institute) codes, because the tube is made of a premium steel alloy, performing better than conventional products. Taking the wear into account, and applying the experimental collapse pressure, it is observed that the von Mises equivalent stress on the tube wall reaches the ultimate tensile stress of the steel, leading to stress concentration around the groove, as identified by the author. The analysis highlights the potential of 2-D numerical modeling for tubes under pressure, providing adequate results at a low computational cost, being useful to support destructive tests.

**KEYWORDS:** Petroleum wells, Casing wear, FEM, High collapse tube, Collapse.

## INTRODUÇÃO

Ao longo de todos os processos pertinentes a vida útil de um poço de petróleo, o desgaste mecânico do sistema de revestimento se faz presente. Este problema é ocasionado, quase que em sua totalidade, pela rotação ou deslizamento da coluna de perfuração. O fenômeno do desgaste é originado pela fricção entre o revestimento e as juntas de conexão (*tool joints*) dos tubos de perfuração que compõem a coluna de perfuração, provocando a perda de espessura da parede dos tubulares, favorecendo a diminuição da resistência mecânica do revestimento às solicitações, muitas vezes combinadas, podendo induzi-lo ao colapso.

O desgaste no revestimento gera uma concentração elevada de tensões, por isso torna-se importante o conhecimento deste fenômeno, bem como as suas causas em elementos estruturais com tubulares de revestimentos de poços de petróleo, como o colapso. De acordo com Timoshenko e Gere (1936), o fenômeno de colapso é entendido como a transição entre um comportamento de estabilidade para uma condição repentina de instabilidade do material sujeito a esforços que os levam a essa condição.

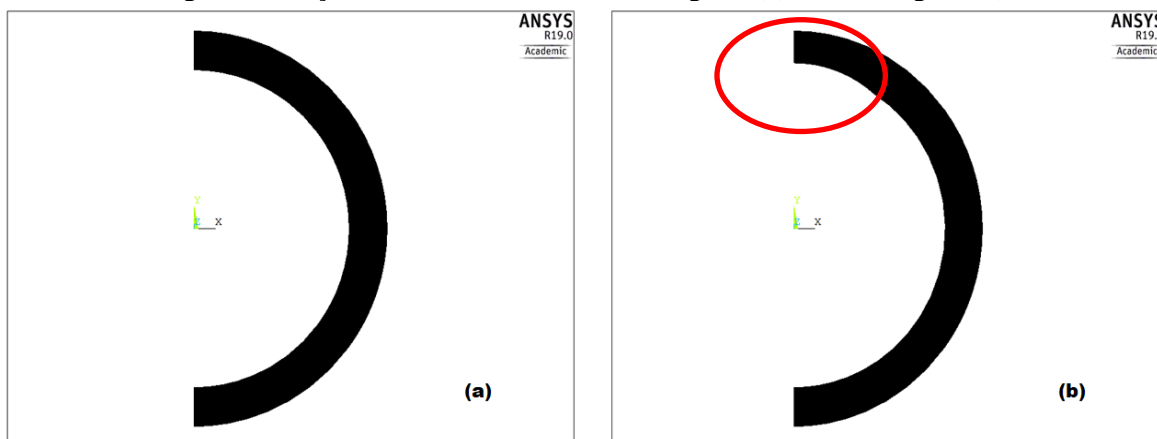
O presente trabalho busca uma avaliação numérica da resistência ao colapso de um modelo experimental representado por um tubo de revestimento *high collapse* internamente desgastado, ensaiado por Moreira Junior (2009). Propõe-se a modelagem numérica via Método dos Elementos Finitos (MEF), em Estado Plano de Tensões, de uma situação de ensaio em câmara hiperbárica, no qual o tubo é engastado em apenas uma das extremidades aplicando-se uma pressão hidrostática ao longo de toda a parede externa.

## MATERIAL E MÉTODOS

No presente trabalho a modelagem numérica é executada em Estado Plano de Tensões, representado pela seção transversal do tubo. As simulações são executadas pelo *software* ANSYS Mechanical APDL, versão acadêmica 19.0. Considerando-se a simetria presente no tubo, e visando o menor custo computacional, modela-se apenas metade da seção transversal, sem desgaste (Figura 1a) e com desgaste destacado pelo círculo em vermelho, vide (Figura 1b).

O tubo com grau de aço V-140 HC ensaiado por Moreira Junior (2009) é objeto desta discussão. Este tubo é dividido em 3 porções (pé, meio e ponta), em que o desgaste é usinado apenas nas porções referentes ao pé e meio do tubo, sendo então a ponta representativa do tubo sem desgaste.

Figura 1 – Seção transversal do tubo sem desgaste (a) e com desgaste(b).



Fonte: AUTORES (2018).

As informações do referido tubo são listadas na Tabela 1, na qual D representa o diâmetro externo, t é a espessura e D/t o índice de esbeltez. Apresentam-se os valores nominais das variáveis, bem como os valores medidos no espécime ensaiado, via perfilagem ultrassônica.

Tabela 1- Informações do tubo V-140 HC.

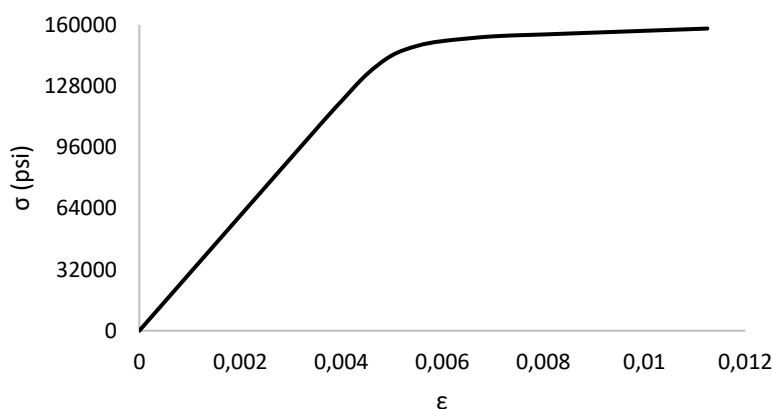
Grau do Aço	Porção do Tubo	D (nominal) (pol)	D (pol)	t (nominal) (pol)	t (pol)	D/t (nominal)	D/t
V-140 HC	Pé	10,75	10,815	0,80	0,822	13,48	13,075
	Meio		10,822		0,816		13,174
	Ponta		10,826		0,828		12,986

Fonte: MOREIRA JUNIOR (2009).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O aço do tubo possui tensão de escoamento de 140000 psi e tensão de ruptura de aproximadamente 158100 psi, obtidos experimentalmente, conforme ilustrado na Figura 2. Este modelo constitutivo é considerado na modelagem, de forma a reproduzir fielmente o comportamento do material do ensaio.

Figura 2 – Gráfico tensão-deformação para o aço ensaiado por Moreira Junior (2009).

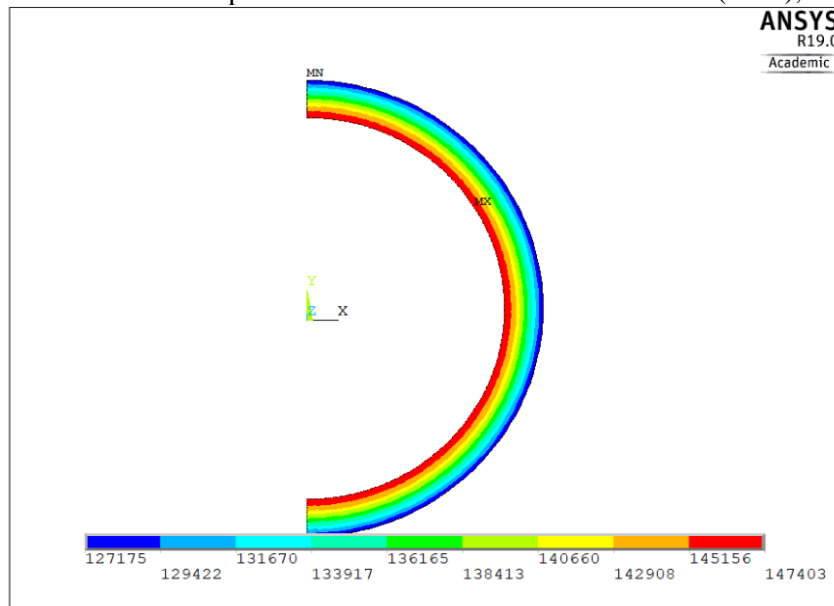


Fonte: AUTORES (2018).

O autor obteve experimentalmente outras propriedades do aço como o módulo de elasticidade no valor de  $3,01 \cdot 10^7$  psi e coeficiente de Poisson igual a 0,29. Aplicando-se no

modelo sem desgaste (porção da ponta do tubo), a pressão de colapso de 21929 psi, obtida experimentalmente, gera-se uma tensão equivalente de von Mises de aproximadamente 147403 psi na parede interna, como ilustrado pela Figura 3, indicando que o tubo falha no regime plástico de colapso. Comparando esse tubo com um tubo de grau API (*American Petroleum Institute*) similar (mesma esbeltez da seção transversal), de resistência ao colapso de 17957,1 psi segundo a formulação contida na norma API/TR 5C3 (2008), o ganho de resistência é de 18,11%. O grau API de um tubo consiste na classe de resistência do aço que o tubo é feito.

Figura 3 – Nível de tensão na parede interna do tubo de Moreira Junior (2009), sem desgaste.



Fonte: AUTORES (2018).

O mesmo é feito para as porções do tubo que consideram o desgaste, a exemplo da porção intermediária do revestimento, aplicando-se uma pressão externa de 17970 psi obtida no ensaio de Moreira Junior (2009), gerando uma tensão equivalente de von Mises na região do desgaste de 156486 psi, como mostrado na Figura 4. Note que para o tubo íntegro, as tensões geradas se distribuem assimetricamente ao longo da parede do tubo. Já para o tubo desgastado, o vértice da região de desgaste atua como um concentrador de tensões. Todos os valores de tensão alcançados via simulação numérica, relacionados a seus desgastes médios e pressões externas aplicadas, são listados na Tabela 2. Nota-se que todos os níveis de desgaste usinados medidos permanecem menores que os 20% pretendido pelo autor.

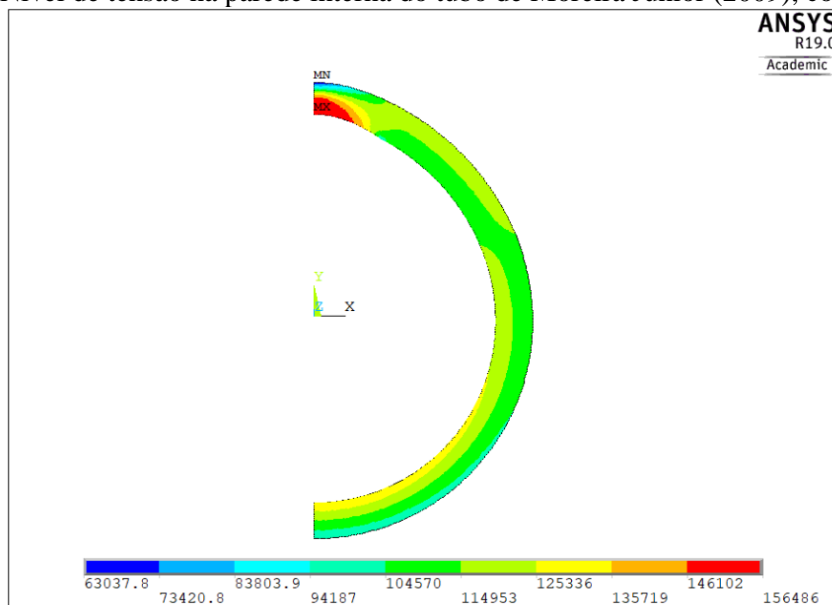
Tabela 2 – Pressões aplicadas e tensões alcançadas na simulação numérica.

Porção do Tubo	Desgaste (pretendido)	Desgastes Médios (medidos)	P (psi)	$\sigma$ (psi)
Pé		16%	17666	158022
Meio	20%	14%	17970	156486
Ponta		0%	21929	147403

Fonte: AUTORES (2018).

Para as porções do tubo que consideram o desgaste, as tensões não ultrapassaram a tensão última de 158091,1 psi, porém foram superiores à tensão de escoamento do aço em questão, adentrando na região de plasticidade do material, assim como o nível de tensão obtido para o tubo sem desgaste. Isso mostra que os revestimentos *high collapse* possuem uma reserva de resistência considerável mesmo se encontrando na região plástica de falha.

Figura 4 – Nível de tensão na parede interna do tubo de Moreira Junior (2009), com desgaste.



Fonte: AUTORES (2018).

## CONCLUSÃO

Observa-se que a abordagem sobre o colapso de tubulares de revestimentos é de grande importância em projetos de poços de petróleo, para garantir a sua integridade mecânica. Para o tubo modelado sem desgaste, nota-se que o mesmo falha em regime plástico, portanto a tensão equivalente de von Mises na parede do tubo se mostra acima da tensão de escoamento. Este mesmo tubo, quando comparado com o tubo API de mesma esbeltez da seção transversal, possui uma resistência ao colapso cerca de 18% maior, mostrando que o tubo em questão é de alta resistência. Para o tubo sem desgaste, as tensões se distribuem axissimetricamente ao longo da parede do tubo. Já para o tubo desgastado, a região de desgaste comporta-se como um concentrador de tensões. Para ambos os tubos as tensões não ultrapassaram a tensão última do aço, porém foram superiores à tensão de escoamento, indicando que há plastificação do material. Isso mostra que os revestimentos *high collapse* possuem uma reserva de resistência considerável, mesmo na região plástica.

## AGRADECIMENTOS

Ao CENPES/PETROBRAS pelo apoio para que esta pesquisa fosse possível.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API/TR 5C3. *Technical report on equations and calculations for casing, tubing, and line pipe used as casing or tubing*. 1 ed. Washington, D.C., 2008.

MOREIRA JUNIOR, N. *Análise experimental e numérica da resistência ao colapso dos tubos de revestimentos sob desgaste interno*. 2012. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Reservatório e de Exploração) – LENEP/CCT/UENF – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Macaé. 2012.

TIMOSHENKO, S.; GERE, J. M. *Theory of elastic stability*. 2. ed. New York: Mc Graw Hill, p. 222-224, 1936.