

9º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



9º CONGRESSO
Brasileiro de P&D em
PETRÓLEO E GÁS

Maceió, AL
de 09 a 11 de novembro
2017

Realização:



ABPG
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE P&D EM
PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Análise Confiabilística de Modelos de Resistência ao Colapso em Tubos Desgastados

AUTORES:

Gabriel Torres da Silveira, Eduardo Toledo de Lima Junior

INSTITUIÇÃO:

Laboratório de Computação Científica e Visualização, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 9º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás - 9º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás - ABPG, no período de 09 a 11 de novembro de 2017, em Maceió/AL. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 9º PDPETRO.

Análise Confiabilística de Modelos de Resistência ao Colapso em Tubos Desgastados

Abstract

During well drilling and production, the casing system is responsible for leaking prevention and structural integrity, presenting high cost in relation to the total well cost. The occurrence of failure events in casing can result in serious environmental, human and material damages. Its structural design must address different load configurations, consisting of internal and external pressures, in addition to axial, bending and torque forces. Among the possible failure modes, the collapse of the tubulars, due to the external pressure, stands out. The collapse strength is strongly dependent on the tube wall thickness, which can be reduced due to the wear of the inner wall, caused by the friction with drilling column during its maneuver. The reliability analysis applied to structural design allows the quantification of the failure probability of the structure for a given limit state, so that it can be predicted still in the design phase. In this kind of analysis, the uncertainties associated to the design variables are considered, based on their modeling as random variables. It is proposed a reliability analysis of the collapse strength of worn pipes, taking into account the randomness of its geometric and mechanical parameters. The evaluation of the loss of strength due to casing wear is carried out based on an analytical model from the literature. The probability of failure is estimated from a semi-analytical method (FORM) and by Monte Carlo simulation, in crude version and with Latin Hypercube Sampling (LHS). Some numerical examples are presented, in order to validate the proposed methodology, and to illustrate its effectiveness.

Keywords: Casing tubes. Structural reliability. Failure probability.

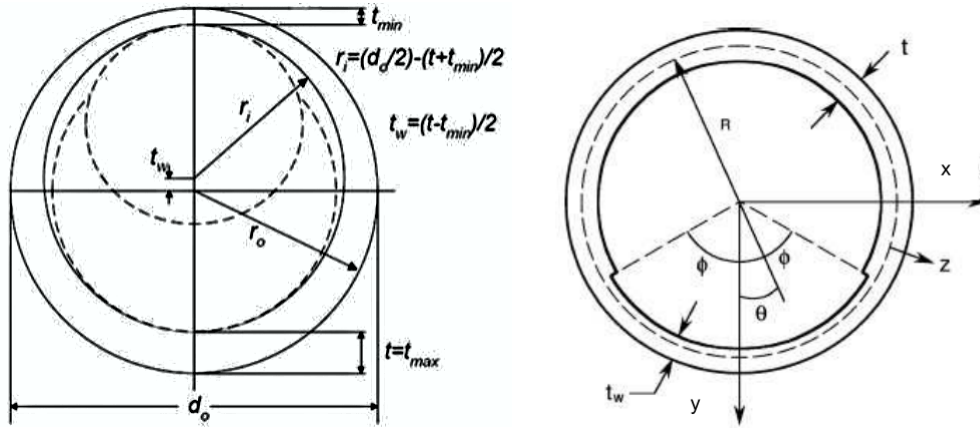
Introdução

No atual contexto da indústria de óleo e gás, os poços situados em campos de exploração ultra profundos estão sujeitos a cenários de carregamentos extremamente severos. Estas cargas podem levar ao comprometimento da integridade estrutural do poço de diferentes maneiras, inviabilizando sua exploração e acarretando em altos custos para a operadora. Dentre os modos de falha existentes, está o colapso, que é caracterizado pela perda da geometria estável do elemento tubular, decorrente da ação de forças externas, em um curto espaço de tempo (MOREIRA JÚNIOR, 2012). Dentre os modelos para cálculo de resistência ao colapso de tubos, podem-se citar o desenvolvido por Klever e Tamano (2004) e o preconizado pela Norma API/TR 5C3 (2008). O primeiro consiste em uma equação de Estado Limite Último (ELU) que leva em consideração parâmetros de manufatura, como as imperfeições de ovalização e excentricidade da seção transversal, além da tensão residual acumulada em decorrência do tratamento térmico na laminação. Já o segundo, é amplamente utilizado pela indústria e possui uma formulação voltada para o Estado Limite de Serviço (ELS), admitindo a razão Diâmetro-Espessura (D/t) como o parâmetro mais significativo (MOREIRA JÚNIOR, 2014).

Visto que os modelos desenvolvidos para análise do colapso dependem fortemente de características geométricas, é de se esperar que alterações sofridas por estas durante a perfuração e por toda a vida útil do sistema de revestimentos levem a valores de resistência diferentes daqueles admitidos na fase de projeto. É o caso do desgaste interno das tubulações devido ao contato com a coluna de perfuração, em que há redução da espessura (t) e por consequência, queda na resistência ao colapso. Este

fenômeno foi analisado por Kuriyama *et al.* (1992), no qual a resistência é uma função da variação da espessura (MOREIRA JÚNIOR, 2014), e posteriormente por Sakakibara *et al.* (2008), em que a amplitude de ângulo de desgaste é admitida como variável do problema. Ambos os modelos estão apresentados na Figura 1.

Figura 1 – Modelo de Tubo Desgastado por Kuriyama *et al.* (1992) e Sakakibara *et al.* (2008)



Fonte: Moreira Júnior, 2014.

Em que d_o , r_o e t são, respectivamente, o diâmetro, raio e espessura nominais do elemento tubular. Ambos os elementos t_{min} e t_w referem-se a mínima espessura observada, enquanto t_w corresponde a transição de um tubo interno de raio r_i . Para Sakakibara *et al.* (2008), o ângulo de desgaste é dado por ϕ e representa a metade da superfície interna desgastada (MOREIRA JÚNIOR, 2014).

Com a finalidade de dimensionamento dos sistemas de revestimento, os modelos anteriormente mencionados se fundamentam em valores nominais (ou determinísticos) para parâmetros físicos dotados de incertezas. A quantificação destas, por meio da teoria da confiabilidade estrutural, permite calcular a probabilidade de falha de um elemento estrutural e ainda, determinar em que momento um estado limite é atingido (SAGRILO, 2003), ou deixa de atender às especificações de projeto (BECK, 2014). Para tal, os parâmetros envolvidos são admitidos no problema como variáveis aleatórias e avaliados segundo uma equação de falha (G), baseada em alguma condição que se deseja verificar.

Esta avaliação é realizada através de algoritmos semi-analíticos, cuja formulação matemática se baseia em encontrar a menor distância entre a origem do espaço normal padrão e a superfície de falha ($G = 0$). Contudo e de maneira geral, problemas de otimização sofrem limitações quanto a natureza da função analisada, podendo convergir para soluções que não são ótimos globais. Maiores detalhes acerca dos métodos podem ser vistos em Melchers (1999).

No intuito de transcender as fraquezas dos métodos semi-analíticos, técnicas de simulação podem ser empregadas para o cálculo da probabilidade de falha através da razão entre o número de cenários de falha (N_f) e o número de cenários analisados (N):

$$Pf = \frac{N_f}{N} \quad (1)$$

Metodologia

Para fins deste trabalho, o modelo adotado para a quantificação da resistência ao colapso é o disposto pela Norma API/TR 5C3 (2008). Este, em função da razão D/t do tubo e da menor tensão de escoamento do aço (yp), resulta na pressão (P) externa atuante necessária para que ocorra a falha da estrutura, a depender do tipo de colapso:

- Colapso por escoamento.

$$P = 2 \cdot yp \cdot \left[\frac{(D/t) - 1}{(D/t)^2} \right], se (D/t) < (D/t)_{yp}. \quad (2)$$

- Colapso plástico.

$$P = yp \cdot \left[\frac{A}{(D/t)} - B \right] - C, se (D/t)_{yp} \leq (D/t) < (D/t)_{pt}. \quad (3)$$

- Colapso de transição.

$$P = yp \cdot \left[\frac{F}{(D/t)} - G \right], se (D/t)_{pt} \leq (D/t) \leq (D/t)_{te}. \quad (4)$$

- Colapso elástico.

$$P = \frac{46.95 \cdot 10^6}{(D/t) \cdot [(D/t) - 1]^2}, se (D/t) > (D/t)_{te}. \quad (5)$$

Em que as variáveis geométricas são dadas em polegadas e as demais, em psi.

Para efeitos de cálculo, as constantes A, B, C, F e G são obtidas pelas Equações 6, 7, 8, 9 e 10, respectivamente.

$$A = 2.8762 + (yp) \cdot 0.10679 \cdot 10^{-5} + (yp^2) \cdot 0.2131 \cdot 10^{-10} - (yp^3) \cdot 0.53132 \cdot 10^{-16}, \quad (6)$$

$$B = 0.026233 + (yp) \cdot 0.50609 \cdot 10^{-6}, \quad (7)$$

$$C = -465.93 + (yp) \cdot 0.030867 - (yp^2) \cdot 0.10483 \cdot 10^{-7} + (yp^3) \cdot 0.36989 \cdot 10^{-13}, \quad (8)$$

$$F = \frac{46.95 \cdot 10^6 \cdot \left[\frac{3 \cdot (B/A)}{2 + (B/A)} \right]^3}{yp \cdot \left[\frac{3 \cdot (B/A)}{2 + (B/A)} - (B/A) \right] \cdot \left[1 - \frac{3 \cdot (B/A)}{2 + (B/A)} \right]^2}, \quad (9)$$

$$G = F \cdot \left(\frac{B}{A}\right) \quad (10)$$

Já os valores limite de esbeltez $(D/t)_{yp}$, $(D/t)_{pt}$ e $(D/t)_{te}$ utilizados para a determinação do tipo de colapso, são resultantes das Equações 11, 12 e 13, respectivamente.

$$(D/t)_{yp} = \frac{\sqrt{(A-2)^2 + 8 \cdot [B + (C/yp)]} + (A-2)}{2 + [B + (C/yp)]}, \quad (11)$$

$$(D/t)_{pt} = \frac{yp \cdot (A-F)}{C + yp \cdot (B-G)}, \quad (12)$$

$$(D/t)_{te} = \frac{2 + (B/A)}{3 \cdot (B/A)}. \quad (13)$$

Neste trabalho, para o cálculo da resistência ao colapso em tubos desgastados, utiliza-se a proposta de Kuriyama *et al.* (1992), que consiste numa penalização da resistência original através da razão entre a formulação de Lamé para a tensão circunferencial num tubo íntegro e seu ajuste, a fim de levar em consideração o dimensionamento da parede desgastada (MOREIRA JÚNIOR, 2012). De tal modo, a resistência ao colapso de um tubo, na presença de desgaste, se dá por:

$$P_{des} = P/K \quad (14)$$

Em que o fator redutor (K) da pressão de colapso de uma tubulação não desgastada (P) presente na Equação 14 é obtido pela Equação 15.

$$K = \frac{2 \cdot yp \cdot \left[\frac{(D/t) - 1}{(D/t)^2} \right]}{yp \cdot \left(\frac{r_i^2 + r_o^2}{2 \cdot r_o^2} \right) \cdot \left[\frac{(r_i^2 + r_o^2 - t_w^2)^2 - 4 \cdot r_i^2 \cdot r_o^2}{(r_o^2 - t_w^2)^2 - r_i^2 \cdot (r_i - 2 \cdot t_w)^2} \right]} \quad (15)$$

Buscando evidenciar o risco do desgaste interno frente a integridade estrutural do poço, compara-se a resistência ao colapso determinística do elemento tubular intacto com sua resistência ao colapso, também determinística, na presença de deterioração. Para tal, o nível de desgaste varia de 0% a 45% da espessura nominal (t) e são considerados três tubos, apresentados na Tabela 1. O resultado é mostrado na Figura 2.

Tabela 1 – Elementos Tubulares

Tubo	Grau de Aço	(D/t)	Diâmetro Externo (D)
1	N-80	18.09	5 1/2"
2	N-80	17.33	7"
3	P-110	17.33	7"

Na análise probabilística, a função de falha escolhida (Equação 16) relaciona a resistência confiabilística do tubo desgastado (P_{Conf}^{Des}) com a resistência determinística do tubo íntegro (P_{Det}). O primeiro termo é calculado com base no modelo de colapso API, penalizado pelo fator de redução proposto por Kuriyama *et al.* (1992), e levando em conta a aleatoriedade das variáveis. O termo determinístico é obtido diretamente pelo modelo API, com uso dos valores nominais das variáveis. Assim, calcula-se a probabilidade de que a resistência do tubo desgastado seja menor que o valor determinístico utilizado na prática de projeto, o qual é calculado sem o conhecimento do nível de desgaste e das incertezas associadas às variáveis de projeto. Entende-se que o termo P_{Conf}^{Des} quantifica a resistência do tubo de forma mais precisa. A probabilidade de falha é estimada pelos métodos FORM, Monte Carlo – Tradicional e sua variante com amostragem por Hipercubo Latino.

$$G(D, t, \sigma) = P_{Conf}^{Des} - P_{Det} \quad (16)$$

As variáveis do problema são Gaussianas, com média (μ) e coeficiente de variação (CV) apresentados na Tabela 2, advindos da Norma API/TR 5C3 (2008), Anexo F. Sendo D_N , t_N e yp_N , os respectivos valores nominais de cada parâmetro.

Tabela 2 – Parâmetros Estatísticos

Tubo	D_μ	D_{cv}	t_μ	t_{cv}	yp_μ	yp_{cv}
1	$1.0059 \cdot D_N$	0.001810	$1.0069 \cdot t_N$	0.0259	$1.21 \cdot yp_N$	0.0511
2	$1.0059 \cdot D_N$	0.001810	$1.0069 \cdot t_N$	0.0259	$1.21 \cdot yp_N$	0.0511
3	$1.0059 \cdot D_N$	0.001810	$1.0069 \cdot t_N$	0.0259	$1.09 \cdot yp_N$	0.0377

Os resultados obtidos semi analiticamente, em termos de índice de confiabilidade, são convertidos em probabilidades de falha através da Equação 17.

$$Pf = \Phi(-\beta) \quad (17)$$

Em que Φ é o operador matemático para a função de distribuição cumulativa normal.

Ainda, o desempenho de cada método é comparado através do tempo médio empregado por cada um para concluir a avaliação.

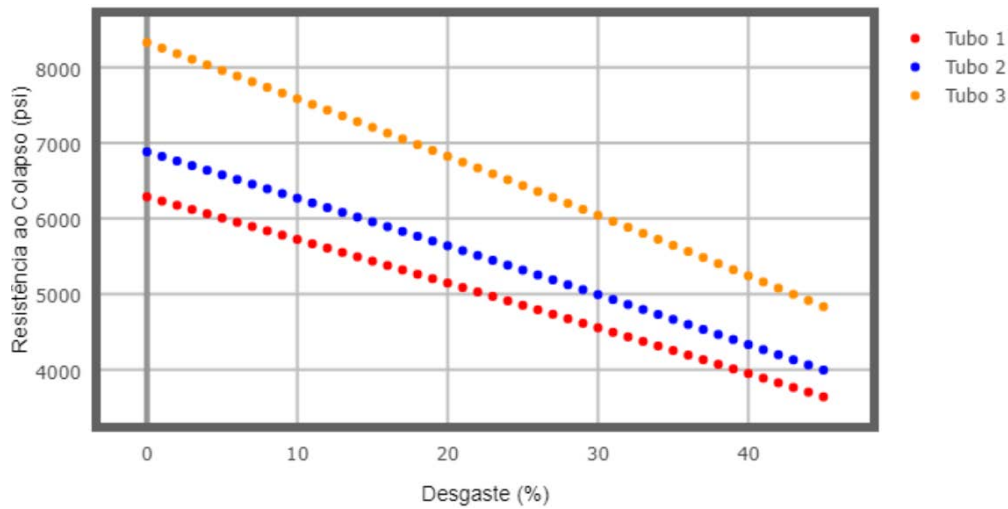
Resultados e Discussão

O decréscimo da resistência ao colapso de cada tubo em razão do aumento do nível de desgaste é verificado na Figura 2.

Apesar do decréscimo da pressão necessária para que ocorra a falha se apresentar linear, as probabilidades de falha crescem quase que exponencialmente até atingirem 100%, para um desgaste em torno de 30%, como observado na Figura 3. Os valores de Pf dos tubos 1 e 2 são muito próximos, visto que são feitos do mesmo aço, sendo a pequena diferença associada aos valores de diâmetro e espessura de cada um deles. Já o tubo 3 apresenta Pf superior aos demais, sob qualquer nível de desgaste, em decorrência do comportamento estatístico da tensão de escoamento no grau P-110. Esta

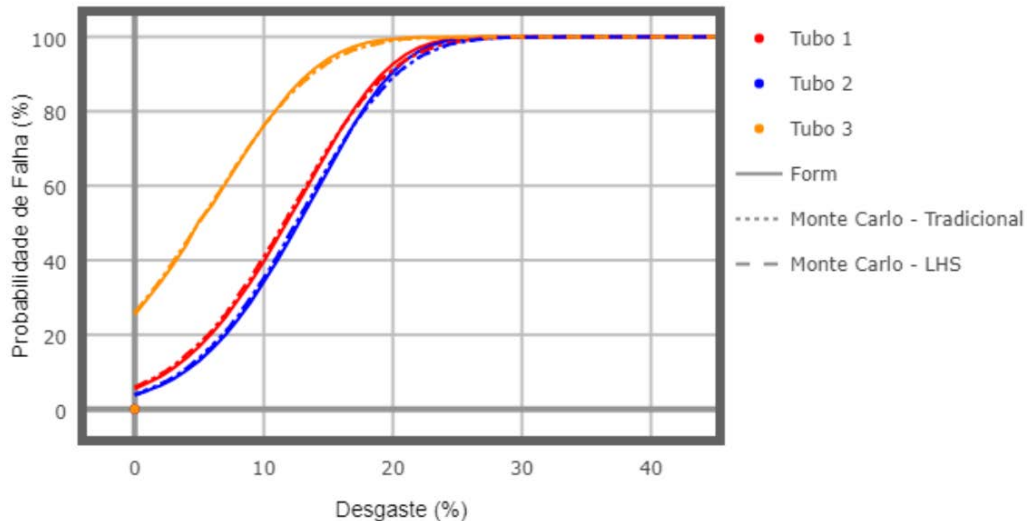
apresenta um coeficiente de variação próximo ao do grau N-80, porém uma média apenas 9% superior em relação ao valor nominal, em comparação aos 21% encontrados no grau N-80.

Figura 2 – Resistência ao Colapso em Função do Desgaste



Fonte: elaborado pelos autores.

Figura 3 – Probabilidade de Falha em Função do Desgaste



Fonte: elaborado pelos autores.

É válido salientar que os métodos semi-analíticos convergiram em conjunto com os de simulação, apesar do comportamento fortemente não linear da função de falha, tornando sua utilização preferível, já que seu custo computacional é baixo e o tempo necessário para a obtenção de boas aproximações para a solução é menor do que o necessário para a outra classe de métodos, como mostrado a seguir.

Tabela 3 – Comparação do Tempo Médio Gasto

Método	Tempo Médio (s)
FORM	10.2799
Monte Carlo - Tradicional	1053.5810
Monte Carlo - Hipercubo Latino	164.5271

Conclusões

Embora a função de falha escolhida (16) não leve em consideração a carga de colapso atuante, o comparativo entre a resistência originalmente projetada para o sistema de revestimentos e aquela ofertada após o desgaste evidencia o risco ao qual os projetos de exploração de óleo e gás estão sujeitos, em razão de um evento mecânico comumente observado pela Indústria. Enfatiza-se que a abordagem via Estado Limite de Serviço (ELS) proposta pela Norma API/TR 5C3 (2008) possui um caráter conservador, fornecendo valores de resistência menores do que os reais.

De tal modo, afirma-se que embora o desgaste interno resulte no decréscimo da resistência e no aumento da probabilidade de falha do elemento estrutural, os valores apresentados nas Figuras 2 e 3 se apresentam muito severos, servindo apenas como um indicador do risco associado ao problema e da necessidade de se adotar modelos numéricos que levem em consideração o Estado Limite Último (ELU), como o proposto por Klever e Tamano (2004), resultando em retratos mais fidedignos das reais condições enfrentadas pelos sistemas de revestimento e na redução dos custos operacionais. Destaca-se ainda, a importância da disponibilidade de séries de dados de produção, por parte do fornecedor, a fim de que as incertezas intrínsecas a um produto ou lote específico sejam devidamente incorporadas à prática de projeto.

Agradecimentos

Em virtude do apoio financeiro e da disponibilização de infraestrutura para a produção deste trabalho, agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e ao Laboratório de Computação Científica e Visualização (LCCV), respectivamente.

Referências Bibliográficas

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. *API/TR 5C3: Technical Report on Equations and Calculations for Casing, Tubing, and Line Pipe Used as Casing or Tubing; and Performance Properties Tables for Casing and Tubing*, 2008.

BECK, A.T. *Curso de Confiabilidade Estrutural: notas de aula*. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

KLEVER, F. J., TAMANO, T. *A New OCTG Strength Equation for Collapse Under Combined Loads*, Houston. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, SPE 90904, 2004.

KURIYAMA, Y., TSUKANO, Y., MIMAKI, T., YONEZAWA, T. *Effect of Wear and Bending on Casing Collapse Strength*, Washington D.C., SPE Annual Technical Conference and Exhibition, SPE 24597, 1992.

MELCHERS, R. E. *Structural reliability analysis and prediction*. John Wiley and Sons, 1999.

MOREIRA JÚNIOR, N. *Análise Experimental e Numérica da Resistência ao Colapso dos Tubos de Revestimento Sob Desgaste Interno*. Centro de Ciência e Tecnologia - Universidade Estadual do Norte Fluminense, Rio de Janeiro, 2012.

SAGRILO, L.V.S. *Confiabilidade estrutural: notas de aula*. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.