

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:

Modelagem Numérica de Tubos Sob Desgaste Interno Submetidos ao Colapso

AUTORES:

Gustavo Teixeira da Silva¹, Lucas Pereira de Gouveia¹, Eduardo Toledo de Lima Junior¹

INSTITUIÇÃO:

¹Universidade Federal de Alagoas

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 8º 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.

MODELAGEM NUMÉRICA DE TUBOS SOB DESGASTE INTERNO SUBMETIDOS AO COLAPSO

Resumo

O desgaste interno de revestimentos em poços do petróleo é pertinente aos processos de perfuração e acontece devido à ação da coluna de perfuração rotativa, causando atrito com o revestimento. Esse tipo de evento é indesejado, porém inevitável, podendo levar à diminuição considerável da resistência do revestimento à pressão externa, aumentando a probabilidade de colapso do poço. O desgaste pode acontecer tanto em poços considerados verticais, em poços direcionais ou mesmo em poços com grande tortuosidade. Este problema é mais comum em poços que possuem grandes profundidades, pois o peso da coluna de perfuração sobre a broca é maior e isso pode induzir a grandes desvios do poço e acentuadas flexões na coluna, provocando cargas laterais mais elevadas. Associado a isso, o principal parâmetro que contribui para esse desgaste é o ganho de ângulo do poço, medido a partir do chamado *dogleg severity*. Existem modelos de previsão da resistência ao colapso de tubos de revestimento desgastados descritos na literatura, bem como normas para padronização de ensaios e classificação de tubos de perfuração, como as normas API/TR 5C3 (2008) e API 7CW (2015). Para resolução de problemas de engenharia é muito comum o uso de métodos numéricos, tal como o método dos elementos finitos (MEF), o qual é capaz de fornecer respostas com boa precisão em problemas de mecânica estrutural, a um custo computacional adequado, tornando-o uma ferramenta útil para ser aplicada em problemas de resistência de tubos de revestimento. Para a modelagem numérica faz-se o uso do *software ANSYS Mechanical*. O trabalho propõe uma análise numérica paramétrica da resistência ao colapso, variando-se os níveis de desgaste do tubo entre 3% e 18%, intervalo de valores coerentes com a prática de projetos de poços. O modelo numérico é validado para um tubo perfeito, e aplicado ao estudo de redução das resistências ao colapso em função dos níveis de desgaste. O material considerado é elástico linear. No modelo desgastado, nota-se uma maior concentração de tensões na região crítica do desgaste, ao contrário do tubo íntegro, no qual as tensões se distribuem de maneira uniforme ao longo da circunferência, de forma axissimétrica. Um polinômio foi ajustado para a estimativa das resistências ao colapso em função dos níveis de desgaste simulados. Observou-se um decaimento não linear da resistência ao colapso em função dos níveis de desgaste considerados.

Introdução

Os revestimentos em poços de petróleo desempenham um papel estrutural de grande importância em atividades como a perfuração e completção. O revestimento possui a função de mitigar eventos indesejados como colapso das paredes, proporcionando o isolamento hidráulico do poço, para que não haja invasão de fluidos da formação para seu interior, ou a migração dos fluidos de completção em direção à formação (BOURGOYNE, 1991).

Segundo Rocha *et al.* (2011), um outro problema pertinente aos processos de perfuração de poços de petróleo é o desgaste do revestimento, muitas vezes ocasionado pelo ganho excessivo de ângulo, também conhecido como *dogleg*, provocando desvios em sua trajetória prevista originalmente, associado à rotação da coluna de perfuração, que causa atrito com a coluna de revestimento. Mais especificamente, são as juntas que conectam os tubos de perfuração, as chamadas *tool joints*, que entram em contato com a parede interna dos tubulares assentados em fases anteriores do sistema de revestimento. A remoção de material ocasionada nesse contato pode reduzir significativamente a espessura, reduzindo sua resistência mecânica. Um dos principais problemas estruturais em poços de petróleo, principalmente nos de grande profundidade, é o colapso devido à pressão externa. Na

maioria dos casos o colapso pode induzir ao fechamento do poço e consequente aprisionamento da coluna de perfuração ou completação, até mesmo levar a parada total da perfuração ou produção.

O fenômeno de colapso é caracterizado pela transição entre um comportamento de estabilidade para uma condição repentina de instabilidade do material sujeito a esforços que os levam a essa condição (TIMOSHENKO; GERE, 1936).

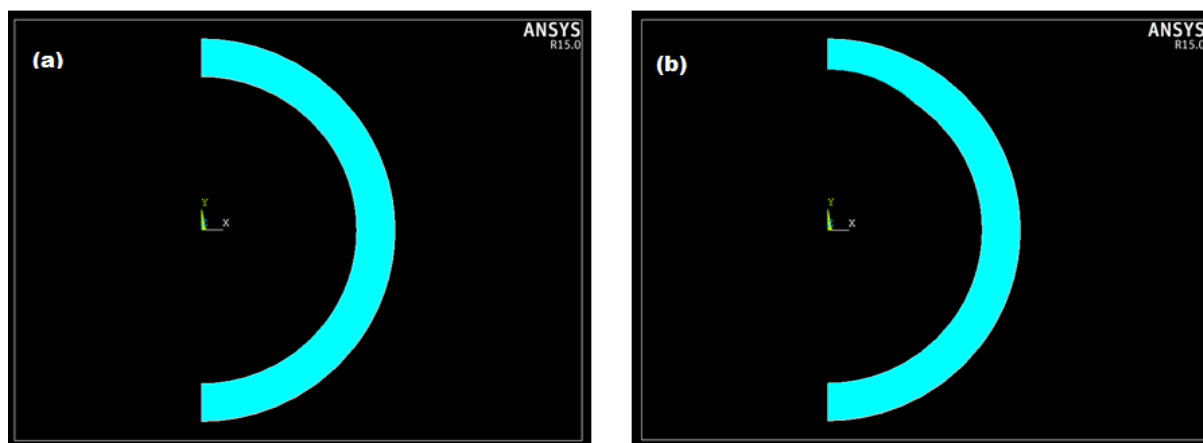
Existem normas que contemplam o dimensionamento de elementos tubulares, uma delas é a API/TR 5C3 (2008), que define os modelos de resistência de tubos e conexões, quando sujeitos à pressão interna, pressão externa e força axial. No caso de pressão externa, definem-se quatro regimes, a saber: colapso por escoamento, que ocorre quando as tensões no tubo superam a tensão de escoamento do material; colapso plástico, que acontece quando os níveis de tensão se encontram entre o limite de proporcionalidade e a tensão de escoamento; colapso elástico, que ocorre ainda na região linear, sob baixos níveis de tensão, sendo um fenômeno predominantemente geométrico; e o colapso de transição, definido como um regime intermediário entre as condições de colapso plástico e elástico. O regime de colapso previsto para um tudo depende de sua esbeltez, dada pela relação entre diâmetro externo (D), a espessura (t), e do grau do aço adotado. Outra norma a ser citada é a API 7CW (2015), que trata da preparação e execução de ensaios com tubos desgastados internamente.

O presente trabalho busca avaliar a resistência ao colapso de tubos de revestimento internamente desgastados, empregados em poços de petróleo. Faz-se uma modelagem numérica via MEF, para análise paramétrica da resistência ao colapso de um tubo desgastado, em níveis usuais, obtidos na literatura. A modelagem é executada aplicando o modelo de desgaste contido na norma API 7CW (2015).

Metodologia

A modelagem proposta no presente trabalho é bidimensional, em estado plano de tensões, tomando-se o aço como elástico linear. Sendo assim, o modelo é representado pela seção transversal do tubo. Por questões de simetria, visando um menor custo computacional, modela-se apenas metade da seção, a princípio sem desgaste, e com desgaste na porção superior, vide Figuras 1(a) e 1(b), respectivamente. As simulações foram executadas no *software* ANSYS *Mechanical*, versão 15.0. Inicialmente o modelo foi validado, com a escolha adequada do tipo de elemento, número de elementos, malha e condições de contorno.

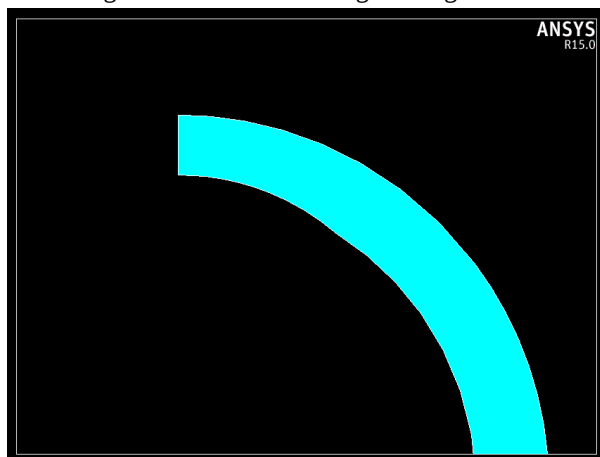
Figura 1 – Geometrias das porções das seções transversais dos tubos sem desgaste (a), com desgaste (b).



Fonte: AUTOR (2017).

Na Figura 2, o desgaste é evidenciado através de um aumento localizado na região superior que representa o modelo.

Figura 2 – Aumento da região desgastada.



Fonte: AUTOR (2017).

Os dados do tubo analisado estão contidos na Tabela 1, na qual ρ o peso linear do tubo e $R_{colapso}$ a resistência ao colapso prevista pela API/TR 5C3(2008), segundo o regime de colapso por escoamento. Adota-se um aço de grau API T95, que possui limite de escoamento mínimo de 95000 psi. Este é o valor máximo de tensão admissível na parede interna do tubo, de acordo com o modelo da API supracitado.

Tabela 1 - Algumas informações acerca do tubo escolhido T95.

Grau do Aço	D (pol)	t (pol)	D/t	ρ (lb/pé)	$R_{colapso}$ (psi)
T95	7 5/8	3/4	10,17	55,3	16850

Fonte: API/TR 5C3 (2008).

A escolha do tubo de revestimento é pautada na discussão acerca do parâmetro D/t . Tomou-se o cuidado de garantir que o tubo, mesmo para o nível de desgaste máximo, ainda se encontre no regime de falha por escoamento, o qual é limitado pelo valor de $D/t < 12,44$, para o grau de aço em questão. O estudo paramétrico deve avaliar a resistência ao colapso do tubo submetido a desgastes entre 3% e 18%, como mostrado na Tabela 2, cuja *tool joint* possui diâmetro de 5 pol, como mostrado na Tabela 2. O critério de falha estabelecido neste trabalho consiste em alcançar a tensão equivalente von Mises de 95000 psi na parede interna do tubo com e sem desgaste. Na Tabela 2 são indicados também os valores máximos de profundidade de desgaste associados ao desgaste em %.

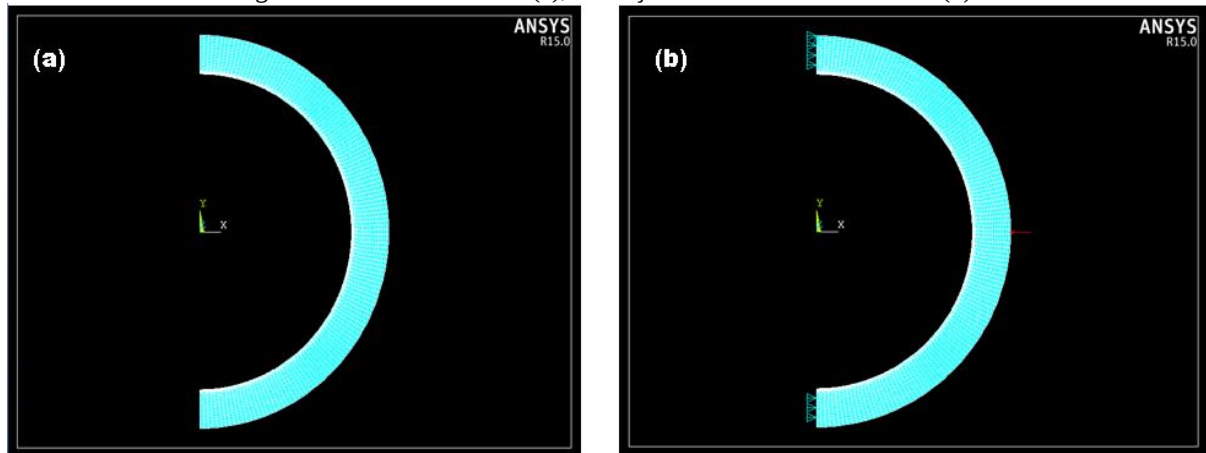
Tabela 2 - Percentuais e valores em polegadas dos sucessivos desgastes da parede interna do tubo modelado.

δ (%)	0	3	6	9	12	15	18
δ (pol)	0	0,0225	0,0450	0,0675	0,0900	0,1125	0,1350

Fonte: AUTOR (2017).

O elemento escolhido para as simulações foi o *Solid183* (PLANE183 2-D 8 node *Structural Solid*), de forma quadrilateral e aproximação quadrática em deslocamentos. Os nós do elemento possuem 2 graus de liberdade no plano, UX e UY, são mapeadas as translações horizontal e vertical. Deve-se salientar que das malhas consideradas adequadas, algumas das malhas adotadas necessitaram de elementos triangulares, como para os níveis de desgaste de 12%, 15% e 18%. Os demais utilizaram somente elementos quadrangulares. A malha é refinada, tanto ao longo de toda sua área, quanto na linha que representa a parede interna da tubulação, local de concentração das maiores tensões no tubo submetido ao colapso. Para o modelo consideram-se condições de contorno conforme a Figura 3(b), que correspondem à restrição do movimento horizontal nas faces do corte simétrico. No vértice superior atribui-se um *keypoint*, o qual é restrito na direção vertical, retirando-se a singularidade da matriz de rigidez do problema. Ao longo da superfície externa, aplica-se um carregamento hidrostático.

Figura 3 – Malha escolhida (a), condições de contorno do modelo (b).

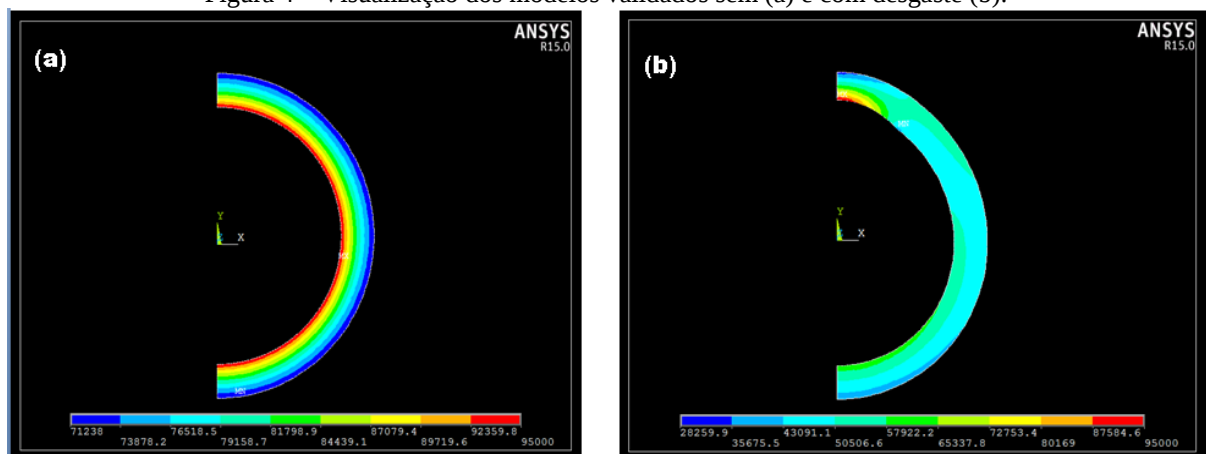


Fonte: AUTOR (2017).

Para estudo de malha do modelo sem desgaste, deve-se ter como tensão externa aplicada 16850 psi, para que se possa produzir uma tensão na parede interna do tubo de revestimento de 95000 psi, como na Figura 4(a). Na análise de convergência, a malha estável adotada possui 4935 elementos e 15420 nós. Já no estudo de sensibilidade de malha do modelo desgastado, considera-se a geometria de menor espessura, com nível de desgaste de 18%, como ilustrado na Figura 4(b). Essa escolha se deve pelo fato da geometria possuir aresta mais acentuada, o que poderia gerar concentração de tensões anormalmente altas. Este modelo converge com uma discretização de 14634 nós e 4697 elementos.

Vale ressaltar que o valor da resistência em cada um dos modelos desgastados foi estimado por meio de uma única simulação, feita através da malha de elementos finitos obtida após um teste de convergência de malha, que consiste na procura por uma discretização a qual o valor da tensão na parede interna obtida se estabilize com o aumento da discretização. Usou-se o valor da resistência ao colapso do tubo sem desgaste, que é de 16850 psi, como condição de carregamento hidrostático externo em todos os níveis de desgaste, encontrando um nível de tensão de Von Mises na parede interna do tubo. Nos modelos de tubo desgastados, obtém-se valores de tensão superiores a 95000 psi. No critério de resistência adotado neste trabalho, busca-se o valor de pressão aplicada que gere o valor limite de tensão estabelecido, encontrando-se, assim, um fator de redução da resistência ao colapso para cada nível de desgaste.

Figura 4 – Visualização dos modelos validados sem (a) e com desgaste (b).

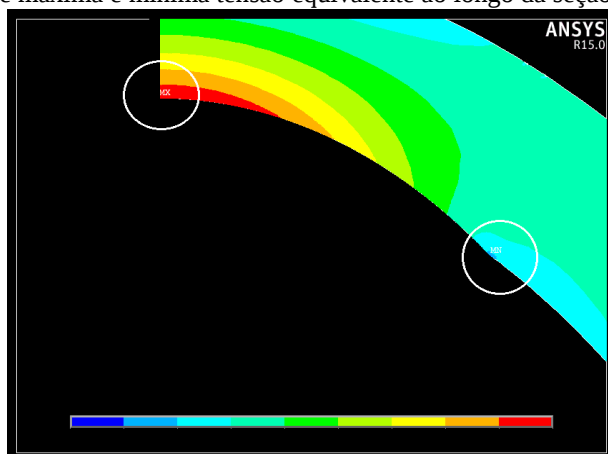


Fonte: AUTOR (2017).

A Figura 4(a) ilustra as tensões de Von Mises para o tubo íntegro, ao passo que na Figura 4(b) são traçados os valores de tensão no tubo com desgaste de 18%. Considerando o desgaste, é verificado que as maiores tensões ocorrem no ponto mais profundo da região desgastada, já as tensões mínimas

aparecem no vértice associado ao último ponto de contato da *tool joint*, conforme a Figura 5, sendo MX (em vermelho), o local de máxima tensão, e MN (em azul), o local onde ocorre mínima tensão.

Figura 5 – Locais de máxima e mínima tensão equivalente ao longo da seção do tubo desgastado.



Fonte: AUTOR (2017).

Resultados e Discussão

Após as simulações, na Tabela 3 compilam-se os valores alcançados das resistências estimadas através do estudo citado anteriormente. Nesta Tabela podem-se encontrar também as reduções percentuais das resistências em comparação com o tubo não desgastado.

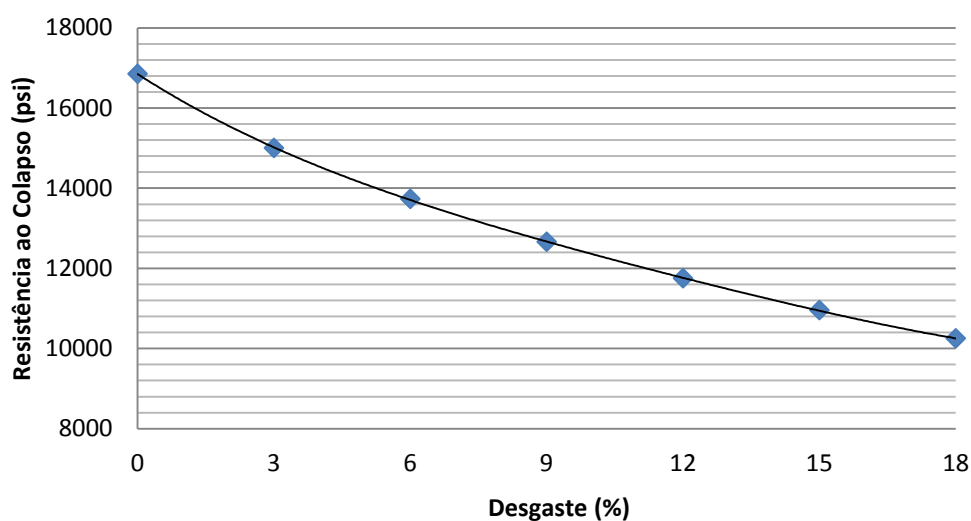
Tabela 3 – Resistências ao colapso calculada pós-teste pela relação de proporcionalidade ($R_{yp\ calc}$), estimadas para cada nível de desgaste interno do tubo (δ) considerado e suas respectivas reduções percentuais em comparação ao tubo não desgastado.

δ (%)	3	6	9	12	15	18
$R_{yp\ calc}$ (psi)	14997,56	13721,62	12656,75	11746,30	10952,86	10250,64
Redução (%)	11	18,56	24,88	30,30	35	39,16

Fonte: AUTOR (2017).

Esses dados são suficientes para se ajustar uma curva que correlacione o decréscimo das resistências ao colapso com o aumento gradativo dos níveis de desgaste interno do tubo, assim como ilustrado na Figura 6.

Figura 6 – Gráfico de nível de desgaste interno *versus* decréscimo da resistência ao colapso.



Fonte: AUTOR (2017).

Nota-se uma queda mais acentuada da pressão de colapso para valores de desgaste até 6%, acima a redução de resistência se mostra linear.

A relação entre a resistência ao colapso e o grau de desgaste foi aproximada por um polinômio do 4º grau, cujo Coeficiente de Pearson no ajuste resultou em 0,997, expresso de acordo com a Equação 1.

$$R_{yp}(\delta) = 0,0493 \cdot \delta^4 - 2,3677 \cdot \delta^3 + 46,837 \cdot \delta^2 - 729,92 \cdot \delta + 16850 \quad (1)$$

Conclusões

Observou-se que, de fato, a abordagem sobre colapso de elementos tubulares é de vital importância em projetos de poços de petróleo, pois se trata de um assunto fundamental para garantir a integridade mecânica de revestimentos submetidos à pressão externa.

O MEF se mostrou uma boa ferramenta para análise de mecânica estrutural, como a resistência ao colapso de tubos de revestimento, isso porque em estado plano de tensões, o valor da tensão equivalente de von Mises para o tubo não desgastado é obtido de maneira exata, isso mostra que as escolhas do tipo de elemento e discretização de malha foram adequadas.

O modelo desgastado possibilitou uma visualização dos níveis de tensão equivalente de von Mises no local do desgaste, obtendo tensões mais elevadas no vértice inferior do corte superior, o que já era de se prever, já que seria o local onde existem esforços de flexão.

Para os níveis de desgaste, os valores das reduções de resistência ao colapso se mantiveram bem ajustados por um polinômio de 4º grau, isso torna a Equação 1 uma boa estimativa das resistências ao colapso para todo o intervalo compreendido entre 0% e 18%, para o tubo em questão.

Agradecimentos

Ao Laboratório de Computação Científica e Visualização (LCCV-UFAL), pelo suporte e infraestrutura disponibilizados.

Referências Bibliográficas

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.

API 7CW. *Casing wear tests*. 1 ed. Washington, D.C., 2015.

BOURGOYNE, A. T.; MILLHEIM, K. K. CHENEVERT, M. E.; YOUNG, F. S. *Applied drilling engineering*. Richardson: Society of Petroleum, 1991.

ROCHA, L. A. S.; AZUAGA, D.; ANDRADE, R. et al. *Perfuração direcional*. 3 ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2011.

TIMOSHENKO, S.; GERE, J. M. *Theory of elastic stability*. New York: McGraw Hill, 1936.