

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:

ESTUDO DE CENÁRIOS DE COLAPSO PARA FALHA EM REVESTIMENTO DE POÇOS DE PETRÓLEO EMPREGANDO FERRAMENTA COMPUTACIONAL

AUTORES:

André Felipe Reis de Araujo Vitorino, João Paulo Lima Santos, Jeremias Christian Honorato Costa, Teófanés Vitor Silva

INSTITUIÇÃO:

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.

ESTUDO DE CENÁRIOS DE COLAPSO PARA FALHA EM REVESTIMENTO DE POÇOS DE PETRÓLEO EMPREGANDO FERRAMENTA COMPUTACIONAL

Abstract

In the literature, it is possible to find several records' variation of pressure level applied in different stages of an oil and natural gas well's life. Events such as formation and subsidence may, during production, increase external pressure around the casing. If the internal pressure is sufficiently overcome, a fault known as collapse may occur. It tends to change the shape of the structure, which is responsible for supporting the side walls and insulating it from external environment. The casing is one of the costliest well sections, which, considering financial instability in the sector plus the risk environments present in the pre-salt (main hydrocarbon supply region in Brazil), should be projected through several studies that prove the given field technical and economic feasibility. A computational tool called *CWELL* was developed to analyze wells projects. This tool analyzes external forces in the different stages of installation, drilling and service. Environments due to high pressures and temperatures and subject to corrosion also are considered, as a module to analyze Casing While Drilling. Thus, the structural integrity evaluation of casing columns can be performed using numerical strategies based on consolidated bibliographic references such as the *API bulletin 5C3*. They have been implemented in the computer language *C++* with a *Qt creator* graphical interface and this software requires from users the input data, which will be fundamental to the study at same time that parameters as diameter and thickness influence the type of collapse. Then, representative environmental efforts calculations are used. They may provide, for example, the triaxial load capacity diagram, which derives from the Von Misses equation and, graphically, endorses the casing sizing. In addition, the risk scenarios for collapse failure can be considered, such as the full evacuation to air one, which would allow the increasing between the pressure difference. In this way, the software intends to provide a safety for well casing projection, including possible risks of critical collapse scenarios, which gives the interested confidence to verify the well viability.

Introdução

Elaborar um projeto de poço de petróleo e gás natural é uma das fundamentais etapas para sua construção (ROCHA & AZEVEDO, 2009). Considerando a histórica demanda por essas *commodities*, reservatórios que fazem necessários poços de menor dificuldade operacional (exemplificados por rasas profundidades ou por exigir pequenos desvios) já foram explorados, restando apenas situações mais complexas (PAZ, 2013). Cenários que se tornaram ainda mais comuns considerando a exploração na região de pré-sal, cujos reservatórios exigem diferentes desafios geológicos e tecnológicos (PINHEIRO *et al*, 2015). As dificuldades criadas não podem, contudo, servir de impedimento para a indústria, a qual atualmente é dependente da produção decorrente desses campos de acordo com relatórios da ANP, 2017.

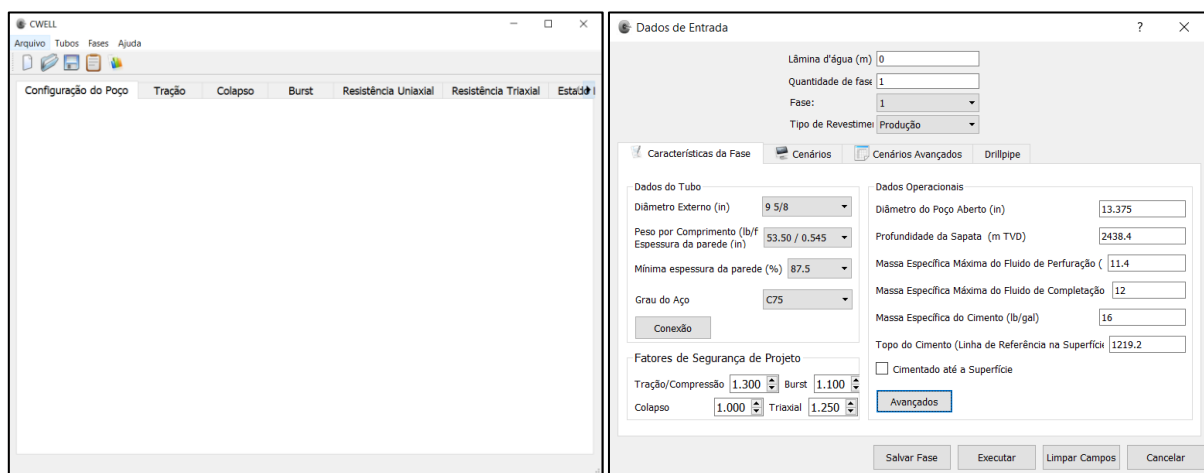
Dessa forma, a investigação relativa ao projeto de poços merece uma atenção ainda maior e, nesse processo, é necessária, segundo BOURGOYNE JR. *et al*, 1991, uma atenção especial para o revestimento. O mesmo autor considera essa seção como uma das mais dispendiosas e a define como aquela que isola o poço do meio externo, fazendo com que não exista contaminação do meio ambiente através da fuga de fluidos, além de sustentar as paredes do poço. Isso torna, segundo AADNØY, 2010, a análise do revestimento uma das atividades mais críticas no projeto do poço. Com toda a arquitetura e a complexa situação que o envolve, são necessárias práticas inovadoras de modelagem geomecânicas para o aperfeiçoamento do mesmo (PINHEIRO *et al*, 2015), as quais já agem em novas ferramentas que visam o futuro da indústria, como exemplifica STRØM *et al*, 2008.

Surge como mais um desses instrumentos o *software Casing Well* (CWELL). Trata-se de uma ferramenta computacional que realiza a investigação de esforços externos e internos aplicados em revestimentos de poços de petróleo e gás natural. Sendo que, ao ajuizar das necessidades de projeto, ela possibilita a análise de distintos cenários e fases encontrados em áreas de altas pressões e temperaturas (HTHP) e sujeitos ao efeito de corrosão. Em meio a essas diversas situações que podem alavancar os carregamentos atribuídos ao projeto, a estrutura estudada pode estar susceptível ao colapso (MURCHEY, 1955). Trata-se de uma essa falha tradicionalmente estudada de acordo com os esforços uniaxiais ou biaxiais, que consideram, segundo BOURGOYNE JR. *et al*, 1991, as tensões radiais e tangenciais. Porém, a mesma referência enfatiza a associação que pode ser feita com as tensões axiais, criando uma avaliação triaxial, também realizada pela ferramenta computacional.

Metodologia

Para tanto, desenvolvimento do CWELL foi realizado a partir da linguagem computacional C++ com interface gráfica criada através do *Qt Creator*, o que permitiu um *layout* fluido e dinâmico, como vemos na Figura 1, onde estão demonstradas as janelas inicial e de aquisição de dados de entrada, respectivamente. Pré-disposto a realizar a investigação da integridade da estrutura mediante ao comportamento que ela esteja solicitada ao longo de sua vida útil, o usuário precisa agir com a entrada de dados fundamentais ao projeto.

Figura 1 – Na direita, *layout* da janela inicial do *software Casing Well* (CWELL); Na esquerda: Dados de entrada gerais do projeto aplicados no *software* para desenvolvimento do cenário escolhido.



Fonte: Autor.

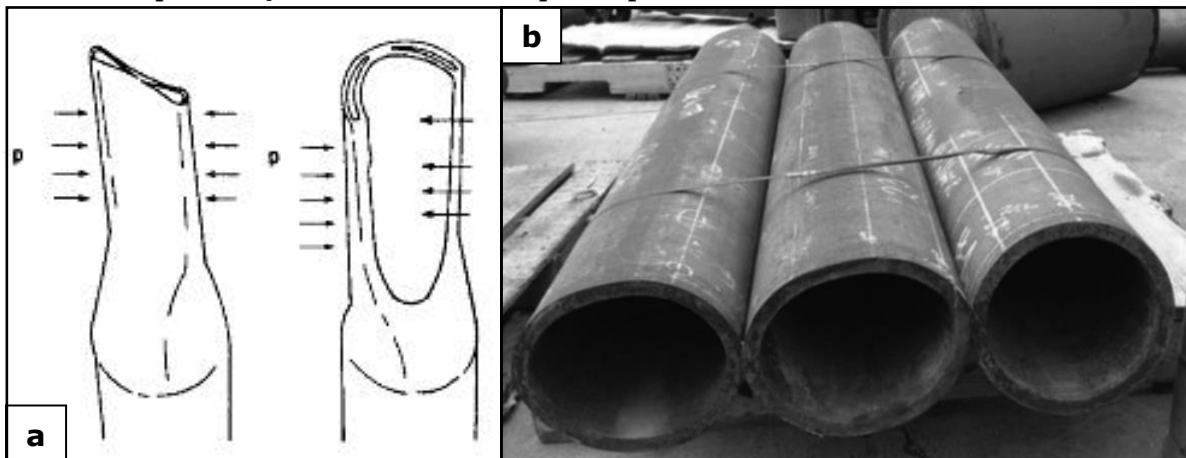
Tratam-se de parâmetros como diâmetro externo, grau de aço e profundidade da sapata, os quais são essenciais, como vemos dispostos na esquerda da Figura 1. Estes fatores são utilizados no cálculo de carregamentos aplicados no tubo em análise. O cálculo de tensões toma como base primordial o relatório técnico 5C3 (ANSI/API, 2008), o qual considera para comportamento uniaxial os carregamentos axiais (geradores de falhas por tensão ou compressão), radiais e tangenciais (os quais podem desenvolver falha tipo *burst* ou colapso). De acordo com RAHMAN & CHILINGARIAN, 1995, existem outros esforços que podem ser aplicados às colunas de revestimento, contudo, estes carregamentos são fatores limitantes na seleção do grau ideal para os tubos. Para estes elementos, deve-se ainda observar que, baseado em ANSI/API, 2008, são considerados fatores de segurança, os quais variam de acordo com o projeto simulado e tendem a firmar maior segurança na análise a partir de um aumento no valor de saída do *software* decorrente da modificação de carregamentos e resistências podendo, inclusive, gerar inconsistência na sinalização de riscos ou probabilidades de falhas. Assim,

segundo AADNØY (2010), existem fatores de segurança mínimos que devem ser seguidos, sendo que esses variam de acordo com requerimentos do operador, fase, tipo de falha e qualidade de tubo aplicados.

A resposta do CWELL é baseada na resistência do tubo aos tipos de falhas decorrentes dos carregamentos citados, como o de colapso, que é um mecanismo resultante de quando a pressão externa é sobresselente decorrente, principalmente da ausência de pressão interna ou tensões axiais (BOURGOYNE JR. *et al*, 1991). É importante lembrar que existem diversos fatores que podem aumentar a pressão externa, como a pressão de poros da formação, a pressão do fluido de perfuração e até mesmo a expansão térmica, existente em todos os poços do pré-sal, já que lá ocorrem grandes variações de temperatura (AADNØY, 2010; PINHEIRO *et al*, 2015).

Esta falha acaba gerando, como consequência, a mudança no formato do tubo, o qual passa de um formato circular para elíptico ou até mesmo para um formato não circular (AADNØY, 2010), como é possível ver na Figura 2. Nela, em (a), são esquematizadas situações da falha do tipo em seu formato extremo, devido ao excesso de pressão externa, que levou ao fechamento das seções dos tubos de duas formas diferentes, enquanto que, em (b), os dois tubos a esquerda estão colapsados, em formato elíptico, como resultado de um teste diferente do seu original, na direita. Na indústria, esse tipo de situação pode ser considerado uma falha geométrica decorrente de problema de estabilidade (AADNØY, 2010). Dessa forma, alguns fatores específicos são fundamentais no estudo como comprimento do tubo, diâmetro externo (OD), espessura (t) e propriedades físicas (como tensão de escoamento plástico, Y_p) do material especificadas por seu grau (RAHMAN & CHILINGARIAN, 1995). Estes autores ainda citam que o estudo do colapso é considerado relevante em situações extremas como perfurações em rochas de argila plástica e salinas, também comuns, segundo PINHEIRO *et al*, 2015, nas regiões de pré-sal.

Figura 2 – (a) esquema de situações extremas da falha do tipo colapso em um tubo; (b) representação de uma falha do tipo colapso ocorrida em dois de três tubos.



Fonte: BOURGOYNE JR. *et al*, 1991, Adaptado; TONG *et al*, 2016.

A investigação estrutural dos tubos considerando os esforços sob os quais os elementos são submetidos pode evitar esse tipo de problema (RAHMAN & CHILINGARIAN, 1995). Por essa razão, o CWELL considera, segundo ANSI/API, 2008, os diferentes regimes de colapso, determinados de acordo com a relação na Equação 1: o colapso por escoamento, o qual tem sua resistência determinada a partir da Equação 2; o colapso em regime plástico, com resistência dada pela Equação 3; o colapso em regime de transição, cuja resistência decorre da Equação 4; o colapso em regime elástico, cuja resistência parte da Equação 5. Para essas, considere as resistências ao colapso (R_{tc}), enquanto que A , B , C , F e G são constantes normalizadas dependentes de Y_p .

$$\frac{OD}{t} \quad (1)$$

$$R_{tc} = 2 * Y_p * \left[\frac{(OD/t) - 1}{(OD/t)^2} \right] \quad (2)$$

$$R_{tc} = Y_p * \left\{ \left[\frac{A}{(OD/t)} \right] - B \right\} - C \quad (3)$$

$$R_{tc} = Y_p * \left\{ \left[\frac{F}{(OD/t)} \right] - G \right\} \quad (4)$$

$$R_{tc} = \frac{46,95 * 10^6}{(OD/t) * [(OD/t) - 1]^2} \quad (5)$$

Com o anexo de ANSI/API, 2008, contudo, as equações a pouco citadas transmitem um levantamento aproximado da resistência, algumas vezes sendo superestimada indevidamente. Por esta razão, pela a mesma norma, utiliza-se a comumente usada na engenharia (BOURGOYNE JR. *et al*, 1991), Teoria de deformação plástica, nomeada como Teoria de Von Misses. Nela, ocorre aperfeiçoamento no critério de falha, por considerar o incremento das tensões tangenciais decorrentes da ação de possíveis tensões axiais existentes. Com esta análise de tensões combinadas, AADNØY, 2010, considera que a partir dessa teoria é possível uma análise triaxial, correlacionando a tensão axial (σ_z), a tensão radial (σ_r) e a tensão tangencial (σ_t) como é dado pela Equação 6, determinando a tensão de escoamento (σ_e). Partindo desta equação e com uso das equações de Lamé (Equação 3 e Equação 4, nas quais a é o raio até o limite interno da parede do tubo, r é o raio até o centro dessa parede e b é o raio até o limite externo da mesma parede), podemos construir a elipse de von-Mises. Trata-se de uma possibilidade para análise gráfica da segurança do projeto, também auxiliada pela envoltória de segurança API em análise triaxial, plotada por indicações da ANSI/API, 2008.

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} * [(\sigma_z - \sigma_t)^2 + (\sigma_t - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2]^{0,5} \quad (2)$$

$$\sigma_r = \frac{a^2 * P_i - b^2 * P_e}{b^2 - a^2} - \frac{(P_i - P_e) * a^2 * b^2}{(b^2 - a^2) * r^2} \quad (3)$$

$$\sigma_t = \frac{a^2 * P_i - b^2 * P_e}{b^2 - a^2} + \frac{(P_i - P_e) * a^2 * b^2}{(b^2 - a^2) * r^2} \quad (4)$$

Para que os ensaios realizados no CWELL pudessem estar mais próximos da realidade, considerando situações da indústria, foram desenvolvidos cenários críticos avançados para situações de colapso, seguindo indicações da REPSOL YPF (2000). Tratam-se de possíveis ocorrências que podem afetar diretamente a coluna de revestimento por variar consideravelmente os carregamentos aplicados durante diferentes fases do tubo. Como vemos na Tabela 1, foram considerados, para diferentes tipos de colunas (as quais variam de acordo com a utilidade que elas terão para o poço, normalmente associada à profundidade) cenários que ocorrem durante a Instalação (procedimentos que antecedem a alocação da cabeça do poço e assentamento do mesmo), a Perfuração (após a Instalação até o termino da cimentação e da completção) e o Serviço (após a completção, alongando-se até o fim da vida útil do poço).

Para análise da funcionalidade do CWELL, pretende-se fazer uso de uma situação crítica, a de Evacuação total para o Ar aplicado a um revestimento de produção 9 5/8" de grau de aço C75, cujas características gerais do projeto estão descritas na janela exposta na direita da Figura 1. Para que se

aplique esse cenário, diferente de outras situações, o *software* não requer dados complementares. Isso ocorre pois REPSOL YPF, 2000, declara que, para este cenário, basta considerar pressão atmosférica para a interna. Dessa forma, segundo a norma, cria-se uma condição de *blowout* (a qual BOURGOYNE JR. *et al*, 1991, considera um dos piores desastres que pode ocorrer durante operações de perfuração), onde há contato direto entre o fundo do poço e a superfície, permitindo o vazamento do gás existente em subsuperfície.

Tabela 1 - Diferentes cenários existentes no processo de perfuração. Adote, em referência aos tipos de revestimento: Revestimento Condutor (C), Revestimento de Superfície (S), Revestimento Intermediário (I), Revestimento de Produção (P), Revestimento *Liner* (L).

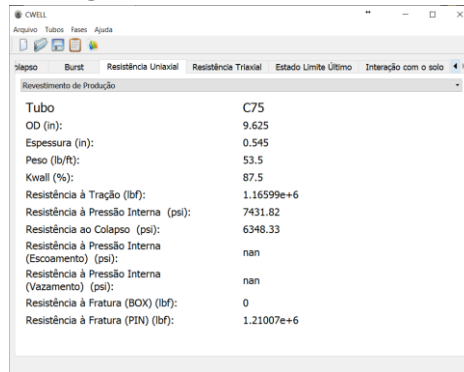
Cenário Crítico	Tipo de Fase / Tipo(s) de Coluna(s) de Revestimento
Cimentação Convencional	Instalação / C, S, I, P, L
Cimentação <i>Stab-in</i>	Instalação / C, S, I, P, L
Evacuação total para o Ar	Perfuração / C, S, I, P, L
Evacuação parcial para o Ar	Perfuração / C, S, I, P, L
Acima do Packer: <i>Gas-Lift</i>, Evacuação Total	Serviço / P, L
Abaixo do Packer: Evacuação Total	Serviço / P, L

Resultados e Discussão

O resultado da investigação decorrente do projeto elaborado para a coluna de revestimento de produção citada demonstra que o CWELL é capaz de indicar as resistências requisitadas para a situação escolhida. Os cálculos de carregamentos aplicados são próximos aos apresentados pela REPSOL YPF (2000), indicando sucesso nas ações propostas. Os dados de saída do projeto são apresentados em uma janela semelhante às apresentadas na Figura 5, para Resistência Uniaxial, e na Figura 6, para Evacuação total para o Ar. No cenário crítico ainda é possível observar do aumento de pressão crítica – no eixo das abscissas – com uma maior profundidade. Trata-se de uma clara referência ao aumento de pressão externa decorrente, por exemplo, da compactação resultante do efeito de subsidência que deriva da sobreposição de sedimentos, como indicado por MURCHEY, 1955, em situação de colapso de revestimento no campo Bolivar Coastal.

A ferramenta computacional também determina, em sua saída, a plotagem das elipses de análise triaxial (tanto a de Von Mises, em azul, quanto a API, em vermelho tracejado). No gráfico, foram aplicadas duas situações de análise. A inicial se baseia na resistência uniaxial e é representada pelo ponto preto, considera uma diferença de pressão de 6348,33 psi com a compressão máxima de 1166000 psi. Por estar externo ao diagrama de Von Mises e à envoltória API, observamos que não é um cenário seguro, o que é justificado devido às ações combinadas entre tensões, as quais confirmaram a sobreposição dos efeitos. Na segunda situação, considera-se a diferença de pressão de 4600 psi com a compressão máxima de 1166000 psi, em verde. Nela, a situação extrema de Evacuação total para Ar se apresenta entre as duas envoltórias, o que, considerando a abrangência da teoria de deformação plástica, é possível que seja considerado um cenário seguro, como aquele descrito na norma emitida pela REPSOL YPF (2000).

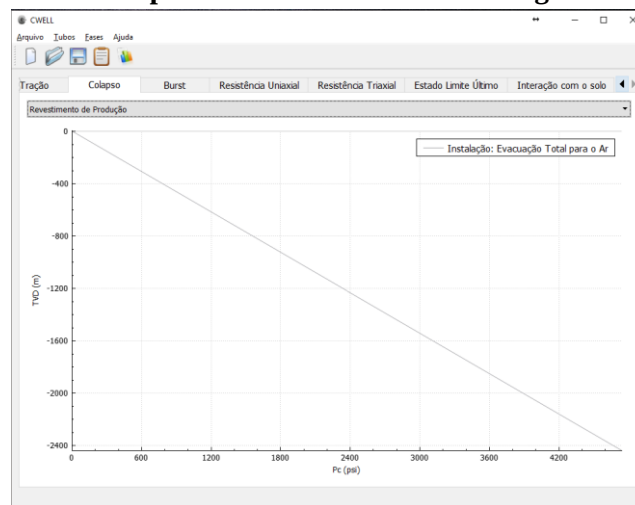
Figura 5 – Dados de saída para Resistência Uniaxial do projeto disponibilizados pelo *software* seguindo o cenário escolhido.



Revestimento de Produção	
Tubo	C75
OD (in):	9.625
Espessura (in):	0.545
Peso (lb/ft):	53.5
Kwall (%):	87.5
Resistência à Tração (lb):	1.16599e+6
Resistência à Pressão Interna (psi):	7431.82
Resistência ao Colapso (psi):	6348.33
Resistência à Pressão Interna (Escoamento) (psi):	nan
Resistência à Pressão Interna (Vazamento) (psi):	nan
Resistência à Fratura (BOX) (lb):	0
Resistência à Fratura (PIN) (lb):	1.21007e+6

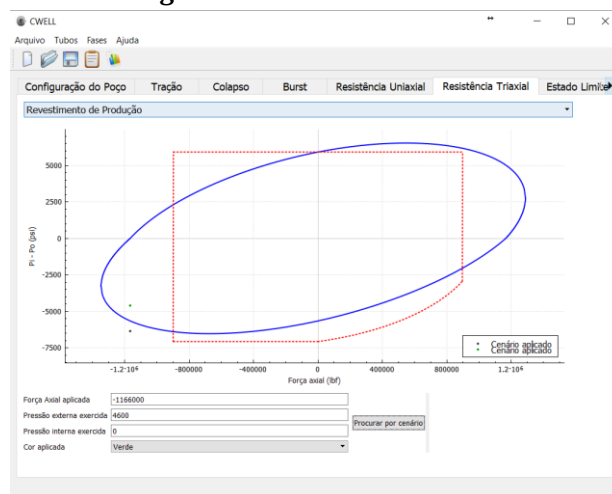
Fonte: Autor.

Figura 6 – Dados de saída para cenário crítico de *kick* de gás escolhido para *burst*.



Fonte: Autor.

Figura 7 – Dados de saída para Resistência Triaxial do projeto disponibilizados pelo *software* seguindo o cenário escolhido.



Fonte: Autor.

Conclusões

O CWELL, inevitavelmente, consegue, considerando normas internacionais estabelecidas, além de diversos propósitos básicos indicados em conceituadas referências aplicáveis ao projeto de revestimentos de poços de petróleo e gás natural, investigar a segurança de distintos cenários de colapso. Tratam-se de situações que ocorrem na indústria em diversas fases da vida do poço. Por isso, pode-se

inferir que a ferramenta computacional pode garantir – de forma suficientemente válida – a preservação da integridade estrutural do tubo com robustez. Caso utilizado corretamente, então, o CWELL pode permitir ao usuário diversos benefícios, como a economia no uso de material e a redução de acidentes (os quais podem causar danos econômicos, sociais e ambientais) e trabalhos de *workover* por danos de peças, o que é fundamental dadas as circunstâncias cada vez mais complexas da indústria.

Agradecimentos

Os agradecimentos se estendem: ao LCCV-UFAL; ao orientador e coautor, prof. Dr. João Paulo Santos; Aos colaboradores Jeremias e Teófanés; Ao CNPQ.

Referências Bibliográficas

AADNØY, B. S., **Modern Well Design**. Segunda Edição publicado por *CRC Press/Balkema*. © 2010 *Taylor & Francis Group*, Londres, Reino Unido, 2010.

ANSI/API. **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**. Relatório Técnico 5C3 da ANSI/API, Primeira Edição, *Copyright American Petroleum Institute*, Washigton, Estados Unidos, 2008.

ANP. **Dados estatísticos: Produção de petróleo e gás natural**. Relatório de produção nacional gerado pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural E Biocombustíveis, Brasília, Brasil, 2017. Disponível em <<http://www.anp.gov.br/wwwanp/dados-estatisticos>>. Acesso em: 17/08/2017.

BOURGOYNE JR., A. T., MILLHEIM, K. K., CHENEVERT, M. E., YOUNG JR., F. S. **Applied Drilling Engineering**. Segunda Edição. ©Copyright 1991 pela *Society of Petroleum Engineers*. ISBN 1-55563-001-4. Richardson, Estados Unidos, 1991.

MURCHEY, G. N. **Problems in Casing Collapse**. Artigo apresentado para o 30th *Annual Fall Meeting of the Petroleum Branch of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*, publicado por *Journal of Petroleum Technology*. Estados Unidos, 1955.

PAZ, L. J. L. **Perfuração com uso de revestimento (casing while drilling – CWD)**. Trabalho de Conclusão de Curso para o Departamento de Engenharia Química e de Petróleo da Universidade Federal Fluminense. Niterói, Brasil, 2013.

PINHEIRO, R. S., SANTOS, A. R., MARQUES, M., SCHNITZLER, E., SIGNORINI, D., TOMITA, R. A. **Well Construction Challenges in the Pre-Salt Development Projects**. Copyright 2015, *Offshore Technology Conference*. Artigo OTC-25888-MS preparado para apresentação na *Offshore Technology Conference* em Houston, Estados Unidos, 2015.

RAHMAN, S. S., CHILINGARIAN, G. V. **Casing Design: Theory and Practice**. ©1995 Elsevier Science B.V. Todos os direitos reservados. Holanda. 1995.

REPSOL-YPF. **Casing Design Manual: Drilling and Productions Operations**. Espanha, 2000.

TONG, H., GUO, D., ZHU, X. **A New HC OCTG Collapse Strength Model Based on Twin Shear Unified Strength Theory**. Artigo em *Journal of Pressure Vessel Technology* 138(5). *The American Society of Mechanical Engineers: Digital Collection*. Estados Unidos, 2016.