

# Avaliação da integridade de revestimento de poços de petróleo sujeitos a *kick* de gás

1<sup>st</sup> Joyce Kelly França Tenório  
Graduanda em Engenharia de Petróleo  
Universidade Federal de Alagoas  
Maceió, Brasil  
joyce.tenorio@ctec.ufal.br

2<sup>nd</sup> Jennifer Mikaella Ferreira Melo  
Graduanda em Engenharia de Petróleo  
Universidade Federal de Alagoas  
Maceió, Brasil  
jennifer.melo@ctec.ufal.br

3<sup>rd</sup> João Paulo Lima Santos  
Doutor em Engenharia Civil  
Universidade Federal de Alagoas  
Maceió, Brasil  
jpls@lccv.ufal.br

**Resumo**—Durante o processo de construção de poços de petróleo, após a etapa de perfuração de uma fase é realizada a instalação do revestimento, um acoplamento de tubos de aço especial de mesmo diâmetro externo, os quais possuem como função de destaque evitar o influxo de fluido da formação, além de proteger as paredes do poço. O presente trabalho descreve parte das funcionalidades do software web CWELL, que é um ambiente baseado em interface web voltado a projeto de revestimento de poços de petróleo, desenvolvido pela Universidade Federal de Alagoas a partir do framework *Django* com linguagem computacional Python. Para o dimensionamento de colunas de revestimento é necessário considerar a resistência mínima dos tubos para que suportem os esforços de tração, pressão interna, colapso e flexão, realizadas de acordo com normativos internacionais (API TR 5C3). Além de possíveis problemas de operação, como *kick*. No estudo de caso presente, visou-se um aprofundamento de análise da integridade de sistema de revestimento nos cenários de *kick* de gás e poço completo por gás. O caso estudado trata um poço vertical *offshore*. Diante das respostas obtidas ao longo do estudo, percebe-se que a coluna de revestimento possui alta tendência de falhar por pressão interna durante a ocorrência de *kicks*, como foi o caso do cenário analisado. Através da análise entre as resistências à pressão interna (*burst*) e ao colapso e os valores de pressão de operação retornados pelo SAEP, é possível verificar a possibilidade de falha dos tubos para cada cenário de projeto, o que é de extrema importância para o dimensionamento de colunas, a fim de obter o melhor desempenho das estruturas.

**Palavras-chave**—poços, *kick*, integridade, CWELL.

## I. INTRODUÇÃO

De acordo com a Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (ANP), em 2017, uma explosão em sonda de perfuração levou a fatalidades, sendo perceptível a complexidade das operações de perfuração de poços de petróleo e a necessidade de garantir a segurança em tais atividades. Esta etapa é realizada utilizando-se uma sonda rotativa, em que as rochas são perfuradas através da rotação

e peso aplicado sobre a broca, que fica localizada na extremidade da coluna de perfuração. A coluna de perfuração é um dos mais importantes componentes da sonda de perfuração e é composta pelos tubos de perfuração (drill pipes), comandos (drill collars) e tubos pesados (heavy weight) (THOMAS, 2004).

Após a etapa de perfuração de uma fase, é realizada a instalação do revestimento, um acoplamento de tubos de aço especial de mesmo diâmetro externo, os quais possuem como função de destaque a proteção das paredes do poço e evitar o influxo de fluido da formação, a invasão e perda de fluido do poço para a formação, além de garantir segurança nas etapas posteriores [1].

De acordo com [2], os revestimentos podem ser divididos em categorias de acordo com suas finalidades. O revestimento condutor é o primeiro a ser assentado no poço, a uma profundidade de 10 a 100 metros e sua principal função é isolar as zonas superficiais não consolidadas. O revestimento de superfície, instalado após o condutor, possui como objetivo o isolamento de zonas superficiais pouco consolidadas, proteção de zonas de água doce e serve de base de apoio para o BOP (*Blowout* Preventer) e revestimentos subsequentes. Já o revestimento intermediário, posicionado entre o revestimento de superfície e o de produção, tem como função de destaque a proteção de zonas de perda de circulação e o isolamento de zonas anormalmente pressurizadas. O revestimento de produção, por sua vez, é definido com base nas possíveis zonas de produção, abrigando a coluna de produção e permitindo a condução dos hidrocarbonetos até a superfície [2]. Os tubos de uma coluna de revestimento devem ser dimensionados e projetados para suportar esforços de tração, flexão, colapso e pressão interna. Nesse contexto, o CWELL (Casing WELL) tem o objetivo de realizar dimensionamento, estudos e aplicações para projetos de colunas de revestimento, permitindo assim uma análise da estabilidade e integridade das estruturas nas diversas fases de um poço. O CWELL é um ambiente voltado a projeto de poços de revestimento de poços de petróleo, desenvolvido pela Universidade Federal de Alagoas a partir do framework *Django* com linguagem computacional Python.

II. FORMULAÇÃO

A. RESISTÊNCIAS UNIAXIAIS E TRIAXIAIS DOS TUBOS

Sabe-se que as normas de dimensionamento possuem como objetivo central assegurar a qualidade das estruturas e fundamentam-se nos critérios de resistências mecânicas. Sendo assim, o CWELL faz uso da norma API ISO 10400 (2017) para obtenção dos resultados [3].

Para o dimensionamento de colunas de revestimento é necessário considerar a resistência mínima dos tubos para que suportem os esforços de tração, pressão interna, colapso e flexão. Além de possíveis problemas de operação, como *kick*. O próprio peso da coluna desencadeia o esforço de tração, uma vez que o tubo de perfuração localizado mais próximo a superfície suporta todo o peso da coluna. A Equação 1 expressa a resistência a tração [4].

A resistência máxima a pressão interna é alcançada quando a tensão atuante atinge o limite de escoamento, o *American Petroleum Institute* (API) permite que a espessura dos tubos de perfuração novos varie até 12,5%, sendo a equação de resistência a pressão interna mostrada na Equação 2.

O colapso é resultado de uma maior pressão externa que interna do tudo, a norma API TR 5C3 [7] define quatro regimes de colapso: por escoamento, regime plástico, de transição e elástico. Dessa forma, o cálculo da resistência ao colapso depende do tipo de regime de colapso a que o tubo de perfuração está submetido, o qual é identificado a partir da relação diâmetro e espessura do tubo. As resistências ao colapso estão mostradas nas equações 3, 4, 5 e 6, respectivamente na ordem citada anteriormente [4].

$$R_t = Y_p A_t \tag{1}$$

$$R_{pi} = \frac{(0,875)2tY_p}{OD} \tag{2}$$

$$R_{yp} = 2Y_p \left[ \frac{\left(\frac{D}{t}\right) - 1}{\left(\frac{D}{t}\right)^2} \right] \tag{3}$$

$$R_{pp} = Y_p \left[ \frac{A}{\frac{D}{t}} - B \right] - C \tag{4}$$

$$R_t = Y_p \left[ \frac{F}{\frac{D}{t}} - G \right] \tag{5}$$

$$R_e = \frac{46,95x10^6}{D/t[D/t - 1]^2} \tag{6}$$

Para o cálculo das constantes presentes nas equações de resistência ao colapso, são utilizadas as Equações 7, 8, 9, 10 e 11.

$$A = 2,8762 + 0,10679x10^{-5}Y_p + 0,21301x10^{-10}Y_p^2 - 0,53132x10^{-16}Y_p^3 \tag{7}$$

$$B = 0,026233 + 0,50609x10^{-6}Y_p \tag{8}$$

$$C = -465,93 + 0,030867Y_p - 0,10483x10^{-7}Y_p^2 + 0,36989x10^{-13}Y_p^3 \tag{9}$$

$$F = \frac{46,95x10^6 \left[ \frac{3B/A}{2 + (B/A)} \right]^3}{Y_p \left[ \frac{3B/A}{2 + (B/A)} - (B/A) \right] x \left[ 1 - \frac{3B/A}{2 + (B/A)} \right]^2} \tag{10}$$

$$G = F(B/A) \tag{11}$$

De acordo com [5], problemas comuns considerados no projeto do revestimento são: *kicks*, perdas de circulação, prisão de coluna e desgaste dos tubos.

As resistências são comparadas aos carregamentos submetidos à estrutura, se o valor do carregamento for maior que o valor que a coluna suporta, há a possibilidade de falha, podendo levar ao comprometimento de suas funções. Somado aos esforços uniaxiais e biaxiais, os resultados triaxiais são uma forma de tornar a análise mais criteriosa, que pode ser realizada por meio das envoltórias API e de von-Mises, mostradas na Fig. 1.

Uma combinação de carregamentos imposta à estrutura fora das duas envoltórias, indica que não é possível garantir que não houve o escoamento do tubo (Falha em Estado Limite de Serviço – Deformação plástica) [1].

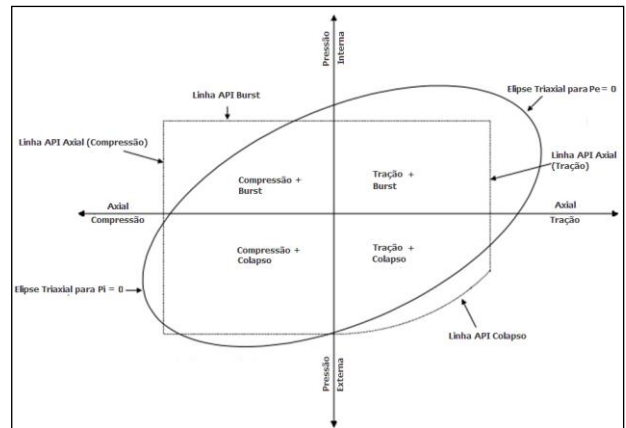


Fig. 1. Eipse de cargas triaxiais para tubos de revestimentos [1].

O critério de Plasticidade de von-Mises indica que a seguinte condição deve ser tomada  $\sigma_{VME} \leq Y_p$ , sendo  $\sigma_{VME}$  dada pela Equação 12 [1].

$$\sigma_{VME} = \frac{[(\sigma_a - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_t)^2 + (\sigma_t - \sigma_a)^2 + 6\tau_{ha}]^{0,5}}{\sqrt{2}} \tag{12}$$

O CWELL utiliza fatores de segurança, que são pré-determinados por norma, para cada tipo de cenário selecionado pelo usuário, fornecendo assim uma maior segurança ao projeto e conseqüentemente, aos resultados obtidos.

B. RESISTÊNCIAS DAS CONEXÕES

As conexões são compostas pelas juntas do revestimento e acoplamento externo, também conhecido por luvas. A

principal função das conexões consiste em unir os dois tubos de revestimento através de juntas rosqueadas. O *American Institute of Petroleum* divide as conexões em três grupos: Round Thread, Buttress Thread e Extreme-Line, os quais podem ser observados na Fig. 2.

O dimensionamento das conexões segue as normas API SPEC 5B (2008) [6] e a API SPEC 5CT (2010) [7], as quais definem suas especificações geométricas. Já a norma API TR 5C3 (2008), indica as equações das resistências à pressão interna e à tração, além da equação de falha por jump-out ou pull-out [1].

Para as conexões do tipo round thread, as equações de resistência incluem apenas o carregamento axial. A resistência da conexão pode ser inferior à do corpo do tubo, pois a mesma é função das condições de acoplamento [1].

Já para as conexões do tipo Buttress Thread, o *American Institute of Petroleum* define somente duas equações de resistência, baseado na informação de que a buttress thread não falha por pull-out [8].

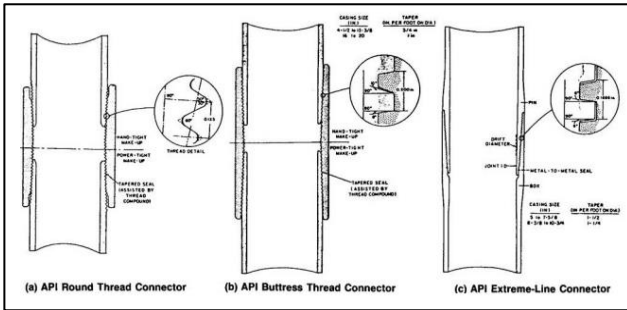


Fig. 2. Tipos de conexões API [8].

### III. FUNCIONALIDADES (CENÁRIOS)

Existem alguns cenários nos quais pode ser utilizado o CWELL como ferramenta de estudo, analisando carregamentos de tração, pressão interna e colapso durante os processos de perfuração das fases, instalação dos revestimentos, de intervenção e produção de óleo e/ou gás [1].

Podem-se dividir esses cenários em: esforços de pressão interna e colapso. Assim, no que diz respeito a pressão interna, pode-se destacar deslocamento do cimento, teste de vazamento e de pressão após endurecimento do cimento, *kick* de gás e poço completo por gás, como também vazamento no tubing [1].

Já os cenários de colapso integrados pelo CWELL são: perda total e parcial de circulação, cimentação e evacuação total acima do packer de produção [1].

No presente estudo de caso, visou-se um aprofundamento de análise da integridade de sistema de revestimento nos cenários de *kick* de gás e poço completo por gás.

A ocorrência de *kick* de gás na perfuração está relacionada com a fase seguinte, assim, não será considerada esse tipo de atividade no revestimento de produção. Analise-se a pressão interna de acordo com o equilíbrio hidrostático entre o fluido invasor e o fluido de perfuração. Permite-se

obter a coluna de gás ( $\Delta H_k$ ) a partir do volume máximo de gás previsto ( $V_k$ ), utilizando as seguintes equações [1]:

$$C_{poçoDCs} = \frac{D_{poço}^2 - D_{DCs}^2}{313.8} \quad (13)$$

$$C_{poçoDP} = \frac{D_{poço}^2 - D_{DP}^2}{313.8} \quad (14)$$

$$C_{csGDP} = \frac{d^2 - D_{DP}^2}{313.8} \quad (15)$$

$$V_{poçoDCs} = C_{poçoDCs} \times \Delta H_{DCs} \quad (16)$$

$$V_{poçoDP} = C_{poçoDP} \times (base_{seg} - \Delta H_{DCs} - base) \quad (17)$$

$$Se V_k \leq V_{poçoDCs} \rightarrow \Delta H_k = \frac{V_k}{C_{poçoDCs}} \quad (18)$$

$$Se V_{poçoDCs} < V_k \leq (V_{poçoDCs} + V_{poçoDP}) \rightarrow \Delta H_k = \frac{V_k - V_{poçoDCs}}{C_{poçoDP}} + \Delta H_{DCs} \quad (19)$$

$$Se V_k > (V_{poçoDCs} + V_{poçoDP}) \rightarrow \Delta H_k = \frac{V_k - (V_{poçoDCs} + V_{poçoDP})}{C_{csGDP}} + (base_{seg} - base) \quad (20)$$

Enquanto o cenário de um poço completo de gás ocorre devido a um influxo de gás da formação durante a perfuração da fase posterior. Dessa forma, a pressão no interior abaixo da cabeça do poço é a pressão da formação menos a pressão da coluna do gás invasor, enquanto a pressão externa é dada como a pressão hidrostática dos fluidos no anular da coluna de revestimento. Quando se tem gás ocupando todo o poço, o cenário de *kick* de gás pode estar incluso no de poço completo de gás, porém existem outros casos que também podem contribuir para a ocorrência desse fenômeno [1].

#### A. INTERFACE DO CWELL

O aplicativo CWELL (Casing WELL) pertence a ferramenta SAEP (Sistema de Aplicações de Engenharia de Petróleo), o qual permite que seja feito o dimensionamento de colunas de revestimento.

Nas Figs. 3, 4 e 5 está apresentada a interface do CWELL, que é dividido em três etapas iniciais: dados dos tubos e das conexões, dados operacionais e dados dos cenários de carregamentos. Tal etapa é antecedida por um janela, na qual serão inseridos o número de fases e profundidade da linha d'água. Após o preenchimento de todos os dados necessários, o CWELL retorna ao usuário os resultados esperados, que são resistências uni e triaxiais (através das envoltórias API e von-Mises) e os carregamentos dos cenários fixados, possibilitando a percepção de possíveis falhas tanto nos tubos quanto nas conexões, de forma numérica e gráfica [1].

**Dados dos Tubos e das Conexões**

**Tubo**

Diâmetro Externo (in)  Mínima espessura da parede (%)

Peso por Comprimento (lb/ft) / Espessura da parede (in)  Grau do Aço

**Conexão**

Comprimento da Seção (m)

Fig. 3. Solicitação dos dados de entrada referentes aos tubos e conexões

**Dados Operacionais**

Diâmetro do poço aberto (in)  Massa específica do fluido de perfuração (lb/gal)

Profundidade da sapata (m TVD)  Massa específica do cimento (lb/gal)

Velocidade de descida da coluna de revestimento (ft/s)  Pressão de injeção do cimento (psi)

Dogleg Severity (°/100ft)  Topo do cimento (m)

Torque (lb.in)   Cimentado até a superfície

Fig. 4. Solicitação de entrada dos dados operacionais

**Cenários**

**Pressão Interna**

Deslocamento do Cimento
  Teste de Pressão após WOC

Teste de Vazamento após WOC

**Perfuração**

Kick de Gás
  Poço Completo de Gás

**Serviço**

Vazamento no Tubing

**Colapso**

Perda Total de Circulação
  Perda Parcial de Circulação

Cimentação

Evacuação Total: Acima do Packer de Produção

Fig. 5. Determinação e fornecimento dos dados para cada cenário crítico

IV. APLICAÇÃO

A análise do revestimento no CWELL fornecendo, para cada fase do poço, dados de entrada (diâmetro, peso do fluido de perfuração, tipo de revestimento, entre outros) e considerando os cenários críticos de pressão interna: *kick* de gás na fase 3 (caso mais crítico que *kick* de líquido) e poço completo para gás nas três fases.

O caso estudado trata-se de um poço vertical offshore, com uma lâmina d'água de 1574 metros, o poço encontra-se submetido a um *kick* de 50 bbl e com gradiente de influxo de 1,4 lb/gal.

Realizado o fornecimento dos dados necessários de projeto no CWELL, o mesmo foi executado e obtidos os resultados, ou seja, as resistências mecânicas dos revestimentos aos esforços solicitantes, exibidas na Tabela 1.

TABELA I. Resistências Uniaxiais para coluna de revestimento

	Fase 1	Fase 2	Fase 3
R. à Tração	1684,68 klpf	1326,14 klpf	690,74 klpf
R. à Pressão Interna	2406,25 psi	2977,73 psi	4350,00 psi
R. ao colapso	771,70	1406,89 psi	3253,67 psi

Os resultados para o revestimento condutor (fase um) revelam a integridade do mesmo no que diz respeito ao efeito do cenário de poço completo por gás, pois os carregamentos não ultrapassam as envoltórias API e Von-Mises (Fig. 2). Ao observar o gráfico da Fig. 6, cenário de *Burst*, encontra-se uma pressão interna máxima de -4176,31 psi, enquanto a resistência à pressão interna do tubo é de 2406,25 psi, o que indica a ausência de ruptura por pressão interna do revestimento condutor, que pode ser observado na Fig. 7.

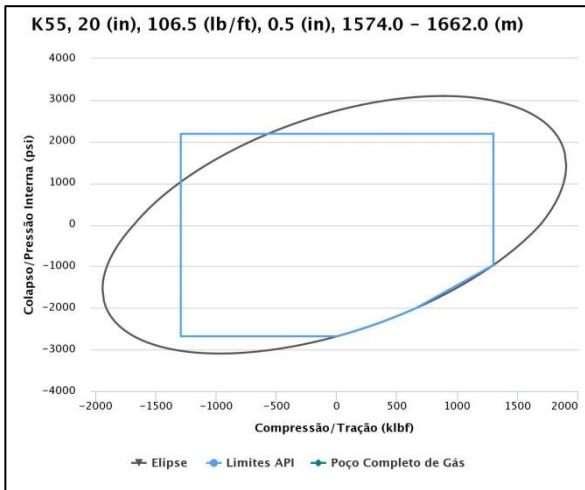


Fig. 6. Resistência Triaxial - Fase 1

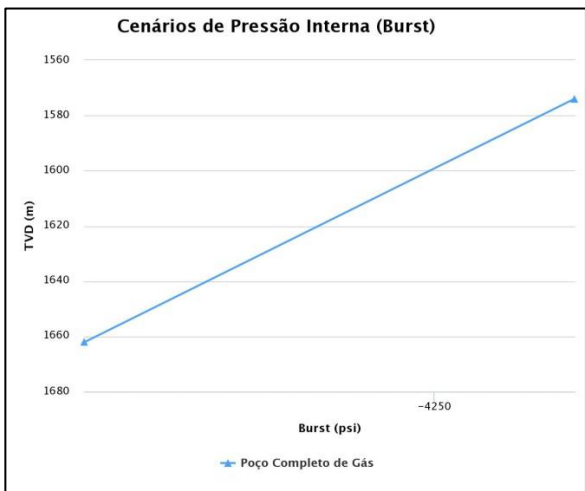


Fig. 7. Carregamento de P. Interna - Fase 1

Na Figs. 8 e 9 são encontrados os resultados obtidos para a fase 2, revestimento intermediário. O primeiro gráfico (Fig.8) indica uma possível falha no tubo de revestimento, pois o cenário de poço completo por gás ultrapassa as envoltórias estabelecidas como limite, estando o tubo fora de suas condições de funcionalidade ótimas. O gráfico da Fig.9 mostra o cenário de pressão interna, sendo o máximo valor encontrado de -2109,24 psi e a resistência à pressão interna do tubo é de 2977,73 psi, constata-se que não houve uma falha por pressão interna do revestimento intermediário.

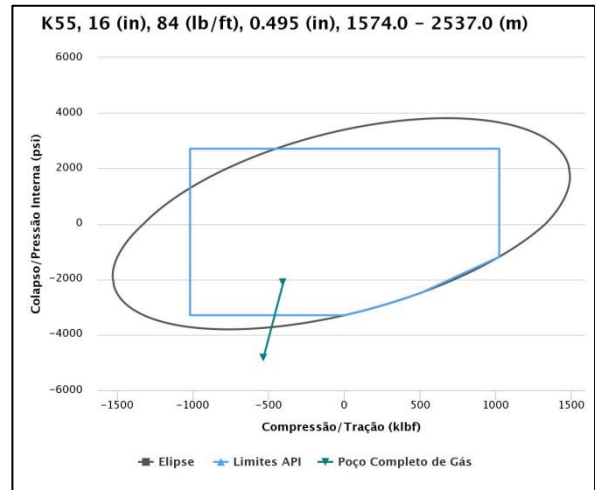


Fig. 8. Resistência Triaxial - Fase 2

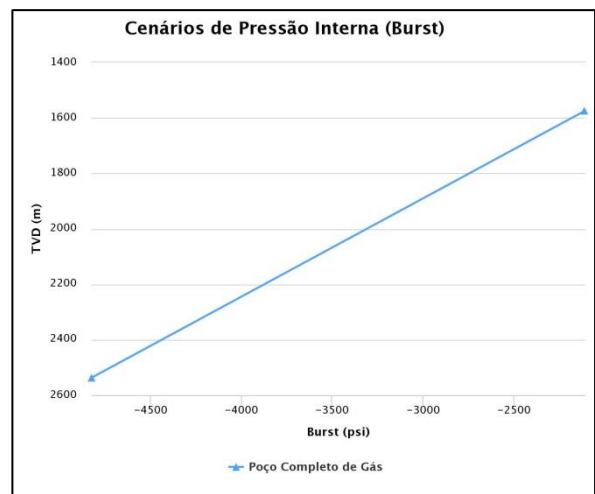


Fig. 9. Carregamento P. Interna - Fase 2

Já nas Figs. 10 e 11, são encontradas as respostas do projeto de dimensionamento referentes à fase três, correspondente ao revestimento de produção, a qual está submetida aos cenários críticos de pressão interna de *kick* de gás e poço completo por gás.

Os cenários críticos nos quais o tubo de revestimento está inserido ultrapassam as envoltórias limites de segurança, indicando uma falha no revestimento por meio do efeito de tais problemas operacionais, *kick* de gás e consequentemente, poço completo por gás (Fig. 10). Ao analisar o gráfico de cenário de pressão interna, obtém-se um valor máximo de *Burst* de 10569,37 psi, enquanto a resistência à pressão interna do tubo é de 4350,00 psi, o que leva a uma confirmação da perda de integridade do revestimento condutor (Fig. 11).

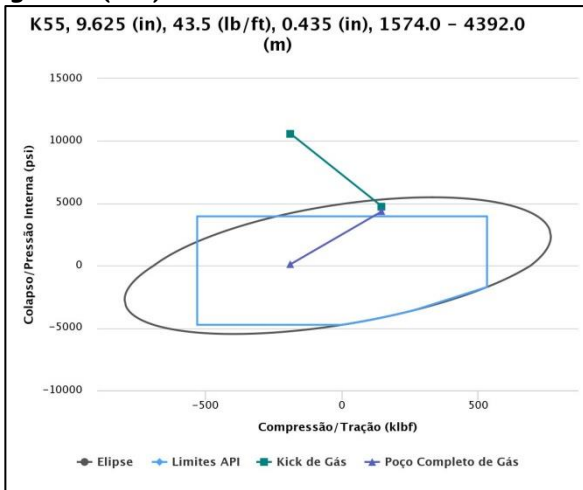


Fig. 10. Resistência Triaxial e carregamento de P. Interna – Fase 3

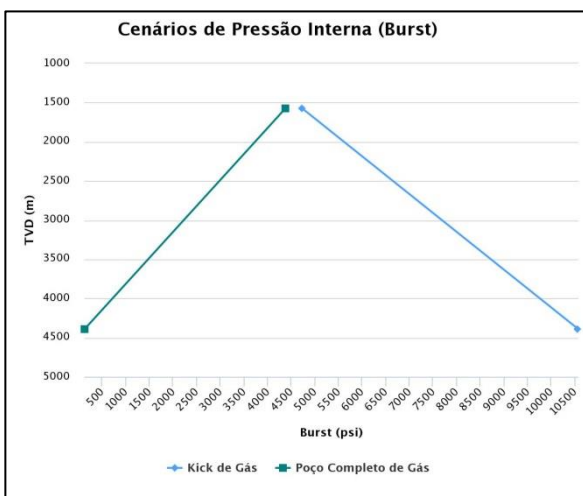


Fig. 11. Carregamento de P. Interna – Fase 3

Diante das respostas obtidas ao longo do estudo, percebe-se a coluna de revestimento possui alta tendência de falhar por pressão interna durante a ocorrência de *kicks*, como foi o caso do cenário analisado.

Através da análise de integridade de colunas de revestimento, é possível também integralizar o estudo dos riscos presentes no sistema de barreira solidária definido pela norma NORSOK D-010 [10]. Dessa maneira, o estudo das possíveis falhas em revestimentos de coluna de revestimento, juntamente com a análise dos riscos de incidentes associados ao conjunto de barreira solidária de poço, constitui um importante método que permite avaliar a integridade de poços de petróleo.

V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os *kicks* são um dos problemas operacionais mais frequentes em poços de petróleo, podendo levar a *blowouts* e grandes catástrofes quando não controlados. Nesse contexto, o referente estudo permite a realização de uma avaliação das colunas de revestimento quando submetidas a um *kick* de gás, e por consequência, tornando o poço completo por gás.

Através da análise entre as resistências à pressão interna (*burst*) e ao colapso e os valores de pressão de operação retornados pelo SAEP, é possível verificar a possibilidade de falha dos tubos para cada cenário de projeto, o que é de extrema importância para o dimensionamento de colunas, a fim de obter o melhor desempenho das estruturas, sem custos desnecessários a partir da utilização de tubos de resistência mecânica muito mais elevada que o necessário.

Dessa forma, faz-se imprescindível um desenvolvimento apropriado de projetos de coluna de revestimento e perfuração que resistam as mais adversas situações, principalmente aos cenários críticos bastante comuns durante a perfuração, como é o caso da presença de *kick*.

Em conformidade com o estudo que é realizado para as colunas de revestimento, a análise de falhas e detecção dos riscos presentes em um sistema de barreira solidária também possui relevância, possibilitando a minimização de perdas econômicas e acidentes em atividades de perfuração e produção de poços de petróleo.

REFERÊNCIAS

- [1] COSTA, J. C. H., Sistema de aplicações de engenharia de petróleo (SAEP): MÓDULO POÇO. Maceió: Universidade Federal de Alagoas, 2016.
- [2] THOMAS, J. E., Fundamentos de Engenharia de petróleo, Ed. Interciência, Rio de Janeiro, 2014.
- [3] ISO 10400. 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. Washington: American Petroleum Institute, 2007.
- [4] SILVA, T. V., Desenvolvimento de sistema para análise de casos de carregamento em colunas de perfuração baseado em interface web. Maceió: Universidade Federal de Alagoas, 2017.
- [5] ADAMS, N. J.; Drilling Engineering. A complete well planning approach. Penn Well Publishing Company. Tulsa. 1985
- [6] API SPEC 5B. Specification for Threading, Gauging and Thread Inspection of Casing, Tubing, and Line Pipe Threads. 15th. Ed. Washington, D.C., 2008.
- [7] API SPEC 5CT. Specification for Casing and Tubing. 9th. Ed. Washington, D.C., 2010. API-RP-7G. Recommended Practice for Drill Stem Design and Operating Limits. 1981
- [8] BOURGOYNE Jr., A. T. et al. Applied Drilling Engineering. 2nd. Ed. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 1991.
- [9] 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. 1st. Ed. Washington, D.C. 2008
- [10] NORSOK D-10, Well integrity in drilling and well operations, Standards Norway, 2014.