



Integridade de elemento de barreira de poço em cenários de perfuração: um estudo de caso

Gilberto L. L. Santos¹, Otávio B. A. Rodrigues¹, João P. L. Santos¹

¹Laboratório de Computação Científica e Visualização, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, LCCV/CTEC/UFAL

Campus A. C. Simoes, 57072-970, Maceió/Alagoas, Brazil

gilberto.santos@lccv.ufal.br; otavio.rodrigues@lccv.ufal.br; jpls@lccv.ufal.br

Resumo. O objetivo do trabalho é uma análise da integridade de elementos de barreira do CSB (Conjunto Solidário de Barreiras) secundário durante a fase de perfuração. Durante o ciclo de vida de um poço, o mesmo está sujeito a diversos carregamentos que precisam ser estimados com precisão para que os componentes e operação do poço tenham um bom desempenho. Quando há um *kick* (influxo para dentro do poço de fluidos confinados nas rochas porosas), cada elemento do CSB precisa funcionar de forma independente com o objetivo de evitar um *blowout* (influxo descontrolado), causando danos aos equipamentos da sonda, assim como lesões às pessoas que trabalham nela. Os revestimentos que compõem um poço de petróleo são parte do CSB. Nesse contexto, este trabalho propõe um estudo de caso para avaliar as resistências dos revestimentos sujeitos a perda total de circulação ou *kick* de gás por meio de análises triaxiais, utilizando o Sistema de Aplicações de Engenharia de Petróleo (SAEP). No caso de estudo proposto neste trabalho, para o cenário de perda total de circulação, o revestimento condutor atendeu as envoltórias de von Mises e API; o revestimento de superfície sofreu plastificação e não atendeu aos coeficientes de segurança. Para um cenário de *kick* de gás, o revestimento intermediário ficou fora do domínio seguro. De acordo com os resultados alcançados, são sugeridos outros revestimentos para adequar as resistências dentro do domínio seguro das envoltórias de von Mises e API.

Palavras-chave: Conjunto Solidário de Barreiras, Perda Total de Circulação, *Kick* de gás

1 Introdução

Um poço de petróleo é perfurado em várias fases, que são revestidas e formam as colunas de revestimento, iniciando com um tubo de pequena extensão e diâmetro maior que os posteriores. Para realizar a perfuração da fase, é necessário um conjunto de ferramentas que constitui a coluna de perfuração, além do fluido de perfuração. De acordo com [1], quando a pressão do fluido é inferior a pressão de poros dos fluidos confinados nos poros há um influxo destes para o poço, formando um *kick*. [1] ainda explica que um fluxo indesejado da formação de forma incontrolável gera um *blowout*, conforme ilustrado nas setas da Figura 1.

Adicionalmente, a Figura 1 mostra a ocorrência de *blowout* no ciclo de vida de poços no Golfo do México, Reino Unido (UK) e no Mar do Norte. Segundo [2], geralmente, os dados das plataformas dessas regiões são mais bem documentados do que explosões em outras localidades. É percebida que, para o período analisado, mais da metade dos *blowouts* aconteceram durante a etapa de perfuração. Dessa forma, tem-se a importância de dedicar estudos para mitigar o problema em questão.

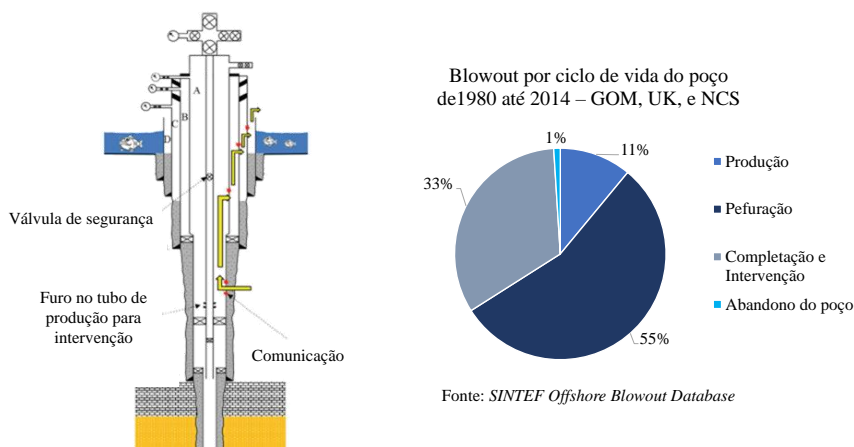


Figura 1. Esquema da evolução de um *kick* para um *blowout*. Fonte: Adaptado de [3]. *Blowout* no ciclo de vida de poços.

Segundo [4], um *blowout* é capaz de causar danos aos equipamentos da sonda, assim como lesões às pessoas que trabalham nela. Em 2010, por exemplo, um *blowout* ao perfurar o poço de Macondo no golfo do México gerou incêndios e explosões na plataforma que levaram a morte de onze pessoas, além do vazamento de quase 5.000.000 de barris de óleo [5]. No Brasil, segundo relatório final da ANP [6], um *underground blowout* (o fluxo de fluidos ocorre de uma formação para outra) em um poço do campo de Frade foi a causa do vazamento de 3.700 barris de petróleo cru no mar.

Estes e outros incidentes fizeram com que a ANP propusesse a resolução nº 46/2016, na qual são estabelecidos os requisitos e diretrizes para a implementação e operação de um Sistema de Gerenciamento da Integridade de Poços (SGIP) de forma a proteger a vida humana e o meio ambiente, à integridade dos ativos da união, de terceiros e do operador do contrato [7]. No SGIP é importante o funcionamento do Conjunto Solidário de Barreiras (CSB) que se refere a um ou mais elementos de barreira de poço capazes de controlar *kick* ou *blowout*. O CSB é classificado em primário ou secundário.

A falha dos elementos do conjunto primário torna necessária uma intervenção através dos elementos do conjunto secundário. A Figura 2 mostra os elementos de barreira de poço dos CSB primário e secundário durante a perfuração. Entre tais, destacam-se o fluido na coluna e o revestimento. É importante garantir a integridade dessas estruturas. A variação permitida para as pressões do fluido de perfuração no poço, segundo [8], deve obedecer a janela operacional, ou seja, respeitar os limites das pressões de poros, fratura e colapso. As colunas de revestimento, de acordo com [9], são dimensionadas para suportar *burst* e colapso, além de esforços à tração.

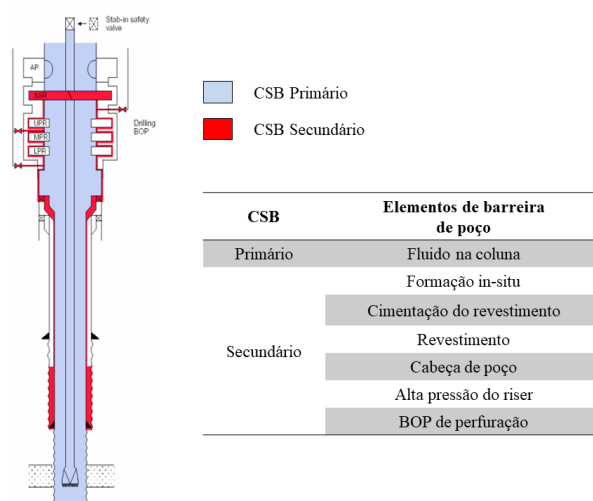


Figura 2. Elementos de barreira de poço em um processo de perfuração. Fonte: Adaptado de [10].

Na literatura são encontrados alguns trabalhos que envolvem a integridade em fluidos e revestimento. [11], por exemplo, analisam diferentes critérios de assentamento de sapatas de revestimento e definem o peso de fluido de perfuração ótimo a partir da média entre as pressões de poros e de fratura. [12], [13] e [14], por exemplo, avaliam a possibilidade de falha em revestimentos considerando os cenários de *kick* de gás durante a perfuração, cimentação na instalação e uma análise integrada de *kick* e cimentação, respectivamente. Para tanto, utiliza-se a ferramenta *Casing Well* (CWELL), a qual foi desenvolvida por [15] e está disponível no Sistema de Aplicações de Engenharia de Petróleo (SAEP).

Neste contexto, o objetivo do trabalho é uma análise da integridade de elementos de barreira do CSB secundário durante a fase de perfuração. Para tanto, é realizado o estudo de caso de um poço, admitindo a falha no CSB primário e focando no elemento de barreira secundária de revestimentos. Assim, é avaliada a possibilidade de falha nos revestimentos do poço por meio do CWELL, considerando os cenários de *kick* de gás e perda de circulação total. A principal contribuição deste trabalho em relação aos anteriores é uma análise da integridade do revestimento por meio de um cenário de perda de circulação total, utilizando o CWELL.

2 Projeto de revestimento de poços

Como mencionado anteriormente, as colunas de revestimento são dimensionadas, considerando tração, *burst* e colapso. Neste sentido, o API TR 5C3 [16] estabelece a resistência à tração R_t como

$$R_t = A_s Y_p, \quad (1)$$

onde A_s e Y_p são a área da seção transversal e a tensão mínima de escoamento do revestimento. Por outro lado, a resistência ao *burst* R_b é obtida por

$$R_b = 2Y_p \frac{0,875t}{D}, \quad (2)$$

em que t e D são a espessura e o diâmetro externo do revestimento. É importante destacar que o coeficiente 0,875 da Eq. (2) significa uma penalização devido às imperfeições do material durante a fabricação de tubos.

O colapso das colunas de revestimento pode ocorrer nos regimes de escoamento, plástico, transição e elástico. Sendo assim, para cada um destes há uma resistência ao colapso R_{cesc} , R_{ct} , R_{ce} e R_{cp} , respectivamente, conforme abaixo:

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

$$R_{ct} = Y_p \left[\frac{A}{\left(\frac{D}{t}\right)} - B \right] - C, \quad (4)$$

$$R_{ce} = Y_p \left[\frac{F}{\left(\frac{D}{t}\right)} - G \right], \quad (5)$$

$$R_{cp} = \frac{46,95 \cdot 10^6}{\frac{D}{t} \left[\left(\frac{D}{t}\right) - 1 \right]^2}, \quad (6)$$

onde A , B , C , F e G são constantes obtidas por equações empíricas em função da tensão de escoamento. É importante destacar que o regime de colapso vigente no revestimento varia conforme a relação entre o diâmetro

externo e a espessura do revestimento, além das constantes A , B , C , F e G . Em API TR 5C3 [16] são apresentadas as relações para cada regime, assim como as equações das constantes.

Também é possível avaliar a resistência de forma tridimensional, a partir do critério de falha de von Mises. Assim, são feitas algumas considerações como definição de tensões em cilindros e características específicas do cenário de *burst* e colapso, resultando nas seguintes expressões para as pressões por *burst* (P_{burst}) e colapso ($P_{colapso}$):

$$P_{burst} = \frac{d^2 \sigma_z + \sqrt{3D^4 Y_p^2 - 9D^4 \tau_{ha}^2 - 3D^4 \sigma_z^2 - Y_p^2 d^4 - 3d^4 \tau_{ha}^2 (D^2 - d^2)}}{3D^4 + d^4}, \quad (7)$$

$$P_{colapso} = -\frac{\sigma_z + \sqrt{4Y_p^2 - 12\tau_{ha}^2 - 3\sigma_z^2 (D^2 - d^2)}}{4D^2}, \quad (8)$$

em que d é o diâmetro interno do revestimento, σ_{eq} , σ_z , σ_h , σ_r , τ_{ha} são as tensões de von Mises, axial, tangencial, radial e cisalhamento torcional, respectivamente. As equações (7) e (8) correspondem a parte superior e inferior da elipse triaxial de von Mises ilustrada na Figura 3, a qual delimita uma região onde o revestimento possui um comportamento elástico. [15] mostra em detalhes o passo a passo para atingir as equações anteriores. Além disso, o API TR 5C3 [16] fornece uma envoltória de segurança, a qual é resultado das resistências acima, dos fatores de segurança e está ilustrada também na Figura 3. Esses dois métodos compõem uma análise triaxial.

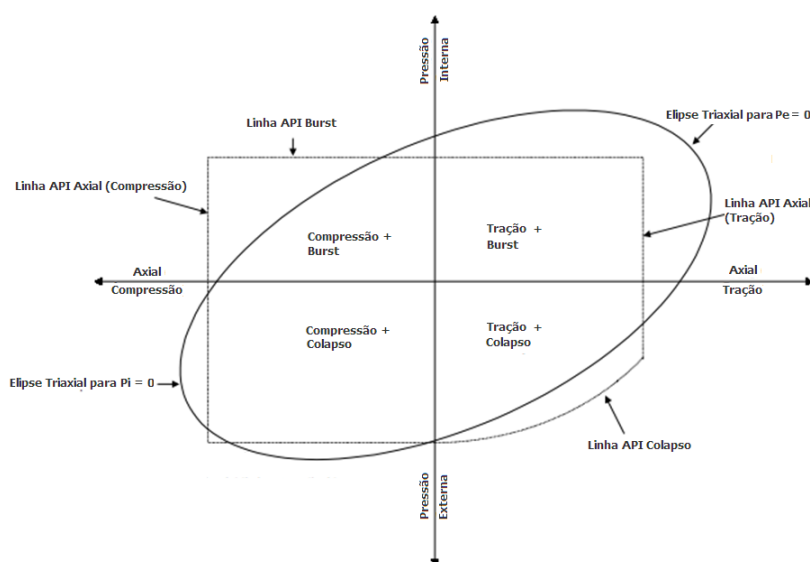


Figura 3. Elipse de resistência triaxial de revestimento. Fonte: [15].

O método de análise triaxial permite a avaliação simultânea da integridade do revestimento com base nos cenários críticos de esforços que o sistema de revestimento deve suportar. Os esforços atuantes ao longo da profundidade do revestimento são representados graficamente por pares ordenados (esforço axial, pressão diferencial). Para garantia de atendimento de integridade estrutural do sistema, os valores plotados dos pares ordenados (esforço axial, pressão diferencial) devem estar contidos no espaço delimitado pela envoltória da elipse de von Mises e pela envoltória de segurança API [17]. Os procedimentos apresentados anteriormente são a base dos cálculos realizados pelo CWELL a fim de avaliar ou dimensionar revestimentos com a possibilidade de adicionar os fatores de segurança. A ferramenta também gera os esforços. Não é o foco deste trabalho detalhar suas formulações matemáticas, porém em [15] são descritas.

3 Cenários de barreira de segurança

O cenário de estudo adotado é apresentado na Figura 4. A Tabela 1 apresenta os valores numéricos associados a configuração do poço adotado. Os fatores de segurança estão disponíveis na Tabela 2. Este caso de estudo

é semelhante ao apresentado por [15]. Neste trabalho é avaliada a perda total de circulação nas fases 1 (revestimento condutor) e 2 (revestimento de superfície). Adicionalmente, na terceira fase (revestimento intermediário), é avaliado um cenário de *kick* de gás.

A perda de circulação é a invasão de fluido de perfuração para a formação através de fraturas existentes ou provocadas em formações com alta permo-porosidade (devido à presença de formação inconsolidada, existência de falhas, fraturas naturais, cavernas, entre outros) ou em zonas depletadas [18]. Na perda de circulação total não há retorno do fluido para a superfície. Neste caso, tem-se uma falha no CSB primário (fluido de perfuração), pois a invasão da lama na formação reduz o nível de fluido de perfuração no anular, diminuindo a pressão hidrostática [18]. Caso pressão hidrostática alcançar níveis abaixo da pressão de poros, a perda total de circulação pode ocasionar um *kick*.

Durante o *kick* pode ocorrer a invasão de óleo, água ou gás provenientes da formação perfurada. A situação mais crítica ocorre quando a invasão é feita por gás. Esse fato se deve a sua maior expansão quando este está se deslocando em direção a superfície, causando uma maior diminuição da densidade da mistura [19].

Admitindo que a barreira primária seja rompida, as resistências dos revestimentos que compõem o poço são analisadas, observe na Figura 2 que o revestimento é um dos elementos dos CSB secundário.

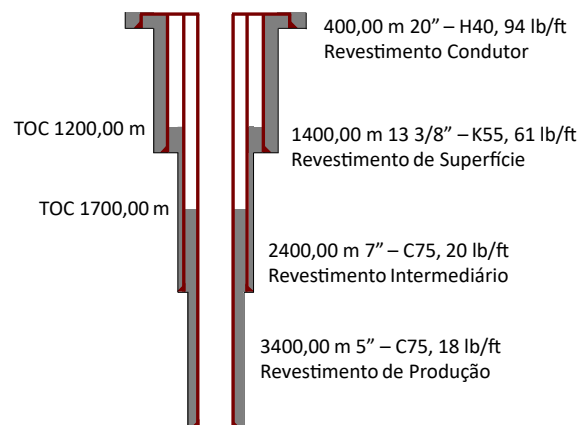


Figura 4. Esquema do modelo do poço.

Tabela 1. Valores numéricos associados ao caso de estudo. Fonte: Adaptado de [15].

Revestimento	Diâmetro Externo [pol]	MD [m]			Broca [pol]	Densidade da lama [lb/gal]	Grau	Peso linear [lb/ft]
		Hanger	TOC	Base				
Condutor	20	0	0	400	26	9.5	H40	94
Superfície	13 3/8	0	0	1400	17 1/2	17.5	K55	61
Intermediário	7	0	1200	2400	8 1/2	12	C75	20
Produção	5	0	1700	3400	6 5/8	14	C75	18

Tabela 2. Fatores de segurança de projeto.

Tração	Burst	Colapso	Triaxial
1,30	1,10	1,00	1,25

A Figura 5 detalha os dados utilizados para a simulação de um *kick* de gás na interface SAEP. Os valores numéricos dos parâmetros foram extraídos de [20]. Não é necessário atribuir valores numéricos para simular a perda total de circulação no CWELL.

4 Resultados e discussão

A Tabela 3 apresenta as resistências dos revestimentos de poço obtidas pelo CWELL. Do revestimento condutor ao intermediário nota-se uma diminuição da resistência à tração. Por outro lado, as resistências por *burst*

Dados Relacionados com a Próxima Fase:

Volume de Kick (bbl)	100
Gradiente de Influxo (psi/m)	0.33
Diâmetro do Poço Aberto (in)	8.5
Profundidade da Sapata da Próxima Fase (m TVD)	3400
Massa Específica do Fluido de Perfuração (lb/gal)	12
Gradiente de Pressão de Poros (lb/gal EMW)	10.87
Comprimento Total dos DCs no BHA (m)	91
Diâmetro Externo dos DCs (in)	6.75
Diâmetro Externo dos DP (in)	5
Massa Específica do Cimento Endurecido (lb/gal)	9

Fechar

Figura 5. Dados para simulação de um *kick* de gás no CWELL.

e colapso aumentam na direção do revestimento condutor ao intermediário. Assim, há uma tendência de o dimensionamento ser focado em esforços mais acentuados por tração no revestimento condutor e em esforços mais acentuados por pressão nos revestimentos de superfície e intermediário.

Tabela 3. Resistência das colunas de revestimento.

Resistência	Revestimento Condutor (Tubo H40)	Revestimento de Superfície (Tubo K55)	Revestimento Intermediário (Tubo C75)
Tração [klbf]	1076,71	961,80	431,19
<i>Burst</i> [psi]	1533,00	3094,39	5100,00
Colapso [psi]	515,47	1539,51	2662,04

Na Figura 6(a) são apresentadas as envoltórias de resistência e os pares ordenados de pressão e esforço, considerando a perda por circulação total no revestimento condutor (Tubo H40). Os esforços pela perda encontram-se no interior dos limites API e da elipse de von Mises, apontando que as resistências calculadas com base nos fatores de segurança são atendidas, bem como o comportamento constitutivo do tubo em regime elástico após o carregamento. A Figura 6(b) demonstra o contrário para o revestimento intermediário (Tubo K55), ou seja, os esforços por perda de circulação em parte da coluna ultrapassam a região segura, indicando a plastificação de parte da coluna e a possibilidade da escolha de um novo tubo a depender do rigor do projetista.

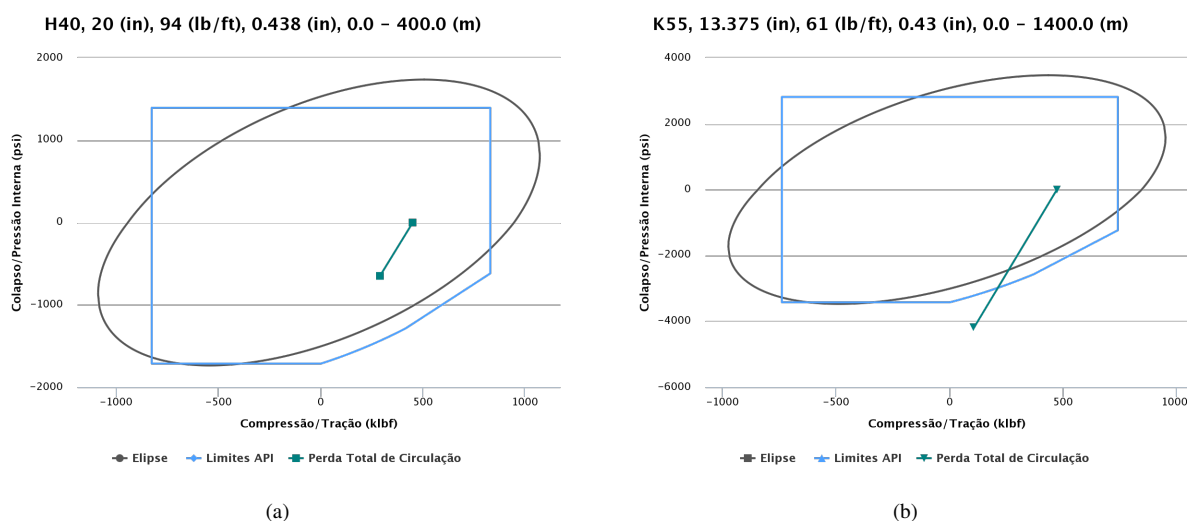


Figura 6. Análise triaxial nos revestimentos: (a) condutor e (b) superfície.

Neste sentido, são avaliados tubos com grau M65, C75, L80, N80 e C90, de modo que apenas o tubo com o último grau forneceu envoltórias de segurança que compreendem os esforços no domínio seguro, conforme ilustrado na Figura 7(a). Os outros tubos foram evoluindo gradativamente no atendimento aos critérios de segurança. Inclusive, aqueles com grau L80 e N80, por exemplo, chegaram a ter o esforço de tração mínimo sobre a elipse de von Mises e os limites API respeitados, conforme ilustrado na Figura 7(b). Porém, seguindo o critério de um projeto rigoroso, haveria a iminência de plastificação. Desta forma, uma sugestão que pode garantir a segurança estrutural quanto ao estado limite de serviço e minimizar o custo é a utilização de um revestimento intermediário com seções combinadas.

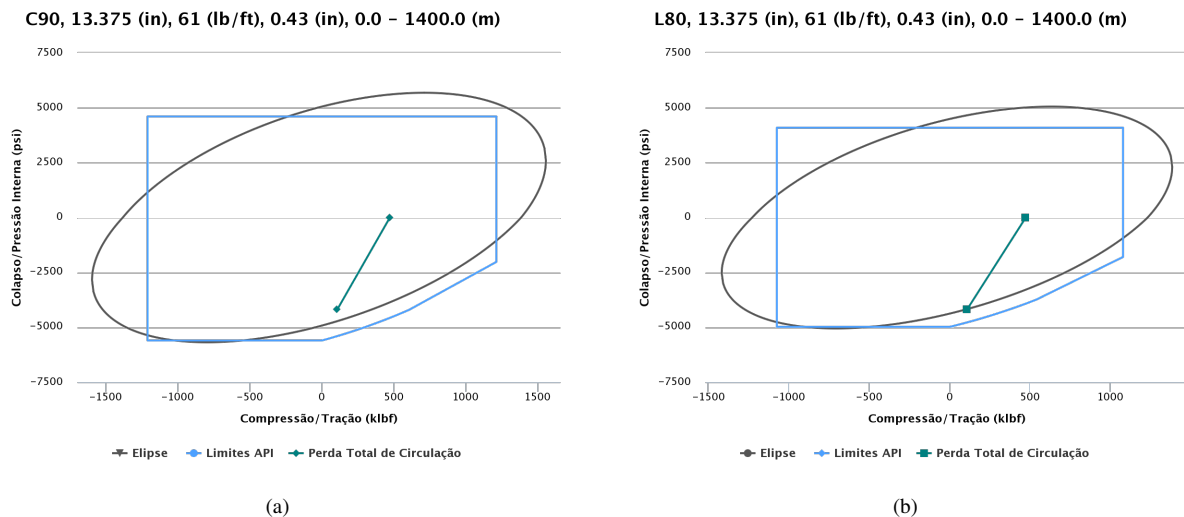


Figura 7. Análise triaxial no revestimento de superfície: (a) C90 e (b) L80.

Na Figura 8 é apresentada a análise triaxial do revestimento intermediário (Tubo C75), considerando o cenário de *kick* de gás. Assim como no revestimento de superfície, parte da curva relativa ao carregamento fica fora do domínio de interseção das envoltórias de segurança, significando deformações plásticas na coluna e o não atendimento a resistência por *burst*, a qual é minorada pelos fatores de segurança. Novamente propõe-se um novo grau para o tubo, ou seja, considerando um projeto conservador quanto a estas deformações. Assim, foram avaliados os tubos com graus L80, N80, C90 e C95. No último tubo os esforços por *kick* ficaram dentro das envoltórias de segurança, conforme ilustrado na Figura 9(a). Também sugere-se o uso de seções combinadas.

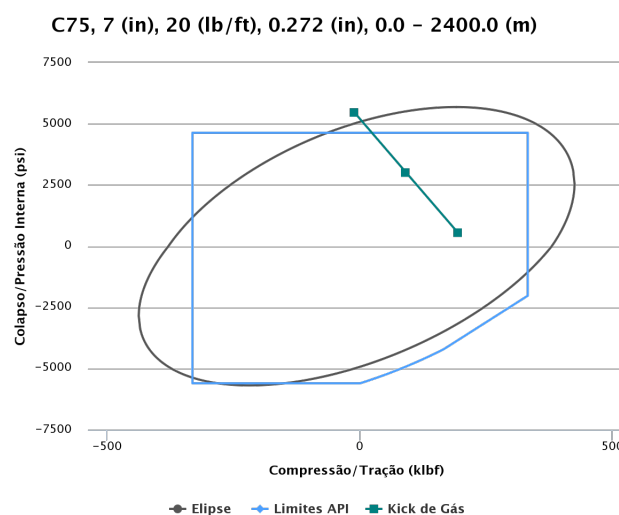


Figura 8. Análise triaxial de revestimento intermediário.

Chama-se a atenção para a análise triaxial do tubo C90 mostrado na Figura 9(b). Todos os esforços estão no

interior da elipse de von Mises. Em outra direção, o ponto com esforço axial mínimo encontra-se sobre a curva limite API. Isso significa que não há plastificação do revestimento, porém os coeficientes de segurança estão no limite de serem violados, indicando um risco dada a possibilidade de incertezas nos processos de fabricação que podem reduzir a própria resistência indicada pelo fabricante.

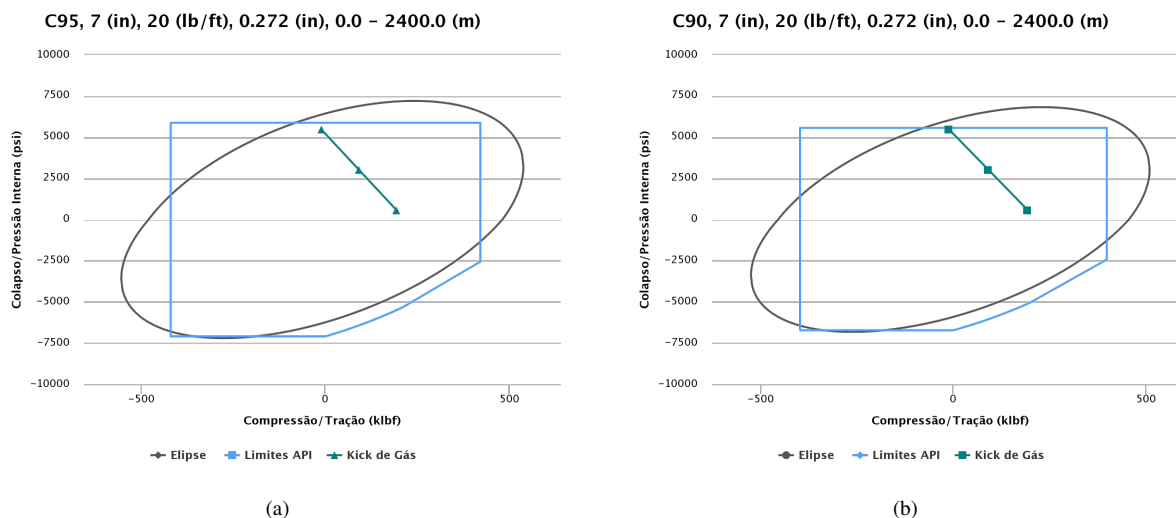


Figura 9. Análise triaxial de revestimento intermediário: (a) C95 e (b) C90.

5 Conclusão

Este trabalho realizou um estudo de caso sobre a integridade do elemento de barreira de poço revestimento durante cenários de perfuração. Os cenários avaliados foram perda de circulação total e *kick* de gás. O revestimento condutor, considerando o primeiro cenário, atendeu as envoltórias de von Mises e API. Por outro lado, nessa mesma operação o revestimento de superfície sofreu plastificação e não atendeu aos coeficientes de segurança. Analogamente, o revestimento intermediário sob um cenário de *kick* também ficou fora do domínio seguro. Assim, foram avaliados diferentes graus para os tubos dos revestimentos de superfície e intermediário, considerando projetos mais conservadores, ou seja, que não aceitam a plastificação na coluna e a violação dos fatores de segurança. Deste modo, indicou-se tubos com grau C90 e C95, respectivamente. Buscando economia e segurança, ainda sugeriu-se a utilização de seções compostas em ambos os revestimentos. Destacam-se ainda as funcionalidades do CWELL fornecendo análises triaxiais, resistências e esforços, os quais são úteis para dimensionamento de colunas de revestimento, bem como verificação da integridade.

Referências

- [1] J. E. Thomas. *Fundamentos de engenharia de petróleo*. Interciência, 2001.
- [2] SINTEF. SINTEF Offshore Blowout Database, 2022.
- [3] M. Khalifeh and A. Saasen. *General Principles of Well Barriers*, pp. 11–69, 2020.
- [4] J. S. Santana, de H. T. Campos, and E. S. Cardoso. Kick e blowout na exploração de poços de petróleo—uma revisão. *REVISTA DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA*, vol. 13, n. 2, 2021.
- [5] C. B. Castro, L. A. Martins, and G. S. Ferreira. As relações entre os acidentes na indústria de petróleo e o desenvolvimento das normas e marcos regulatórios associados: um estudo exploratório. In *I Congresso Nacional de Engenharia de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Campina Grande, Brasil*, pp. 1–9, 2015.
- [6] C. A. Cabral, L. S. P. Teixeira, N. R. Moura, and M. Chambriard. *Investigação do incidente de vazamento de petróleo no campo de Frade*. ANP, 2012.
- [7] ANP. *Resolução ANP nº 46*, 2016.
- [8] L. A. S. ROCHA and C. T. AZEVEDO. Projeto de poços de petróleo-geopressões e assentamento de colunas de revestimento-2ª edição. *Editora Interciência, Rio de Janeiro, Brasil*, 2009.
- [9] B. S. Aadnøy. *Modern well design*. CRC press, 2010.
- [10] S. Norge. Norsok standard d-010: Well integrity in drilling and well operations, rev. 4, 2013.
- [11] F. R. Silva, B. G. Souza, R. S. Andrade, and H. U. S. Mendes. Análise de critérios de assentamento de sapatas de revestimentos e dimensionamento de BOP para projetos de poços de petróleo. *Anais III CONEPETRO*, 2018.

- [12] J. M. F. Melo, J. K. F. Tenório, A. G. C. Oliveira, and J. P. L. Santos. Integrated evaluation of cement and kick scenarios in oil well design. *Brazilian Journal of Petroleum and Gas*, vol. 13, n. 3, 2019.
- [13] J. K. F. Tenório, J. M. F. Melo, A. G. C. Oliveira, and J. P. L. Santos. Avaliação da integridade de revestimento de poços de petróleo sujeitos a kick de gás. *ICCEEg*, 2018a.
- [14] J. K. F. Tenório, J. M. F. Melo, and J. P. L. Santos. Importância da cimentação na estabilidade de poços de petróleo: um estudo de caso. *Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia*, 2018b.
- [15] J. C. H. Costa. Sistema de aplicações de engenharia de petróleo (SAEP): Módulo poço. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2016.
- [16] A. P. Institute. *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*. American Petroleum Institute, 2008.
- [17] J. P. L. Santos, de E. T. Lima Junior, de L. P. Gouveia, and S. R. D. Junior. Desenvolvimento de metodologia para gerenciamento de projeto de revestimento de poço de petróleo. *Exacta*, vol. 19, n. 3, pp. 609–622, 2021.
- [18] C. P. Chieza. Diagnósticos de problemas operacionais durante a perfuração de poços de petróleo. Mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2011.
- [19] da D. O. Costa. *TECNOLOGIA DOS MÉTODOS DE CONTROLE DE POÇO E BLOWOUT*, 2011.
- [20] J. C. H. Costa and J. P. L. Santos. Ferramenta computacional para auxílio ao dimensionamento de colunas de revestimento de poços de petróleo. *Jornada Nacional de Iniciação Científica*, 2015.