



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

Gilberto L. L. Santos<sup>1</sup>, Otávio B. A. Rodrigues<sup>1</sup>, João P. L. Santos<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratório 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.** This template file provides detailed formatting instructions for preparing your full-length paper to the Proceedings of the joint CILAMCE-PANACM-2021 (XLII Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering and III Pan-American Congress on Computational Mechanics). It is strongly recommended that you use the pre-defined styles of this template file, as they embed all necessary text formatting for the corresponding paragraph type. Full-length papers must be written in English.

**Palavras-chave:** First keyword, Second keyword, Third keyword (up to 5 keywords)

### 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.

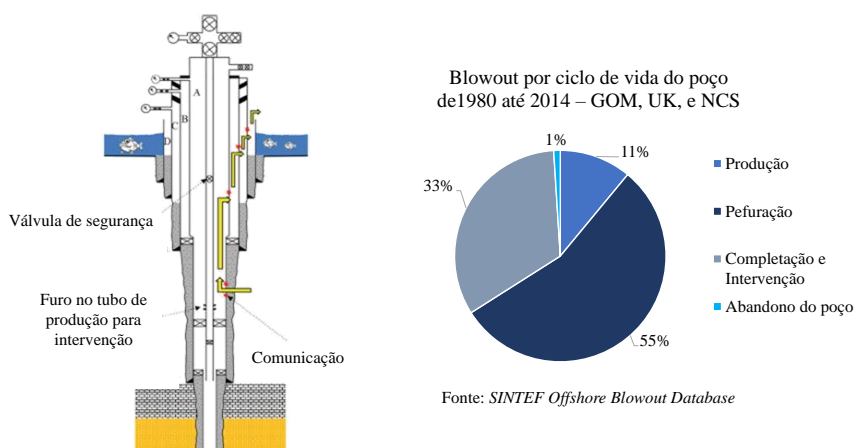


Figura 1. *Blowout* no ciclo de vida de poços e esquema da evolução de um *kick* para um *blowout*. Fonte: Adaptado de [3].

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.

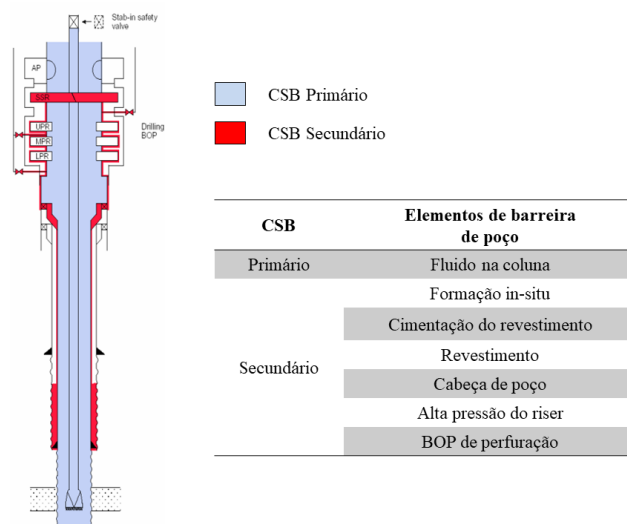


Figura 2. Elementos de barreira de poço em um processo de perfuração. Fonte: Adaptado de [10].

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,  $\sigma_{eq}$ ,  $\sigma_z$ ,  $\sigma_h$ ,  $\sigma_r$ ,  $\tau_{ha}$  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.

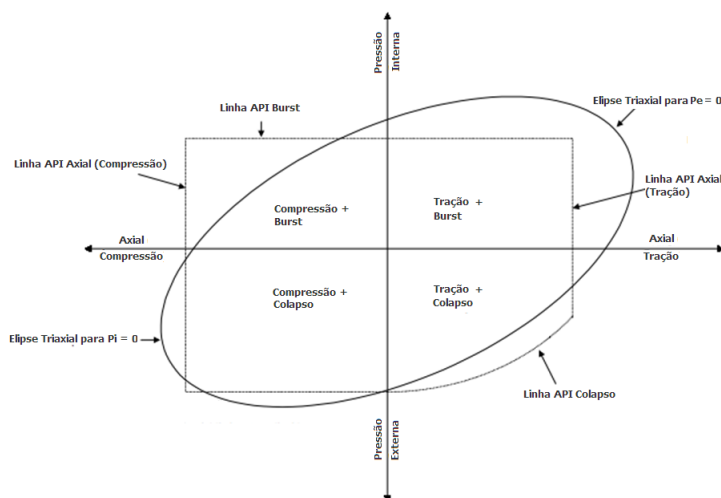


Figura 3. Elipse de resistência triaxial de revestimento. Fonte: [15].

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.

### 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 foi idealizado por [15]. Neste trabalho é avaliada a perda total de circulação nas fases 1 (revestimento condutor) e 2 (revestimento intermediário). Adicionalmente, na terceira fase (revestimento de produção), 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 deplegadas [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*. 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.

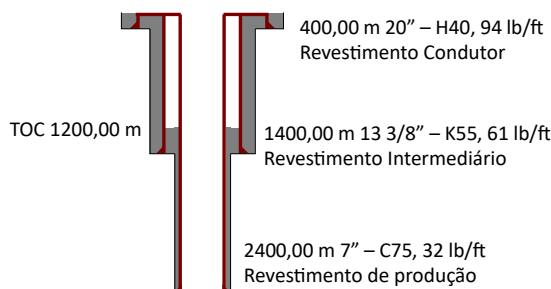


Figura 4. Esquema do modelo do poço.

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] | Grade | Peso linear [lb/ft] |
|---------------|------------------------|--------|------|------|-------------|----------------------------|-------|---------------------|
|               |                        | Topo   | TOC  | Base |             |                            |       |                     |
| Condutor      | 20                     | 0      | 0    | 400  | 26          | 9,5                        | H40   | 94                  |
| Intermediário | 13 3/8                 | 0      | 0    | 1400 | 17 1/2      | 17,5                       | K55   | 61                  |
| Produção      | 7                      | 0      | 1200 | 2400 | 8 1/2       | 12                         | C75   | 32                  |

Tabela 2. Fatores de segurança de projeto.

| Tração | <i>Burst</i> | 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 [19].

Figura 5. Dados para simulação de um *kick* de gás 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* e colapso aumentam na direção do revestimento condutor ao intermediário. Assim, há uma tendência de o dimensionamento realizado ser focado em esforços mais acentuados por tração no revestimento condutor e de esforços mais acentuados por pressão nos revestimentos de superfície e intermediário.

Tabela 3. Resistência das colunas de revestimento.

| Resistência        | Revestimento Condutor<br>(Tubo H40) | Revestimento de Superfície<br>(Tubo K55) | Revestimento Intermediário<br>(Tubo C75) |
|--------------------|-------------------------------------|--|--|
| Tração [klbf]      | 1076,71                             | 961,80                                   | 698,00                                   |
| <i>Burst</i> [psi] | 1533,00                             | 3094,39                                  | 8493,75                                  |
| Colapso [psi]      | 515,47                              | 1539,51                                  | 8201,37                                  |

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 dos rigos da empresa operadora.

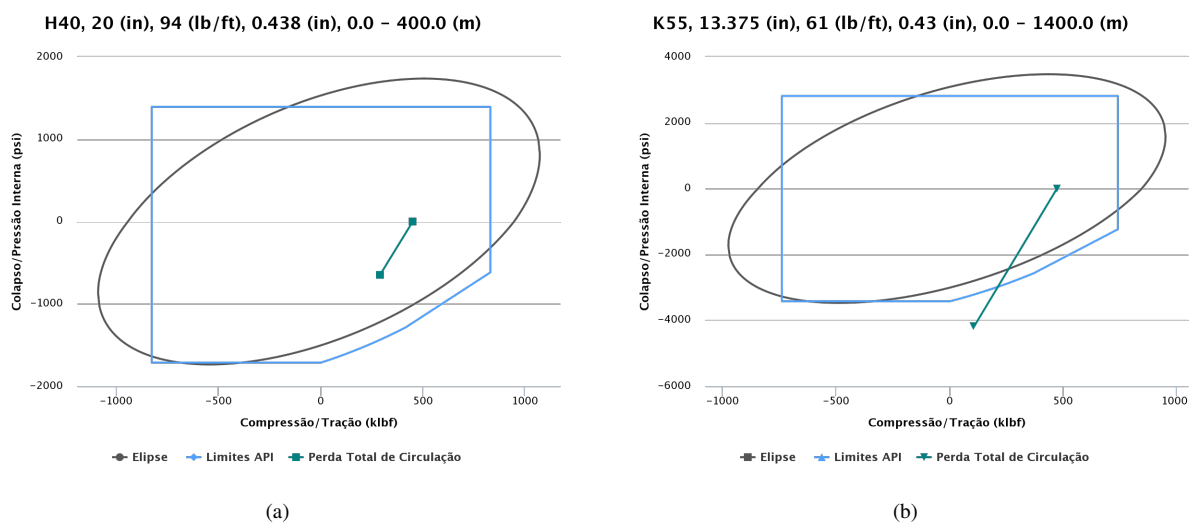


Figura 6. Análise triaxial nos revestimentos: (a) condutor e (b) superfície.

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 do API respeitados, conforme ilustrado na Figura 7(b). Porém, seguindo o critério de uma operadora rigorosa, 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.

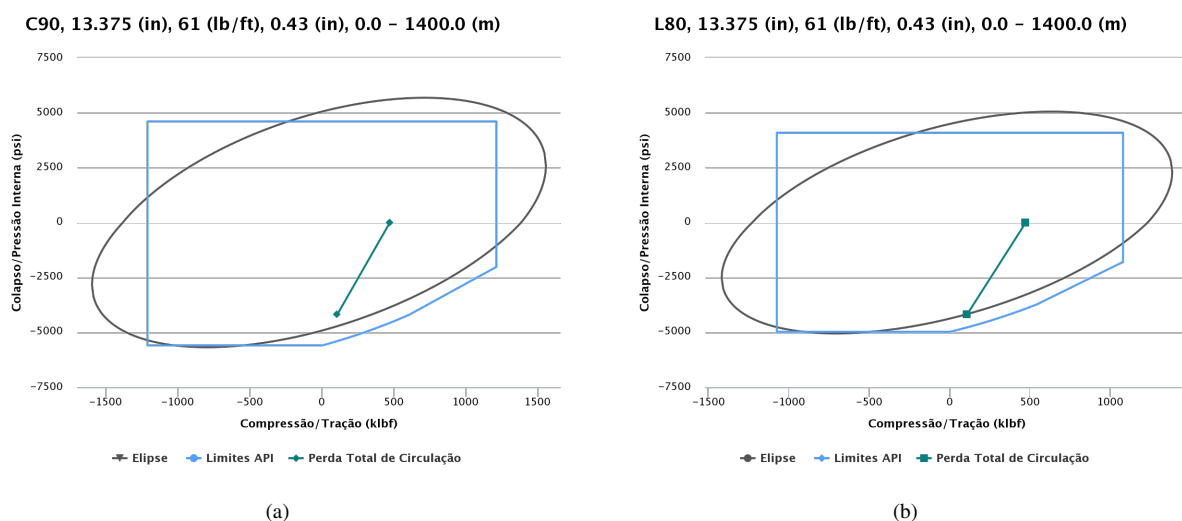


Figura 7. Análise triaxial no revestimento de superfície: (a) C90 e (b) L80.

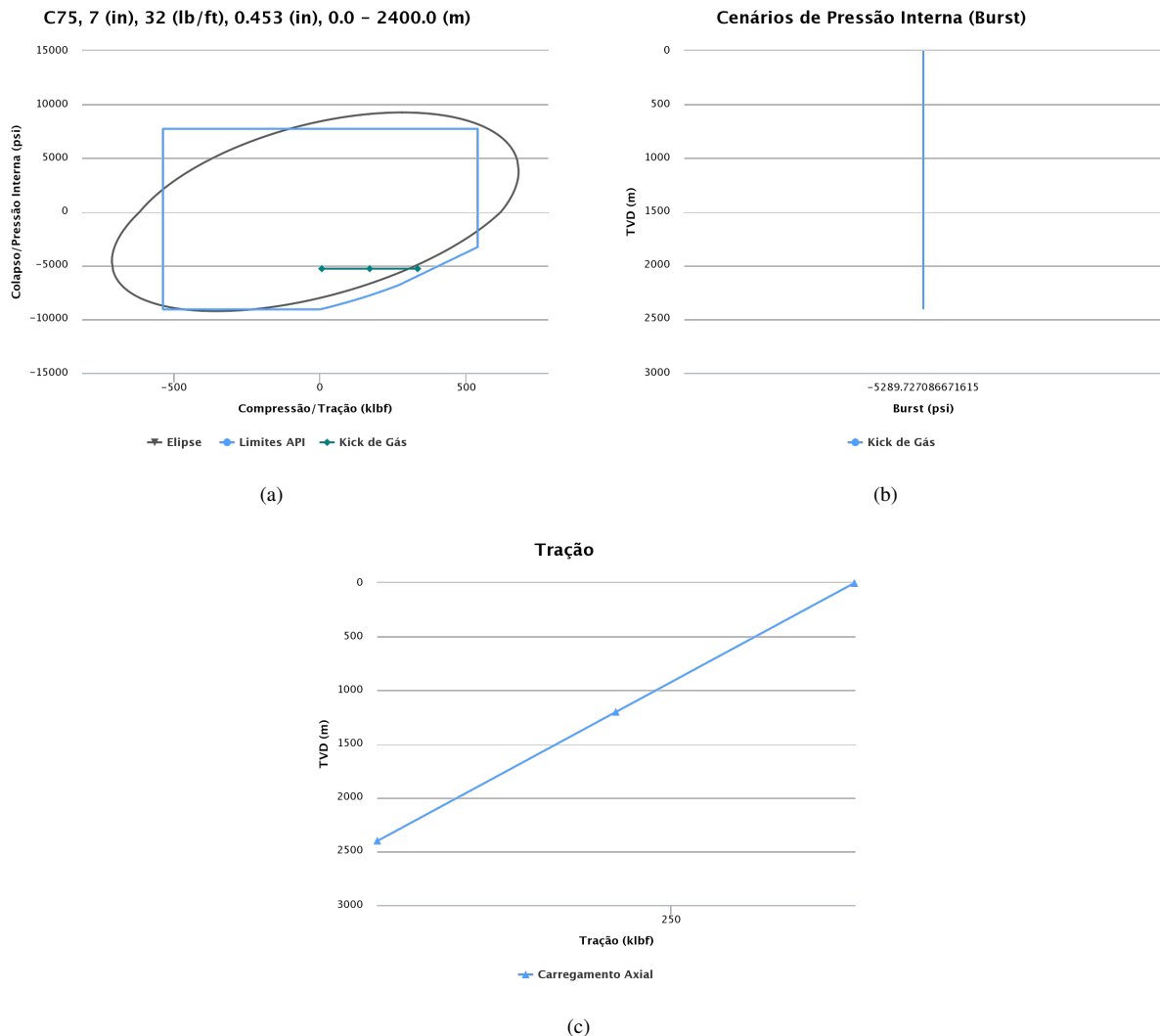


Figura 8. Proposta de revestimento condutor.

## 5 Conclusão

## 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] 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.