



Avaliação da integridade de barreiras de poço primária e secundária em cenários de *kick* de gás e perda de circulação total

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, jppls@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*.

Segundo [2], 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 [3]. No Brasil, segundo relatório final da ANP [4], 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 [5]. 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 1 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 [6], deve obedecer a janela operacional, ou seja, respeitar os limites das pressões de poros, fratura e colapso. As colunas de revestimento, de acordo com [7], são dimensionadas para suportar *burst* e colapso, além de esforços à tração.

Na literatura são encontrados alguns trabalhos que envolvem a integridade em fluidos e revestimento. [9], 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. [10], [11] e [12], 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 [13] 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 primário

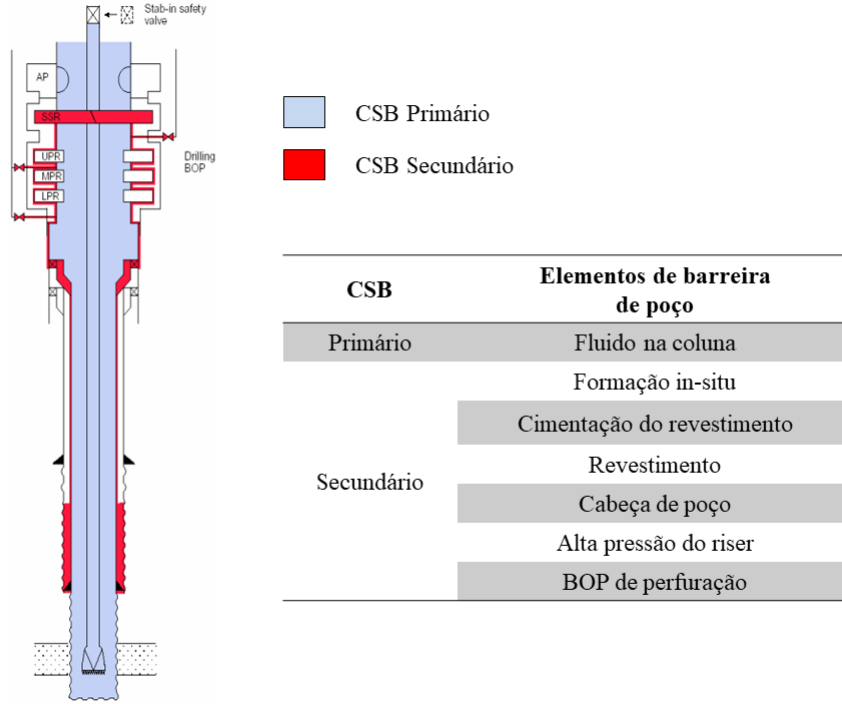


Figura 1. Elementos de barreira de poço em um processo de perfuração. Fonte: Adaptado de [8].

e secundário durante as fases de perfuração. Para tanto, é realizado o estudo de caso de um poço, analisando diferentes fluidos de perfuração e verificando a formação de *kick* segundo o critério de janela operacional. Além disso, é avaliada a possibilidade de falha nos revestimentos por meio do *CWELL*, considerando os cenários de *kick* de gás, poço completo de gás e perda de circulação total.

2 Projeto de revestimento de poços

Como mencionado anteriormente, as colunas de revestimento são dimensionadas, considerando tração, *burst* e colapso. Neste sentido, a API TR 5C3 [14] 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, conforme a seguir:

$$A = 2,8762 + 0,10679 \cdot 10^{-5} \cdot Y_p + 0,21301 \cdot 10^{-10} \cdot Y_p^2 - 0,53132 \cdot 10^{-16} \cdot Y_p^3, \quad (7)$$

$$B = 0,026233 + 0,50609 \cdot 10^{-6} \cdot Y_p, \quad (8)$$

$$C = -465,93 + 0,030867 \cdot Y_p - 0,10483 \cdot 10^{-7} \cdot Y_p^2 + 0,36989 \cdot 10^{-13} \cdot Y_p^3, \quad (9)$$

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

$$G = \frac{FB}{A}. \quad (11)$$

É importante destacar que o regime de colapso vigente no revestimento é determinado conforme a relação entre o diâmetro externo e a espessura do revestimento, além de equações empíricas envolvendo as constantes A , B , C , F e G . Em API TR 5C3 [14] são apresentadas as relações para cada regime. Também é possível avaliar a resistência de forma tridimensional, adaptando o critério de falha de von Mises para os cenários específicos de *burst* e colapso. Em [13], por exemplo, é mostrado o passo a passo. Além disso, a API TR 5C3 [14] fornece uma envoltória de segurança, a qual é resultado das resistências acima e de fatores de segurança. Esses dois métodos formam uma análise triaxial.

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 [15]. Na Figura 12 é apresentada a elipse de resistência triaxial para tubos de revestimento API.

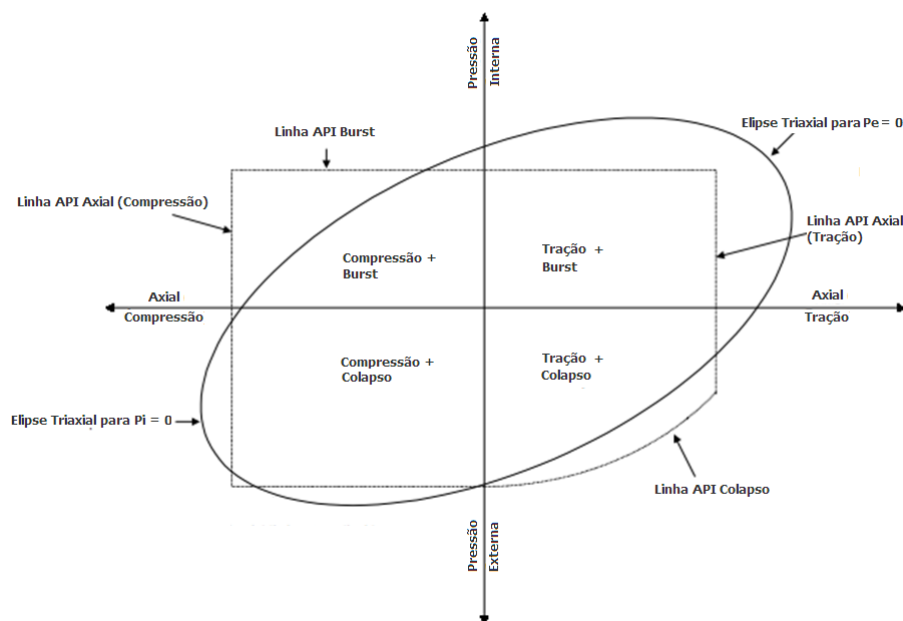


Figura 2. Elipse de resistência triaxial. Fonte: [13].

3 Cenários de barreira de segurança

O cenário de estudo adotado é apresentado na Figura 3. A Tabela 1 apresenta os valores numéricos associados a configuração do poço adotado. Este caso de estudo foi idealizado por [13]. 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 depletadas [16]. 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 [16]. 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 1 que o revestimento é um dos elementos dos CSB secundário.

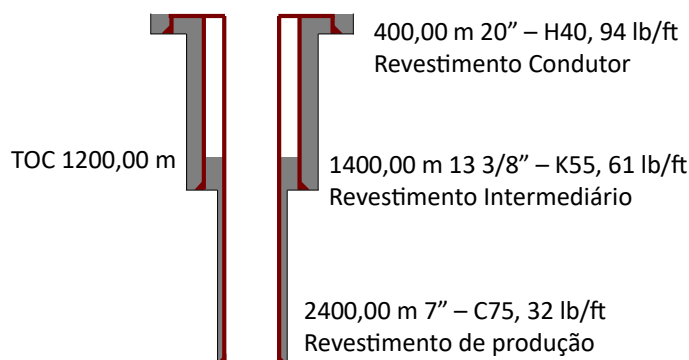


Figura 3. Esquema do modelo do poço.

4 Resultados e discussão

A Figura 4 detalha os dados utilizados para a simulação de um *kick* de gás na interface SAEP. Os valores numéricos dos parâmetros foram extraídos de [17].

Tabela 1. Valores numéricos associados ao caso de estudo. Fonte: Adaptado de [13]

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	10	K55	61
Produção	7	0	1200	2400	8 1/2	12	C75	32

Dados Relacionados com a Próxima Fase:

Volume de Kick (bbl)

Gradiente de Influxo (psi/m)

Diâmetro do Poço Aberto (in)

Profundidade da Sapata da Próxima Fase (m TVD)

Massa Específica do Fluido de Perfuração (lb/gal)

Gradiente de Pressão de Poros (lb/gal EMW)

Comprimento Total dos DCs no BHA (m)

Diâmetro Externo dos DCs (in)

Diâmetro Externo dos DP (in)

Massa Específica do Cimento Endurecido (lb/gal)

Fechar

Figura 4. Dados para simulação de um *kick* de gás na interface SAEP.

5 Conclusão

$$q_r = -4pr^2k\frac{dT}{dr}. \quad (12)$$

Tabela 2. Coefficients in constitutive relations

Constitutive relation	Nomenclature	Value
Turbulent tensor	C_μ	0.09
Turbulent tensor	$C_{\mu b}$	0.69
Lateral lift	C_L	0.08
Virtual mass	C_{VM}	0.8

Acknowledgements. This section should be positioned immediately after the Conclusion section. Type Acknowledgements in boldface, 10 pt Times New Roman type from left margin, leaving 20 pt line spacing before and 12pt after.

Authorship statement. This section is mandatory and should be positioned immediately before the References section. The text should be exactly as follows: The authors hereby confirm that they are the sole liable persons responsible for the authorship of this work, and that all material that has been herein included as part of the present paper is either the property (and authorship) of the authors, or has the permission of the owners to be included here.

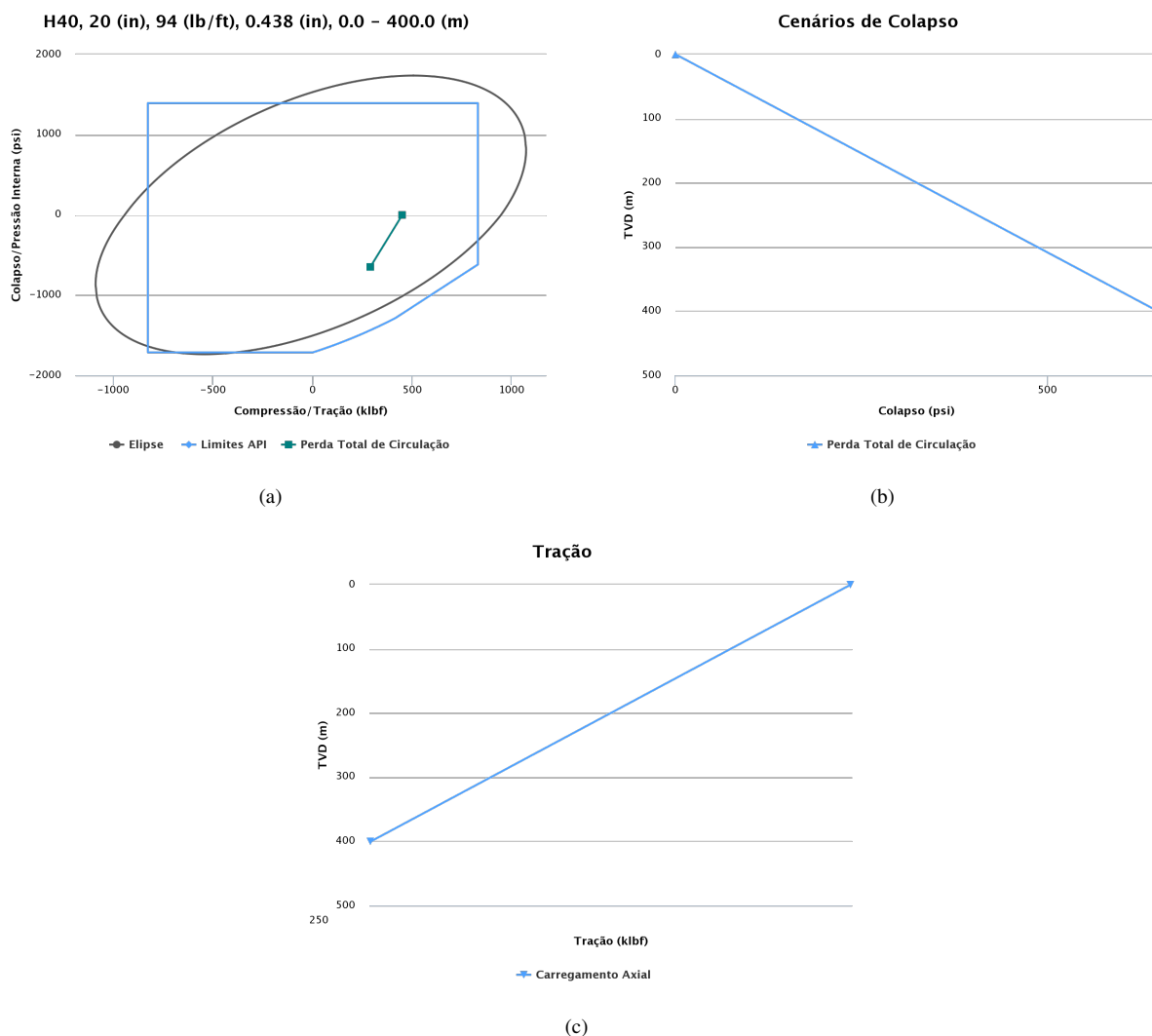


Figura 5. Resultados fase 1 (Revestimento Condutor)

Referências

- [1] J. E. Thomas. *Fundamentos de engenharia de petróleo*. Interciência, 2001.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] ANP. *Resolução ANP nº 46*, 2016.
- [6] 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.
- [7] B. S. Aadnøy. *Modern well design*. CRC press, 2010.
- [8] S. Norge. Norsok standard d-010: Well integrity in drilling and well operations, rev. 4, 2013.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.

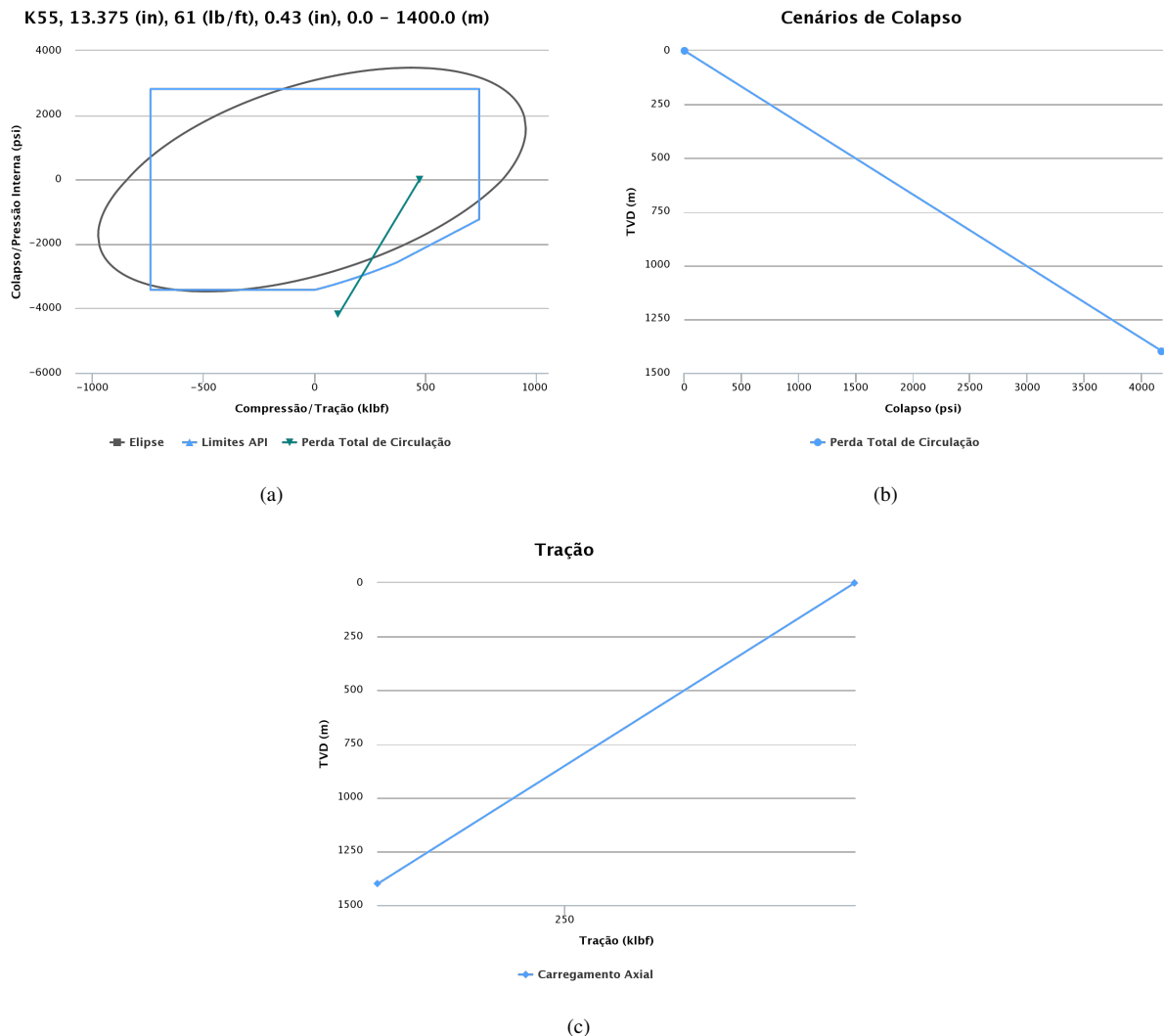


Figura 6. Resultados fase 2 (Revestimento Intermediário)

- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] C. P. Chieza. Diagnósticos de problemas operacionais durante a perfuração de poços de petróleo. Mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2011.
- [17] 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.

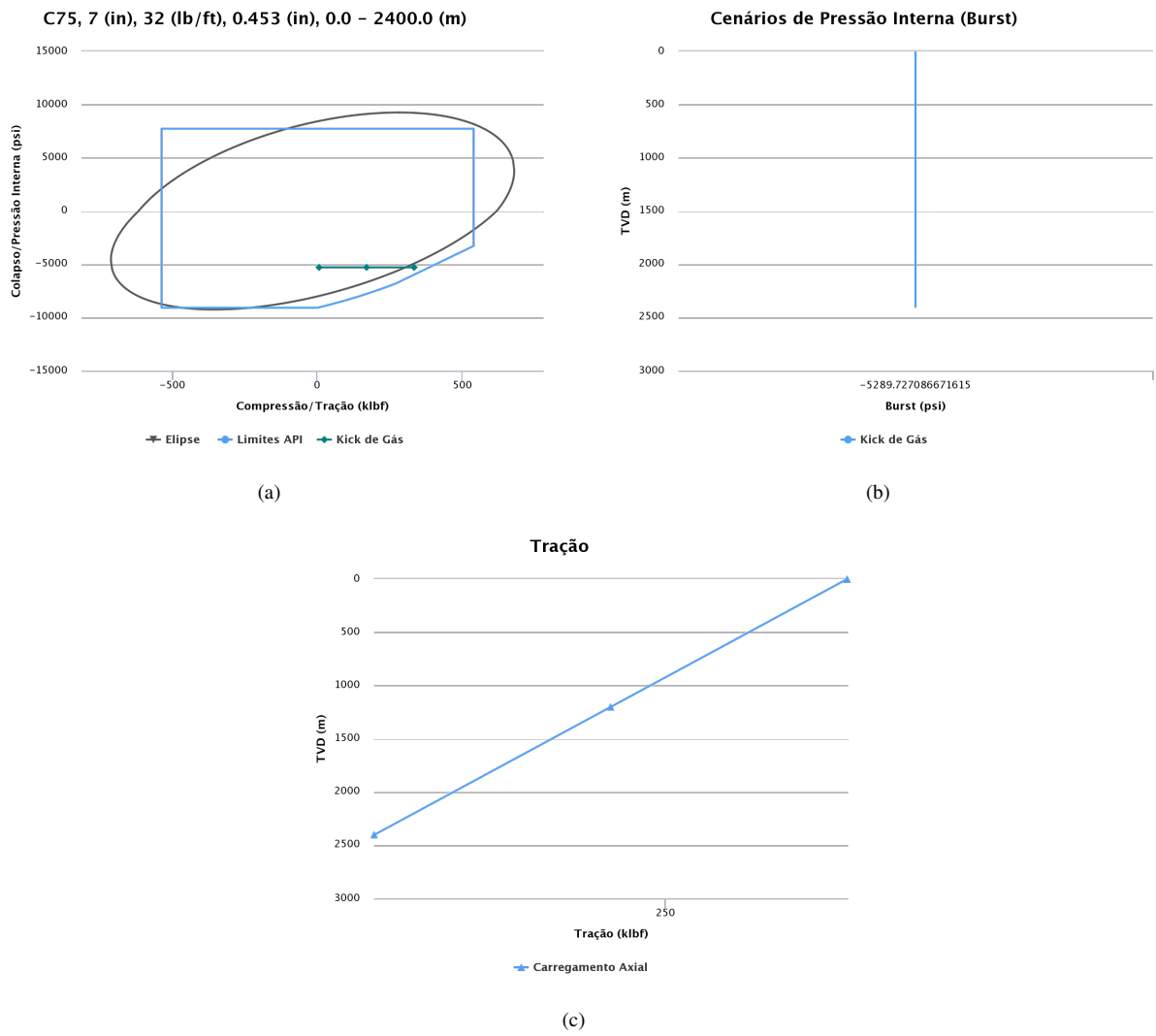


Figura 7. Resultados fase 3 (Revestimento Produção)