

10º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

DESENVOLVIMENTO DE MÓDULO DE ANÁLISE DE ESFORÇOS ATUANTE NA COLUNA DE PRODUÇÃO – CENÁRIOS CRÍTICOS DE PROJETO

AUTORES:

Thauana Nathália Alves Medeiros¹, João Paulo Lima Santos²

INSTITUIÇÃO:

Universidade Federal de Alagoas, UFAL.

DESENVOLVIMENTO DE MÓDULO DE ANÁLISE DE ESFORÇOS ATUANTE NA COLUNA DE PRODUÇÃO – CENÁRIOS CRÍTICOS DE PROJETO

Abstract

Tubing columns are tools that serve as a single pass for produced oil and natural gas and for injecting fluids into reservoirs and are therefore directly involved with the productive life of the well. Because of this, the correct selection of material is critical for a less costly and safe completion project. After the delimitation of material through reservoir aspects, the correct dimensioning of these elements is allowed, considering the comparison between the strength of the structure (including the pipes and their connections) and the forces applied therein. The study of tubing becomes more detailed when considering specific critical scenarios of everyday industry, especially considering the current complexity situations enhanced by environments such as deep and ultra-deep water, as well as high temperature and pressure reservoirs (HPHT). Thus, the improvement process is fundamental to avoid project unfeasibility risks for the production phase. The present work allowed the development of graphical interface and implementation of other critical scenarios in an application that integrates Tubing Well (TWELL) within the Petroleum Engineering Applications System (SAEP). SAEP is an application that can assist in the evaluation of the structural integrity of production column components through the characterization of the acting forces and the analysis of mechanical strength, and is still being refined so that it can assist in designing column columns. production. The web application reaches the educational medium and potentially can extend to the industry. The critical design scenarios developed in this project and implemented in TWELL to provide a more accurate analysis of axial loads were axial stress (sine and helical buckling) and differential pressure (balloon effect). Buckling is an important factor in pipe stress analysis as it is a type of instability that leads to catastrophic failure structure. The balloon effect, because it is based on the expansion and contraction behavior of the well wall, may indicate the occurrence of an unwanted influx of fluid residing in the rock, such as oil, gas and water into the well (kick), assessment of this critical scenario is required.

Introdução

A otimização de produção em campos de exploração de petróleo tem gradativamente ganho maior destaque nas empresas concessionárias devido aos recentes preços praticados no mercado. Esse cenário tem levado as empresas ao desenvolvimento de sistemas de gerenciamento de produção, de forma a maximizar a exploração e minimizar os custos operacionais. A indústria do petróleo demanda uma grande quantidade de equipamentos para oferecer suporte às atividades de perfuração e produção.

Alguns dos equipamentos de maior impacto na eficiência de produção estão associados à coluna de produção. Um dos problemas apresentados na indústria com relação a esse tipo de configuração está relacionado às dificuldades de instalação do equipamento, principalmente em poços horizontais. Problemas mecânicos nos equipamentos também são frequentes, e ocorrem em geral pela baixa resistência mecânica de tubos telados ou amarrados.

As colunas de produção são ferramentas que servem como única passagem para petróleo e gás natural produzidos e para a injeção de fluidos em reservatórios. Devido a isso, é fundamental a seleção correta de material para que haja um projeto de completação menos oneroso e mais seguro. Após a delimitação de material através de aspectos de reservatório, admite-se o correto dimensionamento destes

elementos, que considera a comparação entre a resistência da estrutura (incluindo os tubos e suas conexões) e os esforços nela aplicados (VITORINO, 2018).

Visando restringir os riscos e proporcionar uma análise mais real referente a cenários críticos específicos do cotidiano da indústria, este trabalho busca o desenvolvimento de interface web e incrementação de cenários críticos na aplicação Tubing Well (TWELL), a qual faz parte do aplicativo web Sistema de Aplicações de Engenharia de Petróleo SAEP (COSTA, 2016).

O SAEP é uma ferramenta multidisciplinar computacional capaz de dar assistência a projetos acadêmicos para exploração de petróleo e gás natural. O TWELL é módulo do SAEP responsável por realizar procedimentos de cálculo de projetos de colunas de produção utilizados em poços de petróleo e gás natural, cuja decisão final de dimensionamento é considerada uma das mais importantes durante a completação (BELLARBY, 2009).

O presente trabalho consiste no desenvolvimento de novos recursos para avaliação de flambagem em colunas de produção de poços de petróleo, que foram incorporados ao ambiente WEP TWELL.

Metodologia

Para o cálculo do esforço axial, levando em conta a vida útil do tubular, um número de condições de carregamentos pode agir sobre a componente axial, dentre eles podemos ressaltar a flambagem. É necessário definir-se o limite entre o local onde a flambagem não pode ocorrer e onde pode ocorrer, por ser um tipo de instabilidade que leva uma estrutura à falha catastrófica.

Na tubulação de produção, há uma complicação adicional devido à presença de pressões internas e externas. Dois modos de flambagem são possíveis nesse caso: senoidal e helicoidal. A partir de Lubinski et al (1962, apud BELLARBY, 2009), as forças críticas para cada modo de flambagem em um poço vertical podem ser calculadas pelas equações a seguir:

Flambagem senoidal:

$$F_c = 1.94 (EIw^2)^{1/3} \quad (1)$$

Flambagem Helicoidal:

$$F_c = 4.05 (EIw^2)^{1/3} \quad (2)$$

Onde E é o módulo de elasticidade, I é o momento polar de inércia (em in^4) e w é o peso efetivo (flutuante) da tubulação (em lb/in).

Uma consequência dos poços direcionais é a aplicação da torção ao longo da coluna, desta maneira, é necessário ainda o cálculo do momento polar de inércia da tubulação (Equação 3) em pol^4 , onde D_o é o diâmetro externo da tubulação (in) e D_i é o diâmetro interno da tubulação (in).

$$I = \frac{\pi}{32} (D_o^4 - D_i^4) \quad (3)$$

Em um poço direcional, a força crítica de flambagem é dada por Dawson e Paslay (1984, apud BELLARBY, 2009), conforme Equações 4 e 5.

Flambagem senoidal:

$$F_c = \sqrt{\frac{4EIw \cdot \sin \theta}{r_c}} \quad (4)$$

Flambagem helicoidal:

$$F_c = 1.41 \sim 1.83 \sqrt{\frac{4EIw \cdot \sin \theta}{r_c}} \quad (5)$$

Em que θ é o ângulo de desvio, r_c é a folga radial, w é o peso efetivo (flutuante) da tubulação (em lb/in), I é o momento polar de inércia e E é o módulo de elasticidade. A variação entre 1,41 e 1,83 reflete a incerteza sobre o ponto de que a flambagem senoidal muda para flambagem helicoidal (Aasen and Aadnøy, 2002; Cunha, 2003 apud BELLARBY, 2009).

É possível observar que há uma discrepância nas convenções de sinais. A força crítica é positiva, mas de natureza compressiva, enquanto a compressão é geralmente indicada por uma carga axial negativa. Isso é corrigido com a definição na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1 – Condições de flambagem.

Condição	Significado
$F_{\text{eff}} < -F_c$	A tubulação tende a flambar
$F_{\text{eff}} > -F_c$	A tubulação não tende a flambar

Fonte: BELLARBY, 2009.

A avaliação de cenários críticos de pressão diferencial (efeito balão), por se basear no comportamento de expansão e contração da parede do poço, pode indicar a ocorrência de um influxo indesejado de fluido residente na rocha para dentro do poço (kick), sendo, assim, necessário a avaliação deste cenário crítico. Em uma tubulação fixa, é calculada a força de tensão axial (Equação 6), e posteriormente, calculado o movimento causado pelo efeito balão (Equação 7):

$$F_b = 2 \cdot v \cdot (A_i \Delta p_i - A_o \Delta p_o) \quad (6)$$

$$\Delta L = -\frac{2vL}{E(A_o - A_i)} (A_i \Delta p_i - A_o \Delta p_o) \quad (7)$$

Em que L é o comprimento da tubulação e v é o coeficiente de Poisson (aproximadamente 0.3 para a maioria dos aços em campos petrolíferos). Os efeitos de balão são observados quando a pressão é aplicada à tubulação, portanto, para uma pressão interna será gerada uma força de tração axial, e para uma pressão externa será gerada uma força de compressão axial.

Para a análise dos carregamentos aplicados à coluna de produção ao longo da sua vida útil, foram considerados os diversos componentes de projeto e ponderado os cenários críticos específicos da indústria. Para isso, foram elaborados novos módulos no já existente Tubing Well (TWELL), no Sistema de Aplicações para Engenharia de Petróleo (SAEP) e criada uma interface gráfica para facilitar a interação do usuário com o sistema e melhorar a visualização dos resultados obtidos.

Neste contexto, a linguagem de programação torna-se a base para o servidor. Auxiliando, assim, no processamento de informações a partir do sinal transmitido do frontend - foco em HTML (linguagem

de marcação), CSS (linguagem de estilo) e JavaScript (linguagem de script/programação - e na transmissão inversa de dados, quando a resposta parte do back-end (utiliza a linguagem Python) até a interface para o usuário). Este processo é auxiliado pela JavaScript Object Notation (JSON), a qual possibilita a criação de variáveis para a transferência de dados em diferentes linguagens (Paranhos Sobrinho, 2016; SILVA, 2017).

Resultados e Discussão

O TWELL é dividido em duas seções (Características do Poço e Resultados), onde a primeira delas há o ambiente onde o usuário determina o tipo de coluna de produção, os dados dos tubos e das conexões (Figura 1), os dados operacionais (Figura 2), os cenários e os fatores de segurança de projeto. Enquanto que, na seção Resultados (Figura 3), indica-se, como saída do aplicativo as resistências uniaxiais/biaxiais e triaxiais, e os carregamentos, cabendo ao cliente fazer a comparação de resistências e carregamentos fornecidos, além da análise gráfica a partir do uso das envoltórias API e de von Mises geradas com o estudo triaxial da situação.

Figura 1 – Dados dos tubos e das conexões no TWELL.

A interface do TWELL, intitulada 'Dimensionamento de Colunas de Produção', apresenta uma barra superior com abas 'Características do Poço' e 'Resultados'. Abaixo, há botões para 'Salvar', 'Zerar Campos', 'Executar Projeto' e '1 Voltar Campos'. O usuário é solicitado a 'Determinar o tipo de coluna de produção' com opções 'Uniforme' (selecionada) e 'Seccionada'. A seção principal, 'Dados dos Tubos e das Conexões', contém subseções para 'Tubo' e 'Conexão'. No campo 'Tubo', há campos para 'Diâmetro Externo (in)', 'Peso por Comprimento (lb/ft) / Espessura da parede (in)', 'Mínima espessura da parede (%)' e 'Grau do Aço'. No campo 'Conexão', há opções para 'Non-upset (NU)' e 'External upset (EU)'. Na base da seção, há um campo para 'Comprimento da Seção (m)'.

Fonte: Costa et al (2016).

Figura 2 – Dados operacionais do poço no TWELL.

A interface do TWELL, intitulada 'Dimensionamento de Colunas de Produção', apresenta a mesma barra superior e botões da Figura 1. A seção principal, 'Dados Operacionais', contém campos para 'Profundidade da base do tubo (m TVD)', 'Dogleg Severity (°/100ft)', 'Torque (lbf.in)', 'Massa específica do fluido de completação (lb/gal)' e 'Cenários'. A seção 'Fatores de Segurança de Projeto' está expandida, mostrando campos para 'Fator de segurança' e 'Fator de segurança de projeto'.

Fonte: Costa et al (2016).

Figura 3 – Seção Resultados antes da implementação proposta neste trabalho.

Características do Poço	Resultados
Resistências Uniaxiais	
▶ Tubo ???	
Resistência à Tração	??? klbf
Resistência à Pressão Interna	??? psi
Resistência ao Colapso	??? psi
▶ Conexão ???	
Resistência ao Pull-out/Jump-out da Conexão	??? klbf
Resistência à Pressão Interna de Escoamento da Luva	??? psi
Resistência à Pressão Interna de Vazamento da Conexão	??? psi
▶ Resistências Triaxiais	
▶ Carregamentos	

Fonte: Costa et al (2016).

No caso descrito, na seção Resultados foi feito o incremento na aba Resistências Uniaxiais de dois tópicos, Flambagem e Efeito balão, conforme a Figura 4.

A partir da implementação na ferramenta computacional, foi realizado um estudo de caso para que se determine uma situação mais próxima da realidade. Na Tabela 2 são apresentados os dados dos tubos e conexões utilizados no estudo de caso, e na Tabela 3 são apontados os dados operacionais do poço utilizados como dados de entrada no estudo de caso.

Tabela 2 – Dados gerais para tubos e conexões utilizados no estudo de caso.

Parâmetro	Tubo
Diâmetro externo (em pol)	4
Peso linear (em lb/ft)	9,5
Espessura (em pol)	0,226
Grau de aço	N80
Mínima espessura da parede (em %)	87,5
Comprimento da seção (em m)	3100
Tipo de conexão	NU

Fonte: Autoral (2019).

Tabela 3 – Seleção dos dados operacionais do poço no estudo de caso.

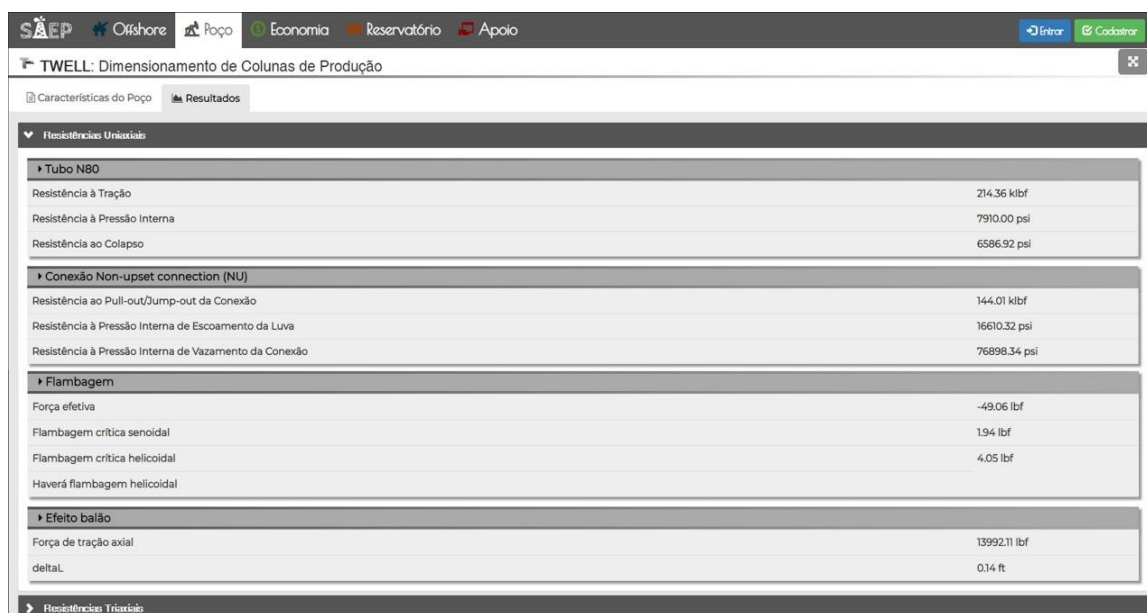
Parâmetro	Tubo
Profundidade da base do tubo (em TVD)	3100
Dogleg Severity (em °/100ft)	0
Torque (em lbf/in)	0
Massa específica do fluido de completação (em lb/gal)	10

Fonte: Autoral (2019).

O cenário crítico escolhido foi o de Teste de Pressão (Pressão interna), utilizado para verificação de falha por *burst*. A pressão de teste na superfície é requisitada na forma de *pop-up* e tem como valor 1200 psi, para, assim, serem calculadas as resistências e carregamentos. Por fim, na última etapa de input, é determinado os fatores de segurança, porém estes parâmetros estão em modo padrão, seguindo o indicado pela NORSOK, e são inseridos automaticamente pelo sistema.

Com os dados aplicados para a verificação de funcionalidade e executando o exemplo, o aplicativo responde desenvolvendo as saídas indicadas para o usuário, como as resistências uniaxiais/biaxiais – mostrado na Figura 4 -, triaxiais e as curvas de carregamentos.

Figura 4 – Seção Resultados implementada dos tópicos Flambagem e Efeito balão com resultados das resistências uniaxiais no estudo de caso no TWELL.



Resistências Uniaxiais	
▶ Tubo N80	
Resistência à Tração	214.36 klbf
Resistência à Pressão Interna	7910.00 psi
Resistência ao Colapso	6586.92 psi
▶ Conexão Non-upset connection (NU)	
Resistência ao Pull-out/Jump-out da Conexão	144.01 klbf
Resistência à Pressão Interna de Escoamento da Luva	16610.32 psi
Resistência à Pressão Interna de Vazamento da Conexão	76898.34 psi
▶ Flambagem	
Força efetiva	-49.06 lbf
Flambagem crítica senoidal	1.94 lbf
Flambagem crítica helicoidal	4.05 lbf
Haverá flambagem helicoidal	
▶ Efeito balão	
Força de tração axial	13992.11 lbf
deltaL	0.14 ft

Fonte: Costa et al (2016).

No tópico Flambagem na Figura 4, tem-se que o tubo apresenta força efetiva (F_{eff}) de -49,06 lbf no ponto crítico e flambagem crítica helicoidal (F_{ch}) de 1,94 lbf. Sabendo que, o tubo tenderá a flambar quando $F_{eff} < -F_c$, o tubo utilizado no estudo de caso apresentará flambagem helicoidal, podendo ser um tipo de instabilidade que leva uma estrutura à falha catastrófica. Tubos de diâmetro maior (e parede mais espessa) terão uma força crítica maior devido ao maior momento de inércia e maior peso.

Na mesma figura, no tópico Efeito balão, é apresentado uma força de tração axial de 13992,11 lbf, causando um movimento de 0,14 ft, devido ao balonismo. Para uma determinada mudança de pressão, a pressão externa tem um efeito maior que a pressão interna, pois a área é maior, causando um aumento de tamanho no tubo.

Conclusões

A implementação e desenvolvimento de módulo de análise de esforços atuante na coluna de produção no TWELL foi primordial para auxílio ao meio educacional e, posteriormente, capacidade de se estender à indústria. O TWELL é um aplicativo em constante aprimoramento para que, assim, possa

auxiliar em projetos de colunas de produção, além de ter um notório pronto funcionamento. A ferramenta web serve, atualmente, como meio de testes para alunos de Engenharia de Petróleo, com o intuito de adquirirem uma previsão do dimensionamento da coluna de produção.

Os cenários críticos de projeto incrementados podem ser utilizados com a finalidade de restringir os riscos e oferecer uma análise mais real referente a cenários críticos específicos do cotidiano da área de Engenharia de Petróleo e Gás. O desenvolvimento da interface gráfica facilitou a interação do usuário com o sistema e serviu para melhorar a visualização dos resultados obtidos.

Por suas limitações técnicas, o TWELL necessita de mais elementos e cenários críticos de projeto que possibilitem uma maior proximidade à realidade. Incentiva-se, assim, o desenvolvimento de atributos dentro do aplicativo web e implementação em sua linha de código, a fim de auxiliar o aperfeiçoamento do aplicativo web.

Com sua completa implementação, o TWELL poderá servir de base para desenvolvimento de novos projetos voltados para o setor de petróleo e gás e possíveis futuras prestações de serviços tecnológicos para empresas.

Agradecimentos

Agradecemos à UFAL, LCCV e CNPq, pelo espaço disponibilizado e verba para desenvolvimento do projeto, além de todos que direta ou indiretamente fizeram parte desta construção.

Referências Bibliográficas

COSTA, J. C. H. et al. **Sistema de Aplicações de Engenharia de Petróleo - SAEP**. 2016. Disponível em: <<http://saep.pythonanywhere.com/>>.

VITORINO, A. F. R. de A. **TWELL: Web interface software for oil well tubing projects**. 2018. 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Engenharia de Petróleo, Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2018.

PARANHOS SOBRINHO, E. d. S. **Desenvolvimento de Aplicações de Sistemas Oceânicos para Descrever o Comportamento de Ondas Marinhas Baseado em Interface Web**. 56 p. Tese (Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia de Petróleo da Universidade Federal de Alagoas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro de Petróleo.) — Universidade Federal de Alagoas, 2016.

BELLARBY, J. **Well Completion Design**. 1st. ed. Oxford: Elsevier B.V, 2009. 711 p. ISBN 9780444532107.