

8º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA AUXÍLIO AO DIMENSIONAMENTO DE COLUNAS DE REVESTIMENTO DE POÇOS DE PETRÓLEO

AUTORES:

Jeremias Christian Honorato Costa

João Paulo Lima Santos

INSTITUIÇÃO:

Laboratório de Computação Científica e Visualização

Centro de Tecnologia - Universidade Federal de Alagoas

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 8º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás - 8º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás - ABPG, no período de 20 a 22 de outubro de 2015, em Curitiba/PR. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 8º PDPETRO.

Ferramenta computacional para auxílio ao dimensionamento de colunas de revestimento de poços de petróleo

Abstract

When drilling wells, hostile environments, such as high-pressured and high-temperature (HPHT) zones, weak and fractured formations, unconsolidated formations, are often encountered. Consequently, wells are drilled and cased in several steps to seal off these troublesome zones and to allow drilling to the total depth. The casing strings are installed; guaranteeing the stability of the side walls of the well and also allows isolation of the shaft with respect to the external environment during producing operations. For the casing design should consider tubes to resist the maximum requests that can occur in the column. These requests or efforts acting on the columns are: traction, internal pressure and collapse.

Keywords: Casing Design; Drilling; Casing Strings; HPHT.

Introdução

A escolha correta dos parâmetros geométricos e mecânicos dos tubos é de extrema importância para o sucesso do poço. O revestimento tem que possuir dimensões e resistências suficientes para permitir que as formações alvo sejam atingidas e produzidas. Essa etapa é uma das mais caras do projeto de poços. Assim, uma importante responsabilidade do engenheiro de perfuração é a concepção de um projeto de revestimento menos caro, mas que permita que o poço seja operado de forma segura. O principal objetivo deste trabalho é apresentar uma ferramenta computacional desenvolvida para auxílio ao projeto de revestimento de poços de petróleo, doravante chamada *Casing Well* (CWELL).

Metodologia

Projeto de Colunas de Revestimento

Para o desenvolvimento de um projeto de revestimento de um poço de petróleo faz-se o cálculo de esforços atuantes nos cenários mais adversos que possam surgir durante a descida, a instalação e a vida útil das colunas e, a partir dos esforços, é realizado o dimensionamento do revestimento que mais se ajusta às cargas, calculando as resistências mecânicas dos tubos e das conexões. Para que a coluna de revestimento escolhida seja adequada, a relação entre a resistência mecânica (R_i) dos tubos e as cargas atuantes (C_i) sobre a coluna deve satisfazer a seguinte relação: $R_i/FS \geq C_i$, onde FS corresponde ao fator de segurança de projeto para o tipo de análise desejada. O projeto deve garantir integridade mecânica do poço e otimização dos custos totais envolvidos, com o uso de tubos que possuam as dimensões mínimas possíveis.

As colunas de revestimento estão sempre sujeitas a condições de cargas combinadas de tração ou compressão com pressão, interna ou externa; situação física mais próxima da realidade; e não de forma idealizada com um estado de tensão axial nulo. Devido a isso, o CWELL foi programado para também realizar uma análise triaxial de dimensionamento. O método de dimensionamento triaxial do revestimento é guiado pela elipse de tensões e pela envoltória API. De acordo com *Bernt* (1996) a elipse de tensões “define os limites de tensão axial (tração ou compressão) versus pressão interna ou externa dentro do qual um tubo de revestimento deve estar trabalhando no regime elástico.”. Já a envoltória API “Define uma região dentro do qual o tubo não falha, considerando as resistências à tração (compressão), pressão interna e colapso, definidas na norma API5C3 (1999). Para o colapso, a envoltória API considera ainda a redução devida à tração”.

1 Resistência mecânica das colunas de revestimento

Os procedimentos de cálculo da resistência mecânica dos tubos de revestimento e das conexões utilizados nesse trabalho seguem às orientações normativas da norma API5C3:1999 (*Bulletin on Formulas and Calculations for Casing, Tubing, Drill Pipe, and Line Pipe Properties*, API, 1999).

1.1 Resistência nos Tubos

A seguir é apresentado um resumo sobre o processo de cálculo da resistência à tração, pressão interna e colapso:

a) Resistência à Tração

O cálculo da resistência à tração (R_t) baseia-se na carga axial mínima requerida para o escoamento do tubo, de modo que o tubo não sofra deformações plásticas. Adota-se então a tensão de escoamento do aço como valor limite, na forma da equação abaixo:

$$R_t = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) Y_p \quad (1)$$

sendo D o diâmetro externo do tubo, d o diâmetro interno e Y_p o limite de escoamento do aço. O fator de segurança varia entre 1,1 a 1,6, dependendo das normas internas das operadoras.

b) Resistência à Pressão Interna (*Burst*)

Trata-se do esforço resultante devido ao diferencial entre as pressões no interior do tubo e no anular (com a pressão interna superior a pressão externa). A resistência à pressão interna (R_{pi}) de escoamento no corpo do tubo é obtida utilizando a Equação de *Barlow*, de acordo com o autor *Bernt* (1996), considerando 87,5% do escoamento da parede, pois o API permite a espessura variar até 12,5%, devido a defeitos de fabricação:

$$R_{pi} = 0.875 \left(\frac{2Y_p}{D/t} \right) \quad (2)$$

sendo D o diâmetro nominal, t a espessura do tubo e Y_p o limite de escoamento do aço. O fator de segurança varia entre 1,0 a 1,25, dependendo das normas internas das operadoras.

c) Resistência ao Colapso

A resistência ao colapso deve suportar o diferencial das pressões criadas pelos fluidos no anular e no interior da coluna (com pressão externa superior a pressão interna). A resistência ao colapso (R_c) é função da razão (D/t) (diâmetro/espessura), do grau do aço do tubo e do esforço axial. O fator de segurança na resistência ao colapso varia entre 1,0 a 1,125.

Segundo a norma API 5C3:1999, são definidos quatro tipos de falhas em regimes de colapso: colapso de escoamento, colapso plástico, colapso de transição, colapso elástico. A partir do range de (D/t) é avaliado a faixa de ocorrência do regime de colapso. A formulação completa para os estados de colapso pode ser obtida na API 5C3:1999. Esquematicamente, acontece na forma:

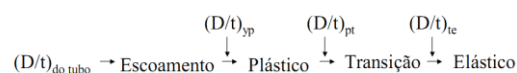


Figura 1. Esquema dos regimes de falhas por colapso

Deve-se também levar em consideração a diminuição do limite de escoamento quando da presença de esforços axiais (S_a), o que resulta numa diminuição da resistência ao colapso, segundo os procedimentos da API5C3:1999:

$$Y_{pa} = Y_p \sqrt{1 - 0.75(S_a/Y_p)^2 - 0.5(S_a/Y_p)} \quad (3)$$

Equação 3 é baseada na teoria da máxima energia de distorção de *Hencky-von-Mises*. A norma ISO 10400:2007 afirma que o material escoar quando a tensão equivalente de *von-Mises* supera o limite de escoamento do aço do *casing* ($\sigma_{VME} > Y_p$).

1.2 Resistência nas Conexões

A conexão é o conjunto formado pelas juntas do tubo de revestimento (*casing thread* ou *pin*) e pelo acoplamento externo (*coupling thread* ou *box*). Tem a função de unir dois tubos de revestimento através de suas juntas rosqueadas. De acordo com Schwind (2006) cerca de 85% a 95% de todas as falhas ocorridas nas colunas de revestimento estejam relacionadas às conexões. As conexões da API são divididas em três famílias: rosca *round thread*, rosca *butress thread* e rosca *extreme-line*.

A norma API5B:1988 define três tipos de falhas nas conexões, por fratura, por *jump-out* e por *pull-out*. A falha por *pull-out* acontece quando a rosca do tubo desliza sobre a rosca da *coupling* ou o contrário, já no *jump-out* o tubo se solta da *coupling* sem que haja o deslizamento.

a) Resistência da Rosca Round Thread

As equações de resistência da rosca *round thread* considera apenas o carregamento axial. A depender das condições de acoplamento, a resistência da conexão pode ser inferior à do corpo do tubo.

Resistência à fratura no tubo	$P_j = 0.95A_{jp}U_p$ (4)
Resistência ao pull-out / jump-out	$P_j = 0.95A_{jp}L\left[\frac{0.74D^{-0.59}U_p}{0.5L+0.14D} + \frac{Y_p}{L+0.14D}\right]$ (5)
Resistência à fratura na <i>coupling</i>	$P_j = 0.95A_{jc}U_c$ (6)

onde A_{jp} é a área da seção transversal do tubo antes da última linha perfeita e calculada por $A_{jp} = 0.7854[(D - 0.1425)^2 - d_1^2]$, A_{jc} é a área da seção transversal da *coupling* e calculada por $A_{jc} = 0.7854(W^2 - d_1^2)$, U_p é a resistência mínima última do aço do corpo do tubo, U_c é a resistência mínima última do aço da *coupling*, L é comprimento da rosca engrenada, W é o diâmetro externo do acoplamento, d_1 é o diâmetro na raiz do acoplamento no final do tubo.

b) Resistência da Rosca Butress Thread

A API define, para este tipo de conexão, apenas duas equações de resistência, pois se baseia no fato de que a *butress thread* não falha por *pull-out*.

Resistência à fratura no tubo	$P_j = 0.95A_pU_p\left[1.008 - 0.396\left(1.083 - \frac{Y_p}{U_p}\right)D\right]$ (7)
Resistência à fratura na <i>coupling</i>	$P_j = 0.95A_{jc}U_c$ (8)

c) Resistência da Rosca Extreme-Line

As equações de resistência das *extreme-line* são baseadas nas dimensões da seção transversal que podem ser críticas no tubo, no *pin* ou no *box* dependendo das dimensões e especificações da conexão.

$$P_j = A_{cr} U_p \quad (9)$$

onde U_p é a resistência mínima última do aço do corpo do tubo, A_{cr} é a área crítica da seção transversal do *box*, do *pin* ou do tubo: $= 0.7854(M^2 - d_b^2)$ se o *box* é crítico, $= 0.7854(D_p^2 - d_j^2)$ se o *pin* é o crítico, $= 0.7854(D^2 - d^2)$ sendo D o diâmetro externo nominal do tubo, d o diâmetro interno nominal do tubo, D_p o diâmetro externo crítico do *pin*, d_j o diâmetro interno da junta, M o diâmetro externo nominal da junta, d_b o diâmetro interno crítico do *box*.

2 Definições do projeto de carregamentos

Para os procedimentos de cálculo dos esforços atuantes na coluna não há normatização específica. Cada empresa geralmente desenvolve suas próprias "regras". Isto leva a uma variedade de diferentes abordagens e filosofias, geralmente conservadoras. Para implementação do módulo de esforços atuantes buscou-se compilação de alguns procedimentos disponíveis na literatura e discutidos por Bernt (1996) e Bourgoyne (1986).

2.1 Esforços Axiais

Para o cálculo do carregamento axial total em qualquer ponto durante a instalação, perfuração e serviço, um número de condições de carregamentos deve ser considerado, como por exemplo: peso próprio da coluna; efeito de empuxo, devido à flutuação da coluna no fluido de perfuração; carregamentos de flexão, caso o poço apresente alguma inclinação (*dog leg severity*); *overpull* avaliado para o puxamento do revestimento se requerido durante as operações de instalação do revestimento; carregamentos devido às mudanças de temperatura ao longo do poço; entre outros.

2.2 Esforços de Pressão Interna (Burst)

De maneira simplificada, pode-se definir um tubo submetido à uma falha por pressão interna, quando a pressão resultante diferencial entre a pressão atuante na parte interior e exterior do tubo excede a resistência mecânica do tubo. De acordo com Bernt (1996), esse tipo de falha apresenta como principal característica uma falha ou propagação de trincas na direção predominante axial do tubo.

O procedimento de cálculo dos esforços de *burst* depende essencialmente das hipóteses levantadas para os procedimentos de instalação e operação dos tubos. Geralmente as colunas são dimensionadas para a situação possível de ocorrência crítica de *kick* usando o *Driller's Method* como explanado no site da SPE (2015).

2.3 Esforços de Colapso

Conforme discutido previamente, quando o diferencial de pressão aplicado ao tubo indicar um nível de pressão externa maior que a interna, com grande predominância da pressão externa atuando no anular, o tubo pode sofrer falha por colapso. A pressão externa pode ser consequência de alterações da pressão de poro do reservatório, do fluido de perfuração e da expansão térmica de gases no tubo.

O procedimento de cálculo dos esforços atuante que podem induzir à falha por colapso dependem essencialmente das hipóteses levantadas para os procedimentos de instalação e operação dos tubos. Geralmente as colunas são dimensionadas para a situação mais crítica onde teríamos pressão interna nula, cenário conhecido como *full evacuation* ou evacuação total.

Módulos de cálculo de resistência mecânica e carregamento - CWELL

A ferramenta CWELL é desenvolvida em C++ e ela possui um módulo específico para cálculo da resistência mecânica dos tubos empregados nas colunas de revestimento e outro específico para os cálculos dos carregamentos previamente selecionados. O procedimento de cálculo pode ser efetuado por seção do poço (fase), conforme interface de manipulação de dados apresentado na Fig. 2.

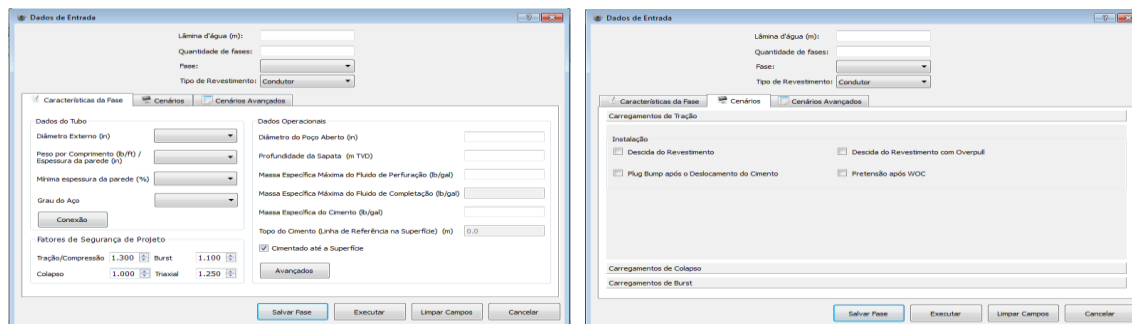


Figura 2. Interface de edição de dados do CWELL

Resultados e Discussão

Para ilustrar a potencialidade da ferramenta, é avaliado um estudo de caso, onde um poço é perfurado em duas fases (revestimento intermediário e revestimento de produção) como demonstrado nas Figs. 3 e 5.

Para a primeira fase, no revestimento intermediário, utilizou uma lama de perfuração de 10 lb/gal e cimento com 16 lb/gal (cimentando até a superfície) e assentou a sapata na profundidade de 1500 m, onde é esperado um *kick* de gás com gradiente de 0,33 psi/m. Admite-se uma pressão equivalente de poros da formação de 10,87 lb/gal como apresentado na Fig. 3. O perfil de esforço axial e pressão interna (*burst*) é apresentado esquematicamente na Fig. 4.

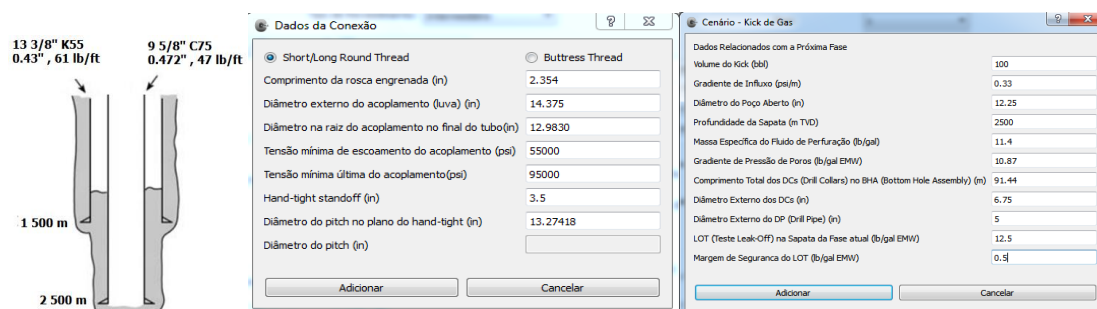


Figura 3. Configuração do poço e dados de entrada referentes a primeira fase do projeto do poço

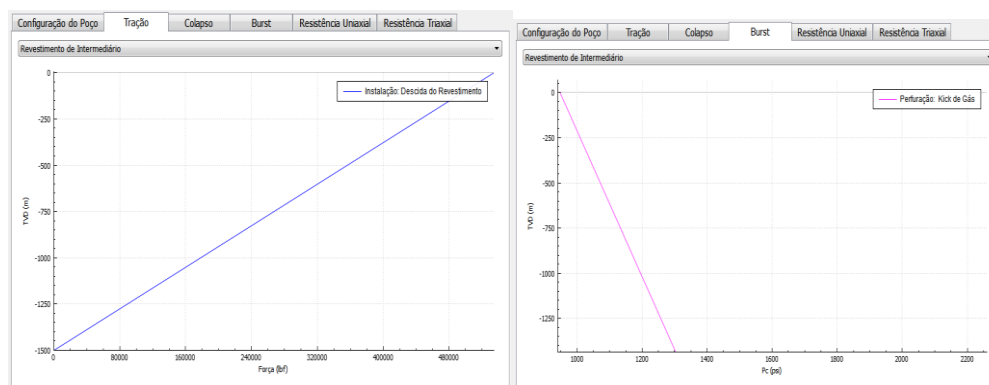


Figura 4. Gráficos dos esforços de tração e *burst* no revestimento intermediário

8º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS

Para a segunda fase, no revestimento de produção, utilizou uma lama de perfuração de 11.4 lb/gal e cimento com 16 lb/gal (cimentando até a metade do revestimento) e assentou a sapata à 2500 m como demonstrado na Fig. 5. Para o dimensionamento ao colapso assumiu o cenário de evacuação total e para o de *burst* o cenário do teste *leak-off*. O perfil de esforço axial e pressão de colapso são apresentados na Fig. 6.

Dados da Conexão

☒ Short/Long Round Thread ☐ Buttress Thread

Comprimento da rosca engrenada (in) 2.229

Diâmetro externo do acoplamento (luva) (in) 10.625

Diâmetro na raiz do acoplamento no final do tubo(in) 9.2400

Tensão mínima de escoamento do acoplamento (psi) 75000

Tensão mínima última do acoplamento (psi) 95000

Hand-tight standoff (in) 3.5

Diâmetro do pitch no plano do hand-tight (in) 9.52418

Diâmetro do pitch (in)

Adicionar Cancelar

Cenário - Teste Leak-off (LOT) após WOC

LOT ou Gradiente de Pressão de Fratura (lb/gal EMW) 15

Margem de Segurança do LOT (lb/gal EMW) 0.5

Massa Específica do Cimento Endurecido ou Gradiente de Pressão de Poros (lb/gal EMW) 9

Adicionar Cancelar

Figura 5. Dados de entrada referentes a segunda fase do projeto do poço

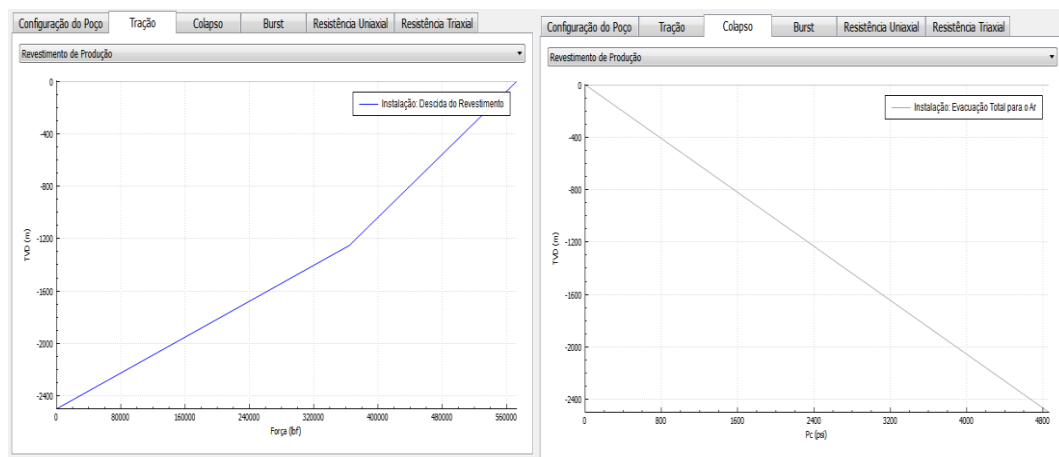


Figura 6. Gráficos dos esforços de tração e colapso no revestimento de produção

Podemos observar pela Fig. 7 os valores das resistências mecânicas calculadas pelo CWELL.

Configuração do Poço	Tração	Colapso	Burst	Resistência Uniaxial	Resistência Triaxial
Revestimento de Intermediário					
Tubo	K55				
OD (in):	13.375				
Espessura (in):	0.43				
Peso (lb/ft):	61				
Kwall (%):	87.5				
Resistência à Tração (lbf):	961798				
Resistência à Pressão Interna (psi):	3094.39				
Resistência ao Colapso (psi):	1539.51				
Resistência à Pressão Interna (Escoamento) (psi):	5325.91				
Resistência à Pressão Interna (Vazamento) (psi):	4551.19				
Resistência à Fratura (BOX) (lbf):	2.69936e+06				
Resistência à Fratura (PIN) (lbf):	1.30947e+06				
Resistência ao Pull-out/Jump-out (lbf):	584193				

Configuração do Poço	Tração	Colapso	Burst	Resistência Uniaxial	Resistência Triaxial
Revestimento de Produção					
Tubo	C75				
OD (in):	9.625				
Espessura (in):	0.472				
Peso (lb/ft):	47				
Kwall (%):	87.5				
Resistência à Tração (lbf):	1.01793e+06				
Resistência à Pressão Interna (psi):	6436.36				
Resistência ao Colapso (psi):	4611.29				
Resistência à Pressão Interna (Escoamento) (psi):	9776.47				
Resistência à Pressão Interna (Vazamento) (psi):	8461.31				
Resistência à Fratura (BOX) (lbf):	1.95018e+06				
Resistência à Fratura (PIN) (lbf):	1.03191e+06				
Resistência ao Pull-out/Jump-out (lbf):	689482				

Figura 7. Dados de saída do CWELL referentes as resistências uniaxiais das colunas

A estabilidade de cada coluna de revestimento pode ser avaliada observando conjuntamente o par ordenado de esforços/tensão axial e pressão diferencial associado a cada profundidade da coluna. Combinando a envoltória de plasticidade para o tubo em questão (tubo API grade K55 e C75), observa-se na Fig. 8, que a combinação de esforços de colapso e pressão interna para o caso avaliado mantém os revestimentos do poço na zona de regime elástico (interior da elipse).

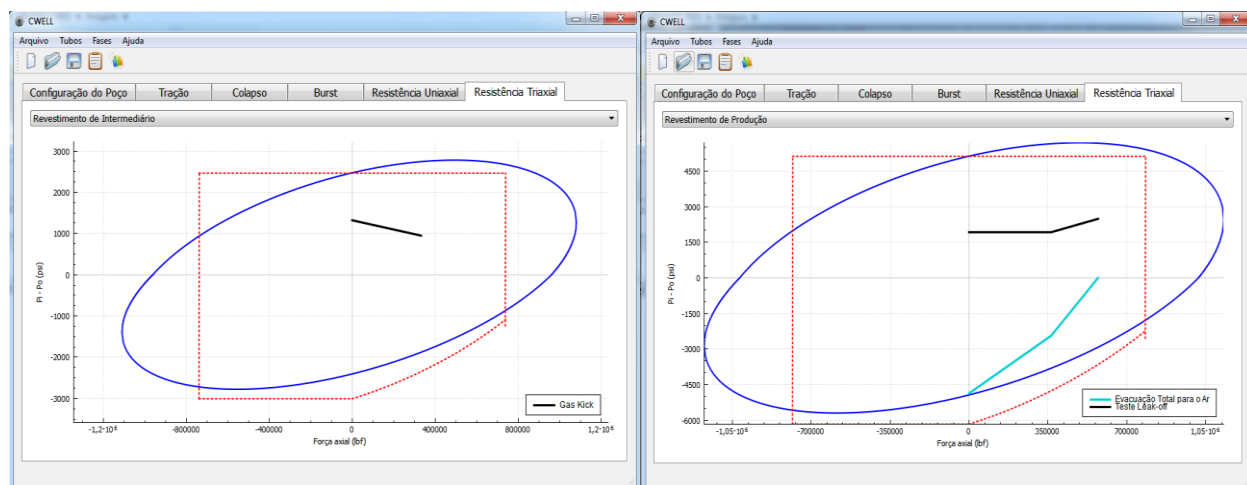


Figura 8. Análise de estabilidade ao longo do revestimento – Método triaxial

Conclusões

A ferramenta desenvolvida apresentou versatilidade nas estratégias implementadas, podendo ser empregada no processo de dimensionamento de colunas de revestimento de poços de petróleo, servindo de apoio aos projetistas e para fins educacionais.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus. Deixo também expressos meus sinceros agradecimentos ao meu orientador Prof. Dr. João Paulo Lima Santos, ao Laboratório de Computação Científica e Visualização (LCCV) e à Universidade Federal de Alagoas (UFAL) por todo apoio técnico-científico na realização deste trabalho.

Referências Bibliográficas

- American Petroleum Institute, 1988. *Specification for Threading, Gauging and Thread Inspection of Casing, Tubing, and Line Pipe Threads 5B*. Washington.
- American Petroleum Institute, 1999. *Bulletin on Formulas and Calculations for Casing, Tubing Drill Pipe, and Line Pipe Properties 5C3*. Washington.
- Bernt, S. A. 1996. *Modern Well Design.2 ed*. CRC Press.
- Bourgoyne Jr A.T., Millheim K.K, et. al. 1986. *Applied Drilling Engineering, SPE*.
- International Organization for Standardization. 2007. ISO/TR 10400: *Petroleum and natural gas industries – Equations and calculations for the properties of casing, tubing, drill pipe and line pipe used as casing or tubing*.
- Schwind, B. E. 2006. *Project Aims to Qualify Tubular Connections. Drilling Contractor*, p.60, 2006.
- SPE – The Society of Petroleum Engineers. *Driller's Method*. 2015. Disponível em: <http://petrowiki.org/Internal_pressure_loads_on_casing_and_tubing_strings> Acesso em: 10/07/2015.