

9º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



9º CONGRESSO
Brasileiro de P&D em
PETRÓLEO E GÁS

Maceió, AL
de 09 a 11 de novembro
2017

Realização:



ABPG
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE P&D EM
PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

ANÁLISE DE CENÁRIOS CRÍTICOS DE FALHA POR PRESSÃO INTERNA (*BURST*) EM REVESTIMENTO DE POÇOS DE PETRÓLEO

AUTORES:

André Felipe Reis de Araujo Vitorino, João Paulo Lima Santos, Jeremias Christian Honorato Costa, Teófanés Vitor Silva

INSTITUIÇÃO:

Universidade Federal de Alagoas

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 9º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás - 9º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás - ABPG, no período de 09 a 11 de novembro de 2017, em Maceió/AL. 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 9º PDPETRO.

ANÁLISE DE CENÁRIOS CRÍTICOS DE FALHA POR PRESSÃO INTERNA (*BURST*) EM REVESTIMENTO DE POÇOS DE PETRÓLEO

Abstract

The pre-salt region is the main source of oil and natural gas supply in the country, also it has limitations in some of its fields regarding the technological or/and financial capacity to collect these commodities. For exploration to take place in a viable way, several studies are needed to develop projects that confirm the successful practicability of exploitation. Planning wells project is an important part of the initial feasibility analysis. Considering this stage, casing must be investigated. This is the section responsible for insulating the well from the external environment and supporting the lateral walls. However, given the increasingly complex geological scenarios present in O&G industry, especially in the pre-salt regions, the use of casing techniques to support adverse situations under which the projects are submitted is significant. Aiming to optimize these methods, it has been developed a computational tool, called CWELL. It investigates the external efforts in drilling process of wells found in high pressures and temperatures areas. Thus, numerical strategies were used to evaluate the structural integrity of casing columns through the development of a C++ computer language software with Qt creator graphic interface, capable of evaluating the problems to which the structure are subjected, such as rupture by excessive internal pressure, known by burst. The program can receive user data, as well as its preferences for determining different extreme internal pressure scenarios, whether during installation, drilling or service (such as gas kick, a common situation in many accidents in this industry). In all cases, the analysis is based on the mechanical resistance of the tube and on calculations that represent environmental efforts, considering the Von Misses equation and guidelines of the *API bulletin 5C3*. Using the triaxial load capacity diagram, following the Von Misses Ellipse, which serves as an important source of casing safety determination, and considering the burst scenario, it will be demonstrated the importance of sizing this structure to avoid structural disasters, preventing several problems for the industry.

Introdução

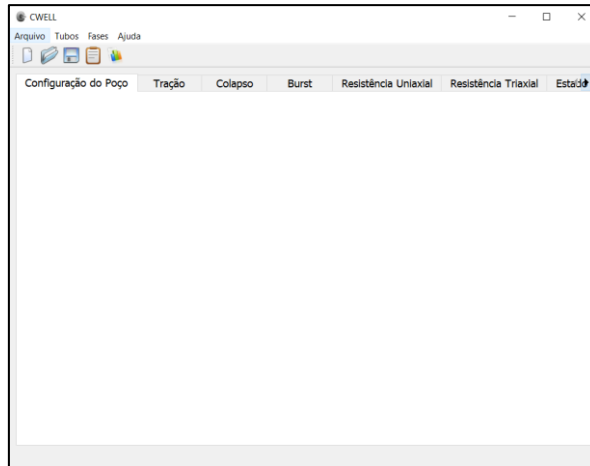
No trabalho de perfuração dos poços de petróleo, uma das mais caras parcelas se relaciona ao revestimento, o qual se responsabiliza pelo isolamento do poço em relação ao meio externo, evitando a liberação de contaminantes ao meio ambiente, e a sustentação das paredes laterais (BOURGOYNE JR. *et al*, 1991). Por razões como essa, o revestimento é considerado uma importante questão na indústria de óleo e gás, relevância que aumenta devido aos cenários geológicos cada vez mais complexos presentes na indústria (WU & ZHANG, 2005), os quais exigem o uso de técnicas de revestimento que suportem as situações adversas sob as quais os projetos são submetidos, incluindo no desenvolvimento de ferramentas inovadoras para modelagem geomecânica (PINHEIRO *et al*, 2015).

Almejando a otimização desses métodos, busca-se o desenvolvimento de uma ferramenta computacional, chamada *Casing Well* (CWELL). Considerando os revestimentos aplicados na engenharia de poços, ela é responsável por investigar esforços externos e internos aplicados em distintos cenários e fases encontrados em áreas de altas pressões e temperaturas (HTHP) e sujeitos ao efeito de corrosão (comuns em região de pré-sal), como também sistemas *Casing While Drilling*. Nesses distintos cenários, potencialmente, podem ser aplicadas diferentes tipos de falhas, como as do tipo *burst* (BOURGOYNE JR. *et al*, 1991). Historicamente, essa falha é derivada da avaliação uniaxial, baseada na tensão radial resultante de pressurização. Visando aumentar a verificação de integridade estrutural, o *software* também julga os cenários através da elipse de plasticidade de Von Mises, a qual averigua a situação também respeitando o aumento da carga axial devido à ação radial (KASTOR, 1986).

Metodologia

Para que se aplicassem essas condicionantes, o CWELL, cuja janela inicial está representada na Figura 1, foi desenvolvido em linguagem computacional C++ com interface gráfica criada através do *Qt Creator*. Para que suas funções sejam utilizadas de forma apropriada, é necessário que o usuário transfira os dados de entrada básicos do projeto de revestimento a ser verificado (como o diâmetro externo do tubo e a profundidade da sapata). O objetivo é a verificação, em diferentes cenários, da segurança quanto à integridade estrutural.

Figura 1 – Layout da janela inicial do software Casing Well (CWELL).



Fonte: Autor.

Parte da investigação realizada pelo software é baseada no relatório técnico 5C3 (ANSI/API, 2008), considera, em comportamento uniaxial, os carregamentos que agem de forma axial (em que as falhas podem acontecer por tensão ou compressão), radial e tangencial, tendo nessas duas a análise de falha por colapso e por *burst*. Essa última é uma consequência de quando a diferença entre as pressões interna (superior) e externa sobressai a resistência mecânica do tubo, gerando instabilidade dúctil ou ruptura frágil (AADNØY, 2010; TALLIN *et al*, 1998). Isso, por sua vez, pode resultar na ruptura ao longo do eixo não apenas em sua seção de revestimento, como em sua conexão, como podemos ver esquematizado na Figura 2a. Trata-se de uma situação que possui diversos relatos na indústria, como o ocorrido em 1944, no poço Taylor 177 (no campo *Ventura Avenue*, localizado na Califórnia, Estados Unidos), quando submetido ao bombeamento para remoção da coluna de produção gerando ruptura do tipo *burst* na coluna de revestimento, ilustrado na Figura 2b (KETTENBURG & SCHMIEDER, 1945).

Figura 2 – Na esquerda: esquema da falha do tipo *burst* em um tubo. Na direita: representação de uma falha do tipo *burst* ocorrida em um revestimento removido do poço Taylor 177, aplicado numa profundidade de 497 pés e sob diferencial de pressão de 3800 psi.



Fonte: AADNØY, 2010, Adaptado; KETTENBURG & SCHMIEDER, 1945.

Para que se evitem problemas como o retratado por esses autores, um cenário pode ser aplicado nos dados de entrada do *software*, como vemos na Figura 3. Para tanto, o CWELL foi elaborado partindo

da conceituação determinada pela ANSI/API, 2008, determina que a tensão aplicada à estrutura não pode superar a resistência a *burst* para o revestimento, a qual, segundo a mesma norma é explícita na Equação 1. Nela, o fator de 0,875 considera a tolerância de 12,5% a menos da espessura nominal da parede, Y_p é a tensão de escoamento do material do tubo, t é sua espessura e OD é seu diâmetro externo. Vale notar, contudo, que existem outras relações que podem determinar esse mesmo tipo de resistência, sendo algumas delas demonstradas por WU & ZHANG, 2005. Apesar da limitação para aplicação da Equação 1, a qual encontra os valores aproximados de resistência com pequenos erros apenas para quando a pressão de superfície do projeto alcança valores inferiores a 12000 psi, KASTOR, 1986, considera-a como válida para o critério uniaxial ou biaxial.

Figura 3 – Dados de entrada gerais do projeto aplicados no software para desenvolvimento do cenário escolhido.

Fonte: Autor.

$$R_{pi} = 0,875 * \left(\frac{2 * Y_p * t}{OD} \right) \quad (1)$$

Este autor também complementa afirmando que, quando a pressão de superfície alcança – aproximadamente – 15000 psi, pode não ser seguro trabalhar com a Equação 1. Sabendo que, partindo da Teoria de deformação plástica, conhecida como Teoria de Von Misses, o critério de falha é aperfeiçoado por tratar do aumento positivo da tensão axial devido a possíveis ações da tensão tangencial. Comumente usada na engenharia (BOURGOYNE JR. *et al*, 1991), a Teoria de distorção de energia de Hencky-von Mises pode, segundo AADNØY, 2010, ser aplicada na análise tridimensional, pois realiza estudo de cargas de tensão combinadas que atuam no revestimento. Para isso, relacionam-se a tensão axial (σ_z), a tensão radial (σ_r) e a tensão tangencial (σ_t) como é dado pela Equação 2, determinando a tensão de escoamento (σ_e). Vale observar que, com os dados dessa equação e tomando como base as equações de Lamé, descritas nas Equação 3 e Equação 4 (nas quais a é o raio até o limite interno da parede do tubo, r é o raio até o centro dessa parede e b é o raio até o limite externo da mesma parede), podemos construir a elipse de von-Mises, a qual nos assegurará da segurança do projeto a partir de visualização gráfica. Vale observar que, seguindo o especificado por ANSI/API, 2008, também é plotada a envoltória de segurança API em análise triaxial, a qual reafirma, caso por essa do mesmo modo seja endossada, a preservação estrutural. Contudo, para que contextos mais realísticos pudessem ser aplicadas ao projeto, diversos cenários críticos foram implementados.

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} * [(\sigma_z - \sigma_t)^2 + (\sigma_t - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2]^{0,5} \quad (2)$$

$$\sigma_r = \frac{a^2 * P_i - b^2 * P_e}{b^2 - a^2} - \frac{(P_i - P_e) * a^2 * b^2}{(b^2 - a^2) * r^2} \quad (3)$$

$$\sigma_t = \frac{a^2 * P_i - b^2 * P_e}{b^2 - a^2} + \frac{(P_i - P_e) * a^2 * b^2}{(b^2 - a^2) * r^2} \quad (4)$$

Nas práticas que buscam trazer maior veracidade aos projetos que possam ser desenvolvidos, observamos distintos tipos de colunas de revestimento e notamos que nos mesmos acontecem as fases de Instalação (a qual se refere aos procedimentos que antecedem a alocação da cabeça do poço e assentamento do mesmo), de Perfuração (após a Instalação, prolonga-se até o termino da cimentação e da completação) e de Serviço (trata-se da fase em que o poço já se encontra após Perfuração, ou seja, quando já tem ocorrido a completação, alongando-se até o fim da vida útil do poço). Os principais cenários críticos são baseados na norma elaborada pela REPSOL YPF (2000), sendo esses descritos na Tabela 1, considerando apenas a falha do tipo *burst*.

Tabela 1 - Diferentes cenários existentes no processo de perfuração. Adote, em referência aos tipos de revestimento: Revestimento Condutor (C), Revestimento de Superfície (S), Revestimento Intermediário (I), Revestimento de Produção (P), Revestimento *Liner* (L).

Cenário Crítico	Tipo de Fase / Tipo(s) de Coluna(s) de Revestimento
Deslocamento do Cimento	Instalação / S, I, P, L
<i>Plug Bump</i>	Instalação / S, I, P, L
Teste de Pressão no Revestimento após WOC	Perfuração / C, S, I, P, L
Teste <i>Leak-off</i> após <i>Drilling out Shoe</i>	Perfuração / S, I, P, L
<i>Kick</i> de gás	Perfuração / S, I, P, L
<i>Shut-in Tubing Pressure</i>: Vazamento na Superfície	Serviço / P, L
Poço Completo de Gás até a Superfície	Serviço / P, L
Operações DST	Serviço / P, L

Visando a análise do trabalho a ser realizado pelo *software*, será discutido apenas um cenário crítico, o *Kick* de gás, o qual será aplicado em um revestimento intermediário 13 3/8”, cujo grau de aço é K55. Trata-se de uma situação (*kick* de gás cujo volume é 100 bbl) baseada em outras existentes na REPSOL YPF (2000) e com dados específicos utilizados demonstrados na Figura 4, que propicia o *burst* devido à máxima pressão interna em cada profundidade enquanto ocorre a circulação para fora, utilizando um dos métodos de amortecimento do poço, método do sondador. Segundo BOURGOYNE JR. *et al* (1991), nessa situação, é importante verificar os efeitos da temperatura e compressibilidade do gás, os quais propiciam maior pressão anular que um *kick* líquido, principalmente devido a menor densidade e maior expansão do gás. Esse efeito pode ser causado por fatores comuns na indústria como a perda de circulação, redução da massa específica do fluido de perfuração e corte de lama por gás.

Figura 4 – Dados de entrada específicos do projeto aplicados no *software* para desenvolvimento do cenário escolhido.

Dados Relacionados com a Próxima Fase	
Volume do Kick (bbl)	100
Gradiente de Influxo (psi/m)	0.5
Diâmetro do Poço Aberto (in)	14
Profundidade da Sapata (m TVD)	1372
Massa Específica do Fluido de Perfuração (lb/gal)	10
Gradiente de Pressão de Poros (lb/gal EMW)	10.87
Comprimento Total dos DCs (Drill Collars) no BHA (Bottom Hole Assembly) (m)	91.44
Diâmetro Externo dos DCs (in)	6.75
Diâmetro Externo do DP (Drill Pipe) (in)	5
LOT (Teste Leak-Off) na Sapata da Fase atual (lb/gal EMW)	15
Margem de Segurança do LOT (lb/gal EMW)	0.5

Adicionar Cancelar

Fonte: Autor.

Para realizar os cálculos de esforços e resistências necessários, o CWELL leva em consideração os fatores de segurança aplicados no projeto. Tratam-se de parâmetros capazes de incrementar a margem de proteção garantida pelos resultados obtidos. Apesar de sua utilidade, segundo a ANSI/API (2008), eles modificam carregamentos e resistências podendo, inclusive, gerar inconsistência na sinalização de riscos ou probabilidades de falhas. Por essa razão, segundo AADNØY (2010), existem fatores de segurança mínimos que devem ser seguidos, sendo que esses variam de acordo com os requerimentos do operador, fase, tipo de falha e qualidade de tubo aplicados. Assim, como é possível ver na Figura 3, foram utilizados os fatores de segurança sugeridos pela REPSOL YPF (2000).

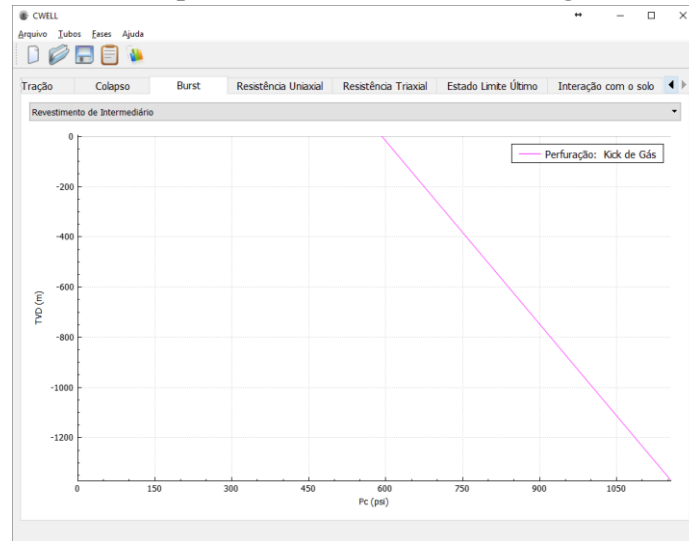
Resultados e Discussão

Com todo o projeto de revestimento intermediário de grau K55 elaborado, o CWELL pode trabalhar satisfatoriamente com o cenário escolhido e realizar o cálculo dos carregamentos aplicados para verificação da integridade estrutural, a qual possuiu valores aproximados àqueles apresentados pela REPSOL YPF (2000). Os dados de saída do projeto são apresentados em uma janela semelhante às apresentadas na Figura 5, para Resistência Uniaxial, e na Figura 6, para o cenário crítico de *kick* de gás.

Figura 5 – Dados de saída para Resistência Uniaxial do projeto disponibilizados pelo *software* seguindo o cenário escolhido.

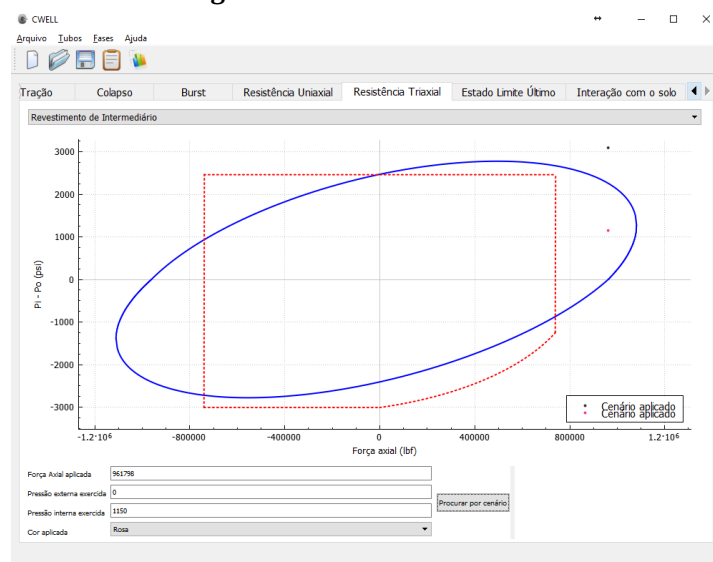
Revestimento de Intermediário	
Tubo	K55
OD (in):	13.375
Espessura (in):	0.43
Peso (lb/ft):	61
Kwall (%):	87.5
Resistência à Tração (lb):	961798
Resistência à Pressão Interna (psi):	3094.39
Resistência ao Colapso (psi):	1539.51
Resistência à Pressão Interna (Escoamento) (psi):	nan
Resistência à Pressão Interna (Vazamento) (psi):	nan
Resistência à Fratura (BOX) (lb):	0
Resistência à Fratura (PIN) (lb):	1.30947e+6

Fonte: Autor.

Figura 6 – Dados de saída para cenário crítico de *kick* de gás escolhido para *burst*.

Fonte: Autor.

Com os dados de saída obtidos, partindo do analisado na REPSOL YPF (2000), decorre-se que o CWELL obteve sucesso em sua investigação. No cenário crítico de *kick* de gás, ainda é possível observar do aumento de pressão crítica – no eixo das abscissas – com uma maior profundidade. Segundo BOURGOYNE JR. *et al* (1991), trata-se de uma consequência do aumento do volume de *kick* na circulação. Na Figura 7, vemos a elipse de Von Mises decorrente da resistência triaxial.

Figura 7 – Dados de saída para Resistência Triaxial do projeto disponibilizados pelo software seguindo o cenário escolhido.

Fonte: Autor.

Nela, foram introduzidos dois cenários. O primeiro, baseado na resistência uniaxial e representado pelo ponto preto, considera uma diferença de pressão de 3094,39 psi com a tração máxima de 961798 psi. Por estar externo ao diagrama de Von Mises (em azul) tanto quanto à envoltória API (em vermelho tracejado), observamos que não é um cenário seguro, o que é justificado devido às ações combinadas entre tensões. O segundo cenário (diferença de pressão de 1150 psi com a tração máxima de 961798 psi), em rosa, demonstra que a situação extrema de *kick* de gás, a qual se encontra entre as duas envoltórias plotadas. Considerando a abrangência da teoria de deformação plástica, podemos considerar um cenário seguro, como o descrito na norma da REPSOL YPF (2000).

Conclusões

Partindo dos resultados obtidos, o CWELL, seguindo as normas internacionais estabelecidas e os conceitos básicos estabelecidos em diversas referências relativas à projeção de revestimentos de poços de petróleo e gás natural, consegue investigar a segurança de distintos cenários de *burst* que podem ocorrer nas diferentes fases exploratórias. Sendo assim, o *software* é suficientemente capaz de garantir solidez na preservação da integridade estrutural do revestimento a ser utilizado, permitindo ao usuário eficácia e economia no uso do material desejado em situações cada vez mais complexas.

Agradecimentos

Os agradecimentos se estendem: ao LCCV-UFAL; ao orientador e coautor, prof. Dr. João Paulo Santos; Aos colaboradores Jeremias e Teófanis; Ao CNPQ.

Referências Bibliográficas

AADNØY, B. S., **Modern Well Design**. Segunda Edição publicado por CRC Press/Balkema. © 2010 Taylor & Francis Group, Londres, Reino Unido, 2010.

ANSI/API. **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**. Relatório Técnico 5C3 da ANSI/API, Primeira Edição, Copyright American Petroleum Institute, Washington, Estados Unidos, 2008.

BOURGOYNE JR., A. T., MILLHEIM, K. K., CHENEVERT, M. E., YOUNG JR., F. S. **Applied Drilling Engineering**. Segunda Edição. ©Copyright 1991 pela Society of Petroleum Engineers. ISBN 1-55563-001-4. Richardson, Estados Unidos, 1991.

KASTOR, R. L. **Triaxial casing design for Burst**. Artigo para IADC/SPE 14727 apresentado em 1986 IADC/SPE Drilling Conference, Dallas, Estados Unidos, 1986.

KETTENBURG, R. J., SCHMIEDER, F. R., **Oil-Well Casing Failures**. Shell Oil Co. Inc, Ventura, Califórnia. Artigo apresentado no Pacific Coast District meeting em Los Angeles, Estados Unidos, 1945.

PINHEIRO, R. S., SANTOS, A. R., MARQUES, M., SCHNITZLER, E., SIGNORINI, D., TOMITA, R. A. **Well Construction Challenges in the Pre-Salt Development Projects**. Copyright 2015, Offshore Technology Conference. Artigo OTC-25888-MS preparado para apresentação na Offshore Technology Conference em Houston, Estados Unidos, 2015.

REPSOL-YPF. **Casing Design Manual: Drilling and Productions Operations**. Espanha, 2000.

TALLIN, A. G., PASLAY, P. R., ONYEWUENYI, O. A., BURREN, C. V. **The Development of Risk-Based Burst Design for Well Casing and Tubing**. Copyright 1998, Society of Petroleum Engineers, Inc. Artigo SPE 48320 preparado para apresentação no SPE Applied Technology Workshop on Risk Based Design of Well Casing and Tubing em The Woodlands, Estados Unidos, 1998.

WU, J., ZHANG, M. G. **Casing Burst Strength After Casing Wear**. Copyright 2005, Society of Petroleum Engineers. Artigo SPE 94304 preparado para apresentação no 2005 SPE Production and Operations Symposium em Oklahoma, Estados Unidos, 2005.