

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



TÍTULO DO TRABALHO:

CONFIABILIDADE APLICADA A MODELOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DE CONEXÕES
API EM REVESTIMENTOS DE POÇOS

AUTORES:

Thiago Barbosa da Silva, Eduardo Toledo de Lima Junior, Lucas Pereira de Gouveia

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.

CONFIABILIDADE APLICADA A MODELOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DE CONEXÕES API EM REVESTIMENTOS DE POÇOS

Abstract

Advances in science and technology have motivated a major boost in various industrial sectors and, consequently, promoted a considerable demand for increasingly complex structures, requiring an adequate understanding about the safety levels involved in design. In this sense, the uncertainties inherent to structural design may be assessed on the light of reliability theory. This reliability-based approach allows to evaluate the failure probability of the structure for a given limit state, since the design stage. In oil and gas well design scope, the casing design is a crucial stage, due to the important casing functions - from bearing unconsolidated formations to supporting equipment at the wellhead - allowing the adequate production activities. The occurrence of failures in casing systems can lead to irreversible safety problems in well operation, and it is estimated that 85% and 95% of the failures in well tubulars are related to joints (Schwind, 2006). Therefore the design of casing joints must be developed with extreme caution, considering that the pipe-connection set must be kept in appropriate conditions of service, with acceptable safety levels. This work aims the analysis of mechanical models of API casing connections, in a probabilistic framework. The formulation for evaluate the strength of well pipes and connections, under various load conditions, is presented by the code API/TR 5C3:2008, widely used by oil and gas companies worldwide. The reliability analysis is performed by the Monte Carlo simulation and First Order Reliability Method (FORM), considering failure modes by fracture in round and buttress connections, beyond failures by pullout in round connections, for different steel grades. Some uncertainties associated with geometric and mechanical properties are taken into account, in order to evaluate its influence on the performance of these couplings.

Introdução

Os avanços na ciência e tecnologia têm motivado um grande impulso nos mais variados setores industriais e, como consequência, promovido uma considerada demanda por estruturas cada vez mais complexas e arrojadas, que necessitam de um maior conhecimento dos níveis de segurança para os quais estas são projetadas. Nesse sentido, a incorporação, das incertezas presentes em um projeto estrutural pode ser realizada com base na teoria da confiabilidade estrutural. Em estruturas, as incertezas comumente observadas e consideradas são variabilidade dimensional, dos carregamentos e das propriedades mecânicas dos materiais.

Nesse contexto, de acordo com Sagrilo (2003), a teoria da confiabilidade estrutural permite quantificar as incertezas e calcular a probabilidade de falha de uma estrutura, ou seja, determinar em que momento um estado limite seja atingido. Associados aos modos de falha de um sistema estrutural, estão os estados limites de serviço e último (colapso da estrutura). De acordo com Beck (2014), confiabilidade é o grau de confiança (probabilidade subjetiva) de que um sistema não falhe dentro de um período de tempo especificado e respeitadas as condições de operação (projeto) do mesmo. Ainda, o autor define o evento complementar à confiabilidade, chamado de probabilidade de falha, como sendo a probabilidade (subjetiva) de que o sistema falhe, não atendendo, às especificações de projeto.

No escopo do projeto de poços exploratórios, o dimensionamento dos revestimentos consiste numa etapa crucial, visto que estes possuem funções importantes – desde a sustentação de formações não consolidadas, até servir como apoio para equipamentos na cabeça do poço – permitindo assim sua operação e produção. De acordo com Schwind (2006), os elementos de conexão são fundamentais na resistência do sistema, visto que entre 85% e 95% de todas as falhas tubulares em campos petrolíferos estão relacionados às conexões.

Desta forma, este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de modelos confiabilísticos para análise da resistência à tração de conexões API empregadas revestimentos de poços, com base em

um documento normativo largamente aplicado pelas operadoras de óleo e gás (API/TR 5C3:2008). Além disso, as análises são realizadas por dois métodos, simulação de Monte Carlo e *First Order Reliability Method* (FORM), com a finalidade de comparar suas vantagens e desvantagens.

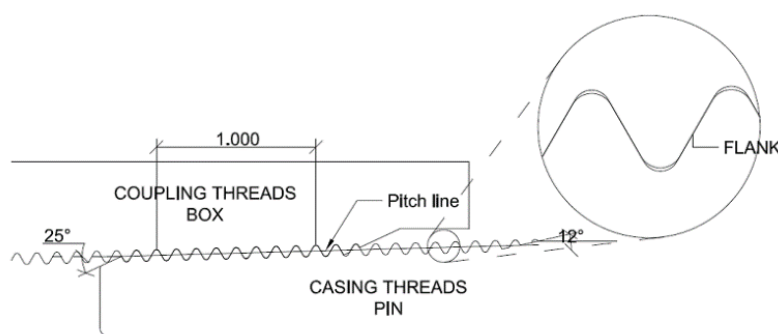
Metodologia

Modelos de resistência à tração das conexões API

Conforme dito anteriormente, o documento normativo API/TR 5C3:2008 define as equações para os modos de falha usuais em conexões API. As equações de resistência são calculadas com as propriedades mínimas do grau de aço utilizado tanto no tubo quanto na conexão e ignoram a possível presença de pressão interna e externa, considerando apenas solicitação axial. Formulações específicas para consideração de solicitações devidas à pressão interna estão também apresentadas no documento, não sendo tratadas neste artigo. O efeito de curvatura no revestimento de resistência da junta também é desprezado. Além disso, dependendo das condições de acoplamento, a resistência da ligação pode ser inferior à do corpo do tubo. As especificações sobre a geometria das conexões de revestimentos são definidas pela norma API 5B:2008. O formato dos elementos de rosca é uma importante classificação abordada na referida norma, onde as conexões são divididas em três famílias: *round*, *thread* e *extreme-line*. As duas primeiras serão tratadas aqui.

As conexões *round* possuem uma geometria em forma de “V” arredondada, contendo 8 fios por polegada e pode ser classificada de acordo com o comprimento do fio em *short thread* (STC) ou *long thread* (LC). Esse tipo de rosca é projetado para fornecer uma boa vedação nas paredes de cada fio (*flank*). O detalhamento da rosca *round thread* é apresentado na Fig. 1.

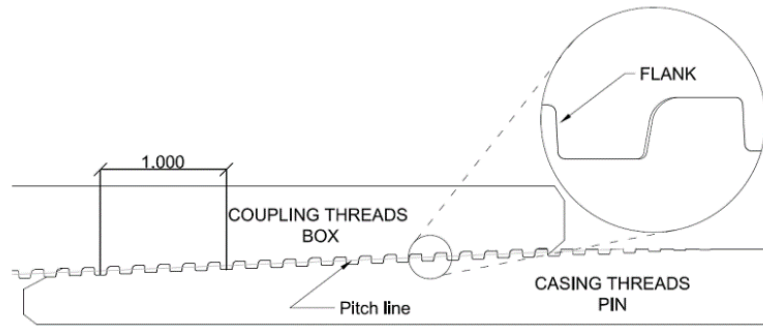
Figura 1 - Rosca *round thread*. Fonte: Cabral, 2014.



Em relação as conexões *buttress*, sua geometria tem forma trapezoidal contendo 5 fios por polegada. Sua função estrutural é resistir as tensões axiais, de tração e compressão. Semelhante a conexão *round thread*, existe uma vedação pela raiz do PIN e a crista do BOX. O esquema da rosca é apresentado na Fig. 2. Devido ao processo inevitável de corte de rosca, existe um caminho de fuga helicoidal em ambas as conexões. Além disso, deve-se destacar que as conexões *buttress* possuem maior aplicabilidade na prática de projeto de revestimentos de poços.

A seguir serão abordados os modelos de resistência à tração em conexões *round* e *buttress* apresentados na API/TR 5C3:2008, com uma abordagem confiabilística. Os referidos modelos são fratura na extremidade rosqueada do tubo, fratura na conexão e *pullout*.

Figura 2 – Rosca *buttress thread*. Fonte: Cabral, 2014.



A falha por fratura na ponta do tubo para conexões *round* é calculada com base na resistência mínima do tubo, conforme apresentado na Eq. 1. Em relação a falha por fratura diretamente na conexão, considera-se as propriedades da conexão, como indicado na Eq.2.

$$P_j = 0.95A_{jp}U_p \quad (1)$$

$$P_j = 0.95A_{jc}U_c \quad (2)$$

onde

P_j representa a resistência da junta, em lbf;

A_{jp} representa área da seção transversal do tubo antes da última linha perfeita, em pol²;

U_p representa a resistência mínima à tração do aço do corpo do tubo, em psi;

A_{jc} representa área da seção transversal da conexão, em pol²;

U_c representa a resistência mínima à tração do material da conexão, em psi.

Em conexões *buttress*, a resistência à fratura no tubo é calculada utilizando a Eq. 3. Enquanto que a resistência à fratura na conexão é calculada da mesma forma que nas conexões *round*, sendo que o parâmetro A_{jc} é distinto para cada tipo de conexão.

$$P_j = 0.95A_pU_p \left[1.008 - 0.0396 \left(1.083 - \frac{Y_p}{U_p} \right) D \right] \quad (3)$$

onde

A_p representa área da seção transversal do tubo, em pol²;

Y_p representa a tensão mínima de escoamento do aço do corpo do tubo, em psi;

D representa o diâmetro externo do tubo, em pol.

Quanto à falha por *pullout*, caracteriza-se quando a rosca do tubo desliza sobre a rosca da conexão ou vice-versa. A norma API/TR 5C3:2008 apresenta a equação para resistência à falha por *pullout* para conexões *round*, como apresentado na Eq. 4. Admite-se que conexões do tipo *buttress* não apresentam falha por *pullout*, tendo em vista a geometria dos elementos de rosca.

$$P_j = 0.95A_{jp}L \left[\frac{0.74D^{-0.59}U_p}{0.5L + 0.14D} + \frac{Y_p}{L + 0.14D} \right] \quad (4)$$

onde

L representa o comprimento da rosca acoplado, em pol.

Deve-se destacar a presença do fator 0.95 na formulação apresentada, o qual corresponde a um fator de minoração da resistência, para utilização na prática de projeto. Tais equações, originalmente, em suas versões de *estado limite*, não possuem tal fator. Este coeficiente assegura uma condição de projeto mais conservadora, sendo uma forma simples de tratar as incertezas inerentes ao problema.

Modelos confiabilísticos para conexões API

No que diz respeito a construção dos modelos confiabilísticos, estes podem ser realizados com base na avaliação das incertezas das variáveis de projeto, que são descritas de maneira estatística, como variáveis aleatórias. Uma etapa crucial na fundamentação teórica em uma análise de confiabilidade estrutural, consiste na caracterização das variáveis aleatórias, que em síntese trata-se da caracterização de um conjunto de dados (inferência estatística) e sua representação por um modelo de distribuição estatística, amparada em testes de aderência, que avaliam a qualidade do ajuste entre os dados da amostra e o modelo estatístico proposto. Para maiores detalhes, vide Ang & Tang (2007).

Para quantificar os modos de falha de uma estrutura utiliza-se as chamadas equações de estado limite (funções de falha), que são deduzidas a partir dos aspectos físicos do problema. Comumente, a função de falha é denominada $G(\mathbf{X}) = 0$, em que $\mathbf{X}$ é um vetor de variáveis aleatórias consideradas na análise. Para cada modo de falha de uma estrutura a respectiva função estabelece uma fronteira entre as regiões de falha e não falha, da seguinte forma:

$$\begin{cases} G(\mathbf{X}) > 0 \Rightarrow \text{Evento Seguro,} \\ G(\mathbf{X}) \leq 0 \Rightarrow \text{Evento de falha.} \end{cases} \quad (5)$$

Dessa forma, definem-se as fronteiras entre os domínios de falha Ω_f e de sobrevivência Ω_s da estrutura. O domínio de falha Ω_f é o conjunto de todos os pontos de $\mathbf{X}$ que levam à falha da estrutura e, o domínio seguro é conjunto complementar a este. Em um problema qualquer, a probabilidade de falha é calculada integrando-se a função conjunta de densidade de probabilidade das variáveis do problema sobre o domínio de falha, conforme apresentado a seguir.

$$P_f = \int_{\Omega_f} f_{\mathbf{X}}(\mathbf{X}) d\mathbf{x} \quad (6)$$

A integral n-dimensional supracitada é de difícil avaliação analítica. Sendo assim, faz-se necessária a utilização de métodos de análise em confiabilidade estrutural para sua resolução. No presente trabalho serão utilizados dois métodos capazes de resolver o problema: Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (FORM) e Simulação de Monte Carlo.

O FORM é um método analítico de confiabilidade baseado na transformação das variáveis aleatórias originais em variáveis aleatórias normais equivalentes, e na linearização da função de falha original do problema. O grande diferencial do método consiste em sua capacidade de utilizar toda a informação estatística das variáveis do problema, podendo-se lidar com distribuições estatísticas quaisquer, correlacionadas ou não. O problema de confiabilidade é formulado como um problema de otimização não linear com restrição, o qual é resolvido de forma iterativa pelo algoritmo HLRF. Maiores detalhes acerca do método são apresentados em Melchers (1999).

Na simulação de Monte Carlo, o objetivo é produzir N eventos randômicos para serem avaliados na função de falha $G(\mathbf{X})$, conforme indicado na Eq. (5). Desta forma, eventos que possuem valores negativos são contabilizados como eventos de falha (N_f). Assim, a probabilidade de falha é estimada pela razão entre o número de eventos de falha e o número total de eventos, ou seja

$$P_f = \frac{N_f}{N} \quad (7)$$

As variáveis aleatórias tratadas no problema são Y_p, U_p, U_c, D (definidas anteriormente), diâmetro externo da conexão (W) e espessura do tubo (t). Serão adotados três graus de aço,

usualmente aplicados em projetos de revestimento: J55, N80 e P110, os quais possuem resistência mínima de escoamento de 55000 psi, 80000 psi e 110000 psi, respectivamente.

As informações estatísticas das variáveis foram obtidas com base nos dados de fabricação publicados na norma API/TR 5C3:2008 e no trabalho desenvolvido por Clinedinst (1964), autor que possui um extenso trabalho em modelos de resistência de tubos e conexões de revestimento de poços.

Os parâmetros estatísticos (média e desvio padrão) de cada variável aleatória são escritos em termos dos coeficientes *mean* e COV, conforme indicado na Tabela 1. O valor médio da variável aleatória é obtido multiplicando-se o fator apresentado na tabela por seu valor nominal. Em relação ao desvio padrão, este é obtido multiplicando seu valor médio pelo coeficiente de variação (COV).

Tabela 1: Parâmetros estatísticos das variáveis aleatórias utilizados nas análises.

Yp		Up		Uc		W		D		t	
mean	COV	mean	COV	mean	COV	mean	COV	mean	COV	mean	COV
J55		J55		J55		1.0	0.0034	1.0059	0.00181	1.0069	0.0259
1.23	0.0719	1.3841	0.0675	1.4241	0.0522						
N80		N80		N80							
1.21	0.0405	1.1581	0.0634	1.229	0.0338						
P110		P110		P110							
1.10	0.036	1.113	0.0566	1.1333	0.0161						

Resultados e Discussão

As análises confiabilísticas são realizadas adotando-se o tubo de revestimento classificado pela indústria petrolífera como tubo P110 10 3/4" 85.3 lb/pé, amplamente utilizado em colunas de revestimento intermediário e de produção em poços. Pretende-se estimar a probabilidade de falha associada aos modelos de resistência apresentados anteriormente, em relação ao seu valor determinístico. Assim, pode-se verificar a influência da consideração da aleatoriedade das variáveis de projeto na formulação usualmente adotada, proposta na API/TR 5C3:2008.

A avaliação da probabilidade de falha é baseada numa equação de estado limite, conhecida também como função de falha. Para as conexões *round*, três funções de falha são criadas. Correspondem aos modelos de resistência à fratura na ponta do tubo, fratura diretamente na conexão e *pullout*. Essas funções de falha são respectivamente definidas a seguir.

$$G(U_p, D, t) = R_{conf}(U_p, D, t) - R_{det} \quad (8)$$

$$G(U_c, W) = R_{conf}(U_c, W) - R_{det} \quad (9)$$

$$G(Y_p, U_p, D, t) = R_{conf}(Y_p, U_p, D, t) - R_{det} \quad (10)$$

Em relação as conexões *buttress*, as funções de falha são formuladas para os modelos de resistência à fratura na ponta do tubo e fratura diretamente na conexão, considerando que conexões *buttress* não falham por *pullout*. Como a expressão para fratura na conexão é idêntica para conexões *round*, a função de falha é a mesma apresentada na Eq. 9. Para fratura na ponta do tubo, a função de falha é definida em termos das mesmas variáveis aleatórias, sendo idêntica à Eq. 8.

Nas funções de falha, R_{det} representa a resistência determinística, calculada diretamente a partir da formulação de projeto contida na norma e R_{conf} representa a resistência confiabilística

calculada com a formulação de estado limite, acrescida da consideração da aleatoriedade das variáveis de projeto.

Utilizando o método analítico FORM e a simulação de Monte Carlo, estima-se o valor de P_f para cada modo de falha citado, conforme apresentado nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2: Probabilidade de falha para os modos de falha em conexões *round*.

Graus de Aço	Probabilidade de Falha					
	FORM			Monte Carlo		
	fratura (tubo)	<i>pullout</i>	fratura (conexão)	fratura (tubo)	<i>pullout</i>	fratura (conexão)
J55	2.004E-06	3.993E-06	1.7498E-09	2.667E-06	3.96E-06	-
N80	2.250E-03	9.101E-08	4.011E-08	2.298E-03	-	-
P110	4.870E-03	7.560E-05	3.879E-07	4.999E-03	8.035E-05	-

Tabela 3: Probabilidade de falha para os modos de falha em conexões *buttress*.

Graus de Aço	Probabilidade de Falha			
	FORM		Monte Carlo	
	fratura (tubo)	fratura (conexão)	fratura (tubo)	fratura (conexão)
J55	2.705E-08	6.152E-09	5.715E-08	-
N80	5.198E-06	4.345E-07	5.52E-06	-
P110	1.57E-04	1.508E-05	1.615E-04	1.544E-05

Conforme observado nas tabelas supracitadas, os valores de probabilidade de falha obtidos para ambas as conexões via FORM e Monte Carlo se apresentam congruentes, o que valida as implementações desenvolvidas neste trabalho. Nota-se que a simulação de Monte Carlo apresenta limitações para encontrar valores de probabilidade de falha muito baixos, devido a necessidade da realização de um grande número de simulações, que aumenta consideravelmente o custo computacional.

O modo de falha dominante nas conexões é fratura na ponta do tubo, apresentando os maiores valores de probabilidade de falha para os três graus de aço considerados, a menos do grau J55, que possui maior valor de P_f devido ao *pullout* em conexões *round*. Observa-se que para o aço P110 estão associados os maiores valores de probabilidade de falha, enquanto que os resultados obtidos para o aço J55 são os menores. Um dos aspectos que justifica a boa performance dos produtos de grau J55 em relação aos outros dois aços analisados é o comportamento estatístico de seus parâmetros de resistência, que possuem valor médio entre 23% e 42% superiores a valor nominal, vide Tabela 1.

Conclusões

Através da incorporação das incertezas das variáveis de projeto via confiabilidade estrutural, foi possível avaliar os níveis de segurança associados a formulação proposta pelo documento normativo API 5C3:2008. Vale ressaltar que a formulação de projeto de conexões apresentada no referido código é a efetivamente adotada na prática de dimensionamento ao redor do mundo, sendo a mesma apresentada na versão anterior do código (API 5C3:1999).

Deve-se salientar que os resultados apresentados servem apenas como indicativo do comportamento confiabilístico das resistências, visto que as variáveis aleatórias foram caracterizadas com base em dados de fabricação publicados na norma API/TR 5C3:2008 e no trabalho desenvolvido por Clinedinst (1964). A metodologia confiabilística pode ser replicada na análise do problema desde que se tenham dados estatísticos de produção de tubos e conexões de um fabricante específico. Ainda, deve-se destacar que não existe unanimidade no meio científico, nem normatização que defina um valor aceitável de probabilidade de falha. Sendo assim, em aplicações de engenharia em geral, valores inferiores a 10^{-3} são desejáveis.

Em relação aos métodos confiabilísticos empregados neste trabalho, nota-se a robustez do método analítico FORM em relação ao método de simulação de Monte Carlo. No entanto, devido à baixa complexidade da implementação computacional do método de Monte Carlo, este pode-se apresentar como uma opção interessante para uma primeira estimativa da probabilidade de falha.

Espera-se que trabalhos desta natureza contribuam com a disseminação da filosofia de dimensionamento probabilístico em projetos de revestimento de poços. A norma API/TR 5C3:2008 já sugere procedimentos confiabilísticos para avaliação da resistência de tubos à pressão interna e colapso.

Agradecimentos

Agradecemos ao apoio financeiro da FAPEAL e do CENPES/PETROBRAS.

Referências Bibliográficas

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API 5B: *Specification for Threading, Gauging and Thread Inspection of Casing, Tubing, and Line Pipe Threads*, 2008.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API Bull 5C3: *Bulletin on formulas and calculations for casing, tubing, drill pipe, and line pipe properties*, 1994.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API/TR 5C3: *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*, 2008.

ANG, A.H-S.; TANG, W.H. *Probability concepts in engineering: emphasis on applications to civil and environmental engineering*, John Wiley & Sons, 2007.

BECK, A.T. *Curso de Confiabilidade Estrutural: notas de aula*. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

CABRAL, C.P. *Análise da Resistência de Conexões em Revestimentos de Poços*. Relatório Final de Projeto de Pesquisa, Maceió, 2014.

CLINEDINST, W.O. *Strength of Threaded Joints for Steel Pipe*. Assistant to General Manager, Process Metallurgy, United States Steel Corporation, Pittsburgh, Pennsylvania. 1964.

MELCHERS, R.E. *Structural reliability analysis and prediction*. Chichester: John Wiley & Sons, 1999.

SAGRILO, L.V.S. *Confiabilidade estrutural: notas de aula*. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

SCHWIND, B.E. *Project Aims to Qualify Tubular Connections*. Drilling Contractor, p.60, 2006.