

A statistical investigation of ultrasonic logging data for a petroleum well casing integrity analysis

Antonio P. A. Ferro¹, Lucas P. de Gouveia¹, Diego de V. G. Ferreira¹, Felipe P. de Lima¹, Aline da S. R. Barboza¹, Joseir G. Percy²

¹Laboratório de Computação Científica e Visualização, Universidade Federal de Alagoas, Campus A. C. Simões, Tabuleiro dos Martins, 57072-900, Maceió, Alagoas, Brasil

antonio.ferro@lccv.ufal.br, lucasgouveia@lccv.ufal.br, diegovasconcelos@lccv.ufal.br, aline@lccv.ufal.br, felipe.pedrosa@lccv.ufal.br

²Petróleo Brasileiro S.A. - Petrobras

Av. Horácio Macedo, 950 – Cidade Universitária da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 21941-915, Rio de Janeiro – RJ, Brasil

joseir@petrobras.com.br

Abstract. The structure responsible to maintain well stability against borehole collapse as well as to prevent fluid flow between formation and the borehole in an uncontrolled way is the casing string. It consists of several high resistance steel tubulars segments connected along well trajectory. Due to severe conditions *in-situ*, casing integrity may be compromised, impacting the capability to withstand loads. The scenario may be more critical concerning to resistance reduction when casing wear is caused by drilling operation of deeper sections of the well. Casing integrity is usually assessed by means of logging devices, such as the ultrasonic logging tool, to acquire casing geometry data, like internal radius and wall thickness along well depth. This work proposes to apply a statistical investigation on well logging datasets in order to characterize geometric data distribution of *in-situ* tubulars. It is discussed ultrasonic logging data treatment to obtain reliable results as well as the comparison between statistical variables from manufactured tubes presented in API TR 5C3:2008 code and those inferred by logging data. Python codes are developed using statistic features to assist the data analysis. The statistical study is justified by its contribution to improve the identification of imperfections and damage in logging data.

Keywords: Casing Integrity, Statistic, Ultrasonic Logging Data.

1 Introdução

A demanda para a execução de poços mais complexos aumentou nas últimas décadas, e com isso elevou-se a preocupação em relação ao programa de controle do revestimento, que consiste em uma estrutura com diversos segmentos tubulares acoplados por conexões ao longo de toda trajetória do poço. A preocupação acerca da integridade dos tubulares surge das solicitações adversas durante a sua vida produtiva. Os danos estruturais como os causados pelo desgaste durante a perfuração coexistem com as imperfeições de fábrica como ovalização e excentricidade, além de pressões e temperaturas extremas. Como mencionado em Correia e Santos [1], o processo de dimensionamento da coluna de perfuração segue a norma API TR 5C3:2008, de onde considera-se esforços atuantes em diversos cenários além de especificações envolvidas na manufatura dos tubos e limites dimensionais de segurança.

A utilização de sensores ultrassônicos na chamada técnica de perfilagem oferece meios de acessar a geometria do tubular *in situ*. Dados como raio interno e espessura da parede dos tubos são obtidos para cada seção transversal investigada ao longo de todo o poço e permite uma abordagem “*as-built*” de análise, de onde é possível identificar anormalidades como deformações excessivas e danos estruturais, causados ainda durante a etapa de perfuração. Tais danos podem comprometer seriamente a vida produtiva do poço e até levar ao colapso.

Neste trabalho, é utilizado uma investigação estatística nos dados obtidos diretamente do instrumento de

perfilagem ultrassônica aplicado em colunas de revestimento *in situ*. Uma metodologia é apresentada para separação de dados espúrios afim de melhor caracterizar as distribuições dos dados geométricos apenas pertencentes as regiões de corpo de tubo, evitando a análise de seções perturbadas devido a ruídos. Na análise é utilizado ainda parâmetros estatísticos obtidos em norma para caracterização de variáveis geométricas de tubulares de fábrica como referência.

2 Especificações Normativas

O documento normativo conhecido como API TR 5C3:2008 é a referência principal para as operadoras de óleo e gás no dimensionamento dos revestimentos de poços. Neste documento é apresentado, dentre outras informações, a caracterização de variáveis aleatórias estatísticas obtidas através de medições e ensaios realizados em lotes de fabricantes de tubos produzidos entre as décadas de 1970 e 2000 (Gouveia [2]).

Estes dados oferecem meios para aplicação de critérios estatísticos dentro de uma análise probabilística de resistência. A norma apresenta dados de 17 fabricantes, dos quais se obtém a caracterização estatística das principais variáveis relacionadas a resistência dos tubos, incluindo dessa forma, algumas variáveis aleatórias relacionadas a geometria dos tubos fabricados. A Tab.1 apresenta as variáveis relacionadas a geometria e com os valores obtidos por média ponderada entre os dados paramétricos de cada fabricante seguindo a relevância da quantidade de amostras. Alguns dados apresentados são adimensionalizados pelos valores nominais.

Tabela 1. Parâmetros estatísticos das variáveis geométricas aleatórias dos tubos fabricados

	Média/Nominal	COV	Distribuição
D (Diâmetro Externo)	1,0059	0,00181	Gaussiana
t (Espessura)	1,0069	0,0259	Gaussiana
t_{min} (Espessura Mínima)	0,941	0,0213	Gaussiana
Ov (Ovalização)	0,217*	0,541	Weibull
Ec (Excentricidade)	3,924*	0,661	Weibull

Fonte: A partir de dados de API TR 5C3 [3]. * Não há definição nominal. Já representa a média.

Como expresso na norma API TR 5C3:2008, os fabricantes são licenciados para produzir de acordo com certas especificações de controle dimensional e de propriedades físicas de seus produtos e que são normatizados seguindo outros documentos normativos apropriados para o controle de qualidade dos lotes. Este controle garante que os tubos utilizados nos poços possuam propriedades mecânicas uniformes e com imperfeições fabris indesejadas mantidas a um nível mínimo seguro.

3 Metodologia

Os tubulares normatizados utilizados nos poços podem sofrer danos significativos durante o processo de perfuração, além de deformações resultantes de temperaturas excessivas bem como pressões interna e externa elevadas, de modo que os dados da geometria do tubo ao longo do poço oferecem informações importantes para compreensão do comportamento *in situ* da estrutura tubular. Dentre os dados geométricos fornecidos pelo instrumento de perfilagem, a espessura possui menor interferência relacionada a efeitos de descentralização do equipamento, como mencionado em Sietinger [4], o que resulta em maior confiança nos dados obtidos do que as medições de raio interno.

Apesar da confiabilidade das medidas, a aquisição de dados de espessura dos revestimentos utilizando o método de perfilagem pode resultar em valores espúrios. Ripmann [5] alerta para sensibilidade dos equipamentos nas regiões de conexão entre tubulares. Os valores de espessura medidos sofrem perturbações devido as regiões de geometria complexa das conexões, que afetam as medidas feitas por ressonância na parede do tubo causada pela emissão das ondas ultrassônicas do instrumento. Dessa forma, é necessário aplicar métodos estatísticos existentes para identificação e eliminação de outliers, ou seja, remover seções cuja distribuição estatística seja distinta dos dados analisados, seja tanto por erro de medição ou mecanismos que provocam diferença significativa em relação a todo conjunto de dados. Uma forma de distinguir as possíveis perturbações nas medidas de espessura é utilizar o coeficiente de variação (COV) que representa o grau de homogeneidade das medidas tomadas para

cada seção, e é definido como a razão entre a o desvio padrão e a média dos dados. Dessa forma, ruídos podem ser mais bem diferenciados, o que favorece a aplicação de filtros para a remoção de outliers.

As boas práticas em análise de dados demandam uma investigação criteriosa das distribuições dos dados amostrais. É necessário que suposições acerca do tipo de distribuições sejam verificadas para que métodos estatísticos mais robustos sejam utilizados tendo como referência a população e sua distribuição teórica. Nesse sentido, investigações estatísticas para caracterização das amostras podem ser feitas com abordagem descritiva utilizando histogramas e parâmetros como coeficientes de assimetria ou mesmo aplicando de forma direta os testes de hipótese, como *Kolmogorov-Smirnov*, *Shapiro-Wilks* e *Anderson-Darling* para citar alguns (ANG e TANG [6]).

Dessa forma, a metodologia apresentada neste trabalho envolve a análise de dispersão dos dados de espessura obtidos no poço utilizando o coeficiente de variação das medidas tomadas em cada uma das milhares de seções ao longo da trajetória do poço. Através de filtro, implementado em *Python*, é separado as seções problemáticas atribuídas a leituras em regiões de conexão ou por ruídos excessivos de causa desconhecida, dessa forma, as seções pertencentes ao corpo de tubo são identificadas. As suposições sobre a distribuição são consideradas e discutidas através da utilização do teste de aderência de *Kolmogorov-Smirnov* e com os parâmetros apresentados na norma e resumidos na Tab. 1.

3.1 Remoção de Outliers

O método de Tukey, também conhecido como método *boxplot*, é amplamente utilizado para tratamento de dados afim de detectar os *outliers*. Como mencionado em Seo [7], este método não assume qualquer distribuição estatística e nem depende da média e desvio padrão dos dados, no entanto é robusto quando aplicado à grande quantidade de dados cuja distribuição é gaussiana.

O método consiste em utilizar limites inferior e superior através do cálculo do interquartil (IQR) e do primeiro e terceiro quartil onde os dados que se encontram além desses limites são definidos como *outliers*. As equações (1) e (2) definem os cálculos das fronteiras inferior e superior através dos quartis, de onde Q1 e Q3 (25° percentil e 75° percentil) são o primeiro e terceiro quartil e no qual o IQR é definido como a diferença entre os valores de Q3 e Q1.

$$L_{Inf} = Q1 - (1,5 \cdot IQR). \quad (1)$$

$$L_{sup} = Q3 + (1,5 \cdot IQR). \quad (2)$$

3.2 Teste *Kolmogorov-Smirnov*

O teste *Kolmogorov-Smirnov* é um método estatístico aplicado na aceitação ou rejeição da hipótese de que o conjunto de dados amostrais pode ser gerado a partir de uma distribuição teórica conhecida. Esta hipótese é chamada de hipótese nula (H_0), e o resultado sempre está atrelada a níveis de significância estatística que correspondem ao erro amostral. O resultado desse teste é a estatística de *Kolmogorov-Smirnov* apresentada na Equação (3).

$$D_n = \max |F(x) - S(x)|. \quad (3)$$

Onde $F(x)$ e $S(x)$ são, respectivamente valores correspondentes a distribuição teórica testada e a distribuição empírica dos dados. O D_n corresponde a um afastamento entre as distribuições testadas. O pacote numérico em *Python* para aplicações estatísticas *SciPy* pode ser utilizado (JONES et al. [8]). O D_n e o p -valor, que é probabilidade de obter uma estatística de teste tão extrema quanto a encontrada no teste de hipótese assumindo H_0 como verdade, são obtidos diretamente com esse pacote. Esses valores podem ser utilizados para a aceitação ou rejeição da amostra considerando geralmente que o erro ou significância estatística apropriada para aplicações em engenharia seja de 5% (BERGER e ZHOU [9]).

4 Resultados

O conjunto de dados de espessura obtidos do poço analisado consiste em 5780 seções, correspondendo a intervalos de 6 in entre cada seção tomada ao longo da profundidade. A taxa de amostragem radial do equipamento permite medição de até 90 pontos de espessura para cada seção amostrada do poço. Os tubulares assentados possuem espessura nominal de 0,625 in e diâmetro externo nominal de 13,625 in. A Fig. 1 apresenta três perfis do poço obtidos com os cálculos de espessura média (a) e coeficiente de variação em cada seção (b).

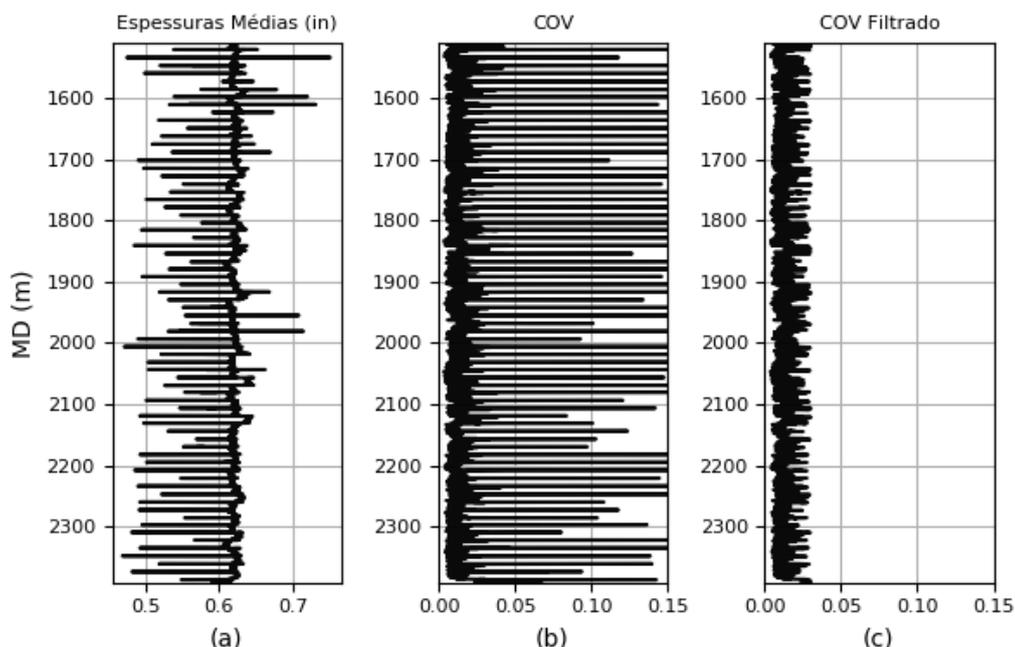


Figura 1. Média (a) e COV (b) calculados para cada seção analisada. Em (c) resultado da remoção de *outliers*.
Fonte: Autores (2020)

Em (c) é apresentado o resultado obtido da aplicação do filtro. É possível notar em (b) a presença de *outliers*, representados pelos picos no perfil, cujos valores de COV nitidamente superam em ordem de grandeza de 10 vezes a média dos valores de COV, que calculada pelo perfil filtrado em (c) é de 0,0133. Foram eliminadas 322 seções e com os dados filtrados realiza-se o teste de *Kolmogorov-Smirnov* para avaliação da suposição de normalidade dos dados e para o teste de aderência a distribuição apresentada em norma (ambas informações apresentadas na Tab. 1). O teste é feito com conjunto de amostras completas e para o subconjunto das 100 seções com menores COVs, dos quais se atribuem a menores interferências de ruído ou mesmo presença de danos como desgaste do revestimento. A Tab.2 apresenta os resultados em termos do percentual de seções cuja hipótese nula (H_0) é aceita.

Tabela 2. Resultados da aplicação do teste de *Kolmogorov-Smirnov* aos dados de espessura filtrados.

	Todas Seções	Seções Comportadas
Teste de Normalidade	86,39 %	100 %
Parâmetros de Fábrica	2,66 %	0 %

O teste de *Kolmogorov-Smirnov* foi aplicado para as 5458 seções transversais não eliminadas pelo filtro, e que consistem cada uma em amostras com 90 medidas de espessura. Os resultados dos testes de hipótese são analisados utilizando nível de significância de 5% como critério para aceitação ou rejeição das hipóteses testadas em cada seção. Percebe-se na Tab.2 que a maioria das seções testadas corroboram a suposição apresentada na Tab.1 de que a distribuição de espessura em tubulares é normalmente distribuída. Com o nível de significância adotado, cerca de 86,39% são consideradas amostras geradas por populações normalmente distribuídas. Para as

seções de tubulares dentro do subconjunto com menores COVs o valor sobe para 100%. Estes valores reforçam a tendência de tubos fabricados sem danos apresentarem distribuição normal, pois as seções com menores COVs apresentam menores níveis de ruídos presentes nas medidas tomadas pelo instrumento ultrassônico. As seções cuja hipótese de normalidade foi rejeitada devem apresentar anomalias devidas ao ambiente *in situ*, seja por aumento no nível de excentricidade (imperfeição captada por medidas de espessura) por deformação, danos causados por remoção de material devido desgaste no revestimento ou ainda distorções causadas pelos ruídos de medição.

Os parâmetros estatísticos apresentados em norma não configuram uma distribuição teórica populacional da qual as amostras *in situ* analisadas demonstrem estatisticamente serem geradas, uma vez que apenas poucas seções do conjunto filtrado completo não rejeitam a hipótese nula. O conjunto de seções bem comportadas utilizados no teste de aderência mostra que mesmo para os valores medidos comportados todos os testes feitos também rejeitam a hipótese de que esses dados amostrados serem obtidos dessa população. Dessa forma, para representar melhor as amostras de tubos íntegros assentados não é recomendado utilizar a distribuição estatística dos dados de espessura da norma, mas sim encontrar a distribuição que seja mais representativa para as amostras filtradas obtidas.

5 Conclusão

Para extrair informações válidas de tubos assentados é necessário utilizar uma metodologia que permita a avaliação estatística confiável dos dados. Dessa forma, os dados de espessura são utilizados em conjunto com filtros e testes de hipótese estatísticos no qual os resultados obtidos mostram que a suposição da normalidade é mantida para as medidas tomadas na perfilagem em tubos assentados e que esta distribuição está ligada aos dados dos tubos mais comportados, ainda que estatisticamente as amostras geradas desses tubos não sejam de distribuição normal idêntica as fornecidas para tubos fabricados.

Agradecimentos. Agradecimentos ao LCCV/UFAL e a PETROBRÁS pelo suporte financeiro e contribuição técnica.

Declaração de Autoria. Os autores confirmam que são as únicas pessoas responsáveis pela autoria deste trabalho e que todo o material aqui incluído como parte do presente artigo é de propriedade (e autoria) dos autores ou tem a permissão dos proprietários para serem incluídos aqui.

Referências

- [1] J. P. A. Correia, J. P. L. Santos. *Avaliação numérica da integridade estrutural de revestimento de poços de petróleo em zonas de alta pressão e alta temperatura e áreas de rochas salinas*. HOLOS, Ano 33, Vol. 01. March, 2017
- [2] L. P. Gouveia. *Avaliação da Confiabilidade em Tubos de Revestimento de Poços de Petróleo*. Masters Thesis, Centro de Tecnologia - Universidade Federal de Alagoas, 2014.
- [3] 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*. 1st. ed. Washington, D.C, 2008
- [4] Seitinger, P. M, 2010. *Casing Wear Analysis: An analysis of the parameters causing casing wear in Troll field and possible solutions*. Mining University of Leoben. Austria.
- [5] S. Ripman. *Casing Wear in Multilateral Wells*. University of Stavanger. Master's Thesis, 2011.
- [6] ANG, A.; TANG, W. *Probability concepts in engineering : emphasis on applications in civil & environmental engineering*. New York: Wiley, 2007. ISBN 9780471720645.
- [7] S. Seo. *A Review and Comparison of Methods for detecting Outliers in Univariate Data Sets*. University of Pittsburgh. Master Thesis. 2006.
- [8] Jones, E., Oliphant, T., Peterson, P., et al., 2001–. SciPy: Open source scientific tools for Python
- [9] V. W. Berger and Y. Y. Zhou, "Kolmogorov-Smirnov Test: Overview". Wiley StatsRef: Statistics Reference Online. 2014