

## CORRELAÇÃO EM CANHONEIO COM MÉTODO TUBING CONVEYED PERFORATING - TCP

Ana Luiza Arruda da Silva <sup>1</sup>  
Flávio Medeiros Júnior <sup>2</sup>

### RESUMO

Durante as últimas décadas, as completações em poços revestidos e canhoneados têm sido amplamente utilizadas para a exploração de poços de petróleo e gás *onshore* e *offshore*. O objetivo do canhoneio é estabelecer uma ligação fundamental entre o interior do revestimento de produção e os reservatórios, utilizando a energia explosiva direcional produzida pelas cargas instaladas nos canhões. Com o rápido desenvolvimento das tecnologias de produção de poços de petróleo e gás, os testes de poços combinados com canhões transportados por tubulação (TCP) estão sendo cada vez mais usados em projetos de completação modernos. O canhão TCP é descido através da coluna e para garantir que o canhão esteja corretamente posicionado no intervalo a ser canhoneado são realizados perfis de correlação para ajustar a profundidade do canhão. O presente artigo tem por objetivo apresentar uma metodologia para definir a necessidade da segunda corrida de correlação em função da força de arraste medida no poço e das propriedades da tubulação com a qual o canhão TCP foi descido. Foi desenvolvido um modelo para cálculo de variação de coluna, critério para definir corridas adicionais do perfil de correlação e simulações em Excel. Os resultados mostraram valores consistentes quando o ajuste é realizado no sentido da retirada da coluna no poço. Com base nos resultados é apresentado um critério para definir a necessidade da segunda corrida do perfil de correlação para verificar a profundidade do canhão.

**Palavras-chave:** Completção, Canhoneio TCP, Arraste.

### 1. INTRODUÇÃO

O canhoneio é uma operação crítica em completações de poços revestidos, que visam conectar a rocha reservatório com o poço. É necessário determinar os sistemas e tipos de canhões, de acordo com a necessidade do projeto, além dos métodos para inserir os canhões no poço. Este trabalho trata da análise das operações de correlação realizadas em canhoneio com o método *Tubing Conveyed Perforating* (TCP), buscando reduzir o custo da operação sem que haja comprometimento dos resultados esperados.

A metodologia TCP é uma técnica bastante utilizada nas operações de canhoneio, principalmente em reservatórios onde se deseja maximizar a produção do intervalo, minimizar

---

<sup>1</sup> Graduanda do Curso de Engenharia de Petróleo da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, [luizaarruda97@gmail.com](mailto:luizaarruda97@gmail.com);

<sup>2</sup> Professor orientador: PhD, Colorado School of Mines (CSM), Golden, CO, US, [flaviojr\\_eng@hotmail.com](mailto:flaviojr_eng@hotmail.com).

o dano à formação e obter maior flexibilidade para um possível evento de controle de poço. Estas condições são encontradas em poços exploratórios, poços com perda de fluido para formação ou reservatório sensíveis ao fluido de amortecimento utilizado na intervenção.

O canhão TCP é descido através da coluna e para garantir que o canhão está corretamente posicionado no intervalo a ser canhoneado são realizados perfis de correlação para ajustar a profundidade do canhão. Em algumas situações são necessárias duas corridas do perfil de correlação (uma inicial e uma final após o ajuste da profundidade), enquanto outros casos consideram que apenas a corrida inicial do perfil de correlação é suficiente para garantir o correto posicionamento do canhão TCP.

Este trabalho apresenta uma metodologia para definir a necessidade da segunda corrida de correlação em função da força de arraste medida no poço e das propriedades da tubulação com a qual o canhão TCP foi descido.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

Durante as últimas décadas, as completações em poços revestidos e canhoneados têm sido amplamente utilizadas para a exploração de poços de petróleo e gás *onshore* e *offshore* (EICHELBERGER, 1956; LEE, 2002; ELSHENAWY, 2013). O objetivo do canhoneio é estabelecer uma ligação fundamental entre o tubo de produção e os reservatórios, utilizando a energia explosiva direcional produzida pelas cargas instaladas nos canhões (BAUMANN et al., 2013). Com o rápido desenvolvimento das tecnologias de produção de poços de petróleo e gás, os testes de poços combinados com TCP estão sendo cada vez mais usados em projetos de completação modernos, com uma conexão em série do canhão, amortecedores de choque, obturador (*packer*), coluna de produção e vários instrumentos no revestimento do fundo do poço (GILLIAT et al., 2014).

Existem várias vantagens da completação a poço revestido e canhoneado sobre a completação à poço aberto: (a) seletividade inicial na produção e injeção; (b) capacidade de isolamento de água, gás ou areia por meio de técnicas relativamente simples, como plugues, *straddle packers* ou tratamentos de compressão de cimento; (c) excelente produtividade - assumindo uma perfuração bem projetada e implementada; (d) danos de formação relacionados à perfuração geralmente podem ser contornados; (e) capacidade de adicionar zonas em uma data posterior, também é possível perfurar zonas obstruídas por incrustação (*scale*) e outros

depósitos; (f) adequado para estimulação por faturamento hidráulico, especialmente onde a contenção de fratura ou fratura múltipla é necessária; (g) redução do potencial para produção de areia com o uso de canhões seletivos ou orientados; (h) facilidade de aplicação de tratamentos químicos - especialmente aqueles tratamentos que requerem divergência, como compressão de incrustações, acidificação e outros solventes químicos; (i) fácil de usar com completações inteligentes ou completações seletivas (BELLARBY, 2009).

Existem vários tipos diferentes de explosivos. Eles variam em poder explosivo e estabilidade de temperatura. O explosivo principal faz parte do projeto da carga moldada e é classificado como um explosivo secundário de alta potência. O explosivo detona em velocidade supersônica. Explosivos secundários também são encontrados no cordão detonador e no detonador (BELLARBY, 2009).

Existem dois tipos principais de construção de canhões usados para a completação em poços de petróleo. Os canhões do tipo cápsula possuem pequeno diâmetro e baixo peso. As cargas descem expostas ao ambiente do poço e todo o conjunto do canhão (abaixo do cabeça de disparo) é deixado no fundo do poço como detritos quando o canhão é disparado. O segundo tipo de sistema é o canhão transportador. O transportador é um tubo oco que atua tanto para proteger os canhões quanto para manter a pressão atmosférica no interior do canhão. O transportador (junto com alguns detritos de carga) é recuperado para a superfície ou cai no reservatório uma vez que o canhão dispara. O transportador contém *scallops* seções de paredes finas através das quais os jatos são direcionados para canhonear a parede do revestimento e a rocha reservatório (BELLARBY, 2009).

Segundo Bellarby (2009) existem vários métodos diferentes para colocar os canhões dentro do poço, dentre eles o TCP. Nesse método não há limite de peso e diâmetro dos canhões, exceto o tamanho do revestimento (BELLARBY, 2009; KING, 1989). Esses canhões podem ser executados com uma coluna de teste ou com a coluna de completação do poço. No caso de testes de formação, os canhões são executados com uma coluna de trabalho que incorpora ferramentas de teste de poço, como válvulas de circulação no espaço anular e válvulas de teste operadas por pressão; o *packer* é assentado; os testes de vedação são realizados; os canhões são disparados e inicia-se a produção do poço.

Poços com elevação natural são adequados para canhoneio usando canhões de aço oco contendo cargas moldadas de penetração profunda para maximizar a penetração, minimizar o dano à formação perto do poço e maximizar a produtividade. No caso do canhoneio TCP, os

canhões são instalados abaixo do *packer* de completação. A coluna de produção com *packer* e o canhão TCP são descidos em uma única execução (WOOD et al., 2018).

Para esse posicionamento, várias técnicas podem ser usadas: (a) identificar um ponto de referência conhecido (plugue pré-existente no poço) e selecionar a profundidade apropriada; (b) assentar um obturador (*packer*) descido com cabo elétrico em uma profundidade conhecida apropriada e encamisar o canhão e a coluna de completação no *packer*; (c) executar o TCP até a profundidade de perfuração aproximada. Em seguida, fazer a corrida do perfil de correlação com localizador de conexões/raios gama. Verificar a profundidade do canhão comparando a profundidade do sub marcador radioativo com a profundidade do perfil de referência corrido à poço aberto. Mover a coluna TCP para posicionar adequadamente os canhões na profundidade desejada. Assentar o *packer* e verificar novamente o posicionamento correto da profundidade do canhão (ALLEN, 2012). Caso a profundidade não esteja correta, reposicionar o canhão e verificar com a corrida de um novo perfil. Repetir o processo até que o canhão seja posicionado na profundidade correta.

Para canhoneio descido à cabo elétrico, a correlação de profundidade é geralmente com o auxílio de raios gama e localizador de conexões de revestimento (GR / CCL). Estes são correlacionados com os perfis de poço aberto. O controle de profundidade pode ser alcançado com uma precisão de menos de 1 pé. Para os canhões transportados por tubulação, o controle de profundidade pode ser obtido por medição da coluna, no entanto o alongamento, expansão térmica e arrasto, para não mencionar o erro humano, limitarão a precisão a dezenas de pés na melhor das hipóteses. É comum usar uma correlação com cabo elétrico antes de instalar o susensor de tubulação ou árvore de teste. O perfil de correlação pode ser baseado nos perfis de poço aberto acima do reservatório ou em uma marca radioativa (*pip tag*) estrategicamente posicionada. Para uma completação submarina, a profundidade da água poderá limitar a utilidade do perfil de correlação (BELLARBY, 2009).

De acordo com Chieza (2011) os modelos de torque e arraste são utilizados para dar suporte ao planejamento de poços e ajudar na previsão e prevenção de problemas operacionais de poços. O principal fator que influencia os valores de torque e arraste é a fricção gerada no poço.

O arraste (*drag*) é uma força axial gerada de maneira similar ao torque (quanto maior a força de contato, maior o arraste) e basicamente toma o lugar do torque quando a coluna para de rotacionar e o tubo se move somente numa direção axial. A força de arraste estará sempre

agindo na direção oposta ao movimento da coluna de perfuração. Logo, a magnitude da força de arraste é obtida através da multiplicação do fator de atrito com a força normal (CHIEZA, 2011).

### 3. METODOLOGIA

A metodologia utilizada será baseada em revisão bibliográfica do tema, desenvolvimento de um modelo para cálculo de variação de coluna e critério para definir corridas adicional do perfil de correlação, simulações em Excel e análise dos resultados.

O canhoneio TCP é realizado com a descida do canhão conectado na extremidade da coluna de produção, coluna de teste ou coluna de trabalho da sonda. O método empregado para medida das colunas e conseqüentemente para determinar a profundidade do canhão TCP, apresenta uma margem de erro acima do tolerável para o correto posicionamento do canhão. Para verificar e corrigir o posicionamento do canhão TCP, são realizadas uma ou mais corridas de um perfil de correlação com bases na ferramenta de gamma ray (GR) e casing collar locator (CCL).

A magnitude deste ajuste depende do método utilizado para determinação da profundidade da coluna, da profundidade do intervalo canhoneado, das propriedades mecânicas e geométricas da coluna e do revestimento, além da trajetória direcional do poço.

Após o posicionamento do canhão com base na profundidade da coluna, realiza-se a corrida inicial do perfil de correlação. Com base no perfil de correlação, determina-se a real profundidade do canhão e o ajuste necessário para posicionar o canhão na profundidade correta. A Figura 1 (a) e (b) apresenta um desenho esquemático do posicionamento do canhão com a coluna e com o perfil de correlação.

Após determinado o ajuste, procede-se o reposicionamento do canhão através da movimentação da coluna na superfície. Altera-se o comprimento da coluna na superfície com o objetivo de corrigir o posicionamento do canhão no Fundo. A Figura 1 (c) apresenta o

desenho esquemático do processo de ajuste após a corrida inicial do perfil de correlação.

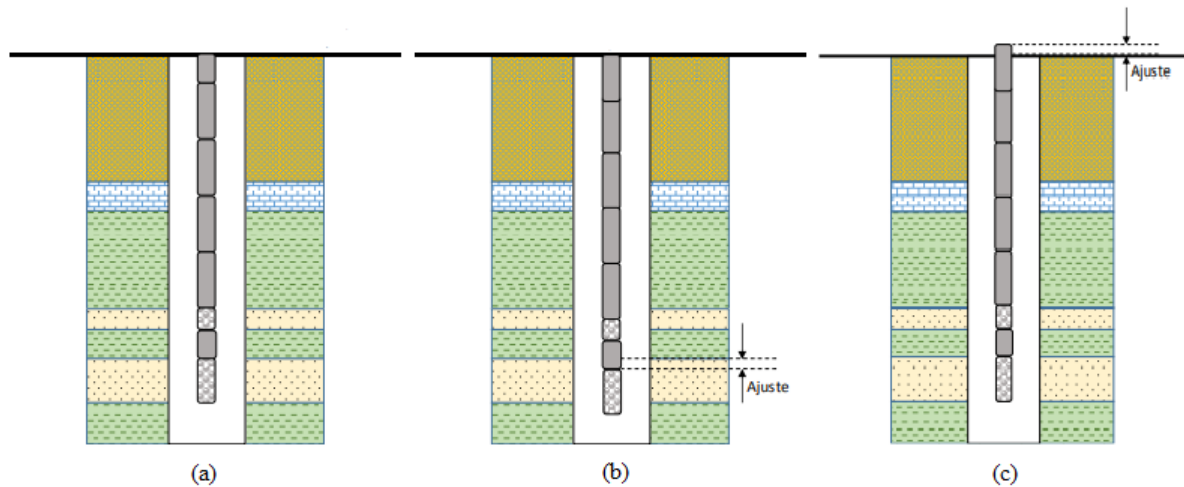


Figura 1: (a) Profundidade do canhão medida com a sonda, (b) Profundidade medida com perfil de correlação, (c) Profundidade após o ajuste de superfície

Conforme mostrado na Figura 1 (c), espera-se que o ajuste realizado na superfície seja suficiente para corrigir integralmente a posição do canhão TCP em relação ao intervalo que será canhoneado. Na realidade, o ajuste de superfície funciona muito bem em poços rasos ou poços verticais onde a força de arraste axial (*drag*) é pequena e não tem grande influência no movimento do canhão na extremidade da coluna.

No caso de poços profundos ou com inclinação, onde o *drag* apresenta uma magnitude capaz de provocar variações no comprimento da coluna durante o processo de ajuste na superfície, é provável que após o ajuste de superfície, permaneça um erro residual e o canhão não fique integralmente posicionado no intervalo que se deseja realizar o canhoneio. Neste caso é necessário realizar uma nova corrida com o perfil de correlação para realizar uma nova verificação e um novo ajuste no posicionamento do canhão.

Uma vez que uma nova corrida para correlação implica em aumento do tempo e do custo da intervenção, existe diferentes abordagens para definição da necessidade de uma corrida para correlação de profundidade após o ajuste inicial da coluna realizado na superfície.

### 3.1 Modelo para cálculo da variação da coluna

Objetivando obter parâmetros que ajudem na definição da necessidade de uma corrida adicional do perfil de correlação, foi adotado o modelo apresentado na Figura 2, assumindo as seguintes premissas: o *drag* no trecho vertical do poço é desprezível; o *drag* provém apenas do

trecho slant do poço; o *drag* é uma força linearmente distribuída ao longo do trecho slant.

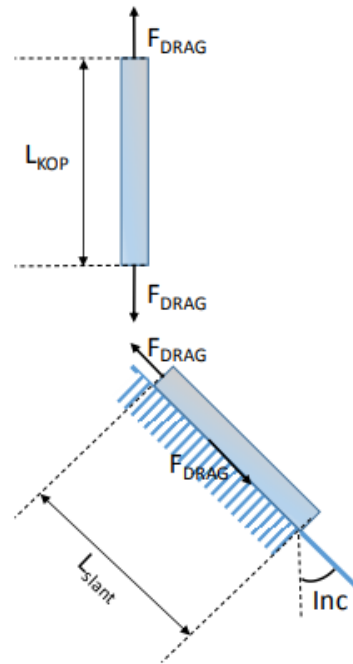


Figura 2: Modelo para cálculo da variação do comprimento da coluna em função do *drag* no poço

Considerando as premissas apresentadas e o modelo da Figura 2, pode-se estimar a variação no comprimento da coluna na Equação 1:

$$\Delta L = \frac{F_{DRAG}}{E A_s} \times \left( L_{KOP} + \frac{L_{slant}}{2} \right) \quad (1)$$

onde  $\Delta L$  é a variação no comprimento da coluna decorrente da força de arraste (m),  $F_{drag}$  é a força de arraste axial (lbf),  $E$  é o módulo de elasticidade do material da coluna (psi),  $A_s$  é a área da seção transversal da tubulação ( $pol^2$ ),  $L_{KOP}$  é a profundidade do KOP (m) e  $L_{slant}$  é o comprimento medido do trecho *slant* (m).

A partir da Equação 1 foram elaborados gráficos que apresentam a estimativa da variação do comprimento da coluna em função da força de arraste medida no poço e das propriedades mecânicas e geométricas da coluna utilizada para o canhoneio TCP.

### 3.2 Critério para definir corridas adicional do perfil de correlação

Objetivando propor uma metodologia para verificação da profundidade nos canhoneios TCP, sugere-se o seguinte critério para realização da corrida do perfil de correlação após o ajuste de profundidade realizado na superfície.

As corridas adicionais do perfil de correlação devem ser realizadas sempre que a expectativa de variação do comprimento da coluna indique uma perda maior do que 5% do intervalo a ser canhoneado. Este critério está apresentado na Equação 2:

$$\frac{n \times \Delta L}{L_{\text{canhoneio}}} > 0,05 \quad (2)$$

onde n é o número de intervalos distinto a serem canhoneado na mesma descida do canhão, ΔL é a variação no comprimento da coluna decorrente da força de arraste (m) e L<sub>canhoneio</sub> é o comprimento total do intervalo a ser canhoneado (m).

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da Equação 1 foram elaborados gráficos que apresentam a estimativa da variação do comprimento da coluna em função da força de arraste medida no poço e das propriedades mecânicas e geométricas da coluna utilizada para o canhoneio TCP. Os gráficos para coluna 2 3/8", 2 7/8" e 3 1/2" com rosca API EU estão apresentados nas Figuras 3, 4 e 5, respectivamente.

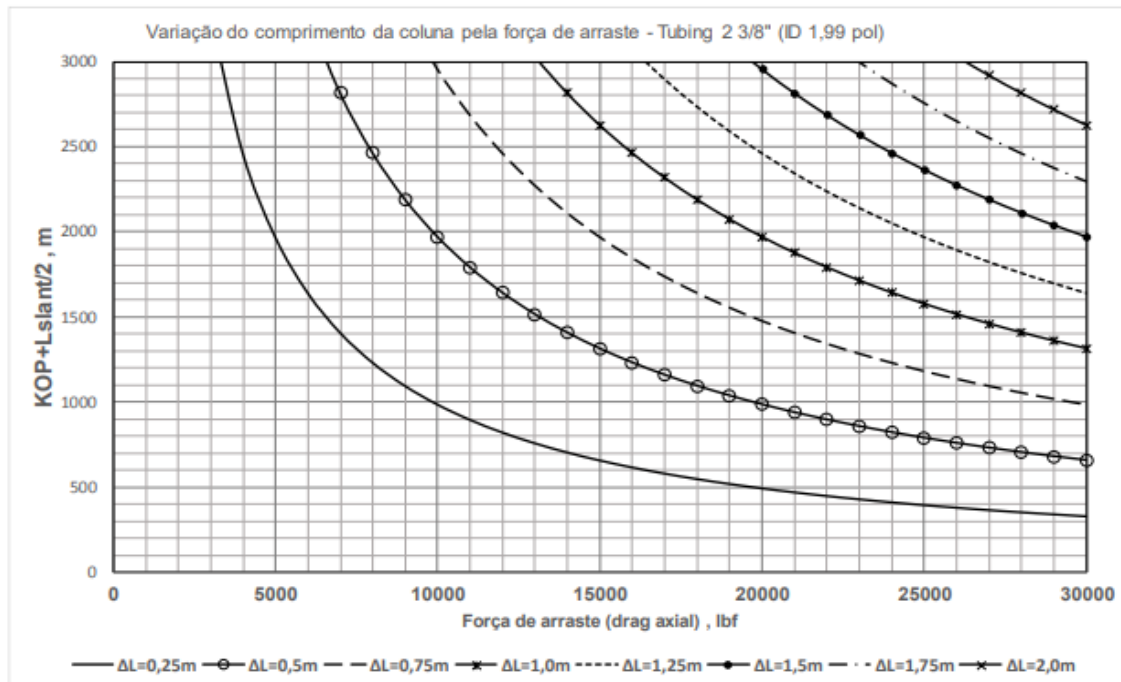


Figura 3: Variação do comprimento da coluna com a força de arraste – Tubos 2 3/8"



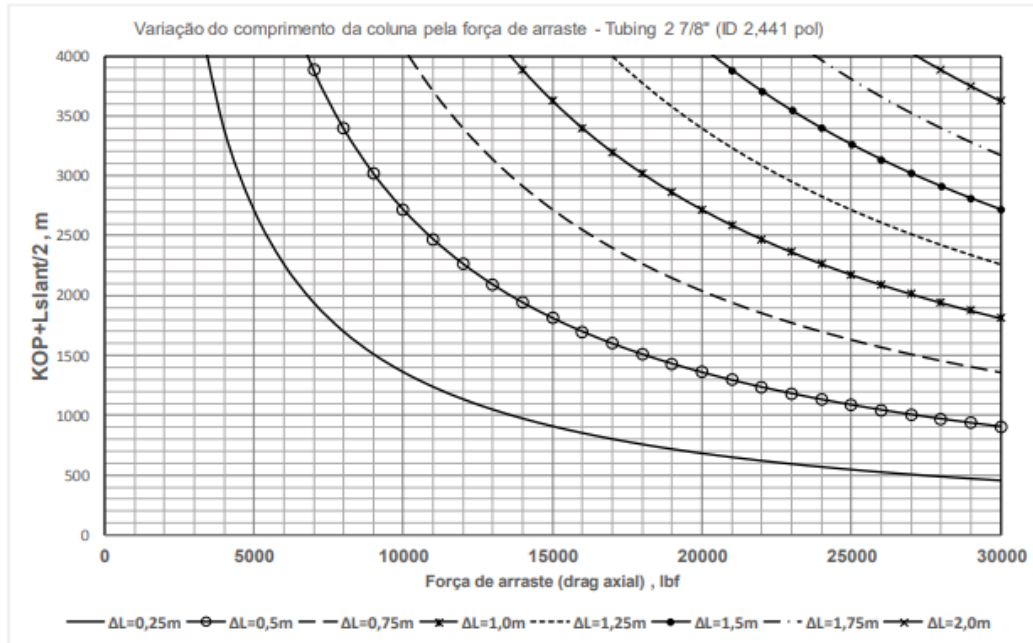


Figura 4: Variação do comprimento da coluna com a força de arraste – Tubos 2 7/8”

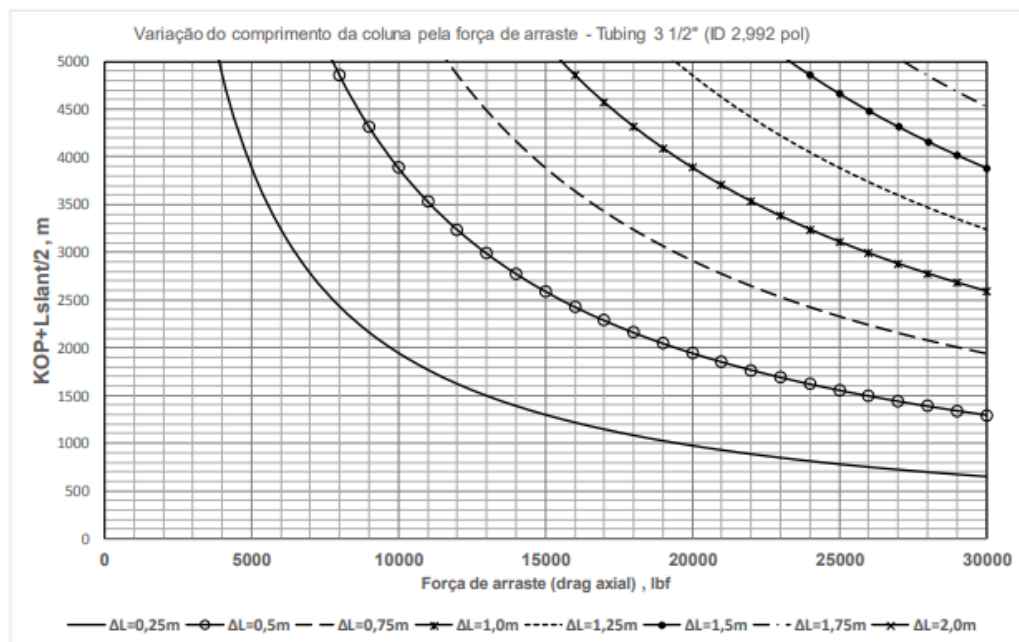


Figura 5: Variação do comprimento da coluna com a força de arraste – Tubos 3 1/2”

O modelo apresentado no item 3.1 considera apenas o comportamento elástico da coluna de produção. Desta forma, os resultados do modelo, mostrados nas Figuras 3, 4 e 5, apresentam valores consistentes quando a força de arraste proporciona efeito de tração na coluna, ou seja, quando o ajuste é realizado no sentido da retirada da coluna no poço.

Quando o ajuste é realizado no sentido de gerar esforço de compressão na coluna, o valor da força de arraste pode gerar efeito de flambagem da coluna. O efeito da flambagem aumenta a variação no comprimento da coluna, porém este efeito não está contemplado no modelo apresentado no item 3.1.

Logo, os valores calculados pelo modelo serão menores do que os valores reais nos casos onde a força de arraste gera esforço de compressão na tubulação.

Sugere-se que a segunda corrida do perfil de correlação para verificar a profundidade do canhão, seja realizada sempre que a variação prevista para tamanho da coluna decorrente do drag indique uma perda maior do que 5% do comprimento total do intervalo a ser canhoneado.

#### 4.1 Exemplo de aplicação de uso das Figuras 3, 4 e 5

Determinar a variação no comprimento da coluna 2 7/8" utilizada para um canhoneio TCP em um poço com arraste de 15000 lbf, KOP @ 700 metro e trecho *slant* de 400 metros.

Considerando a Figura 4, para coluna 2 7/8", traça-se uma linha reta vertical a partir do valor de 15000 lbf no eixo das abcissas. Em seguida, traça-se uma linha reta horizontal a partir do valor de 900 m ( $700+400/2$ ) no eixo das ordenadas. O encontro das duas linhas retas indica a variação esperada para o comprimento da coluna. Neste exemplo a variação esperada é de 0,25 m.

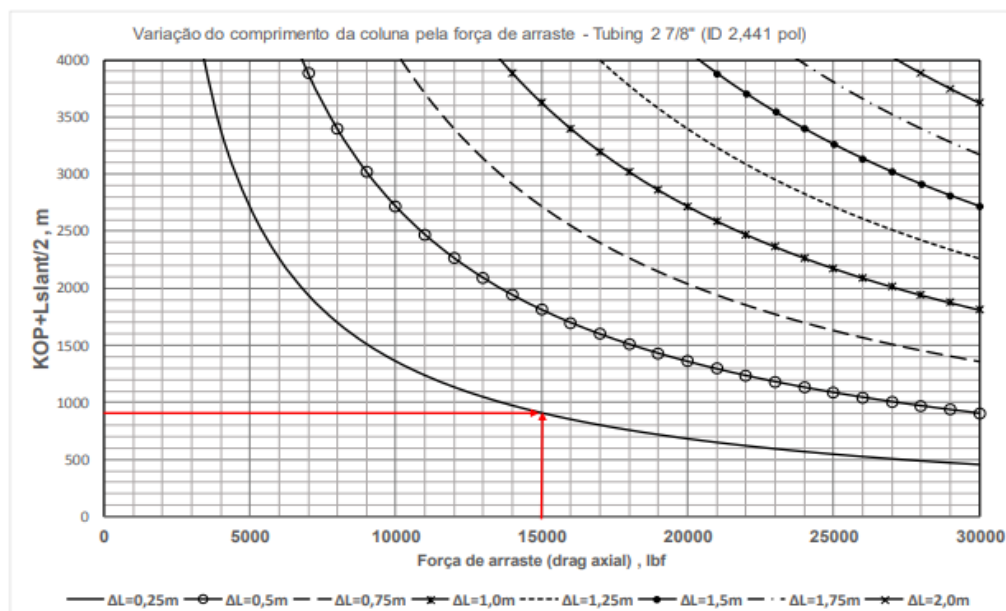


Figura 6: Determinação da variação do comprimento da coluna

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresenta um modelo para determinação da variação do comprimento da coluna em função da força de arraste, do comprimento vertical e do trecho inclinado (*slant*) do poço, que visa redução do custo do canhoneio sem comprometimento do resultado da operação.

Com base na variação do comprimento da coluna, do número de intervalos no canhoneio e do comprimento total a ser canhoneado, determinou-se um critério objetivo para definição das corridas para verificação da profundidade do canhão.

O modelo proposto e o cálculo da variação do comprimento da coluna são mais coerentes com ajuste de profundidade que induzam esforços de tração na coluna. No caso de ajuste que geram esforços de compressão, os valores calculados pelo modelo são inferiores aqueles esperados para situação real.

Para futuros trabalhos são recomendados modelos mais sofisticados para o cálculo da variação do comprimento da coluna para movimentação de canhoneio TCP.

## 6. AGRADECIMENTOS

À Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), e ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), pelo apoio financeiro por meio do Programa de Recursos Humanos para o Setor Petróleo e Gás.

À Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

Ao meu professor e orientador Flávio Medeiros por todo apoio, dedicação e incentivo à pesquisa.

## 7. REFERÊNCIAS

EICHELBERGER, R.J., 1956. **Experimental test of the theory of penetration by metallic jets**. J. Appl. Phys. 27 (1), 63–68. <https://doi.org/10.1063/1.1722198>.

LEE, W.H., 2002. **Oil well perforator design using 2D Eulerian code**. Int. J. Impact Eng. 27 (5), 535–559. [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(01\)00054-9](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(01)00054-9).

ELSHENAWY, T., Li, Q., 2013. **Influences of target strength and confinement on the penetration depth of an oil well perforator.** Int. J. Impact Eng. 54, 130–137. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2012.10.010>.

BAUMANN, C., Lazaro, A., Valdivia, P., et al., 2013. **Perforating gunshock loads-prediction and mitigation.** SPE/IADC Drilling Conference. <https://doi.org/10.2118/163549-MS>. Amsterdam, The Netherlands.

GILLIAT, J., Bale, D., Satti, R.P., et al., 2014. **The importance of Pre-Job shock modeling as a risk mitigation tool in TCP operations.** SPE Deepwater Drilling and Completions Conference. Galveston, Texas. <https://doi.org/10.2118/170260-MS>. SPE-170260-MS.

BELLARBY, J. **Well Completion Design.** 5. ed. Aberdeen, Uk: Developments In Petroleum Science, 2009. 711 p.

KING, G. E., 1989. **Perforating the Horizontal Well.** Volume 41, 671. <https://doi.org/10.2118/19888-PA>.

WOOD, S., Comb L., Singh M. K., Lavery J., 2018. **Perforating vertical smart well completions using tubing-conveyed perforating gun assemblies: case history.** SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition. Abu Dhabi. <https://doi.org/10.2118/189318-MS>. SPE-189318-MS.

ALLEN, T. O., Roberts A. P. **Production Operations.** OGCI and PetroSkills Publications, Tulsa, Oklahoma, 2012. Volume 1.

CHIEZA, Carolina Pontes. **Diagnósticos de problemas operacionais durante a perfuração de poços de petróleo.** 2011. 151 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Puc - Rio, Rio de Janeiro, 2011.