



ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE COMPOSIÇÕES DE FUNDO DE POÇO PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Francisco S. M. Costa

Petróleo Brasileiro S.A.

Exploração & Produção da Bahia, Av. ACM, 1113, 5º andar s/ 536, BA

Paulo R. Ribeiro

Universidade Estadual de Campinas

DEP/FEM/UNICAMP, Cx. P. 6122 – Campinas, SP, 13083-970, Brasil

***Resumo.** Este trabalho trata da modelagem do comportamento mecânico de composições de fundo de poço (bottom hole assembly – BHA) equipados com comandos desbalanceados, através do método de elementos finitos. A composição foi discretizada em elementos bidimensionais de viga-coluna e o problema não-linear geométrico foi resolvido pelo método de Newton com um esquema de carregamento incremental. O modelo foi validado através de problemas clássicos de vigas com grande deslocamentos e pequenas deformações, bem como dados publicados para o comportamento estático de comandos estabilizados. As condições de contorno impostas pelas paredes do poço foram implementadas através de elementos de mola bilineares. A análise da variação da magnitude da força de reação na broca, devido à rotação da coluna de perfuração, foi executada aplicando-se uma força de corpo no BHA, que era equivalente à força desbalanceada. Este tipo de aproximação permitiu um tratamento simplificado do comportamento dinâmico do sistema em um ponto de vista estático. O efeito da força desbalanceada na força de reação na broca foi investigada e uma tendência efetiva de reduzir inclinação do poço foi verificada, com uma velocidade rotacional crescente da coluna de perfuração.*

***Palavras-chave:** Perfuração, Comandos, Poço, Petróleo, Elementos, Finitos*

1. INTRODUÇÃO

O controle da trajetória do poço durante sua perfuração é um assunto importante na exploração de petróleo, pois influencia no custo global das operações (Bradley, 1975). Mantendo-se o poço próximo da sua trajetória projetada e aplicando-se os parâmetros de perfuração adequados (peso-sobre-broca, velocidade rotacional e vazão de fluido de perfuração) é possível atingir o objetivo em um tempo reduzido, evitando-se qualquer tipo de intervenção para correção dessa trajetória.

Devido às características geológicas de certos campos, há uma tendência natural de ganho de inclinação do poço durante a perfuração, que causa desvio indesejado da trajetória vertical projetada. Este tipo de problema é bastante freqüente na área de Jacuípe, na Bacia do

Recôncavo de Baiano (Brasil). Significantes esforços foram feitos para reduzir os custos associados com a manutenção da trajetória vertical de poços de desenvolvimento (Restum & Derossi, 1994).

Há, basicamente, dois modos para se manter a trajetória vertical do poço: i) usando-se um coluna de perfuração estabilizada; ii) usando-se um BHA (*Bottom-hole assembly* – composição de fundo de poço) equipado com comandos desbalanceados. A opção de coluna de perfuração estabilizada requer a colocação de estabilizadores em pontos estratégicos ao longo do BHA, que alterará a orientação da broca devido à reação nos pontos de contato entre os comandos e o poço. Apesar dos resultados satisfatórios obtidos com esta opção, há um aumento significativo no torque e arraste na coluna de perfuração.

O princípio de operação do comando desbalanceado está baseado no efeito de força centrífuga devido a rotação de coluna de perfuração, que gera uma força de reação na broca que tende a manter a trajetória vertical do poço. O desbalanceamento é atingido através de usinagem longitudinal (em alguns pontos) do comando. O comando desbalanceado foi primeiramente utilizado na perfuração de poços exploratórios em regiões com tendência de ganho de inclinação nos E.U.A. (*World Oil*, 1971) e também para aumentar a taxa de penetração em alguns campos em Kansas e Wichita (*World Oil*, 1978). O uso de comandos desbalanceados também provou ser a opção mais lucrativa na Bacia do Recôncavo (Restum & Derossi, 1994): inclinações máximas de 6° foram registradas usando-se comando desbalanceado onde inclinações até 13° foram medidas usando-se comando convencional. Estes resultados encorajaram o uso da ferramenta em mais da metade dos poços perfurados naquela área e também começaram a levantar perguntas que consideram alguns aspectos técnicos da aplicação, como: i) magnitude da força de reação na broca causado pelo desbalanceamento; ii) deslocamento dos comandos no fundo do poço; iii) comparação do comportamento mecânico do coluna de perfuração equipada com estabilizador ou comando desbalanceado.

Devido às dificuldades em medir as quantidades que ajudariam a responder qualquer pergunta relacionada ao comportamento da coluna de perfuração no fundo do poço, um modelo de elementos finitos foi desenvolvido para simular o comportamento estático da coluna de perfuração. O comportamento do BHA equipado com comando desbalanceado, que tem uma natureza puramente dinâmica, foi aproximado aplicando uma força desbalanceada equivalente para o sistema. Esta análise bidimensional simplificada do problema dinâmico dentro de um contexto estático permitiu a determinação da variação da magnitude da força de reação na broca como uma função da velocidade de rotacional do coluna de perfuração.

2. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

As equações diferenciais que representam uma viga (módulo de Young E , momento de inércia I , área da seção transversal A e comprimento L) sujeita a cargas transversal (concentrada, V e distribuída, $q(x)$) e axial (concentrada, P) podem ser escritas da seguinte maneira (Timoshenko & Gere, 1961):

$$EI \frac{d^3 v}{dx^3} + P \frac{dv}{dx} = -V \quad (1)$$

$$EI \frac{d^4 v}{dx^4} + P \frac{d^2 v}{dx^2} = q(x) \quad (2)$$

$$EA \frac{du}{dx} = P \quad (3)$$

O deslocamento axial, u , é descrito ao longo do eixo horizontal x e o deslocamento transversal, v é descrito no eixo vertical y .

A representação de elementos finitos do problema é obtida aplicando-se o método dos resíduos ponderados ao sistema de equações diferenciais e aproximando-se as variáveis desconhecidas (campo de deslocamento) por funções de forma que são definidas dentro de cada elemento (Huebner & Thornton, 1982). Portanto, aplicando-se o método de Galerkin, as equações podem ser escritas em forma de matriz conforme a seguir (Cook, Malkus & Plesha, 1989 e Przemieniecki, 1968):

$$(\mathbf{K}_E + \mathbf{K}_G) \mathbf{U} = \mathbf{F} \quad (4)$$

Onde \mathbf{K}_E representa a matriz de rigidez elástica, \mathbf{K}_G a matriz geométrica, \mathbf{U} o vetor das incógnitas (deslocamentos nodais) e \mathbf{F} é o vetor dos carregamentos.

A não-linearidade geométrica do sistema é caracterizada pela dependência de \mathbf{K}_G na deformação axial dos elementos, e por conseguinte, no campo de deslocamento local. O modelo pode descrever problemas de viga-coluna sujeitas a grandes deslocamentos e pequenas deformações utilizando-se a Formulação Lagrangeana Total (Bathe, 1982) para descrever as configurações de deslocamento da estrutura. O sistema de equações não-lineares foi resolvido através de método de Newton com um esquema de carregamento incremental.

As condições de contorno impostas pelas paredes de poço foram modeladas através de elementos de molas bilineares (constantes elásticas: k_0 e k_1), que basicamente indicam uma diferente rigidez ao deslocamento lateral do coluna de perfuração, dependendo da posição de seus pontos em relação às paredes de poço. Este modelo foi implementado no sistema de equações somando uma matriz de rigidez das molas, \mathbf{K}_S , à matriz de rigidez global do sistema, \mathbf{K} , que também está composta por \mathbf{K}_E e \mathbf{K}_G .

3. VALIDAÇÃO DO MODELO

O modelo foi validado através de problemas clássicos de viga e foi comparado com os resultados da simulação de um BHA estabilizado.

O primeiro exemplo clássico foi o da viga em balanço sujeita a uma carga concentrada transversal (F) na sua extremidade. A viga foi discretizada em 8 elementos e uma carga adimensional P_{ad} (FL^2/EI) foi aplicado em 26 incrementos. Os resultados do modelo foram comparados com a solução analítica (Mattiasson, 1981), de maneira adimensional, de acordo com Fig. 1. O deslocamento adimensional da viga em balanço sujeita a uma carga concentrada transversal crescente pode ser observado na Fig. 2.

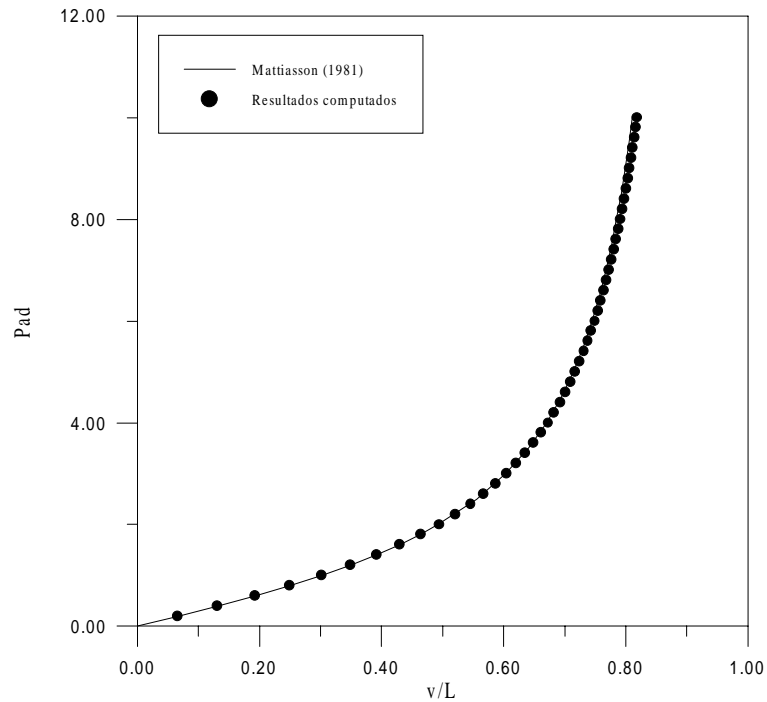


Figura 1 - Comparação entre os resultados computados para uma viga em balanço ($E=A=I=L=1$) com carga concentrada na extremidade (F) e a solução analítica (Mattiasson)

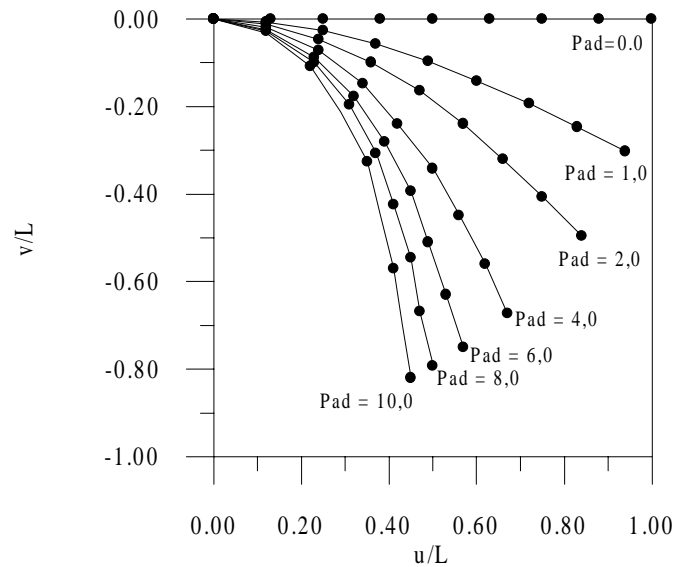


Figura 2 – Varias configurações de equilíbrio para o processo de carregamento incremental da viga em balanço ($E=A=I=L=1$) com carga concentrada na extremidade (F)

O segundo problema clássico usado para validar a ferramenta matemática foi o de uma viga em balanço sujeita a uma carga uniformemente distribuída transversal (q). Os resultados computados para uma discretização de 10 elementos foram comparados com a solução analítica (Holden, 1972), de maneira adimensional, e pode ser observado na Fig. 3.

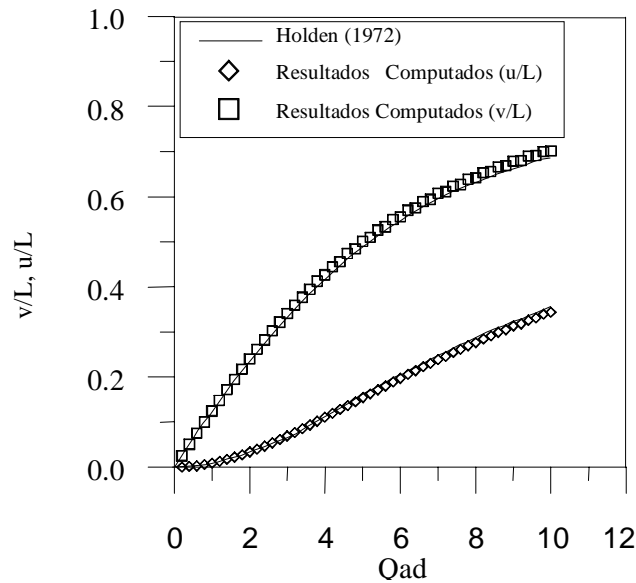


Figura 3 - Comparação entre os resultados computados para uma viga em balanço ($E=2.1e7$ N/m^2 ; $A=2e-3$ m^2 ; $I=1.67e-8$ m^4 ; $L=1$ m) com carga uniformemente distribuída (q) e a solução analítica (Holden, 1972).

A viabilidade de aplicar o modelo matemático para descrever o comportamento mecânico da coluna de perfuração foi verificado, baseado na concordância entre os resultados computados e os dados publicados (Millheim et al., 1978) para o deslocamento e força de reação ao longo de um BHA com um único estabilizador, conforme os dados da Tab.1.

Tabela 1: Dados do BHA utilizados na análise.

Dado do BHA	Valor
Massa específica do fluido de perfuração (kg/m^3)	1198
Diâmetro externo dos comandos (m)	0,2032
Diâmetro interno dos comandos (m)	0,0508
Diâmetro do poço (m)	0,2508
Diâmetro do estabilizador (m)	0,2508
Massa específica do aço (kg/m^3)	7833
Módulo de Young do aço (N/m^2)	2,0E+11
Coefficiente de Poisson	0,3
Inclinação do poço ($^\circ$)	10
Azimute do poço ($^\circ$)	0
Comprimento dos comandos (m)	152,4
Comprimento discretizado dos comandos (m)	54,9
Comprimento radial do espaço anular (m)	0,0238
Momento de inércia (m^4)	8,3E-05
Área da seção transversal (m^2)	0,0304
Módulo de Young da Formação (N/m^2)	1,56E+10

Millheim et al. (1978) utilizaram um pacote comercial para simular o deslocamento e força de reação ao longo de um BHA sob quatro condições de estabilização. Eles utilizaram elementos 3D de viga-coluna para discretizar a parte inferior do BHA (54.86 m acima da broca com 13 elementos) e o contato entre o coluna de perfuração e as paredes do poço foi

representado através de elementos de barra bilineares. O sistema foi representado por uma viga inclinada, apoiada em uma extremidade (broca) e livre na outra (topo da discretização), sujeita a uma carga distribuída (axial e transversal) devido ao peso efetivo do BHA (força de gravidade - força de empuxo) e uma carga concentrada na sua extremidade livre (peso efetivo equivalente do resto do comprimento do BHA que está localizado sobre a seção discretizada e abaixo do ponto neutro de flambagem).

A configuração deformada do BHA pode ser observada na Fig. 4 e a força de reação devido ao contato com as paredes do poço é mostrada na Fig. 5.

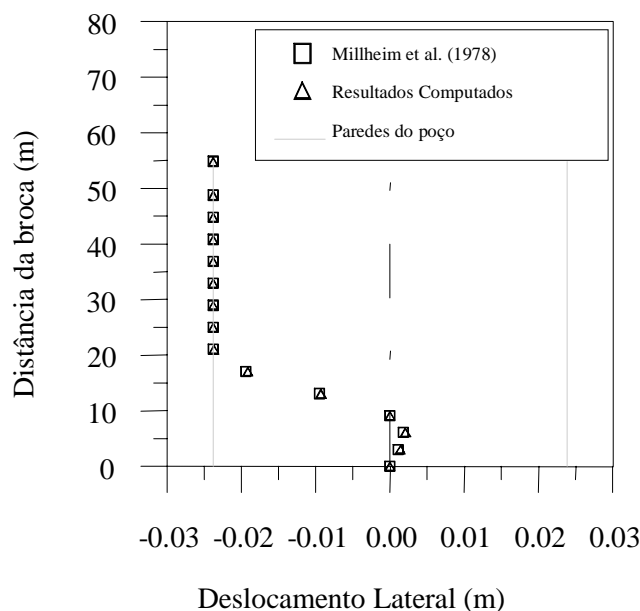


Figura 4 – Deslocamento lateral *versus* distância da broca para um BHA com um estabilizador localizado a 9,14 m acima da broca ($k_0=1.87E4$ e $k_1=1.87E10$)

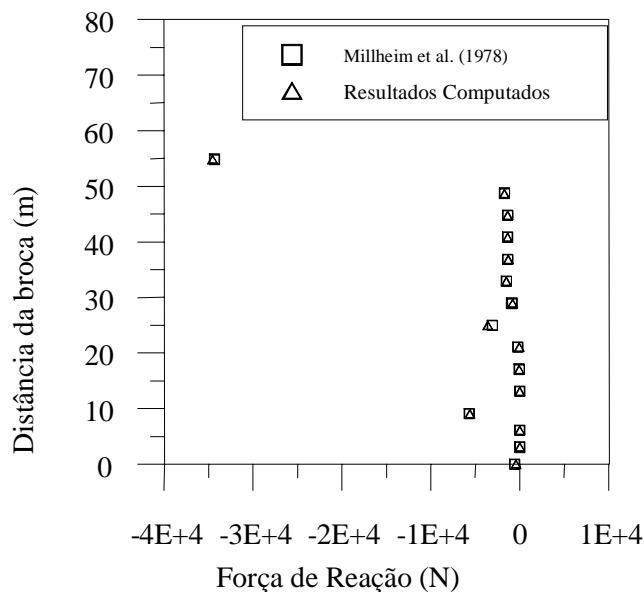


Figura 5 – Força de reação na broca *versus* distância da broca para um BHA com um estabilizador localizado a 9,14 m acima da broca ($k_0=1.87E4$ e $k_1=1.87E10$)

Uma análise de sensibilidade do efeito das constantes (k_0 e k_1) dos elementos na solução foi executado. Este procedimento foi necessário para selecionar as combinações de constantes que melhor simulam o problema.

Os resultados do modelo para outros problemas de viga, bem como coluna de perfuração com diferentes tipos de estabilização podem ser conferidos no trabalho de Costa (1996).

4. COMPORTAMENTO MECÂNICO DE COMANDOS DESBALANCEADOS

Esta seção incluiu a análise do efeito do desbalanceamento artificial introduzida em comandos desbalanceados na inclinação de poços.

4.1 Modelagem do BHA

Os dados básicos do poço e do BHA são mostrados na Tab. 1, desconsiderando-se o estabilizador e introduzindo-se comando desbalanceado imediatamente acima da broca. O desbalanceamento artificial deste comando foi introduzido através da usinagem de 50 furos alinhados ao longo do seu comprimento (9.14 m), retirando uma massa total de 120 Kg de um de seus lados.

Discretização. A malha de discretização do comando desbalanceado foi mais fina que a do exemplo de validação prévio, devido à sua seção transversal irregular associada com a retirada de material. A parte inferior do BHA foi discretizada em 112 elementos em vez de apenas 13.

Condições de contorno. A condição de apoio na broca foi substituída por um elemento de mola visando tratar as paredes do poço como uma fundação elástica para ser mais realista. A carga concentrada aplicada à extremidade livre foi mantida a mesma, mas a carga distribuída incorporou a magnitude da força desbalanceada devido à velocidade rotacional da coluna de perfuração e o peso efetivo da seção discretizada do BHA.

Casos de carregamento. Para inspecionar o efeito da variação da magnitude da força desbalanceada no campo de deslocamento e força de reação ao longo do BHA, foram considerados dois casos extremos: (i) força desbalanceada que aponta para o lado baixo do orifício, (ii) força desbalanceada que aponta para o lado alto do orifício.

4.2 Resultados

O caso básico para a análise da efetividade do comando desbalanceado é o BHA liso. A configuração deformada e a força de reação ao longo do BHA liso é mostrado nas Figs. 6 e 7, respectivamente.

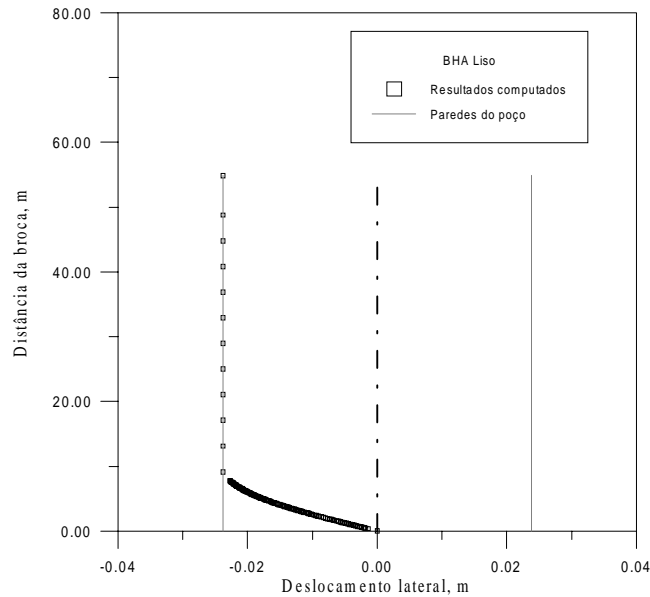


Figura 6 - Deslocamento lateral *versus* distância da broca para um BHA liso

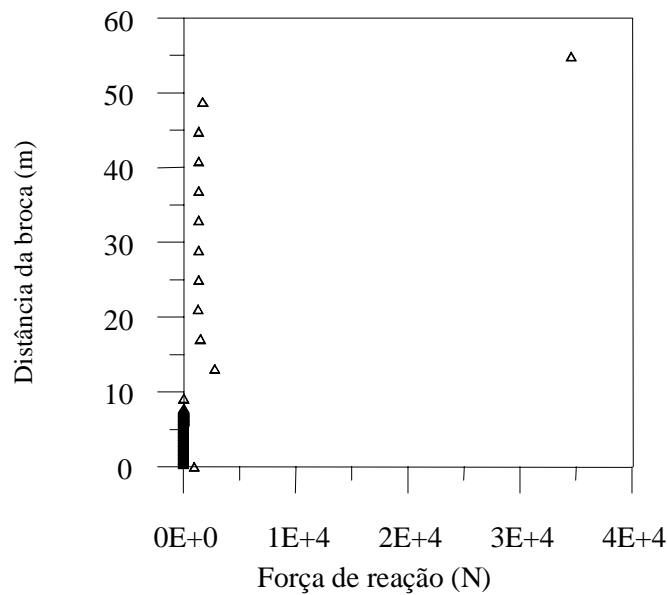


Figura 7 - Força de reação na broca *versus* distância da broca para um BHA liso

Velocidade Rotacional. O efeito da força centrífuga no deslocamento lateral e na força de reação ao longo do BHA, para três diferentes velocidades rotacionais da coluna de perfuração, foi estudado. Para cada velocidade rotacional (60, 120 e 180 RPM) foram analisados dois cenários de carregamento que dependem da direção da força desbalanceada. Quando a direção da força centrífuga coincide com a do peso efetivo dos comandos, os pontos nodais na parte inferior do BHA tendem a ser deslocados para o lado baixo do poço. Este fato também é comprovado pela inspeção da força de reação na broca, que tende a ser maior do que quando as forças apontam para direções opostas (força centrífuga que aponta para o lado alto dos orifícios).

Aplicação. Como a tendência de ganhar ou perder inclinação é relacionada diretamente à magnitude e direção da força de reação na broca, os valores apresentados na Tab. 2

confirmam a tendência de reduzir o ângulo de inclinação com uma velocidade rotacional crescente da coluna de perfuração. É importante comentar que o valor positivo da força de reação na broca significa que o contato ocorre no lado baixo do poço, já o valor negativo indica o contato da broca com o lado alto do poço. O contato com o lado baixo do poço caracteriza uma tendência de perda de inclinação que ocorre, incondicionalmente, quando a força centrífuga e o peso específico possuem o mesmo sentido.

Os resultados na Tab. 2 também indicam a supremacia do BHA equipado com comandos desbalanceado sobre o BHA liso, quando a meta é reduzir o ângulo de inclinação do poço.

Tabela 2: Força de reação na broca em função da velocidade rotacional.

Velocidade rotacional (RPM)	Orientação da força desbalanceada	Força de reação na broca (N)
60	Lado baixo	982,63
	Lado alto	595,72
120	Lado baixo	1109,5
	Lado alto	-275
180	Lado baixo	2300,17
	Lado alto	-886,89
BHA liso		950,92

5. CONCLUSÕES

O código de elementos finitos desenvolvido para modelar estruturas de viga-coluna 2D, sujeitas a grandes deslocamentos e pequenas deformações, provou ser uma ferramenta matemática digna para modelar o comportamento mecânico da coluna de perfuração.

O método de Newton com um esquema de carregamento incremental mostrou ser um algoritmo poderoso para resolver esta classe de problemas de não-linearidade geométrica, mas deve-se considerar cuidadosamente a discretização e o incremento de carga a fim de garantir a convergência do sistema bem como a qualidade da solução.

A modelagem do contato entre o coluna de perfuração e as paredes do poço através de elementos de molas bilineares é bastante efetivo, mas uma análise de sensibilidade preliminar do valor das constantes elásticas na qualidade da solução é recomendada.

A análise estática da variação da magnitude da força centrífuga gerada pela rotação do comando desbalanceado, permitiu uma verificação preliminar da tendência de inclinação do poço.

Uma tendência clara de reduzir o ângulo de inclinação, aumentando a velocidade rotacional do BHA equipado com comando desbalanceado, foi observada. Esta tendência foi deduzida pela inspeção da magnitude da força de reação na broca.

6. RECONHECIMENTOS

O suporte financeiro para este trabalho foi concedido pela PETROBRAS e os recursos computacionais foram obtidos através do Departamento de Engenharia de Petróleo da UNICAMP.

REFERÊNCIAS

1971, Unique Drill Collar Limits Angle With High Bit Loads, World Oil, pp. 91-92.

- 1978, Unbalanced Drill Collar Increases Penetration Rates, *World Oil*, pp. 103-105.
- Bathe, K. J., 1982, *Finite Element Procedure in Engineering Analysis*, Prentice-Hall.
- Bradley, W. B., 1975, Factors Affecting the Control of Borehole Angle in Straight and Directional Wells, *Journal of Petroleum Technology*, pp. 679-688.
- Cook, R. D., D. S. Malkus and M. E. Plesha, 1989, *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*, John Wiley & Sons, 3rd ed., New York City.
- Costa, F. S. M., 1996, *Estudo do Comportamento Mecânico de Comandos Desbalanceados pelo Método de Elementos Finitos*, Tese de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil.
- Holden, J. T., 1972, On The Finite Deflections of Thin Beams, *Int. J. Solids Structures*, vol. 8, pp. 1051-1055.
- Huebner, K. H., E. A. Thornton, 1982, *The Finite Element Method for Engineers*, John Wiley & Sons, New York City.
- Mattiasson, K., 1981, Numerical Results From Large Deflection Beam and Frame Problems Analysed by Means of Elliptic Integrals, *Int. J. Num. Meth Eng.*, vol. 17, n^o 1, pp. 145-149.
- Millheim, K., S. Jordan and C. J. Ritter, 1978, Bottom-Hole Assembly Analysis Using the Finite-Element Method, *Journal of Petroleum Technology*, pp. 265-274.
- Przemieniecki, J. S., 1968, *Theory of Matrix Structural Analysis*, Mc-Graw Hill Book Company.
- Restum, M. J. L. and C. R. D. Derossi, 1994, Comando Desbalanceado: Uma Alternativa à Coluna Estabilizada, *IX Congresso Latinoamericano de Perforacion*, vol. 1, pp. 289-300.
- Timoshenko, S. P., J. M. Gere, 1961, *Theory of Elastic Stability*, McGraw-Hill.

FINITE ELEMENT MODELING OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF BOTTOM HOLE ASSEMBLIES

Abstract. This work treats the finite element modeling of the mechanical behavior of BHAs equipped with unbalanced drillcollars. The assembly was discretized in 2-D beam-column elements and the geometric non-linear problem was handled by Newton's method with an incremental loading scheme. The model was validated by some classical large displacement and small deformation beam problems as well as published data for the static behavior of stabilized drillcollars. The constraint imposed by the borehole walls was implemented by bilinear spring elements. The analysis of the variation of the magnitude of the reaction force at the bit, due to drillstring rotation, was performed by applying a body force to the BHA which was equivalent to the unbalanced force. This kind of approach allowed a simplified treatment of the dynamic behavior of the system in a static point of view. The effect of the unbalanced force in the reaction force at the bit was investigated and an effective tendency of reducing inclination of the wellbore was verified, with an increasing rotational speed of the drillstring.

Key Words: Finite, Element, Drilling, Wellbore, Petroleum