5
Perfuração Direcional

5.1
Introdução

O termo perfuração direcional é usado para referir-se à perfuração de poços não verticais. Em geral, as vibrações das colunas de perfuração causam falha prematura dos componentes do sistema de perfuração e ineficiência na taxa de penetração.

Em operação, as colunas podem apresentar diferentes tipos de vibrações: Vibração Axial (ou longitudinal), este tipo de vibração existe devido à interação da broca com a formação rochosa, e pode produzir o fenômeno conhecido como quicar de broca ou *bit-bounce*; Vibração Flexional (ou lateral), usualmente causada pelo desbalanceamento dos tubos de perfuração, gerando forças centrífugas que, por sua vez, causam a precessão direta/retrógrada da coluna ou *forward/backward whirl*; e por último, a Vibração Torsional, causada pela interação não linear broca-formação e coluna-parede do poço. Como conseqüência da vibração torsional se produz o fenômeno *stick-slip*. O *stick-slip* está caracterizado por paradas e acelerações alternadas da broca. Medições de campo, reportadas por Leine [39], revelam que a vibração *stick-slip* coexiste com a precessão. Em um trabalho anterior [60] foi demonstrado que as vibrações axiais e torsionais estão acopladas através das forças que atuam na broca.

Neste capítulo são apresentados resultados numéricos que descrevem o *stick-slip* e a precessão na forma mais elementar. O sistema é analisado usando a viga de Cosserat, desenvolvida nos capítulos precedentes, junto ao tradicional Método dos Elementos Finitos. Neste trabalho, não se pretende modelar completamente todas as forças que atuam sobre o sistema; o objetivo é mostrar que, usando uns poucos elementos de Cosserat, é possível obter o comportamento dinâmico do sistema.

5.2
Benefícios da Perfuração Direcional

Os poços direcionais são perfurados por vários motivos:

– Atingir reservorios que são de difícil, ou impossível, acesso verticalmente.

– Obter poços mais baratos, tendo mais pontos de extração em uma mesma região.

– Perfurar poços de alívio (*relief wells*) para despressurizar um poço que está sem controle (*Blow Out*).

Aproximadamente 20 anos atrás, os poços eram perfurados em ângulos de no máximo 60 graus; atualmente, a perfuração horizontal é muito freqüente. No entanto, uma perfuração afastada do ponto inicial é ainda um desafio e requer uma planificação cuidadosa. O recorde atual são poços que distam horizontalmente 10.000m do ponto inicial, com profundidades que vão de 1.600-2.600m. Os seguintes poços são os únicos perfurados desde terra firme até o leito submarino:

– *Wytch Farm*, na costa sul de Inglaterra, operado pela BP (*British Petroleum*),

– *Dieksand Land*, na costa norte da Alemanha, operado pela RWG AG, e mais recentemente,

– *Chayvo*, na costa leste de *Sakhalin Island*, ver Fig. 5.1, na Rússia, operado pela *ExxonMobil*.

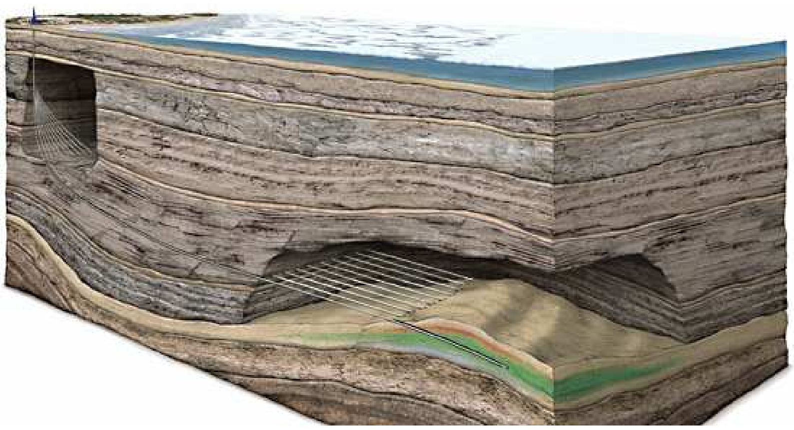

Figura 5.1: Chayvo, na costa leste de *Sakhalin Island*, Rússia.

5.3 Forças que Atuam sobre a Coluna de Perfuração

As forças que atuam na coluna de perfuração, quando está em operação são várias [47, 50]. Só para mencionar algumas: tração, compressão, momento fletor, torque, forças de atrito, forças dinâmicas, etc. Neste trabalho somente os dinâmicos como impacto, interação broca-formação e desbalanceamento são considerados. Além disso, o estudo está orientado a colunas de perfuração que usam brocas tri-cônicas.

Em geral, quando se perfura usando brocas com cones, uma estrutura tipo lobular é formada na formação rochosa. O número de lóbulos formado é igual ao número de cones da broca. Quando os cones rolam sobre a formação, um padrão do tipo crista-vale é continuamente formado e desintegrado; dito de outra forma, o padrão crista-vale gira a uma certa velocidade que depende da rigidez da rocha a ser destruída. Também, brocas cônicas rolando sobre a formação geram um movimento axial quase periódico da parte inferior da coluna. Como uma primeira aproximação, os deslocamentos axiais podem ser considerados como deslocamentos harmônicos.

Para a simulação numérica, considera-se que sobre a broca atuam uma força axial F_{bit}, denominada força sobre a broca, e um torque resistivo T_{bit}, denominado torque sobre a broca. Essas forças são descritas a seguir.

5.3.1 Modelo da Força sobre a Broca

Na coluna, supõe-se que exista uma força axial que atua sobre a broca. Essa força está formada por dois componentes: uma força estática e outra dinâmica. Usualmente, a força estática é chamada de peso sobre a broca ou *weight on bit* (WOB) e representa uma porcentagem, no caso de colunas verticais 80-85% do peso do comando [55]. Por outro lado, a força dinâmica é conseqüência do movimento axial da broca cônica. Supondo que são usadas brocas tri-cônicas, a expressão da força sobre a broca está definida como:

$$F_{bit} = WOB + F_0 \sin(3\phi_{zbit}) \tag{5-1}$$

nessa equação, ϕ_{zbit} é a rotação da broca e F_0 é a amplitude da força dinâmica. F_0 é uma porcentagem da força estática e usualmente varia entre 0 e 15% [55]. Conseqüentemente $0 \leq \frac{F_0}{WOB} \leq 0,15$.

5.3.2
Modelo do Torque sobre a Broca

Para o movimento torsional, um modelo de torque resistivo que atua sobre a broca é especificado, tal que possa descrever o movimento de *stick-slip* na sua forma mais elementar. O torque resistivo, usualmente conhecido como torque sobre a broca T_{bit}, representa a resistência da formação a ser destruída. Resultados experimentais obtidos por Wolf [13] mostram que durante o processo de perfuração existem torques negativos, que muitas vezes tendem a desenroscar os componentes da coluna.

Para a descrição do T_{bit}, usa-se o modelo proposto por Yigit et al. [43]. Esse modelo depende da força axial sobre a broca F_{bit} e da função de atrito $f(\dot{\phi}_{zbit})$. A função de atrito, extraída de Tucker et al. [31], representa a variação do atrito na interface broca-formação e é função da velocidade da broca $\dot{\phi}_{zbit}$:

$$T_{bit} = \mu_{bit} F_{bit} f(\dot{\phi}_{zbit}) \tag{5-2}$$

$$f(\dot{\phi}_{zbit}) = \tanh(\dot{\phi}_{zbit}) + \frac{\alpha_1 \dot{\phi}_{zbit}}{1 + \alpha_2 \dot{\phi}_{zbit}^2} \tag{5-3}$$

Nas equações acima, $(\dot{\ }) = \frac{\partial(\ )}{\partial t}$ representa a derivada em relação ao tempo e $\dot{\phi}_{zbit}$ é a velocidade angular da broca, as constantes α_1 e α_2 determinam a transição da região de atrito estático para o dinâmico [40]. A constante μ_{bit} é o fator de corte e depende do tipo de broca usado, por exemplo, $\mu_{bit} = 0,04$ para brocas cônicas [43]. A função contínua e não linear $f(\dot{\phi}_{zbit})$ é usada para representar a dependência do torque sobre a broca T_{bit} com a velocidade de rotação $\dot{\phi}_{zbit}$. Essa dependência é mostrada na Fig. 5.2 para diferentes valores de α_1 e α_2.

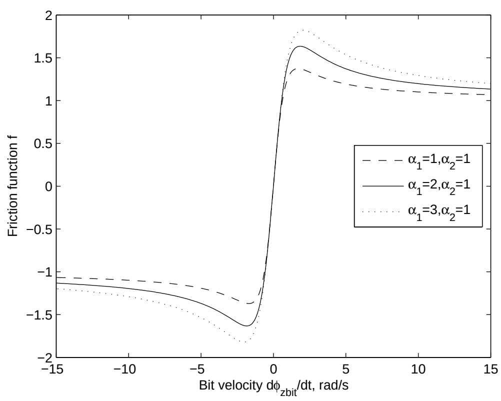

Figura 5.2: Função de atrito sobre T_{bit}.

5.4
Especificações da Coluna Direcional

Para a simulação numérica, considera-se uma coluna de perfuração direcional simplificada, mostrada na Fig. 5.3. A coluna está engastada na parte superior e, na parte inferior existem forças concentradas (F_{bit} e T_{bit}) que atuam na broca. Essa configuração foi projetada com a ajuda do Eng. João Carlos Ribeiro Plácido do CENPES-PETROBRAS, e é usada para mostrar a performance da viga de Cosserat.

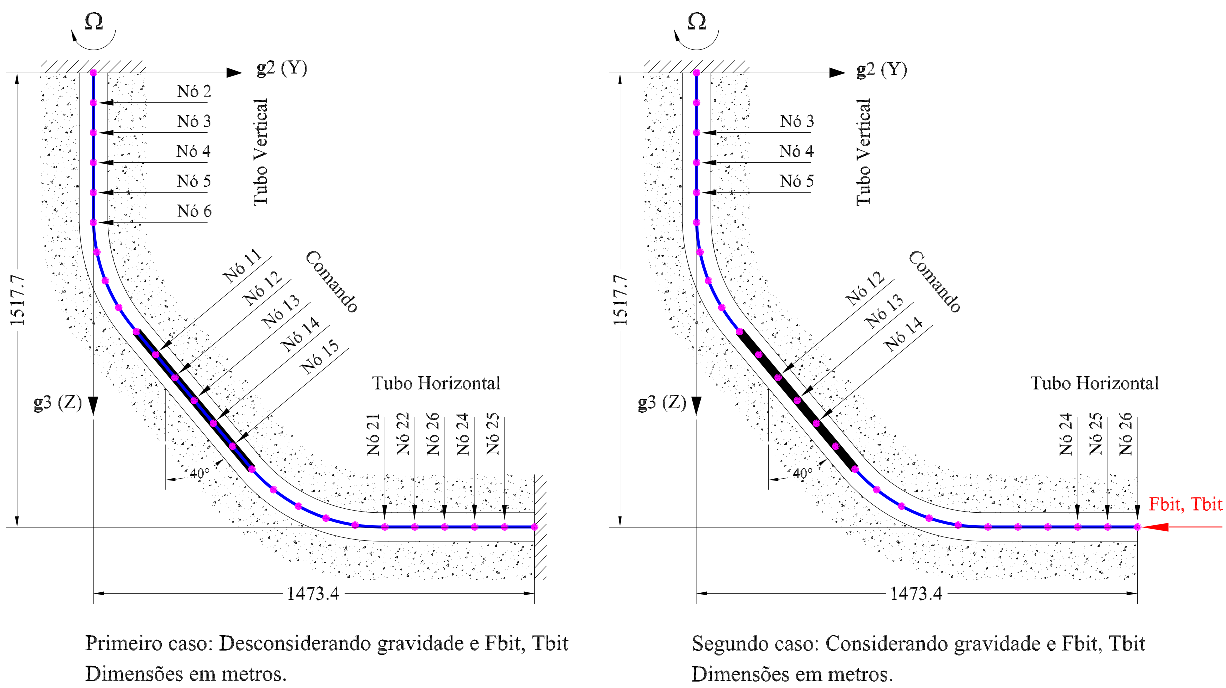

Figura 5.3: Coluna direcional simplificada.

A simulação numérica é realizada para uma coluna de comprimento total $L = 2500m$. A coluna, que é dividida em 25 elementos iguais, está girando a uma velocidade constante $\Omega = 50RPM$ $(5,236rad/s)$ e está contida em um poço de diâmetro uniforme $0,2168m$; o material da coluna e da parede do poço é aço. Outras propriedades mecânicas e geométricas do sistema são: A densidade e o módulo de Young do aço são assumidos como $\rho = 7850kg/m^3$ e $E = 2,1 \times 10^11N/m^2$, respectivamente. Para o impacto assume-se que $Kc = 1,0 \times 10^8 N/m$ e $Cc = 0,1Ns/m$, também, $\mu = \{0,1,\ 0,2\}$ são usados como coeficientes de atrito entre a coluna e a parede do poço.

Especificações do tubo de perfuração: $L_p = 1900m, D_o = 0,127m, D_i = 0,1084m$.

Especificações do comando: $L_c = 600m, D_o = 0,1714m, D_i = 0,0762m$. Sendo D_o e D_i os diâmetros externo e interno, respectivamente.

5.5 Simulações Numéricas

Nesta secção são realizadas simulações numéricas da resposta dinâmica do sistema não linear para duas condições de contorno da coluna de perfuração. No primeiro caso, assume-se que os extremos superior e inferior da coluna estão engastados, já no segundo caso, considera-se que o extremo inferior da coluna está sobre a ação das forças F_{bit} e T_{bit}. Nas simulações numéricas, considera-se que a coluna está girando a velocidade constante de $\Omega = 50rpm$ e existe uma excentricidade $e_0 = 0,01m$ uniforme ao longo da coluna. Também, o tamanho do passo escolhido para a simulação é considerado como $\Delta t = 0,001s$ e todas as condições iniciais são consideradas nulas. Por outro lado, quando as forças de gravidade são consideradas, elas são aplicadas gradativamente até chegar à configuração estática deformada; depois de atingida essa configuração, impõe-se uma aceleração constante até alcançar a velocidade de rotação da coluna preestabelecida. Finalmente, as forças que atuam na broca são aplicadas gradualmente. Essas etapas são melhor entendidas observando a Fig. 5.9. A estratégia de carregamento descrita acima é usada para representar realisticamente o processo de operação da coluna de perfuração.

5.5.1 Primeiro Caso: Ambos Extremos Engastados

Para esta primeira simulação não se considera o efeito da gravidade nem as forças sobre a broca. Isto ajudará à compreensão da resposta dinâmica do sistema. No entanto, existem forças geradas pelo desbalanceamento e forças de impacto.

As Figs. 5.4 e 5.5 mostram o registro temporal dos deslocamentos e rotações para diferentes nós. Nessas figuras é possível observar as freqüências internas devidas à não linearidade do sistema. Além disso, também observam-se freqüências da excitação externa. Outro fato a ser observado é a variação angular torsional para os diferentes nós. As curvas revelam que aqueles nós mais afastados dos engastes são os que sofrem maior variação angular, p. ex., a máxima variação angular do nó 22, Fig. 5.5, está em torno de $\Phi_y(t) \approx 1,4rad$ [80°].

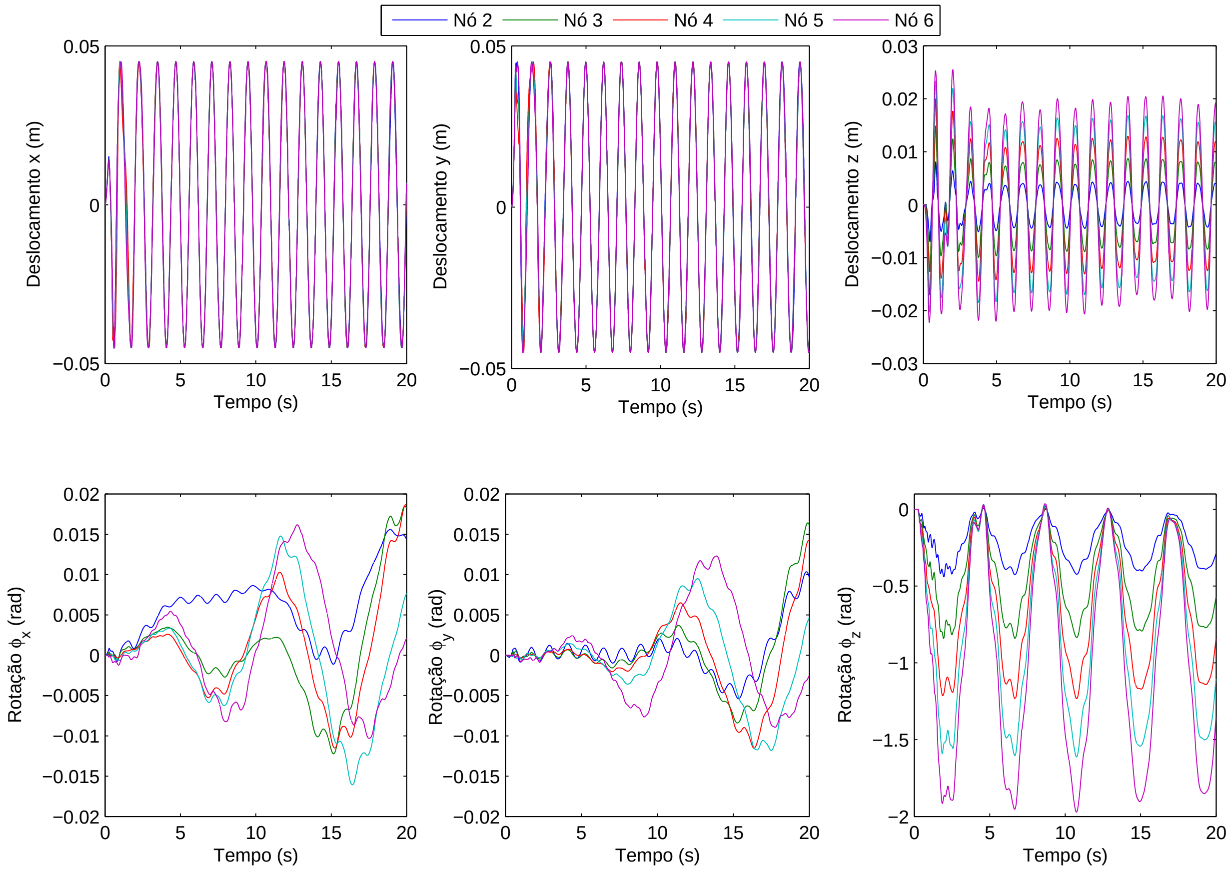

Figura 5.4: Deslocamentos e rotações para $\mu = 0,1$.

Uma outra forma de mostrar os resultados, ainda mais interessante e fácil de interpretar, é através das órbitas da secção transversal, como aquelas da Fig. 5.6. Nessas figuras estão mostradas as órbitas dos nós do tubo vertical, do comando e do tubo horizontal (Ver Fig. 5.3). A órbita do comando foi obtida projetando os deslocamentos no plano da secção transversal, ou seja: $Proj = Y \sin(40°) - Z \cos(40°)$. Os resultados mostrados são coerentes, porque as órbitas dos nós não podem ultrapassar a parede do poço. O deslocamento máximo dos nós do tubo é limitado pela folga $\delta_{tubo} = \frac{\varnothing_{poco} - \varnothing_{tubo}}{2} = 0,0449m$ e para os nós do comando através da folga $\delta_{comando} = \frac{\varnothing_{poco} - \varnothing_{comando}}{2} = 0,0227m$; esses resultados podem ser conferidos observando as órbitas da Fig. 5.6. Outra característica a ser observada é o sentido de rotação dos nós nas órbitas: depois de um período intermitente de impactos, o tubo (comando) atinge a parede do poço e todos os nós do tubo (comando) giram na mesma direção, ou seja, os nós realizam precessão direta.

Outro resultado importante da modelagem são as forças de impacto normal. As forças que resultam da interação da coluna com a parede do

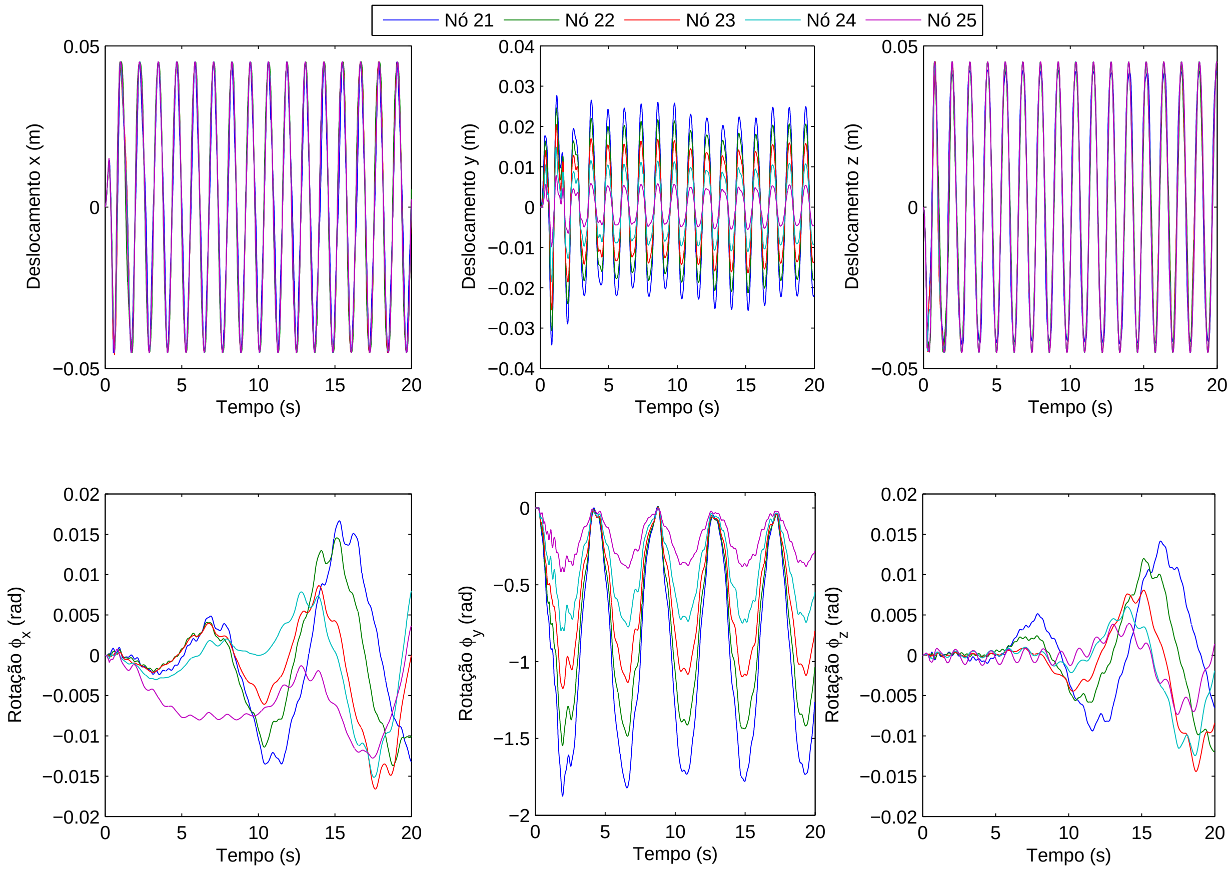

Figura 5.5: Deslocamentos e rotações para $\mu = 0,1$.

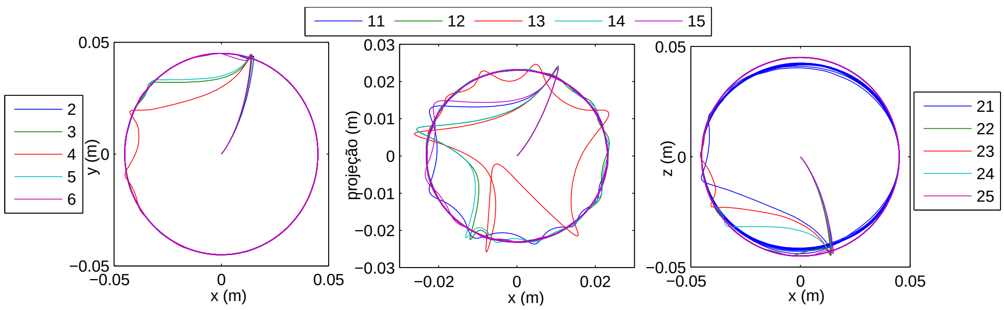

Figura 5.6: Órbitas de vários nós (Fig. 5.3-esquerda) quando $\mu = 0,1$.

poço podem ser observadas na Fig. 5.7. Nessas curvas exprimem-se as forças normais para o tubo e para o comando, sendo que a intensidade das forças no comando são maiores que no tubo. Quando a coluna encosta na parede do poço, observa-se que o valor médio das forças no tubo e no comando são $\approx 1,5 \times 10^4 N$ e $\approx 5 \times 10^4 N$, respectivamente. Nas curvas também é possível notar que as forças variam harmonicamente segundo a velocidade de rotaçao da coluna.

Todos os resultados mostrados acima foram obtidos usando os

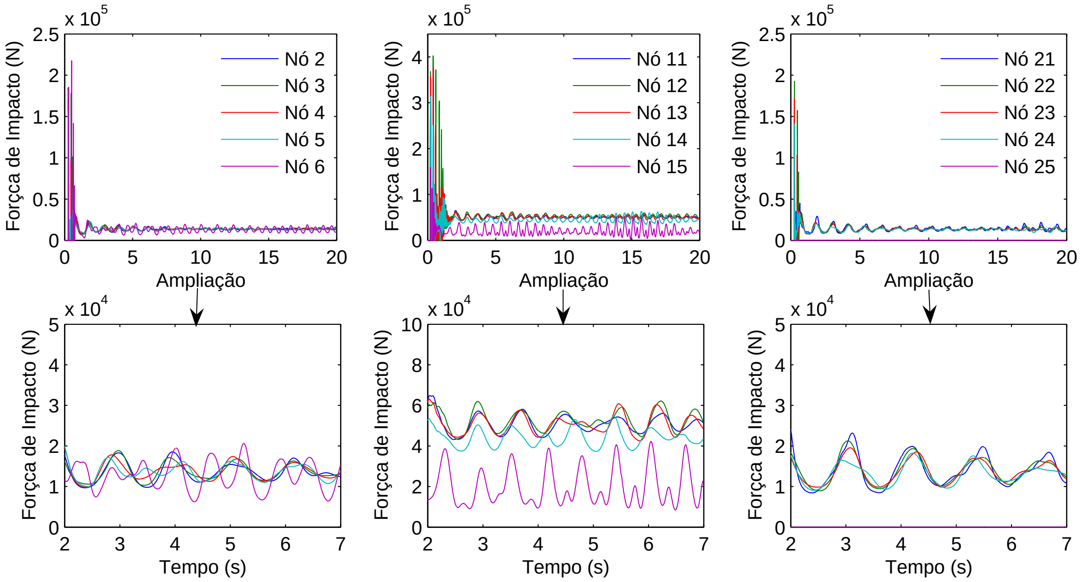

Figura 5.7: Forças de impacto para $\mu = 0.1$

parâmetros indicados anteriormente e usando um coeficiente de atrito baixo $\mu = 0,1$. Mas, será que aumentando esse valor para $\mu = 0,2$ a dinâmica do sistema sofrerá alterações drásticas?. Essa questão é respondida observando as órbitas do tubo e do comando, mostradas na Fig. 5.8. Essas órbitas mostram que o nó 13 do comando, depois do período de impactos, realiza precessão retrógrada e os outros nós precessão direta. A condição de precessão retrógrada é uma situação de instabilidade física e infelizmente o programa desenvolvido não consegue acompanhar o movimento posterior ao início da precessão retrógrada. Como conseqüência dessa falha, a órbita do nó 13 transfere-se, progressivamente, fora do limite da parede do poço, onde já não faz sentido continuar com a integração temporal. A precessão retrógrada é conseqüência do elevado valor do coeficiente de atrito, que tende a mudar o sentido da rotação da coluna. Esse tipo de comportamento de precessão direta/retrógrada é comum em problemas de dinâmica de rotores interagindo com o estator, p. ex., no trabalho de Liebich [35] podem-se encontrar resultados de precessão retrógrada que caem fora da órbita permissível. Vale ressaltar que os resultados numéricos obtidos da simulação foram apresentados no ECCM-2006 [68].

5.5.2
Segundo Caso: Um Extremo Engastado e o Outro Excitado por Forças

Uma coluna de perfuração real está atuada por varios tipos de forças e, nesta secção, são levadas em conta as forças sobre a broca e o peso próprio

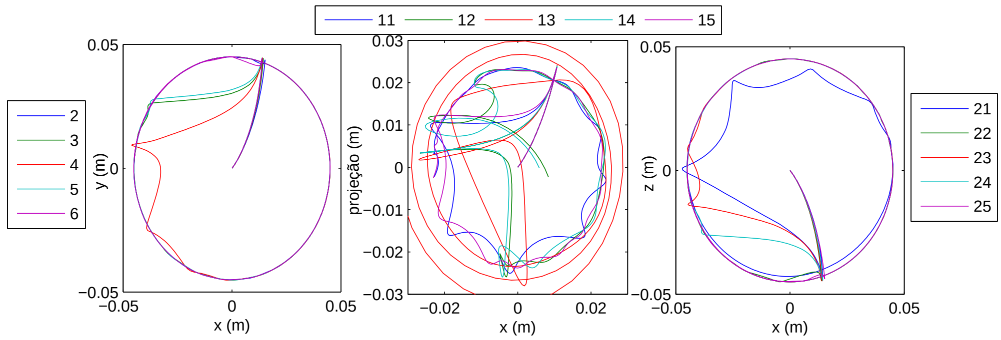

Figura 5.8: Órbitas de vários nós (Fig. 5.3-esquerda) quando $\mu = 0,2$.

da coluna; as forças que agem na broca são o F_{bit} e T_{bit}, discutidas anteriormente. Para as simulações numéricas, adotam-se os seguintes valores: $\mu = 0,1$ para o coeficiente de atrito, $WOB = 1000N$ para o peso sobre a broca e $F_0 = 0,1WOB$ (ver Eq. 5-1), $\mu_{bit} = 0,04$, $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ para os parâmetros do torque sobre a broca (ver Eq. 5-2). Para que a simulação numérica represente uma operação real do processo de perfuração, os carregamentos na coluna, Fig. 5.9, são aplicados gradativamente.

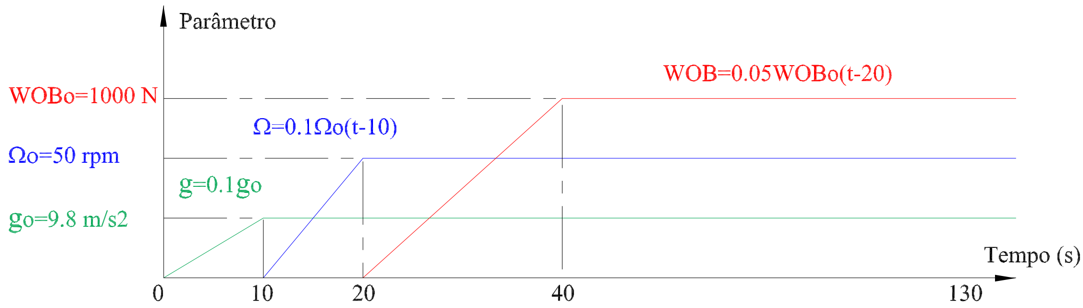

Figura 5.9: Carregamento gradativo sobre o sistema.

Da simulação numérica realizada para um período de 130s, obtêm-se vários resultados, entre eles: deslocamentos e rotações, órbitas e forças de impacto para diferentes seções da coluna.

Os registros temporais dos deslocamentos e rotações, referidos ao sistema de coordenadas inercial X, Y, Z, para diferentes seções da coluna de perfuração, são mostrados nas Figs. 5.10 e 5.11. Dessas figuras, percebe-se que o valor de equilíbrio de deslocamento do nó 5 é $Z(t) \approx 0,5m$ e do nó 26 é $Y(t) \approx 0,95m$. É necessario notar que os nós alinhados com a direção Y, nós 24, 25 e 26 da Fig. 5.3, possuem o mesmo deslocamento $Y(t)$ na Fig. 5.11. Isso é porque a força de gravidade não possui componentes na direção Y e o deslocamento devido ao WOB parece ser mínimo.

Por outro lado, devido ao torque resistivo imposto pela força de atrito entre a coluna e a parede do poço, existe uma forte variação do ângulo de torção $\Phi_y(t)$ do nó 26 em torno do valor de equilíbrio $\Phi_y(t) \approx -0,08rad$, Fig. 5.11. Se compararmos as variações angulares $\Phi_y(t)$ e $\Phi_z(t)$ dos diferentes nós, o efeito do T_{bit} pode ser observado no nó 26, o qual reconhece-se pela vibração de alta freqüência que acompanha a $\Phi_y(t)$ e $\Phi_z(t)$.

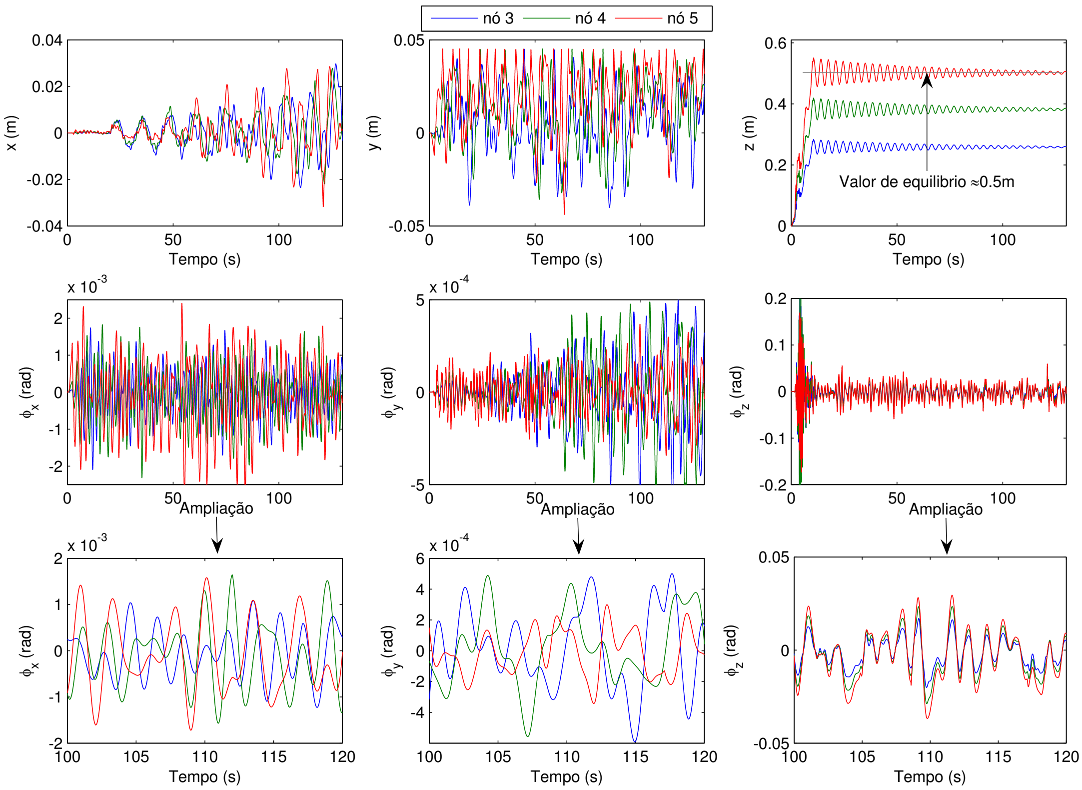

Figura 5.10: Deslocamentos e Rotações (Fig. 5.3-direita) quando $\mu = 0,1$.

A interpretação dos deslocamentos $X(t), Y(t)$ da Fig. 5.10 e $X(t), Z(t)$ da Fig. 5.11 é melhor realizada observando as órbitas da Fig. 5.12.

As órbitas mostram que a posição inicial da coluna é o centro geométrico do poço. Quando a força de gravidade começa a atuar, a coluna cai até atingir a parede do poço; os primeiros nós que chocam contra a parede são do comando, sucedidos pelos nós do tubo horizontal e depois aqueles do tubo vertical. Essa sucessão dos impactos pode ser observada na Fig. 5.13.

Observando as órbitas do comando e do tubo horizontal, percebe-se que posteriormente ao período de impactos, o comando e tubo horizontal ficam encostados na parede do poço e, mesmo impondo uma rotação Ω à coluna, eles continuam nessa posição. Esse tipo de comportamento só pode ser característico para colunas curvas. Por outro lado, o mesmo

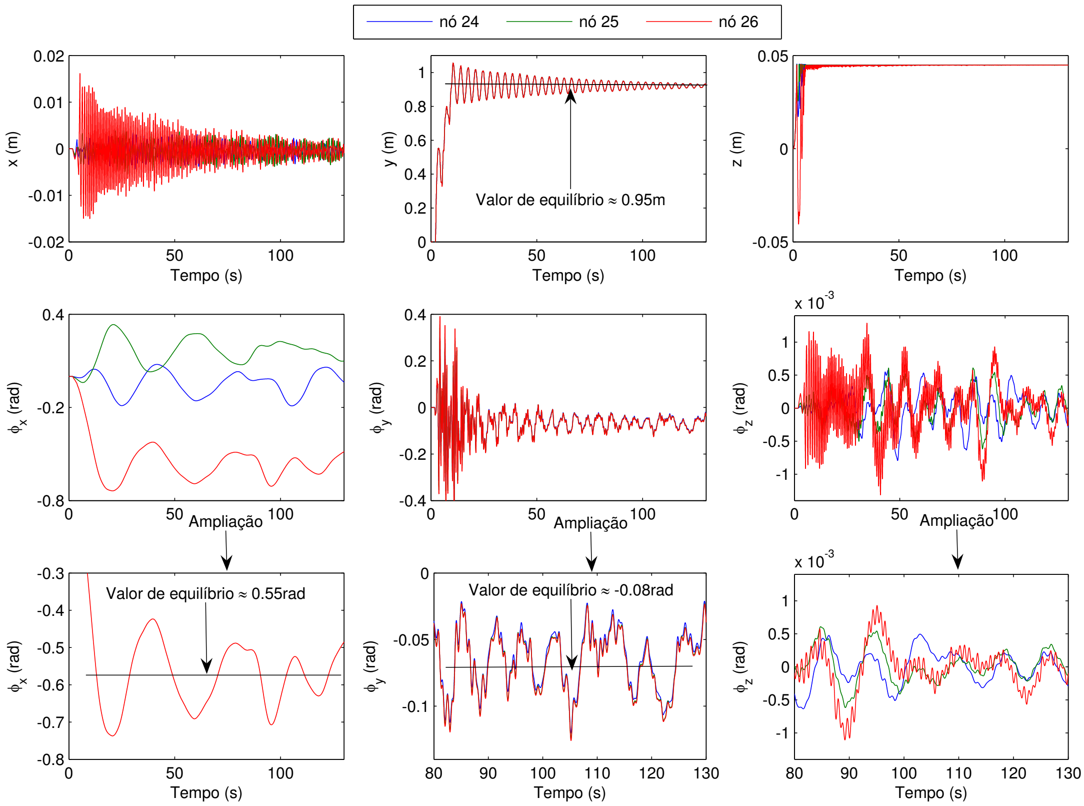

Figura 5.11: Deslocamentos e Rotações (Fig. 5.3-direita) quando $\mu = 0,1$.

não ocorre para o tubo vertical, nas órbitas observa-se que ele impacta continuamente. Outros parâmetros importantes do sistema analisado são as forças de impacto normais. Essas forças, entre a coluna e a parede do poço, são mostradas na Fig. 5.13. A duração do impacto é aproximadamente $\approx 0,03$s, esse tempo depende principalmente dos parâmetros de contato e a forma parabólica [41] é característica quando se emprega $Cc < 1$. A título de exemplo, o valor da força de impacto do nó 26 é da ordem $F_n(t) \approx 1000N$.

Finalizando, as equações do movimento do sistema estão totalmente acopladas pelos termos não lineares. Como consequência disso, os resultados numéricos mostram freqüências internas introduzidas pelas não linearidades. As respostas também mostram freqüências externas ($n \times \Omega,\ n = 1, \cdots$) porque a excitação externa é periódica (forças de desbalanceamento).

5.5.3
Comentários Gerais

O exemplo apresentado acima é um sistema de muita importância na área de perfuração. Os resultados obtidos de forças, deslocamentos e órbitas possuem um sentido lógico. Infelizmente, não existe nenhuma bibliografia que faça referência ao estudo dinâmico desse tipo de sistema, especialmente

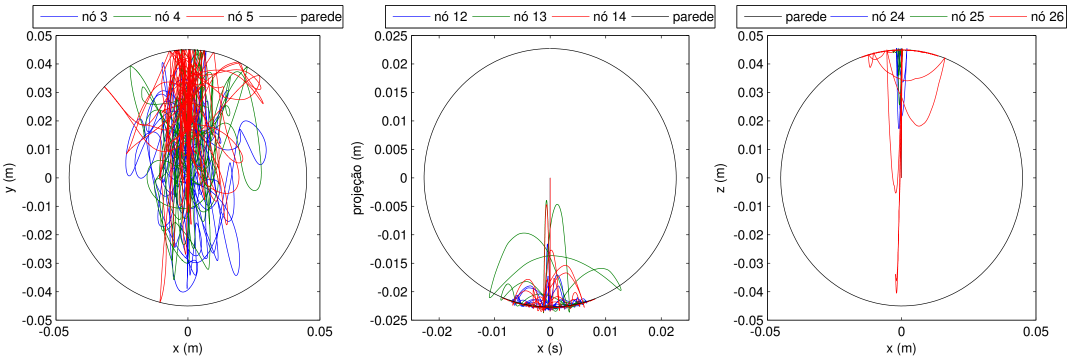

Figura 5.12: Órbitas para os tubos e o comando.

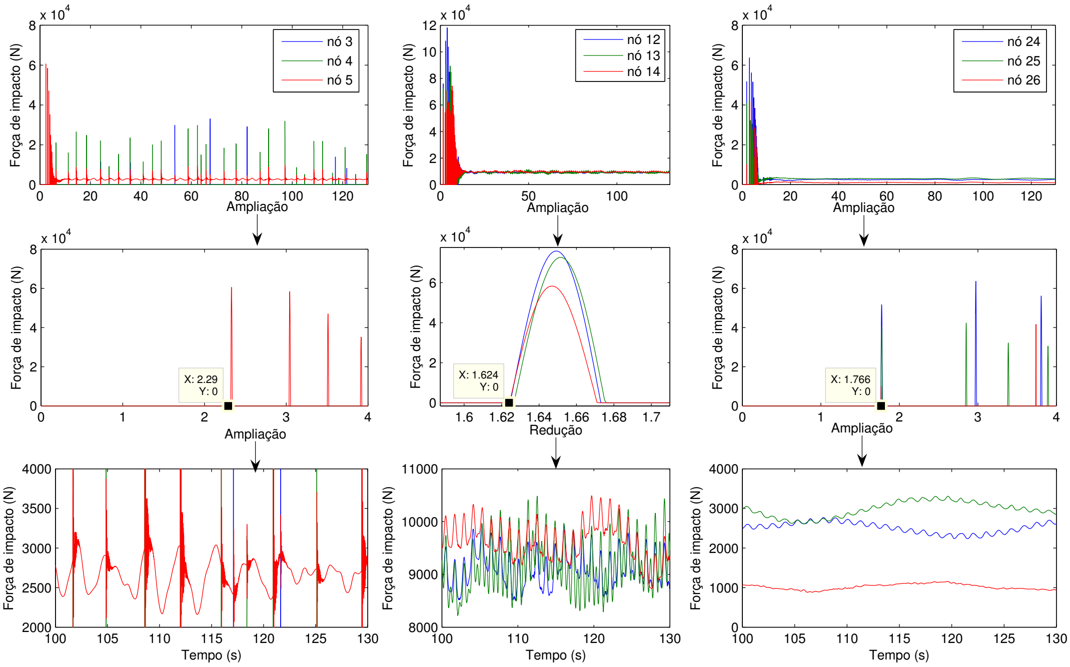

Figura 5.13: Forças de impacto nos tubos e no comando.

relacionado às forças que atuam na broca. No entanto, espera-se que as informações de força e torque na broca, a serem obtidos de uma bancada experimental montada na CSIRO-Austrália pelo Dr. L. F. Penna Franca, sirvam como dados de entrada para o sistema e que, aliados à teoria de Cosserat desenvolvida neste trabalho, serão valiosas para uma simulação mais próxima à realidade.