

2

MODELAGEM DA DINÂMICA AXIAL DA COLUNA DE PERFURAÇÃO

Este capítulo concentra-se na modelagem da coluna de perfuração, mais especificamente, na modelagem da dinâmica axial da coluna. Ao desconsiderar os efeitos de acoplamento, é possível estudar cada forma de vibrar da coluna de perfuração de modo individual.

O modelo utilizado neste estudo é bastante conhecido, sendo formulado por Dareing (1968) [8]. Como vantagens, este modelo apresenta uma solução analítica e reproduz, satisfatoriamente, os resultados experimentais. Entretanto, de forma a tornar o modelo mais condizente com a realidade enfrentada nos dias de hoje, utilizam-se dados de campo atuais. Não é intuito deste capítulo agregar algo novo, mas reproduzir um modelo já conhecido de forma a melhor entender a dinâmica da coluna de perfuração. Esta modelagem será importante para determinar as características da coluna de perfuração (por exemplo: frequências naturais). Estes resultados serão levados em conta na modelagem do dispositivo de vibroimpacto, bem como na concepção e montagem da bancada experimental.

Outro ponto discutido neste capítulo será a forma como as vibrações axiais surgem durante o processo de perfuração, focando, basicamente, a justificativa do surgimento da formação de lóbulos em rochas duras, através de uma revisão bibliográfica do assunto.

2.1

Introdução

Historicamente, um dos grandes causadores de falhas nas colunas de perfuração é a vibração severa (vibrações próximas à frequências de ressonância da coluna). Estas vibrações acentuadas em perfuração de poços de petróleo e gás podem reduzir a taxa de penetração e causar o desmoronamento de trechos da parede do poço. Além disso, estas vibrações podem provocar a falha prematura da broca e de outros componentes que

formam a coluna de perfuração, falhas estas que ocorrem especialmente por fadiga nas conexões dos comandos. Em casos extremos, quando não detectadas a tempo, as vibrações podem acarretar o rompimento de componentes e, quando não for possível retirar as partes do equipamento que ficaram no furo (técnica de pescaria), o poço pode ser perdido. Portanto, torna-se fundamental conhecer em detalhe o comportamento dinâmico da coluna de perfuração, a fim de prevenir tais ocorrências.

As vibrações na coluna de perfuração resultam da combinação de três formas distintas: axial ou longitudinal, torcional e lateral, também chamada de transversal ou flexional. Quando as vibrações se tornam severas (ressonância), surgem disfunções que podem conduzir rapidamente à falha prematura do equipamento [12].

A vibração axial, especialmente próxima à broca, afeta o controle direcional do furo e é o provável responsável pela formação de perfis na rocha no fundo do poço, perfis tais que produzem forçamentos periódicos na broca nas direções axial e torcional [10]. Este assunto será abordado em detalhe mais à frente.

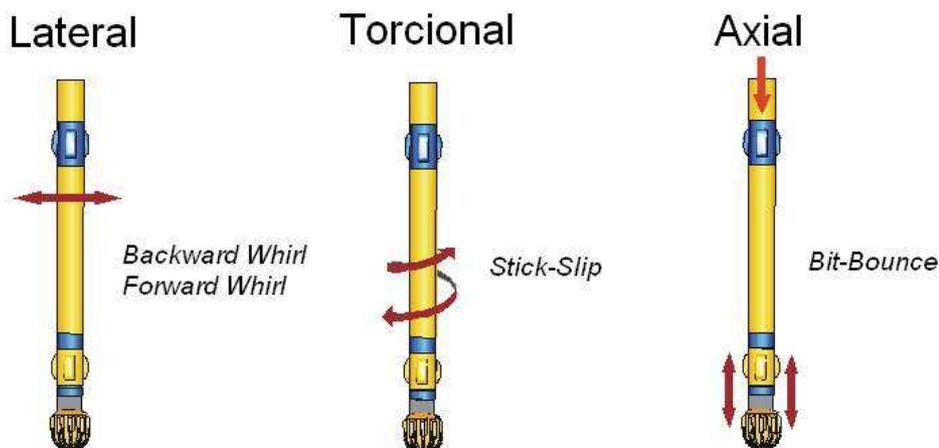


Figura 2.1: Tipos de vibração em uma coluna de perfuração [13].

As vibrações axiais podem dificultar a perfuração, causar dano à broca e ao BHA e diminuir a ROP. A grande causadora da vibração axial é a força gerada na **interação** broca/rocha. Essa excitação depende do tipo de broca e formação rochosa que se pretende perfurar. No caso de brocas tricônicas, a vibração gerada pelo rolamento dos cones da broca resulta em um movimento axial suave do BHA, com frequência dominante igual a três vezes a frequência de rotação da coluna [5]. Quando esta frequência de excitação é igual a uma das frequências (axial) naturais da coluna, o sistema entra em ressonância e a broca pode perder contato com a formação rochosa.

Vibrações axiais excessivas e não controladas causam o fenômeno de “quicar da broca” (*bit bounce*), causando a destruição da broca, falha dos componentes mecânicos do BHA e a diminuição da taxa de penetração.

2.2

Dinâmica (Axial) da Coluna de Perfuração

Para a determinação das frequências naturais da coluna, foi utilizada a modelagem realizada por Dareing (1968) [8], que se vale de uma abordagem contínua da dinâmica da coluna. Suas vantagens são: considera os efeitos de massa e rigidez dos equipamentos de superfície (cabos de içamento, *kelly*, *swivel* e bloco de içamento) e diferenciar o comportamento dinâmico do BHA (comandos) dos tubos de perfuração.

O deslocamento axial estará representado pela variável $u = u(x, t)$. A figura (2.2) mostra a coluna de perfuração a ser modelada. Considera-se um longo trecho formado de tubos de perfuração e um trecho curto formado pelos comandos (BHA).

Nesta modelagem, u_{BHA} representa o deslocamento axial na seção do BHA e u_{TP} representa o deslocamento na seção dos tubos de perfuração.

2.2.1

Equação de Movimento

Para um elemento diferencial, a equação do movimento axial resulta da seguinte equação diferencial parcial:

$$AE \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \gamma \frac{\partial u}{\partial t} + \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \rho g \quad (2-1)$$

sendo esta equação válida tanto para o BHA (\llbracket_{BHA}), quanto para os tubos de perfuração (\llbracket_{TP}). A interação do fluido de perfuração com a coluna está representado através do coeficiente de amortecimento viscoso γ . Certamente, o coeficiente de amortecimento é dependente da frequência de oscilação da coluna, em outras palavras, o fluxo de fluido de perfuração é influenciado pelas oscilações da coluna [8] [13]. Entretanto, para fins deste trabalho será considerado coeficiente de amortecimento viscoso constante.

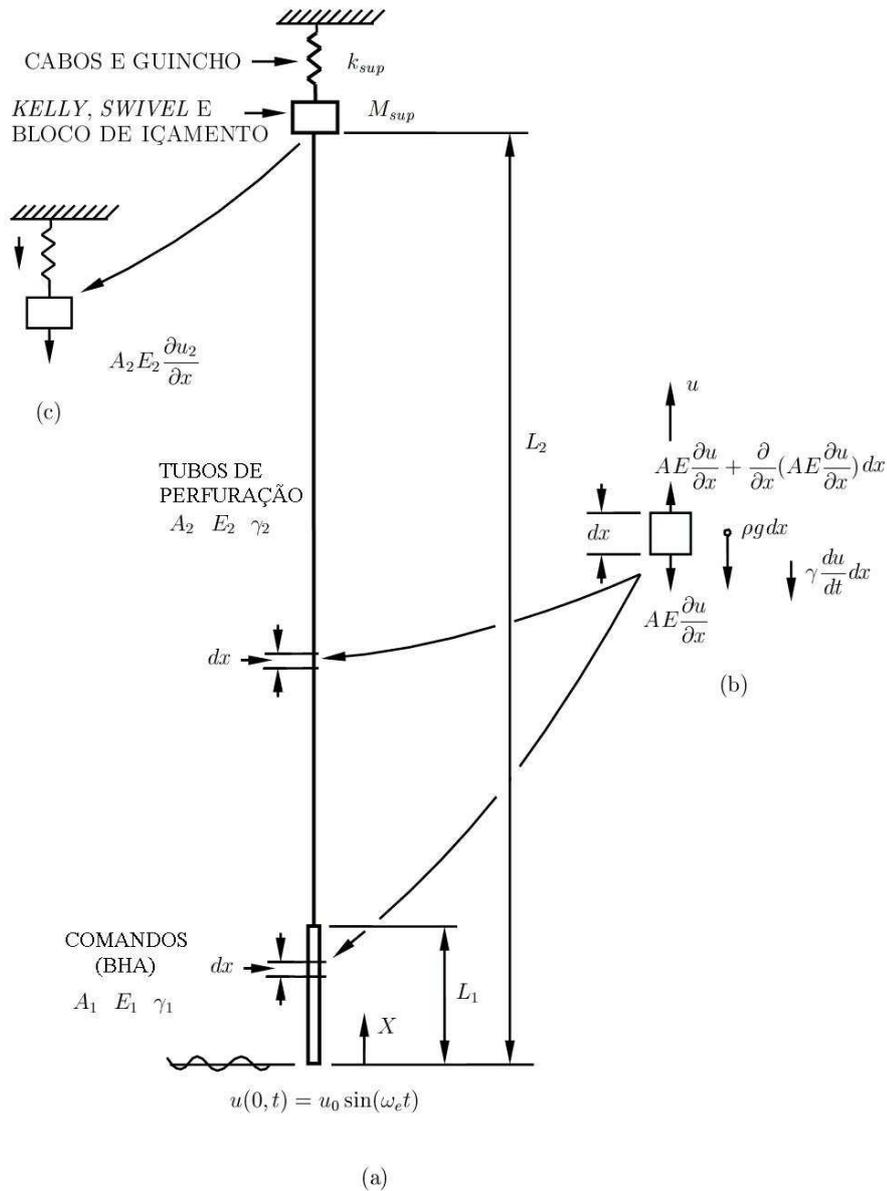


Figura 2.2: Desenho esquemático da coluna de perfuração [8].

2.2.2

Condições de Contorno

A primeira condição de contorno a ser considerada é a de que, no topo da coluna ($u_{TP}(L_2, t)$), o somatório das forças é nulo. Estas forças são basicamente as forças de inércia e rigidez dos equipamentos de superfície, pois, nesta modelagem, não está sendo considerado o efeito de amortecimento destes equipamentos. Esta condição é mostrada na figura

(2.2-c).

$$A_{TP}E_{TP}\frac{\partial u_{TP}(L_{TP},t)}{\partial x} + k_{sup}u_{TP}(L_{TP},t) + M_{sup}\frac{\partial^2 u_{TP}(L_{TP},t)}{\partial t^2} = 0 \quad (2-2)$$

Uma vez que os tubos de perfuração e o BHA são conectados de forma rígida, deve-se observar que os pontos de junção compartilham de mesmo deslocamento e força:

$$u_{BHA}(L_{BHA},t) = u_{TP}(L_{BHA},t) \quad (2-3)$$

$$E_{BHA}A_{BHA}\frac{\partial u_{BHA}(L_{BHA},t)}{\partial x} = E_{TP}A_{TP}\frac{\partial u_{TP}(L_{BHA},t)}{\partial x} \quad (2-4)$$

2.2.3

Interação broca/rocha

Forças longitudinais e carregamentos torcionais variantes no tempo podem ser aplicados aos comandos a partir de diversas formas, tais como: flutuações na pressão do fluido de perfuração, atrito da coluna com a parede do furo e interação da broca com a formação rochosa [7] [10]. Maior estudo destes fenômenos são necessários de forma a identificar sob quais condições de operação cada um se torna dominante. Além disso, os diversos tipos de brocas (cônicas, PDC, etc.) podem gerar diferentes condições de carregamento na parte inferior dos comandos.

Quando se utiliza brocas tricônicas ao perfurar rochas duras, normalmente são observadas freqüências de forçamento axial na coluna de perfuração de três vezes a rotação da broca [10]. Isto se deve ao fato de que, durante o processo de corte, é gerada uma superfície característica no fundo do poço, composta por lóbulos. O número de lóbulos é definido por um múltiplo do número de cones da broca, conforme é mostrado na figura (2.3). Entretanto, a formação de lóbulos no fundo do poço é mais aparente na perfuração de rochas duras e, nem sempre, ocorre em todas as condições de perfuração [9]. Este fenômeno vem sendo observado através de medições em campo há, pelo menos, 35 anos [9] [7].

Segundo Dareing (1984) [10], os lóbulos formados no fundo do poço são moldados por forças longitudinais, causados, provavelmente, por uma

ressonância axial da coluna. De uma forma geral, por mais de 30 anos, a formação de lóbulos é assumida como causa primária e a principal fonte excitadora das vibrações longitudinais em colunas de perfuração.

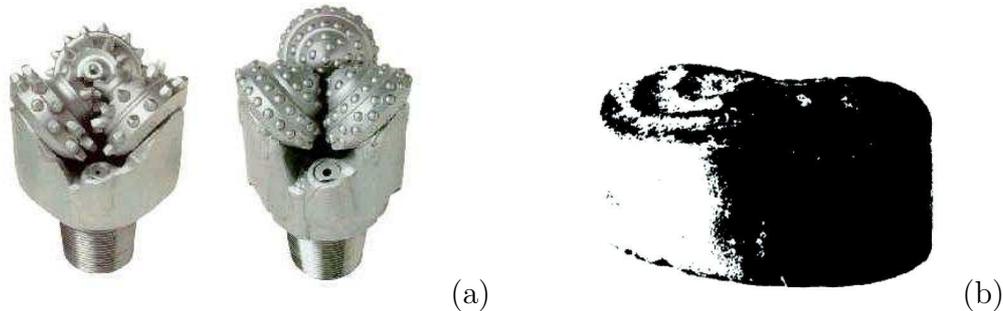


Figura 2.3: a) Broca tricônica (site geocities.yahoo.com.br/perfuracao); b) formação de três lóbulos no fundo de rochas duras, causados pelo processo de perfuração com broca tricônica [10].

Durante o processo de perfuração, esses lóbulos são destruídos e regenerados a cada trilha circular formada. O deslocamento axial da broca (ou a distância vertical entre um pico e um vale do lóbulo) varia de 6 a 13 mm [10].

Um dos primeiros trabalhos a detectar tal fenomenologia experimentalmente é o trabalho de Cunningham (1968) [7], onde a parcela dinâmica do peso sobre a broca (WOB) varia de 2.000 lb a extremos de 140.000 lb. Neste artigo, é também observado, através de medições em campo, o efeito de “quicar” (*bit-bounce*) da broca, isto é, quando o peso sobre a broca é nulo. O autor associa o fenômeno de flutuação do peso sobre a broca a dois fatores: a interação broca/rocha (uso de brocas tricônicas em rochas duras) e a variação da pressão do fluido de perfuração, responsável por retirar os detritos de rocha gerados pelo processo de corte bem como lubrificar a broca.

Desta maneira, a broca, além de funcionar como um mecanismo de destruição da rocha, é também uma fonte de excitação dinâmica.

Uma vez justificada a origem das vibrações axiais na interação broca/rocha, consideraremos, para efeitos de modelagem, que o deslocamento da ponta da broca ($u(0, t)$) é prescrito, isto é:

$$u_{BHA}(0, t) = u_0 \sin(\omega_e t) \quad (2-5)$$

onde

$$\omega_e = 2\pi f_e = 2\pi \frac{3N}{60} \quad (2-6)$$

sendo N a velocidade de rotação da coluna de perfuração (em rpm).

2.3 Solução Analítica e Simulação Numérica

A solução analítica da equação (2-1) é dada por:

$$u_{BHA}(x, t) = Re [B_1 \sin(\eta_1 x + b_1) e^{i\omega_e t}], \quad 0 \leq x \leq L_{BHA} \quad (2-7)$$

$$u_{TP}(x, t) = Re [B_2 \sin(\eta_2 x + b_2) e^{i\omega_e t}], \quad L_{BHA} \leq x \leq L_{TP} \quad (2-8)$$

onde

$$\eta_1 = \sqrt{\frac{1}{E_{BHA} A_{BHA}} (\rho_{BHA} \omega_e^2 - \gamma_{BHA} \omega_e i)}$$

$$\eta_2 = \sqrt{\frac{1}{E_{TP} A_{TP}} (\rho_{TP} \omega_e^2 - \gamma_{TP} \omega_e i)}$$

e B_1 , B_2 , b_1 e b_2 são constantes complexas determinadas a partir das condições de contorno:

$$B_1 = -\frac{i u_0}{\sin(b_1)}$$

$$B_2 = \frac{-i u_0 \sin(\eta_1 L_{BHA} + b_1)}{\sin(b_1) \sin(\eta_2 L_{BHA} + b_2)}$$

$$b_1 = \arctan \left[\frac{A_{BHA} E_{BHA} \eta_1}{A_{TP} E_{TP} \eta_2} \tan(\eta_2 L_1 + b_2) \right] - \eta_1 L_{BHA}$$

$$b_2 = \arctan \left(\frac{E_{TP} A_{TP} \eta_2}{M_{sup} \omega_e^2 - k_{sup}} \right) - \eta_2 L_{TP}$$

Para a simulação numérica, os parâmetros do problema foram extraídos dos trabalhos de Dareing [8] e Franca [13], sendo mostrados a seguir.

Tabela 2.1: Parâmetros da simulação numérica.

Equipamentos de Superfície			
Inércia	M_{sup}	24000	kg
Rigidez	k_{sup}	10^7	N/m
Comandos (BHA)			
Comprimento	L_{BHA}	150	m
Área	A_{BHA}	$18.525 \cdot 10^{-3}$	m^2
Coef. de Amortecimento	γ_{BHA}	5	Ns/m^2
Módulo de Elasticidade	E_{BHA}	210	GPa
Densidade	ρ_{BHA}	$7.8 \cdot 10^3$	kg/m^3
Drill Pipe			
Comprimento	L_{TP}	1500	m
Área	A_{TP}	$3.405 \cdot 10^{-3}$	m^2
Coef. de Amortecimento	γ_{TP}	20	Ns/m^2
Módulo de Elasticidade	E_{TP}	210	GPa
Densidade	ρ_{TP}	$7.8 \cdot 10^3$	kg/m^3
Excitação			
Amplitude	u_0	$6.1 \cdot 10^{-3}$	m

O gráfico da resposta em frequência para o BHA e para os tubos de perfuração são apresentados a seguir. Nestes casos, são adotados elementos localizados no ponto médio de cada sistema (tubos de perfuração e comandos), isto é, $x_{BHA} = L_{BHA}/2$ e $x_{TP} = (L_{TP} - L_{BHA})/2$.

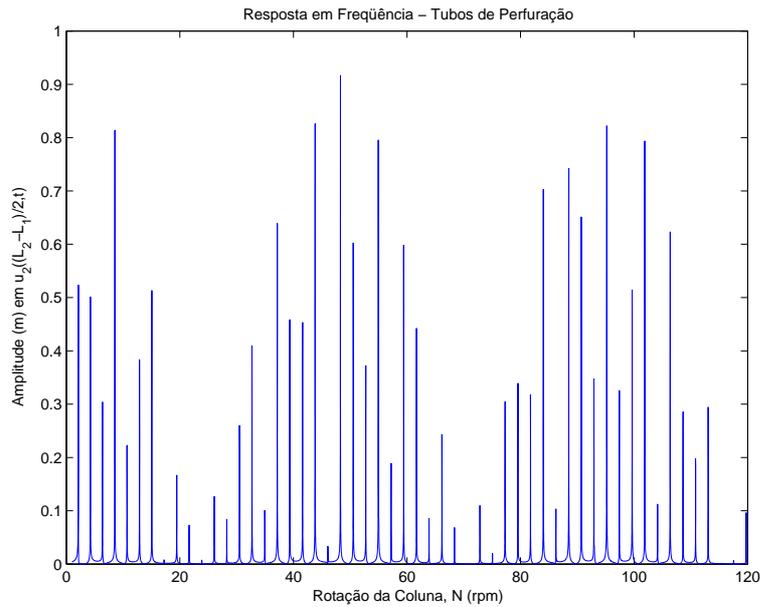


Figura 2.4: Espectro de amplitude dos tubos de perfuração no domínio da frequência (em $u_{TP}((L_{TP} - L_{BHA})/2)$).

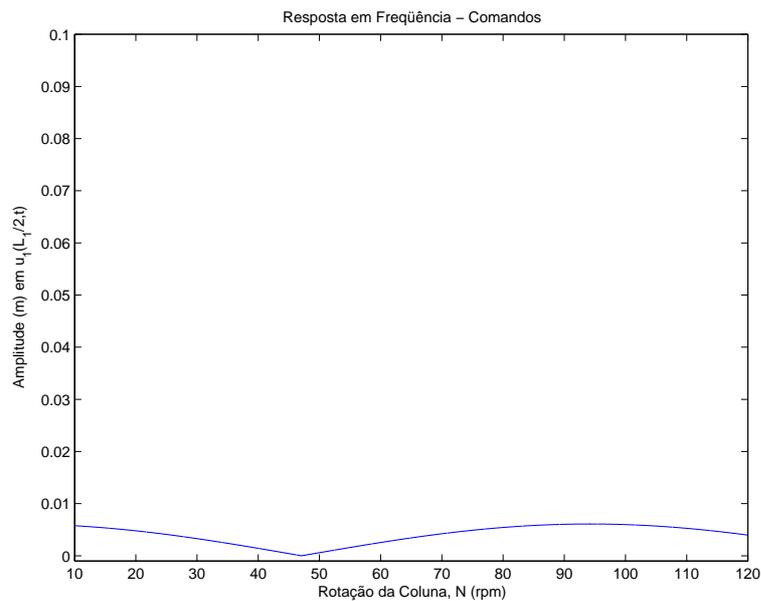


Figura 2.5: Espectro de amplitude dos comandos no domínio da frequência (em $u_{BHA}(L_{BHA}/2)$).

A partir dos gráficos apresentados nas figuras (2.4) e (2.5), é possível observar que os elementos da coluna de perfuração responsáveis pela vibração axial da coluna no espectro de velocidades de rotação da mesa são os tubos de perfuração (*Drill Pipes*), enquanto o BHA aparenta somente acompanhar o movimento axial gerado pelo conjunto broca/rocha.

Este mesmo efeito pode ser constatado se plotarmos o gráfico deslocamento *versus* tempo para cada sistema. Adotando como exemplo uma rotação da coluna de perfuração coincidente com uma das frequências de ressonância (p. ex.: 48.31 rpm), teremos as seguintes respostas:

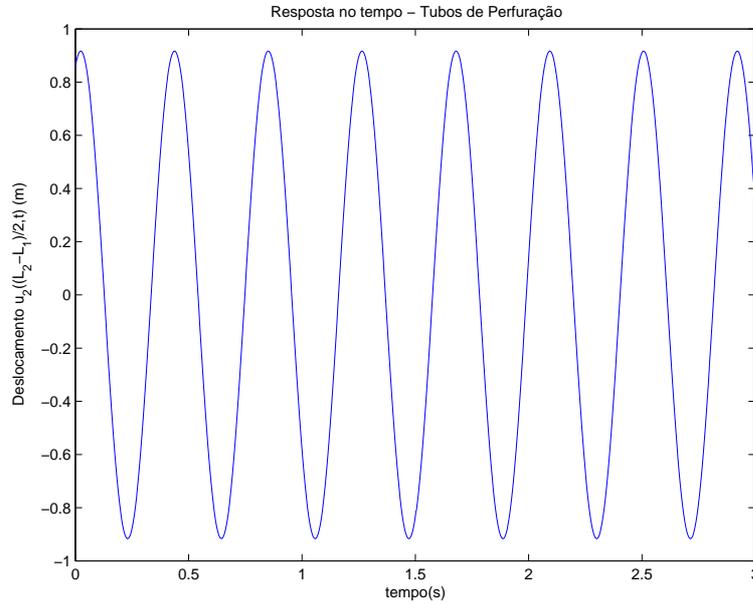


Figura 2.6: Resposta no tempo - tubos de perfuração; $N = 48.31rpm$.

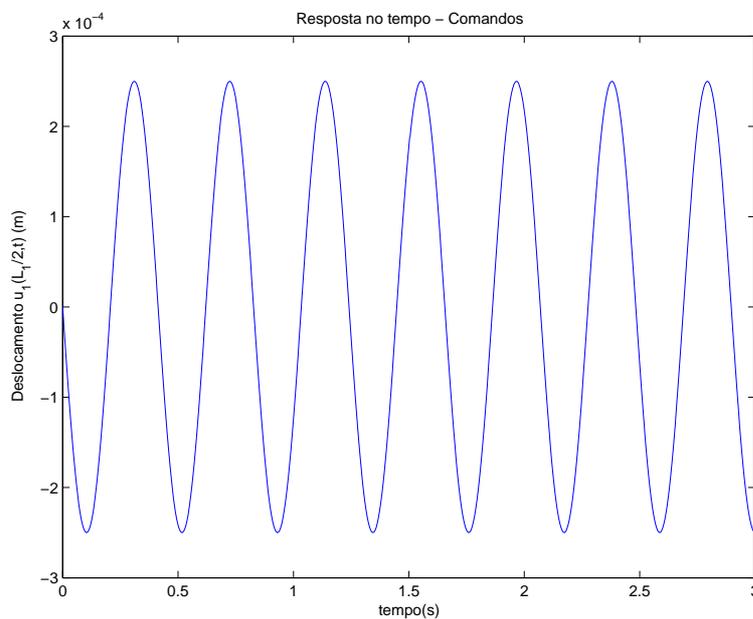


Figura 2.7: Resposta no tempo - comandos; $N = 48.31rpm$.

Numa primeira abordagem, conforme será discutido no capítulo 3, o comportamento axial da coluna de perfuração será estudado a partir

de um modelo com um grau de liberdade, onde a rigidez equivalente do sistema é associada aos tubos de perfuração e a massa equivalente é associada aos comandos (BHA) responsáveis por prover peso à broca (WOB). Os gráficos apresentados nas figuras (2.6) e (2.7) mostram que, numa das frequências naturais da coluna, os tubos de perfuração apresentam grandes amplitudes de movimento, enquanto os comandos parecem apenas acompanhar o movimento prescrito da interação broca/rocha. Com isso, podemos concluir que, para efeito de modelagem da coluna, o BHA pode ser considerado como um corpo rígido. Este assunto será abordado com maiores detalhes no capítulo 3. O último fato a ser observado considera os elevados valores de amplitude de vibração dos tubos de perfuração na ressonância (ordem de grandeza de metro). Apesar dos valores elevados, estes são condizentes com a realidade, uma vez que a deformação sofrida pelo material encontra-se abaixo do limite elástico do mesmo.

2.4

Considerações Finais

A vibração axial ou longitudinal é mais severa na perfuração com broca tricônica, sendo essa a broca ideal para se induzir vibração axial à coluna de perfuração. A causa dessa vibração está no fato de que as brocas tricônicas geram uma superfície de corte característica (lóbulos), durante a perfuração, excitando a coluna de modo axial. A frequência de excitação axial corresponde ao número de cones da broca multiplicado pela sua rotação.

Foi apresentado, neste capítulo, um modelo da dinâmica axial da coluna de perfuração [8]. A partir deste modelo, foi possível estudar o comportamento axial dos tubos de perfuração e do BHA separadamente. Através deste modelo, concluiu-se que a vibração axial da coluna de perfuração é gerada basicamente pelos tubos de perfuração, uma vez que a rigidez dos tubos de perfuração é muito menor que a do BHA.