

Romulo Reis Aguiar

**Desenvolvimento de um dispositivo
gerador de vibroimpacto**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
Programa de Pós-graduação em
Engenharia Mecânica

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2006



Romulo Reis Aguiar

**Desenvolvimento de um dispositivo
gerador de vibroimpacto**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de
Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento
de Engenharia Mecânica da PUC–Rio

Orientador: Prof. Hans Ingo Weber

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2006



Romulo Reis Aguiar

Desenvolvimento de um dispositivo gerador de vibroimpacto

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Hans Ingo Weber, Dr.-Ing.

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. João Carlos Ribeiro Plácido, Ph.D.

CENPES – PETROBRAS

Luiz Fernando Penna Franca, D.Sc.

Drilling Mechanics Group – CSIRO Petroleum

Prof. Marcelo Amorim Savi, D.Sc.

Departamento de Engenharia Mecânica – COPPE-UFRJ

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 13 de Fevereiro de 2006

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Romulo Reis Aguiar

Graduou-se em Engenharia Mecânica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, tendo dedicado 2 anos à projetos de iniciação científica (PIBIC-CNPq) nas áreas de dinâmica de rotores e vibroimpacto. Trabalhou por 3 anos na GE Aircraft Engines, especializando-se na área de desenvolvimento de novos reparos de componentes de motores aeronáuticos. Apresentou trabalho junto com seu orientador durante o Mestrado no XXVI CILAMCE. Atualmente dedica-se ao curso de Doutorado em Engenharia Mecânica na PUC-Rio.

Ficha Catalográfica

Aguiar, Romulo Reis

Desenvolvimento de um dispositivo gerador de vibroimpacto / Romulo Reis Aguiar; orientador: Hans Ingo Weber . — Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Mecânica, 2006.

146 f. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Mecânica – Teses. 2. Colunas de Perfuração. 3. Vibração Axial. 4. Taxa de Penetração (ROP). 5. Impactos. 6. Vibroimpacto. I. Weber, Hans Ingo. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Aos meus pais, José e Marina.

Agradecimentos

Aos meus pais, José Aguiar e Marina Reis Aguiar, que durante todo esse tempo tiveram paciência, amor e compreensão fundamentais para galgar mais este passo tão importante.

Ao professor Hans I. Weber por sua amizade, dedicação e inestimável contribuição na minha formação e elaboração deste trabalho.

À PUC-Rio, ao CNPq e à FAPERJ, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Aos colegas do Laboratório de Vibrações da PUC-Rio, pelas discussões e troca de idéias, fontes valiosas para o enriquecimento deste trabalho.

Ao técnico Wagner Epifânio da Cruz que, com a sua ajuda incondicional, colaborou na construção e montagem da bancada experimental.

À Denise Marques, por sua paciência e contribuição ao revisar o texto da dissertação.

Resumo

Aguiar, Romulo Reis; Weber, Hans Ingo. **Desenvolvimento de um dispositivo gerador de vibroimpacto**. Rio de Janeiro, 2006. 146p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A perfuração de rochas duras ainda é um grande desafio para as empresas de perfuração e exploração de petróleo. Uma das linhas de pesquisas atuais consiste em combinar satisfatoriamente duas técnicas para prover o aumento da taxa de penetração. Esta nova técnica vem sendo chamada de *perfuração com martelo em ressonância*. Esta dissertação se propõe a desenvolver o primeiro protótipo de um dispositivo que irá operar em ressonância e que será capaz de gerar forças dinâmicas expressivas. De forma resumida, este dispositivo será chamado de “RIMD” (**R**esonant **I**mpact **D**evice). Em princípio a idéia é construir um dispositivo em forma de uma “caixa preta”, na qual será montada na estrutura que vibra, tendo esta caixa dois ajustes, um calibrando a frequência de ressonância do RIMD e outro agindo sobre os impactos (folga). É conhecido de trabalhos anteriores que o tamanho da folga também possui influência sobre a frequência natural do sistema. Desta forma, existe uma interdependência entre ambos os ajustes. Um dos primeiros passos no projeto e desenvolvimento do protótipo do RIMD é o dimensionamento do mesmo, de forma que seja pequeno o suficiente para facilitar sua construção e instrumentação no laboratório de vibrações da PUC-Rio, bem como seja representativo do sistema em tamanho real (a ser implantado na coluna de perfuração). Os componentes do RIMD envolvem um sistema massa-mola com baixo amortecimento e algum dispositivo de impacto e de variação da folga. Após a concepção e construção do protótipo, os passos seguintes do estudo são a obtenção das características do RIMD, como a faixa de frequências o qual atua e a medição das forças impulsivas geradas. Por último, o protótipo também servirá para validar um modelo analítico que permitirá investigações posteriores neste tema, podendo gerar outras possibilidades de construção do RIMD.

Palavras-chave

colunas de perfuração, vibração axial, taxa de penetração (ROP), impactos, vibroimpacto.

Abstract

Aguiar, Romulo Reis; Weber, Hans Ingo. **Development of a vibroimpact device**. Rio de Janeiro, 2006. 146p. MSc. Dissertation — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Hard rock drilling is still a great challenge for oil companies. One current line of research involves combining the two existing drilling techniques in order to enhance the rate of penetration. This new technique is called ***Resonance Hammer Drilling***. This dissertation proposes the design and development of the first prototype that will operate in resonance, and will be capable of generating considerable dynamic forces. This device will be known as the **Resonant Impact Device**, or “RIMD”. In principle the idea is to build some sort of “black box”, which will be mounted on a vibrating structure with two switches – one calibrating the RIMD resonance frequency and the other acting on the impacts – changing the size of the gap. It is known from previous work that gap size also has influence on the system natural frequency. Therefore there is a relationship between switches. One of the first steps of RIMD design and development is device dimensioning, necessary in order to construct a scale model at the Dynamic and Vibration laboratory at PUC-Rio representative of the real size system. The real size system will be mounted on the drillstring. RIMD components involve a mass-spring system with low damping and some impact and gap variation devices. The analysis of this prototype includes obtaining key characteristics such as the range of possible frequencies and the measurement of the generated impulsive forces. Finally, the built prototype will be used to validate an analytical model that will allow further investigations on this subject providing the way to other possible constructions.

Keywords

oilwell drillstrings, axial vibration, rate of penetration (ROP), impacts, vibroimpact.

Conteúdo

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Perfuração de poços de petróleo	19
1.2	Equipamentos da sonda de perfuração	20
1.3	Colunas de perfuração	25
1.4	Brocas	28
1.5	Vibrações em colunas de perfuração	30
1.6	ROP em rochas duras e inovações no processo de perfuração	31
1.7	Objetivos do trabalho	33
1.8	Organização do trabalho	34
2	MODELAGEM DA DINÂMICA AXIAL DA COLUNA DE PERFURAÇÃO	35
2.1	Introdução	35
2.2	Dinâmica (Axial) da Coluna de Perfuração	37
2.3	Solução Analítica e Simulação Numérica	41
2.4	Considerações Finais	45
3	MODELAGEM DO DISPOSITIVO DE VIBROIMPACTO	46
3.1	Introdução sobre Impacto	46
3.2	Modelos Contínuos de Impacto	49
3.3	Modelagem Matemática do RIMD	54
3.4	Resultados numéricos e discussões	57
3.5	Considerações finais	67
4	METODOLOGIA E RESULTADOS EXPERIMENTAIS	69
4.1	Aparato Experimental	69
4.2	Metodologia Experimental	73
4.3	Identificação de parâmetros e Resultados Experimentais	74
4.4	Considerações Finais	118
5	VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO	121
5.1	Identificação dos Parâmetros do Impacto	121
5.2	Resultados Numéricos	124
5.3	Comparação Numérico-Experimental	126
5.4	Considerações Finais	137
6	CONCLUSÕES	139
6.1	Trabalhos futuros	142
	Bibliografia	144

Lista de Figuras

1.1	Imagens de campo - perfuração de um poço de petróleo (site geocities.yahoo.com.br).	18
1.2	Perfuração de um poço de petróleo (site www.howstuffworks.com).	19
1.3	Desenho esquemático de uma plataforma de perfuração (site www.howstuffworks.com).	20
1.4	Kelly de seção reta hexagonal e quadrada [25].	24
1.5	Comando (<i>Drill Collar</i>) [25].	26
1.6	Tubo de perfuração (<i>Drill Pipe</i>) [25].	26
1.7	a) Broca de diamante natural; b) broca tipo PDC (site www.seed.slb.com).	29
1.8	Broca tricônica com insertos (site geocities.yahoo.com.br).	29
1.9	Tipos de vibração em uma coluna de perfuração [13].	30
2.1	Tipos de vibração em uma coluna de perfuração [13].	36
2.2	Desenho esquemático da coluna de perfuração [8].	38
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].	40
2.4	Espectro de amplitude dos tubos de perfuração no domínio da frequência (em $u_{TP}((L_{TP} - L_{BHA})/2)$).	43
2.5	Espectro de amplitude dos comandos no domínio da frequência (em $u_{BHA}(L_{BHA}/2)$).	43
2.6	Resposta no tempo - tubos de perfuração; $N = 48.31rpm$.	44
2.7	Resposta no tempo - comandos; $N = 48.31rpm$.	44
3.1	Impacto entre dois corpos [4].	47
3.2	Deformação durante o impacto [4].	48
3.3	Fluxo de energia [4].	49
3.4	Força de contato para o modelo de Kelvin-Voigt [15].	51
3.5	Impacto de uma massa com uma superfície rígida para diferentes valores de velocidade: a) plano fase; b) característica força/penetração. Parâmetros utilizados: $m = 2Kg$ $k_c = 2.1 \cdot 10^8 N/m_c$ $n_c = 1.6$ $\lambda_c = 0.6s/m$.	53
3.6	Desenho esquemático do sistema de perfuração rotativa.	54
3.7	Protótipo do RIMD.	55
3.8	Modelagem do sistema.	56
3.9	Modelos de comparação a) 1 GDL; b) 2 GDL sem impacto.	57
3.10	Força transmitida <i>versus</i> frequência de excitação a) 1 GDL; b) 2 GDL.	59
3.11	Influência da distribuição de massa. Força transmitida <i>versus</i> frequência.	60

3.12	Influência da distribuição de massa: a) primeiro modo (detalhe); b) segundo modo (detalhe).	60
3.13	Resposta em frequência: a) velocidade; b) força de impacto.	61
3.14	Plano fase do RIMD, $\Omega = 4.53Hz$, condição em regime.	62
3.15	Comportamento da força de impacto, $\Omega = 4.53Hz$.	63
3.16	Resposta em frequência da força de impacto: a) aumentando k_2 ; b) diminuindo k_2 .	63
3.17	Influência da rigidez do RIMD.	64
3.18	Condição de período-1. $k_2 = 90N/m$ e $\Omega = 4.338Hz$: a) plano fase do RIMD; b) perfil da força de impacto.	65
3.19	Condição de período-1 transitória. $k_2 = 70N/m$ e $\Omega =$ $4.271Hz$: a) plano fase do RIMD; b) perfil da força de impacto.	65
3.20	Condição de período-0.5. $k_2 = 40N/m$ e $\Omega = 4.196Hz$: a) plano fase do RIMD; b) perfil da força de impacto.	65
3.21	Resposta em frequência da força de impacto: aumentando o gap.	66
3.22	Resposta em frequência da força de impacto: diminuindo o gap.	67
4.1	Foto da bancada experimental.	70
4.2	Desenho esquemático do experimento.	70
4.3	Tratamento dos sinais.	73
4.4	Correlação bancada - modelo (ver figura (4.2)).	74
4.5	Foto do experimento 1 grau de liberdade, sem impacto.	75
4.6	Resposta em frequência - vibração livre.	75
4.7	Resposta no tempo: a) acelerômetro 2 (AB77); b) acelerômetro 3 (AC69).	77
4.8	Picos de aceleração: a) acelerômetro 2 (AB77); b) acelerômetro 3 (AC69).	78
4.9	Vibração livre do RIMD, distância entre acoplamentos 10 cm: a) resposta em frequência; b) resposta no tempo.	79
4.10	Frequências naturais, distância entre acoplamentos 10 cm: a) modelo Numérico; b) experimental.	80
4.11	Frequências naturais, distância entre acoplamentos 15cm a) RIMD; b) sistema.	82
4.12	Resposta no tempo. Distância entre acoplamentos 15cm; folga 0mm; $\Omega = 3.25Hz$. a) F_i versus F_0 ; b) Acelerações.	83
4.13	Respostas no tempo. Distância entre acoplamentos 15cm; folga 0mm; $\Omega = 3.5Hz$. a) F_i versus F_0 ; b) Acelerações.	84
4.14	Respostas no tempo. Distância entre acoplamentos 15cm; folga 0mm; $\Omega = 4.5Hz$. a) F_i versus F_0 ; b) Acelerações.	84
4.15	Resposta no tempo. F_i versus F_0 . Distância entre acoplamentos 15cm; folga 0mm; $\Omega = 5.5Hz$.	85
4.16	Resposta no tempo. Distância entre acoplamentos 15cm; folga 0mm; $\Omega = 5.5Hz$: a) acelerações; b) detalhe do gráfico.	85
4.17	Respostas no tempo. Distância entre acoplamentos 15cm; folga 0mm; $\Omega = 7.75Hz$: a) F_i versus F_0 ; b) acelerações.	86
4.18	Respostas no tempo. Distância entre acoplamentos 15cm; folga 0mm; $\Omega = 9.25Hz$: a) F_i versus F_0 ; b) acelerações.	86

4.19	Respostas no tempo. Distância entre acoplamentos 15cm; folga 0mm; $\Omega = 10.25Hz$: a) F_i versus F_0 ; b) acelerações.	87
4.20	Respostas no tempo. Distância entre acoplamentos 15cm; folga 0mm; $\Omega = 11Hz$: a) F_i versus F_0 ; b) acelerações.	87
4.21	Respostas no tempo. Distância entre acoplamentos 15cm; folga 0mm; $\Omega = 12Hz$: a) F_i versus F_0 ; b) acelerações.	88
4.22	Respostas no tempo. Distância entre acoplamentos 15cm; folga 0mm; $\Omega = 13.25Hz$: a) F_i versus F_0 ; b) acelerações.	88
4.23	Respostas no tempo. Distância entre acoplamentos 15cm; folga 0mm; $\Omega = 14.5Hz$: a) F_i versus F_0 ; b) acelerações.	89
4.24	Resposta no domínio da frequência. Distância entre acoplamentos 15cm; folga 0mm; F_i/F_0 versus Ω .	90
4.25	Respostas no tempo. Distância entre acoplamentos 15cm; folga 1mm; $\Omega = 6.25Hz$: a) F_i versus F_0 ; b) acelerações.	91
4.26	Respostas no tempo. Distância entre acoplamentos 15cm; folga 1mm; $\Omega = 7Hz$: a) F_i versus F_0 ; b) acelerações.	92
4.27	Respostas no tempo. Distância entre acoplamentos 15cm; folga 1mm; $\Omega = 8.75Hz$: a) F_i versus F_0 ; b) acelerações.	92
4.28	Respostas no tempo. Distância entre acoplamentos 15cm; folga 1mm; $\Omega = 13.5Hz$: a) F_i versus F_0 ; b) acelerações.	93
4.29	Resposta no domínio da frequência. Distância entre acoplamentos 15cm; folga 1mm; F_i/F_0 versus Ω .	93
4.30	Respostas no tempo. Distância entre acoplamentos 15cm; folga 3mm; $\Omega = 6Hz$: a) F_i versus F_0 ; b) acelerações.	94
4.31	Respostas no tempo. Distância entre acoplamentos 15cm; folga 3mm; $\Omega = 12.5Hz$: a) F_i versus F_0 ; b) acelerações.	94
4.32	Resposta no domínio da frequência. Distância entre acoplamentos 15cm; folga 3mm; F_i/F_0 versus Ω .	95
4.33	Resposta no domínio da frequência. Distância entre acoplamentos 15cm; comparação entre folgas. F_i/F_0 versus Ω .	95
4.34	Resposta no domínio da frequência. Distância entre acoplamentos 17cm; comparação entre folgas. F_i/F_0 versus Ω .	97
4.35	Resposta no domínio da frequência. Distância entre acoplamentos 19cm; folga 0mm; F_i/F_0 versus Ω .	99
4.36	Resposta no domínio da frequência. Distância entre acoplamentos 19cm; folga 1mm; F_i/F_0 versus Ω .	100
4.37	Respostas no tempo. Distância entre acoplamentos 19cm; folga 3mm; $\Omega = 12.5Hz$: a) F_i versus F_0 ; b) acelerações.	100
4.38	Resposta no domínio da frequência. Distância entre acoplamentos 19cm; folga 3mm; F_i/F_0 versus Ω .	101
4.39	Resposta no domínio da frequência. Distância entre acoplamentos 19cm; comparação entre folgas; F_i/F_0 versus Ω .	101
4.40	Resposta no tempo. F_i versus F_0 . Distância entre acoplamentos 21cm; folga 0mm; $\Omega = 2.75Hz$.	103
4.41	Resposta no tempo. Distância entre acoplamentos 21cm; folga 0mm; $\Omega = 2.75Hz$: a) acelerações; b) detalhe do gráfico.	103
4.42	Respostas no tempo. Distância entre acoplamentos 21cm; folga 0mm; $\Omega = 5.25Hz$: a) F_i versus F_0 ; b) acelerações.	104

4.43	Respostas no tempo. Distância entre acoplamentos 21cm; folga 0mm; $\Omega = 6.75Hz$: a) F_i versus F_0 ; b) acelerações.	104
4.44	Respostas no tempo. Distância entre acoplamentos 21cm; folga 0mm; $\Omega = 7.5Hz$: a) F_i versus F_0 ; b) acelerações.	105
4.45	Respostas no tempo. Distância entre acoplamentos 21cm; folga 0mm; $\Omega = 8Hz$: a) F_i versus F_0 ; b) acelerações.	105
4.46	Respostas no tempo. Distância entre acoplamentos 21cm; folga 0mm; $\Omega = 9Hz$: a) F_i versus F_0 ; b) acelerações.	106
4.47	Respostas no tempo. Distância entre acoplamentos 21cm; folga 0mm; $\Omega = 12.25Hz$: a) F_i versus F_0 ; b) acelerações.	106
4.48	Respostas no tempo. Distância entre acoplamentos 21cm; folga 0mm; $\Omega = 14.25Hz$: a) F_i versus F_0 ; b) acelerações.	107
4.49	Resposta no domínio da frequência. Distância entre acoplamentos 21cm; folga 0mm; F_i/F_0 versus Ω .	107
4.50	Respostas no tempo. Distância entre acoplamentos 21cm; folga 1mm; $\Omega = 4.5Hz$: a) F_i versus F_0 ; b) acelerações.	109
4.51	Respostas no tempo. Distância entre acoplamentos 21cm; folga 1mm; $\Omega = 5.25Hz$: a) F_i versus F_0 ; b) acelerações.	109
4.52	Respostas no tempo. Distância entre acoplamentos 21cm; folga 1mm; $\Omega = 5.75Hz$: a) F_i versus F_0 ; b) acelerações.	110
4.53	Respostas no tempo. Distância entre acoplamentos 21cm; folga 1mm; $\Omega = 8.75Hz$: a) F_i versus F_0 ; b) acelerações.	110
4.54	Respostas no tempo. Distância entre acoplamentos 21cm; folga 1mm; $\Omega = 11Hz$: a) F_i versus F_0 ; b) acelerações.	111
4.55	Respostas no tempo. Distância entre acoplamentos 21cm; folga 1mm; $\Omega = 12Hz$: a) F_i versus F_0 ; b) acelerações.	111
4.56	Respostas no tempo. Distância entre acoplamentos 21cm; folga 1mm; $\Omega = 12.25Hz$: a) F_i versus F_0 ; b) acelerações.	112
4.57	Respostas no tempo. Distância entre acoplamentos 21cm; folga 1mm; $\Omega = 13.75Hz$: a) F_i versus F_0 ; b) acelerações.	112
4.58	Resposta no domínio da frequência. Distância entre acoplamentos 21cm; folga 1mm; F_i/F_0 versus Ω .	113
4.59	Respostas no tempo. Distância entre acoplamentos 21cm; folga 3mm; $\Omega = 4.25Hz$: a) F_i versus F_0 ; b) acelerações.	114
4.60	Respostas no tempo. Distância entre acoplamentos 21cm; folga 3mm; $\Omega = 12.25Hz$: a) F_i versus F_0 ; b) acelerações.	114
4.61	Resposta no domínio da frequência. Distância entre acoplamentos 21cm; folga 3mm; F_i/F_0 versus Ω .	115
4.62	Resposta no domínio da frequência. Distância entre acoplamentos 21cm; comparação entre folgas. F_i/F_0 versus Ω .	115
4.63	Otimização da força de impacto. Primeiro modo de vibração. F_i/F_0 versus Ω .	117
4.64	Otimização da força de impacto. Primeiro modo de vibração. F_i/F_0 versus Ω .	118
5.1	Força de impacto no tempo. a) Condição inicial de 7mm. b) condição inicial de 5mm.	122
5.2	Identificação dos parâmetros do impacto. Condição inicial de 7mm.	123

5.3	Identificação dos parâmetros do impacto. Condição inicial de 5mm.	123
5.4	Resultados numéricos; F_i versus Ω : a) distância entre acoplamentos 15cm; b) distância entre acoplamentos 17cm.	125
5.5	Resultados numéricos; F_i versus Ω : a) distância entre acoplamentos 19cm; b) distância entre acoplamentos 21cm.	125
5.6	Resultados numéricos; F_i versus Ω : a) distância entre acoplamentos 19cm (detalhe - primeiro modo); b) distância entre acoplamentos 17cm (detalhe - segundo modo).	126
5.7	Comparação numérico-experimental; distância entre acoplamentos 15cm; gap 0mm; F_i/F_0 versus Ω .	127
5.8	Comparação numérico-experimental; distância entre acoplamentos 15cm; gap 1mm; F_i/F_0 versus Ω .	127
5.9	Comparação numérico-experimental; distância entre acoplamentos 15cm; gap 3mm; F_i/F_0 versus Ω .	128
5.10	Comparação numérico-experimental; distância entre acoplamentos 17cm; gap 0mm; F_i/F_0 versus Ω .	130
5.11	Comparação numérico-experimental; distância entre acoplamentos 17cm; gap 1mm; F_i/F_0 versus Ω .	130
5.12	Comparação numérico-experimental; distância entre acoplamentos 17cm; gap 3mm; F_i/F_0 versus Ω .	131
5.13	Comparação numérico-experimental; distância entre acoplamentos 19cm; gap 0mm; F_i/F_0 versus Ω .	132
5.14	Comparação numérico-experimental; distância entre acoplamentos 19cm; gap 1mm; F_i/F_0 versus Ω .	133
5.15	Comparação numérico-experimental; distância entre acoplamentos 19cm; gap 3mm; F_i/F_0 versus Ω .	133
5.16	Comparação numérico-experimental; distância entre acoplamentos 21cm; gap 0mm; F_i/F_0 versus Ω .	135
5.17	Comparação numérico-experimental; distância entre acoplamentos 21cm; gap 1mm; F_i/F_0 versus Ω .	135
5.18	Comparação numérico-experimental; distância entre acoplamentos 21cm; gap 3mm; F_i/F_0 versus Ω .	136

Lista de Tabelas

2.1	Parâmetros da simulação numérica.	42
3.1	Parâmetros: modelos de comparação.	57
3.2	Parâmetros do RIMD.	58
4.1	Especificação dos sensores.	72
4.2	Especificação do <i>shaker</i> .	72
4.3	Massas dos componentes.	76
4.4	Frequências naturais, distância entre acoplamentos 10 cm.	80
4.5	Frequências naturais, distância entre acoplamentos 12 cm.	81
4.6	Identificação de parâmetros - distância entre acoplamentos 15cm.	82
4.7	Frequências naturais - comparação numérico-experimental, distância entre acoplamentos 15cm.	82
4.8	Frequências naturais (experimentais) - sistema com e sem impacto, distância entre acoplamentos 15cm.	96
4.9	Identificação de parâmetros - Distância entre acoplamentos 17cm.	96
4.10	Frequências naturais - comparação numérico-experimental, distância entre acoplamentos 17cm.	97
4.11	Frequências naturais (experimentais) - sistema com e sem impacto, distância entre acoplamentos 17cm.	98
4.12	Identificação de parâmetros - Distância entre acoplamentos 19cm.	98
4.13	Frequências naturais - comparação numérico-experimental, distância entre acoplamentos 19cm.	98
4.14	Frequências naturais (experimentais) - sistema com e sem impacto, distância entre acoplamentos 19cm.	102
4.15	Identificação de parâmetros - Distância entre acoplamentos 21cm.	102
4.16	Frequências naturais (experimentais) - sistema com e sem impacto, distância entre acoplamentos 21cm.	116
5.1	Parâmetros do RIMD para identificação dos parâmetros de impacto.	122
5.2	Parâmetros do impacto.	122
5.3	Frequências naturais; numérico e experimental; distância entre acoplamentos 15cm.	129
5.4	Forças de impacto máximas; numérico e experimental; distância entre acoplamentos 15cm.	129
5.5	Frequências naturais; numérico e experimental; distância entre acoplamentos 17cm.	131
5.6	Forças de impacto máximas; numérico e experimental; distância entre acoplamentos 17cm.	132
5.7	Frequências naturais; numérico e experimental; distância entre acoplamentos 19cm.	134
5.8	Forças de impacto máximas; numérico e experimental; distância entre acoplamentos 19cm.	134

5.9	Frequências naturais; numérico e experimental; distância entre acoplamentos 21cm.	136
5.10	Forças de impacto máximas; numérico e experimental; distância entre acoplamentos 21cm.	137

Lista de símbolos

\sin	Seno.
\cos	Cosseno.
L, l	Comprimento.
x	Posição.
v	Velocidade.
t	Tempo.
E	Módulo de elasticidade.
A	Área da seção reta.
I	Inércia.
u	Deslocamento axial.
γ, c	Coefficiente de amortecimento.
ρ	Densidade.
g	Aceleração da gravidade (9.81 m/s^2).
u_0	Amplitude de excitação da coluna causada pela interação broca/rocha.
ω_e	Frequência de excitação da coluna (rad/s).
f_e	Frequência de excitação da coluna (Hz).
N	Velocidade de rotação da coluna (rpm).
\square_{TP}	Índice relativo aos tubos de perfuração.
\square_{BHA}	Índice relativo aos comandos (BHA).
\square_{sup}	Índice relativo aos equipamentos de superfície (kelly, swivel, etc.).
η	Constante (manipulação algébrica).
B	Constante de integração.
b	Constante de integração.
k	Rigidez.
M, m	Massa.
ξ	Fator de amortecimento.
F	Força.
F_i	Força de impacto.
F_0	Força de excitação.
δ	Deformação.
\square_c	Índice referente ao modelo de impacto de Hunt e Crossley.
λ	Coefficiente de proporcionalidade.
n	Expoente no linear.
Imp	Impulso.
R	Razão entre massas.
gap	Folga.
\square_1	Índice relativo ao sistema principal.
\square_2	Índice relativo ao RIMD.
Ω	Frequência de excitação.
ω, f	Frequência natural.
h	Altura.
T	Período.
ψ	Decremento logarítmico.
H	Matriz de receptância.

Uma jornada de mil milhas deve começar com um único passo.

Lao Tsé.