Romulo Reis Aguiar

Experimental investigation and numerical analysis of the vibro-impact phenomenon

TESE DE DOUTORADO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
Postgraduate Program in Mechanical Engineering

Rio de Janeiro
March 2010

Pontifícia Universidade Católica
do Rio de Janeiro

Romulo Reis Aguiar

Experimental investigation and numerical analysis of the vibro-impact phenomenon

Tese de Doutorado

Thesis presented to the Postgraduate Program in Mechanical Engineering of the Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Técnico Científico, PUC–Rio as partial fulfillment of the requirements for the degree of Doutor em Engenharia Mecânica

Adviser: Prof. Hans Ingo Weber

Rio de Janeiro
March 2010

Pontifícia Universidade Católica
do Rio de Janeiro

Romulo Reis Aguiar

Experimental investigation and numerical analysis of the vibro-impact phenomenon

Thesis presented to the Postgraduate Program in Mechanical Engineering of the Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Técnico Científico da PUC–Rio as partial fulfillment of the requirementes for the degree of Doutor em Engenharia Mecânica

Prof. Hans Ingo Weber, Dr.-Ing.
Adviser
Departamento de Engenharia Mecânica – PUC–Rio

Prof. Gerhard Schweitzer, Dr.-Ing.
Institute of Robotics and Intelligent Systems – ETH Zurich

Prof. Ilmar Ferreira Santos, Dr.-Ing.
Departament of Mechanical Engineering – Technical University of Denmark, DTU

Prof. José Manoel Balthazar, D.Sc.
Departamento de Estatística, Matemática Aplicada e Computacional – UNESP

Prof. Marcelo Amorim Savi, D.Sc.
Departamento de Engenharia Mecânica – UFRJ

Prof. Rubens Sampaio Filho, Ph.D.
Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. José Eugênio Leal
Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC–Rio

Rio de Janeiro, March 29th, 2010

Romulo Reis Aguiar

Received his Bachelor of Science degree in Mechanical Engineering from Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (2001). Worked at General Electric, Aircraft Engines Division for three years, on the development of new repair procedures for aircraft engine parts. Obtained his masters degree from PUC-Rio (2006), in the research field of Solid Mechanics, establishing his research in Nonlinear Dynamics and Vibro-impact. Presented many articles with his adviser in international congresses (CILAMCE, DINAME, COBEM and MOVIC).

Bibliographic data

Aguiar, Romulo Reis

Experimental investigation and numerical analysis of the vibro-impact phenomenon / Romulo Reis Aguiar; adviser: Hans Ingo Weber . — 2010.

144 f. : il. (color.) ; 30 cm

Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Mecânica – Teses. 2. Coluna de Perfuração. 3. Dinâmica Não-linear. 4. Impacto. 5. Vibro-impacto. 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

Inicio meus agradecimentos ao mestre e amigo, Prof. Hans Ingo Weber, pelo incentivo, dedicação, conselhos e exemplo de vida.

Minha família teve um papel fundamental durante esse período da minha vida: meus pais, José e Marina, minha avó, Iacy e minha tia, Jean, agradeço pelo companheirismo, orientação e suporte, imprescindíveis para galgar este passo tão importante.

Gostaria de enfatizar a ajuda do técnico do Laboratório de Dinâmica e Vibrações da PUC-Rio, Wagner Epifânio da Cruz, durante a concepção e fabricação das bancadas experimentais, além de tornar-se um grande amigo em todos esses anos que passei na PUC, desde a iniciação científica até o doutorado.

Expresso minha gratidão aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio, em especial ao Prof. Rubens Sampaio, ao Carlúcio Souza e à Rosely Marins.

Agradeço à PUC, ao CNPq, à FAPERJ e à CSIRO pelo suporte financeiro.

Tive a satisfação de conviver com grandes amizades nesse período na PUC-Rio: Thiago Ritto, Edson Cataldo, Juliana Vianna, Juliana Abrantes, Frank Pruzaesky, Luiz Sampaio, dentre outros, que compartilharam a rotina na universidade; pela amizade e pelas incontáveis trocas de idéias, fontes valiosas que enriqueceram este trabalho.

Dr. Luiz Franca possui um papel importante na minha formação, pela oportunidade única de ter me oferecido o estágio na CSIRO Petroleum, período que adquiri preciosa experiência e conhecimento na área de perfuração de poços de petróleo e interação broca/rocha. Agradeço também a todos os colegas de trabalho do Drilling Mechanics Group: Prof. Emmanuel Detournay, Dr. Thomas Richard, Dr. Joel Sarout, Luis Mariano, Amir Soroush, Greg Lupton e Stephen Banks, pelas diversas discussões que foram essenciais a esta tese.

Deixo aqui minha gratidão à Mariana Costa, por sua amizade, companheirismo e inabalável paciência.

Aproveito a oportunidade para agradecer a todos os meus amigos da música, pelos momentos de alegria e descontração nas inúmeras rodas de choro que assisti e/ ou participei; em especial, agradeço aos músicos do grupo Água no Feijão, a minha "família do choro": Marcus Garrett, Marilynn Mair, Michel Nascimento, Pablo Curty e Raphael Moraes.

Last but not least, expresso meus agradecimentos à Marilynn Mair, pela ajuda ao revisar o texto da tese.

Resumo

Aguiar, Romulo Reis; Weber, Hans Ingo. **Experimental investigation and numerical analysis of the vibro-impact phenomenon**. Rio de Janeiro, 2010. 146p. Tese de Doutorado — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Existem aplicações técnicas onde o principal elemento de um sistema mecânico está sujeito a um padrão de vibração. Um exemplo se encontra na perfuração de poços de petróleo em rochas duras utilizando brocas tricônicas, uma vez que esse tipo de interação broca/ rocha impõe uma vibração longitudinal à estrutura. É possível utilizar parte desta energia para excitar um martelo, uma subestrutura do sistema principal capaz de gerar impactos. A onda de tensão gerada pelo impacto pode ser útil para remover o sistema de uma condição de *stick* (*stick-slip*) ou ajudar na propagação de trincas no material a ser perfurado. A perfuração de rochas duras ainda é um grande desafio para as empresas de perfuração e exploração de petróleo. Neste contexto, uma forma de conseguir maior eficiência da coluna de perfuração é combinando a perfuração rotativa convencional com um dispositivo de vibro-impacto. A tarefa de desenvolver um martelo embarcado na coluna de perfuração e que impacta sobre a broca ainda é uma sugestão a ser implementada. O propósito deste trabalho é a investigação experimental e a modelagem matemática do comportamento da força de impacto num sistema de vibro-impacto embarcado. Mudando a rigidez do martelo e a folga é possível investigar o comportamento do sistema sob diferentes freqüências de excitação. É apresentada uma metodologia para a integração numérica de equações diferenciais descontínuas. Este trabalho também estuda a modelagem da força de impacto, investigando qual modelo matemático disponível na literatura melhor representa os dados experimentais. Os resultados experimentais serão usados para validar o modelo matemático, através do qual o sistema será estudado em maior detalhe. Uma análise não-linear é realizada (diagramas de bifurcação, mapas de Poincaré e mapas de Peterka). Finalmente, este trabalho mostra uma aplicação prática deste sistema de vibro-impacto, onde um sistema massa-mola é montado a uma bancada experimental de perfuração. Resultados experimentais mostram que a aplicação da força de impacto durante a perfuração aumenta a taxa de penetração.

Palavras–chave

coluna de perfuração, dinâmica não-linear, impacto, vibro-impacto.

Abstract

Aguiar, Romulo Reis; Weber, Hans Ingo. **Numerical-experiment investigation and nonlinear analysis of the vibroimpact phenomenon**. Rio de Janeiro, 2010. 146p. PhD. Thesis — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

There are technical applications when the main element of a mechanical system is subjected to a regular vibration pattern. An example of this is drilling with tricone bits on hard material, because under normal condition the contact surface becomes lobular, imposing a longitudinal vibration on the drilling structure. It is possible to use part of this energy to resonate a hammer, that is a substructure of the system and impacts on it. The stress wave created by the impact may be useful to release the system from the stick condition of stick-slip phenomenon or to help in the crack propagation of the material being cut. Hard rock drilling is still a great challenge for oil companies. Optimum productivity is made possible by combining the advantages of rotary and percussive drilling. The task of developing an internal hammer in the drillstring that impacts on the drill bit remains an idea to be implemented. The subject of this work is the experimental investigation and the mathematical modeling of the impact force behavior in a vibro-impact system, where a hammer is mounted on a cart that imposes a prescribed displacement. By changing the hammer stiffness and the impact gap it is possible to investigate the impact force behavior under different excitation frequencies. A methodology is presented to numerically integrate the ODEs with a discontinuous right-hand side. This work also compares different models of the impact force presented in prevailing scientific literature to determine which one best fits the experimental data. This information will be used to create a mathematical model of the test rig. The experimental data will be used to validate the mathematical model. The hammer behavior is studied in more detail using a nonlinear analysis (bifurcation diagrams, Poincaré maps and Peterka map). Nonlinear analysis shows the various responses of the hammer, such as dynamical jumps, bifurcations and chaos. Finally, this work shows the field application of this vibro-impact system. A mass-spring system is mounted to an experimental drilling rig. Experimental results shows that impact forces during drilling improve the rate of penetration.
Keywords

oilwell drillstring, nonlinear dynamics, impact, vibro-impact.

Table of Contents

List of Figures

List of Tables

Notation

BHA	Bottom Hole Assembly.
MWD	Measurement While Drilling.
LWD	Logging While Drilling.
$HWDP$	Heavyweight drill pipes.
TOB	Torque on bit.
WOB	Weight on bit.
RHD	Resonance Hammer Drilling.
FRF	Frequency response function.
DOF	Degree of freedom.
sin	Sine.
cos	Cosine.
z	Impact condition (number of impact per cycles of excitation).
F_i	Impact force, N.
F_{exc}	Excitation force, N.
m_{tot}	Total mass, kg.
m	Hammer mass, kg.
M	Cart mass, kg.
A_0	Excitation amplitude, m.
l	Length, m.
g	Acceleration of gravity, 9.81 m/s^2.
t	Time, s.
c	Damping coeficient, Ns/m.
ζ	Damping ratio.
θ	Angle, rad.
$\dot{\theta}$	Angular velocity, rad/s.
$\ddot{\theta}$	Angular acceleration, rad/s^2.
x	Displacement (hammer), m.
y	Displacement (excitation), m.
Ω	Excitation frequency, Hz or rad/s.
ω	System natural frequency, Hz or rad/s.
δ	Indentation during impact, m.
$\dot{\delta}$	Velocity of indentation during impact, m/s.
$\dot{\delta}^{(-)}$	Instant velocity before impact, m/s.
k_i	Stiffness of impact (modeling), N/m.
c_i	Damping of impact (modeling), Ns/m.
n	constant.
λ_i	Damping/ stiffness ratio (impact modeling), s.
e	Coefficient of restitution.
gap	Impact gap, m.
Γ	Subspace.
Σ	Hyper-surface.
$h(\mathbf{x})$	Scalar function.
η	Narrow band thickness.
$\mathbf{x}$	State-space vector.
$\overline{co}$	Convex set.

L'essentiel est invisible pour les yeux.

Antoine de Saint-Exupèry, Le Petit Prince.