Fredy Jonel Coral Alamo

Dinâmica de Estruturas Unidimensionais Esbeltas Utilizando o Contínuo de Cosserat

TESE DE DOUTORADO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
Programa de Pós–graduação em

Engenharia Mecânica

Rio de Janeiro

Dezembro de 2006

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO

Fredy Jonel Coral Alamo

Dinâmica de Estruturas Unidimensionais Esbeltas Utilizando o Contínuo de Cosserat

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós–graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC–Rio como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Hans Ingo Weber

Rio de Janeiro
Dezembro de 2006

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO

Fredy Jonel Coral Alamo

Dinâmica de Estruturas Unidimensionais Esbeltas Utilizando o Contínuo de Cosserat

Tese apresentada ao Programa de Pós–graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC–Rio como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Hans Ingo Weber, Ph.D.
Orientador
Departamento de Engenharia Mecânica — PUC–Rio

Prof. Luiz Bevilacqua, Ph. D.
Laboratório Nacional de Computação Científica – LNCC

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

Prof. Ilmar Ferreira Santos, Dr. Eng.
Technical University of Denmark, Department Of Mechanical Engineering

Prof. Domingos A. Rade, Ph. D.
Departamento de Engenharia Mecânica – UFU

Prof. João Carlos Ribeiro Plácido, Ph. D.
Cenpes/Petrobras

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

Rio de Janeiro, 18 de Dezembro de 2006

Fredy Jonel Coral Alamo

Graduou–se em Engenharia Mecânica na Universidad Nacional de Ingeniería (Lima, Perú). Cursou mestrado na PUC-Rio em 2003, especializando-se em vibrações mecânicas e dinâmica de sistemas rotativos. Apresentou vários trabalhos em congressos nacionais e internacionais (COBEM, CILAMCE, PACAM, ECCM, etc) junto com o seu orientador durante os estudos de Mestrado e de Doutorado. Atualmente trabalha na empresa Softec, como Engenheiro de suporte e consultoría, e paralelamente dedica-se à pesquisa na área de dinâmica, vibrações e sistemas rotativos

Ficha Catalográfica

Coral Alamo, Fredy Jonel

Dinâmica de Estruturas Unidimensionais Esbeltas Utilizando o Contínuo de Cosserat/ Fredy Jonel Coral Alamo; orientador: Hans Ingo Weber. — Rio de Janeiro : PUC–Rio, Departamento de Engenharia Mecânica, 2006.

v., 120 f: il. ; 29,7 cm

1. Tese (doutorado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Mecânica – Teses. 2. Sistemas Dinâmicos e Vibrações. 3. Sistemas Rotativos. 4. Perfuração de Poços. 5. Estruturas Flexíveis. 6. Viga de Cosserat I. Weber, Hans. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Dedico este trabalho a meu filho Guilherme, em ocasião do seu nascimento.

Agradecimentos

Agradeço a meus pais Luís e Livia pela influência que tiveram na minha formação acadêmica e humana. Seu amor e sua demonstração da importância dos estudos e do trabalho foram essenciais no longo processo de aperfeiçoamento pessoal; a eles devo praticamente tudo. Não poderia deixar de agradecer a meus irmãos (Oscar, María, Manuel, Percy, Soledad e Arturo) pelo amor, confiança e apoio contínuo que sempre mostraram.

Também, agradeço a minha esposa Tacila, pela revisão do texto, pela sua paciência e sua conpreensão durante os dias mais difíceis.

Um especial agradecimento ao meu orientador Prof. Hans Ingo Weber pelo apoio constante, incentivo para a realização deste trabalho, exemplo de vocação para a pesquisa e amizade. A ele serei infinitamente grato.

Aos meus amigos e colegas da PUC-Rio, em especial para Harry Saavedra, Carlos Rivas, Germaín Venero, Raúl Valdivia, Ruben Gomez, Rómulo Reis, Thiago Ritto, Priscila de Almeida, Flavia e Luis Pedro, com quem travei inúmeras conversas tecnológicas e filosóficas.

Aos meus amigos e colegas da *Technische Universität Darmstadt - Alemanha*, em especial a Melissa Hopenstedt, a Martin Kreschel, a Ana Costa Conrado e a Rosa Ramirez; da *Universidad Tecnológica Nacional de Bahía Blanca - Argentina*, em especial a Marcelo Tulio Piovan e a Fernando Bueza, com quem compartí momentos interessantes.

Ao CNPq, à CAPES, à FAPERJ e à PUC–Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Aos professores e pessoal do departamento de Engenharia Mecânica e ao tecnico do Laboratório de Vibrações, Wagner Epifanio, pela sua cooperação e ajuda.

Aos idealizadores do projeto VICONDIA, minha gratidão é para o Prof. Nicolò Bachschmid da *Politecnico di Milano*, o Prof. Richard Markert da *Technische Universität Darmstadt* e o Prof. Hans Ingo Weber da PUC-Rio.

Resumo

Coral Alamo, Fredy Jonel; Weber, Hans. **Dinâmica de Estruturas Unidimensionais Esbeltas Utilizando o Contínuo de Cosserat**. Rio de Janeiro, 2006. 124p. Tese de Doutorado — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Neste trabalho é formulado e analisado o equilíbrio estático e a dinâmica de uma viga elástica tridimensional. A teoria tridimensional empregada, que pode ser chamada de teoria de Cosserat para vigas, é exata geometricamente, ou seja, não está baseada em aproximações geométricas ou suposições mecânicas. Para a deformação da viga, assume-se a hipótese de Bernoulli e por simplicidade consideram-se relações constitutivas lineares para o material. A configuração deformada da viga é descrita através do vetor de deslocamento da curva de centróides, e uma base móvel, rigidamente unida à secção transversal da viga. A orientação da base móvel, relativa a um sistema inercial, é parametrizada usando três rotações elementares consecutivas. No teoria de Cosserat para vigas, as equações do movimento são equações diferenciais parciais não-lineares em função do tempo e de uma variável espacial. No entanto, para o equilíbrio estático, as equações tornam-se equações diferenciais ordinárias não-lineares com uma variável espacial que são resolvidas usando o método de perturbação. Da solução do equilíbrio estático, obtêm-se as funções de deslocamento da viga, em função dos deslocamentos e rotações nodais, as quais são usadas para a análise dinâmica. Para obter a dinâmica da viga usa-se a equação de Lagrange, que é formada pelas expressões da energia cinética e da energia potencial de deformação. Além disso, usa-se o método de Newmark para resolver as equações do movimento. Como aplicação, estuda-se numérica e experimentalmente a dinâmica de uma viga rotativa curva contida numa cavidade uniforme. Quando se usa a teoria de Cosserat para vigas, que leva em conta as não linearidades geométricas, a alta precisão da resposta dinâmica é obtida dividindo o sistema em poucos elementos, os quais são em número bem menor que no tradicional MEF. Essa é a principal vantagem da teoria desenvolvida.

Palavras–chave

Sistemas Dinâmicos e Vibrações; Sistemas Rotativos; Perfuração de Poços de Petróleo; Impacto; Estruturas Flexíveis; Viga de Cosserat.

Abstract

Coral Alamo, Fredy Jonel; Weber, Hans. **Dynamics of Slender One-dimensional Structures Using Cosserat Continuum**. Rio de Janeiro, 2006. 124p. PhD. Thesis — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In this work, it is formulated and analyzed the static equilibrium and the dynamics for three dimensional deformation of elastic rods. The intrinsically one-dimensional theory that is employed, which may be called the special Cosserat theory of rods, is geometrically exact, namely, it is not based upon geometrical approximations or mechanical assumptions. For the rod deformation, it is adopted the Bernoulli hypotheses and for simplicity, the linear constitutive relations are employed. The deformed configuration of the rod is described by the displacement vector of the deformed centroid curve and an orthonormal moving frame, rigidly attached to the cross-section of the rod. The orientation of the moving frame, relative to the inertial one, is related by the rotation matrix, parameterized by three elemental rotations. In the sense of Cosserat theory, the equations of motion are nonlinear partial differential equations, which are functions of time and one space variable. For the static equilibrium, however, the equations become nonlinear ordinary differential equations with one space variable, which can be solved approximately using standard techniques like the perturbation method. After the static equilibrium equation are solved, the displacement functions are obtained. These nonlinear displacement functions, which are functions of generic nodal displacements and rotations, are used for dynamical analysis. To obtain the dynamics of the Cosserat rod, it is used the Lagrangian approach, formed from the kinetic and strain energy expressions. Furthermore, the equations of motion, which are nonlinear ordinary differential equations, are solved numerically using the Newmark method. As an application, a curved rod, constrained to rotate inside a hole, is investigated numerically and experimentally. When using the Cosserat rod approach, that take into account all the geometric nonlinearities in the rod, the higher accuracy of the dynamic responses is achieved by dividing the system into a few elements, which is much less than in the traditional FEM.

Keywords

Vibration and Dynamic Systems; Rotative Systems; Oil Well Drilling; Impact; Flexible Structures, Cosserat Rod.

Conteúdo

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Lista de Símbolos

(F)	Base fixa ou inercial.
(S)	Base móvel.
${}^{S}(\bullet)$	Vetor ou matriz $(\bullet)$ escrita na base $\mathbf{S}$.
${}^{S}(\tilde{\bullet})$	Matriz antisimétrica $(\bullet)$ escrita na base $\mathbf{S}$.
$(\bar{\bullet})$	Representação adimensional da variável $(\bullet)$.
${}^{A}\mathbf{T}^{B}$	Matriz de rotação.
$\mathbf{E}$	Matriz identidade.
$\mathbf{M}$	Matriz de massa.
$\mathbf{G}$	Matriz giroscópica.
$\mathbf{K}$	Matriz de rigidez linear.
$\mathbf{K}_g$	Matriz de rigidez não linear.
$\mathbf{v}, \mathbf{u}$	Vetores de deformação linear e angular.
$\mathbf{v}^{\circ}, \mathbf{u}^{\circ}$	Vetores de referência das deformações linear e angular.
$\mathbf{e}_i, \mathbf{d}_i$	Vectores unitários $(i = 1 \cdots 3)$.
$\mathbf{n}, \mathbf{m}$	Vetores de força e momento internos.
$\mathbf{f}, \mathbf{l}$	Vetores de densidade de força e momento externos.
κ, τ	Curvatura e torção geométrica de uma curva.
φ	Variável torsional.
ϕ_x, ϕ_y, ϕ_z	Ângulos consecutivos.
$\phi_{xi}, \phi_{yi}, \phi_{zi}$	Deslocamentos angulares nodais.
x_i, y_i, z_i	Deslocamentos lineares nodais.
$\mathbf{w}$	Vetor de velocidade angular.
Ω	Velocidade angular constante.
$\mathbf{Q}$	Vetor de forças generalizadas.
$\mathbf{q}$	Vetor de coordenadas generalizadas.
$\mathbf{p}^i, \mathbf{p}^c, \mathbf{p}^d$	Vetores de força interna, concentrada e distribuída.
$\mathbf{F}_{bit}$	Força sobre a broca.
$\mathbf{T}_{bit}$	Torque sobre a broca.

La oscuridad nos envuelve a todos, pero mientras el sabio tropieza en alguna pared, el ignorante permanece tranquilo en el centro de la estancia.

Anatole France , *Escritor Frances.*