Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Diego Orlando

Absorsor Pendular para Controle de Vibrações de Torres Esbeltas

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Área de Concentração: Estruturas.

Orientador: Paulo Batista Gonçalves

Rio de Janeiro, março de 2006

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Diego Orlando

Absorsor Pendular para Controle de Vibrações de Torres Esbeltas

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Paulo Batista Gonçalves
Presidente/Orientador
Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. Carlos Magluta
Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE-UFRJ

Prof. João Luis Pascal Roehl
Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. Raul Rosas e Silva
Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. José Eugênio Leal
Coordenador(a) Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 03 de março de 2006

Diego Orlando

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade de Passo Fundo (UPF), em janeiro de 2004. Participou de projetos de iniciação científica no Laboratório de Ensaios em Sistemas Estruturais (LESE-UPF). Ingressou no curso de mestrado em Engenharia Civil da PUC-Rio em março de 2004, atuando na área de Dinâmica Estrutural e Controle de Vibrações.

Ficha Catalográfica

Orlando, Diego

Absorsor pendular para controle de vibrações de torres esbeltas / Diego Orlando ; orientador: Paulo Batista Gonçalves. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2006.

168 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia civil – Teses. 2. Torres esbeltas. 3. Absorsor dinâmico de vibrações. 4. Absorsor pendular. 5. Controle de vibrações. 6. Oscilações não-lineares. 7. Estabilidade dinâmica. I. Gonçalves, Paulo Batista. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

Dedico este trabalho como minha mais saudosa homenagem aos meus pais, Wilson Orlando e Melânia Maria Orlando, por todo amor, carinho e auxílio no decorrer da minha vida.
Para meu irmão Thiago Orlando, pela amizade e por todas as oportunidades de brincadeira e descontração.

Agradecimentos

Agradeço a vida, e àqueles que passam fazendo-a valer a pena.

Ao Professor Paulo Batista Gonçalves pelas conversas, pelo auxílio constante na realização deste trabalho, pela paciência e por sua amizade.

Aos professores do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio pelos ensinamentos transmitidos.

Aos professores que participaram da Comissão examinadora.

A meus familiares que sempre acreditaram em mim, em especial a minhas avós e a meus avôs (Fidelis Orlando e Bonifácio Popiolek, in memoriam). A minha “Tia Ninha”, que ainda está viva em minha memória.

Aos meus amigos de uma vida inteira, em especial Eduardo de Mattos, Erblai de Mattos Junior, Cleiton Batista Silverio, Henrique Marek, André Guimarães, Eduardo Zimmer, Maikel Orlando, Célio França, Taiana França, Denise Marek, Carla Dall’Agnol, Osmar Cervieri e Jaime Giolo.

Aos Professores, Engenheiros e amigos Zacarias Chamberlain e Gilnei Artur Drehmer pelo constante apoio e incentivo.

Aos colegas e amigos que colaboraram nessa Dissertação em especial Frederico Martins, André Muller, Eduardo Pasquetti, Walter Menezes e Igor Otiniano.

Aos grandes amigos Julio e Gisele Holtz, Patrícia Cunha, Fernando Ramires e Alexandre Del Savio obrigado pelo incentivo e apoio.

Aos colegas, companheiros e amigos de festa e descontração Adriano, Thiago Pecin, Ygor, Christiano, Tiago Proto e Adenilson.

Aos antigos companheiros de republica Tinho, Zé, Fred, Pasquetti e Magnus, por terem me aturado tanto tempo e aos novos colegas de apartamento Thiago, Erblai e Luis Gustavo.

A Cnpq e a Capes pelo apoio financeiro, sem os quais este trabalho não poderia ser realizado.

A PUC-Rio pela complementação da bolsa através do programa de bolsa de rendimento acadêmico.

Por fim, a todos aqueles que contribuíram de uma forma ou outra na realização desta Dissertação.

Resumo

Orlando, Diego; Gonçalves, Paulo Batista. **Absorsor Pendular para Controle de Vibrações de Torres Esbeltas.** Rio de Janeiro, 2006. 168p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Nesse trabalho, estuda-se o desempenho de um absorsor pendular no controle de vibrações de torres altas e esbeltas, ocasionadas por carregamentos dinâmicos, tais como, por exemplo, cargas ambientais. Em virtude da possibilidade de oscilações de grande amplitude, considera-se na modelagem do problema a não-linearidade do pêndulo. O principal objetivo é estudar o comportamento do sistema torre-pêndulo, submetido a um carregamento harmônico, no regime não-linear, abordando-se aspectos gerais ligados à estabilidade dinâmica. Apresenta-se, inicialmente, a formulação necessária para obter o funcional de energia do sistema coluna-pêndulo, tanto para o caso linear quanto para o caso não-linear, do qual derivam-se as equações diferenciais parciais de movimento. A partir das equações lineares, obtêm-se as freqüências naturais e modos de vibração para alguns casos relevantes de coluna. A seguir, com base na análise modal do sistema coluna-pêndulo, deriva-se um modelo de dois graus de liberdade capaz de descrever com precisão o comportamento do sistema na vizinhança da freqüência fundamental da coluna, do qual obtêm-se as equações de movimento e as equações de estado não-lineares. Uma análise paramétrica detalhada das oscilações não-lineares do sistema coluna-pêndulo demonstra que o absorsor pendular passivo pode reduzir ou amplificar a resposta da coluna. No estudo da influência da não-linearidade geométrica do pêndulo, verifica-se a importância dessa na resposta do sistema, evidenciando que a não-linearidade não pode ser desprezada nessa classe de problema. Por fim, com base nos resultados, propõe-se um absorsor pendular híbrido. Os estudos revelam que este controle é mais eficiente que o passivo e que não requer grande gasto de energia.

Palavras-chave

Torres esbeltas, absorsor dinâmico de vibrações, absorsor pendular, controle de vibrações, oscilações não-lineares, estabilidade dinâmica.

Abstract

Orlando, Diego; Gonçalves, Paulo Batista. **Vibration Control of Slender Towers with a Pendulum Absorber.** Rio de Janeiro, 2006. 168p. MSc. Dissertation - Department of Civil Engineering, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In the present work the performance of a pendulum absorber in the vibration control of tall and slender towers, caused by dynamic loads, such as, environmental loads, is studied in detail. Due to the possibility of large amplitude oscillations, the non-linearity of the pendulum is considered in the modeling of the problem. The main objective of this research is to study the behavior of the tower-pendulum system, submitted to a harmonic load, in the nonlinear regimen, with emphasis on general aspects related to its dynamic stability. It is presented, initially, the formulation necessary for the derivation of the system's energy functional, both for the linear and the nonlinear cases, from which the partial differential equations of motion are derived and the vibration frequencies and related vibration modes are obtained. Then, based on the modal analysis of the column-pendulum system, a two degrees of freedom model, capable of describing with precision the behavior of the system in the neighborhood of the fundamental frequency of the column is derived, from which the equations of motion and the nonlinear state-space equations are obtained. A detailed parametric analysis of the nonlinear oscillations of the system is carried out. It shows that the pendulum may reduce or amplify the response of the column. The results show a marked influence of the geometric not-linearity of the pendulum on the response of the system, showing that its not-linearity cannot be neglected in this class of problems. Finally, based on the results, a hybrid control approach is proposed. These studies show that this control strategy is more efficient than the passive control alone and that it does not require a large amount of energy.

Keywords

Slender towers, dynamic vibration absorber, pendulum absorber, vibration control, nonlinear oscillations, dynamic stability.

Sumário

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Lista de Símbolos

A,	área da seção transversal da coluna de seção transversal constante;
A_j,	amplitudes; constantes da função f_n;
A_0,	área da seção transversal da base da coluna de seção transversal variável;
A_x,	área da seção tranversal a uma altura x da base da coluna de seção transversal variável;
b,	número de termos necessários para descrição do campo de deslocamento com a precição desejada;
C,	coeficiente de amortecimento da coluna;
$\mathbf{C}$,	vetor de constantes;
C_d,	coeficiente de amortecimento da massa do modelo discreto;
C_i,	constantes;
C_p,	coeficiente de amortecimento do pêndulo;
C_{pd},	coeficiente de amortecimento do pêndulo no modelo discreto;
d_{ext},	diâmetro externo da seção da coluna;
ds,	elemento infinítessimal curvo;
dx,	elemento infinítessimal linear na direção do eixo x;
e,	espessura da parede da coluna;
E,	módulo de elasticidade do material da torre; energia dissipada;
E_d,	energia dissipada do sistema;
EI_0,	rigidez a flexão na base da coluna;
EI_x,	rigidez a flexão da coluna na seção x;
f,	magnitude da força de controle;
f_n,	função de aproximação para deflexão da coluna;
F,	força de excitação adimensional;
$\mathbf{F}$,	matriz de coeficientes;

FA_{ζ}, fator de amplificação de deslocamento da coluna;

FA_{ψ}, fator de amplificação de rotação da coluna;

$FA_{\zeta\_ótimo}$, fator de amplificação da coluna ótimo;

Fc, força de controle;

F_e, força de excitação para uma explosão, ou terremoto, ou rajada de vento;

F_o, amplitude da força de excitação;

g, aceleração da gravidade;

I, momento de inércia da seção transversal da coluna;

I_n, função de Bessel de terceiro tipo;

I_x, momento de inércia da seção transversal da coluna, na seção x;

l, comprimento da haste do pêndulo absorsor;

l_d, comprimento da haste do pêndulo no modelo discreto;

J_n, J_i, função de Bessel de primeiro tipo;

L, comprimento da coluna;

L_1, comprimento da extremidade engastada até a massa concentrada M_c;

L_2, comprimento da massa concentrada M_c até a extremidade livre da coluna;

$\mathbf{K}$, matriz de rigidez do sistema coluna-pêndulo;

K_d, rigidez elástica da massa do modelo discreto;

K_n, função de Bessel de quarto tipo;

K_{nl}, rigidez não-linear do pêndulo absorsor;

K_p, rigidez torsional do pêndulo absorsor;

K_{pd}, rigidez torsional do pêndulo do modelo discreto;

m, massa do pêndulo absorsor;

m_d, massa do pêndulo do modelo discreto;

M, massa por unidade de comprimento na coluna da seção transversal constante;

$\mathbf{M}$, matriz de massa do sistema coluna-pêndulo;

M_c,	massa concentrada na coluna;
M_d,	massa do modelo discreto;
M_o,	massa por unidade de comprimento na base da coluna de seção transversal variável;
M_t,	massa total da coluna;
M_x,	massa por unidade de comprimento da coluna de seção transversal variável na seção x;
n,	parâmetro que descreve a mudança de seção transversal da coluna;
N,	força axial na coluna de seção transversal constante;
N_0,	força axial na base da coluna de seção transversal variável;
N_x,	força axial na coluna de seção transversal variável na seção x;
p,	carga concentrada no topo da coluna;
$P(x,t)$,	força transversal que age na seção x em um tempo t;
q,	carga axial devida ao peso próprio da coluna de seção transversal constante;
q_i,	coordenadas generalizadas;
q_x,	carga axial devida ao peso próprio da coluna de seção transversal variável na seção x;
q_0,	carga axial devida ao peso próprio na base da coluna de seção transversal variável;
Q,	força genérica externa;
t,	tempo;
T,	energia cinética; período do sistema coluna-pêndulo;
T_{pl},	energia cinética do pêndulo;
u,	deslocamento axial;
U,	energia interna de deformação; carga de vento;
U_f,	energia da membrana gerada pela deformação axial;
U_m,	energia de flexão gerada pelo alongamento das fibras tracionadas e o encurtamento das fibras comprimidas;
v,	velocidade tangencial da massa do pêndulo;
V_p,	potencial das cargas externas;

V_{pl}, energia potencial total do pêndulo;

$Y_n(d)$, função de Bessel de segundo tipo;

x, coordenada axial;

w, deslocamento transversal da coluna;

$\overline{w}$, deslocamento transversal da coluna;

w_{es}, deslocamento estático da coluna;

W, trabalho;

W_{nc}, trabalho realizado pelas forças não conservativas;

W_p, trabalho realizado pela força harmônica;

$\frac{1}{R_0}$, curvatura da estrutura indeformada;

$\frac{1}{R_f}$, curvatura do eixo deformado;

α, relação entre a massa concentrada (M_c) e massa total da coluna (M_t); parâmetro de controle da rigidez não-linear do pêndulo;

β, parâmetro de controle da força de controle;

β_j, parâmetro de freqüência;

δ, variação dos termos; função delta de Dirac;

ε, deformação específica da linha neutra;

ε_0, parâmetro de controle da força de excitação F_e;

ζ, parâmetro adimensional de deslocamento da coluna;

ζ_s, parâmetro adimensional de deslocamento estático; amplitude da força de excitação (adimensional);

ζ_{orig}, parâmetro adimensional de deslocamento da coluna original;

η, parâmetro que descreve a mudança de seção transversal da coluna;

ϖ, relação entre a freqüência de excitação e a freqüência natural da coluna;

θ, deslocamento angular do pêndulo absorsor;

$\overline{\theta}$, deslocamento angular do pêndulo absorsor;

θ_0, condição inicial do deslocamento angular do pêndulo absorsor;

ϑ,	relação entre a freqüência natural do pêndulo e a freqüência natural da coluna;
$\vartheta_{ótimo}$,	relação ótima entre a freqüência natural do pêndulo e a freqüência natural da coluna;
μ,	relação entre a massa do pêndulo e massa da coluna;
ξ_c,	taxa de amortecimento da coluna;
ξ_p,	taxa de amortecimento do pêndulo absorsor;
$\xi_{pótimo}$,	taxa de amortecimento do pêndulo absorsor ótimo;
π,	energia potencial; pi;
ρ,	massa por unidade de volume;
τ,	parâmetro adimensional de tempo (dado por $\omega_e t$);
υ,	parâmetro de posição da massa concentrada ao longo da coluna;
$\phi(x)$,	deslocamento lateral da torre; modos de vibração;
ϕ_1, ϕ_2,	funções peso;
φ,	ângulo de fase;
χ,	mudança de curvatura;
ψ,	ângulo formado entre o eixo x e o eixo da viga; ângulo de fase;
ω,	freqüência do sistema coluna-pêndulo;
ω_c,	freqüência natural da coluna;
ω_e,	freqüência de excitação;
ω_p,	freqüência natural do pêndulo absorsor;
Γ,	função gamma;
Δ,	encurtamento na extremidade da coluna.