

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Melchisedeck Feitosa Correia**

## **Visualização da solução do campo-livre do SASSI-2000**

### **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.

Orientador: João Luis Pascal Roehl

**Rio de Janeiro, novembro de 2006**



**Melchisedeck Feitosa Correia**

## **Visualização da solução do campo-livre do SASSI-2000**

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.

**João Luis Pascal Roehl**

Orientador  
DEC / PUC-Rio

**Andréia Abreu Diniz de Almeida**

DEC / PUC-Rio

**Paulo Batista Gonçalves**

DEC / PUC-Rio

**Teresa Denyse P. Araújo**

UFC

**José Eugênio Leal**

Coordenador(a) Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 27 de novembro de 2006

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

### **Melchisedeck Feitosa Correia**

Graduou-se em engenharia civil pela Universidade Federal de Sergipe, UFS, em maio de 2004.

#### Ficha Catalográfica

Correia, Melchisedeck Feitosa

Visualização da solução do campo-livre do  
SASSI-2000 / Melchisedeck Feitosa Correia ;  
orientador: João Luis Pascal Roehl. – 2006.

105 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado em Engenharia  
Civil)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de  
Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil – Teses. 2. Análise na  
frequência. 3. Campo-livre. 4. SASSI-2000. I. Roehl,  
João Luis Pascal. II. Pontifícia Universidade Católica  
do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil.  
III. Título.

CDD: 624

Aos meus pais: Edelsio Santos Correia e Edna Feitosa Correia,  
pelos ensinamentos, compreensão e amor.

## **Agradecimentos**

A Deus por ter me concedido o dom da vida, inteligência e sabedoria;

Ao professor Roehl pela paciência, orientação acadêmica e pessoal;

A Paôla pelos esclarecimentos, sugestões e companheirismo;

Aos colegas de mestrado;

À Capes pelo apoio financeiro;

Aos meus amigos da Igreja Assembléia de Deus em Jacarepaguá pelo apoio espiritual, hospitalidade e honra;

Aos meus pais, Edelsio e Edna, aos meus irmãos, Ana Leia, Junior, Danielle e Marília, e à Cícera pelo estímulo, compreensão e amor imensurável, obrigado por serem minha família;

## Resumo

Correia, Melchisedeck Feitosa. **Visualização da solução do campo-livre do SASSI-2000**. Rio de Janeiro, 2006. 105p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Estudam-se as formas de resolução do campo-livre pelo programa SASSI-2000 na análise de problemas de interação solo-estrutura, no domínio da frequência, no caso de uma excitação sísmica. Considera-se um modelo de sítio composto por seis camadas de terreno, semi-infinitas, horizontais, apoiadas sobre um semi-espaço rígido e de uma estrutura aporticada, 3D, inserida no terreno, variando-se o nível de enterramento. Usam-se diferentes composições do campo-livre no que tange à natureza e ao ângulo de incidência das ondas que o compõem. Analisa-se, inicialmente, o comportamento do sistema no campo-livre através dos parâmetros: eleição adequada dos tipos de onda, de sua inclinação com a vertical do ponto de controle e participações relativas na composição do sistema. Focalizam-se as variações das frequências naturais, fornecidas por funções de transferência obtidas na vertical do ponto de controle, e dos respectivos modos de vibração. Repete-se a análise com a presença da estrutura variando-se o nível de enterramento da mesma e acrescentando-se, neste caso, o interesse na variação da cinemática do campo-livre além dos limites do terreno escavado. Conclui-se, finalmente, sobre as atitudes de trabalho e as seleções mais adequadas dos parâmetros para a utilização corrente do programa.

## Palavras-chave

SASSI-2000; campo-livre; análise na frequência.

## Abstract

Correia, Melchisedeck Feitosa. **Visualization of free-field solution in SASSI-2000**. Rio de Janeiro, 2006. 105p. MSc.Dissertation - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

One studies on SASSI-2000 frequency domain resolution procedures to obtain the so called free-field response for a site under seismic excitation, consideration made to the soil structure interaction. A stratified site model is considered formed by a series of six semi-infinite horizontal layers with equal height resting on a rigid viscoelastic half-space; the structure model is a 3D iso-symmetric orthogonal frame made of equal beam elements with variable soil embedment. Different free-field wave compositions, including body and surface waves, are used with variable incidence angle to the vertical Z-axis.

The behavior of the free-field solution is observed through the following parameters and selections: wave types, value of their incidence angle to the vertical of the control point on the half-space surface and their relative participation factors in the overall wave field; the structure to soil mass and stiffness ratios are kept constant. One focalizes the variation of the system natural frequency values, obtained from a series of suitably selected transfer functions on the control point vertical line, and their associated modal configurations. The run series is repeated with the structure presence under different soil embedment and the observation is extended to the soil kinematics variation outside the excavated soil.

Conclusions include the understanding of the main behavior aspects and orientation is given about the more convenient attitudes and selections to be taken.

## Keywords

SASSI-2000; free-field; frequency analysis.

## Sumário

Romanos	15
Gregos	17
1 Introdução	18
1.1. Motivação	18
1.2. Contextualização	19
1.3. Objetivos	21
1.4. Organização do texto	21
2 Revisão bibliográfica	23
2.1. Análise no domínio da frequência	23
2.1.1. Transformada discreta de Fourier	23
2.1.2. Função de transferência	28
2.2. Propagação de ondas elásticas	30
2.3. Excitação sísmica	32
3 Programa SASSI-2000	36
3.1. Descrição geral	36
3.2. Ambientação	39
3.3. Esquema de solução com diagrama de bloco	41
4 O Campo-livre, seus cenários e protagonistas.	43
4.1. Geral	43
4.2. Cenários do campo-livre no ambiente SASSI-2000	44
4.2.1. O cenário matemático	44
4.2.1.1. Ondas P e SV inclinadas	44
4.2.1.2. Ondas SH inclinadas	46
4.2.1.3. Ondas de Rayleigh, R	47
4.2.1.4. Ondas de Love, L	48
4.2.2. Cenários físicos	49
4.3. Protagonistas e seus papéis nos cenários do campo-livre	49



5 Definição da composição das características do campo-livre	58
5.1. Estratégia	58
5.2. Programa de ensaio	60
5.2.1. Ondas de corpo (P, SV e SH)	60
5.2.2. Ondas superficiais (R e L)	61
5.3. Apresentação e análise dos resultados	62
5.3.1. Ondas de corpo (P, SV e SH)	62
5.3.1.1. Relação entre os resultados apresentados pelas ondas P e SV	62
5.3.1.2. Onda SH	76
5.3.2. Ondas de superfície (Rayleigh e Love)	80
5.3.2.1. Ondas Rayleigh	80
5.3.2.2. Onda Love	84
5.4. Conclusões parciais (terreno – campo-livre)	86
6 Análise da interação solo estrutura	88
6.1. Estratégia	88
6.2. Resultados da interação solo estrutura	90
6.3. Conclusões parciais (terreno + estrutura)	97
7 Encerramento	99
7.1. Conclusões finais	99
7.2. Sugestões para prosseguimento	101
7.3. Sinopse para os usuários	101
8 Referências bibliográficas	104

## Lista de figuras

Figura 2.1 – Esquema de análise de um sistema nos domínios do tempo e da frequência. ....	23
Figura 2.2 – Série discreta. ....	25
Figura 2.3 - Deformações produzidas pelas ondas de corpo: (a) ondas P; (b) ondas SV. Fonte: W. H. Freeman and Company, apud Kramer 1996. ....	34
Figura 2.4 - Deformações causadas pelas ondas superficiais: (a) ondas de Rayleigh; (b) ondas de Love. Fonte: W. H. Freeman and Company, apud Kramer 1996. ....	35
Figura 3.1 – Modelo de subestruturação do volume flexível. (a) Sistema Total; (b) Sítio original, com indicação dos nós do volume de solo escavado e (c) Estrutura. Fonte: manual teórico do SASSI-2000. ....	37
Figura 3.2- Diagrama de bloco do SASSI-2000. Fonte: Manual do Usuário – SASSI-2000. ....	42
Figura 4.1 - Modelo de onda SV plana incidente. Fonte: manual teórico do SASSI-2000. ....	45
Figura 4.2 - Modelo de onda plana SH incidente. Fonte: manual teórico do SASSI-2000. ....	46
Figura 4.3 - Graus de liberdade para ondas de Rayleigh. Fonte: manual teórico do SASSI-2000. ....	47
Figura 4.4 - Graus de liberdade ondas de Love. Fonte: manual teórico do SASSI-2000. ....	48
Figura 4.5 - Modelo simplificado para representação do terreno: estrutura trabalhando ao cortante. ....	53
Figura 4.6 - Modelo simplificado de uma camada. ....	56
Figura 4.7 - Funções de transferência para o sistema simplificado de uma camada. ....	57
Figura 5.1 – Modelo da vertical do ponto de controle utilizado para as leituras ..	58
Figura 5.2 - 1º modo, vertical do ponto de controle, movimento de controle Z-X, solo 3. ....	65

Figura 5.3 - 2º modo, vertical do ponto de controle, movimento de controle X-Z, solo 3. ....	66
Figura 5.4 - 3º modo, vertical do ponto de controle, movimento de controle Z-X, solo 3. ....	66
Figura 5.5- 4º modo, vertical do ponto de controle, movimento de controle X-Z, solo 3. ....	67
Figura 5.6 - 5º modo, vertical do ponto de controle, movimento de controle Z-X, solo 3. ....	67
Figura 5.7 - 6º modo, vertical do ponto de controle, movimento de controle X-Z, solo 3. ....	68
Figura 5.8 - Função de Transferência, movimento de controle Z-X, onda P, $\alpha = 0.5^\circ$ , solo 3. ....	70
Figura 5.9 - Função de Transferência, movimento de controle Z-X, onda P, $\alpha = 10^\circ$ , solo 3. ....	70
Figura 5.10 - Função de Transferência, movimento de controle Z-X, onda P, $\alpha = 20^\circ$ , solo 3. ....	71
Figura 5.11 - Função de Transferência, movimento de controle Z-X, onda P, $\alpha = 30^\circ$ , solo 3. ....	71
Figura 5.12 - Função de Transferência, movimento de controle Z-X, onda P, $\alpha = 35^\circ$ , solo 3. ....	72
Figura 5.13 - Função de Transferência, movimento de controle Z-X, onda SV, $\alpha = 0.5^\circ$ , solo 3. ....	72
Figura 5.14 - Função de Transferência, movimento de controle Z-X, onda SV, $\alpha = 10^\circ$ , solo 3. ....	73
Figura 5.15 - Função de Transferência, movimento de controle Z-X, onda SV, $\alpha = 20^\circ$ , solo 3. ....	73
Figura 5.16 - Função de Transferência, movimento de controle Z-X, onda SV, $\alpha = 35^\circ$ , solo 3. ....	74
Figura 5.17 - Função de Transferência, propagação horizontal na superfície a cada 125 m, movimento de controle X-Z, onda P, $\alpha = 35^\circ$ , solo 3. ....	74
Figura 5.18 - Função de Transferência, propagação horizontal na superfície a cada 125 m, movimento de controle Z-X, onda P, $\alpha = 35^\circ$ , solo 3. ....	75
Figura 5.19 - Propagação horizontal com a frequência a cada 125 m, movimento de controle X-X, onda P, $\alpha = 35^\circ$ , solo 3. ....	75

Figura 5.20 - Propagação horizontal com a frequência a cada 125 m, movimento de controle X-Z, onda P, $\alpha = 35^\circ$ , solo 3. ....	76
Figura 5.21 - Função de transferência, movimento de controle Y-Y, onda SH, $\alpha = 0,5^\circ$ , solo 3. ....	77
Figura 5.22 - Funções de transferência, movimento de controle Y-Y, onda SH, $\alpha = 0,5^\circ$ , solo 3. ....	77
Figura 5.23 - Funções de transferência , movimento de controle Y-Y, onda SH, $\alpha = 35^\circ$ , solo 3. ....	78
Figura 5.24 - Funções de transferência , movimento de controle X-X, onda SV, $\alpha = 0,5^\circ$ , solo 3. ....	79
Figura 5.25 - Modos, vertical do ponto de controle, movimento de controle Y-Y, onda SH, $\alpha = 0,5^\circ$ , solo 3. ....	79
Figura 5.26- Função de Transferência, movimento de controle X-Z, onda R, solo 3.....	81
Figura 5.27 - Função de Transferência, movimento de controle Z-X, onda R, solo 3.....	81
Figura 5.28 - Função de Transferência, movimento de controle X-X, onda R, solo 3.....	82
Figura 5.29 - Função de Transferência, movimento de controle X-X, onda R, solo 3.....	82
Figura 5.30 - Modo fundamental, vertical do ponto de controle, movimento de controle Z-X e X-Z, ondas R e P, solo 3. ....	83
Figura 5.31 - Função de Transferência, movimento de controle Y-Y, onda R, solo 3.....	85
Figura 6.1 – Modelo da estrutura enterrada até a 3ª camada do solo e os pontos de leitura.....	89
Figura 6.2 - Modelo da estrutura no SAP2000.....	89
Figura 6.3 – Os seis primeiros modos da estrutura e os modos correspondentes às frequências de 25,20 Hz ( $9^\circ$ ) e 83,77 Hz ( $43^\circ$ ). ....	91
Figura 6.4 - 1º Modo, vertical do ponto de controle, variação do nível de enterramento, movimento de controle Z-X, onda SV, $\alpha = 20^\circ$ , solo 3.....	93
Figura 6.5 - 2º Modo, vertical do ponto de controle, variação do nível de enterramento, movimento de controle X-Z, onda SV, $\alpha = 20^\circ$ , solo 3.....	93

Figura 6.6 - 3º Modo, vertical do ponto de controle, variação do nível de enterramento, movimento de controle Z-X, onda SV, $\alpha = 20^\circ$ , solo 3.....	94
Figura 6.7 - 4º Modo, vertical do ponto de controle, variação do nível de enterramento, movimento de controle X-Z, 2º modo, onda SV, $\alpha = 20^\circ$ , solo 3.....	95
Figura 6.8 - Modos de vibração com a distância, variação do nível de enterramento, movimento de controle X-Z, onda SV, $\alpha = 20^\circ$ , solo 3.....	96
Figura 6.9 - Superfície do solo, variação com a distância para vários níveis de enterramento, movimento de controle X-Z e Z-Z, onda SV, $\alpha = 20^\circ$ , solo 3. ....	96

## Lista de tabelas

Tabela 4.1 - Características físicas do modelo .....	55
Tabela 4.2 - Frequências de referência .....	55
Tabela 5.1 – Parâmetros do campo-livre no modelo de sítio .....	61
Tabela 5.2 - Frequências do sistema para o solo 3 para $\alpha = 0,5^\circ$ .....	62
Tabela 5.3 - Frequências do sistema para o solo 3 para $\alpha = 10^\circ$ .....	63
Tabela 5.4 - Frequências do sistema para o solo 3 para $\alpha = 35^\circ$ .....	64
Tabela 6.1 - Propriedades da estrutura.....	88
Tabela 6.2 - Frequências da estrutura .....	90

## Lista de símbolos e abreviaturas

### Romanos

$a$	Aceleração
$a_{cl}$	Aceleração no topo da camada 1
$A$	Área
$NÓ\ i$	Nó no topo da camada $i$
$S.E.Rig.$	Semi-espaco rígido
$EC1$	Estrutura enterrada até a primeira camada
$EC2$	Estrutura enterrada até a segunda camada
$EC3$	Estrutura enterrada até a terceira camada
$ESUP$	Estrutura na superfície do solo
$CL$	Campo Livre
$b$	Profundidade
$b_c$	Ângulo crítico de incidência da onda SV
$[C]$	Matriz de rigidez dinâmica complexa dependente da frequência
$\bar{e}$	Vetor unitário
$E$	Módulo de elasticidade
$f$	Frequência em Hz
$F_n$	Componentes da transformada discreta de Fourier de uma série
$f_r$	Componente $r$ da série discreta
$f(t)$	Função temporal
$X-X$	Movimento de controle na direção $X$ , direção de análise $X$
$Z-Z$	Movimento de controle na direção $Z$ , direção de análise $Z$
$X-Z$	Movimento de controle na direção $X$ , direção de análise $Z$
$Z-X$	Movimento de controle na direção $Z$ , direção de análise $X$
$Y-Y$	Movimento de controle na direção $Y$ , direção de análise $Y$
$f_{o_n}$	Frequência natural $n$
$G$	Módulo de elasticidade transversal

$h$	Espessura da camada de terreno
$h(t - \tau)$	Função resposta a um impulso unitário
$H(\omega)$	Função de transferência (função resposta a um harmônico unitário)
$\bar{H}(\omega)_i$	Amplitude harmônica da resposta do modo $i$ a um vetor unitário
$I$	Momento de inércia
$J$	Momento torcional de inércia
$k$	Número de onda
$[K]$	Matriz de rigidez
$l$	Largura
$m$	Massa
$[M]$	Matriz de massa total
$M_s$	Massa de terreno por andar
$N$	Número de pontos da transformada de Fourier
$n_c$	Número de camadas de terreno
$NF$	Número total de frequências de análise
$NFreq_i$	Número da frequência de análise $i$
$\{P_b\}$	Vetor de carregamento no topo do semi-espaço
$r(\omega)$	Resposta na frequência $\omega$
$S$	Área de cisalhamento
$\mathcal{T}$	Transformada de Fourier
$\mathcal{T}^{-1}$	Transformada inversa de Fourier
$t$	Instante de tempo
$T$	Período
TDF	Transformada discreta de Fourier
TRF	Transformada rápida de Fourier
$u$	Deslocamento
$\{U\}$	Vetor de deslocamentos, na vertical do ponto de controle
$\{U'_f\}$	Vetor de movimentos do campo-livre nos nós de interação
$V$	Velocidade da onda
$V_P$	Velocidade da onda P



$V_S$	Velocidade da onda S
$\{W\}$	Modos de vibração
$x_{PC}, y_{PC}$	Distâncias x e y do ponto de controle ao nó de interação

## Gregos

$\alpha$	Ângulo de incidência das ondas
$\delta$	Fator de participação modal
$\Delta f$	Incremento de frequência
$\Delta t$	Incremento de tempo
$\gamma$	Massa específica
$\eta$	Fator de participação da onda de Rayleigh
$\lambda$	Constante de Lamé
$\mu = \nu$	Coefficiente de Poisson
$\rho$	Peso específico
$\omega$	Frequência circular
$\omega_{0i}$	Frequência circular natural i
$\xi_P$	Fator de amortecimento associado à onda P
$\xi_{SV}$	Fator de amortecimento associado à onda SV