



Paôla Regina Dalcanal

**Comentários sobre a seleção de parâmetros para
a composição do campo-livre no programa SASSI 2000**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil do Centro Técnico Científico da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas.

Orientador: Prof. João Luis Pascal Roehl

Rio de Janeiro
Abril de 2004



Paôla Regina Dalcanal

**Comentários sobre a seleção de parâmetros
para a composição do campo-livre no programa SASSI 2000**

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

Prof. João Luis Pascal Roehl

Presidente / Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Celso Romanel

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Sergio Hampshire de Carvalho Santos

DME/UFRJ

Profa. Andréia Abreu Diniz de Almeida

Pesquisador CNPq/PUC-Rio

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial

do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 01 de Abril de 2004

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

Paôla Regina Dalcanal

Graduou-se em engenharia civil pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná, UNIOESTE, campus de Cascavel, em junho de 2002. Bolsista de Iniciação Científica, PIBIC – CNPq, no período de setembro de 1999 a agosto de 2000.

Ficha Catalográfica

Dalcanal, Paôla Regina

Comentários sobre a seleção de parâmetros para a composição do campo-livre no programa SASSI 2000 / Paôla Regina Dalcanal ; orientador: João Luis Pascal Roehl. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2004.

136 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. SASSI2000. 3. Campo-livre. 4. Análise de frequência. I. Roehl, João Luis Pascal. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

Aos meus avós:
Fortunato (in memorian), Maria,
e Zaíra (in memorian),
pelos ensinamentos e imenso carinho.

Agradecimentos

À Deus;

Ao professor Roehl pela incansável orientação acadêmica e pessoal;

Ao CNPq pelo apoio financeiro;

À Eletronuclear, parceira nesse trabalho, pelo apoio financeiro e fornecimento de dados;

Ao Engenheiro Tarcísio da Eletronuclear, pelas sugestões e esclarecimentos sobre o programa SASSI2000;

À Fer, Angela, Marcos, Lucila, Daniel, Regina e Sophia, por serem minha família no Rio;

Aos colegas de mestrado, especialmente: Fabiana, Cyntia, Melissa, Marcélia, Renato, Ramires, Marcela, Cris, Alexandre;

À Andréia e à Denyse pela ajuda técnica e amizade;

À Ana Roxo, pela pronta atenção;

Aos professores da Unioeste, especialmente: Humberto, Leila e Solange, por despertarem meu interesse pela pesquisa e pelo incentivo constante;

À Vó Maria pelas orações, carinho e preocupação;

Aos meus pais, Loricezar e Sincleir, à minha irmã, Sabrina, aos tios, Vancle e Avelino, Néia e Carlão, Dina e Ico, Gládis e Inédio e aos primos, Rafael, Samuel, Mônica, Nicole, Natinho, Vini, Gildo e Paulo, pelo suporte, estímulo e principalmente amor incondicional, obrigada por serem minha família.

Resumo

Dalcanal, Paôla Regina; Roehl, João Luis Pascal. **Comentários sobre a seleção de parâmetros para a composição do campo-livre no programa SASSI 2000**. Rio de Janeiro, 2004. 136p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Estudam-se as formas de resolução do campo-livre e obtenção das funções de transferência adotadas pelo programa SASSI2000 na análise de problemas de interação solo-estrutura, no domínio da frequência, no caso de uma excitação sísmica. Propõem-se composições do campo-livre no que tange à natureza e ângulo de incidência das ondas que o compõem. Para tal, avalia-se o comportamento de um sistema simples, constituído por uma estrutura superficial com cinco graus de liberdade, apoiada em um terreno estratificado sobre um semi-espaço em rocha. Analisa-se a influência, na resposta do sistema, da variação dos seguintes parâmetros definidores do campo-livre: natureza e ângulo de incidência das ondas, propriedades topográficas e constitutivas do terreno, direção do movimento de controle e posição relativa do ponto de controle ao nó de interação. Cria-se um banco de dados em funções de transferência. Com relação à obtenção dessas funções, faz-se a análise de um sistema similar, para o qual são fornecidos diferentes conjuntos de frequências de análise e, examinando-se as soluções encontradas, propõe-se um roteiro para definição das frequências de análise utilizando exclusivamente o programa em questão, comprovando sua eficiência em estruturas reais das usinas nucleares de Angra 3 e Angra 1.

Palavras-chave

SASSI2000; campo-livre; análise na frequência.

Abstract

Dalcanal, Paôla Regina; Roehl, João Luis Pascal (Advisor). **Some comments on SASSI 2000 free field parameter selection.** Rio de Janeiro, 2004. 136p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

One examines a series of SASSI2000 runs to develop sensibility regarding the behavior of the program general solution in order to propose adequate analyst aptitudes in the choice of the analysis frequencies, as well as in the free-field wave composition and body wave incident angle selection. The control motion point localization and control motion direction options are also considered.

A five degree of freedom superficial structure model is used founded over a horizontally layered site overlaying a rock halfspace. The study is made on a large set of acceleration transfer functions to the only one interaction node obtained by the variation of the above mentioned parameters.

Recommendations are proposed to clarify and to extend the user manual chapters on the determination of the analysis frequencies and on the free-field wave composition. The efficiency of this proposal is checked on a group of examples on nuclear power plant structural models.

Keywords

SASSI2000; free-field; frequency analysis.

Sumário

1 Introdução	19
1.1. Situação geral.....	19
1.2. Situação particular	20
1.3. Objetivos	22
1.4. Organização do texto	22
2 Revisão bibliográfica	24
2.1. Análise no domínio da frequência	24
2.1.1. Transformada discreta de Fourier	24
2.1.2. Função de transferência.....	28
2.2. Propagação de ondas elásticas	30
2.3. Excitação sísmica.....	32
3 Programa SASSI2000.....	35
3.1. Descrição geral	35
3.2. Resolução do problema de campo-livre.....	37
3.2.1. Ondas P e SV inclinadas	38
3.2.2. Ondas SH inclinadas	39
3.2.3. Ondas de Rayleigh, R.....	40
3.2.4. Ondas de Love, L	41
3.3. Considerações sobre as frequências de análise.....	42
4 Definição da composição de ondas do campo-livre para o SASSI2000	46
4.1. Estratégia	46
4.2. Modelo básico.....	47
4.3. Programa de ensaio.....	48
4.3.1. Ondas de corpo (P, SV e SH).....	48
4.3.2. Ondas superficiais (R).....	49
4.4. Apresentação e análise dos resultados	50
4.4.1. Ondas de corpo (P, SV e SH).....	50

4.4.2. Ondas superficiais (R).....	75
4.5. Conclusões	83
5 Escolha do conjunto básico de frequências de análise para o SASSI2000 ..	85
5.1. Estratégia	85
5.2. Modelo	86
5.3. Programa de ensaios	87
5.4. Apresentação e análise dos resultados	91
5.4.1. Proposta para roteiro de definição de frequências no SASSI2000..	97
5.4.2. Exemplos de aplicação do roteiro	98
5.5. Conclusões	102
6 Comentários finais e sugestões	103
7 Referências bibliográficas	106
A.I Propagação de ondas elásticas	107

Lista de figuras

Figura 2.1 – Esquema de análise de um sistema nos domínios do tempo e da frequências.....	24
Figura 2.2 – Série discreta.	25
Figura 2.3 - Deslocamentos produzidos pelas ondas de corpo: (a) ondas P; (b) ondas SV. Fonte: W. H. Freeman and Company, apud Kramer 1996.....	33
Figura 2.4 - Deslocamentos causados pelas ondas superficiais: (a) ondas de Rayleigh; (b) ondas de Love. Fonte: W. H. Freeman and Company, apud Kramer 1996.....	34
Figura 3.1 – Modelo de subestruturação do volume flexível. (a) Sistema Total; (b) Sítio original, com indicação dos nós da fundação e (c) Estrutura. Fonte: manual teórico do SASSI2000.	35
Figura 3.2 - Modelo de onda SV plana incidente. Fonte: manual teórico do SASSI2000.	38
Figura 3.3 - Modelo de onda plana SH incidente. Fonte: manual teórico do SASSI2000.	40
Figura 3.4 - Graus de liberdade para ondas de Rayleigh. Fonte: manual teórico do SASSI2000.	41
Figura 3.5 - Graus de liberdade ondas de Love. Fonte: manual teórico do SASSI2000.	42
Figura 4.1 – Modelo básico: haste plana superficial, com cinco massas translacionais na direção x, sobre terreno em camadas mais 10 camadas de semi-espaco rochoso.....	47
Figura 4.2 - $FT\ddot{u}_1$ ondas P ou SV com variação de a , $n_c = 1$, $h = 2m$, rocha e $mc(x)$	51
Figura 4.3 - $FT\ddot{u}_6$ ondas P ou SV com variação de a , $n_c = 1$, $h = 2m$, rocha e $mc(x)$	51
Figura 4.4 - $FT\ddot{w}(1a6)$ onda P com variação de a , $n_c = 1$, $h = 2m$, rocha e $mc(x)$	52
Figura 4.5 - $FT\ddot{w}(1a6)$ onda SV com variação de a , $n_c = 1$, $h = 2m$, rocha e $mc(x)$	52

Figura 4.6 - $FT\ddot{u}_1$ ondas P ou SV com variação de a , $n_c = 1$, $h = 2m$, solo e $mc(x)$	54
Figura 4.7 - $FT\ddot{u}_6$ ondas P ou SV com variação de a , $n_c = 1$, $h = 2m$, solo e $mc(x)$	54
Figura 4.8 - $FT\ddot{w}(1a6)$ onda P com variação de a , $n_c = 1$, $h = 2m$, solo e $mc(x)$. 55	
Figura 4.9 - $FT\ddot{w}(1a6)$ onda SV com variação de a , $n_c = 1$, $h = 2m$, solo e $mc(x)$	55
Figura 4.10 - $FT\ddot{u}_1$ onda P com variação de a , $n_c = 1$, $h = 2m$, rocha e $mc(z)$	57
Figura 4.11 - $FT\ddot{u}_1$ onda SV com variação de a , $n_c = 1$, $h = 2m$, rocha e $mc(z)$.	57
Figura 4.12 - $FT\ddot{w}(1a6)$ onda P ou SV com variação de a , $n_c = 1$, $h = 2m$, rocha ou solo, e $mc(z)$	58
Figura 4.13 - $FT\ddot{u}(1a6)$ onda P ou SV com variação de a , $n_c = 1$, $h = 2m$, solo e $mc(x)$, estrutura sem massa.	58
Figura 4.14 - $FT\ddot{u}(1a6)$ onda P com variação de a , $n_c = 1$, $h = 2m$, solo e $mc(z)$, estrutura sem massa.	59
Figura 4.15 - $FT\ddot{u}(1a6)$ onda SV com variação de a , $n_c = 1$, $h = 2m$, solo e $mc(z)$, estrutura sem massa.	59
Figura 4.16 - Amplitudes da $FT\ddot{w}(1a6)$ onda P, $n_c = 1$, $h = 2$, rocha, $mc(x)$, e relação trigonométrica de aproximação.....	61
Figura 4.17 - Amplitudes da $FT\ddot{w}(1a6)$ onda SV, $n_c = 1$, $h = 2$, rocha, $mc(x)$, e relação trigonométrica de aproximação.....	61
Figura 4.18 - Amplitudes da $FT\ddot{u}(1a6)$ para $f = 0,05$ Hz, onda P, $mc(z)$, e relação trigonométrica de aproximação.	62
Figura 4.19 - Amplitudes da $FT\ddot{u}(1a6)$ para $f = 0,05$ Hz, onda SV, $mc(z)$, e relação trigonométrica de aproximação.....	62
Figura 4.20 - Componente vertical do movimento para onda P incidente. Fonte: Chen, 1980.....	63
Figura 4.21 - Relação entre deslocamentos, da superfície vertical, (W) e horizontal (U), para onda SV incidente. Fonte: Chen, 1980.	63
Figura 4.22 - Relação entre os deslocamentos horizontal (U) e vertical (W), da superfície, para onda P incidente. Fonte: Chen, 1980.	63

Figura 4.23 - Componente horizontal do movimentos superficial para onda SV incidente. Fonte: Chen, 1980.....	63
Figura 4.24 - $FT\ddot{u}_1$ para variação da espessura e do número de camadas de solo do terreno, SV a 30° e $mc(x)$	65
Figura 4.25 - $FT\ddot{w}(1a6)$ para variação da espessura e número de camadas de solo do terreno, onda SV a 30° e $mc(x)$	66
Figura 4.26 - $FT\ddot{u}(1a6)$ para variação da espessura e número de camadas de solo do terreno, onda P a 30° , $mc(z)$ e estrutura sem massa.	66
Figura 4.27 - Modelo simplificado para representação do terreno: estrutura trabalhando ao cortante.....	67
Figura 4.28 – $FT\ddot{u}(1a6)$ ondas SV a 10° ou 30° , $n_c = 1$, $h = 2m$, rocha, $mc(x)$ e estrutura sem massa, para valores positivos e negativos de x_{PC}	70
Figura 4.29 – $FT\ddot{w}(1a6)$ ondas SV a 10° ou 30° , $n_c = 1$, $h = 2m$, rocha, $mc(x)$ e estrutura sem massa, para valores de negativos de x_{PC}	71
Figura 4.30 – $FT\ddot{w}(1a6)$ ondas SV a 10° ou 30° , $n_c = 1$, $h = 2m$, rocha, $mc(x)$ e estrutura sem massa, para valores de positivos de x_{PC}	71
Figura 4.31 – $FT\ddot{u}(1a6)$ ondas SV a 10° ou 30° , $n_c = 1$, $h = 2m$, solo, $mc(x)$ e estrutura sem massa, para valores positivos e negativos de x_{PC}	72
Figura 4.32 – $FT\ddot{w}(1a6)$ ondas SV a 10° ou 30° , $n_c = 1$, $h = 2m$, solo, $mc(x)$ e estrutura sem massa, para valores negativos de x_{PC}	73
Figura 4.33 – $FT\ddot{w}(1a6)$ ondas SV a 10° ou 30° , $n_c = 1$, $h = 2m$, solo, $mc(x)$ e estrutura sem massa, para valores positivos de x_{PC}	73
Figura 4.34 – $FT\ddot{w}(1a6)$ ondas SV a 10° , $n_c = 1$, $h = 2$ ou $8 m$, solo, $mc(x)$ e estrutura sem massa, para valores negativos de x_{PC}	74
Figura 4.35 – $FT\ddot{w}(1a6)$ ondas SV a 10° , $n_c = 1$, $h = 2$ ou $8m$, solo, $mc(x)$ e estrutura sem massa, para valores positivos de x_{PC}	74
Figura 4.36 - $FT\ddot{u}$ ondas SV+R com variação do ângulo de incidência e do fator de participação, $n_c = 1$, $h = 2m$, rocha, $mc(x)$, estrutura sem massa.	76
Figura 4.37 - $FT\ddot{w}$ ondas SV+R com variação do ângulo de incidência e do fator de participação, $n_c = 1$, $h = 2m$, rocha, $mc(x)$, estrutura sem massa.	76
Figura 4.38 - $FT\ddot{w}$ ondas SV+R com variação do ângulo de incidência e fator de participação, $n_c = 1$, $h = 2m$, solo, $mc(x)$, estrutura sem massa.	77

Figura 4.39 – $FT\ddot{w}$ ondas SV30+R com variação do fator de participação, $n_c = 1$, rocha, $mc(x)$, estrutura sem massa, para variação da espessura da camada. .	78
Figura 4.40 - $FT\ddot{w}$ ondas SV30+R com variação do fator de participação, $n_c = 1$, solo, $mc(x)$, estrutura sem massa, para variação da espessura da camada. ...	78
Figura 4.41 - $FT\ddot{u}$ ondas P+R com variação do ângulo de incidência e fator de participação, $n_c = 1$, $h = 2m$, rocha, $mc(z)$, estrutura sem massa.	80
Figura 4.42 - $FT\ddot{w}$ ondas P+R com variação do ângulo de incidência e fator de participação, $n_c = 1$, $h = 2m$, rocha, $mc(z)$, estrutura sem massa.	80
Figura 4.43 - $FT\ddot{u}$ ondas P+R com variação do ângulo de incidência e fator de participação, $n_c = 1$, $h = 2m$, solo, $mc(z)$, estrutura sem massa.....	81
Figura 4.44 - $FT\ddot{w}$ ondas P+R com variação do ângulo de incidência e fator de participação, $n_c = 1$, $h = 2m$, solo, $mc(z)$, estrutura sem massa.....	81
Figura 4.45 – $FT\ddot{u}$ ondas P30+R com variação do fator de participação, $n_c = 1$, rocha, $mc(z)$ estrutura sem massa, para variação da espessura da camada. ..	82
Figura 4.46 - $FT\ddot{u}$ ondas P30+R com variação do fator de participação, $n_c = 1$, solo, $mc(z)$, estrutura sem massa, para variação da espessura da camada. ...	82
Figura 5.1 – Modelo de estudo: haste superficial com cinco massas translacionais na direção x.....	86
Figura 5.2 – Modelo estrutural do reator de Angra 3. Fonte: Sampaio, 1999.....	89
Figura 5.3 – Modelo da base do reator de Angra 3. Fonte: Sampaio, 1999.....	90
Figura 5.4 – Modelo da caixa coletora de serviços de Angra 1.....	90
Figura 5.5 – $FT\ddot{u}_4$ com 20 frequências de análise.	93
Figura 5.6– $FT\ddot{u}_3$ com 20 frequências de análise.....	93
Figura 5.7 - Configuração modal do modelo apresentado na Figura 5.1.	94
Figura 5.8 – $FT\ddot{u}_6$ com variação da quantidade de frequências de análise indicadas em cada intervalo.....	96
Figura 5.9 – $FT\ddot{u}_6$ Função com variação da quantidade de frequências de análise indicadas em cada intervalo.....	96
Figura 5.10 – $FT\ddot{u}_6$ com diferentes frequências naturais.....	97
Figura 5.11 – $FT\ddot{u}_{157}$, do prédio do reator, para os dois conjuntos de frequências de análise.	99
Figura 5.12 - $FT\ddot{u}_{441}$, da caixa coletora,, $mc(y)$, para os dois conjuntos de frequências de análise.....	101

Figura 5.13 - $FT\ddot{v}441$, da caixa coletora, $mc(y)$, para os dois conjuntos de frequências de análise.....	101
Figura 5.14 - $FT\ddot{w}441$, da caixa coletora, $mc(y)$, para os dois conjuntos de frequências de análise.....	102

Lista de tabelas

Tabela 4.1 – Propriedades dos materiais.	48
Tabela 4.2 – Parâmetros de campo-livre para estudo da influência da natureza da onda e do ângulo de incidência.....	48
Tabela 4.3 – Parâmetros de campo-livre para estudo da influência da espessura e número de camadas do terreno.	49
Tabela 4.4 – Resumo dos valores das FT obtidas para cada onda com seus respectivos ângulos de incidência. $n_c = 1$, $h = 2\text{m}$, rocha e $mc(x)$	53
Tabela 4.5 – Frequências e acelerações de pico das FT_{i1} para os três casos de terreno estudados, onda SV a 30° e $mc(x)$	65
Tabela 5.1 – Propriedades dos materiais.	86
Tabela 5.2 - Dados de entrada do solo no módulo SITE1	88
Tabela 5.3 - Relações de frequências de análise para o nó 6.....	91
Tabela 5.4 - Relações de frequências de análise para o nó 5.....	91
Tabela 5.5 - Relações de frequências de análise para o nó 4.....	92
Tabela 5.6 - Relações de frequências de análise para o nó 3.....	92
Tabela 5.7 - Relações de frequências de análise para o nó 2.....	92
Tabela 5.8 - Conjuntos de frequências de análise para o prédio do reator de Angra 3.	99
Tabela 5.9 - Conjunto final de frequências de análise para a caixa coletora de Angra 1.	100

Lista de símbolos e abreviaturas

Romanos

a	Aceleração
A	Área
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 longitudinal
E_c	Módulo de elasticidade longitudinal confinado
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
$FT\ddot{u}_n$	Função de transferência em aceleração para a direção x no nó n
$FT\ddot{v}_n$	Função de transferência em aceleração para a direção y no nó n
$FT\ddot{w}_n$	Função de transferência em aceleração para a direção z no nó n
f_{o_n}	Frequência natural n
$f_{0_i} SI$	Frequência do modo i fornecida pelo SASSI2000
$f_{0_i} SI_{100}$	Frequência do modo i fornecida pelo SASSI2000 para 100 frequências de análise.
G	Módulo de elasticidade transversal
h	Espessura da camada de terreno
$h(t - t)$	Função resposta a um impulso unitário

$H(\mathbf{w})$	Função de transferência (função resposta a um harmônico unitário)
$\bar{H}(\mathbf{w})_i$	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_h	Coeficiente de rigidez horizontal
k_v	Coeficiente de rigidez vertical
k_m	Coeficiente de rigidez por metro
$[K]$	Matriz de rigidez
l	Largura
m	Massa
$[M]$	Matriz de massa total
m_c	Direção do movimento de controle
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-espço
RF_i	Relação entre frequências de análise do modo i
$r(\mathbf{w})$	Resposta na frequência ?
S	Área de cisalhamento
T	Transformada de Fourier
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
\vec{v}	Vetor de deslocamento relativo
$\dot{\vec{v}}$	Vetor de velocidade relativa
$\ddot{\vec{v}}$	Vetor de aceleração relativa
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

α	Ângulo de incidência das ondas
δ	Fator de participação modal
Df	Incremento de frequência
Dt	Incremento de tempo
γ	Massa específica
η	Fator de participação da onda de Rayleigh
λ	Constante de Lamé
$\mu = \nu$	Coefficiente de Poisson
ρ	Peso específico
ω	Frequência circular
ω_{0i}	Frequência circular natural i
ξ_P	Fator de amortecimento associado à onda P
ξ_{SV}	Fator de amortecimento associado à onda SV