



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA POLITÉCNICA
Curso de Engenharia Civil
Departamento de Estruturas

ESTUDO DE AMPLIFICAÇÃO SÍSMICA EM SOLOS ESTRATIFICADOS

ANDRÉ WAINER CHALRÉO

Projeto de Graduação apresentado ao corpo docente do Departamento de Estruturas da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Aprovado por:

Silvio de Souza Lima
Prof. Associado, D.Sc., EP/UFRJ (Orientador)

Sérgio Hampshire de Carvalho Santos
Prof. Associado, D.Sc., EP/UFRJ (Co-orientador)

Ricardo Valeriano Alves
Prof. Adjunto, D.Sc., EP/UFRJ

Janeiro/2012

Agradecimentos

Com a ajuda de D'us.

Dizem que escrever uma monografia de final de curso é um trabalho solitário. Se por um lado isso é verdade, por outro, não seria possível ter chegado até aqui sem a ajuda e o incentivo de certas pessoas fundamentais.

Agradeço, então, em primeiro lugar, à minha noiva Tamara, companheira de sempre e, em breve, minha cúmplice de vida. Mesmo estando longe, acompanhou de perto os meus anseios e cada desafio superado ao longo desta jornada.

Sou grato, também, aos meus pais, certamente a fonte genética da minha aptidão para a engenharia civil.

À minha irmã Carla, minha vizinha de porta, pelo apoio moral nesses últimos meses.

Ao professor e orientador Silvio de Souza Lima e ao professor e co-orientador Sérgio Hampshire de Carvalho Santos, agradeço pelos ensinamentos e orientações a mim despendidos.

Ao professor Ricardo Valeriano Alves, pelo grande apoio fornecido em um período tão difícil, possibilitando a conclusão deste projeto.

À FAPERJ, por incentivar o desenvolvimento deste projeto, financiando-o por meio de bolsa de iniciação científica.

Por último, e mais importante, a D'us, pois sem ele sequer estaríamos aqui.

Resumo

Os objetivos deste projeto são:

- 1) Desenvolver procedimento automático (programa de computador), com interface gráfica e facilidades de uso, para determinação da resposta correspondente à amplificação sísmica de solos estratificados submetidos à ação sísmica.
- 2) Estudar os procedimentos disponíveis para a consideração da amplificação sísmica.

Ele é constituído das seguintes etapas:

- 1) Introdução: Realizou-se uma breve explicação sobre a análise sísmica, definindo uma série de conceitos relacionados a esse tema, ambientando o leitor ao tema estudado.
- 2) Desenvolvimento teórico: Explicou-se a teoria envolvida no programa desenvolvido neste projeto, o SHAKE BR. De modo geral, estudou-se o caso de propagação de ondas no solo, geradas por sismos, calculando os efeitos nele.
- 3) SHAKE BR: Apresentou-se o programa SHAKE BR, explicando de maneira simplificada seu funcionamento e utilização. Indicou-se como foi feito o desenvolvimento do programa, adaptado do programa SHAKE, realizando conversão do código fonte de Fortran para Pascal e desenvolvimento da interface gráfica em Delphi. Comparou-se o SHAKE BR com o SHAKE original, comprovando o funcionamento do programa desenvolvido neste projeto.
- 4) Comparação entre análise pelo SHAKE BR e pela NBR 15421:2006. Fez-se uma comparação entre a análise realizada para obtenção de espectros de resposta de aceleração utilizando o SHAKE BR e o método simplificado apresentado pela NBR 15421. Comentaram-se os resultados obtidos, verificando se estão compatíveis com o esperado.
- 5) Conclusão: Avaliou-se o projeto realizado, e propuseram-se possibilidades de continuidade a serem dadas para este trabalho.

Índice

1. Introdução	1
2. Desenvolvimento Teórico	7
2.1. Introdução.....	7
2.2. Propagação da onda no solo	7
2.3. Propagação unidimensional da onda e análise de resposta do solo.....	10
2.3.1. Análise de resposta do terreno utilizando FFT.....	15
2.3.2. Análise de resposta do terreno não-linear no domínio do tempo	16
2.3.3. Análise de resposta do terreno linear equivalente no domínio do tempo	18
3. SHAKE BR	20
3.1. Introdução.....	20
3.1.1. Descrição do programa	21
3.2. Conversão de Fortran para Pascal	23
3.3. Interface Gráfica do SHAKE BR.....	29
3.3.1. Introdução	29
3.3.2. Utilização do programa SHAKE BR.....	30
3.3.2.1. Menus iniciais.....	30
3.3.2.2. Entrada de dados.....	33
3.3.2.3. Saída de dados	47
3.3.2.4. Sobre o SHAKE BR	50
3.4. Comparação entre o SHAKE BR e o SHAKE original.....	50
4. Comparação entre análise pelo SHAKE BR e pela NBR 15421:2006	54
4.1. Introdução.....	54
4.2. Obtenção do espectro de projeto pela NBR 15421	55
4.3. Obtenção do espectro de resposta de acelerações pelo SHAKE BR.....	56
4.4. Comparação de resultados	57
5. Conclusão.....	63
Referências / Bibliografia	64

Índice de Figuras

Figura 1.1. Variação do PGA horizontal em relação à variação da magnitude e da distância ao epicentro.	2
Figura 1.2. Variação do PGA horizontal em relação à variação da profundidade e da distância ao epicentro.	2
Figura 1.3. Mapeamento da aceleração sísmica horizontal característica no Brasil para terrenos da classe B (“Rocha”).	3
Figura 1.4. Classe do terreno.	4
Figura 1.5. Variação do espectro de resposta de projeto (S_a/A_{gs0}) em função do período (T).	5
Figura 2.1. Tensões do elemento infinitesimal na direção do eixo x.	7
Figura 2.2. Principais tipos de ondas sísmicas.	10
Figura 2.3. Terminologias usadas na análise de resposta do solo: (1) solo depositado sobre camada rochosa; e (2) sem solo depositado sobre camada rochosa.	11
Figura 2.4. Análise unidimensional da propagação de onda em solo elástico linear.	11
Figura 2.5. Módulo de função de transferência para a camada elástica não-amortecida.	13
Figura 2.6. Módulo de função de transferência para a camada elástica amortecida.	15
Figura 2.7. Modos correspondentes às três primeiras frequências naturais.	15
Figura 2.8. Elementos de viga solicitados por cisalhamento para análise unidimensional da propagação de onda S-H.	16
Figura 2.9. Relação não-linear de força-deslocamento.	17
Figura 2.10. Loop histerético devido a cargas cíclicas.	18
Figura 2.11. Variação do módulo de cisalhamento equivalente em relação à deformação.	18
Figura 2.12. Variação da razão de amortecimento equivalente em relação à deformação.	19
Figura 3.1. Exemplo de inserção do código em Fortran como comentário.	23
Figura 3.2. Declaração do tipo “complex”.	24
Figura 3.3. Procedimentos para soma e raiz quadrada de números complexos.	24
Figura 3.4. Exemplos de variáveis globais que tiveram de ser declaradas no início do programa, diferentemente do código em Fortran.	25
Figura 3.5. Exemplo de remoção de comando “go to”.	26
Figura 3.6. Funções de conversão de vetores de números complexos para reais e vice-versa – Parte 1.	26
Figura 3.7. Funções de conversão de vetores de números complexos para reais e vice-versa – Parte 2.	27
Figura 3.8. Comparação da quantidade de variáveis declaradas em Fortran e Pascal – Parte 1.	27
Figura 3.9. Comparação da quantidade de variáveis declaradas em Fortran e Pascal – Parte 2.	28

Figura 3.10. Comparação entre o SHAKE em Fortran e em Pascal.....	28
Figura 3.11. Conteúdo do programa SHAKE BR.	30
Figura 3.12. Tela de entrada do programa SHAKE BR.	31
Figura 3.13. Página principal do programa SHAKE BR.....	31
Figura 3.14. Menu principal do programa SHAKE BR.	32
Figura 3.15. Sub-menu do {002} Input File.	32
Figura 3.16. Sub-menu do {003} Output File.....	32
Figura 3.17. Opções referentes ao {001} Options Record.....	33
Figura 3.18. Botões padrões utilizados nas opções de 1 a 11.	33
Figura 3.19. Entrada de dados referente às propriedades dinâmicas do solo ({008} Option 1).....	35
Figura 3.20. Representação esquemática do caso estudado.	36
Figura 3.21. Entrada de dados referente ao perfil do terreno ({009} Option 2).....	37
Figura 3.22. Exemplo de seleção utilizando combo-box.....	38
Figura 3.23. Acelerograma para o caso estudado, correspondente ao arquivo DIAM.ACC.	38
Figura 3.24. Entrada de dados referente ao acelerograma de “input” ({010} Option 3).	39
Figura 3.25. Janela de seleção do acelerograma ({047} Input Motion File).	40
Figura 3.26. Entrada de dados referente à atribuição da geração do acelerograma ({011} Option 4). 41	
Figura 3.27. Entrada de dados referente ao número de iterações e à razão entre deformação uniforme equivalente e deformação máxima do acelerograma ({012} Option 5).	41
Figura 3.28. Entrada de dados referente ao pedido do usuário de computação das acelerações no topo das camadas especificadas ({013} Option 6).....	42
Figura 3.29. Entrada de dados referente ao pedido do usuário de computação do histórico temporal de tensão cisalhante e de deformações no topo da subcamada especificada ({014} Option 7).....	43
Figura 3.30. Comentário existente na aba correspondente à computação do histórico temporal dos deslocamentos ({015} Option 8).....	44
Figura 3.31. Entrada de dados referente à computação do espectro de resposta ({016} Option 9). ...	44
Figura 3.32. Entrada de dados referente à computação do espectro de amplificação ({017} Option 10).	45
Figura 3.33. Entrada de dados referente à computação do espectro de Fourier ({018} Option 11)....	46
Figura 3.34. Janela de seleção do arquivo de saída ({007} Preview).....	47
Figura 3.35. Tela de visualização dos arquivos de saída.	48
Figura 3.36. Janela de exportação dos arquivos de saída.	49
Figura 3.37. Opções de extensão de arquivo.....	49
Figura 3.38. Informações sobre o programa SHAKE BR.....	50
Figuras 3.39. Arquivo de entrada do SHAKE original INP.DAT – parte 1.....	50

Figuras 3.40. Arquivo de entrada do SHAKE original INP.DAT – parte 2.....	51
Figuras 3.41. Arquivo de entrada do SHAKE original INP.DAT – parte 3.....	52
Figura 3.42. Comparação entre resultados do SHAKE BR e do SHAKE original.	52
Figura 4.1. Representação esquemática do problema estudado.	54
Figura 4.2. Tabela da NBR 15421 para obtenção dos fatores de amplificação sísmica no solo.	55
Figura 4.3. Cálculo de ags_0 e ags_1 , segundo o item 6.2 da NBR 15421.	55
Figura 4.4. Tela de entrada do sistema DinaSis.	56
Figura 4.5. Acelerograma gerado artificialmente pelo ProgSis, segundo a NBR 15421.....	56
Figura 4.6. Tabela de conversão de unidades.	57
Figura 4.7. Comparação entre resultados do SHAKE BR e da NBR 15421.....	58
Figura 4.8. Tabela com Classe do solo e velocidade para os nove casos estudados a seguir.	59
Figura 4.9. Comparação entre resultados do SHAKE BR e da NBR 15421 para os solos de Classe C.	59
Figura 4.10. Comparação entre resultados do SHAKE BR e da NBR 15421 para os solos de Classe D.....	60
Figura 4.11. Comparação entre resultados do SHAKE BR e da NBR 15421 para os solos de Classe E.	60
Figura 4.12. Comparação entre resultados do SHAKE BR e da NBR 15421 para os solos de Classe C, para a faixa de variação do período de 0,0s a 2,0s.	61
Figura 4.13. Comparação entre resultados do SHAKE BR e da NBR 15421 para os solos de Classe D, para a faixa de variação do período de 0,0s a 2,0s.....	61
Figura 4.14. Comparação entre resultados do SHAKE BR e da NBR 15421 para os solos de Classe E, para a faixa de variação do período de 0,0s a 2,0s.	62

Índice de consulta para o SHAKE BR

{001} Options Record	32
{002} Input File	32
{003} Output File	32
{004} About	32
{005} Create	32
{006} Process.....	32
{007} Preview	32
{008} Option 1	33
{009} Option 2	33
{010} Option 3	33
{011} Option 4	33
{012} Option 5	33
{013} Option 6	33
{014} Option 7	33
{015} Option 8	33
{016} Option 9	33
{017} Option 10	33
{018} Option 11	33
{019}  First Record.....	34
{020}  Prior Record.....	34
{021}  Next Record.....	34
{022}  Last Record	34
{023}  Insert Record	34
{024}  Delete Record.....	34
{025}  Save Edit	34

{026}  Cancel Edit.....	34
{027} Modulus.....	35
{028} Damping.....	35
{029} Used in this Analysis?	35
{030} X of ΣX	35
{031} Modulus Strain.....	35
{032} Modulus Reduction	35
{033} Damping Strain.....	35
{034} Damping Reduction	35
{035} Identification.....	37
{036} Sublayer	37
{037} Soil Type.....	37
{038} Select Soil Type	37
{039} Thickness	37
{040} Max Shear Modulus.....	37
{041} Initial Estimate Damping.....	37
{042} Mass density	37
{043} Max Shear Wave Velocity	37
{044} Number of Acceleration Values to be Read.....	39
{045} Number of Values for use in Fourier Transform	39
{046} Time Interval Between Acceleration Values.....	39
{047} Input Motion File.....	39
{048} Format Reading Acceleration.....	39
{049} Multiplication Factor	39
{050} Maximum Acceleration	39
{051} Maximum Frequency.....	40
{052} Number of Header Lines.....	40
{053} Number of Acceleration Values per Line	40
{054} Sublayer	41
{055} Object Motion	41
{056} Save the Strain Compatible Soil Properties after the Final Iteration	42
{057} Number of Iterations.....	42
{058} Ratio of Equivalent Uniform Strain Divided by Max Strain.....	42

{059} Soil Type.....	42
{060} Select Sublayer	43
{061} Object Motion	43
{062} Acceleration Output	43
{063} Soil Type.....	43
{064} Select Sublayer	43
{065} Strain/Stress.....	43
{066} Time History.....	43
{067} Number of Values to Save	43
{068} Identification.....	43
{069} Sublayer	45
{070} Object Motion	45
{071} Number of Damping Ratios	45
{072} Gravity Acceleration	45
{073} Damping Ratio.....	45
{074} First Sublayer	45
{075} Second Sublayer	45
{076} Object Motion for First Layer.....	45
{077} Object Motion for Second Layer	45
{078} Frequency Step	46
{079} Identification.....	46
{080} Soil Type.....	46
{081} Select Sublayer	46
{082} Object Motion	46
{083} Number Of Times the Spectrum is to be Smoothed	46
{084} Number of Values.....	46
{085} Header	47
{086} Date and Time	47
{087} Page X of Σ X Pages	47
{088} View	47
{089} Output	47
{090} Prior Page.....	49
{091} Next Page.....	49
{092} Zoom in (+).....	49

{093} Zoom out (-)	49
{094} Print	49
{095} File	49
{096} Save as type	49

1. Introdução

Visando ambientar o leitor à análise sísmica, e à compreensão de conceitos presentes no programa SHAKE BR, objeto principal desse projeto de graduação, será feita uma breve introdução de assuntos relacionados a esse tema, apresentados principalmente na disciplina Análise Sísmica, oferecida para o curso de pós-graduação (mestrado profissional) da UFRJ.

Os terremotos são eventos naturais que podem ser capazes de causar desastres, ocasionando enorme perda material e quantidade de vidas perdidas, cuja previsão de ocorrência é feita com base estatística em função de registros anteriores. Pode-se definir terremotos, ou sismos, como movimentos de camadas de solos em todas as direções, provocados por liberação súbita de energia na crosta terrestre. Essa liberação de energia pode ocorrer devido ao deslocamento relativo de placas tectônicas, erupções vulcânicas, rupturas de cavernas subterrâneas e explosões provocadas pelo homem. 95% dos sismos ocorrem nas bordas das placas tectônicas, mas podem ocorrer mesmo no interior dessas ("inter-plate"). Assim, a maioria dos locais está sujeita à possibilidade de ocorrência de terremotos.

Segundo a Teoria Elástica de Reid, quando a energia de deformação é liberada em eventos sísmicos, parte da energia é liberada na ruptura da rocha, parte como calor e parte como ondas elásticas. Essas ondas se propagam causando deformações e esforços associados em todas as direções, sendo essencial estudar o comportamento do solo durante o sismo. Os projetos de engenharia devem considerar os sismos, garantindo que o risco de colapso seja aceitável dentro de certa probabilidade de ocorrência. Os danos causados são decorrentes de projeto ou sistema estrutural inadequados, ruptura da fundação e combinação de outros efeitos.

Alguns conceitos presentes nesse trabalho serão definidos de maneira simples, visando facilitar a leitura e entendimento do mesmo: Hipocentro (ou foco) é o ponto, abaixo da superfície, onde tem início a ruptura da rocha, dando origem ao terremoto. Epicentro é a projeção do foco na superfície. O terremoto pode ser classificado quanto à profundidade do foco em relação à superfície como: superficial (menor que 15km), intermediário (menor que 50km) ou profundo (maior que 300km).

A magnitude do terremoto é uma medida instrumental, quantitativa, que representa a energia liberada pelo sismo. Já a intensidade é uma medida não instrumental que avalia o impacto causado pelo sismo na população, estruturas e terreno. As escalas de magnitude quantificam a energia liberada, sendo que a medida é feita com base na amplitude máxima das ondas de volume ou de superfície (existem, também, escalas de intensidade, qualitativas). A mais famosa das escalas de magnitude é a Richter (ou de magnitude local), calculada com o logaritmo na base 10 da amplitude máxima do registro sísmico, em microns, registrada por um sismógrafo do tipo Wood-Anderson, a uma distância de 100km do epicentro do terremoto. Um sismo com magnitude 5 ou maior na escala Richter é considerado potencialmente destrutivo. Outras escalas de magnitude utilizadas na análise sísmica são as

de: magnitude de volume ou corpo, magnitude de superfície e magnitude de momento. Com as magnitudes do sismo, calcula-se a quantidade de energia liberada.

Modelos de atenuação são expressões analíticas que fornecem a variação dos movimentos na superfície, decorrentes de um terremoto, em função da magnitude, distância do local estudado ao foco ou epicentro do sismo, tipo e geometria do solo, incertezas e erros. Eles consideram a perda de energia que as ondas sísmicas experimentam enquanto caminham da fonte até o local de interesse. Os modelos de atenuação podem ser baseados em diferentes parâmetros do terreno, como a aceleração, velocidade ou deslocamento máximos (PGA, PGV ou PGD, respectivamente); ou aceleração, velocidade ou deslocamento espectral. De forma simplificada, pode-se dizer que quanto maior a magnitude do terremoto, maior o PGA horizontal; quanto maior a distância do local estudado ao epicentro, menor o PGA horizontal; e quanto maior a profundidade local, menor o PGA horizontal, como pode ser indicado na Figura 1.1 e na Figura 1.2, segundo Souza Lima [1], a seguir. Além disso, quanto mais resistente for o solo, maior será a velocidade de propagação das ondas sísmicas, logo maior será a frequência. Os modelos de atenuação indicados para a análise sísmica variam em função da região da ocorrência do terremoto (Existem modelos de atenuação específicos para o Japão, outros para o mundo em geral, ou para o leste americano, ou para o oeste, etc). Modelos de atenuação seriam aplicáveis no caso brasileiro, mas ainda não foram criados.

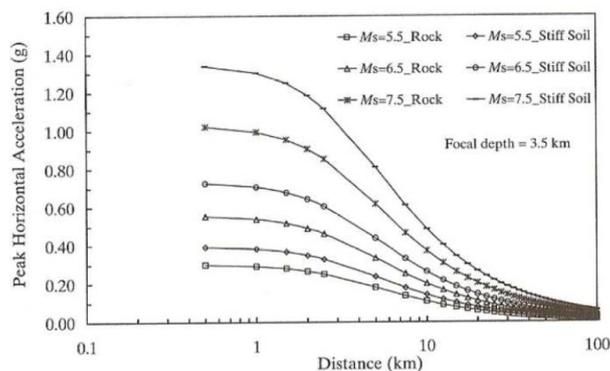


Figura 1.1. Variação do PGA horizontal em relação à variação da magnitude e da distância ao epicentro.

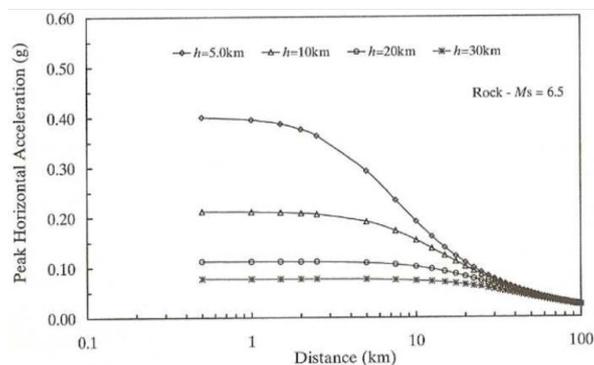


Figura 1.2. Variação do PGA horizontal em relação à variação da profundidade e da distância ao epicentro.

As características do solo influenciam a duração e frequência do terremoto. Em geral, fundações em rocha estão expostas a excitações de alta frequência (períodos pequenos), mas se forem em terreno fraco ou mole, estarão expostas a excitações de baixa frequência (períodos longos). Dependendo do tipo de solo, a velocidade de propagação das ondas de cisalhamento varia.

As frequências naturais da construção devem ser mantidas o mais afastado possível da frequência do solo local, para evitar a amplificação do efeito sísmico na construção, que será estudada neste trabalho com maior profundidade.

A norma brasileira [2] apresenta um mapeamento que permite adotar valores de PGA em função da localidade em que a obra será realizada no Brasil, conforme mostrado na Figura 1.3:

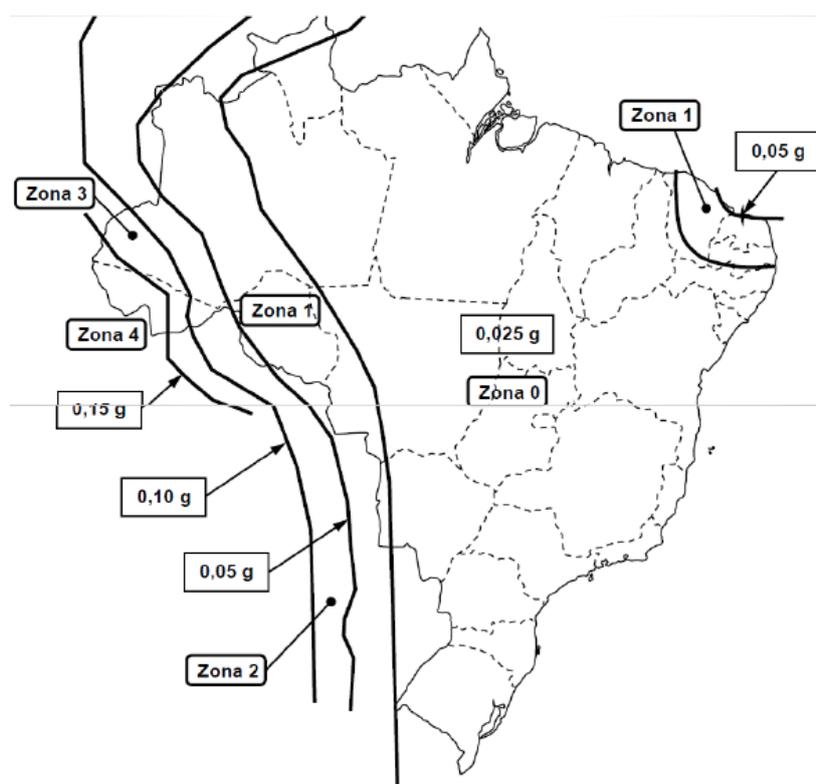


Figura 1.3. Mapeamento da aceleração sísmica horizontal característica no Brasil para terrenos da classe B (“Rocha”).

A norma brasileira também organiza os tipos de solo em Classes do terreno para diversos tipos de solo ou rocha em função da velocidade média de propagação da onda de cisalhamento e/ou a resistência do terreno medida em ensaios SPT, conforme apresentado na Figura 1.4 a seguir. Dessa maneira, é possível obter propriedades dinâmicas do terreno, como os fatores de amplificação sísmica, de forma mais prática.

Classe do terreno	Designação da Classe do terreno	Propriedades médias para os 30 m superiores do terreno	
		\bar{v}_s	\bar{N}
A	Rocha sã	$\bar{v}_s \geq 1500$ m/s	(não aplicável)
B	Rocha	$1500 \text{ m/s} \geq \bar{v}_s \geq 760$ m/s	(não aplicável)
C	Rocha alterada ou solo muito rígido	$760 \text{ m/s} \geq \bar{v}_s \geq 370$ m/s	$\bar{N} \geq 50$
D	Solo rígido	$370 \text{ m/s} \geq \bar{v}_s \geq 180$ m/s	$50 \geq \bar{N} \geq 15$
E	Solo mole	$\bar{v}_s \leq 180$ m/s	$\bar{N} \leq 15$
	-	Qualquer perfil incluindo camada com mais de 3 m de argila mole	
F	-	Solo exigindo avaliação específica, como: 1. Solos vulneráveis à ação sísmica, como solos liquefazíveis, argilas muito sensíveis e solos colapsíveis fracamente cimentados; 2. Turfa ou argilas muito orgânicas; 3. Argilas muito plásticas; 4. Estratos muito espessos (≥ 35 m) de argila mole ou média.	

Figura 1.4. Classe do terreno.

Segundo Souza Lima [3], “um gráfico que mostre a resposta máxima, seja em termos de deslocamentos, velocidades, acelerações, ou qualquer outra grandeza, em função do período natural ou da frequência natural para um sistema de um grau de liberdade, considerando uma determinada excitação é chamado de espectro de resposta”. O período natural da estrutura pode ser obtido por um processo de extração modal que considere as características mecânicas e de massa da estrutura. Os espectros de resposta possuem grande importância na análise sísmica, em especial espectros de resposta para aceleração da base, pois facilitam a caracterização e compreensão dos efeitos dos sismos nas estruturas. Cada sismo possui um determinado espectro de resposta, em função da movimentação que ocorreu na formação rochosa e do tipo de solo em que ocorreu. Assim, o conhecimento do espectro de resposta de um determinado terremoto somente, não é informação suficiente para que possa ser utilizado como dado em algum projeto.

Surgiu, então, o conceito de espectro de projeto, que é formado a partir de um conjunto de espectros de respostas de sismos que já ocorreram no local estudado, utilizando conceitos estatísticos, garantindo uma pequena probabilidade de ocorrência de espectros de respostas de maiores proporções que o espectro de projeto. Esse sim é a informação necessária para ser utilizada de maneira direta como dado de um projeto. A norma brasileira construiu um espectro de respostas estudando o período de recorrência de sismos e suas respectivas acelerações que contempla eventos que tenham período de recorrência de 475 anos para todas as acelerações e períodos na região em questão. O espectro de projeto da norma brasileira é mostrado na Figura 1.5:

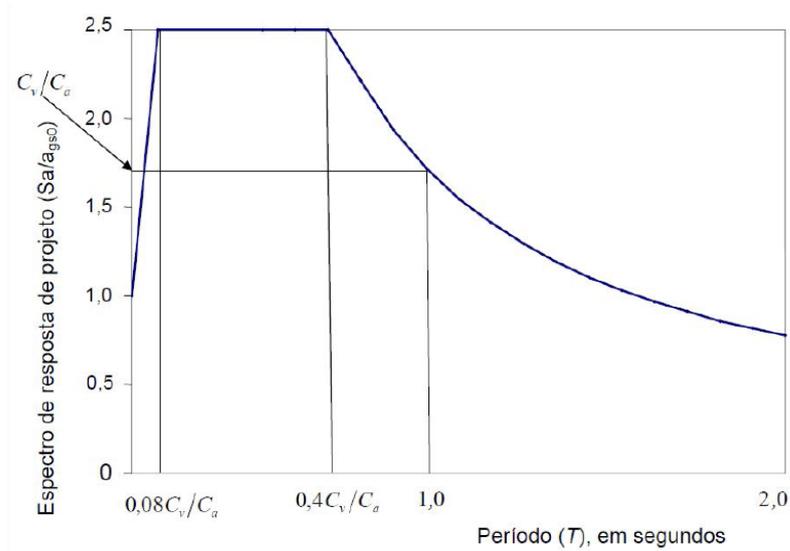


Figura 1.5. *Variação do espectro de resposta de projeto (S_a/A_{gs0}) em função do período (T).*

C_a e C_v são fatores de amplificação sísmica no solo, em função da Classe do terreno e do valor da aceleração sísmica horizontal característica (que por sua vez é função da zona sísmica em que se encontra, conforme apresentado na Figura 1.3). Calculando C_a e C_v , é possível traçar o espectro de resposta para a região de interesse, segundo a norma brasileira.

Como foi dito, o estudo dessas grandezas é essencial na análise sísmica, para determinar os esforços aos quais as estruturas estarão submetidas. Preferencialmente, as estruturas deverão ser projetadas de maneira cuidadosa para resistir a esses esforços buscando garantir a continuidade na transferência de cargas, evitando a concentração de tensões; manter a relação altura-base pequena, minimizando a tendência ao tombamento; adotar altura dos andares iguais, equalizando rigezas de colunas e paredes; garantir simetria de forma em planta, minimizando a torção; equalizar resistência em relação a ambos os eixos, eliminando excentricidade entre o centro de massa e o de resistência; manter a resistência vertical idêntica, minimizando concentração de tensões; adotar elementos resistentes no perímetro, maximizando resistência à torção; garantir vãos pequenos, oferecendo redundância à estrutura, reduzindo o nível de tensões; eliminar balanços, reduzindo vulnerabilidade à aceleração vertical; e adotar diafragmas sem aberturas, garantindo transferência direta das forças laterais para os elementos resistentes.

Além disso, outros fenômenos importantes na análise sísmica dependem dessas grandezas. Por exemplo, a liquefação, que é um fenômeno que acontece em solos não coesivos, saturados, que devido ao movimento vibratório ocasionado pelos sismos, em que a pressão de água aumenta podendo fazer com que as partículas de solo fiquem em suspensão, se movimentando de forma rápida umas em relação às outras, fazendo com que o solo se comporte como fluido, diminuindo substancialmente a resistência e rigidez do solo. Como consequência ocorrem enormes recalques, podendo levar ao colapso total das estruturas. Um

dos parâmetros no estudo da liquefação, por exemplo, é a aceleração máxima devido ao terremoto, que deve ser obtida pelo espectro de resposta. O projetista pode ter que considerar procedimentos especiais para lidar com a liquefação, como a substituição do solo onde a estrutura será assentada, instalação de drenos verticais, vibração do terreno etc, ou até mesmo mudar o local da obra para outro em que não haja perigo de liquefação.

Outro fenômeno é a interação solo-estrutura, cujo estudo é muito importante, quando o meio da fundação não é muito firme, e há possibilidade de ocorrência de eventos sísmicos potencialmente perigosos. Durante a ocorrência do terremoto, a estrutura interage com o solo no seu entorno, impondo deformações no solo. Essas deformações, em contrapartida, causam movimentações nos suportes ou na região de interface entre o solo e a estrutura, que são diferentes da movimentação da superfície livre do terreno. Essas interações modificam substancialmente a resposta da estrutura. Para estudar esse fenômeno, precisamos do histórico sísmico, obtido segundo o desenvolvimento aqui descrito.

A própria norma brasileira, porém, prevê que em determinados casos é necessário utilizar um procedimento mais específico para realizar a análise, por exemplo, quando o terreno estudado se trata de um solo Classe F (ver Figura 1.4). Esse procedimento pode ser feito utilizando o SHAKE BR desenvolvido para esse projeto, adaptado do programa SHAKE, por Schnabel [4].

2. Desenvolvimento Teórico

2.1. Introdução

Para melhor compreensão do funcionamento do programa SHAKE BR, será apresentada, de maneira resumida, a teoria envolvida na análise sísmica que ele realiza. Para isso, será estudada a propagação de uma onda no solo, enunciando o problema de maneira geral, particularizando para o caso específico de análise sísmica que é utilizado no programa e indicando como é calculada a resposta do solo devido à propagação das ondas sísmicas, baseando-se no desenvolvimento realizado por Datta [5].

É essencial ter conhecimento da propagação da onda gerada pelo terremoto por duas principais razões: A primeira: as características dinâmicas da movimentação do terreno que será aplicada na base da estrutura são modificadas quando a onda gerada na formação rochosa, que se encontra abaixo do depósito, se propaga pelo solo, atingindo a superfície, normalmente, amplificada. Para compreender essas modificações, é necessário o conhecimento de propagação da onda. A segunda: para determinar as funções de impedância do solo, obtendo as condições de contorno necessárias para a consideração do solo como um meio semi-infinito. Quando a análise da propagação da onda for feita por métodos numéricos, é necessário o conhecimento das características de vibração do solo decorrente da propagação da onda.

2.2. Propagação da onda no solo

Para obter a equação, de modo geral, que representa a movimentação do solo em qualquer direção, inicia-se pelo resultado da Segunda Lei de Newton ($\mathbf{F}=\mathbf{ma}$), buscando obter o equilíbrio entre as forças externas e internas do elemento infinitesimal representado na Figura 2.1:

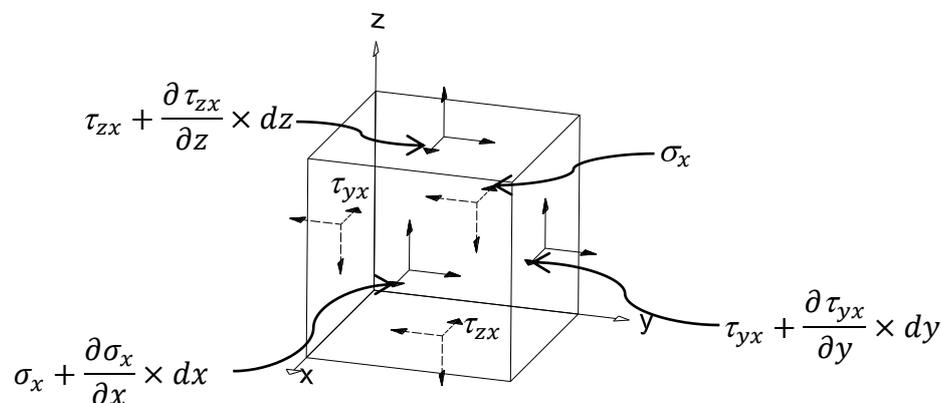


Figura 2.1. Tensões do elemento infinitesimal na direção do eixo x.

Manipulando adequadamente a equação de equilíbrio, chega-se a:

$$\rho \times \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (2.1)$$

onde ρ é a densidade do solo e u é o deslocamento na direção x . Da mesma forma, pode-se obter as equações para as direções y e z .

Utilizando as relações de tensão-deslocamento da Teoria da Elasticidade e as constantes de Lamé, segundo Villaça [6], pode-se reescrever a equação (2.1) na forma:

$$\rho \times \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + G) \times \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + G \times \nabla^2 u \quad (2.2)$$

onde ε é a soma das deformações nas direções dos eixos ($\varepsilon = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$), ∇^2 é o operador de Laplace e λ e G são as constantes de Lamé, que valem:

$$\lambda = \frac{E \times \nu}{(1 + \nu) \times (1 - 2 \times \nu)} \quad (2.3)$$

e:

$$G = \frac{E}{2 \times (1 + \nu)} \quad (2.4)$$

onde E é o módulo de elasticidade do solo, G é o módulo de cisalhamento e ν é o coeficiente de Poisson.

Resolvendo a equação (2.2), utilizando as condições de fronteira adequadas, obtêm-se os deslocamentos do solo devido à propagação da onda gerada pelo terremoto, na direção x , em qualquer ponto dentro do solo. De forma semelhante, obtêm-se as equações para as direções y e z :

$$\rho \times \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = (\lambda + G) \times \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + G \times \nabla^2 v \quad (2.5)$$

e:

$$\rho \times \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = (\lambda + G) \times \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} + G \times \nabla^2 w \quad (2.6)$$

Combinando as equações (2.2), (2.5) e (2.6) de determinadas maneiras, obtêm-se soluções para dois tipos de onda (ondas de volume). A primeira, conhecida como onda P (primária), possui a característica de provocar movimentações nas partículas na própria direção de propagação da onda. A segunda, conhecida como onda S (secundária) ou onda de cisalhamento, se caracteriza por causar deslocamentos num plano perpendicular à direção de propagação da onda. Como os deslocamentos do solo na direção horizontal causados na estrutura possuem muito mais importância na análise sísmica, somente as ondas de cisalhamento serão estudadas mais detalhadamente neste trabalho.

A equação para esse tipo de onda pode ser obtida eliminando ε das equações (2.5) e (2.6). Derivando essas equações em relação à z e y respectivamente, e subtraindo uma da outra, obtém-se a seguinte equação:

$$\rho \times \frac{\partial^2 \theta_x}{\partial t^2} = G \times \frac{\partial^2 \theta_x}{\partial x^2} \quad (2.7)$$

que pode ser reescrita na seguinte forma:

$$\frac{\partial^2 \theta_x}{\partial t^2} = V_s^2 \times \frac{\partial^2 \theta_x}{\partial x^2} \quad (2.8)$$

onde:

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.9)$$

onde $\theta_x = \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right)$ é a rotação em torno do eixo x , V_s é a velocidade da onda de cisalhamento.

Assim, a equação (2.8) representa a propagação da onda distorcional com rotação em torno do eixo x . Procedimento similar pode ser feito para os eixos y e z . A onda de cisalhamento possui, normalmente, dois componentes: a onda S-H (em que a movimentação das partículas do solo ocorre na direção horizontal, perpendicular à direção de propagação da onda) e a onda S-V (em que a movimentação das partículas ocorre na direção vertical, perpendicular à direção de propagação da onda). Como dito anteriormente, interessam particularmente os deslocamentos na horizontal, causados por ondas que se propagam na vertical, portanto o estudo será desenvolvido para ondas S-H.

O desenvolvimento, até aqui, foi feito para a onda se propagando por um corpo infinito – o solo. Na realidade, entretanto, a terra não é um meio infinito, portanto a propagação das ondas sísmicas não obedece estritamente às equações apresentadas anteriormente, principalmente quando se propagam próximas à superfície. Nesse caso, existem novas formas de equações de onda (ondas de superfície), decorrentes da presença da superfície livre, na fronteira superior. Próximo à superfície, portanto, o solo deve ser modelado como um corpo semi-infinito, com uma superfície livre plana. Nessa região, principalmente dois outros tipos de ondas são obtidos: a onda de Rayleigh e a onda de Love (que ocorre na interface de duas camadas com propriedades distintas). Esses dois tipos de onda não serão estudados nesse trabalho. Ainda existem vários outros tipos de onda, que não serão descritos nesse trabalho, pois apresentam pouca significância no estudo de movimentações do terreno que afetam as estruturas.

Uma representação ilustrativa dos quatro tipos de ondas apresentados neste trabalho está representada Figura 2.2 a seguir:

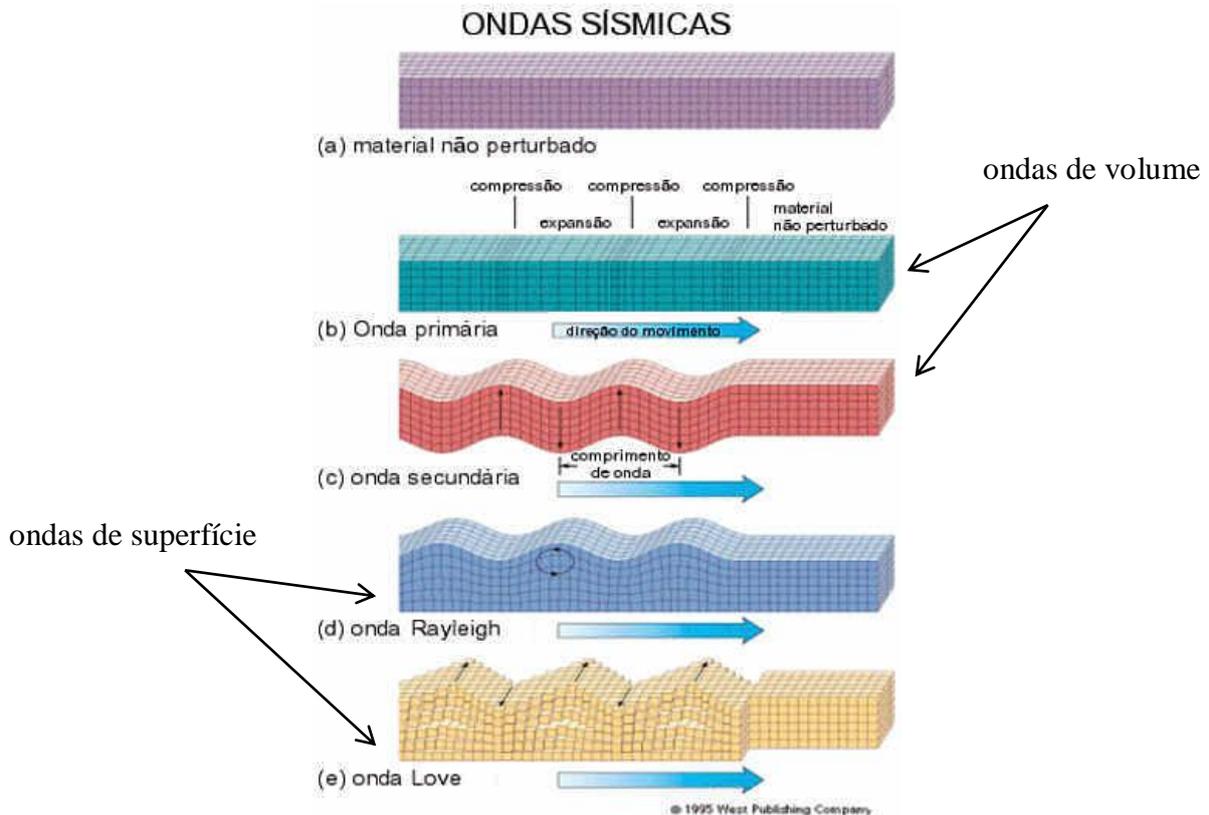


Figura 2.2. Principais tipos de ondas sísmicas.

2.3. Propagação unidimensional da onda e análise de resposta do solo

Há muito tempo, já foi descoberto que as condições locais do solo modificam o comportamento de propagação livre das ondas geradas por sismos. Essa influência é estudada analisando a resposta do solo na superfície livre, utilizando uma onda gerada na formação rochosa. Dependendo das condições e geometria da região estudada, pode ser necessária a análise de resposta do solo em uma, duas ou três dimensões. Foi comprovado que a análise unidimensional apresenta bons resultados em muitos casos. Obviamente, esse tipo de análise é o mais simples, facilitando o desenvolvimento de programas com essa abordagem, que é o caso do SHAKE BR. Assim, normalmente a análise da resposta do solo é feita considerando o problema de somente uma dimensão. Portanto, será estudada apenas a propagação unidimensional das ondas e a resposta do terreno correspondente.

Como já citado anteriormente, as ondas de maior importância para análise sísmica são as S-H, portanto a análise unidimensional da propagação de onda será feita considerando essa informação como premissa. Além disso, também será assumido que as superfícies do solo e da camada rochosa são consideradas de comprimento e largura infinitos (na direção horizontal).

Algumas terminologias associadas a esse tipo de análise, relacionadas aos diversos tipos de resposta de movimentações no solo, estão ilustradas na Figura 2.3, a seguir. Esses termos também são utilizados no programa SHAKE BR.

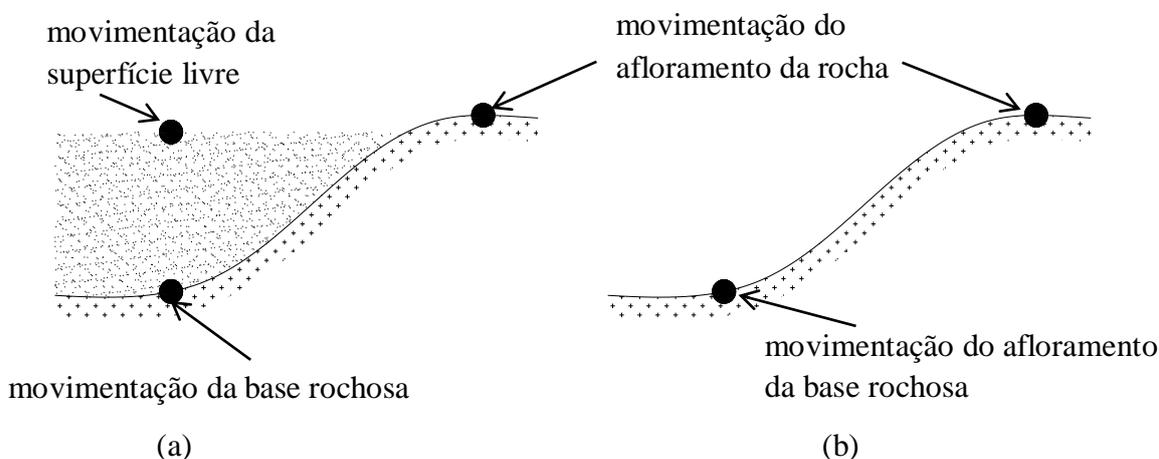


Figura 2.3. Terminologias usadas na análise de resposta do solo: (1) solo depositado sobre camada rochosa; e (2) sem solo depositado sobre camada rochosa.

Inicialmente, buscando o desenvolvimento deste estudo de maneira didática, faz-se uma análise considerando o comportamento linear do depósito de solo. Posteriormente, será considerado seu comportamento não-linear, o que normalmente ocorre no caso de sismos que gerem grandes movimentações no solo. A análise para o caso de comportamento linear é bastante simples, bastando resolver a equação (2.8) para obter a movimentação do solo. Já no caso não-linear, é necessária uma análise não linear ou uma análise equivalente linear. A solução pela resolução da equação (2.8) não pode ser realizada, tornando-se necessária uma análise que utilize transformadas de Fourier.

Para análise considerando o comportamento linear do depósito de solo, representa-se esquematicamente, na Figura 2.4 a seguir, a camada uniforme de solo homogêneo e elástico sobre uma formação rochosa rígida:

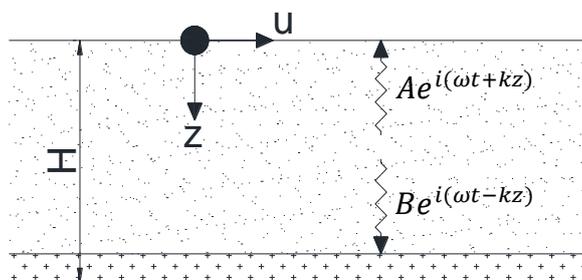


Figura 2.4. Análise unidimensional da propagação de onda em solo elástico linear.

O movimento harmônico horizontal da formação rochosa produzirá ondas S-H que se propagarão no solo na direção vertical, como indicado na Figura 2.4. Neste caso, partindo da equação (2.8), a equação de propagação da onda será:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = V_s^2 \times \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2.10)$$

A solução da equação (2.10) para o movimento harmônico do solo, conforme demonstrado por Boyce [7], será:

$$u(z, t) = A \times e^{i \times (\omega \times t + k \times z)} + B \times e^{i \times (\omega \times t - k \times z)} \quad (2.11)$$

onde ω é a frequência de excitação, $k = \omega / V_s$ e A e B são as amplitudes das ondas que se propagam na direção vertical nos sentidos para cima e para baixo, respectivamente.

Como condição de fronteira, sabe-se que a deformação cisalhante deve ser nula na superfície livre, ou seja:

$$\tau(z, 0) = G \times \gamma(0, t) = G \times \frac{\partial u(0, t)}{\partial z} = 0 \quad (2.12)$$

onde τ é a tensão cisalhante e γ é a deformação distorcional.

Da condição (2.12), tem-se que:

$$G \times i \times k \times (A - B) \times e^{i \times (\omega \times t)} = 0 \quad (2.13)$$

De onde obtém-se:

$$A = B \quad (2.14)$$

Aplicando o resultado (2.14) na equação (2.11), obtém-se a equação para o deslocamento em qualquer profundidade, que será:

$$u(z, t) = 2 \times A \times \cos(k \times z) \times e^{i \times (\omega \times t)} \quad (2.15)$$

Observando a equação (2.15), percebe-se que se trata de uma onda estacionária de amplitude $2A \cos(kz)$.

Utilizando a equação (2.15), pode-se obter a razão entre as amplitudes do deslocamento nas superfícies superior e inferior da camada de solo, que será:

$$R(\omega) = \frac{u_{max}(0, t)}{u_{max}(H, t)} = \frac{1}{\cos(k \times H)} \quad (2.16)$$

Por meio da equação (2.16), nota-se que o movimento harmônico é prescrito na superfície inferior, e sua amplitude é amplificada conforme ocorre a propagação para a superfície superior, pois a velocidade de propagação da onda perto da superfície é muito menor que nas camadas inferiores. A equação (2.16) também denota a função de

transferência para a propagação da onda harmônica a partir da formação rochosa até a superfície livre. Essa função é plotada a seguir, segundo Carvalho Santos [8], na Figura 2.5:

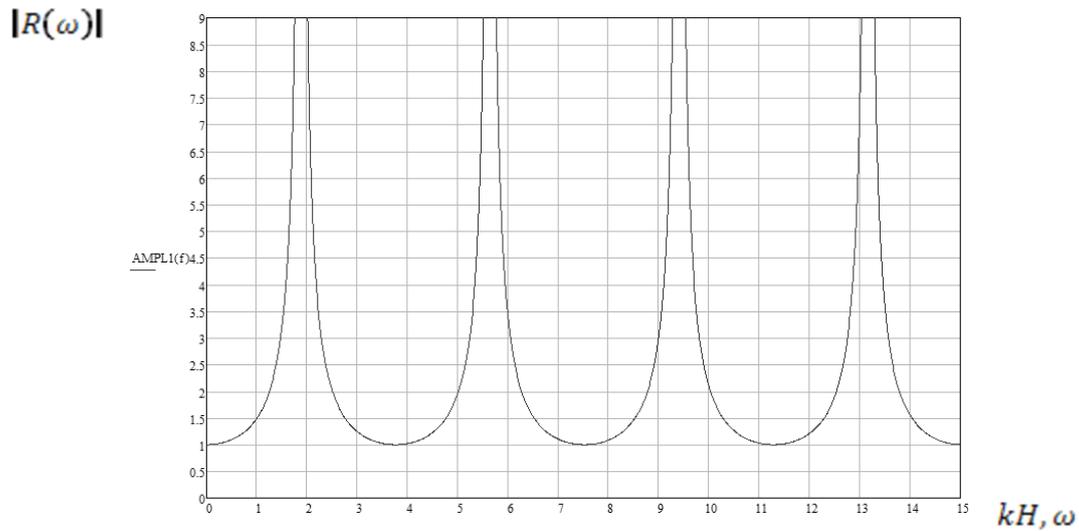


Figura 2.5. Módulo de função de transferência para a camada elástica não-amortecida.

No gráfico da Figura 2.5, nota-se que a amplificação tende ao infinito para determinadas frequências, de valor $\frac{n \times \pi \times V_s}{2H}$, onde $n=1,3,5,\dots$. Isso ocorre, pois se considerou, na análise, amortecimento nulo, portanto a amplificação tende ao infinito nas frequências de ressonância. Esse comportamento, porém, não representa a realidade.

Para poder considerar o amortecimento do solo, a equação (2.10) deve incluir um termo que leve em conta o amortecimento do solo, sendo reescrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = V_s^2 \times \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{\eta}{\rho} \times \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t} \quad (2.17)$$

onde η é a viscosidade equivalente do solo, que vale:

$$\eta = \frac{2 \times G \times \xi}{\omega} \quad (2.18)$$

onde ξ é o fator de amortecimento do solo.

η também é o parâmetro do modelo de Kelvin-Voigt para representar relação tensão-deformação em cisalhamento para solo. (No caso de propagação viscoelástica da onda, é comum utilizar o modelo de Kelvin-Voigt, que considera que a resistência à deformação provocada pelo cisalhamento é uma soma da parcela de resistência elástica e uma viscosa).

A relação tensão deformação no solo é dada por:

$$\tau = G \times \gamma + \eta \times \frac{\partial \gamma}{\partial t} \quad (2.19)$$

Além disso, da equação (2.18), percebe-se que a viscosidade equivalente do solo é inversamente proporcional à frequência, fazendo com que a razão de amortecimento seja independente da frequência.

Resolvendo a equação (2.17), obtém-se:

$$u(z, t) = A \times e^{i \times (\omega \times t + \check{k} \times z)} + B \times e^{i \times (\omega \times t - \check{k} \times z)} \quad (2.20)$$

onde $\check{k} = \frac{\omega}{\check{V}_s}$ e \check{V}_s é a velocidade complexa da onda de cisalhamento, dada por:

$$\check{V}_s = \sqrt{\frac{\check{G}}{\rho}} \quad (2.21)$$

onde: $\check{G} = G \times (1 + i \times 2 \times \xi)$.

Expandindo a equação (2.21) em série de potência e desprezando os termos de maior ordem, reescreve-se essa equação da seguinte forma:

$$\check{V}_s = \sqrt{\frac{G \times (1 + i \times 2 \times \xi)}{\rho}} = V_s \times (1 + i \times \xi) \quad (2.22)$$

A razão entre as amplitudes do deslocamento nas superfícies superior e inferior da camada de solo, no caso da consideração do fator de amortecimento não-nulo será:

$$R(\omega) = \frac{u_{max}(0, t)}{u_{max}(H, t)} = \frac{1}{\cos(\check{k} \times H)} = \frac{1}{\cos\left(\frac{\omega \times H}{V_s} \times (1 + i \times \xi)\right)} \quad (2.23)$$

Utilizando a relação: $|\cos(a + bi)| = \sqrt{\cos^2 a + \sinh^2 b}$ e considerando que $\sinh^2 b \approx b^2$ quando b é pequeno, pode-se reescrever a função de transferência desta maneira:

$$|R(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{\cos^2\left(\frac{\omega \times H}{V_s}\right) + \left(\frac{\xi \times \omega \times H}{V_s}\right)^2}} \quad (2.24)$$

A função é plotada a seguir, segundo Idriss [9], na Figura 2.6. Da mesma forma que na Figura 2.5, para a análise com amortecimento nulo, percebe-se que os valores de pico ocorrem nas frequências de ressonância, em que $\omega_n = \frac{n \times \pi \times V_s}{2H}$, onde $n=1,3,5,\dots$. Na análise com amortecimento não-nulo, entretanto, a amplificação assume valores finitos. Também percebe-se que a amplificação vai diminuindo nas frequências naturais de maior ordem,

associadas aos modos correspondentes a essas vibrações, conforme indicado na Figura 2.7, apresentada na sequência.

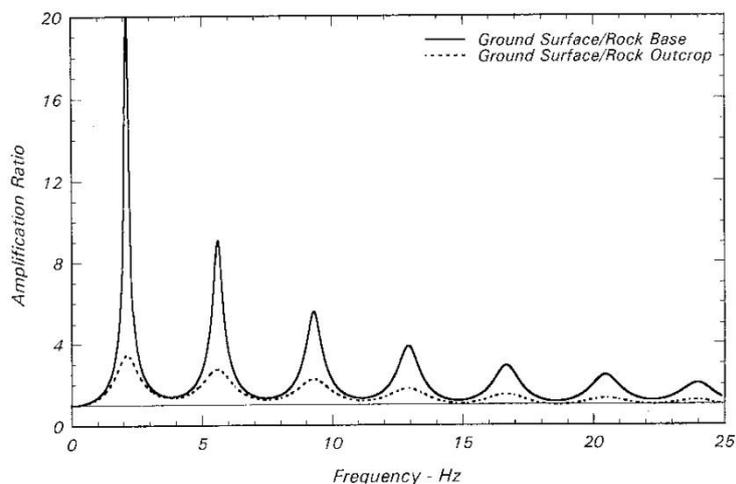


Figura 2.6. Módulo de função de transferência para a camada elástica amortecida.

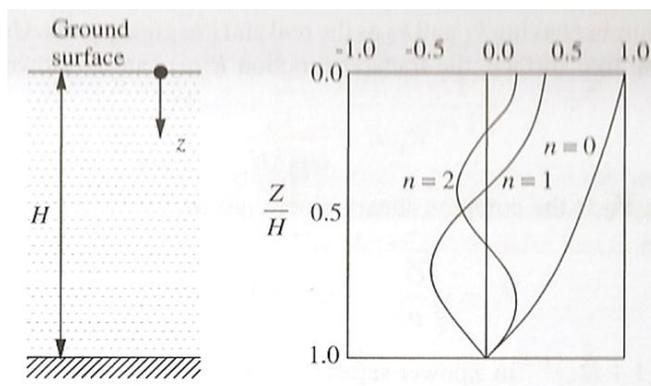


Figura 2.7. Modos correspondentes às três primeiras frequências naturais.

Conhecida a função de transferência, $R(\omega)$, é possível calcular a resposta do terreno na camada superficial, causada pela propagação de ondas no sentido vertical, do tipo S-H, para determinado histórico temporal de movimentação da formação rochosa, utilizando três métodos: análise de Fourier, análise não-linear no domínio de tempo, ou uma análise linear equivalente utilizando método iterativo no domínio do tempo.

2.3.1. Análise de resposta do terreno utilizando FFT

Os passos para realizar a análise de Fourier são os seguintes:

- a) Sintetizar a movimentação da formação rochosa, utilizando o método da transformada rápida de Fourier (FFT, em inglês), que resultará num conjunto de números complexos num intervalo discreto da frequência, $\Delta\omega$.
- b) Considerar somente a primeira metade dos números (a segunda metade corresponde aos conjugados da primeira metade).
- c) Obter os valores para a função de transferência no intervalo da frequência, $\Delta\omega$, partindo de zero.
- d) Multiplicar os números complexos obtidos com FFT da letra b pelos valores correspondentes da função de transferência obtidos na letra c.
- e) Encontrar os conjugados dos números complexos obtidos na letra d e sequenciar todos os números complexos obtidos de maneira apropriada.
- f) Obter a inversa da transformada de Fourier das séries. O resultado corresponderá ao histórico temporal da resposta do solo.

2.3.2. Análise de resposta do terreno não-linear no domínio do tempo

Para realizar a análise não-linear no domínio do tempo, deve-se discretizar o solo em elementos de viga equivalentes com consideração de deformação por força cortante. A quantidade de massa de solo correspondente à área em plante considerada deve ser concentrada em nós, conforme indicado na Figura 2.8:

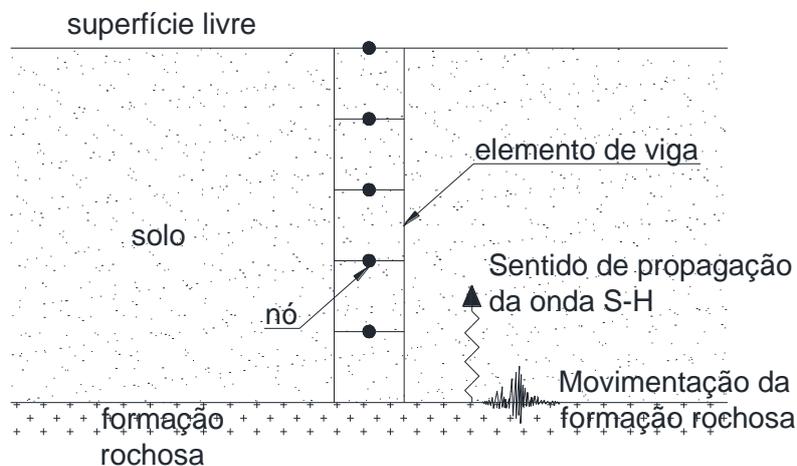


Figura 2.8. Elementos de viga solicitados por cisalhamento para análise unidimensional da propagação de onda S-H.

A equação a seguir, que descreve esse modelo, para solos de comportamento linear, com considerável razão de amortecimento, pode ser resolvida numericamente para obter o histórico temporal de resposta no nó superior.

$$\mathbf{M} \times \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} + \mathbf{C} \times \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{K} \times \mathbf{u} = -\mathbf{M} \times \mathbf{I} \times \frac{\partial^2 \mathbf{u}_g}{\partial t^2} \quad (2.25)$$

onde \mathbf{M} é a matriz de massa para o elemento de viga equivalente, \mathbf{C} é a matriz de amortecimento, \mathbf{K} é a matriz de rigidez, \mathbf{u}_g é o histórico temporal de deslocamento do terreno na formação rochosa, \mathbf{u} é a movimentação horizontal do terreno e \mathbf{I} é a matriz identidade com termos na direção do deslocamento do terreno. Para obter o valor total (absoluto) na superfície livre, basta somar a aceleração da formação rochosa à aceleração no nó superior.

Conforme dito, a equação (2.25) é válida para solos de comportamento linear. Para solos de comportamento não-linear, o que geralmente ocorre para movimentações de grande magnitude, deve-se reescrever a equação (2.25) da seguinte forma:

$$\mathbf{M} \times \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} + \mathbf{C} \times \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{R}(\mathbf{u}) = -\mathbf{M} \times \mathbf{I} \times \frac{\partial^2 \mathbf{u}_g}{\partial t^2} \quad (2.26)$$

onde $\mathbf{R}(\mathbf{u})$ é a relação não-linear de força-deslocamento para o solo submetido a cargas cíclicas. Essa relação é representada por uma curva em formato de coluna vertebral ("backbone curve") mostrada na Figura 2.9:

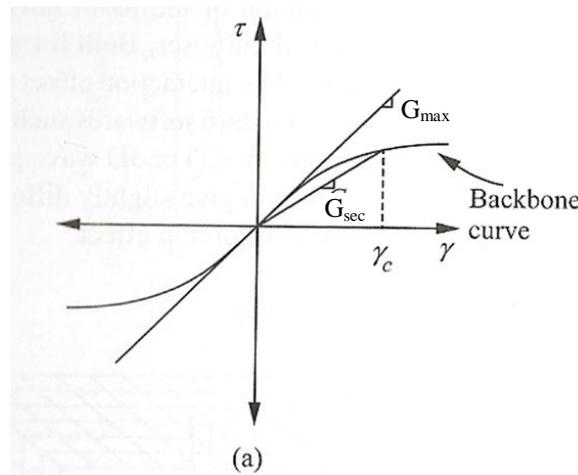


Figura 2.9. Relação não-linear de força-deslocamento.

Pode-se resolver, então, a equação (2.26) por métodos numéricos, para obter a resposta do terreno na superfície livre. Normalmente, esses valores são inferiores aos obtidos na análise linear – resolvendo a equação (2.25). Isso ocorre porque o solo de comportamento não-linear submetido a cargas cíclicas apresenta comportamento histerético, ou seja, depois de submetido a esforços, não recupera logo, rapidamente, seu estado antes da aplicação das cargas, o que resulta numa deformação que pode ser permanente. Esse comportamento é mostrado na Figura 2.10, a seguir. Esse fenômeno faz com que mais energia sísmica seja dissipada além daquela devida ao amortecimento do solo.

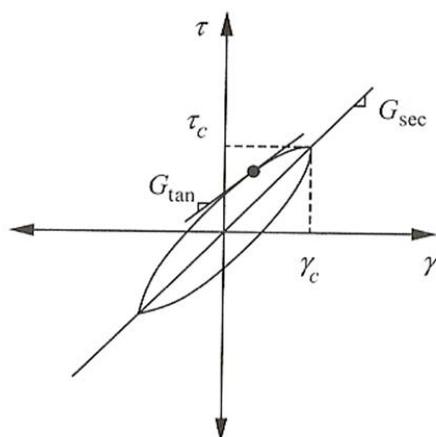


Figura 2.10. Loop histerético devido a cargas cíclicas.

2.3.3. Análise de resposta do terreno linear equivalente no domínio do tempo

A análise linear equivalente utilizando método iterativo no domínio do tempo é amplamente utilizada para obter a resposta do terreno. Nesse tipo de análise, são utilizados módulo de cisalhamento e fator de amortecimento equivalentes, que representam a perda de energia decorrente dos “loops” histeréticos. O módulo de cisalhamento equivalente corresponde a um valor representativo dos módulos de cisalhamento em todos os pontos da curva da Figura 2.10. Ele pode ser tomado, de maneira aproximada, como o módulo de cisalhamento secante, indicado na Figura 2.9. Já a razão de amortecimento para valores diferentes de deformações corresponde à área do “loop”.

À medida que o módulo secante diminui com o aumento da deformação, ocorre, gradativamente, o aumento da degradação do módulo de cisalhamento equivalente. Expressando o resultado de testes experimentais cíclicos, essa degradação do módulo de cisalhamento é mostrada na Figura 2.11, a seguir. Por definição, o módulo de cisalhamento máximo é dado por $\rho \times V_s^2$.

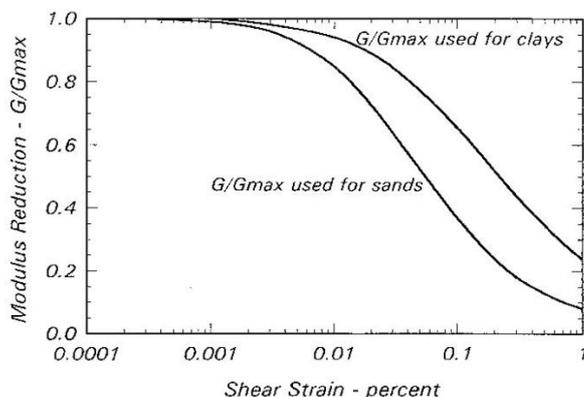


Figura 2.11. Variação do módulo de cisalhamento equivalente em relação à deformação.

Similarmente, à medida que ocorre o aumento da deformação, aumenta o fator de amortecimento. Essa relação também pode ser obtida experimentalmente. Uma curva típica é mostrada na Figura 2.12:

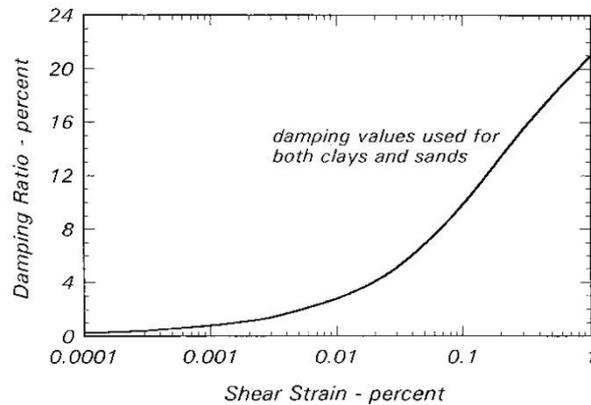


Figura 2.12. *Variação da razão de amortecimento equivalente em relação à deformação.*

Observa-se na Figura 2.11 e na Figura 2.12 que a relação entre o módulo de cisalhamento equivalente e a deformação por cisalhamento são inversamente proporcionais, enquanto que a relação entre a razão de amortecimento equivalente e a deformação por cisalhamento são diretamente proporcionais.

A análise linear equivalente iterativa inicia com o valor do módulo de cisalhamento máximo e calcula as deformações correspondentes nos elementos. Na próxima iteração, a análise é feita com o módulo de cisalhamento equivalente correspondente à deformação obtida na iteração anterior, obtido da Figura 2.11. É feita, então, a quantidade de iterações necessárias para que a convergência desejada seja atingida. (Toma-se, usualmente, para definir o módulo de cisalhamento equivalente e o amortecimento equivalente, os valores correspondentes a 65% da deformação distorcional máxima ocorrida na iteração anterior.)

3. SHAKE BR

3.1. Introdução

O SHAKE BR foi desenvolvido a partir do SHAKE, criado em 1972, no “College of Engineering University of California”, por Schnabel [4]. Existem diversos métodos para avaliar como as condições locais do solo influem na resposta do solo durante a ocorrência de um terremoto. O SHAKE BR se baseia na hipótese de que as principais respostas num depósito de solo derivam da propagação de ondas de cisalhamento na direção vertical, de baixo para cima, a partir da formação rochosa subjacente. Utiliza-se um método analítico baseado nesse conceito, considerando também o comportamento não-linear do solo, conforme explicado no desenvolvimento teórico deste trabalho. Esse procedimento apresenta resultados compatíveis com observações de campo em diversos casos, sendo, portanto, importante para prever respostas dentro de depósitos de solo e as características de movimentos na superfície do terreno.

Esse procedimento pode ser, didaticamente, dividido nos seguintes passos:

a) Determinar quais os deslocamentos prováveis de acontecerem na formação rochosa que se encontra abaixo do depósito de solo, e selecionar para a análise um acelerograma compatível com essas movimentações:

Os parâmetros mais importantes da movimentação causada por um terremoto são: a máxima aceleração, o período predominante e a duração efetiva do sismo. Relações empíricas entre esses parâmetros e a distância do hipocentro do terremoto foram estabelecidas para sismos de diversas magnitudes. O espectro de projeto pode ser obtido por uma média das envoltórias dos espectros de resposta obtidos em análises feitas com diversos acelerogramas reais.

b) Determinar as propriedades dinâmicas do depósito de solo:

Relações entre o módulo de cisalhamento dinâmico e razões de amortecimento do solo, como funções das deformações devido ao cisalhamento e as propriedades estáticas do solo foram estabelecidas para diversos tipos de solo, conforme explicado no desenvolvimento teórico. Assim, de maneira simples podem ser obtidas as propriedades estáticas do solo, e com essas relações estabelecer as propriedades dinâmicas com razoável precisão. Em problemas especiais ou em tipos de solo em que essas relações não foram estabelecidas, porém, são necessários métodos mais complexos para o estabelecimento das propriedades dinâmicas.

c) Computar a resposta do depósito de solo para a movimentação da camada-base rochosa:

No caso da estrutura do solo ser essencialmente horizontal, pode ser utilizado um método unidimensional de análise. O programa apresentado utiliza a análise feita pela

solução da equação da onda. Para depósitos de solo mais complexos, sugere-se a análise pelo método dos elementos finitos.

Apesar de normalmente o foco do sismo ser considerado na formação rochosa, o programa é capaz de considerar o foco em qualquer profundidade. Portanto, acelerogramas obtidos com instrumentos em determinada profundidade do depósito de solo podem ser usados para gerar novas movimentações na formação rochosa, que, em seguida, poderá ser usada como valor de projeto para outros depósitos de solo.

Também são considerados: a não-linearidade do comportamento do solo, o efeito elástico da camada-base de rocha e sistemas com amortecimentos variáveis, explicados no desenvolvimento teórico.

O depósito pode ser composto por diversas camadas horizontais de determinada espessura, com dimensões em planta infinitas. Todas as camadas são homogêneas e isotrópicas, e possuem determinada densidade, módulo de cisalhamento e fator de amortecimento.

O programa considera que a propagação vertical das ondas de cisalhamento gera somente deslocamentos horizontais. Com a resolução da equação da onda, é possível calcular a movimentação em qualquer camada do depósito. Consequentemente, podem-se computar as amplitudes em todas as camadas, e as deformações e acelerações podem ser calculadas a partir da função de deslocamento.

Importante notar que movimentações da rocha com frequência próxima às frequências de ressonância do depósito serão consideravelmente mais afetadas que movimentações com frequência afastada das frequências de ressonância. Logo, o efeito elástico da camada-base de rocha não é função somente da razão de impedância entre o depósito e a rocha e do amortecimento no depósito, mas também da distribuição de frequência da energia da movimentação da rocha relativa à frequência de ressonância do depósito.

3.1.1. Descrição do programa

O programa SHAKE BR computa as respostas em um sistema que é formado por subcamadas homogêneas e viscoelásticas, cujas medidas no plano horizontal são consideradas infinitas, e está sujeito às ondas de cisalhamento do tipo S-H, que se propagam na direção vertical. A não-linearidade do módulo de cisalhamento e do fator de amortecimento é considerada pela análise linear equivalente iterativa, descrita anteriormente.

As seguintes premissas estão implícitas na análise:

- a) O depósito de solo estende-se infinitamente na direção horizontal.

- b) Cada subcamada é completamente definida por seus valores de: módulo de cisalhamento, razão crítica de amortecimento, densidade e espessura. Esses valores são independentes da frequência.
- c) As respostas nos sistemas são causadas pela propagação das ondas de cisalhamento, de baixo para cima, a partir da subcamada onde se encontra o foco do sismo (usualmente no topo da base rochosa).
- d) As ondas de cisalhamento são definidas por valores de aceleração igualmente espaçados em intervalos de tempo (período). A repetição cíclica do histórico temporal de acelerações está implícita na solução.
- e) A relação entre a deformação e o módulo de cisalhamento e o fator de amortecimento é considerada, por meio de procedimento de equivalência linear, baseado no valor médio efetivo para a deformação computado para cada camada.

Pode-se estudar no programa sistemas em que tanto o módulo de cisalhamento quanto o fator de amortecimento variam. O acelerograma de “input”, utilizado como base para a análise, pode ser atribuído para qualquer subcamada do sistema, e podem-se computar as respostas em qualquer outra subcamada.

As diversas operações que o programa pode realizar são descritas adiante, na explicação da interface gráfica desenvolvida.

3.2. Conversão de Fortran para Pascal

Sem dúvida, a parte mais desafiadora deste trabalho foi a realização da conversão do código fonte do programa SHAKE original, de Fortran para Pascal. O principal objetivo dessa conversão foi fazer com que o SHAKE BR possuísse o código em linguagem mais moderna, compatível com o desenvolvimento de aprimoramentos. Uma das grandes dificuldades enfrentadas foi a idade do código, feito em versão antiga de Fortran, que vem se desenvolvendo constantemente. Até mesmo achar um compilador de Fortran capaz de ler o código original da maneira que está escrito foi uma tarefa difícil.

O compilador utilizado na conversão para Pascal foi o Delphi 7. O código convertido para Pascal possui 5442 linhas. Necessita-se de 104 páginas para a impressão do código fonte do programa, que obviamente, foi descartada. Portanto, neste trabalho, apresentam-se somente alguns pontos importantes da conversão.

Foram inseridos trechos do código original em Fortran como comentário dentro do código em Pascal para facilitar comparações entre as duas linguagens. Um exemplo é mostrado na Figura 3.1, em que foi feita a declaração do procedimento “CALL_CURVEG”:

```
(* Procedure CALL_CURVEG(NC: integer; NV: Array [1..27] of integer;
K1: integer;
           A,B: Array [1..27,1..20] of float; NN: integer,
TSTEP: Array [1..27] of float;
           NT: Array [1..27] of integer; T: Array [1..200] of
float; V: Array [1..27,1..200] of float;
           X,Y: Array [1..27,1..20] of float; NSTEP: integer);
*)
  Procedure CALL_CURVEG(var NC: integer; var NV: Array of integer;
var K1: integer;
           var A,B: Array1_27e1_550Float; var NN: integer;
TSTEP: Array of float;
           var NT: Array of integer; var T: Array of float;
var V: Array1_27e1_550Float;
           var X,Y: Array1_27e1_550Float; var NSTEP: integer);
  (* DIMENSION X(27,20),Y(27,20),A(27,20),B(27,20),NV(27),TSTEP(27)
  DIMENSION NT(27), T(200), V(27,200) *)
  var
    goto31, M, I, J, L: integer;
    XMIN, XMAX, X1, X2, TT: float;
```

Figura 3.1. Exemplo de inserção do código em Fortran como comentário.

Diferentemente do Fortran, o Pascal não possui número complexos como tipo de variável predefinido. Necessitou-se, portanto, criar o tipo “complex”, composto de parte real e imaginária, e definir procedimentos com as diversas operações matemáticas para números complexos utilizadas no programa. Nas Figuras 3.2 e 3.3, é mostrada a definição do tipo

“complex” e alguns procedimentos para a realização das operações com os números complexos, respectivamente.

```
Complex=record
  re,im:float;
end;
```

Figura 3.2. Declaração do tipo “complex”.

```
procedure cadd(var z: complex; x, y: complex); (* adds x to y, giving
z *)
begin
  z.re:= x.re+y.re;
  z.im:= x.im+y.im;
end;

function pow(x,y: float): float; (* x elevado a y é igual a
exp(y*ln(x)) *)
begin
  pow := exp(y*ln(x));
end;

procedure csqrt (var z: Complex; x1: Complex);
var
  x, y, r, xtmp, ytmp, teta: float;
begin
  x := x1.re;
  y := x1.im;
  r := cabs (x1);

  if (r=0.0) then
  begin
    fcplx_2 (z, 0.0, 0.0);
    exit;
  end;

  xtmp := sqrt ((r+abs(x))*0.5);
  ytmp := y*0.5/xtmp;

  if (x>=0.0) then fcplx_2 (z, xtmp, ytmp);
  if (y=0.0) then y := 1.0;
  if (x<0.0) then fcplx_2 (z, abs(ytmp), fortran_sign(xtmp,y));
end;
```

Figura 3.3. Procedimentos para soma e raiz quadrada de números complexos.

Um ponto de dificuldade é que, diferentemente do Pascal, o Fortran permite a declaração de variáveis globais dentro de procedimentos, portanto necessitou-se estudar todas as variáveis globais declaradas dessa forma e declará-las no início do programa. Alguns exemplos são mostrados na Figura 3.4:

```
SOILA_IDNT: Array[0..200] of string[30];
SOILA_BL, SOILA_GL, SOILA_FACT, SOILA_, SOILA_H, SOILA_R,
SOILA_BF: Array[0..200] of float;
SOILB_FAC, SOILB_WL, SOILB_DEPTH, SOILB_WEIGHT: Array[0..200]
of float;
SOILB_TP: Array[0..200] of integer;
SOILC_MSOIL, SOILC_MWL: integer;
SOILD_GLMAX: Array[0..200] of float;
SOILDG_NV: Array[0..200] of integer;

CCG_ID: Array1_27e1_11String;

EQ_MFOLD, EQ_MA2, EQ_MA, EQ_MMA, EQ_MX : integer;
EQ_DT, EQ_DF: float;
EQ_TITLE: Array[0..30] of string[30];
WGK_WW, WGK_GT, WGK_SKO: float;

FRCUT_NCUT, FRCUT_NZERO: integer;

JISCK_JIS: integer;
JISCK_FINPEQ: string[90];

CSOIL_G, CSOIL_V, CSOIL_PLUS, CSOIL_MINUS: Array[0..200] of
complex;
```

Figura 3.4. *Exemplos de variáveis globais que tiveram de ser declaradas no início do programa, diferentemente do código em Fortran.*

O código original utiliza muitas vezes o comando “go to”, que dificulta o entendimento do código, principalmente quando são realizados “loops” muito grandes. A maioria dos “go to” foi retirada do código em Pascal e, para facilitar a comparação com o código em Fortran muitas vezes declararam-se variáveis de nome “go to”, e/ou comentários relativos aos “go to” originais, conforme mostrado na Figura 3.5, a seguir:

```

CALL_STEPG(K1, NN, TSTEP, NT, XMIN, XMAX, T, NSTEP);
goto31 := 0;
for {2} L := 1 to NC do
begin
  M := NV[L] - 1;
  for {2} I := 1 to NSTEP do
  begin
    for {3} J := 1 to M do
    begin
      goto31 := 0;
      IF (T[I] < X[L,J]) then
      begin
        (* GO TO 31 *)
        goto31 := 1;
        break;
      end;
      (* 3 CONTINUE *)
    end;
    if (goto31 = 0) then J := M;
  {31} TT := T[I];
  IF (K1 = 2) then TT := alog(TT,10.0);
  {2} V[L,I] := A[L,J]*TT + B[L,J];
  end;
end;

```

Figura 3.5. Exemplo de remoção de comando “go to”.

Outra dificuldade enfrentada é que, diferentemente do Pascal, o Fortran permite utilizar um vetor de números complexos para guardar valores e os converter automaticamente para reais em procedimentos que utilizam como valores reais os valores definidos como complexos do vetor. Necessitou-se criar procedimentos que realizassem essa conversão, mostrados nas Figuras 3.6 e 3.7.

```

procedure copyarray_r_c(var A_ftemp: array of float; X: array of
complex);
var j: integer;
begin
  for J := 1 to MAX_Array_X do
  begin
    (*      A_ftemp[J] := cREAL(X[J]);      *)
    A_ftemp[(J*2)-1] := cREAL(X[J]);
    A_ftemp[J*2] := AIMAG(X[J]);
  end;
end;

```

Figura 3.6. Funções de conversão de vetores de números complexos para reais e vice-versa – Parte 1.

```

procedure copyarray_c_r(var X: array of complex; A_ftemp: array of
float);
var j: integer;
begin
  for J := 1 to MAX_Array_X do
    begin
      x[J].re := A_ftemp[(J*2)-1];
      x[J].im := A_ftemp[J*2];
      (*      fcplx_2 (X[J], A_ftemp[J], AIMAG(X[J])); *)
    end;
end;

```

Figura 3.7. *Funções de conversão de vetores de números complexos para reais e vice-versa – Parte 2.*

Outra diferença é que o Fortran faz declaração automática de tipo da variável para variáveis de determinados nomes padronizados, dificultando a conversão para Pascal, pois muitas vezes é difícil identificar todas essas variáveis não declaradas, que tem de ser declaradas. Pode-se perceber essa peculiaridade por meio do aumento da quantidade de variáveis declaradas em determinados procedimentos, em relação à quantidade declarada no código em Fortran. Um exemplo é mostrado nas Figuras 3.8 e 3.9:

```

var
  (*      CSOIL_G, CSOIL_V, CSOIL_PLUS, CSOIL_MINUS: Array[1..51] of
complex;
      CCG_ID: Array[1..27,1..11] of string[6];
      TIME_T: Array[1..9] of float;

      EQ_MFOLD, EQ_MA2, EQ_MA, EQ_MMA, EQ_MX : integer;
      EQ_DT, EQ_DF: float;
      EQ_TITLE: Array[1..5] of string[6];

      SOILA_IDNT: Array[1..6] of string[6];
      SOILA_BL, SOILA_GL, SOILA_FACT, SOILA_, SOILA_H, SOILA_R,
SOILA_BF: Array[1..51] of float;
      SOILB_FAC, SOILB_WL, SOILB_DEPTH, SOILB_WEIGHT: Array[1..51] of
float;

      SOILB_TP: Array[1..51] of integer;
      SOILC_MSOIL, SOILC_MWL: integer;

      FRCUT_NCUT, FRCUT_NZERO: integer;
      JISCK_JIS: integer;
      JISCK_FINPEQ: string[30];
*)

```

Figura 3.8. *Comparação da quantidade de variáveis declaradas em Fortran e Pascal – Parte 1.*

```

IBLANK: string[6];
OPHEAD: string[80];
ABSIS, ABSPR, ABSCL: string[60];
LLL, LLGS, LLPCH, LLPL, LNV: Array[0..30] of integer;
SK: Array[0..20] of float;
LL, LT, LNSW, LP, MMM: Array[0..60] of integer;
LL5, LT5, LP5: Array[0..60] of integer;
IDAMP: Array1_27e1_11String;

I, J, L, NF, NR, NP, NA, KK, goto0, NSN, N1, N, itemp, itemp2, itemp3, itemp0, itemp1,
IFR, NSW, M, K1, NN, NSKIP, KP, LIN, LOUT, LOTP, LINT,
    INT_var,
VAR_IN, ITMAX, KS, LOOP, K, K2, LS, LN, LL1, LT1, goto720, NEW_var, II, goto172, IFER
R: integer;
XF, SH, SHV, VSAV, TT, DFA, PRMUL, DGMAX, DPTH, DTNEW: float;
ctemp1, ctemp2: complex;
label goto101;

```

Figura 3.9. Comparação da quantidade de variáveis declaradas em Fortran e Pascal – Parte 2.

Todos os resultados calculados para o exemplo encontrado no manual do SHAKE 91 foram obtidos pelo programa SHAKE original e pelo programa SHAKE BR (ainda sem interface gráfica) e comparados. Os resultados apresentaram diferenças desprezíveis, provavelmente devido às diferenças internas entre os tipos de variáveis utilizados no Fortran e no Pascal, e concluiu-se que a conversão foi feita corretamente. Um exemplo da comparação de resultados, referente à computação do acelerograma calculado para o afloramento na primeira camada de areia, é mostrado na figura Figura 3.10. Nota-se que os gráficos se sobrepõem.



Figura 3.10. Comparação entre o SHAKE em Fortran e em Pascal.

3.3. Interface Gráfica do SHAKE BR

3.3.1. Introdução

Todo programa atual de engenharia deve possuir uma interface amigável ao usuário, o que não ocorria no programa SHAKE original, dificultando seu uso. Portanto, além da conversão de Fortran para Pascal, com objetivo de adaptar o programa para uma linguagem mais moderna, compatível com o desenvolvimento de atualizações, foi criada uma interface gráfica que traz uma série de vantagens ao usuário do SHAKE BR.

Serão descritos, brevemente, alguns pontos importantes sobre o desenvolvimento da interface gráfica criada para o programa. Em seguida, será explicada detalhadamente sua utilização pelo usuário, estudando-se cada componente do programa durante a análise do exemplo sugerido por Idriss [9].

A interface gráfica para o SHAKE BR foi desenvolvida no compilador Delphi 2007 Win 32. O desenvolvimento foi baseado em abas, com opções de salvamento por aba, permitindo que o usuário salve cada campo preenchido na entrada de dados, reabrindo do ponto em que parou ao finalizar e reiniciar o programa.

O arquivo de dados foi concebido de forma a ser local, ou seja, não é necessário recorrer a um banco de dados para rodar o aplicativo. O padrão escolhido para esse arquivo foi o *.xml, que possui a qualidade de interoperabilidade – é o padrão atual de troca de informações para outras aplicações, permitindo que qualquer outra aplicação possa ler e importar os dados (até mesmo no navegador da Internet). Visando deixar o programa independente, caso esse arquivo seja apagado do sistema, ao rodar o programa será gerado um novo.

Se o usuário quiser realizar um novo estudo sem perder a entrada de dados feita anteriormente, basta copiar e renomear o arquivo “SHAKEData.xml”. Exemplo: após iniciar o estudo de um problema para um depósito composto de 13 camadas no Rio Branco (AC), o usuário deseja estudar um depósito com três camadas no Rio de Janeiro (RJ). Posteriormente, ele voltará a estudar ou consultar o caso do Acre. Ele pode, então copiar e renomear o arquivo “SHAKEData.xml” com os dados referentes ao caso do Acre para, por exemplo, “Rio_Branco.xml”, e então realizar o novo estudo para o Rio de Janeiro. Quando quiser retomar o estudo para o Acre, basta renomear o Arquivo “Rio_Branco.xml” para “SHAKEData.xml”, continuando do ponto em que havia parado.

A função de criação dos arquivos de entrada é independente da função de cálculo para geração dos arquivos de saída. Assim, é possível realizar alterações manualmente nos arquivos de entrada gerados pelo programa, do tipo *.INP, que se encontrarão na pasta do mesmo, e processar o cálculo pelo programa.

O “preview” do relatório dos arquivos de saída gerados pelo programa “out1.dat” e “out2.dat” permite a visualização do relatório completo, de maneira paginada, dentro do

programa, possibilitando a mudança do zoom de exibição. É possível, também, exportar o “preview” nos formatos: PDF (*.pdf), HTML (*.htm), Rich Text Files (*.rtf) ou Text Files (*.txt). Além disso, o usuário pode acessar os arquivos de saída manualmente. O “preview” também permite a impressão direta, ou o usuário pode abrir o arquivo exportado em programa compatível e imprimi-lo.

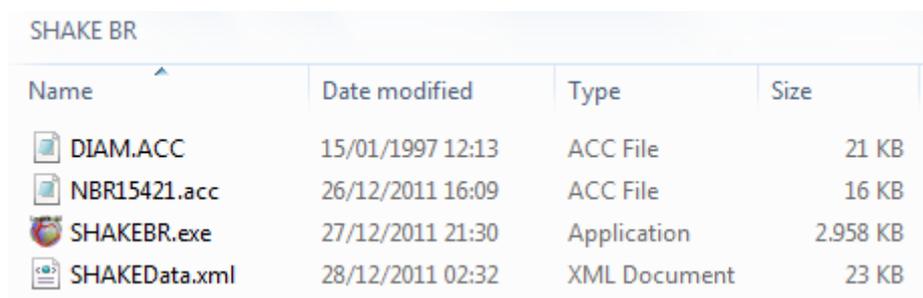
Buscando o “layout” mais ergonômico, procurou-se não utilizar barras de rolagem horizontais nos formulários. Assim, recomenda-se a resolução de tela mínima de 1024x768 durante a utilização do programa.

Optou-se por deixar o idioma da interface em inglês, aumentando o horizonte de quantidade de usuários do SHAKE BR, levando em conta, também, que como grande parte do material disponível sobre Análise Sísmica é encontrado somente em inglês, muito provavelmente o usuário do programa domina o idioma. De qualquer forma, na explicação sobre a utilização do programa, toda a interface é traduzida para o português.

3.3.2. Utilização do programa SHAKE BR

3.3.2.1. Menus iniciais

O programa SHAKE BR não requer instalação. Basta o usuário copiar o mesmo para seu disco rígido e começar a utilizá-lo. A pasta do programa SHAKE BR contém quatro arquivos, conforme mostrado na Figura 3.11. “SHAKEBR.exe” é o arquivo executável do programa. “SHAKEData.xml” é o arquivo de dados, conforme explicado anteriormente. “DIAM.ACC” e “NBR15421.acc” são arquivos com dados do acelerograma a serem lidos pelo programa, correspondentes ao caso estudado nesta seção (disponível no exemplo do SHAKE 91), e ao caso estudado mais adiante neste trabalho (gerado artificialmente pelo programa ProgSis – Geração de Sismo Artificial, do sistema DinaSis).



Name	Date modified	Type	Size
DIAM.ACC	15/01/1997 12:13	ACC File	21 KB
NBR15421.acc	26/12/2011 16:09	ACC File	16 KB
SHAKEBR.exe	27/12/2011 21:30	Application	2.958 KB
SHAKEData.xml	28/12/2011 02:32	XML Document	23 KB

Figura 3.11. Conteúdo do programa SHAKE BR.

Ao se executar o programa, será aberta a tela de apresentação, mostrada na Figura 3.12. Para continuar a abertura, basta clicar em qualquer lugar da imagem. O acelerograma

apresentado nessa tela foi gerado no Excel, utilizando dados de saída gerados pelo SHAKE BR.

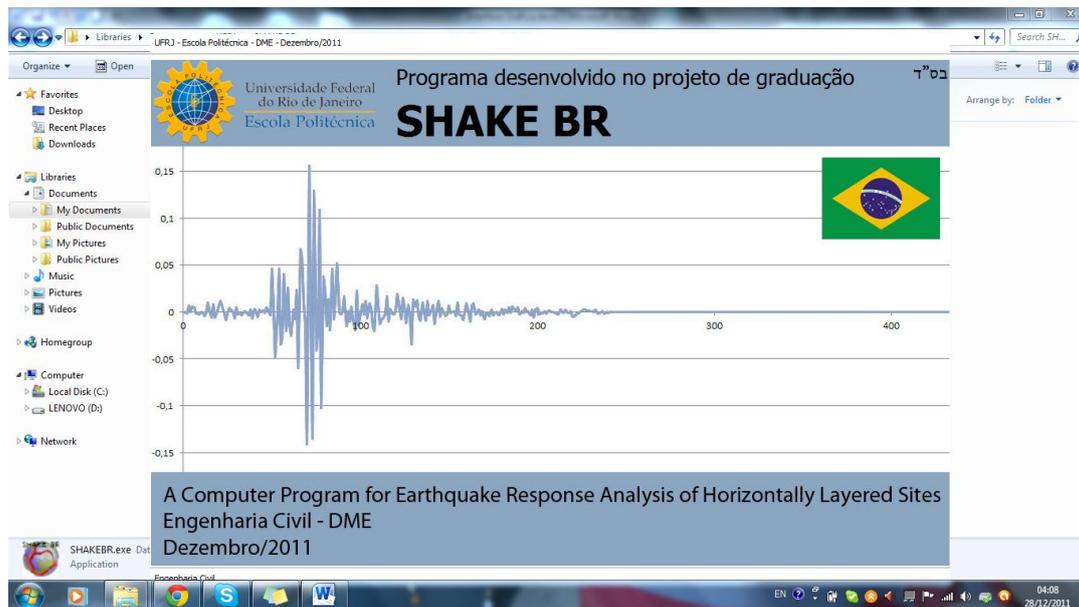


Figura 3.12. Tela de entrada do programa SHAKE BR.

Ao clicar na tela de apresentação, o usuário terá acesso a página principal do programa, mostrada na Figura 3.13. As imagens apresentadas são ilustrativas, correspondentes a consequências de terremotos ocorridos recentemente.

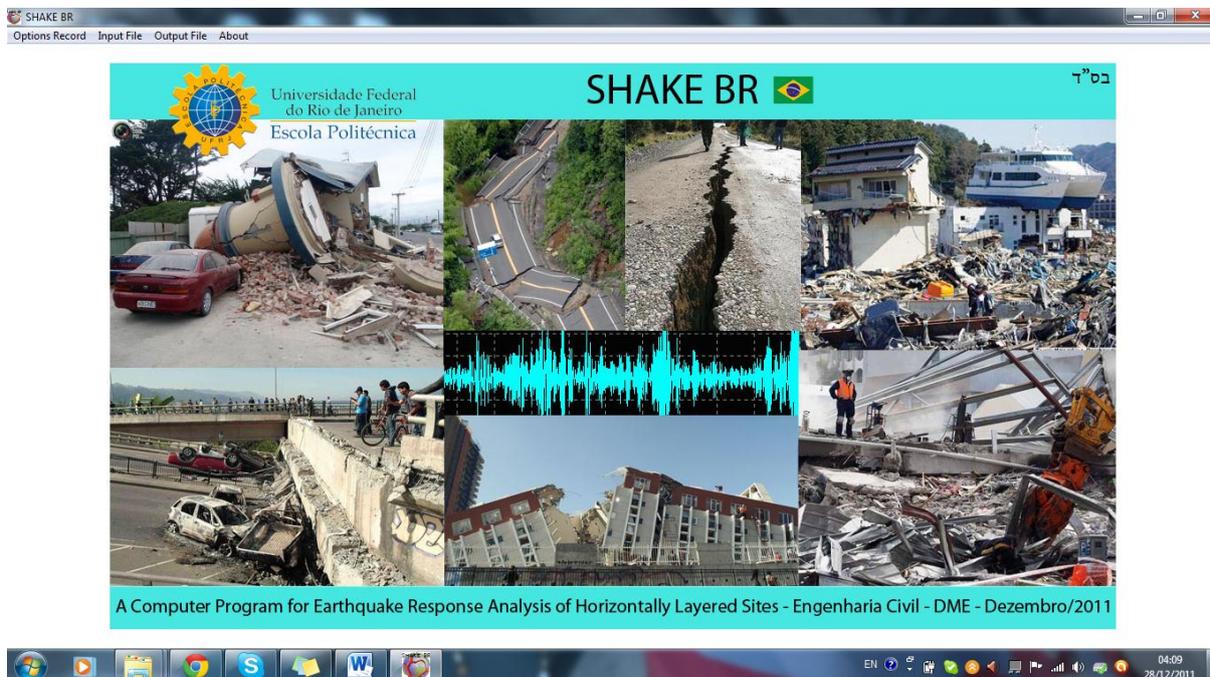


Figura 3.13. Página principal do programa SHAKE BR.

O menu principal é mostrado na Figura 3.14:

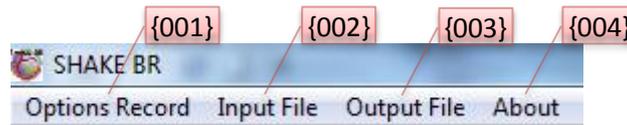


Figura 3.14. Menu principal do programa SHAKE BR.

{001} *Options Record* – Onde devem ser feitas todas as entradas de dados pelo usuário, e indicadas as saídas desejadas.

{002} *Input File* – Geração dos arquivos de entrada *.INP correspondentes aos dados fornecidos pelo usuário em {001} *Options Record* e processamento dos dados gerando os arquivos de saída “out1.dat” e “out2.dat”.

{003} *Output File* – Visualização, exportação e impressão dos arquivos de saída criados em {006} *Process*.

{004} *About* – Informações sobre o programa SHAKE BR.

Os sub-menus são mostrados nas Figuras 3.15 e 3.16:

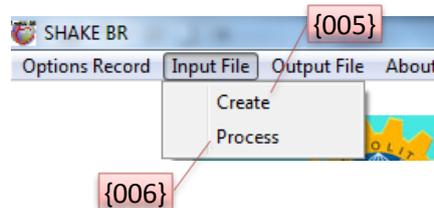


Figura 3.15. Sub-menu do {002} *Input File*.

{005} *Create* – Geração dos arquivos de entrada, conforme explicado em {002} *Input File*.

{006} *Process* - Processamento dos dados, conforme explicado em {002} *Input File*.

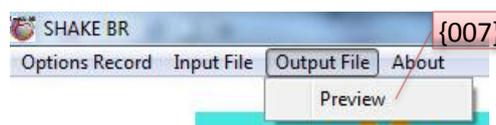


Figura 3.16. Sub-menu do {003} *Output File*.

{007} *Preview* – explicado em {003} *Output File*.

3.3.2.2. Entrada de dados

As opções de 1 a 5 correspondem às entradas de dados do usuário. As opções de 6 a 11 correspondem às saídas desejadas pelo mesmo. A navegação entre as opções de 1 a 11 é feita pelas abas superiores, conforme mostrado na Figura 3.17:

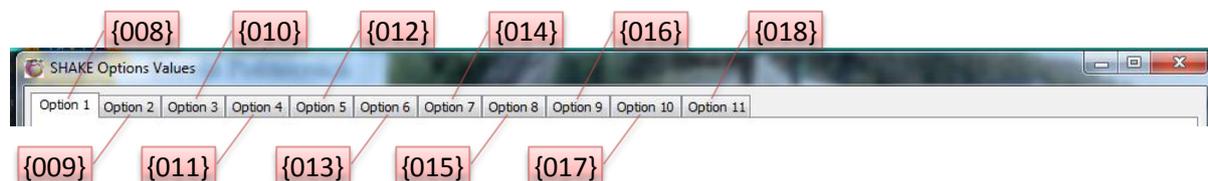


Figura 3.17. Opções referentes ao {001} Options Record.

{008} Option 1 – Propriedades dinâmicas do solo.

{009} Option 2 – Perfil do terreno.

{010} Option 3 – Acelerograma de “input”.

{011} Option 4 – Atribuição do acelerograma à camada especificada.

{012} Option 5 – Número de iterações e razão entre deformação uniforme equivalente e deformação máxima.

{013} Option 6 – Computar as acelerações no topo das camadas especificadas.

{014} Option 7 – Computar o histórico temporal de tensão cisalhante e de deformações no topo da subcamada especificada.

{015} Option 8 – Computar o histórico temporal dos deslocamentos.

{016} Option 9 – Computar o espectro de resposta.

{017} Option 10 – Computar o espectro de amplificação.

{018} Option 11 – Computar o espectro de Fourier.

A Figura 3.18 apresenta os botões padrões utilizados para navegação e para salvamento dentro do programa, que aparecem de maneira similar em várias opções de entrada:

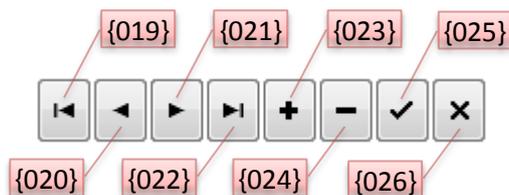


Figura 3.18. Botões padrões utilizados nas opções de 1 a 11.

- {019}  *First Record* – Navega para o primeiro registro.
- {020}  *Prior Record* – Navega para o registro anterior.
- {021}  *Next Record* – Navega para o próximo registro.
- {022}  *Last Record* – Navega para o último registro.
- {023}  *Insert Record* – Insere um novo registro.
- {024}  *Delete Record* – Exclui o registro selecionado.
- {025}  *Save Edit* – Salva as modificações feitas no registro selecionado.
- {026}  *Cancel Edit* – Cancela as modificações feitas no registro selecionado.

Em relação ao salvamento, a interface foi criada com dupla redundância. Se o usuário editar um registro e, sem salvar, começar a editar outro registro, as modificações feitas no registro anterior serão salvas automaticamente (Portanto, o usuário só poderá desfazer modificações em um registro se não tiver começado a editar outro). Além disso, se o usuário editar algum registro, não começar a editar outro, não salvar as modificações e fechar o programa, automaticamente as mudanças que ele tiver feito no registro serão salvas.

A entrada de dados referente às propriedades dinâmicas do solo ({008} *Option 1*) é mostrada na Figura 3.19, a seguir. A obtenção das propriedades do solo é feita com ensaios complexos em laboratórios, caros e muito difíceis de serem realizados. As propriedades dos três tipos de terreno já definidos no programa: argila, areia e rocha, foram obtidas há vários anos e até hoje são os tipos utilizados em projetos. Entretanto, o usuário pode definir quantos tipos de solo desejar.

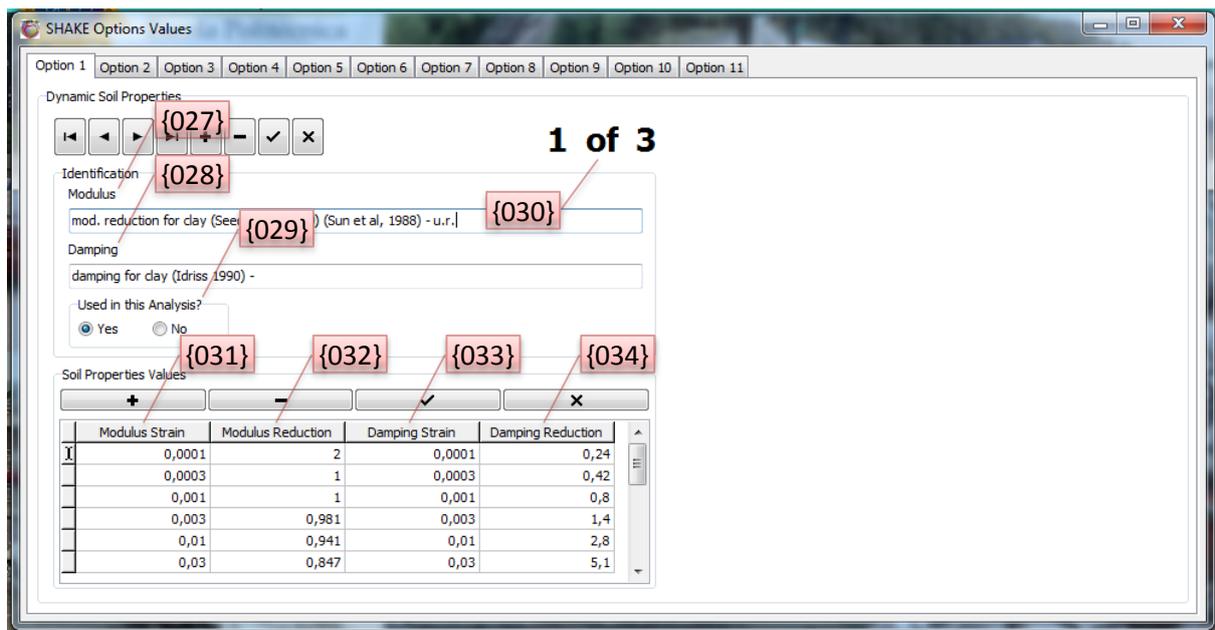


Figura 3.19. Entrada de dados referente às propriedades dinâmicas do solo ({008} Option 1).

{027} *Modulus* – Identificação que aparecerá no arquivo de saída para o conjunto de valores de redução do módulo de cisalhamento definidos pelo usuário em {031} *Modulus Strain* e {032} *Modulus Reduction*.

{028} *Damping* – Identificação que aparecerá no arquivo de saída para o conjunto de valores de redução do amortecimento definidos pelo usuário em {033} *Damping Strain* e {034} *Damping*.

{029} *Used in this Analysis?* – Definir se o tipo de terreno em questão será utilizado na análise.

{030} *X of $\sum X$* – Indica a numeração atribuída ao tipo de terreno em questão e quantidade total de tipos de solo definidas pelo usuário. No arquivo de saída “out1.dat” só aparecerão os tipos de solo, e propriedades respectivas, que foram utilizados na análise. Assim, não serão impressos dados desnecessários para o usuário e serve como verificação de que realmente foram usados os tipos de solo desejados na análise.

{031} *Modulus Strain* – Valores das deformações, em porcentagem, em ordem crescente.

{032} *Modulus Reduction* – Valores das reduções do módulo de cisalhamento (G/G_{\max}), em decimal, correspondentes às deformações definidas em {031} *Modulus Strain*.

{033} *Damping Strain* – Valores das deformações, em porcentagem, em ordem crescente.

{034} *Damping* – Valores do fator de amortecimento (ξ/ξ_{\max}), em decimal, correspondentes às deformações definidas em {033} *Damping Strain*.

Todos os dados referentes às propriedades dinâmicas do solo ({008} *Option 1*) são preenchidos simplesmente digitando os valores nos campos correspondentes, usando vírgula como separador decimal.

Na Figura 3.21, a seguir, é mostrada a entrada de dados referente ao perfil do terreno ({009} *Option 2*). Para melhor visualizar o caso estudado, foi feita uma representação esquemática na Figura 3.20:

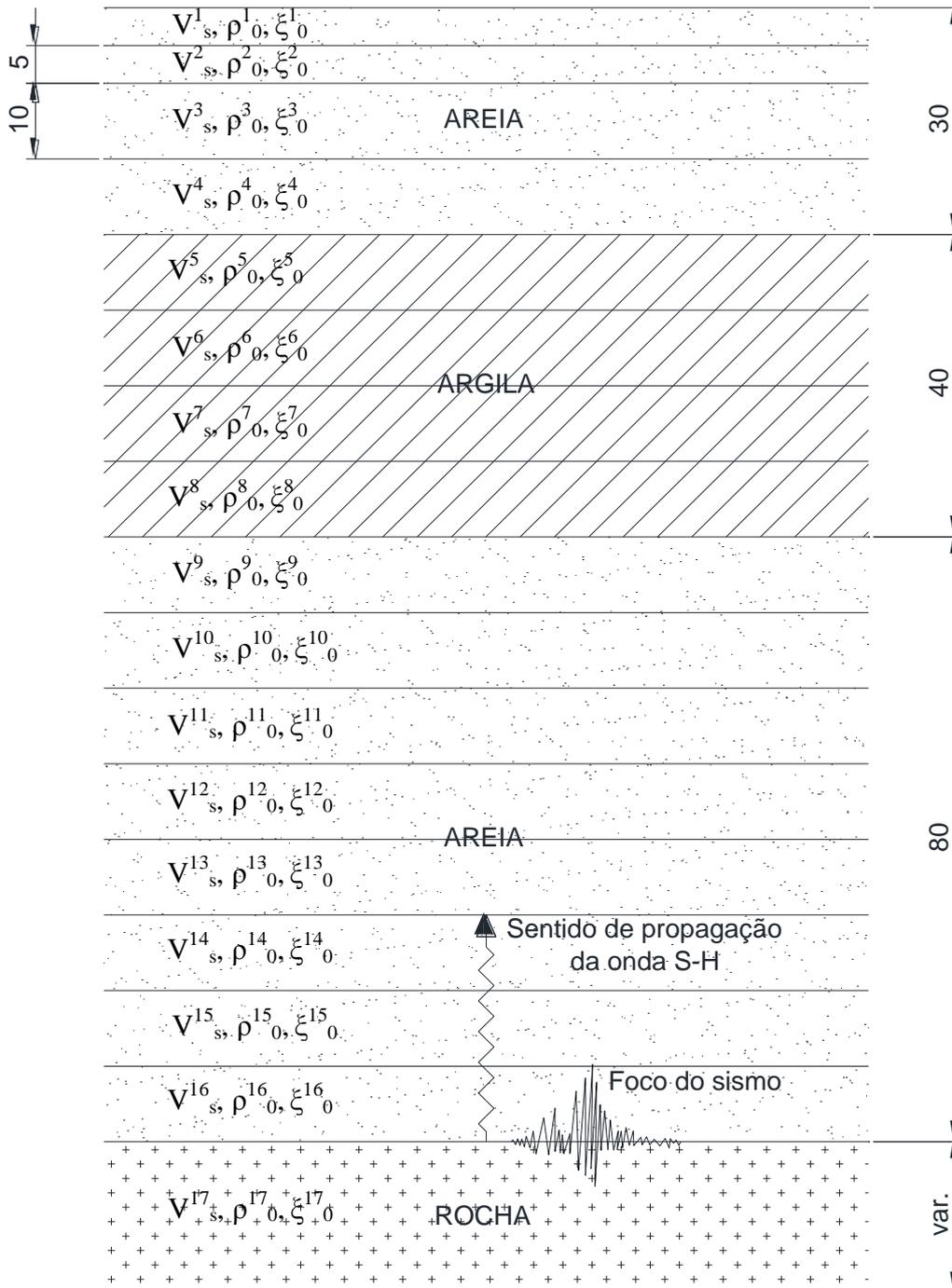


Figura 3.20. Representação esquemática do caso estudado.

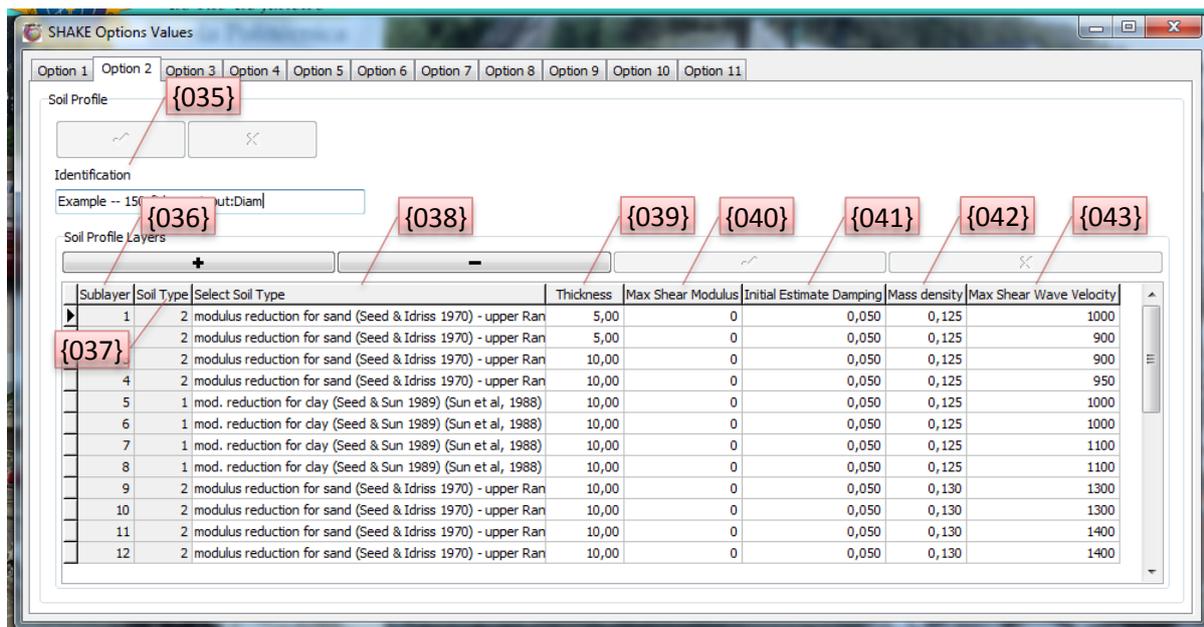


Figura 3.21. Entrada de dados referente ao perfil do terreno ({009} Option 2).

{035} *Identification* – Identificação do perfil de solo.

{036} *Sublayer* – Número da subcamada. (Preenchido automaticamente)

{037} *Soil Type* – Tipo de solo atribuído para a respectiva camada. (Preenchido automaticamente)

{038} *Select Soil Type* – Atribuição de um tipo de solo, definido em {008} *Option 1*, para a camada em questão.

{039} *Thickness* – Espessura da subcamada, em ft. Para a formação rochosa, deve-se atribuir o valor 0 para a espessura.

{040} *Max Shear Modulus* – Módulo de cisalhamento máximo da subcamada, em ksf (se for fornecida a velocidade máxima de propagação da onda S-H para a subcamada, em {043} *Max Shear Wave Velocity*, deve-se atribuir o valor 0 para o módulo de cisalhamento máximo).

{041} *Initial Estimate Damping* – Estimativa inicial do fator de amortecimento, em decimal.

{042} *Mass density* – Densidade de massa, em kip/ft³.

{043} *Max Shear Wave Velocity* – Velocidade máxima de propagação da onda S-H para a subcamada, em ft/s (se for fornecido o módulo de cisalhamento máximo para a subcamada, em {040} *Max Shear Modulus*, deve-se atribuir o valor 0 para a velocidade máxima de propagação da onda S-H).

Alguns dados referentes ao perfil do terreno ({009} *Option 2*) são preenchidos automaticamente, conforme dito anteriormente. A atribuição do tipo de solo para uma camada ({038} *Select Soil Type*) é feita utilizando-se uma “combo-box”, sendo possível solicitar somente os tipos de solo definidos pelo usuário em {008} *Option 1*, conforme ilustrado na Figura 3.22, a seguir. (Atenção: Se o usuário utilizar um tipo de solo definido em {008} *Option 1*, porém tiver definido em {029} *Used in this Analysis?* que o tipo de solo não será utilizado na análise, resultará em erro.) Os demais dados são preenchidos simplesmente digitando-se os valores nos campos correspondentes, usando vírgula como separador decimal.

Type	Select Soil Type	Th
2	s reduction for sand (Seed & Idriss 1970) - upper Range	
2	mod. reduction for clay (Seed & Sun 1989) (Sun et al, 1988)	
2	modulus reduction for sand (Seed & Idriss 1970) - upper Range	
2	modulus reduction for rock half space (Schnabel et al, 1972)	
1		
1		
1		
1		

Figura 3.22. Exemplo de seleção utilizando “combo-box”.

A entrada de dados referente ao acelerograma de “input” ({010} *Option 3*) é mostrada na Figura 3.24, a seguir. O acelerograma utilizado pode ser: gerado artificialmente, por exemplo, pelo programa ProgSis – Geração de Sismo Artificial, do sistema DinaSis; obtido por meio de estudos de terremotos anteriores no local estudado; ou obtido numa outra análise realizada pelo programa SHAKE BR.

A Figura 3.23 mostra o acelerograma utilizado no caso estudado, disponível no exemplo do SHAKE 91:

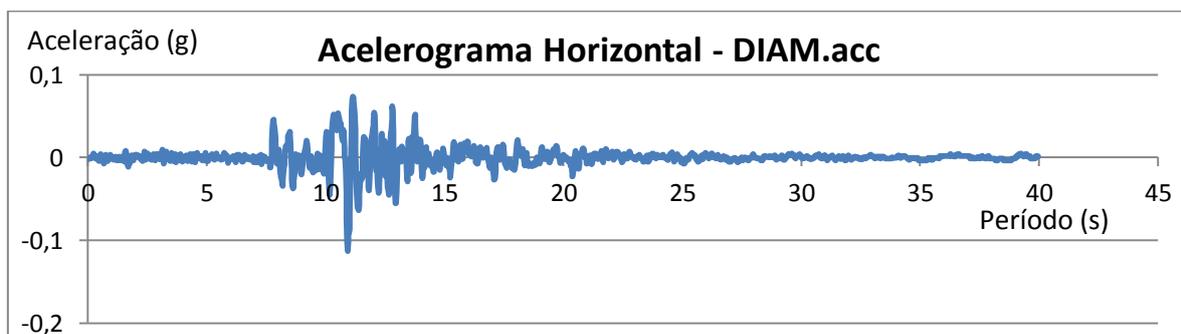


Figura 3.23. Acelerograma para o caso estudado, correspondente ao arquivo DIAM.ACC.

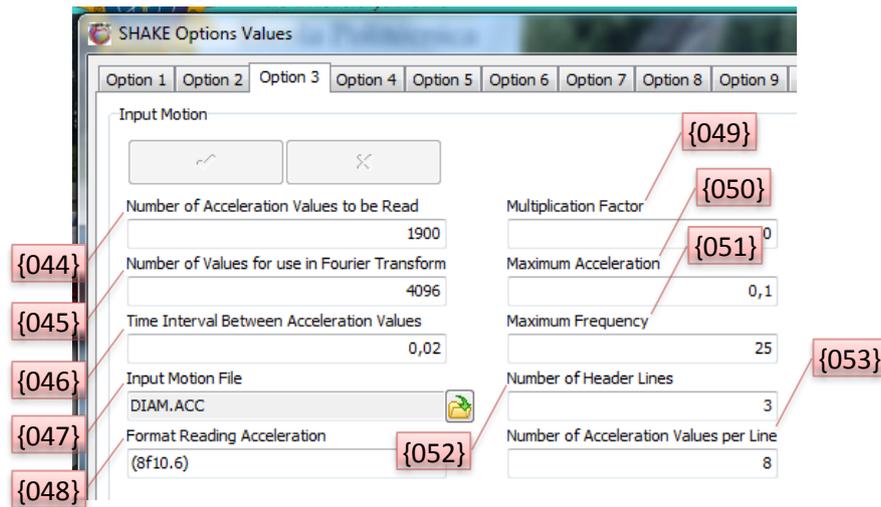


Figura 3.24. Entrada de dados referente ao acelerograma de “input” ({010} Option 3).

{044} *Number of Acceleration Values to be Read* – Número de acelerações (NV) a ser lido do arquivo correspondente ao acelerograma ({047} *Input Motion File*).

{045} *Number of Values for use in Fourier Transform* – Número de valores a ser usado na Transformada de Fourier (MA). MA deve ser uma potência de 2 (512, 1024, 2048, 4096, 8192, ...) e maior que NV.

{046} *Time Interval Between Acceleration Values* – Intervalo de tempo entre os valores de aceleração, em s.

{047} *Input Motion File* – Nome do arquivo referente ao acelerograma de “input” (Tem que ser um arquivo de extensão *.acc. Caso a extensão do arquivo desejado seja *.txt, basta renomear manualmente o arquivo, colocando a extensão *.acc).

{048} *Format Reading Acceleration* – Formato de leitura para os valores de aceleração, referente ao programa SHAKE 91 em Fortran. Como a linguagem utilizada no SHAKE BR é Pascal, essa informação se torna desnecessária, podendo ser preenchida com qualquer valor. Somente para comparar os arquivos de saída do SHAKE BR com os do SHAKE 91, foi mantida essa opção de entrada de dados. (Nesse caso, “8f10.6” significa em Fortran que estão sendo lidos 8 valores de aceleração por linha, do tipo float, com 10 casas inteiras e 6 decimais, utilizando ponto como separador decimal).

{049} *Multiplication Factor* – Fator de multiplicação utilizado para ajustar os valores de aceleração (se for fornecida a aceleração máxima, em {050} *Maximum Acceleration*, deve-se atribuir o valor 0 para o fator de multiplicação).

{050} *Maximum Acceleration* – Aceleração máxima a ser utilizada, em g. Os valores de aceleração lidos serão ajustados para prover a aceleração máxima especificada nessa entrada de dados (se for fornecido o fator de multiplicação, em {049} *Multiplication Factor*, deve-se atribuir o valor 0 para a aceleração máxima).

{051} *Maximum Frequency* – Frequência máxima, ou seja, a frequência de corte a ser utilizada na análise.

{052} *Number of Header Lines* – Número de linhas de cabeçalho existentes no arquivo escolhido em {047} *Input Motion File*.

{053} *Number of Acceleration Values per Line* – Número de valores de aceleração em cada linha no arquivo definido em {047} *Input Motion File*. Atenção: o código em Pascal, traduzido do Fortran, da mesma forma que no SHAKE original, possui a restrição de não poder ler somente um valor de aceleração por linha, sendo o mínimo de dois valores por linha.

Todos os dados referentes às propriedades dinâmicas do solo ({010} *Option 3*) são preenchidos simplesmente digitando os valores nos campos correspondentes, usando vírgula como separador decimal; exceto na escolha do arquivo do acelerograma de “input”, em {047} *Input Motion File*, na qual o usuário deve clicar no botão  e, então, selecionar o arquivo de extensão *.acc a ser utilizado na análise., conforme indicado na Figura 3.25, a seguir. Para facilitar o usuário, a janela de seleção do acelerograma já abre na própria pasta onde está o SHAKE BR, onde se encontram os arquivos tipo *.acc:

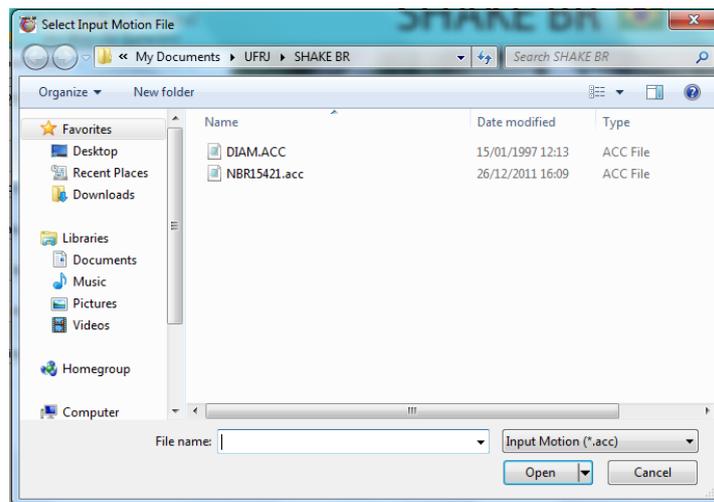


Figura 3.25. *Janela de seleção do acelerograma ({047} Input Motion File).*

Na Figura 3.26, a seguir, é mostrada a entrada de dados referente à atribuição do acelerograma à camada especificada pelo usuário ({011} *Option 4*):

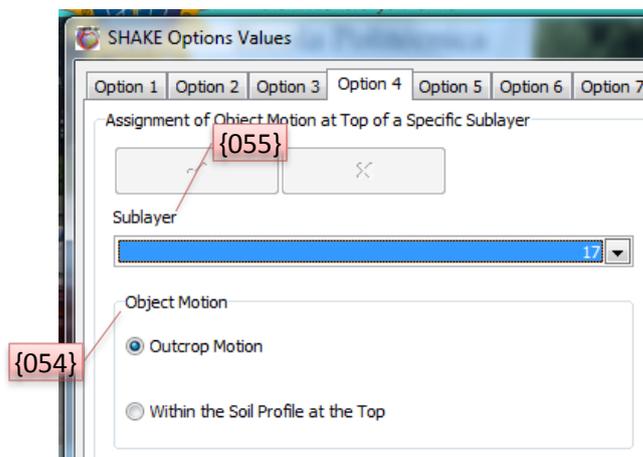


Figura 3.26. Entrada de dados referente à atribuição da geração do acelerograma ({011} *Option 4*).

{054} *Sublayer* – Número da subcamada no topo da qual deve ser atribuída a geração do acelerograma.

{055} *Object Motion* – Definir se os deslocamentos conhecidos do solo são atribuídos para o afloramento ("outcrop"); ou no interior do perfil de solo ("within"), no topo da camada selecionada em {054} *Sublayer*.

A entrada de dados referente ao número de iterações e à razão entre deformação uniforme equivalente e deformação máxima ({012} *Option 5*) é mostrada na **Figura D.17**:

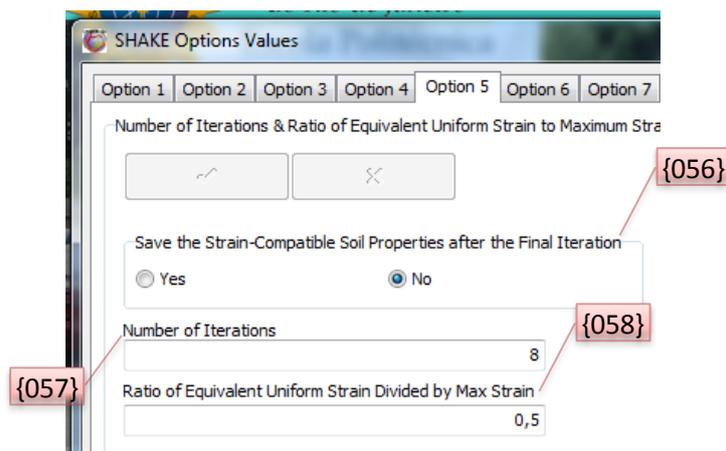


Figura 3.27. Entrada de dados referente ao número de iterações e à razão entre deformação uniforme equivalente e deformação máxima do acelerograma ({012} *Option 5*).

{056} *Save the Strain Compatible Soil Properties after the Final Iteration* – Especificar se é desejado o salvamento das propriedades do solo compatíveis com as deformações depois do final da última iteração.

{057} *Number of Iterations* – Número de iterações a serem realizadas.

{058} *Ratio of Equivalent Uniform Strain Divided by Max Strain* – Razão entre a deformação uniforme equivalente dividida pela deformação máxima. Normalmente, varia entre 0,4 e 0,75, dependendo do acelerograma de “input” e da magnitude do terremoto que o acelerograma representa. A seguinte relação pode ser utilizada para estimar essa razão:

$$R = (M - 1)/10 \quad (3.1)$$

onde M é a magnitude do terremoto. Usualmente, adota-se R=0,65.

Conforme dito anteriormente, as próximas opções de entrada de dados correspondem às saídas desejadas pelo usuário. Na Figura 3.28, a seguir, é mostrada a entrada de dados em que o usuário pede a computação das acelerações no topo das camadas especificadas ({013} *Option 6*):

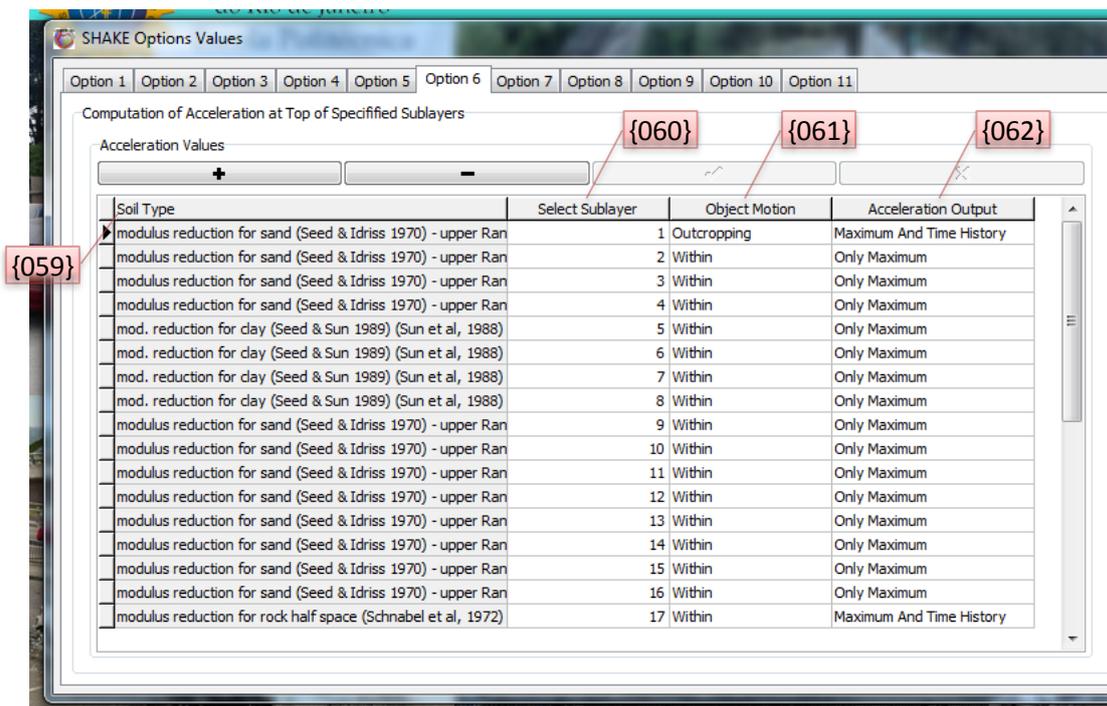


Figura 3.28. *Entrada de dados referente ao pedido do usuário de computação das acelerações no topo das camadas especificadas ({013} Option 6).*

{059} *Soil Type* – Tipo de solo atribuído para a respectiva camada. (Preenchido automaticamente).

{060} *Select Sublayer* – Selecionar a subcamada no topo da qual serão calculadas as acelerações.

{061} *Object Motion* – Definir o tipo da subcamada: aflorante ("outcrop"); ou no interior do perfil de solo ("within").

{062} *Acceleration Output* – Escolher o tipo de dados de saída para as acelerações computadas: salvar a aceleração máxima somente ou salvar tanto o histórico temporal de acelerações quanto a aceleração máxima.

A entrada de dados referente à computação do histórico temporal de tensão cisalhante e de deformações no topo da subcamada especificada ({014} *Option 7*) é mostrada na Figura 3.29:

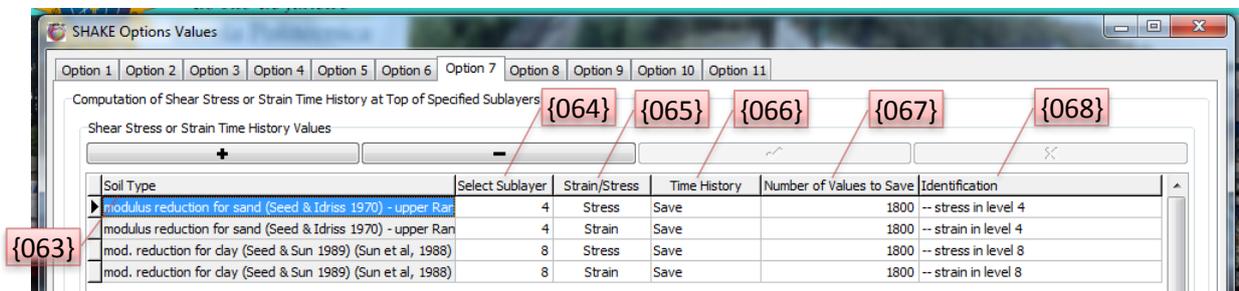


Figura 3.29. Entrada de dados referente ao pedido do usuário de computação do histórico temporal de tensão cisalhante e de deformações no topo da subcamada especificada ({014} *Option 7*).

{063} *Soil Type* – Tipo de solo atribuído para a respectiva camada. (Preenchido automaticamente).

{064} *Select Sublayer* – Selecionar a subcamada no topo da qual será calculada o histórico temporal de tensões cisalhantes ou de deformações.

{065} *Strain/Stress* – Optar pela computação do histórico temporal de tensão cisalhante ou de deformações.

{066} *Time History* – Optar pelo salvamento ou não-salvamento do histórico temporal escolhido em {065} *Strain/Stress*.

{067} *Number of Values to Save* – Número de valores a ser salvo, tipicamente igual a NV, definido em {045} *Number of Values for use in Fourier Transform*.

{068} *Identification* – Identificação que aparecerá no arquivo de saída junto ao histórico temporal computado.

Importante perceber que os históricos temporais pedidos na opção anterior ({014} *Option 7*) só podem ser computados no topo da subcamada desejada. Caso o usuário queira computar o histórico temporal em determinada profundidade da subcamada, deverá redefinir o perfil do terreno, dividindo a subcamada em questão na profundidade desejada, que passará a ser o topo de uma das novas subcamadas.

Conforme indicado na Figura 3.30, o programa não utiliza a aba correspondente à computação do histórico temporal dos deslocamentos ({015} *Option 8*). Segundo Idriss [9], o propósito dessa opção é cumprido na computação das acelerações no topo das camadas especificadas ({013} *Option 6*). Optou-se em manter a aba correspondente à {015} *Option 8*, para utilizar a mesma numeração de opções do programa SHAKE original, e não causar dúvidas ao usuário se percebesse que há uma quebra na numeração das opções.



Figura 3.30. Comentário existente na aba correspondente à computação do histórico temporal dos deslocamentos ({015} *Option 8*).

Na Figura 3.31, a seguir, é mostrada a entrada de dados em que o usuário pede a computação do espectro de resposta ({016} *Option 9*):

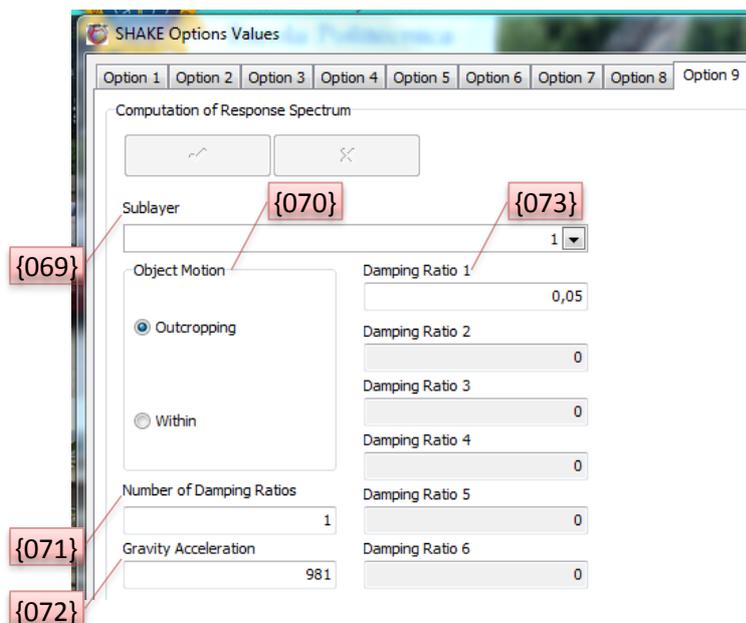


Figura 3.31. Entrada de dados referente à computação do espectro de resposta ({016} *Option 9*).

{069} *Sublayer* – Selecionar a subcamada em que se deseja o espectro de resposta.

{070} *Object Motion* – Escolher entre: aflorante ("outcrop"); ou no interior do perfil de solo ("within").

{071} *Number of Damping Ratios* – Quantidade de razões de amortecimento a ser utilizada na análise, sendo o máximo igual a seis. Em função do valor atribuído neste campo, será liberada a quantidade de campos correspondentes em {072} *Damping Ratio*.

{072} *Gravity Acceleration* – Valor da aceleração da gravidade.

{073} *Damping Ratio* – Valores das razões de amortecimento a serem utilizados na análise.

A entrada de dados referente à computação do espectro de amplificação ({017} *Option 10*) é mostrada na Figura 3.32:

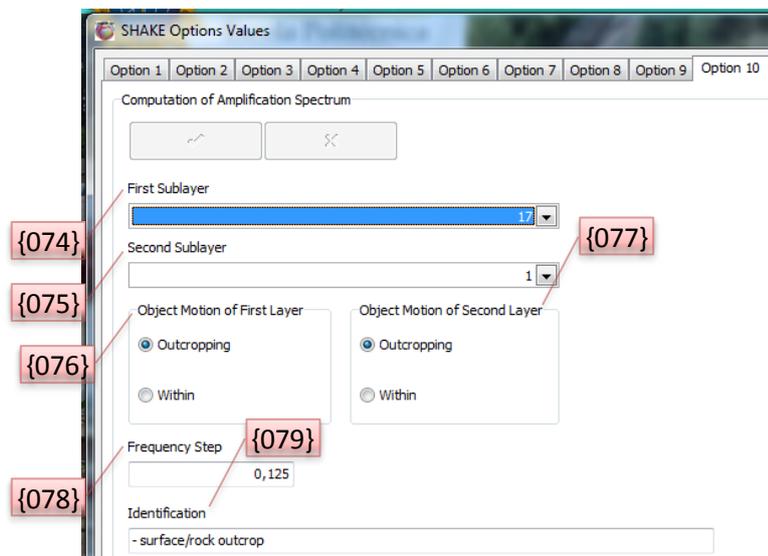


Figura 3.32. Entrada de dados referente à computação do espectro de amplificação ({017} *Option 10*).

{074} *First Sublayer* – Selecionar a primeira subcamada.

{075} *Second Sublayer* – Selecionar a segunda subcamada.

{076} *Object Motion for First Layer* – Escolher entre: aflorante ("outcrop"); ou no interior do perfil de solo ("within").

{077} *Object Motion for Second Layer* – Escolher entre: aflorante ("outcrop"); ou no interior do perfil de solo ("within").

{078} *Frequency Step* – Valor para o passo de frequência, em Hz. O espectro de amplificação é calculado para 200 frequências, iniciando de 0 e utilizando o passo de frequência definido neste campo.

{079} *Identification* – Informação de identificação do espectro de amplificação.

Na Figura 3.33, a seguir, é mostrada a entrada de dados em que o usuário pede a computação do espectro de Fourier ({018} *Option 11*):

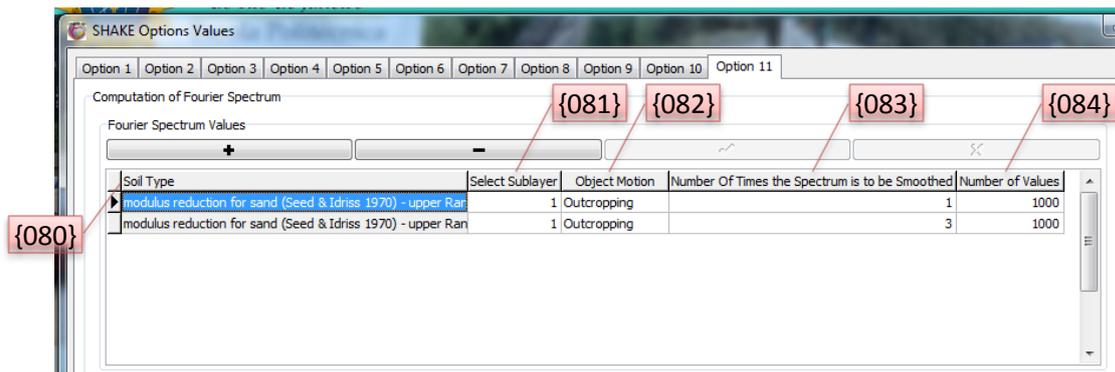


Figura 3.33. Entrada de dados referente à computação do espectro de Fourier ({018} *Option 11*).

{080} *Soil Type* – Tipo de solo atribuído para a respectiva camada. (Preenchido automaticamente).

{081} *Select Sublayer* – Selecionar a subcamada.

{082} *Object Motion* – Escolher entre: aflorante ("outcrop"); ou no interior do perfil de solo ("within").

{083} *Number Of Times the Spectrum is to be Smoothed* – Número de vezes que se deseja suavizar o espectro. Ver equação 3.2, a seguir.

{084} *Number of Values* – Número de valores a ser salvo.

Na computação do espectro de Fourier, o usuário deve obrigatoriamente prover outra subcamada ou então repetir a mesma já definida.

Segundo Schnabel [4], a expressão utilizada para suavizar o espectro de Fourier é:

$$A_i = \frac{A_{i-1} + 2 \times A_i + A_{i+1}}{4} \quad (3.2)$$

onde A_i é a amplitude do espectro para a i -ésima frequência.

3.3.2.3. Saída de dados

Conforme dito anteriormente, o processamento dos dados, realizado em {006} *Process*, gera dois arquivos de saída: “out1.dat” e out2.dat”. Esses arquivos são gerados na própria pasta do SHAKE BR. O usuário pode acessá-los manualmente utilizando um editor de texto compatível, ou então usar a interface gráfica para obter o “preview”, exportar e imprimir o arquivo.

Para acessar os arquivos de saída pela interface gráfica, o usuário deve clicar em {007} *Preview*, e então selecionar o arquivo a ser visualizado, conforme indicado na Figura 3.34 a seguir. Para facilitar o usuário, a janela de seleção do arquivo de saída já abre na própria pasta onde está o SHAKE BR, onde se encontram os arquivos “out1.dat” e “out2.dat”.

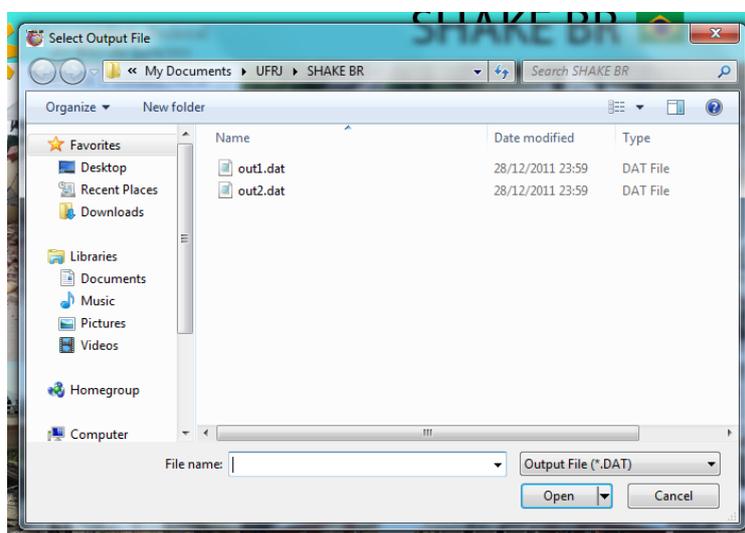


Figura 3.34. Janela de seleção do arquivo de saída ({007} *Preview*).

O “preview”, neste caso do arquivo “out1.dat”, é mostrado na Figura 3.35, a seguir. No início desse arquivo, são exibidos comentários em relação ao desenvolvimento do programa, que podem ser visualizados na primeira página “preview”.

{085} *Header* – Cabeçalho inserido no começo de cada página do “preview” do arquivo de saída criado.

{086} *Date and Time* – Data e hora da criação do “preview” do arquivo de saída.

{087} *Page X of $\sum X$ Pages* – Paginação sequencial.

{088} *View* – Conjunto de botões relacionado à visualização do “preview”.

{089} *Output* – Conjunto de botões relacionado à impressão e exportação do “preview”.

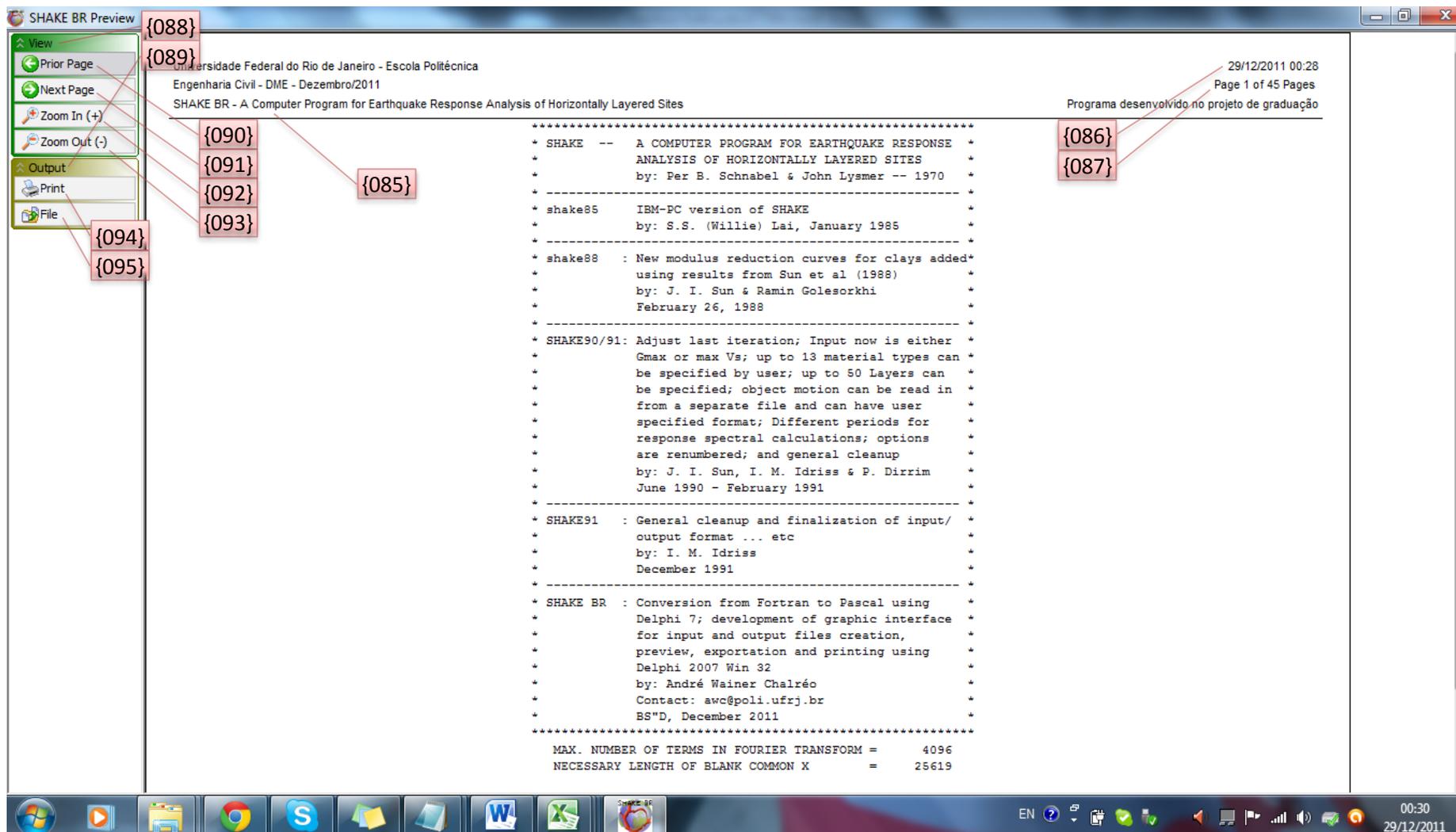


Figura 3.35. Tela de visualização dos arquivos de saída.

No conjunto de botões relacionados à visualização do “preview” ({088} *View*), encontram-se os seguintes:

{090} *Prior Page* – Navega para a página anterior.

{091} *Next Page* – Navega para a próxima página.

{092} *Zoom in (+)* – Amplia o zoom de exibição do “preview”

{093} *Zoom out (-)* – Reduz o zoom de exibição do “preview”

No conjunto de botões relacionado à impressão e exportação do “preview” ({089} *Output*), encontram-se os seguintes:

{094} *Print* – Imprime o “preview” utilizando a impressora padrão instalada no computador

{095} *File* – Exporta o “preview” do arquivo de saída para um arquivo na extensão desejada. Ao clicar neste botão, é exibida a janela de exportação mostrada na Figura 3.36:

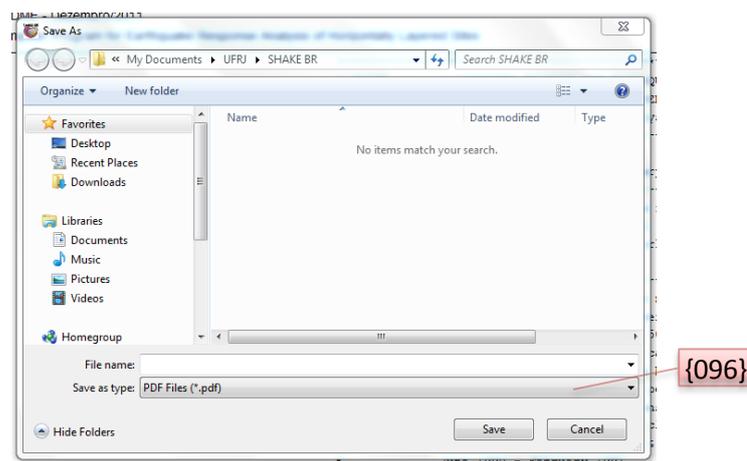


Figura 3.36. Janela de exportação dos arquivos de saída.

{096} *Save as type* – Combo-box com os tipos de extensão em que podem ser exportados os arquivos de saída, conforme indicado na Figura 3.37, a seguir.

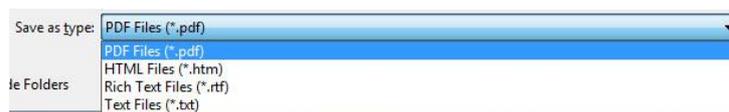


Figura 3.37. Opções de extensão de arquivo.

3.3.2.4. Sobre o SHAKE BR

Conforme dito anteriormente, em {004} *About* o usuário visualiza as informações sobre o programa SHAKE BR, mostradas na Figura 3.38, mostrada a seguir.



Figura 3.38. *Informações sobre o programa SHAKE BR.*

3.4. Comparação entre o SHAKE BR e o SHAKE original

Objetivando avaliar o funcionamento do SHAKE BR, o mesmo exemplo que se estudou nas explicações de como utilizá-lo foi analisado pelo SHAKE original. Neste caso, realizou-se a entrada de dados por meio de arquivo *.txt ou similar, mostrado nas Figuras 3.39, 3.40 e 3.41 (uma vez que o programa original não possui interface gráfica):

```
option 1 - dynamic soil properties - (max is thirteen):
  1
  3
  11      #1 modulus for clay (seed & sun 1989) upper range
0.0001   0.0003   0.001   0.003   0.01   0.03   0.1
0.3
1.        3.        10.
1.000    1.000    1.000    0.981    0.941    0.847    0.656
0.438
0.238    0.144    0.110
  11      damping for clay (Idriss 1990) -
0.0001   0.0003   0.001   0.003   0.01   0.03   0.1
0.3
1.        3.16    10.
0.24     0.42    0.8     1.4     2.8     5.1     9.8
15.5
21.      25.      28.
```

Figuras 3.39. *Arquivo de entrada do SHAKE original INP.DAT – parte 1.*

```

11      #2 modulus for sand (seed & idriss 1970) - upper Range
0.0001 0.0003 0.001 0.003 0.01 0.03 0.1
0.3
1.      3.      10.
1.000 1.000 0.990 0.960 0.850 0.640 0.370
0.180
0.080 0.050 0.035
11      damping for sand (Idriss 1990) - (about LRng from SI 1970)
0.0001 0.0003 0.001 0.003 0.01 0.03 0.1
0.3
1.      3.      10.
0.24 0.42 0.8 1.4 2.8 5.1 9.8
15.5
21.    25.      28.
8      #3 ATTENUATION OF ROCK AVERAGE
.0001 0.0003 0.001 0.003 0.01 0.03 0.1
1.0
1.000 1.000 0.9875 0.9525 0.900 0.810 0.725
0.550
5      DAMPING IN ROCK
.0001 0.001 0.01 0.1 1.
0.4 0.8 1.5 3.0 4.6
3      1      2      3
Option 2 -- Soil Profile
2
1 17      Example -- 150-ft layer; input:Diam @ .1g
1 2      5.00      .050      .125      1000.
2 2      5.00      .050      .125      900.
3 2      10.00     .050      .125      900.
4 2      10.00     .050      .125      950.
5 1      10.00     .050      .125      1000.
6 1      10.00     .050      .125      1000.
7 1      10.00     .050      .125      1100.
8 1      10.00     .050      .125      1100.
9 2      10.00     .050      .130      1300.
10 2     10.00     .050      .130      1300.
11 2     10.00     .050      .130      1400.
12 2     10.00     .050      .130      1400.
13 2     10.00     .050      .130      1500.
14 2     10.00     .050      .130      1500.
15 2     10.00     .050      .130      1600.
16 2     10.00     .050      .130      1800.
17 3     .010      .140      4000.
Option 3 -- input motion:
3
1900 4096 .02      diam.acc      (8f10.6)
.10      25.      3      8
Option 4 -- sublayer for input motion {within (1) or outcropping (0)}:
4
17      0
Option 5 -- number of iterations & ratio of avg strain to max strain
5
0      8      0.50

```

Figuras 3.40. Arquivo de entrada do SHAKE original INP.DAT – parte 2.

```

Option 6 -- sublayers for which accn time histories are computed &
saved:
  6
 16  17  17
  1   1   0
  0   1   0
option 7 -- sublayer for which shear stress or strain are computed &
saved:
  7
  4   1   1   0 1800          -- stress in level 4
  4   0   1   0 1800          -- strain in level 4
option 7 -- sublayer for which shear stress or strain are computed &
saved:
  7
  8   1   1   0 1800          -- stress in level 8
  8   0   1   0 1800          -- strain in level 8
option 9 -- compute & save response spectrum:
  9
  1   0
  1   0   981.0
 0.05
option 10 -- compute & save amplification spectrum:
 10
 17   0   1   0   0.125      - surface/rock outcrop
execution will stop when program encounters 0
  0

```

Figuras 3.41. Arquivo de entrada do SHAKE original INP.DAT – parte 3.

Para comparar os resultados obtidos pelos dois programas, os espectros de resposta de acelerações obtidos com o programa SHAKE BR e com o programa SHAKE original, foram plotados em gráficos feitos no Excel, mostrados na Figura 3.42, a seguir:

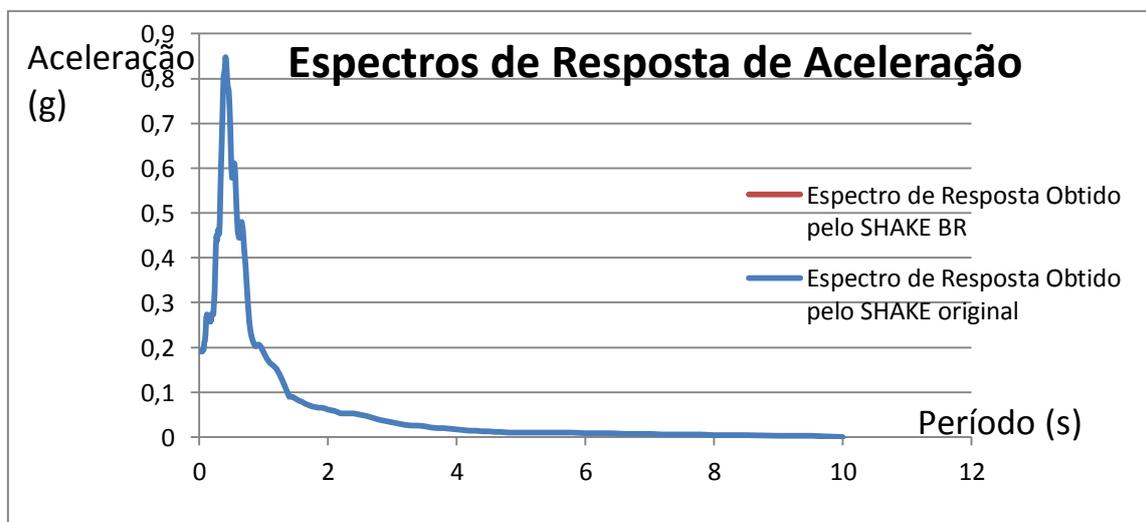


Figura 3.42. Comparação entre resultados do SHAKE BR e do SHAKE original.

Existe uma pequena diferença entre os resultados obtidos utilizando o SHAKE BR e os resultados utilizando o SHAKE original, porém a partir dos gráficos (praticamente sobrepostos) apresentados na Figura 3.42, nota-se que essa diferença é desprezível. Conclui-se que o SHAKE BR funciona conforme esperado, podendo ser utilizado para a análise sísmica da mesma forma que o SHAKE original, com as vantagens de possuir uma interface gráfica amigável e uma linguagem mais moderna, o Pascal (em relação ao Fortran), compatível com o desenvolvimento de atualizações futuras.

Não foram apresentados, neste trabalho, os demais resultados da análise do caso estudado, pois a comparação dos espectros de resposta obtidos é suficiente para indicar a validação do funcionamento do programa SHAKE BR, porém compararam-se todos os dados de saída e todos os resultados apresentaram diferenças desprezíveis. Também não foram apresentados os arquivos de saída gerados pelos dois programas, pois a partir da Figura 3.35 percebe-se que, somente para imprimir o arquivo de saída “out1.dat”, 45 páginas seriam necessárias.

4. Comparação entre análise pelo SHAKE BR e pela NBR 15421:2006

4.1. Introdução

Objetivando avaliar o método utilizado pela norma brasileira [2] para calcular o espectro de projeto, será estudado um exemplo prático, analisado pela metodologia simplificada da norma e pelo programa SHAKE BR. A norma foi desenvolvida buscando facilitar a realização da análise, utilizando parâmetros simples do solo e de acelerações, de fácil obtenção. Portanto, se comprovada sua aplicabilidade, é possível realizar os cálculos por meio dela, com mais facilidade. Questiona-se, porém, o possível superdimensionamento do espectro de projeto, que poderá ser avaliado com auxílio do SHAKE BR. Além disso, a própria norma prevê casos em que é obrigatória a utilização de métodos mais complexos de análise (caso de solos Classe F, por exemplo).

Os dados do problema estudado são os seguintes:

- Depósito composto por camada única de areia, Classe E, assentada sobre formação rochosa;
- Localização da análise: Rio Branco (AC) – Logo, a aceleração básica $a_g=0,10g$
- Frequência máxima a ser usada na análise: $f=90\text{Hz}$
- Razão entre a deformação uniforme dividida pela deformação máxima: $R=0,65$ (valor típico)
- Em relação à camada de areia:
 - Espessura da camada de areia: $H=30\text{m}$;
 - Velocidade de propagação da onda de cisalhamento na camada de areia: $V_s=180\text{m/s}$;
 - Densidade inicial: $\rho_0=1,8\text{t/m}^3$;
 - Módulo de cisalhamento inicial: $G_0=58320\text{kPa}$;
 - Amortecimento inicial: $\xi_0=0,05$, sobrejacente ao semi-espaço.
- Em relação à rocha:
 - Velocidade de propagação da onda de cisalhamento na rocha: $V_s=1300\text{m/s}$;
 - Densidade inicial: $\rho_0=2,5\text{t/m}^3$;
 - Módulo de cisalhamento inicial: $G_0=4225000\text{kPa}$;
 - Amortecimento inicial: $\xi_0=0,02$

A Figura 4.1 representa esquematicamente o problema estudado:

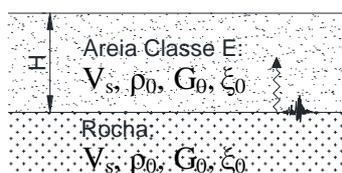


Figura 4.1. Representação esquemática do problema estudado.

4.2. Obtenção do espectro de projeto pela NBR 15421

Inicialmente, são obtidos os fatores de amplificação sísmica no solo, segundo a NBR 15421, conforme indicado na Figura 4.2:

Classe do terreno	C_a		C_v	
	$a_0 \leq 0,10g$	$a_0 = 0,15g$	$a_0 \leq 0,10g$	$a_0 = 0,15g$
A	0,8	0,8	0,8	0,8
B	1,0	1,0	1,0	1,0
C	1,2	1,2	1,7	1,7
D	1,6	1,5	2,4	2,2
E	2,5	2,1	3,5	3,4

Para valores de $0,10g \leq a_0 \leq 0,15g$ os valores de C_a e C_v podem ser obtidos por interpolação linear.

Para a classe do terreno F, um estudo específico de amplificação no solo deve ser desenvolvido.

O espectro de resposta de projeto, $S_a(T)$, é apresentado graficamente na figura 2 e definido numericamente em três faixas de períodos, expressos em segundos, pelas expressões:

$$S_a(T) = a_{gs0} (18,75 \cdot T \cdot C_a / C_v + 1,0) \quad (\text{para } 0 \leq T \leq C_v / C_a \cdot 0,08)$$

$$S_a(T) = 2,5 a_{gs0} \quad (\text{para } C_v / C_a \cdot 0,08 \leq T \leq C_v / C_a \cdot 0,4)$$

$$S_a(T) = a_{gs1} / T \quad (\text{para } T \geq C_v / C_a \cdot 0,4)$$

Quando for necessário definir um espectro para acelerações verticais, as acelerações deste espectro podem ser tomadas como 50% das acelerações correspondentes definidas nos espectros para acelerações horizontais.

Figura 4.2. Tabela da NBR 15421 para obtenção dos fatores de amplificação sísmica no solo.

A partir da Figura 4.2, para Classe B (procura-se obter o espectro de projeto não amplificado na face superior da formação rochosa) e $a_0=0,10g$, os valores de C_a e C_v são ambos iguais a 1,0

Em seguida, calculam-se as acelerações espectrais para os períodos de 0,0s (a_{gs0}) e de 1,0s (a_{gs1}), segundo o item 6.2 da NBR 15421, mostrado na Figura 4.3:

O espectro de resposta de projeto, $S_a(T)$, para acelerações horizontais, correspondente à resposta elástica de um sistema de um grau de liberdade com uma fração de amortecimento crítico igual a 5%, é definido a partir da aceleração sísmica horizontal característica a_0 e da classe do terreno, utilizando as seguintes grandezas:

$$a_{gs0} = C_a a_0$$

$$a_{gs1} = C_v a_0$$

onde:

a_{gs0} e a_{gs1} são as acelerações espectrais para os períodos de 0,0s e 1,0s respectivamente, já considerado o efeito da amplificação sísmica no solo.

C_a e C_v são os fatores de amplificação sísmica no solo, para os períodos de 0,0s e 1,0s, respectivamente, conforme tabela 3, em função da aceleração característica de projeto a_0 e da classe do terreno;

T é o período natural (em segundos), associado a cada um dos modos de vibração da estrutura.

O espectro de resposta de projeto é considerado como aplicado à base da estrutura.

Nos casos em que se identifique que uma estrutura ou parte dela apresente uma fração de amortecimento crítico diferente de 5%, um fator de correção, devidamente justificado, poderá ser aplicado pelo projetista ao espectro de resposta de projeto.

Figura 4.3. Cálculo de a_{gs0} e a_{gs1} , segundo o item 6.2 da NBR 15421.

Assim, como $C_a=1,0$, $C_v=1,0$ e $a_g=0,10g$, logo:

$$a_{gs0} = C_a \times a_g = 0,10g \quad \text{e} \quad a_{gs1} = C_v \times a_g = 0,10g \quad (4.1)$$

O espectro de projeto será descrito por uma função definida em três intervalos distintos: $0 \leq T \leq \frac{C_v}{C_a} \times 0,08$, $\frac{C_v}{C_a} \times 0,08 \leq T \leq \frac{C_v}{C_a} \times 0,4$ e $T \geq \frac{C_v}{C_a} \times 0,4$. No caso estudado, esses intervalos são $0 \leq T \leq 0,08$, $0,08 \leq T \leq 0,4$ e $T \geq 0,4$.

Portanto, a função que define o espectro será:

$$S_a(T) = a_{gs0} \left(\frac{18,75 \times T \times C_a}{C_v} + 1 \right) = 0,10(18,75 \times T + 1) \quad \text{se } 0 \leq T \leq 0,08$$

$$S_a(T) = 2,5 \times a_{gs0} = 0,25g \quad \text{se } 0,08 \leq T \leq 0,4 \quad (4.2)$$

$$S_a(T) = \frac{a_{gs1}}{T} = \frac{0,1}{T} \quad \text{se } T \geq 0,4$$

4.3. Obtenção do espectro de resposta de acelerações pelo SHAKE BR

O acelerograma utilizado na análise, indicado na Figura 4.5, foi gerado artificialmente, segundo a norma brasileira, no programa ProgSis – Geração de Sismo Artificial, do sistema DinaSis, mostrado na Figura 4.4, feito no Excel:



Figura 4.4. Tela de entrada do sistema DinaSis.

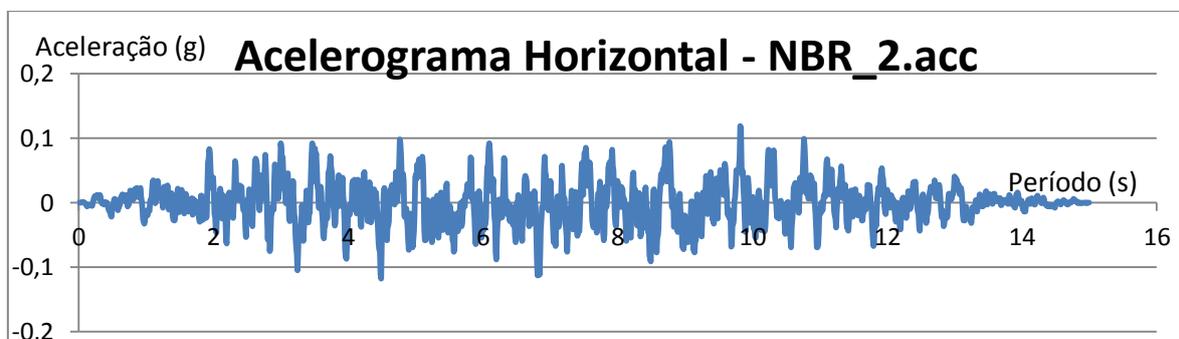


Figura 4.5. Acelerograma gerado artificialmente pelo ProgSis, segundo a NBR 15421.

A utilização do programa deve ser feita em unidades inglesas. Para realizar as conversões, as seguintes relações foram importantes:

- 1m=3,2808399ft
- 1ton/m³=0,0624282kip/ft³
- 1kPa=0,0208854ksf
- 1m/s=3,2808399ft/s

Nesse sentido, a Figura 4.6, a seguir, apresenta os dados do problema que necessitaram de conversão para a utilização do SHAKE BR:

Areia Classe E	Unidades convencionais	Unidades Inglesas
H (m ou ft)	30,00	98,43
V _s (m/s ou ft/s)	180,00	590,55
ρ ₀ (t/m ³ ou kip/ft ³)	1,80	0,11
G ₀ (kPa ou ksf)	58320,00	1218,04
ξ ₀ (adimensional)	0,05	0,05

Rocha	Unidades convencionais	Unidades Inglesas
V _s (m/s ou ft/s)	1300,00	4265,09
ρ ₀ (t/m ³ ou kip/ft ³)	2,50	0,16
G ₀ (kPa ou ksf)	4225000,00	88240,82
ξ ₀ (adimensional)	0,02	0,02

Figura 4.6. Tabela de conversão de unidades.

O programa utiliza ou a velocidade de propagação de cisalhamento da onda ou módulo de cisalhamento inicial como dado de entrada, calculando o que não foi definido pela equação (4.3): Foi fornecido ao programa o módulo de cisalhamento.

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (4.3)$$

No cálculo, realizaram-se 8 iterações. O tipo de análise feito foi o de “outcrop”.

4.4. Comparação de resultados

Para comparar o espectro de resposta de acelerações obtido com o programa SHAKE BR e o espectro de projeto da norma, os resultados obtidos nas duas análises foram comparados com gráficos feitos no Excel, mostrados na Figura 4.7, a seguir:

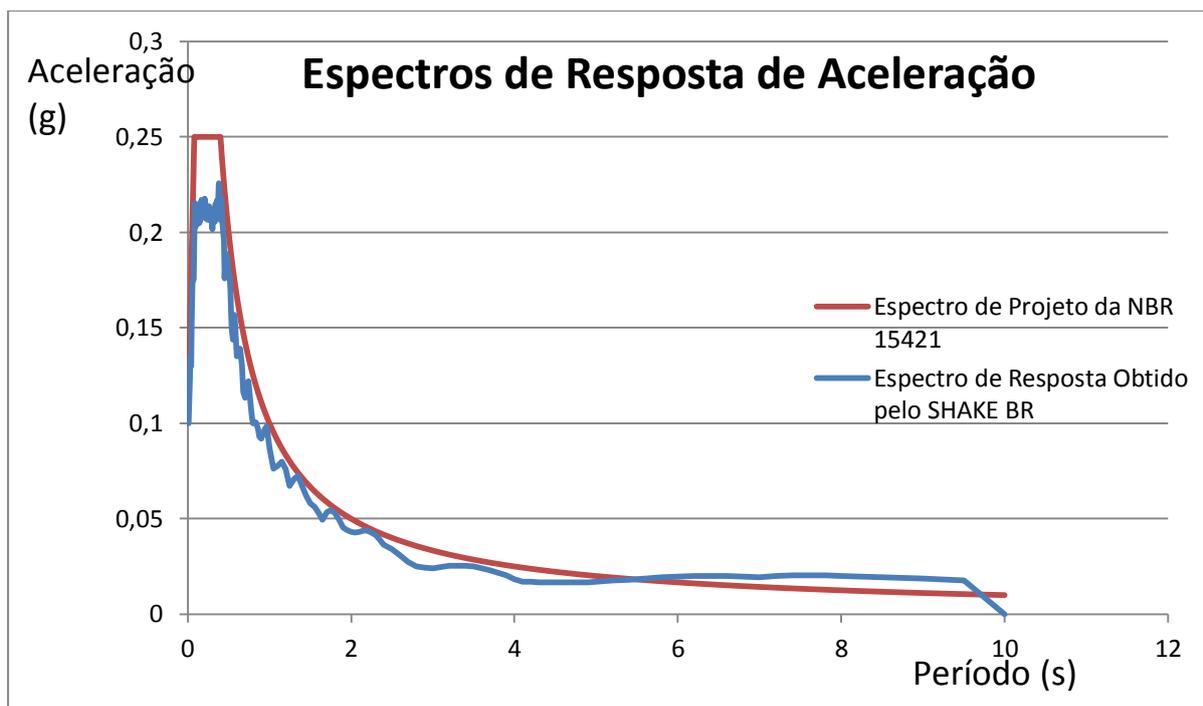


Figura 4.7. Comparação entre resultados do SHAKE BR e da NBR 15421.

Para esse caso, conclui-se que o espectro de projeto obtido pela norma brasileira realmente pode ser utilizado em projeto para descrever o sismo deste problema. Nota-se que os valores obtidos pelos dois métodos ficaram bem próximos. O espectro de resposta de acelerações obtido pelo SHAKE BR ultrapassou o valor do espectro de projeto da NBR 15421 cerca de, no máximo, $\Delta S=0,0077g$ (para $T>5,6s$). Portanto a hipótese de superdimensionamento da norma brasileira está negada. Verificou-se, posteriormente, que o ajuste do acelerograma definido pelo usuário no SHAKE BR neste caso foi inadequado. Corrigindo esse ajuste, o resultado obtido pelo SHAKE BR seria mais próximo ainda do espectro de projeto da NBR 15421.

Somente por meio do exemplo estudado, porém, não se pode concluir a aplicabilidade do espectro de projeto sugerido pela NBR 15421 em todos os casos. Para isso, é necessário estudar mais casos. Foram analisados, então, nove casos similares ao exemplo prático apresentado anteriormente, utilizando os mesmo dados, variando somente a Classe do solo e a velocidade de propagação da onda (ou o módulo de cisalhamento inicial), conforme mostrado na Figura 4.8, a seguir. Propositamente, foram adotados dois valores de velocidade próximos aos limites extremos permitidos para Classe correspondente, e um valor intermediário.

Classe do Solo	Velocidade (m/s)		
	400,0	570,0	740,0
C	400,0	570,0	740,0
D	200,0	260,0	320,0
E	100,0	130,0	160,0

Figura 4.8. Tabela com Classe do solo e velocidade para os nove casos estudados a seguir.

Como os cálculos realizados nos novos casos são similares ao anterior, são apresentados nas Figuras 4.9, 4.10 e 4.11 somente os resultados para os nove casos estudados.

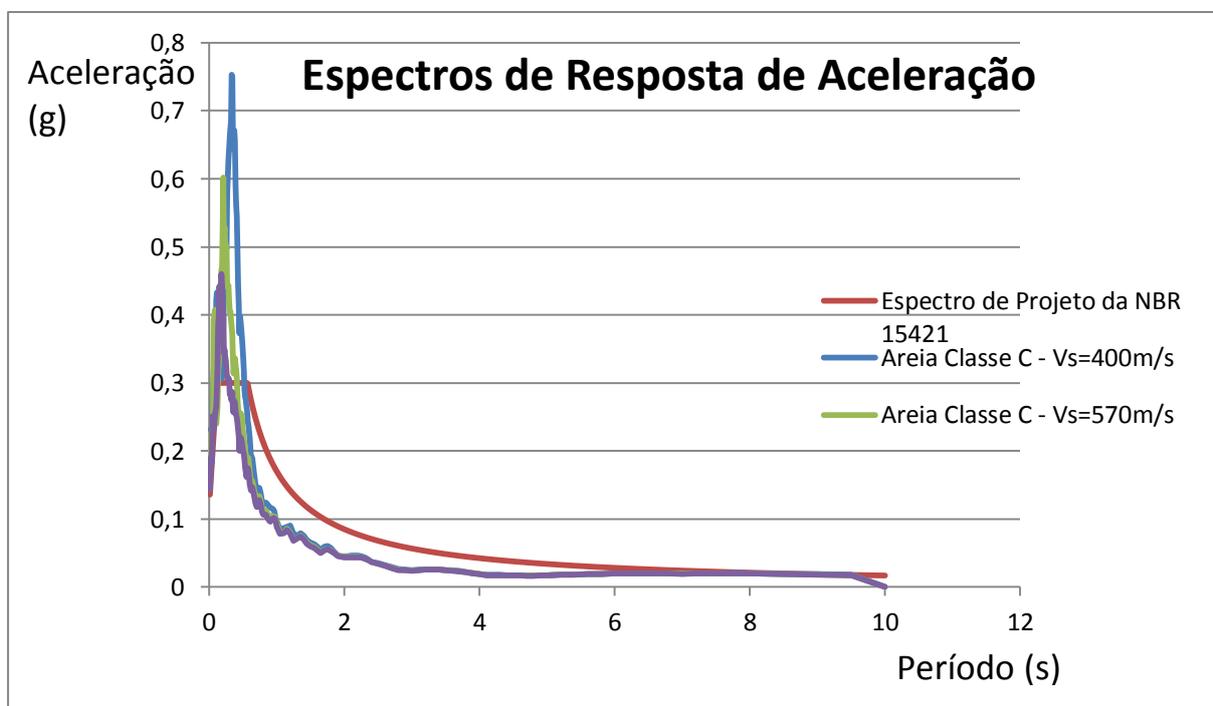


Figura 4.9. Comparação entre resultados do SHAKE BR e da NBR 15421 para os solos de Classe C.

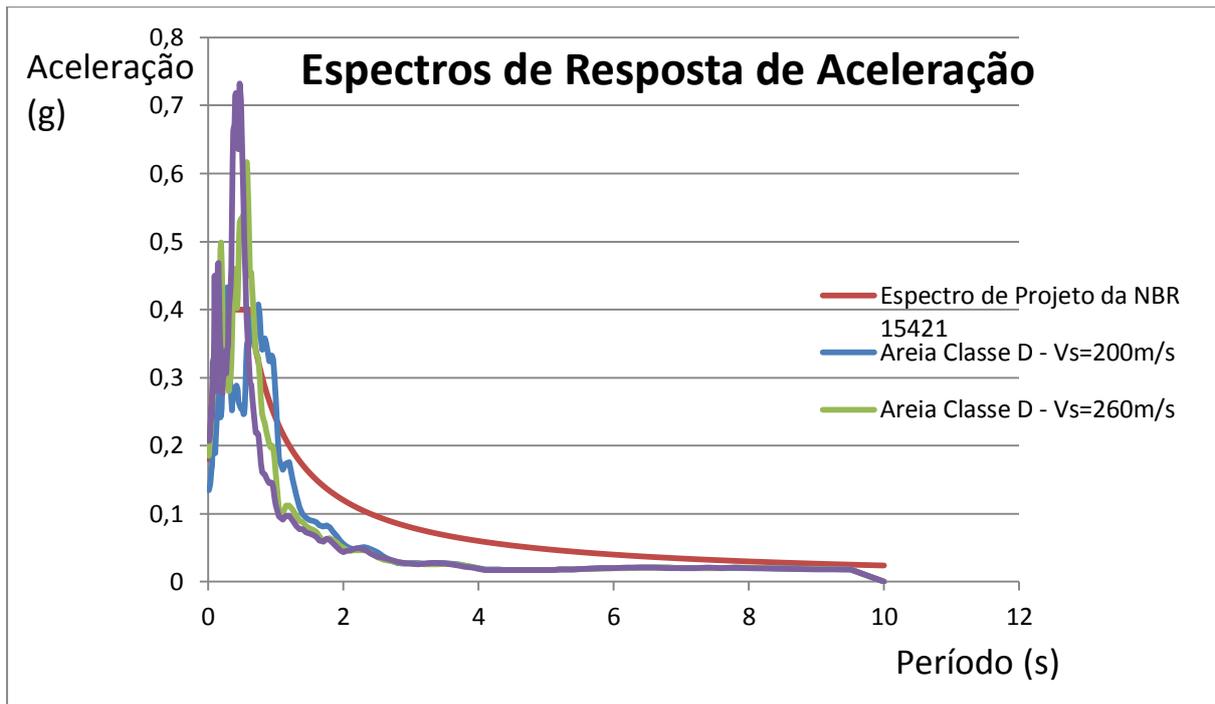


Figura 4.10. Comparação entre resultados do SHAKE BR e da NBR 15421 para os solos de Classe D.

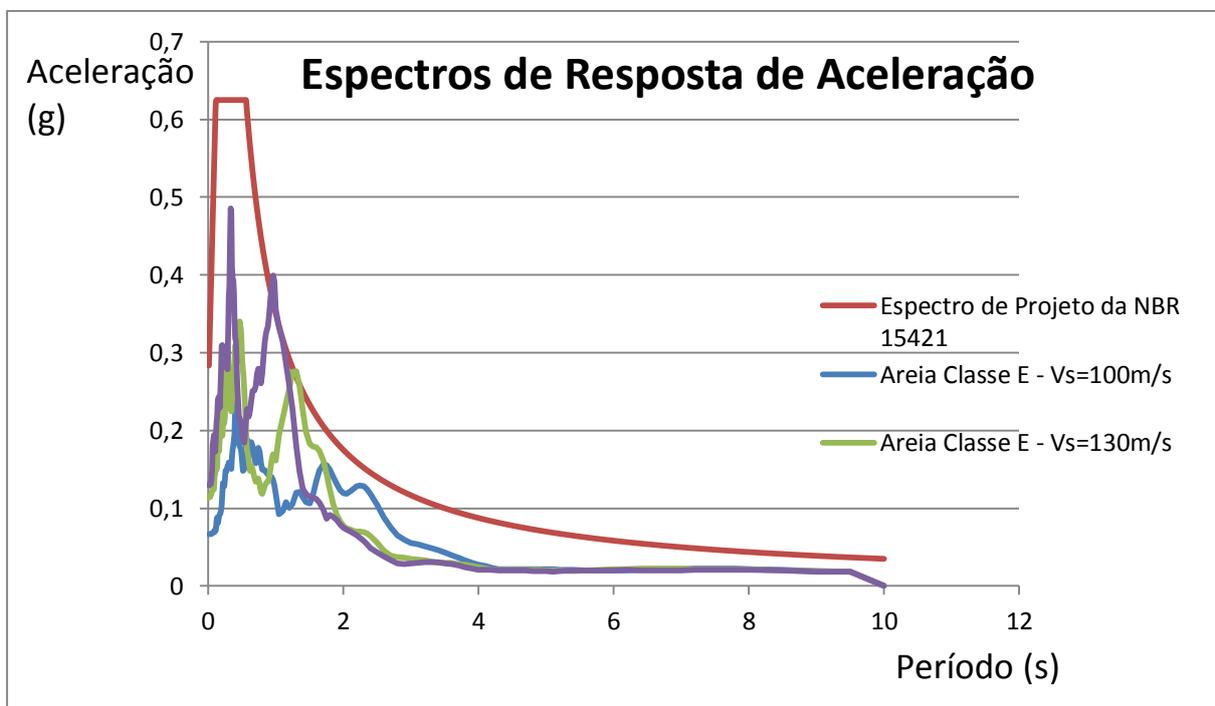


Figura 4.11. Comparação entre resultados do SHAKE BR e da NBR 15421 para os solos de Classe E.

Nas Figuras 4.12, 4.13 e 4.14, são mostrados os mesmos resultados das Figuras 4.9, 4.10 e 4.11, porém para a faixa de variação do período de 0,0s a 2,0s:

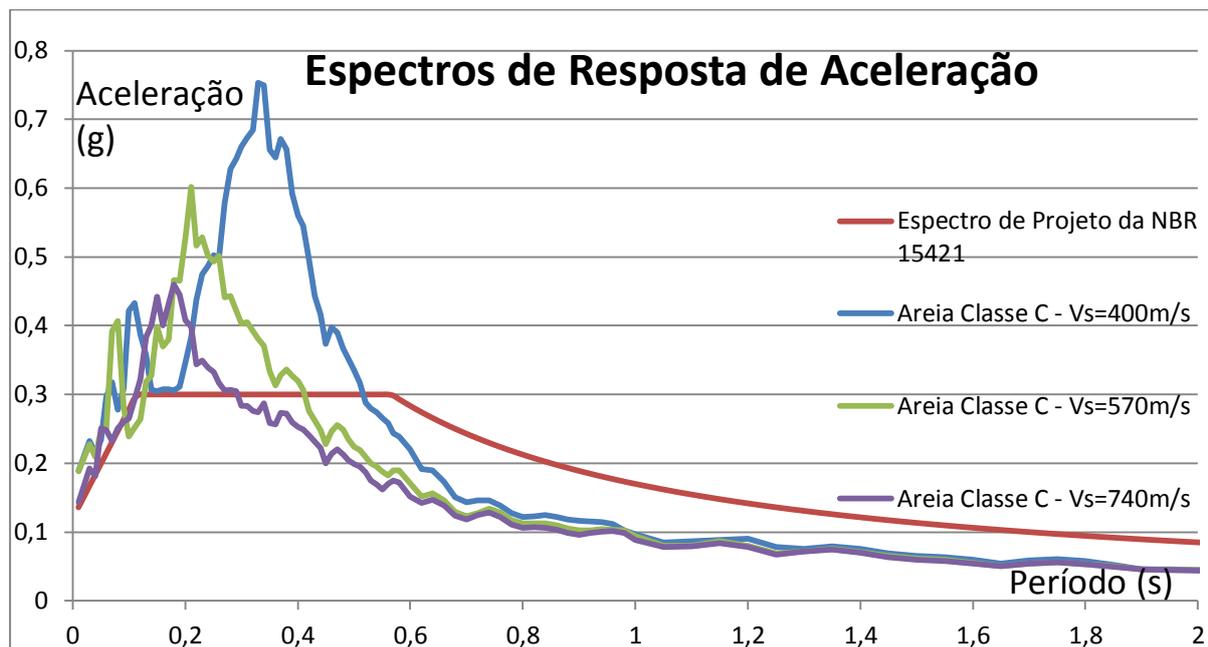


Figura 4.12. Comparação entre resultados do SHAKE BR e da NBR 15421 para os solos de Classe C, para a faixa de variação do período de 0,0s a 2,0s.

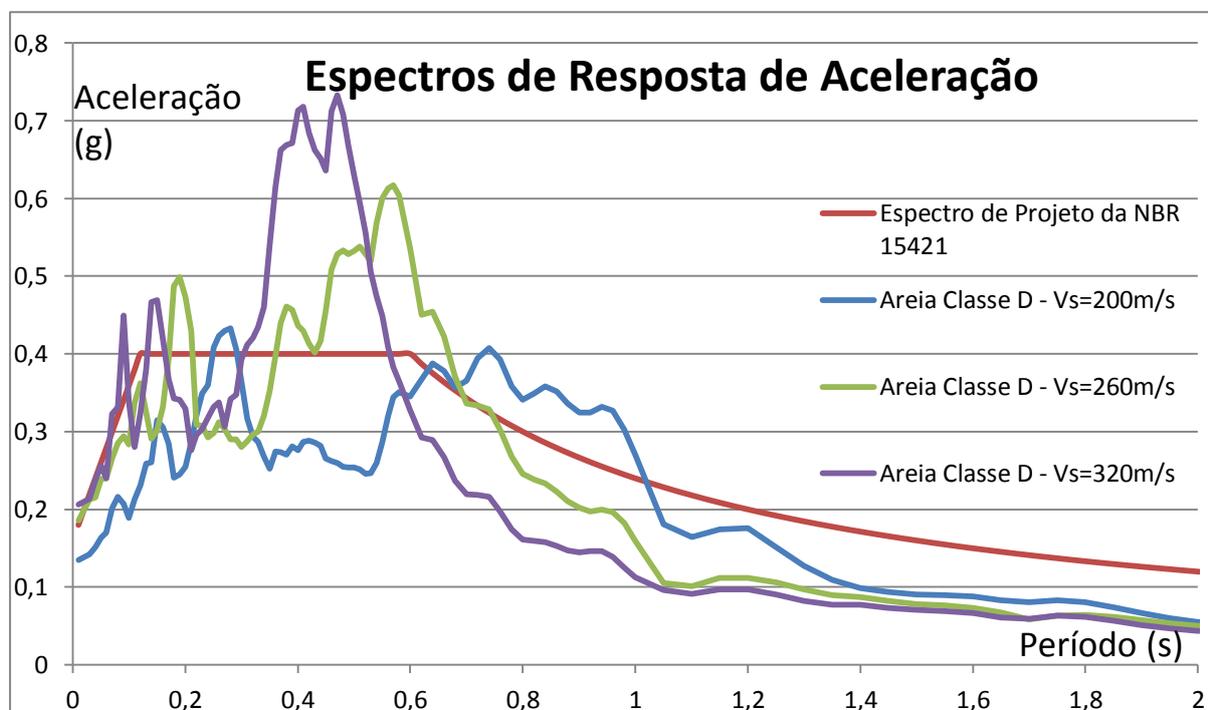


Figura 4.13. Comparação entre resultados do SHAKE BR e da NBR 15421 para os solos de Classe D, para a faixa de variação do período de 0,0s a 2,0s.

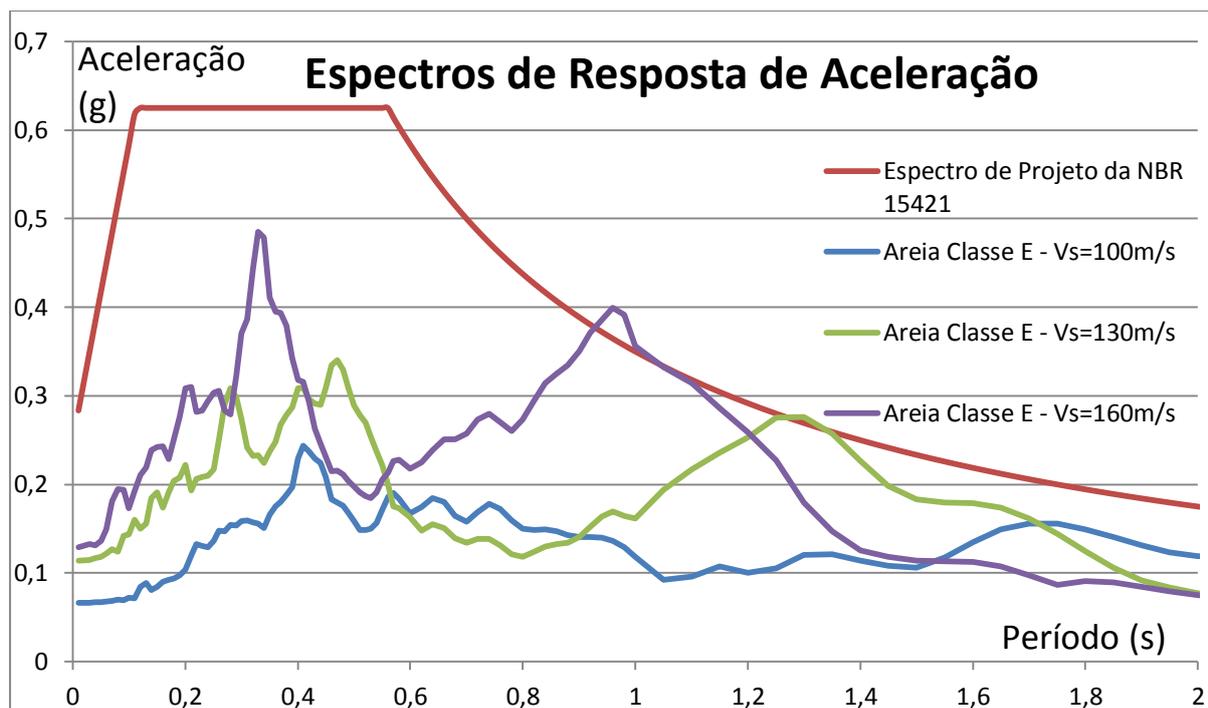


Figura 4.14. Comparação entre resultados do SHAKE BR e da NBR 15421 para os solos de Classe E, para a faixa de variação do período de 0,0s a 2,0s.

A partir dos novos estudos, percebe-se que nos solos de Classe E os valores das acelerações correspondentes ao espectro de projeto da NBR 15421 são quase todos superiores que os valores obtidos pelo SHAKE BR. Para os solos de Classe C e D, porém, nota-se que os valores máximos obtidos pelo SHAKE BR ultrapassam consideravelmente os valores do espectro de projeto da norma. Inicialmente, os resultados obtidos para as Classes C e D implicariam no questionamento do procedimento utilizado pela NBR 15421 para a geração do espectro de projeto. Porém, para chegar a essa conclusão seria necessário gerar no mínimo cinco acelerogramas, estudar cada um deles para os nove casos e fazer uma média das envoltórias, já que cada sismo artificial teria um resultado diferente. Esse processamento não é o objetivo deste trabalho.

Outro resultado importante observado é que provavelmente os coeficientes de amplificação da norma, C_a e C_v , para a Classe E podem estar muito exagerados. Novamente, essa conclusão só poderia ser confirmada se estudássemos o mesmo caso com outros acelerogramas, ou ainda com uma formação rochosa menos rígida, pois essas variações poderiam causar mudanças que justificariam o uso dos coeficientes de amplificação com os valores considerados pela NBR 15421 para a Classe E.

5. Conclusão

Neste projeto, foi adquirido bastante conhecimento na interessante área da análise dinâmica, especificamente no campo da análise sísmica, pouco estudada no Brasil. Muitos conceitos não abordados durante o curso de graduação foram adquiridos, promovendo importante contribuição na formação de um engenheiro civil, estimulando o aprofundamento futuro nos assuntos estudados.

O desenvolvimento do programa SHAKE BR trata-se de uma grande contribuição para o campo da análise sísmica, sendo uma poderosa ferramenta capaz de realizar diversos tipos de cálculos importantes nessa área. A interface amigável, facilidade na entrada de dados, opções de salvamento da entrada de dados e de projetos completos, linguagem mais moderna que facilita a realização de aprimoramentos futuros e saída de dados em diversos formatos são algumas das vantagens que o SHAKE BR possui em relação ao SHAKE original. As comparações feitas com o SHAKE original foram suficientes para garantir o funcionamento do SHAKE BR que gera diferenças suficientemente pequenas, a ponto de considerar iguais os resultados gerados nos dois programas.

Além disso, este projeto pode servir de manual de uso do programa, pois se explicou sua utilização de maneira detalhada. Na sua versão digital, o índice de consulta criado para o SHAKE BR no início do trabalho, permite que o usuário seja remetido (ao clicar com o botão esquerdo do mouse) diretamente para a explicação do ponto em que estiver em dúvida ao utilizar o programa.

Os casos estudados foram importantes para aplicar o conhecimento adquirido, e exemplificar o funcionamento do SHAKE BR. Os resultados de comparação com a NBR 15421 foram satisfatórios.

Para dar continuidade a este projeto sugere-se:

- 1) Utilizar o SHAKE BR para estudar as seis Classes de solo definidas pela norma, para solos com diferentes valores de velocidade de propagação da onda de cisalhamento para cada classe, utilizando pelo menos cinco acelerogramas gerados artificialmente em cada caso. Assim, poderá obter-se uma envoltória média dos espectros de respostas e comparar com o espectro de projeto da norma, verificando se os fatores de amplificação definidos para cada Classe de solo estão superdimensionados ou não.
- 2) Realizar aprimoramentos para o SHAKE BR. Uma modificação de grande interesse, que pode ser realizada com facilidade (só não foi feita porque não houve tempo disponível) é atribuir ao SHAKE a possibilidade de geração de gráficos, a partir dos resultados obtidos nos cálculos. Não é complicado traçar esses gráficos manualmente no Excel, mas essa modificação aumentaria ainda mais a velocidade de obtenção dos resultados pelo usuário, uma vez que, geralmente, procura-se obter justamente esses gráficos.

Referências / Bibliografia

- [1] **Introdução à Engenharia Sísmica**, Souza Lima, S., Carvalho Santos, S.H., UFRJ-DME, 2011 (aula ministrada na disciplina Análise Sísmica do mestrado profissionalizante)
- [2] **ABNT NBR 15421: 2006, Projeto de estruturas resistentes a sismos – Procedimento**
- [3] **Análise Dinâmica - Projeto de Estruturas Sob Ação Dinâmica**, Souza Lima, S., Carvalho Santos, S.H., UFRJ-DME, 2011 (aula ministrada na disciplina Análise Dinâmica, do mestrado profissionalizante)
- [4] **Shake - A Computer Program for Earthquake Analysis of Horizontally Layered Sites**, Schnabel, P.B., Lysmer, J., Seed, H.B., 1972, College of Engineering University of California
- [5] **Seismic Analysis of Structures**, Datta, T.K., John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd., 2010
- [6] **Introdução à Teoria da Elasticidade 4ª Edição**, Villaça, S.F., Taborda Garcia, L.F., UFRJ-DME, 2006
- [7] **Equações Diferenciais Elementares e Problemas de Valores de Contorno**, Boyce, W.E., Prima, R.C., LTC, 1930
- [8] **Interação Solo-Estrutura**, Carvalho Santos, S.H., Souza Lima, S., UFRJ-DME, 2011 (aula ministrada na disciplina Análise Sísmica do mestrado profissionalizante)
- [9] **User's Manual for SHAKE91**, Idriss, I.M., Sun, J.I., Univerisity of California, 1992
- [10] **Seismic Design and Retrofit of Briges**, Priestley, G.M., Calvi, G.M., John Wiley & Sons, Inc., 1996
- [11] **Dominando o Delphi 3 “A Bíblia”**, Cantú M., Ed. Markon, 1998