

5 Definição da composição das características do campo-livre

5.1. Estratégia



Figura 5.1 – Modelo da vertical do ponto de controle utilizado para as leituras

Tem-se como objetivo principal a identificação cinemática do terreno no campo livre em função das variáveis que o caracterizam, ou seja, da natureza própria do terreno, dos tipos das ondas e dos ângulos de incidência das mesmas, da localização do ponto de controle e da definição do semi-espaço. Como indicadores principais, são analisadas funções de transferência de acelerações do terreno do ponto de controle para vários outros pontos nas direções vertical e horizontal do campo-livre. Após esse estudo, avaliam-se as modificações causadas pela presença de uma estrutura para evidenciar o nível da sua interação com o terreno.

O módulo SITE disponibiliza a configuração cinemática do terreno na vertical do ponto de controle, ver Figura 5.1, nas frequências de análise; a partir

dessas configurações, podem-se analisar as variações no campo-livre através da vertical do ponto de controle observando os resultados numéricos e gráficos. Todavia, as frequências do sistema não são fornecidas; para identificar essas frequências trabalha-se com funções de transferência, por serem curvas que representam o sistema sob a ação de um carregamento padrão, correspondendo à transposição de uma aceleração harmônica unitária do ponto de controle e na direção do movimento de controle para o ponto e direção em que se está solicitando a resposta.

Uma particularidade do programa é que a configuração cinemática do terreno, direção X, Y e Z, é normalizada, no SITE, na vertical do ponto de controle, a partir do ponto na superfície, e na direção X. Devido a isso, quando se usa onda P com $\alpha = 0^\circ$, e com movimento de controle segundo X, por exemplo, encontram-se resultados elevadíssimos em Z, já que a normalização torna unitária a amplitude do movimento segundo X do ponto de controle, enquanto que as amplitudes dominantes são na direção Z; para a onda SV encontram-se essas mesmas grandezas muito próximas de zero.

Daí a explicação porque o programa não fornece a função de transferência em X-X para a onda P, $\alpha = 0^\circ$, como também não o faz para o caso da onda SV, segundo a direção Z, com incidência também na vertical. Na fase de normalização surgem resultados numéricos de ordem muito elevada.

Outro aspecto interessante é o comportamento das funções de transferência. Para obtenção de gráficos bem comportados dessas funções, isto é, mostrando os mesmos picos de frequência nas funções de transferência de todas as camadas do terreno, é necessário, o movimento de controle segundo X e avaliar a resposta segundo Z, ou vice-versa.

Dessa maneira, adotam-se as seguintes atitudes e seleções para o prosseguimento do trabalho de visualização da solução do campo-livre:

- ✓ Situa-se o ponto de controle, preferencialmente, no topo da primeira camada e focalizam-se as configurações deformadas na vertical desse mesmo ponto;
- ✓ Utilizam-se funções de transferência para a identificação das frequências de vibração do sistema e, para esses valores, caracterizam-se as configurações das camadas do sistema, na vertical

do ponto de controle, que correspondem aos seus modos de aceleração;

- ✓ Para a determinação dessas frequências e respectivas configurações, a partir de funções de transferência mais bem comportadas, emprega-se movimento de controle segundo Z e observam-se as acelerações segundo X, ou emprega-se o movimento de controle segundo X e observam-se as acelerações segundo Z;
- ✓ Amortecimento para todos os tipos de solo e de onda, $\xi = 0.07$.

Assim, espera-se expandir o entendimento e a sensibilidade quanto à maneira de se trabalhar com o SASSI, para que se possa escolher a composição mais adequada de ondas de modo a se obterem melhores resultados.

5.2. Programa de ensaio

5.2.1. Ondas de corpo (P, SV e SH)

Em primeiro lugar, avalia-se a influência da natureza das ondas de corpo, P ou SV, e do ângulo de incidência das mesmas.

Estudam-se três tipos de solo, através de três pares de velocidades para ondas P e SV, e utilizando um mesmo semi-espaço. As características do modelo estão descritas na Tabela 5.1. A vertical do ponto de controle é feita coincidir como o eixo coordenado Z e se fazendo o plano X ou Y horizontal.

A seguir avalia-se o comportamento do campo-livre com a variação da distância x , do ponto de controle ao nó considerado. Varia-se essa coordenada de 125 em 125 m, até os 700 metros. Os movimentos tanto na direção x como em z são analisados somente para a onda P.

A análise da influência da onda SH é feita com os mesmos parâmetros de campo-livre apresentados na Tabela 5.1 com exceção do tipo de onda e da direção do movimento de controle que, para a onda SH, deve ser a direção Y.

Tabela 5.1 – Parâmetros do campo-livre no modelo de sítio

Parâmetros de Campo Livre	Descrição
Velocidades características do terreno estratificado	V _p = 2500 m/s V _s = 1600 m/s V _p = 1900 m/s V _s = 1200 m/s V _p = 1300 m/s V _s = 800 m/s
Velocidades características do semi-espaço	V _p = 4000m/s V _s = 2500m/s
Massa específica	1,85 t/m ³
Amortecimento associado à onda S(ξ_{vs})	0,07
Módulo de Elasticidade (E)	3,08 x 10 ⁵ KN/m ²
Coefficiente de Poisson (ν)	0,3
Amortecimento associado à onda P(ξ_{vp})	0,07
Espessura da camada de Terreno(h)	2,00 m
Número de camadas(n_c)	6
Tipo de onda	P ou SV
Ângulo de incidência(α)	0°; 10°; 20°; 30°; 35°
Posição do ponto de controle (X _{PC} ;Y _{PC})	(0;0)
Direção do movimento de controle (mc)	X ou Z

5.2.2.**Ondas superficiais (R e L)**

Para a análise da influência da presença de ondas de Rayleigh(R) e Love(L) no desempenho do campo-livre, analisam-se os resultados obtidos de forma semelhante às ondas de corpo, agora para as equações definidoras das ondas superficiais.

Utilizam-se fatores de participação de 5% ou 20%, no intervalo de 0 a 4Hz, juntamente com ondas SV ou P, com conseqüente participação de 95% ou 80% das ondas de corpo. Estudo feito por Dalcanal (2004) sugere a participação das ondas superficiais até a frequência de 4Hz; e para frequências superiores adota-se 100% de ondas de corpo. Segundo Chen (1980) as ondas superficiais perdem a expressão além desse limite de frequência.

5.3. Apresentação e análise dos resultados

5.3.1. Ondas de corpo (P, SV e SH)

O modelo inclui seis camadas de terreno sobre o semi-espaço, conseqüentemente têm-se 7 superfícies de camada incluída a do semi-espaço. O programa SASSI no módulo SITE faz a contagem das superfícies de cima para baixo, assim sendo, a vertical do ponto de controle aparece em primeiro lugar.

Desenvolvem-se os ensaios com o solo de velocidades $V_p = 1300$ m/s e $V_s = 800$ m/s por ser menos rígido e opta-se por um Δt de 0,005 segundos para o cálculo do passo da freqüência, o que leva a resultados de freqüência até 100Hz.

5.3.1.1. Relação entre os resultados apresentados pelas ondas P e SV

➤ Freqüências

O primeiro ponto a ser analisado é o valor das freqüências do sistema, obtidas através das funções de transferência, pois, existem diferenças na utilização de uma para outra onda, como demonstrado na tabela a seguir:

Tabela 5.2 - Freqüências do sistema para o solo 3 para $\alpha = 0,5^\circ$

Freqüência	DIREÇÃO	Onda P	Onda SV	Referência
Nº		Freq.(Hz)	Freq.(Hz)	Freq.(Hz)
1ª	Z-X	16,41	16,89	16,83
2ª	X-Z	27,25	28,32	27,34
3ª	Z-X	50,10	51,17	50,48
4ª	X-Z	70,02	81,45	82,03
5ª	Z-X	83,01	----	84,14
6ª	X-Z	96,29	----	117,79

De um modo geral as freqüências encontradas para as ondas de corpo têm valores semelhantes e muito próximos às freqüências de referência, entretanto constata-se os seguintes efeitos:

- ✓ A quarta frequência do sistema, avaliada pela onda P, demonstra uma disparidade sensível chegando até 14% de diferença em relação à onda SV, contudo a frequência encontrada utilizando a onda SV tem aproximadamente o mesmo resultado fornecido pela frequência de referência.
- ✓ Para a quinta frequência o resultado apresentado pela onda P é praticamente igual ao da frequência de referência e a onda SV não demonstra resultados próximo a 100 Hz. Para a sexta frequência do sistema observa-se que a onda P afasta-se bastante da frequência de referência demonstrando uma diferença de 18.25%, já a onda SV não apresenta resultado para essa frequência visto que a análise das frequências no SASSI é programada até 100 Hz. Para o ângulo de 0,5° observa-se que os resultados da onda SV tendem a ser maiores que os fornecidos pela onda P e se aproximam mais das frequências de referência. Também se observa, na Tabela 5.2, que a diferença entre os resultados apresentados pelas ondas de corpo tendem a crescer com o aumento do valor da frequência.

A seguir é demonstrada mais uma tabela com as frequências produzidas utilizando agora um ângulo de incidência de 10°:

Tabela 5.3 - Frequências do sistema para o solo 3 para $\alpha = 10^\circ$

Frequência	DIREÇÃO	Onda P	Onda SV	Referência
Nº		Freq.(Hz)	Freq.(Hz)	Freq.(Hz)
1ª	Z-X	16,406	16,992	16,83
2ª	X-Z	27,246	28,32	27,34
3ª	Z-X	50,195	51,269	50,48
4ª	X-Z	70,117	81,738	82,03
5ª	Z-X	83,398	----	84,14
6ª	X-Z	96,289	----	117,79

Os ângulos de 0,5° e 10° apresentam resultados bastante semelhantes. Conclui-se com estas tabelas que para ângulos de incidência pequenos os resultados são próximos aos das frequências de referência e, as ondas de corpo apresentam mais bem esses resultados, principalmente para valores próximos a 100 Hz, nas seguintes direções: Onda SV movimento de controle em X e direção

do movimento Z, já para a onda P é o movimento de controle em Z e a direção de movimento em X, consoante com observação anterior.

A Tabela 5.4 apresenta os resultados encontrados utilizando 35° como ângulo de incidência.

Tabela 5.4 - Frequências do sistema para o solo 3 para $\alpha = 35^\circ$

Frequência	DIREÇÃO	Onda P	Onda SV	Referência
N ^o		Freq.(Hz)	Freq.(Hz)	Freq.(Hz)
1 ^a	Z-X	16,309	15,309	16,83
2 ^a	X-Z	27,44	28,906	27,34
3 ^a	Z-X	50,976	52,344	50,48
4 ^a	X-Z	71,387	74,023	82,03
5 ^a	Z-X	83,789	83,496	84,14
6 ^a	X-Z	96,582	96,582	117,79

De maneira geral, as frequências fornecidas pelas ondas de corpo possuem valores semelhantes aos das frequências de referência; a diferença existente entre os valores das ondas de corpo tende a diminuir com o aumento do ângulo de incidência das ondas e, para frequências próximas a 100 Hz, seus valores se afastam da frequência de referência. Conclui-se então que nas frequências correspondentes à direção Z, utilizando ângulos maiores, ou seja, próximos ao ângulo crítico, ocorrem maiores alterações nas frequências (observe a 4^a e 6^a frequência da tabela acima). Sabe-se que a equação utilizada para solucionar a propagação da onda é a mesma para as duas ondas, no entanto a velocidade de propagação da onda que é utilizada é diferente, levando a um número de onda diferente para a mesma frequência do sistema. Esses parâmetros levam a obter frequências diferentes pela aproximação dos resultados, como também a forma de propagação da onda, pois, a onda SV se propaga por cisalhamento e a onda P por dilatação. E, a disparidade encontrada na sexta frequência do sistema, demonstra que o ângulo de inclinação da onda pode realmente interferir na frequência natural do sistema devido ao acoplamento existente dentro das propriedades do solo e que, com um valor do ângulo α em torno dos 35° esse acoplamento existente é despertado.

Um dos principais pontos que influenciam nas diferenças de resultado da onda P para a onda SV é o número de onda k, pois, quanto menor a velocidade de propagação no terreno maior é o k, isso explica porque, para ângulos pequenos, a

onda SV apresenta resultados sempre maiores que a onda P. A crescente diferença existente entre os resultados apresentados pela onda P e SV para pequenos ângulos é devido ao ângulo de incidência da onda, pois, a diferença entre o seno e o cosseno do ângulo é muito grande. E quando se aumenta o ângulo de incidência, esta diferença diminui bastante, pois, próximo a 45° o seno e o cosseno são os mesmos.

Estes resultados mostram que o ângulo de incidência altera as frequências do sistema, principalmente para frequências altas, pois, na frequência fundamental a variação é pequena e, a escolha da onda de corpo também influencia bastante nos resultados.

➤ Modos de vibração nas frequências do sistema

São apresentados nesta seção os modos de vibração fornecidos pelas ondas P e SV com a variação do ângulo e da frequência. Tais configurações seguem os aspectos gerais já identificados em outros sistemas estruturais.

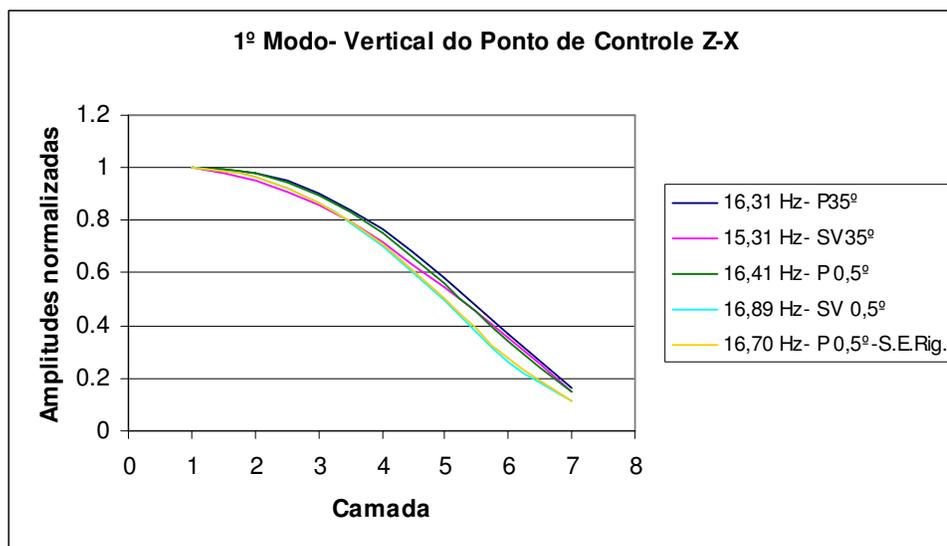


Figura 5.2 - 1º modo, vertical do ponto de controle, movimento de controle Z-X, solo 3.

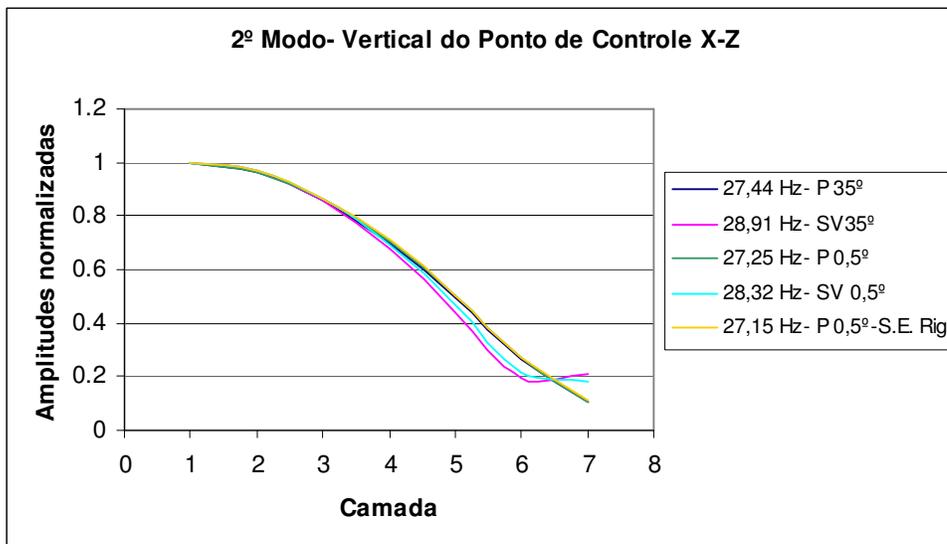


Figura 5.3 - 2º modo, vertical do ponto de controle, movimento de controle X-Z, solo 3.

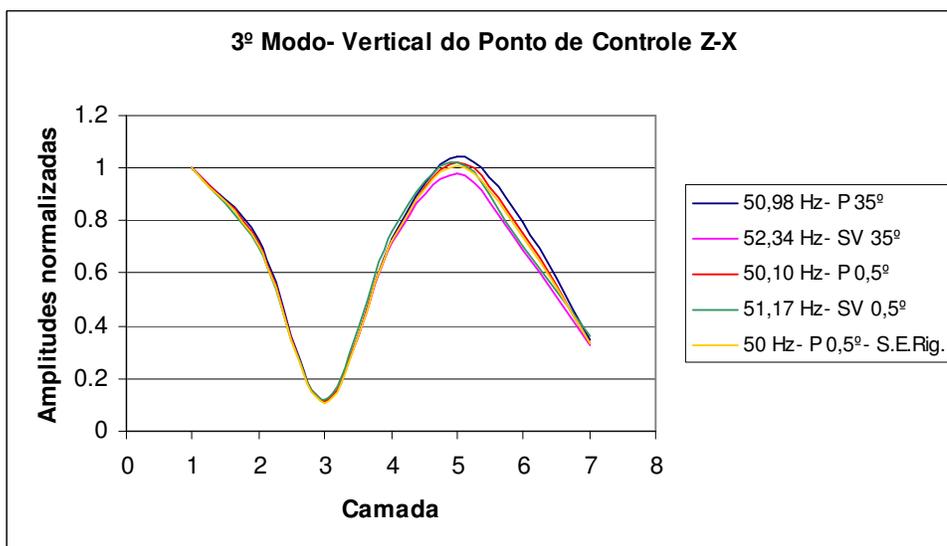


Figura 5.4 - 3º modo, vertical do ponto de controle, movimento de controle Z-X, solo 3.

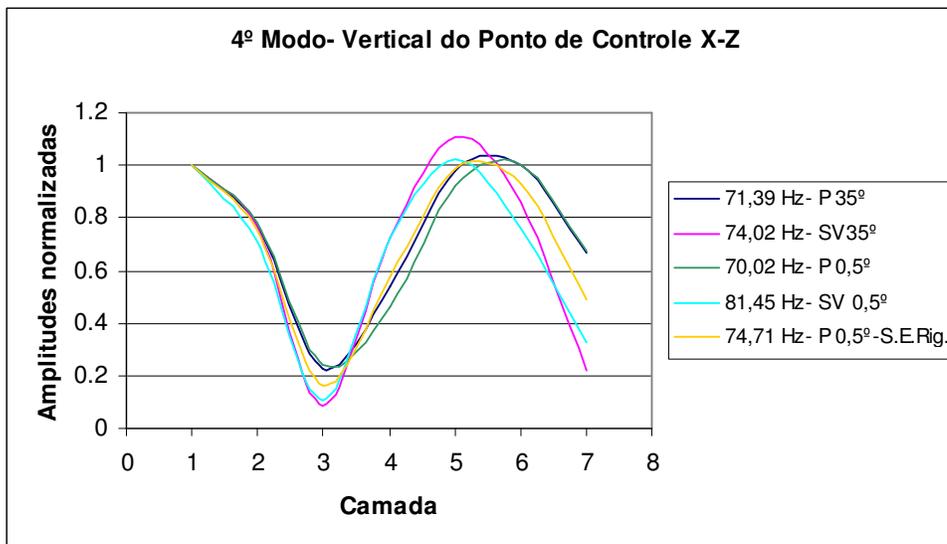


Figura 5.5- 4º modo, vertical do ponto de controle, movimento de controle X-Z, solo 3.

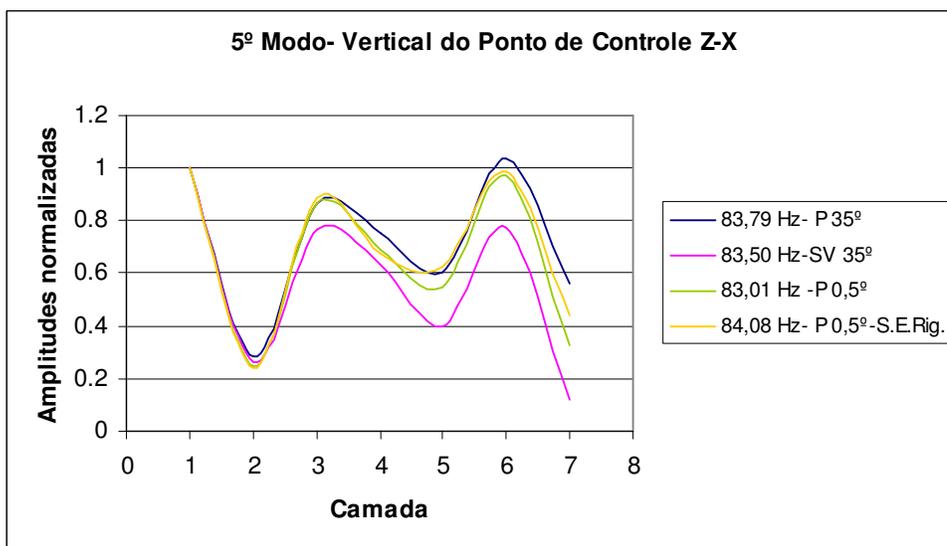


Figura 5.6 - 5º modo, vertical do ponto de controle, movimento de controle Z-X, solo 3.

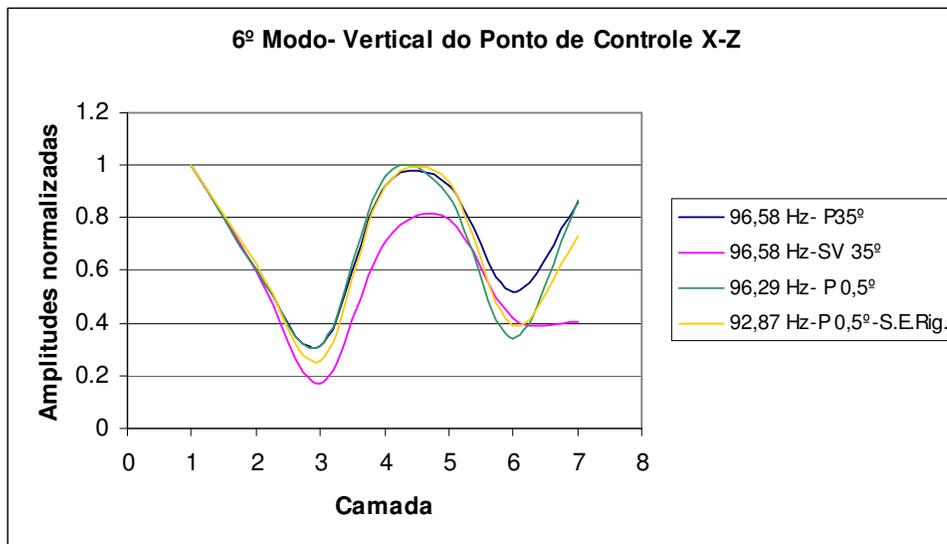


Figura 5.7 - 6º modo, vertical do ponto de controle, movimento de controle X-Z, solo 3.

Estas figuras demonstram que mesmo variando o ângulo α , os modos dados pelas respectivas ondas são praticamente os mesmos; existe uma pequena diferença entre os modos fornecidos pelas ondas SV e P. Os modos fornecidos pelo SASSI 2000 são sempre positivos, pois o mesmo fornece os valores em módulo. Utilizando-se um semi-espço bastante rígido ocorre uma pequena variação da frequência e o modo tende a apresentar resultados na média dos modos anteriormente fornecidos pelas ondas, mas, a configuração permanece a mesma. As Figuras 5.6 e 5.7 não apresentam modos para a onda SV a $0,5^\circ$ como foi apresentado no estudo das frequências.

Mesmo alterando as velocidades de propagação no semi-espço não ocorrem alterações significativas nas frequências, isso porque no Programa SASSI2000 quando se alteram as velocidades do semi-espço, altera-se apenas o k , o elemento responsável pela excitação na Equação (4.1), ou seja, não ocorrem alterações nas condições de contorno.

Os modos correspondentes às direções X-X e Z-Z apresentam as mesmas configurações que as direções X-Z e Z-X respectivamente.

A seguir é analisado o comportamento das funções de transferência de acelerações, a partir do ponto e da direção de controle, para as diversas camadas (nós) do campo-livre, com a variação do ângulo de incidência α .

➤ **Análise das funções de transferência - Ondas P e SV**

As Figuras 5.8 a 5.12 mostram a amplitude segundo X das funções de transferência, para o caso da onda P, ponto de controle na primeira camada, direção de controle, Z, e solo 3; essas amplitudes estão normalizadas pela aceleração da camada 1, na direção do movimento de controle, ac_1 , igual à unidade.

Em tais figuras, observa-se o seguinte:

- ✓ São mobilizadas três frequências para a transferência de energia, 16,41, 50,10 e 83,10 Hz, Figura 5.7 e Tabela 5.2, sendo que a frequência 50,10 Hz é a que apresenta maior amplificação; compreende-se que, para $\alpha = 0$, essa função de transferência não existiria pois toda a potência seria transferida segundo Z; compreende-se, também, que as ordenadas reunidas segundo uma dessas frequências de transferência, se plotadas convenientemente, reproduziriam a configuração modal a ela associada, Figura 5.3;
- ✓ Com o aumento do ângulo α até 10° , a amplitude na frequência de 50,10 Hz é majorada sensivelmente e depois, continuando o aumento de α , essa amplitude decai enquanto que a da frequência 83,01 Hz passa a crescer, chegando a dominar inteiramente as anteriores.

As figuras 5.13 a 5.16, semelhantemente às anteriores, agora para a onda SV, mostram um quadro semelhante voltado para o primeiro e o segundo modos, confirmando a variação do ângulo α como um elemento de acentuação do espectro de Fourier da excitação.

Sob o ponto de vista formal do desenvolvimento analítico, essa questão encara a decomposição do vetor de amplitudes do carregamento harmônico (representado por uma aceleração unitária segundo a direção do movimento de controle e zero nos demais registros) pelas configurações modais do sistema do campo-livre e as correspondentes amplitudes de cada frequência.

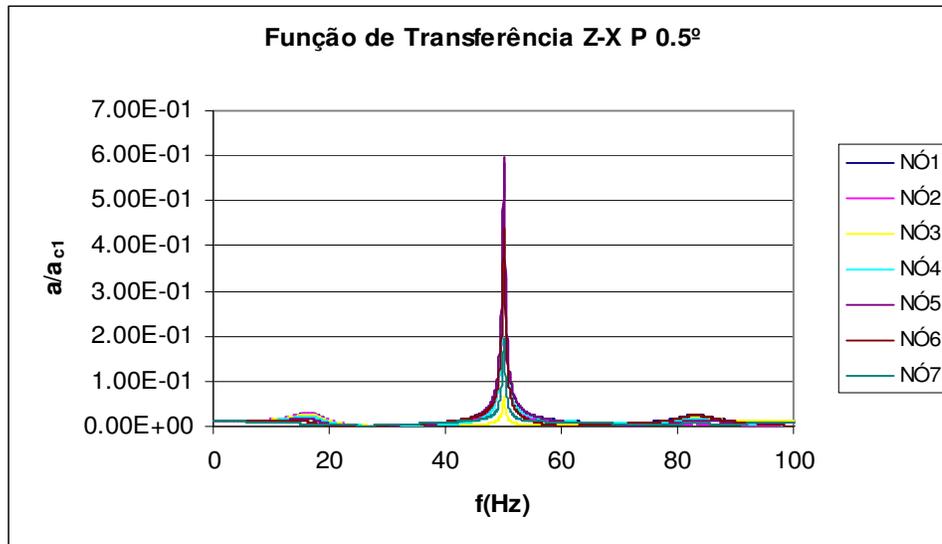


Figura 5.8 - Função de Transferência, movimento de controle Z-X, onda P, $\alpha = 0.5^\circ$, solo 3.

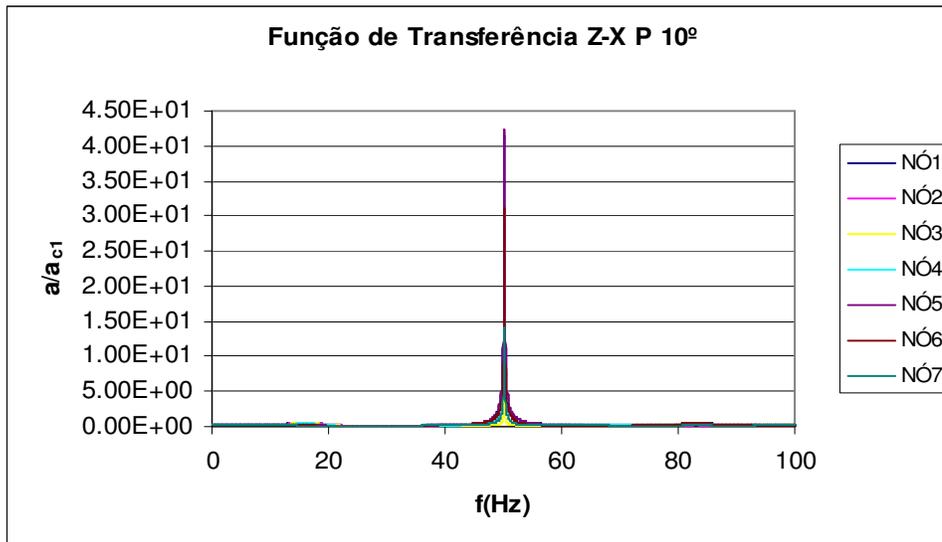


Figura 5.9 - Função de Transferência, movimento de controle Z-X, onda P, $\alpha = 10^\circ$, solo 3.

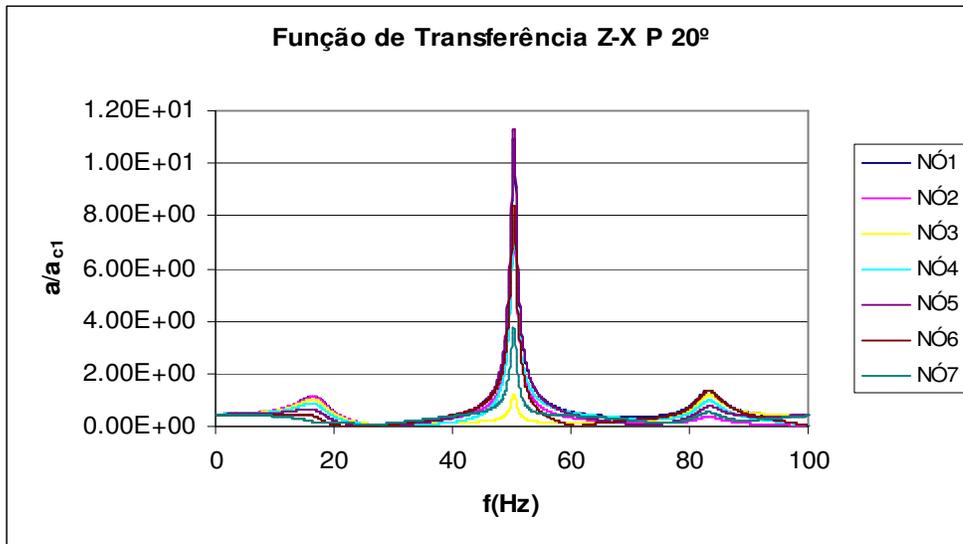


Figura 5.10 - Função de Transferência, movimento de controle Z-X, onda P, $\alpha = 20^\circ$, solo 3.

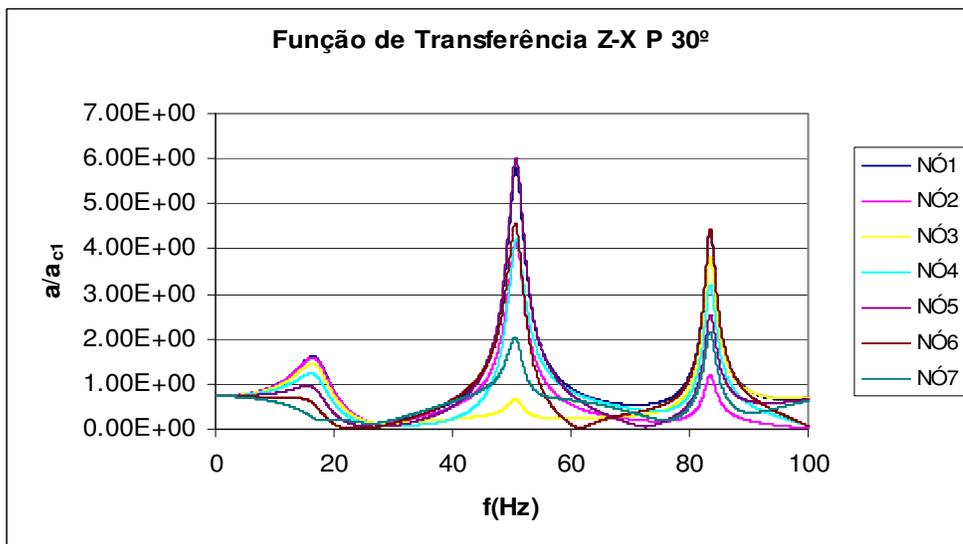


Figura 5.11 - Função de Transferência, movimento de controle Z-X, onda P, $\alpha = 30^\circ$, solo 3.

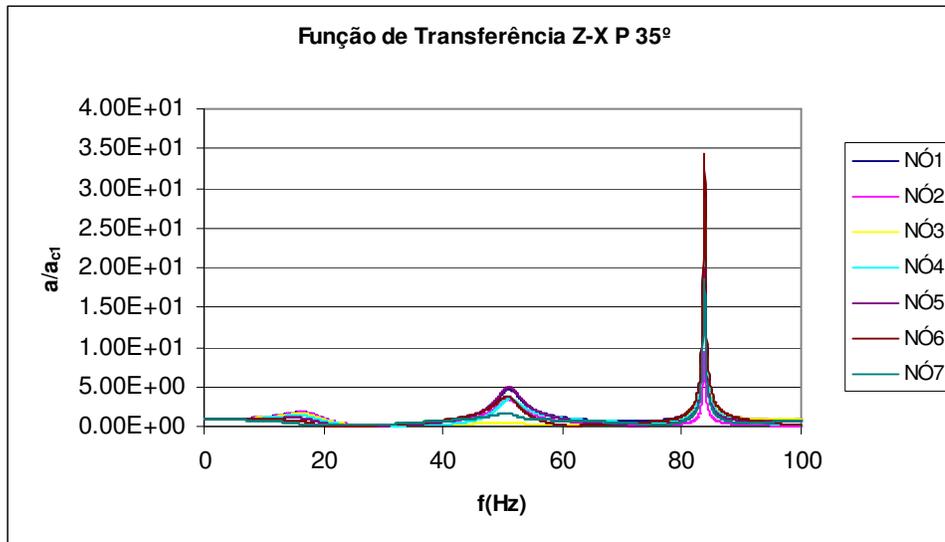


Figura 5.12 - Função de Transferência, movimento de controle Z-X, onda P, $\alpha = 35^\circ$, solo 3.

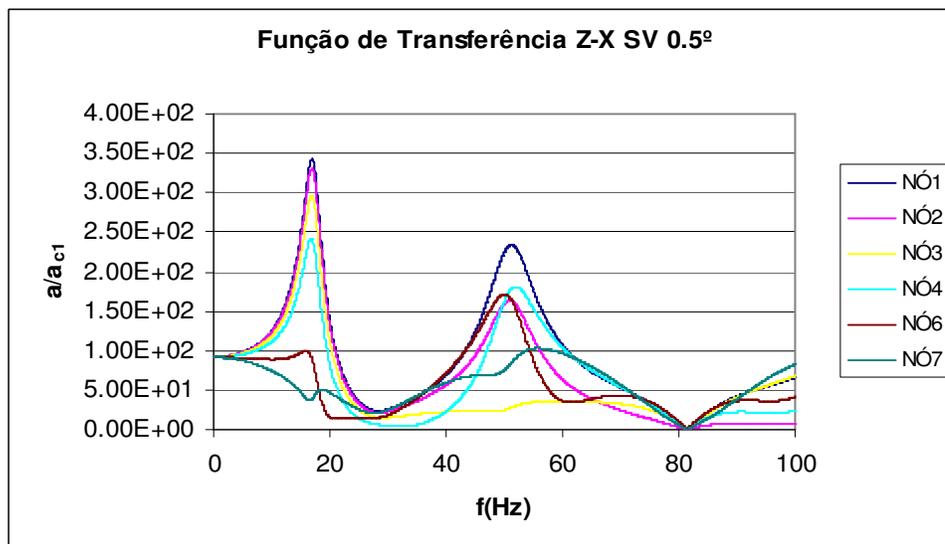


Figura 5.13 - Função de Transferência, movimento de controle Z-X, onda SV, $\alpha = 0.5^\circ$, solo 3.

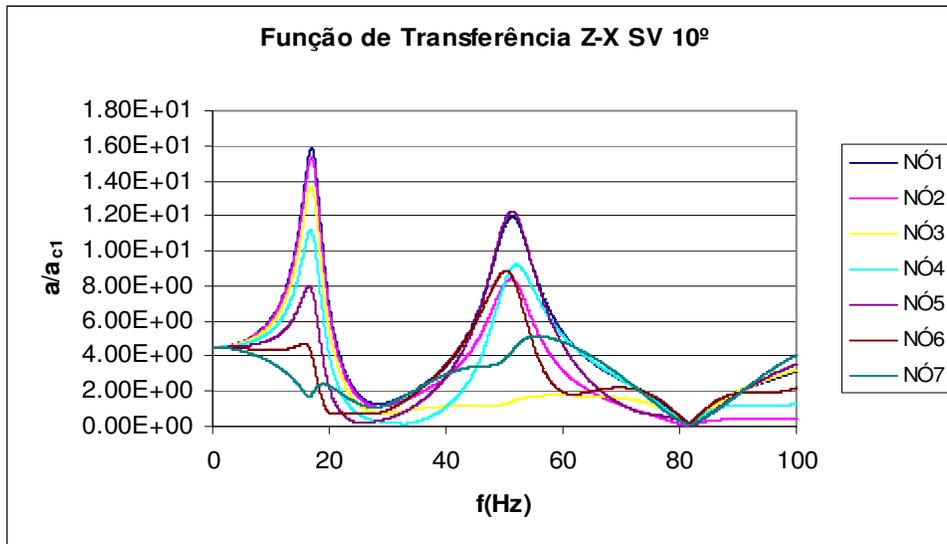


Figura 5.14 - Função de Transferência, movimento de controle Z-X, onda SV, $\alpha = 10^\circ$, solo 3.

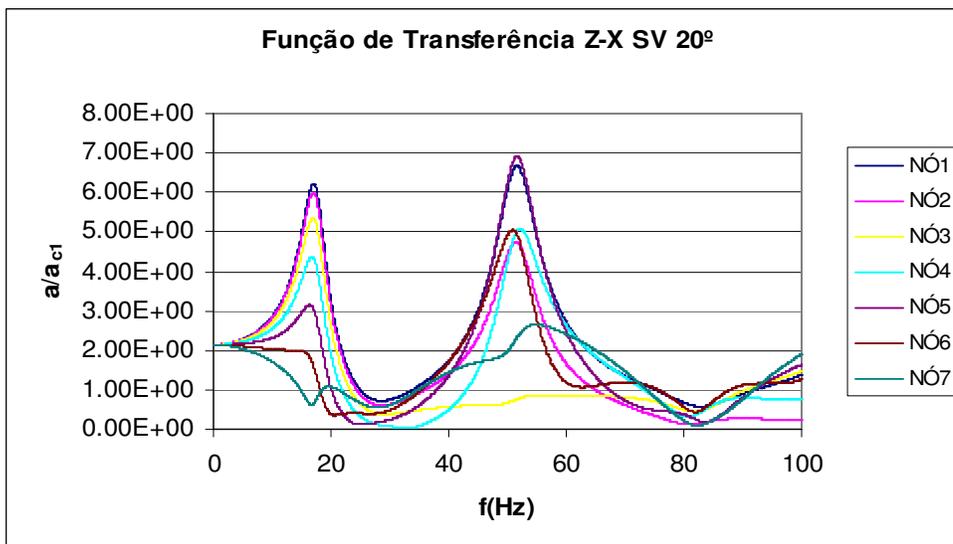


Figura 5.15 - Função de Transferência, movimento de controle Z-X, onda SV, $\alpha = 20^\circ$, solo 3.

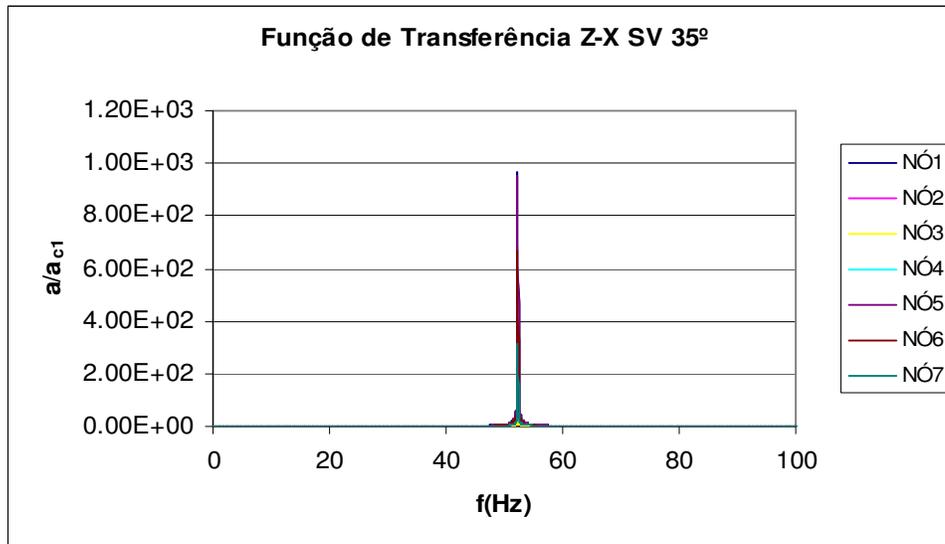


Figura 5.16 - Função de Transferência, movimento de controle Z-X, onda SV, $\alpha = 35^\circ$, solo 3.

➤ Propagação horizontal nas frequências do sistema

Para esta análise é adotada somente uma onda, a P, pois, o efeito da propagação no campo-livre somente leva em consideração uma exponencial, Equação (4.2).

Foram adotadas distâncias de 125 m entre um nó e outro. As Figuras apresentadas nesta seção demonstram a propagação horizontal para um nó na superfície do modelo.

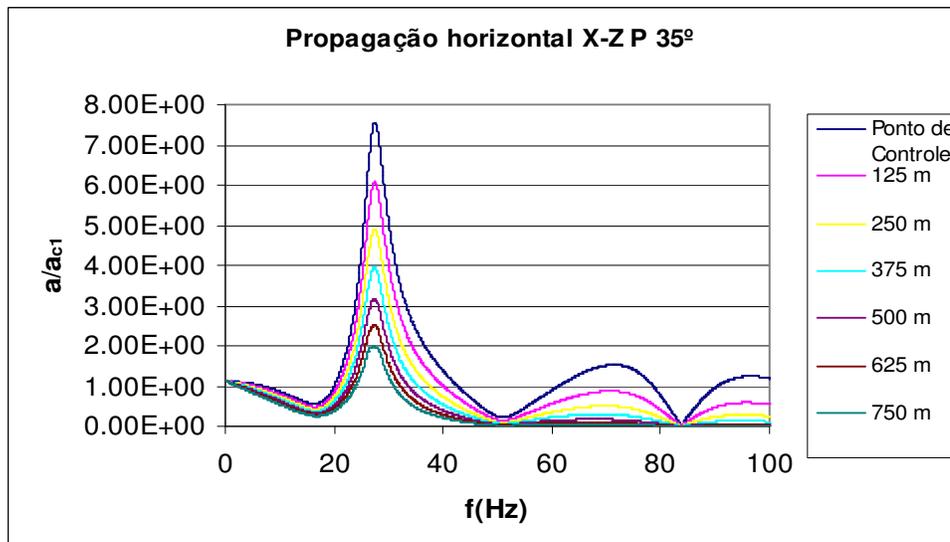


Figura 5.17 - Função de Transferência, propagação horizontal na superfície a cada 125 m, movimento de controle X-Z, onda P, $\alpha = 35^\circ$, solo 3.

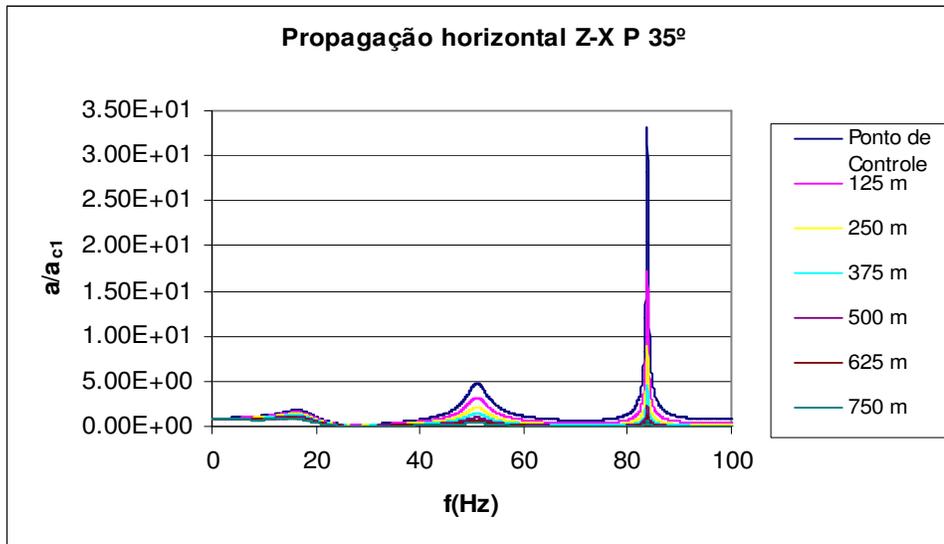


Figura 5.18 - Função de Transferência, propagação horizontal na superfície a cada 125 m, movimento de controle Z-X, onda P, $\alpha = 35^\circ$, solo 3.

As Figuras 5.17 e 5.18 mostram que com a distância as frequências do sistema permanecem as mesmas e ocorrem apenas diminuições nas amplitudes, tanto na direção X como também na direção Z, como se esperava.

Agora são visualizadas curvas exponenciais para as frequências fornecidas pela Função de Transferência para o movimento de controle nas direções X-X e X-Z, Figuras 5.19 e 5.20.

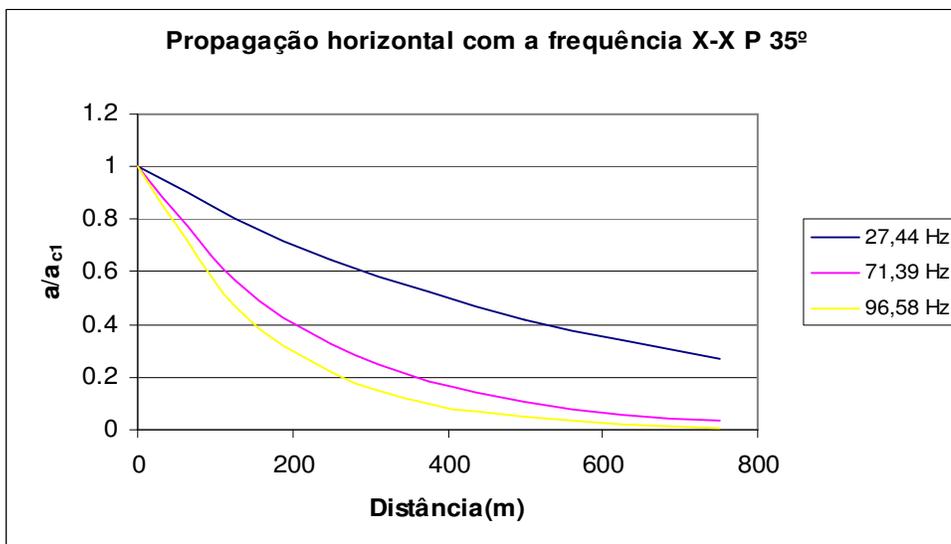


Figura 5.19 - Propagação horizontal com a frequência a cada 125 m, movimento de controle X-X, onda P, $\alpha = 35^\circ$, solo 3.

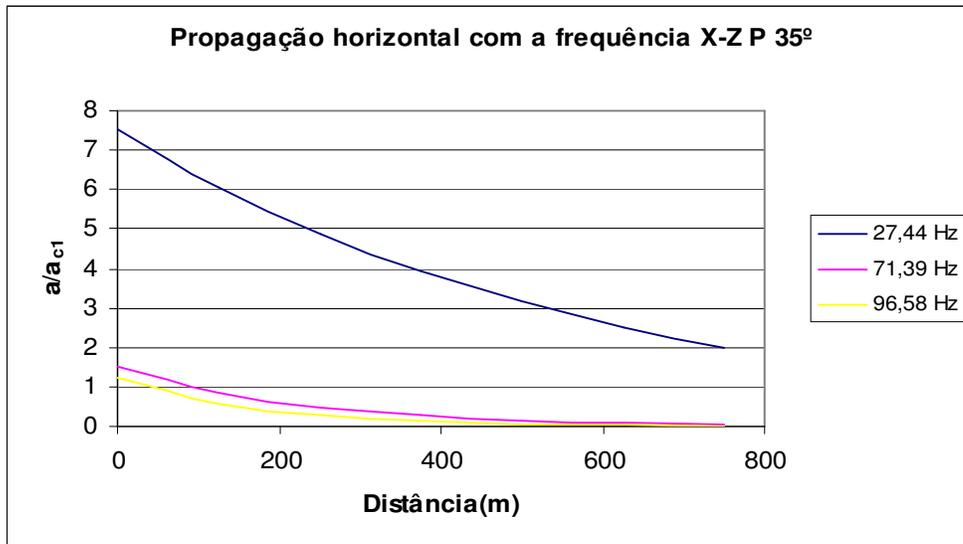


Figura 5.20 - Propagação horizontal com a frequência a cada 125 m, movimento de controle X-Z, onda P, $\alpha = 35^\circ$, solo 3.

Pode-se observar, ver Figura 5.19, que todas as curvas partem de um mesmo valor, no entanto, a exponencial possui curvaturas diferentes; o fator responsável por esse resultado é o número de onda k , pois, quanto maior o seu valor, maior é o decaimento, ver equação (4.2). A Figura 5.20 demonstra as diferenças existentes nas amplitudes devido à frequência, pois, nesta direção, os resultados são normalizados pela 1ª camada na direção X-X.

$$\{U(x)\} = \delta\{U\} \exp(-ikx) \quad (4.2)$$

5.3.1.2. Onda SH

São analisados os valores das frequências do sistema e as configurações dos modos correspondentes; para isso escolhem-se três ângulos de incidência, $0,5^\circ$, 10° e 35° , ver Figuras 5.21 a 5.23.

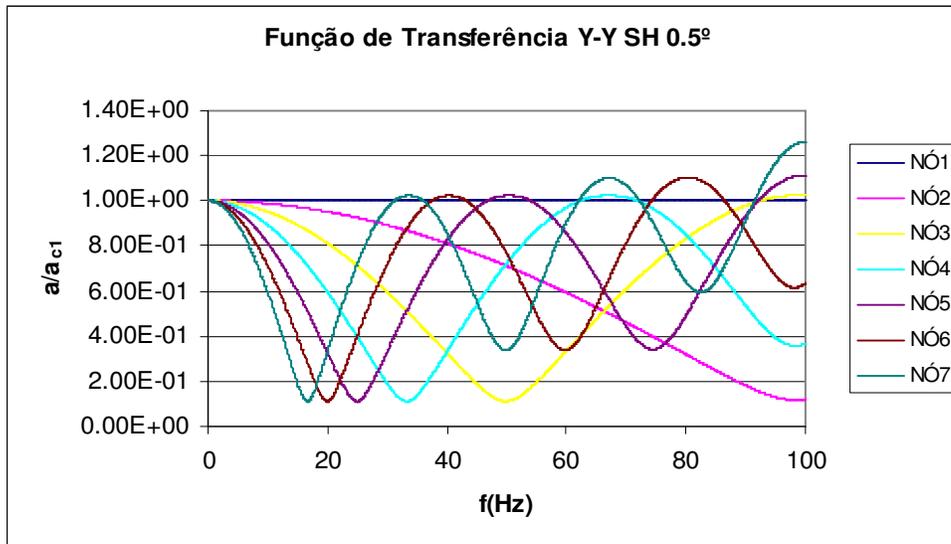


Figura 5.21 - Função de transferência, movimento de controle Y-Y, onda SH, $\alpha = 0,5^\circ$, solo 3.

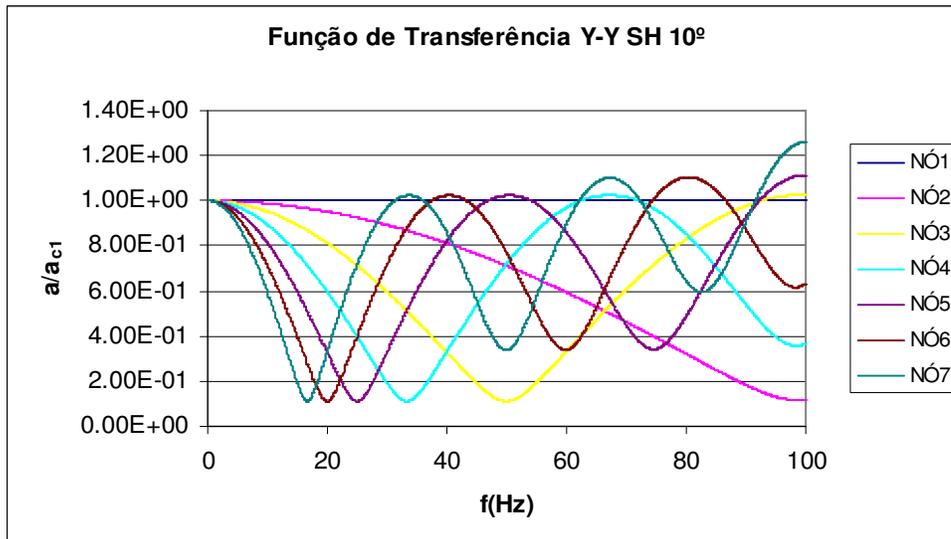


Figura 5.22 - Funções de transferência, movimento de controle Y-Y, onda SH, $\alpha = 0,5^\circ$, solo 3.

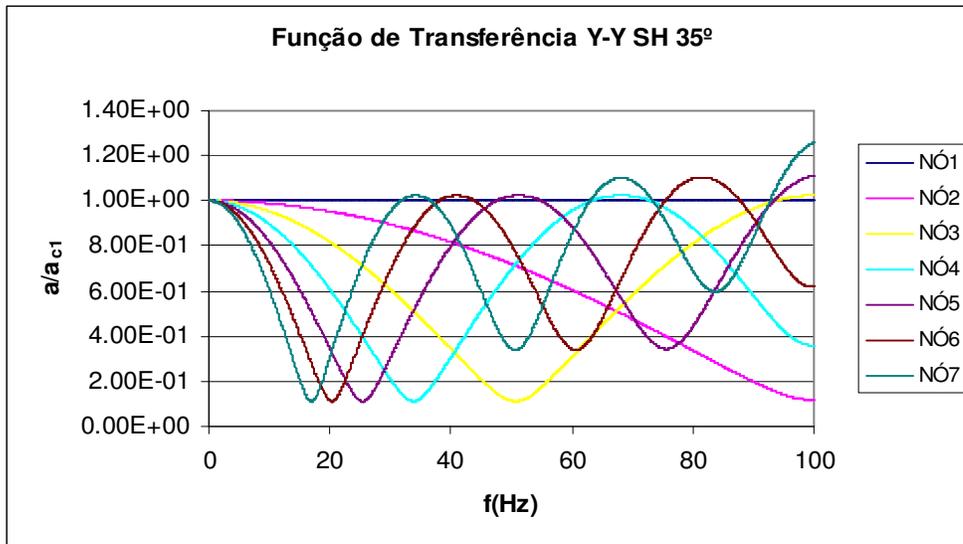


Figura 5.23 - Funções de transferência , movimento de controle Y-Y, onda SH, $\alpha = 35^\circ$, solo 3.

Pode-se observar, através das figuras, que ocorre uma grande variação na vertical do ponto de controle, pois, tomando como base a primeira superfície de camada, nó 1, as outras superfícies possuem funções de transferência totalmente diferentes, sem indicarem valores extremos em frequências coincidentes. Conclui-se também que através da variação do ângulo de incidência da onda não ocorrem alterações expressivas nas funções de transferência, ou seja, o ângulo α interfere muito pouco nos resultados obtidos na direção Y. Outro fato relevante é que a função de transferência fornecida pela onda SV em um ângulo de incidência de $0,5^\circ$, ver Figura 5.24, mostra o mesmo resultado das figuras observadas anteriormente; isso comprova a semelhança entre essas ondas para ângulos próximos a 0° , pois, para maiores valores de ângulos de incidência a onda SV produz ondas P refletidas e refratadas modificando os resultados das funções de transferências. Entretanto, a onda SH somente produz onda SH e isso é comprovado pelo resultado obtido quando se varia o ângulo α .

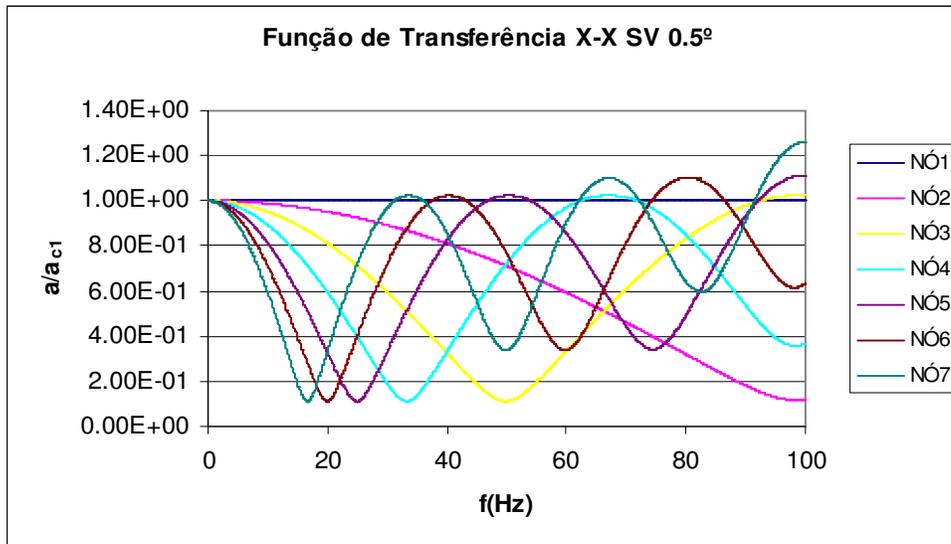


Figura 5.24 - Funções de transferência , movimento de controle X-X, onda SV, $\alpha = 0,5^\circ$, solo 3.

➤ Modos de vibração - SH

São apresentadas nesta seção, as configurações dos modos da onda SH em frequências fornecidas pela onda SV a $0,5^\circ$:

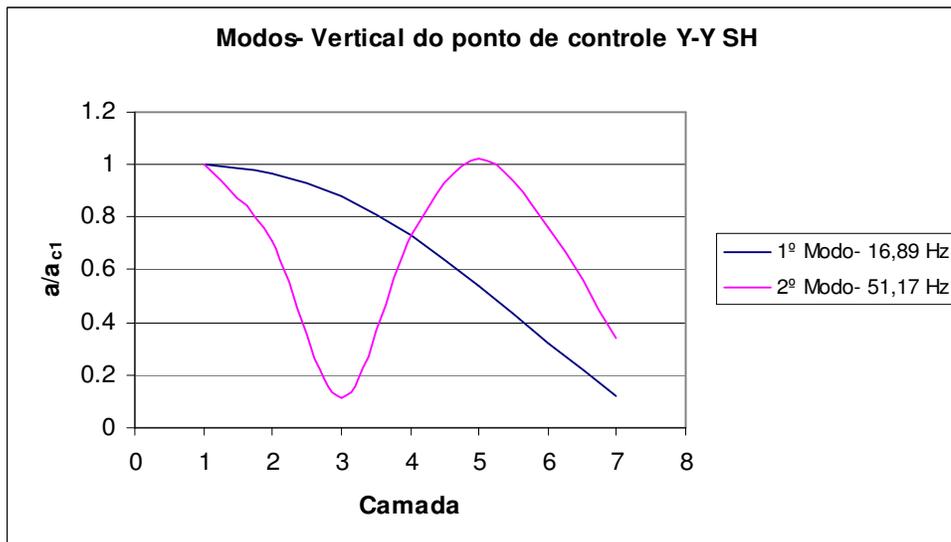


Figura 5.25 - Modos, vertical do ponto de controle, movimento de controle Y-Y, onda SH, $\alpha = 0,5^\circ$, solo 3.

Os resultados obtidos da Figura 5.25 demonstram os mesmos modos apresentados pela onda SV, ver Figuras 5.2 e 5.4.

A utilização desse tipo de onda é interessante em problemas axissimétricos, uma vez que se obtém as respostas fora do plano.

5.3.2. Ondas de superfície (Rayleigh e Love)

5.3.2.1. Ondas Rayleigh

Admitindo uma onda plana com movimentos harmônicos simples no plano X-Z e que somente se propaga na direção X, e que a amplitude desse movimento decresce assintoticamente com a profundidade Z, essas ondas recebem o nome do seu primeiro estudioso, Lord Rayleigh (1885).

As ondas Rayleigh atenuam rapidamente com a profundidade. A solução correspondente a esta definição deve ser derivada das equações gerais do movimento para ondas propagando-se em duas dimensões. A trajetória de uma partícula movendo-se em uma onda Rayleigh é elíptica e, a magnitude e direção do movimento elíptico dependem da profundidade. O maior efeito causado pelo amortecimento é que essas ondas Rayleigh decaem exponencialmente quando se propagarem na direção X. O fator de decaimento é, aproximadamente, $\exp(-2\pi\xi)$ por comprimento de onda na direção X.

Para encontrar uma formulação para este tipo de onda é necessária uma teoria baseada em um complicado problema não-linear de autovalor. A solução para esse problema envolve sérias dificuldades numéricas.

Através da equação da onda Rayleigh podem-se determinar $2n$ fatores de participação modal. Esses, em princípio, podem ser determinados por $2n$ condições de contorno. Porém, em um usual problema de resposta do site, ou seja, somente um movimento de controle e, conseqüentemente, um único deslocamento conhecido para cada frequência, não é possível determinar o movimento geral. A solução particular pode ser obtida se assumido que o movimento produz, no ponto de controle, somente um modo fundamental. Isso é uma aproximação lógica desde que o modo fundamental, fornecido pela onda Rayleigh existente no site, tenha a maior contribuição no movimento.

Através da análise do modo fundamental na solução da equação, tem-se a frequência do modo fundamental, e, após essa frequência o resultado das acelerações decaem rapidamente; então, adota-se a frequência de 4Hz como limite para atuação das ondas Rayleigh nas frequências de análise, devido à potência que essa onda apresenta em sua densidade espectral.

Na análise da onda superficial de Rayleigh, são utilizados resultados fornecidos pela Equação (4.4), mostrando os modos fundamentais para o solo em estudo, no gráfico seguinte é demonstrado esses resultados.

$$([A]k^2 + i[B]k + [G] - \omega^2[M]) \cdot \{W\} = \{0\} \quad (4.4)$$

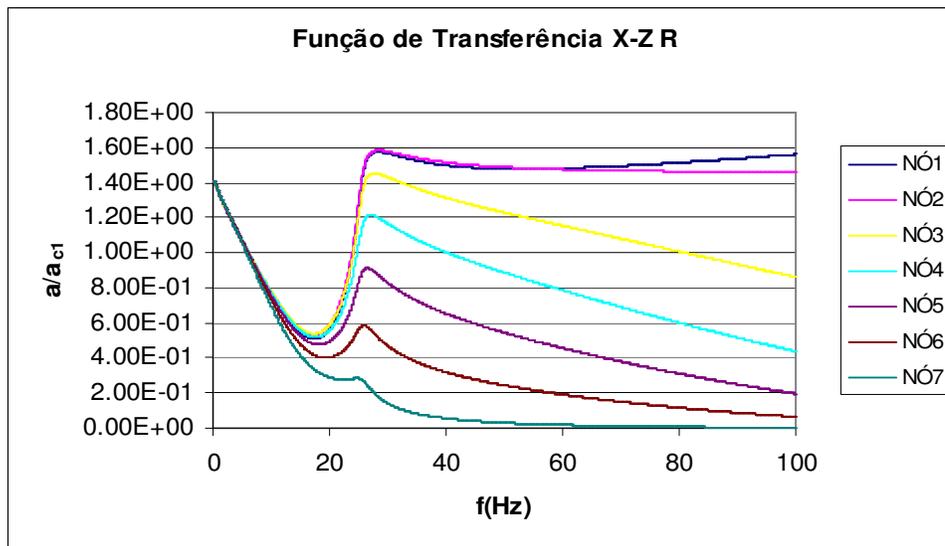


Figura 5.26- Função de Transferência, movimento de controle X-Z, onda R, solo 3.

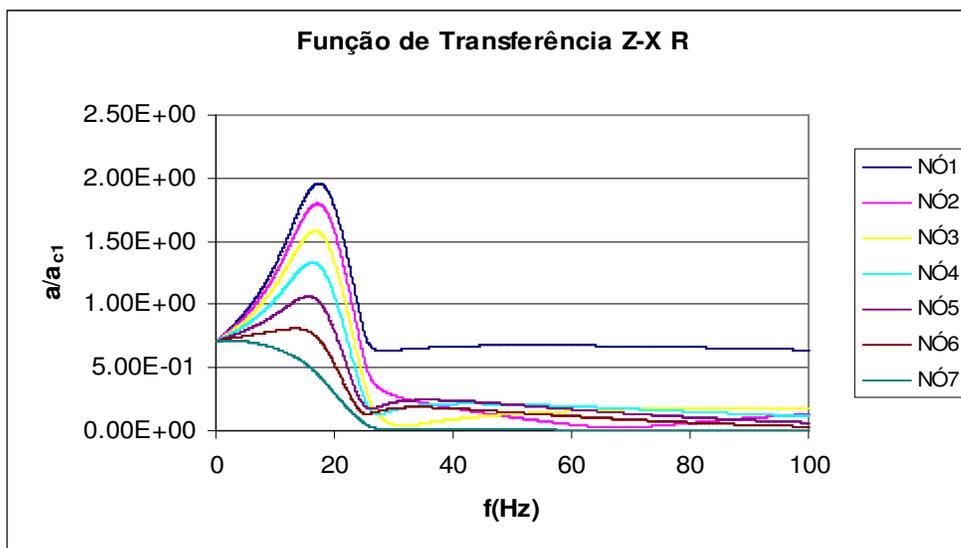


Figura 5.27 - Função de Transferência, movimento de controle Z-X, onda R, solo 3.

Os modos em cada direção são apresentados e verifica-se que a equação em estudo produz somente um modo para cada direção correspondente.

As frequências que definem os modos fundamentais para as direções X-Z, 28,22 Hz e Z-X, 17,38 Hz, têm os seus valores próximos às frequências de referência, 27,34 Hz e 16,83Hz. Com estas Figuras, 5.26 e 5.27, pode-se inferir que realmente para as ondas Rayleigh o modo fundamental é preponderante sobre os outros modos.

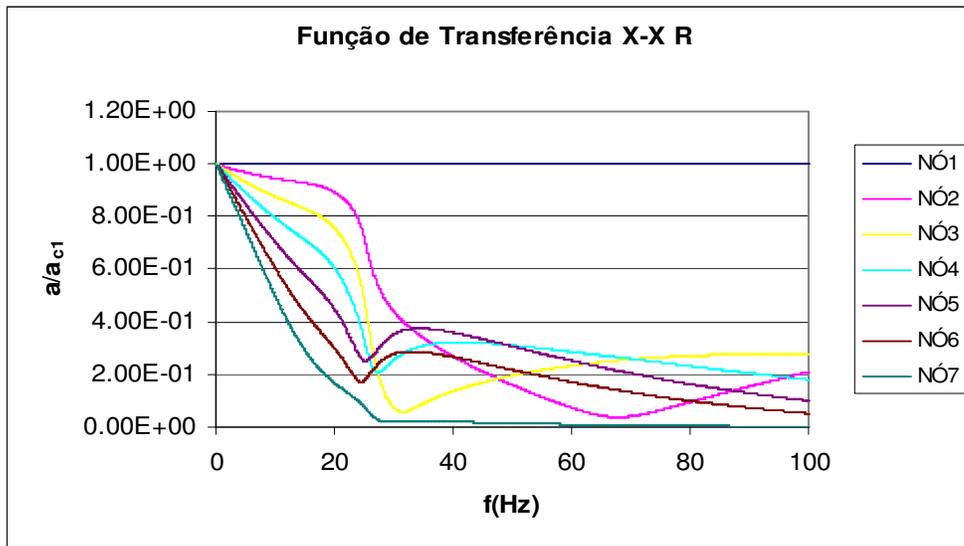


Figura 5.28 - Função de Transferência, movimento de controle X-X, onda R, solo 3.

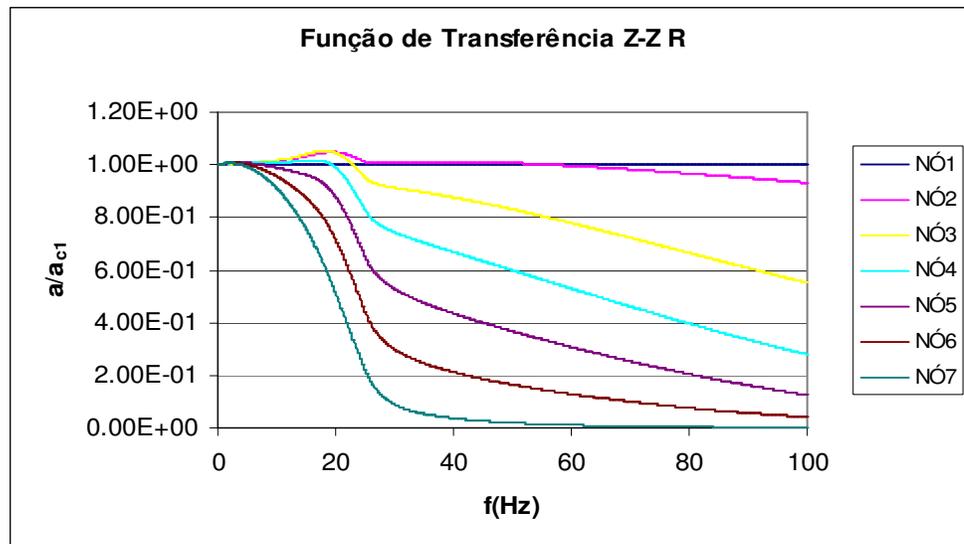


Figura 5.29 - Função de Transferência, movimento de controle X-X, onda R, solo 3.

As Figuras 5.28 e 5.29 mostram a dispersão que ocorre ao se utilizarem ondas Rayleigh, tanto com a variação da frequência como em profundidade, pois, quanto mais próximo ao semi-espaço maior é a dispersão.

Na Figura 5.29, são apresentados os modos fundamentais da onda Rayleigh nas direções X-Z e Z-X, em comparação com os modos apresentados pela onda P. Analisam-se também os resultados das frequências.

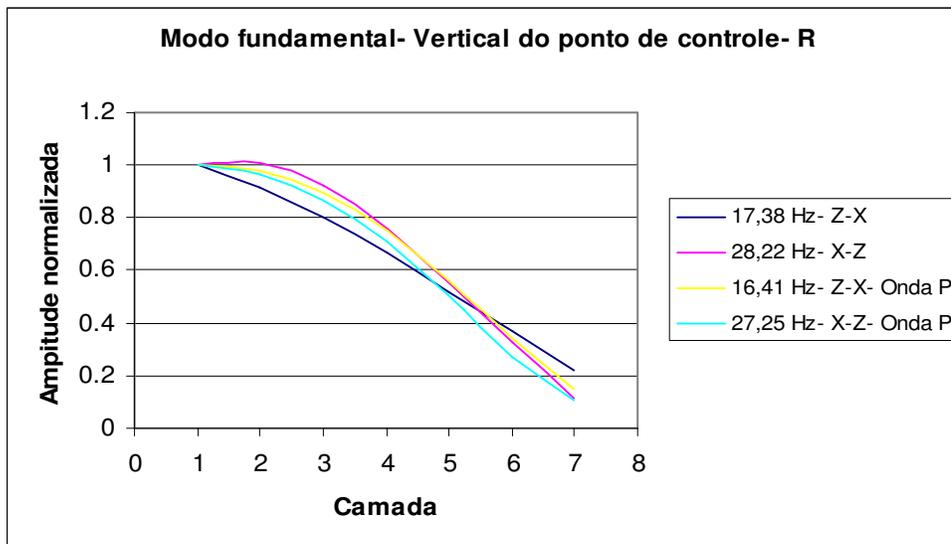


Figura 5.30 - Modo fundamental, vertical do ponto de controle, movimento de controle Z-X e X-Z, ondas R e P, solo 3.

Ainda na Figura 5.30, observa-se que os modos produzidos pelas ondas Rayleigh são muito próximos dos modos produzidos pela onda P e que ocorre uma pequena variação na frequência, entretanto, o modo das ondas Rayleigh apresentado na direção X-Z é mais assintótico na superfície.

Para se utilizar as ondas Rayleigh em conjunto com as ondas de corpo P e SV é necessário entender que, em um sismo, a potência na densidade espectral das ondas de Rayleigh é obtida somente até 4Hz, portanto a utilização das ondas Rayleigh deve se limitar a esse intervalo. Na análise deste solo utilizando ondas Rayleigh até 4Hz, não ocorrem alterações significativas nas amplitudes e nas frequências do sistema. Segundo os estudos produzidos por Dalcanal (2004) a influência das ondas R, em geral, é de redução das respostas, sendo maior com o aumento do seu fator de participação e do ângulo de incidência da onda de corpo. E é mais presente quando se considera o movimento de controle na direção Z. Em

todos os casos, para maiores valores de seu fator de participação as respostas do campo-livre apresentam singularidades sem uma aparente conexão lógica. Em consequência, concordando com o que está escrito no manual do SASSI 2000, o fator de participação das ondas R convém ser mantido pequeno $\leq 10\%$.

5.3.2.2. Onda Love

As ondas Love são definidas no SASSI2000 para propagação na direção Y. Em um sistema viscoelástico de multicamadas, as formas dos modos e os números de onda são mais convenientemente avaliados por um método discretizado similar ao que foi usado pela onda de Rayleigh. Como no caso das ondas Rayleigh, este método assume variações lineares dos deslocamentos dentro das camadas e a existência de uma base rígida em algumas limitadas profundidades que podem ser variadas, com a frequência, assegurando uma adequada simulação do semi-espaço.

A Equação (4.5) demonstra um problema similar de autovalor, no entanto mais simples do que o apresentado pela Equação (4.4) da onda de Rayleigh. Para uma dada frequência, ω , este problema pode ser resolvido por um método de resolução de n autovalores. E, como no caso das ondas Rayleigh, para um único movimento de controle é necessária a existência de um único modo fundamental.

$$([A]k^2 + [G] - \omega^2[M]) \cdot \{W\} = \{0\} \quad (4.5)$$

A Figura 5.31 não demonstrou a definição de uma frequência, mas, pode-se inferir que a participação da onda Love dá-se preponderantemente sobre a superfície para qualquer frequência do sistema, pois, quanto mais próximo do semi-espaço, menores são os resultados encontrados. Pode-se perceber, pelo gráfico, através da profundidade, que existe apenas um modo sendo propagado em qualquer frequência do sistema, principalmente a partir de 20 Hz. Nas frequências menores que 20 Hz existe uma tendência de deslocamento uniforme para qualquer profundidade, ou seja, todas as superfícies de camada têm o mesmo deslocamento da superfície.

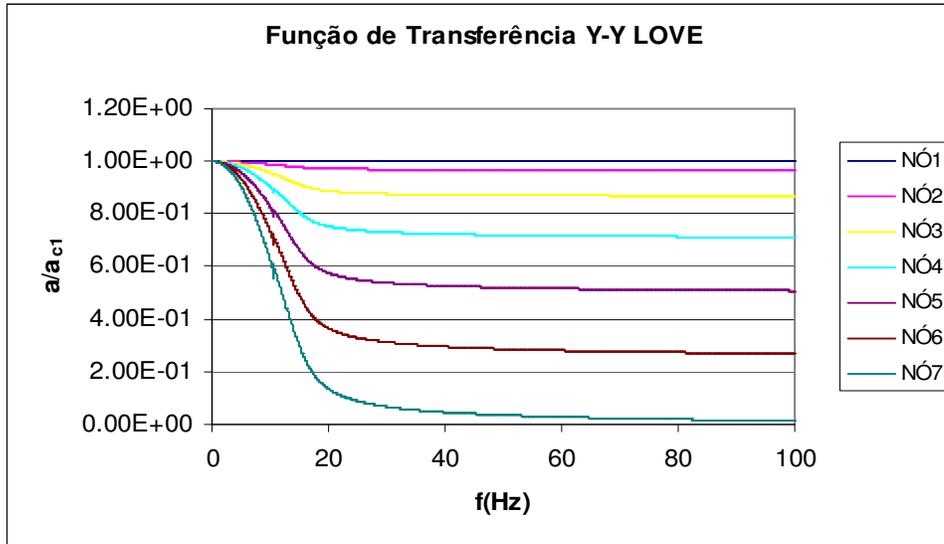


Figura 5.31 - Função de Transferência, movimento de controle Y-Y, onda R, solo 3.

5.4. Conclusões parciais (terreno – campo-livre)

O comportamento geral da solução do campo-livre é influenciado pela composição desse campo, natureza e ângulo de incidência das ondas de corpo e fator de participação das ondas superficiais que o compõem. As amplitudes das funções de transferência, no ponto de controle, são mantidas unitárias na direção desse movimento, exceto para o movimento de controle segundo z com participação simultânea de ondas Rayleigh. Para solos com rigidez elevada, com participação das ondas Rayleigh até 4 Hz não ocorrem alterações nas amplitudes e frequências do sistema.

As frequências do sistema podem sofrer alterações com a variação do ângulo de incidência das ondas de corpo, principalmente a partir da segunda frequência do sistema. Os valores de frequências apresentadas na direção Z sofreram maiores alterações do que na direção X . Os resultados das frequências utilizando a onda SV tendem a ser maiores que os apresentados pela onda P devido ao número de onda k . Para ângulos pequenos ($< 10^\circ$) os valores das frequências fornecidas pelo SASSI tendem a ser muito próximos aos valores das frequências de referência. Para ângulos maiores ($> 20^\circ$) as frequências do sistema sofrem maiores alterações devido ao acoplamento existente nas propriedades do solo.

A variação do ângulo de incidência pode alterar as funções de transferência nas frequências do sistema tanto para mais como para menos, ou seja, a depender do ângulo utilizado na análise pode ocorrer variação no fator de participação modal demonstrando que um modo pode prevalecer sobre os outros. Essa comprovação ocorre apenas na direção X tanto para a onda P como para a onda SV; com a onda P ocorre uma permuta entre a segunda e a terceira frequência; para a onda SV ocorre uma permuta entre a primeira e a segunda frequência.

Os modos de vibração são praticamente os mesmos, independente da onda utilizada; a variação dos parâmetros que constituem o semi-espaço não altera de forma significativa as frequências do sistema.

A propagação com a distância demonstra que quanto maior o valor da frequência, maior o decremento das curvas exponenciais, pois, o número de onda

k depende da frequência de modo proporcional. E, com o aumento da distância, não ocorrem alterações nas frequências do sistema.

A onda SH possui a mesma resposta da onda SV para um ângulo de 0° na direção X-X. As respostas na direção Y demonstram o cisalhamento entre as camadas na vertical do ponto de controle. A onda SH não define frequências e os modos definidos nas frequências da onda SV são semelhantes.

As ondas Rayleigh apresentam um modo preponderante, e o valor da frequência é próximo aos valores apresentados pelas ondas de corpo. O modo é praticamente o mesmo apresentado pelas ondas de corpo e apresenta uma curva assintótica à superfície.

A participação da onda de Love dá-se preponderantemente sobre a superfície para qualquer frequência do sistema, pois, quanto mais próximo do semi-espaço menores são os resultados encontrados. Todos os exemplos mostram apenas um modo para qualquer frequência.