

4

Definição da composição de ondas do campo-livre para o SASSI2000

4.1.

Estratégia

Buscando-se elucidar a questão da definição do campo de ondas, avaliar a influência da composição do mesmo na resposta do sistema, e entender o funcionamento do campo-livre, estuda-se uma estrutura superficial, com cinco graus de liberdade, apoiada em um terreno estratificado em camadas horizontais sobre um semi-espaco elástico, em rocha, dividido em 10 camadas horizontais, Figura 4.1. O ponto de controle, onde é definido o acelerograma do sismo, também é admitido na superfície do terreno. Escolhe-se esse modelo, pois se tem interesse no comportamento do campo-livre. Assim, analisando-se as funções de transferência para o nó de interação, obtém-se o comportamento do terreno, uma vez que a coordenada deste é a mesma da do ponto de controle.

Variam-se os seguintes parâmetros de definição do campo-livre: natureza e ângulo de incidência das ondas, propriedades do terreno (E , G , ν , ρ , espessura e número de camadas), direção do movimento de controle e distância do ponto de controle ao nó de interação.

Cria-se uma base de dados em funções de transferência de aceleração nas direções x , $FT\ddot{u}$, y , $FT\ddot{v}$ e z , $FT\ddot{w}$, para o nó de interação, nó 1, e eventualmente para o nó 6, superior. Trabalha-se com funções de transferência por serem curvas que representam o sistema sob influência de um carregamento padrão, transferências de uma aceleração harmônica unitária do ponto de controle para o nó onde se está solicitando a resposta. E, principalmente, por serem, para o modelo simplificado em uso, uma avaliação indireta dos movimentos do campo-livre.

Comparam-se as respostas com a teoria de resolução do campo-livre apresentada por Chen (1980) em sua tese de doutorado e desenvolvida para utilização no programa SASSI, para compreensão dos resultados obtidos.

Dessa maneira, espera-se aumentar o conhecimento e a sensibilidade quanto à maneira de trabalhar do SASSI, de modo a se ampliar a região segura de aplicação do mesmo e definir a melhor configuração de ondas para que se tenham resultados confiáveis, dentro das expectativas e de acordo com o que é definido na norma para cálculos sísmicos.

4.2. Modelo básico

Estrutura plana, constituída de uma haste de 15m de extensão, com cinco massas translacionais segundo a direção x, de 12.600 t cada, dispostas a cada três metros, conforme Figura 4.1.

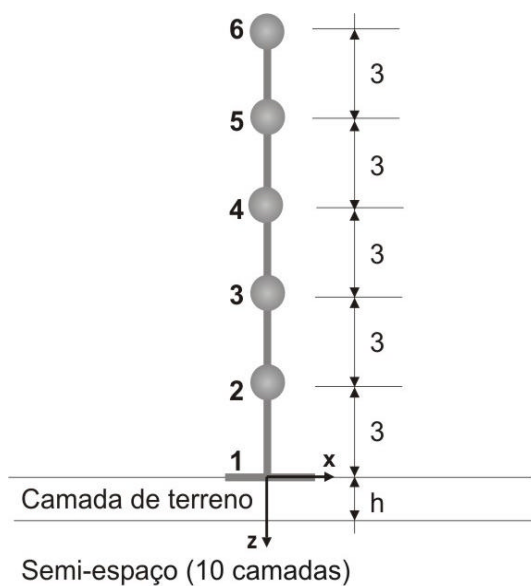


Figura 4.1 – Modelo básico: haste plana superficial, com cinco massas translacionais na direção x, sobre terreno em camadas mais 10 camadas de semi-espaço rochoso.

A haste é modelada com cinco elementos de viga com as propriedades apresentadas na Tabela 4.1.

Restringem-se os movimentos rotacionais em torno dos eixos x e z. O nó de interação, nó 1, é restrito a rotações na três direções.

O terreno, variado, é modelado por camadas sobre um semi-espaço de rocha com dez camadas e as propriedades apresentadas também na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Propriedades dos materiais.

Elementos de viga		Semi Espaço
Mecânicas	Geométricas	Mecânicas
$E = 3,02 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$ $\nu = 0,2$ $\gamma = 0 \text{ t/m}^3$ $\xi = 0 \%$	$A = 100,00 \text{ m}^2$ $S_2 = S_3 = 83,00 \text{ m}^2$ $J = 1,41 \times 10^3 \text{ m}^3$ $I_{22} = I_{33} = 8,33 \times 10^2 \text{ m}^4$	$E = 7,80 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$ $\nu = 0,2$ $\gamma = 2,65 \text{ t/m}^3$ $\xi_{VS} = \xi_{VP} = 0,07 \%$

4.3.

Programa de ensaio

4.3.1.

Ondas de corpo (P, SV e SH)

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

Para tal, estudam-se, inicialmente, dois tipos de terreno: um constituído por uma camada de rocha e outro por uma camada de solo. Varia-se também a direção do movimento de controle em cada caso. As características dos campos-livres estudados são descritas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Parâmetros de campo-livre para estudo da influência da natureza da onda e do ângulo de incidência.

Parâmetros de Campo Livre	Descrição	
	Rocha	Solo
Módulo de Elasticidade (E)	$7,8 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$	$1,4 \times 10^5 \text{ kN/m}^2$
Coeficiente de Poisson (ν)	0,2	0,25
Massa Específica (ρ)	$2,65 \text{ t/m}^3$	$1,85 \text{ t/m}^3$
Amortecimento associado à onda S (ξ_{VS})	0,07	
Amortecimento associado à onda P (ξ_{VP})	0,07	
Espessura da camada de terreno (h)	2,00 m	
Número de camadas (n_c)	1	
Tipo de onda	P ou SV	
Ângulo de incidência (α)	0° ; 0,5° ; 30° ; 44,5° ; 45° ; 45,5° ; 60° ; 80° ; 89,5° e 90°	
Distância do ponto de controle ao nó de interação (x_{PC} ; y_{PC})	(0 ; 0)	
Direção do movimento de controle (mc)	x ou z	

Depois, verifica-se o comportamento do campo-livre com relação à variação da espessura da camada de terreno e à estratificação do mesmo. Estudam-se três casos: uma camada de dois metros de solo (1_2), uma camada de oito metros de

solo (1_8) e quatro camadas de dois metros de solo (4_2). As características dos campos-livres de cada caso são descritas na Tabela 4.3.

E, finalmente, avalia-se o comportamento das respostas quando modificada a distância x do ponto de controle ao nó de interação, x_{PC} . Varia-se essa distância de 200 em 200 metros, até 600 metros, quer no sentido negativo, aproximando-se da fonte do terremoto, quer no positivo, afastando-se dessa. Estuda-se o modelo básico, porém com a estrutura sem massa, para que se tenha somente o comportamento do campo-livre. O terreno avaliado é composto por uma camada de dois ou oito metros de rocha ou de solo. Para movimento de controle na direção x utilizam-se ondas SV, e na direção z ondas P, ambas incidindo a 30° ou a 10° .

Tabela 4.3 – Parâmetros de campo-livre para estudo da influência da espessura e número de camadas do terreno.

Parâmetros de campo-livre	Casos		
	1_2	1_8	4_2
Terreno	solo	solo	solo
Espessura da camada de terreno (h)	2 m	8 m	2 m
Número de camadas (n_c)	1	1	4
Tipo de onda	SV ou P		
Ângulo de incidência (α)	30°		
Distância do ponto de controle ao nó de interação (x_{PC} ; y_{PC})	(0 ; 0)		
Direção do movimento de controle (mc)	x ou z		

A análise da influência da onda SH é feita com os mesmos parâmetros de campo-livre apresentados na Tabela 4.2 com exceção do tipo de onda, que agora é SH, e da direção do movimento de controle que, para onda SH, deve ser a direção y .

4.3.2. Ondas superficiais (R)

Analisa-se a influência da presença das ondas de Rayleigh (R) no desempenho do campo-livre. Para tal avalia-se o modelo básico, Figura 4.1, porém com a estrutura sem massa para que se tenha somente a resposta desse campo.

Usam-se ondas R, com 5% ou 20% de participação, no intervalo de 0,05 a 4 Hz, juntamente com ondas SV ou P, com conseqüente participação de 95% ou 80%, já que as ondas R são formadas por essas ondas de corpo, perdem a expressão além desse limite de frequência e estão presentes somente em pequenas porcentagens no movimento de controle, Chen (1980). Para frequências superiores a 4Hz adota-se 100% de ondas de corpo. Na entrada do Programa, a participação das ondas é descrita por um fator decimal, ?.

São utilizados os mesmos terrenos constituídos de uma camada de dois ou de oito metros de rocha ou de solo. O ponto de controle é mantido na superfície. Para movimento de controle segundo x, adota-se onda de corpo SV e, segundo z, onda P, ambas incidido a 30°, 20° ou 10°.

4.4. Apresentação e análise dos resultados

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

As Figuras 4.2 e 4.3 apresentam as funções de transferência de aceleração na direção x para os nó 1 e 6, $FT_{\ddot{u}1}$ e $FT_{\ddot{u}6}$, respectivamente. Considera-se uma camada de rocha, movimento de controle na direção x e ondas P ou SV incidindo a 30°, 60° ou 80°. Indicam-se os valores das frequências de pico, que são as frequências naturais do sistema, e as amplitudes correspondentes.

Na seqüência, apresentam-se as funções de transferência na direção z, $FT_{\ddot{w}(1a6)}$, iguais do nó 1 ao nó 6. Considera-se novamente uma camada de rocha, movimento de controle na direção x e onda P, Figura 4.4, ou onda SV, Figura 4.5, ambas com variação do ângulo de incidência. Apresenta-se ainda, na Tabela 4.4, um resumo dos valores das funções de transferência para cada tipo de onda e ângulo de incidência. Quando a função de transferência varia com a frequência mas não varia com α , os valores são indicados por FT, ou seja, é sempre a mesma função para todos os ângulos.

Não se obtêm respostas na direção y.

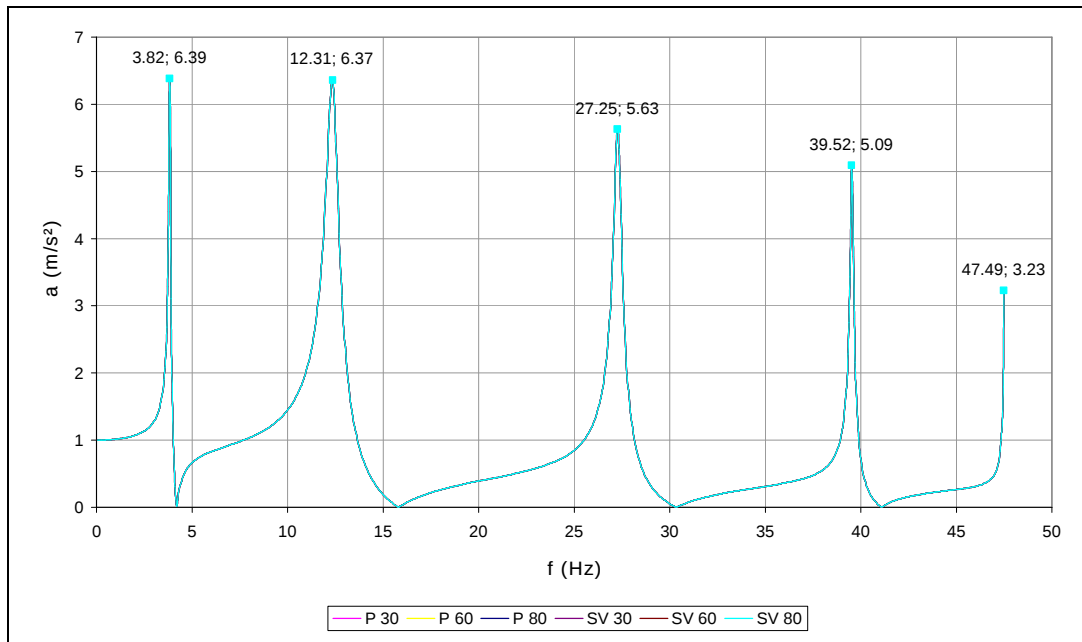


Figura 4.2 - FTü1 ondas P ou SV com variação de α , $n_c = 1$, $h = 2$ m, rocha e $mc(x)$.

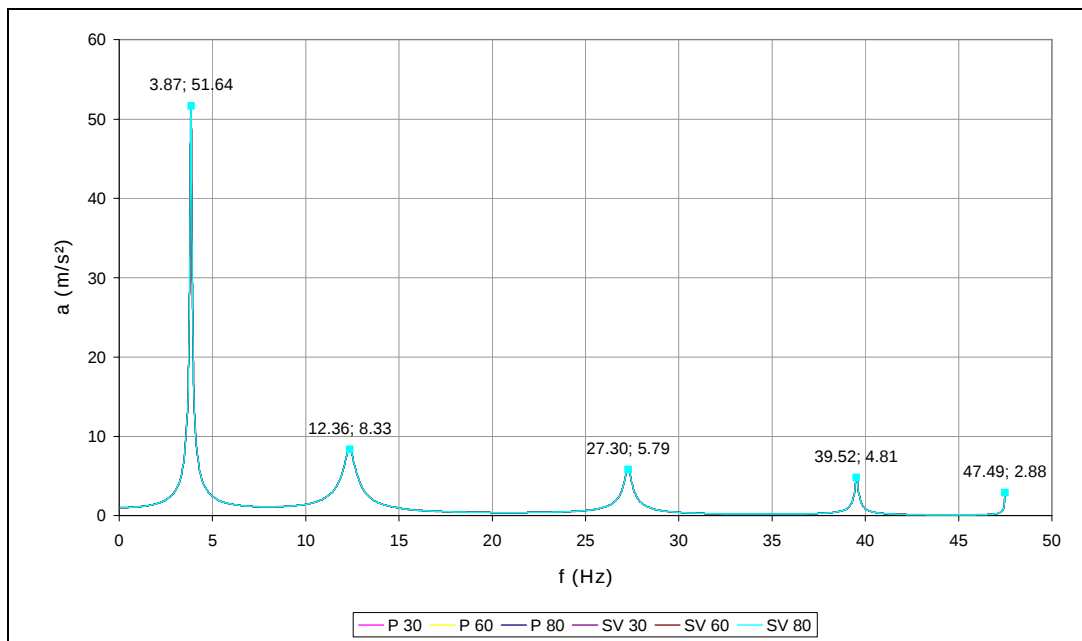


Figura 4.3 - FTü6 ondas P ou SV com variação de α , $n_c = 1$, $h = 2$ m, rocha e $mc(x)$.

Nota-se que as funções de transferência na direção x são iguais tanto quando utilizada onda P quando da utilização de onda SV, não apresentando tampouco diferenças com a variação do ângulo de incidência. Tal não é surpreendente, pois o movimento de controle está prescrito na direção x e o programa preserva o valor unitário da aceleração no ponto de controle e na mesma direção. Percebe-se também que para a frequência natural fundamental, a resposta

é amplificada cerca de oito vezes para o nó 6, isso devido à configuração dos modos de vibração para cada frequência natural.

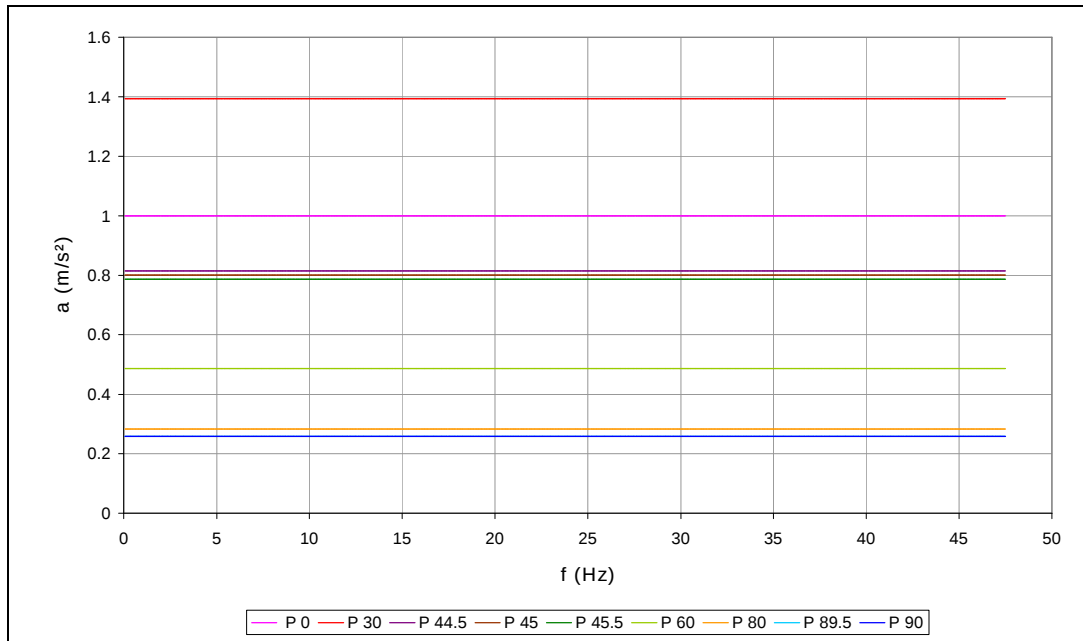


Figura 4.4 - $FT\ddot{w}(1a6)$ onda P com variação de α , $n_c = 1$, $h = 2\text{m}$, rocha e $mc(x)$.

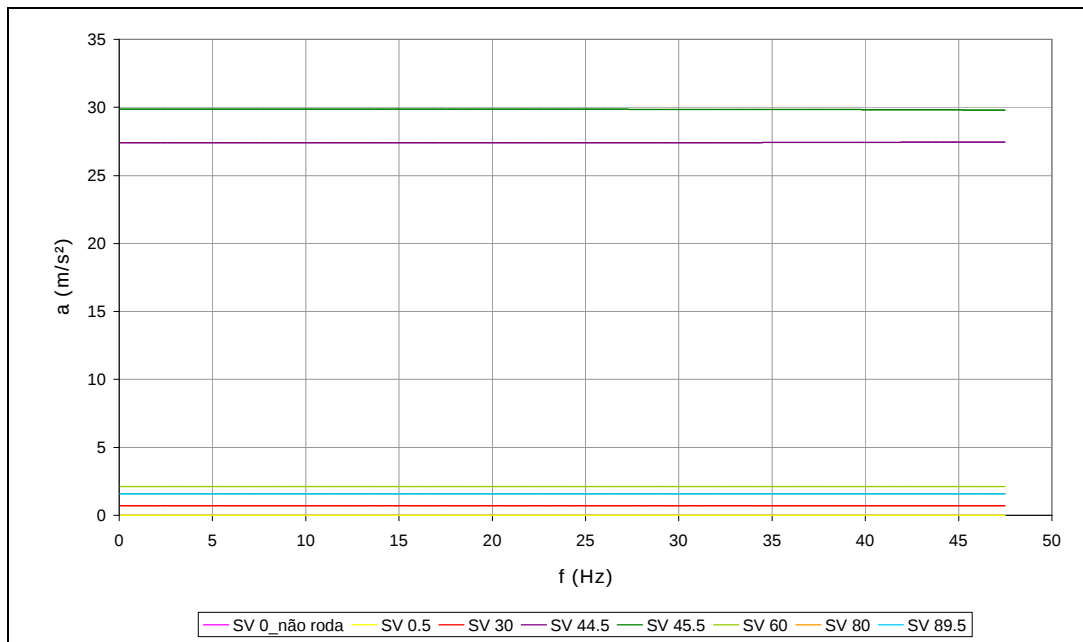


Figura 4.5 - $FT\ddot{w}(1a6)$ onda SV com variação de α , $n_c = 1$, $h = 2\text{m}$, rocha e $mc(x)$.

Já as $FT\ddot{w}$ variam tanto com a natureza da onda quanto com o ângulo de incidência das mesmas, apresentando inclusive para certos ângulos valores muito elevados, díspares, Tabela 4.4, e os outros para os quais o programa não roda.

Porém as funções de transferência são as mesmas para os nós 1 a 6, pois o sistema não apresenta massa na direção z ; assim, nessa direção, todo o sistema é acelerado com a mesma amplitude, que corresponde à aceleração do ponto do campo-livre cuja posição coincide com a do nó de interação, nó 1, Figura 4.1. O modelo estrutural, por ausência de massa, exibe-se como inteiramente rígido na direção vertical.

Tabela 4.4 – Resumo dos valores das FT obtidas para cada onda com seus respectivos ângulos de incidência. $n_c = 1$, $h = 2\text{m}$, rocha e $mc(x)$.

a (graus)	ONDA P		ONDA SV	
	FT $\ddot{u}$	FT $\ddot{w}$	FT $\ddot{u}$	FT $\ddot{w}$
0	(-)	1,00	FT	(-)
0,5	FT	93,56 (*)	FT	0,01
30	FT	1,39(*)	FT	0,71
44,5	FT	0,82	FT	27,40 (*)
45	FT	0,80	FT	10^9 (*)
45,5	FT	0,79	FT	29,90 (*)
60	FT	0,49	FT	2,12
80	FT	0,28	FT	1,62
89,5	FT	0,26	FT	1,58
90	FT	0,26	(-)	(-)

(*) valores díspares (-) não roda

Apresentam-se nas Figuras 4.6 e 4.7 as funções de transferência na direção x para os nós 1 e 6 para onda P ou SV incidindo a 30° , 60° ou 80° . Considera-se novamente movimento de controle na direção x , porém agora se trabalha com o terreno em solo. As frequências naturais e as amplificações nas mesmas são novamente indicadas.

Prosseguindo, apresentam-se, nas Figuras 4.8 e 4.9, as funções de transferência na direção z , iguais do nó 1 ao 6, para onda P ou SV, respectivamente, com variação do ângulo de incidência. Novamente, trabalha-se com uma camada de solo e movimento de controle na direção x .

Nota-se que, na direção x , há grande redução dos valores das duas primeiras frequências naturais, se comparadas com as das Figuras 4.2 e 4.3, sendo as demais pouco alteradas. Quanto às amplitudes, com exceção do caso da frequência fundamental para o nó 1, onde não há variações sensíveis, as demais sofrem uma grande redução. Isso porque, como o solo é mais flexível que a rocha, o sistema todo fica mais flexível, com redução das frequências naturais. A variação do nó 1 para o nó 6 também é pouco sentida, pois devida a maior flexibilização do solo

em relação à estrutura ela praticamente desloca-se como um corpo rígido, ou seja, os modos não têm grande variação de um nó para outro. Novamente não há variação da função de transferência nem com a natureza da onda, nem com o ângulo de incidência.

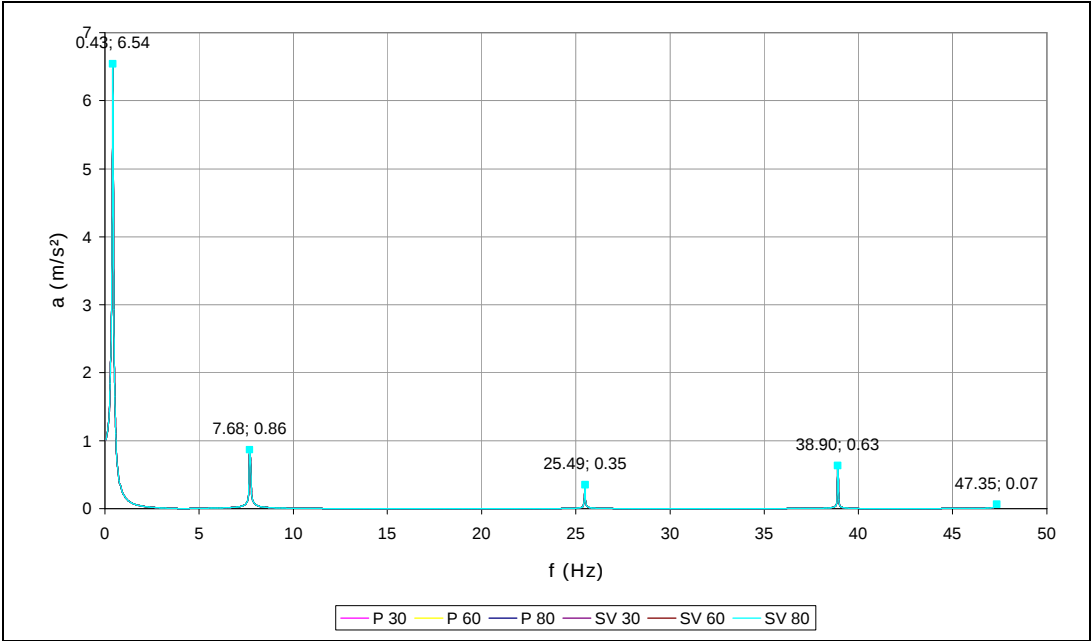


Figura 4.6 - $FT\ddot{u}1$ ondas P ou SV com variação de α , $n_c = 1$, $h = 2\text{m}$, solo e $mc(x)$.

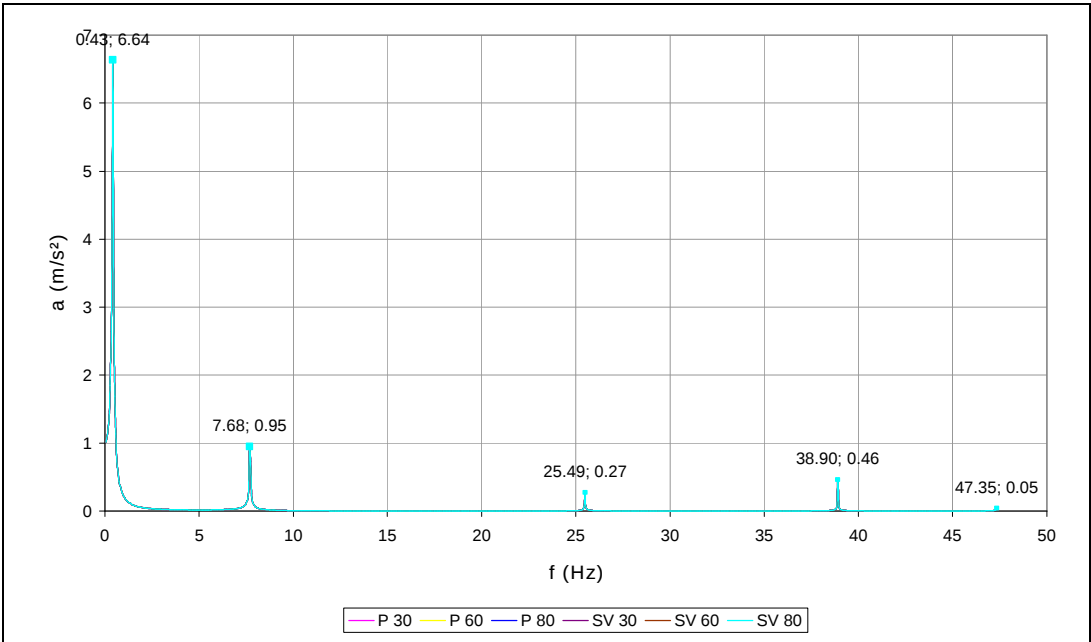


Figura 4.7 - $FT\ddot{u}6$ ondas P ou SV com variação de α , $n_c = 1$, $h = 2\text{m}$, solo e $mc(x)$.

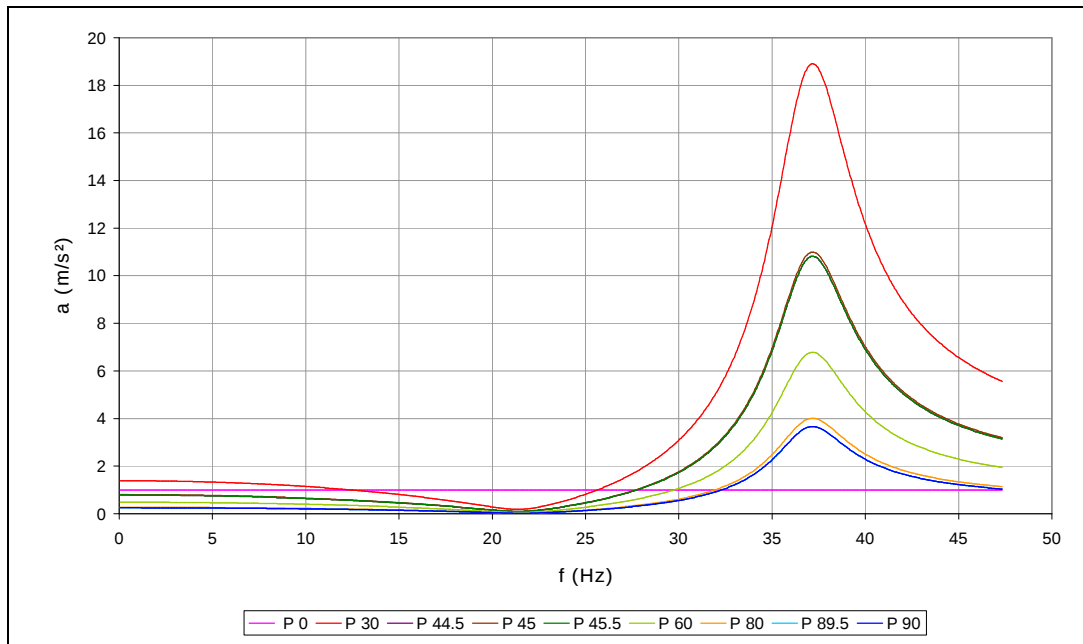


Figura 4.8 - $FT\ddot{w}(1a6)$ onda P com variação de α , $n_c = 1$, $h = 2\text{m}$, solo e $mc(x)$.

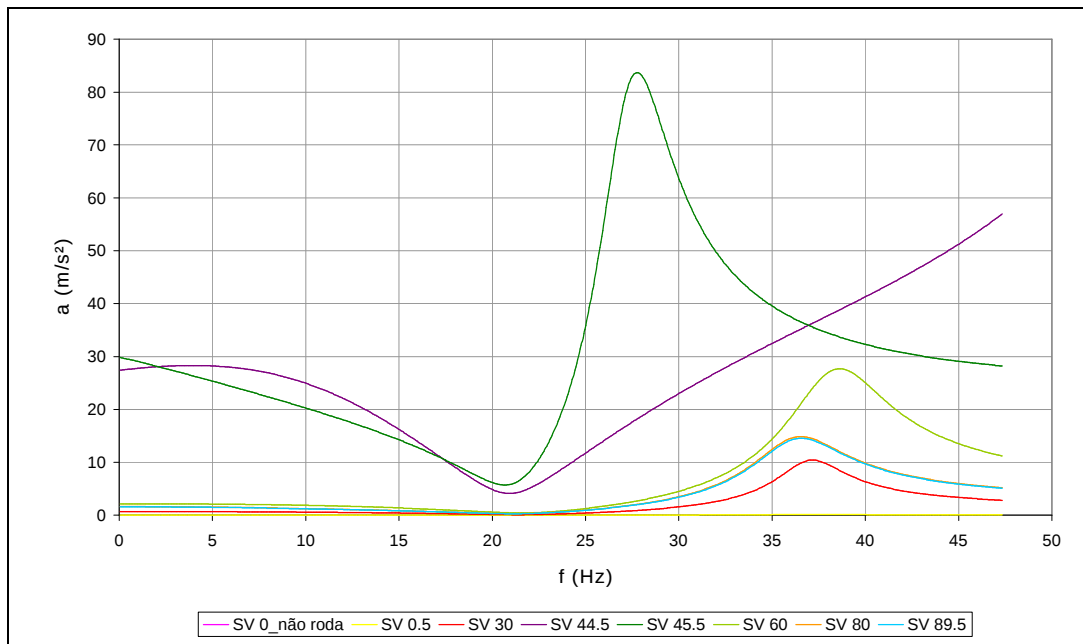


Figura 4.9 - $FT\ddot{w}(1a6)$ onda SV com variação de α , $n_c = 1$, $h = 2\text{m}$, solo e $mc(x)$.

Ao contrário, contata-se nas funções de transferência para a direção z , que elas continuam variando tanto com a natureza da onda quanto com o ângulo de incidência. Entretanto, com exceção do caso de onda P incidindo a 0° , que leva todo o movimento na direção z , as curvas não são mais constantes, apresentando um pico entre 36 e 39 Hz. Esse pico, que não aparece quando o terreno é rochoso, (pois sendo muito rígido, tem frequência fundamental muito elevada) representa a

freqüência natural do terreno na direção z, já que a estrutura não tem massa nessa direção. Outra observação é que para a primeira freqüência de análise, 0,05 Hz, o período do carregamento é praticamente infinito, ou seja, não há esforços internos no sistema e ele responde como a rocha, com os valores das curvas iguais aos da Tabela 4.4. Valores díspares e situações em que o programa não roda também ocorrem, como já comentado para a situação de uma camada de rocha sobre o semi-espaço.

Apresentam-se agora, os resultados obtidos com movimento de controle na direção z. Nas Figuras 4.10 e 4.11 observam-se as funções de transferência na direção x para o nó 1 considerando onda P ou SV, respectivamente, com variação do ângulo de incidência e terreno com uma camada de dois metros de rocha. E, a Figura 4.12 apresenta a função de transferência na direção z para ondas P ou SV incidindo a 30°, 60° ou 80°, considerando o mesmo terreno.

Percebe-se que o comportamento com a variação da natureza da onda e do ângulo de incidência é o contrário, ou seja, as funções de transferência na direção x, perpendicular ao movimento, variam. Já a função de transferência na direção z, direção do movimento, permanece constante e unitária.

O comportamento das funções de transferência quando da flexibilização do terreno, ou seja, adoção de uma camada de solo, para movimento de controle em z segue o mesmo princípio já observado. As funções de transferência na direção x variam com a natureza da onda e com o ângulo de incidência e há uma redução das freqüências naturais, principalmente das duas primeiras. E na direção z, a função de transferência é igual ao caso do terreno em rocha, Figura 4.12.

Para se ter o comportamento do solo na direção x, sem influência da estrutura, analisam-se as funções de transferência para o modelo básico, porém sem massa, com uma camada de dois metros de solo, variando a direção do movimento de controle. A Figura 4.13 apresenta a função de transferência na direção x para onda P ou SV a 30°, 60° ou 80°, com movimento de controle na direção x. As funções de transferência na direção z não são apresentadas pois são as mesmas das Figura 4.8 e Figura 4.9, uma vez que o modelo básico já não apresentava massa na direção z. E, as Figura 4.14 e Figura 4.15 apresentam os resultados obtidos com movimento de controle z, para ondas P ou SV com variação do ângulo de incidência. Novamente a função de transferência na direção z não foi mostrada, pois é igual à da Figura 4.12.

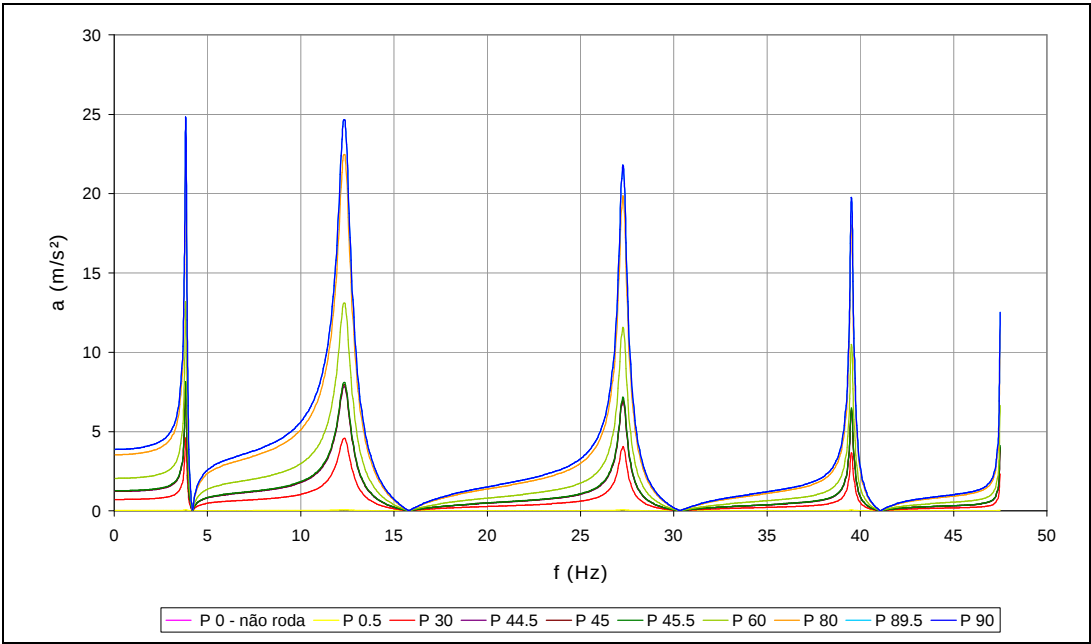


Figura 4.10 - FTü1 onda P com variação de α , $n_c = 1$, $h = 2\text{m}$, rocha e $mc(z)$.

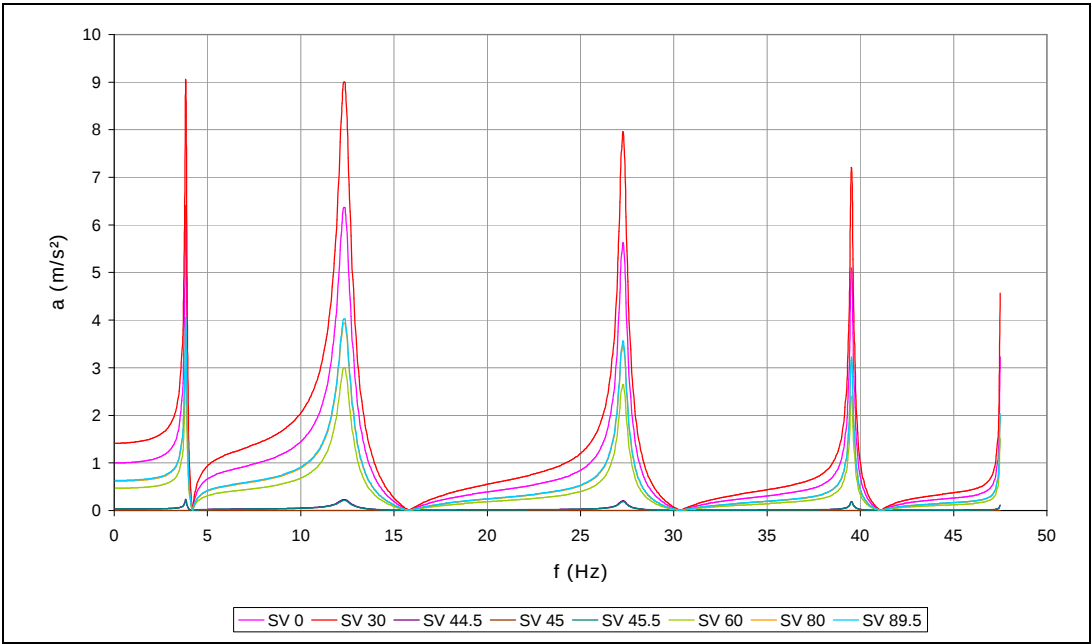


Figura 4.11 - FTü1 onda SV com variação de α , $n_c = 1$, $h = 2\text{m}$, rocha e $mc(z)$.

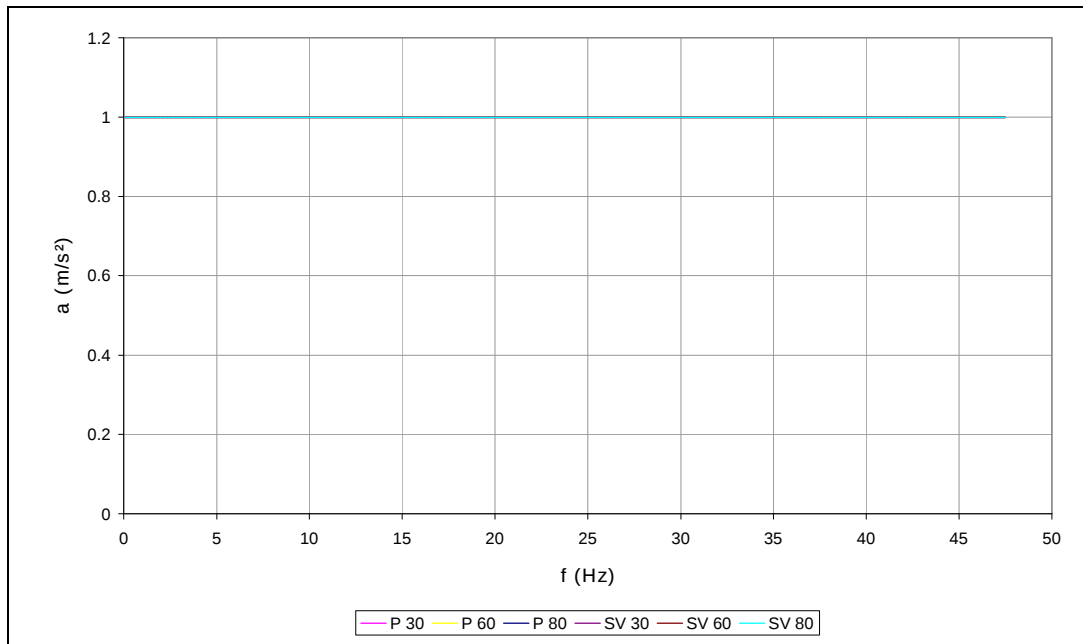


Figura 4.12 - $FT\ddot{w}(1a6)$ onda P ou SV com variação de α , $n_c = 1$, $h = 2\text{m}$, rocha ou solo, e $mc(z)$.

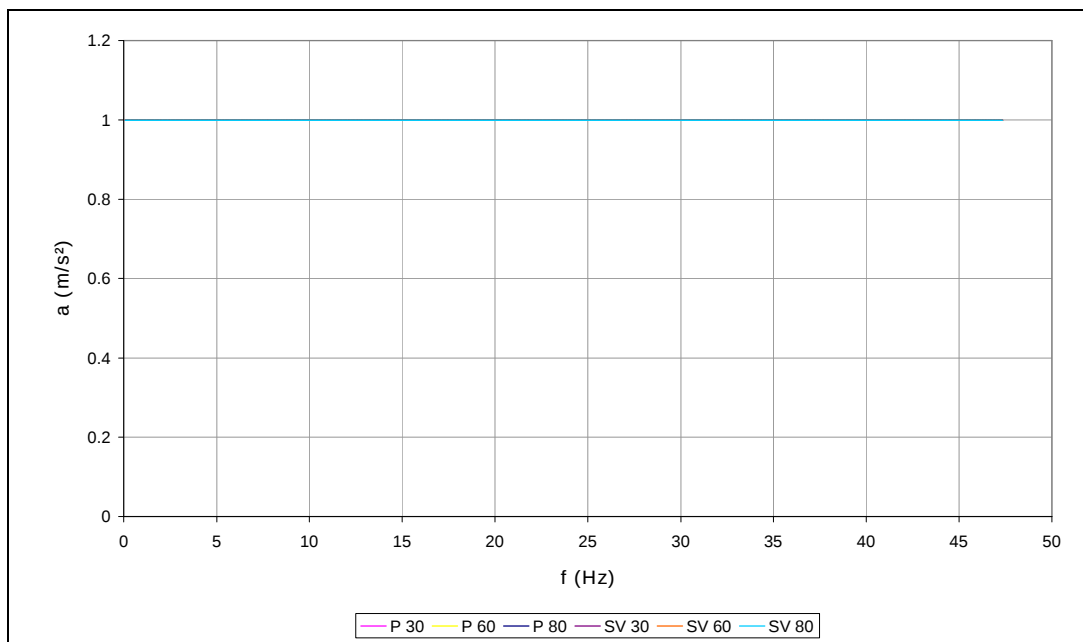


Figura 4.13 - $FT\ddot{u}(1a6)$ onda P ou SV com variação de α , $n_c = 1$, $h = 2\text{m}$, solo e $mc(x)$, estrutura sem massa.

Nota-se que, a função de transferência na direção x , com movimento de controle também nessa direção, permanece constante e unitária. Esse comportamento explica o porquê das funções de transferência na direção x , para estrutura com massa, permanecerem as mesmas com a variação da natureza da onda e ângulo de incidência. Coincidindo também com o caso da função de

transferência na direção z e movimento de controle também nessa direção. Ou seja, as respostas no ponto de controle são mantidas iguais a um na direção do movimento de controle, como já visto.

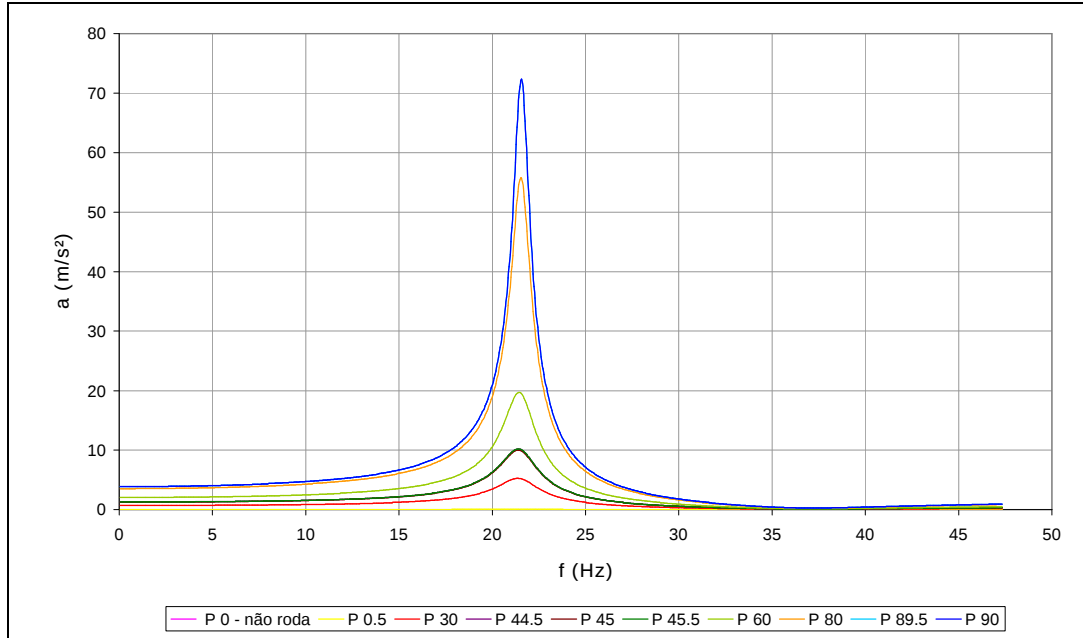


Figura 4.14 - $FT\ddot{u}(1a6)$ onda P com variação de α , $n_c = 1$, $h = 2\text{m}$, solo e $mc(z)$, estrutura sem massa.

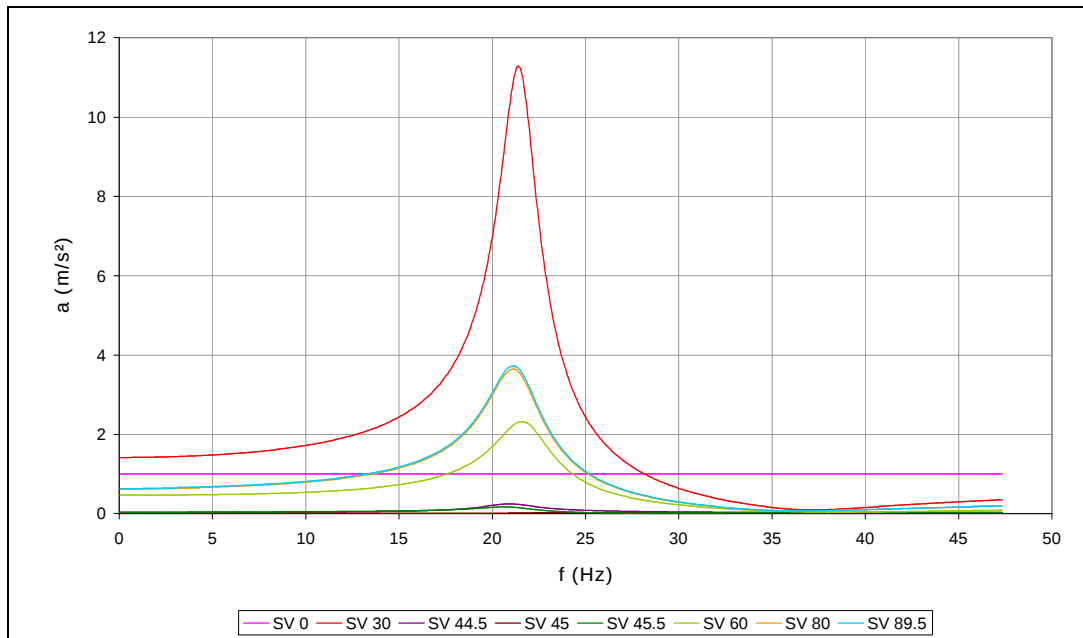


Figura 4.15 - $FT\ddot{u}(1a6)$ onda SV com variação de α , $n_c = 1$, $h = 2\text{m}$, solo e $mc(z)$, estrutura sem massa.

Já quando se tem movimento de controle em z, a função de transferência na direção x varia com a natureza da onda e ângulo de incidência, como esperado, e apresenta um pico na região de 21,5 Hz. Esse pico indica a frequência natural do terreno para a direção x. Nota-se também que, para a frequência de 0,05 Hz, as funções de transferência partem do mesmo valor tanto quando considerada estrutura com massa ou sem, indicando assim uma resposta para carregamento com duração infinita, sem participação da flexibilidade da estrutura.

Com base nos resultados até agora apresentados percebe-se que o movimento no ponto de controle é mantido unitário na direção do movimento de controle e para a outra direção ele é uma componente que depende da natureza da onda e do ângulo de incidência.

Plotando-se as amplitudes das funções de transferência, para a frequência 0,05 Hz, com relação aos respectivos ângulos de incidência tem-se o comportamento de cada tipo de onda, normalizado pela componente do deslocamento do ponto de controle na direção do movimento de controle, com a variação do ângulo de incidência. Relações trigonométricas podem ser estabelecidas, como observado nas figuras a seguir. A Figura 4.16 apresenta as amplitudes da função de transferência na direção z, movimento de controle em x, para onda P versus a relação trigonométrica de aproximação. Na Figura 4.17 têm-se os mesmos parâmetros, porém para onda SV. As amplitudes das funções de transferência na direção x com movimento de controle na direção z, para onda P, são apresentadas na Figura 4.18, e para onda SV, na Figura 4.19. Comparadas com a relação trigonométrica de aproximação para cada caso.

Nota-se que, no caso de movimento de controle na direção x, as acelerações na vertical, quando da incidência da onda P, vão para o infinito para ângulos próximos a 0° e, no caso da onda SV, próximos a 45° . E que as menores acelerações ocorrem para ângulos superiores a 50° , onda P, e inferiores ao ângulo crítico, Equação (2.23), onda SV. Comportamentos similares as relações trigonométricas $\cot(a)$ e $|1/(1 - \cot(a))|$, respectivamente.

Para movimento de controle na direção z, as acelerações horizontais, no caso de onda P incidente, crescem exponencialmente até quatro vezes a amplificação horizontal e, para onda SV, são muito amplificadas próximo a 0° e a $37,8^\circ$, ângulo crítico, e são nulas para 45° . As menores amplificações ocorrem até

30° para onda P e a partir de 45° para onda SV. Com exceção da região próxima ao ângulo crítico no caso de onda SV, as funções de transferência podem ser aproximadas pelas relações trigonométricas $1 - \exp(a)$, onda P, e $\cot(a)$, onda SV.

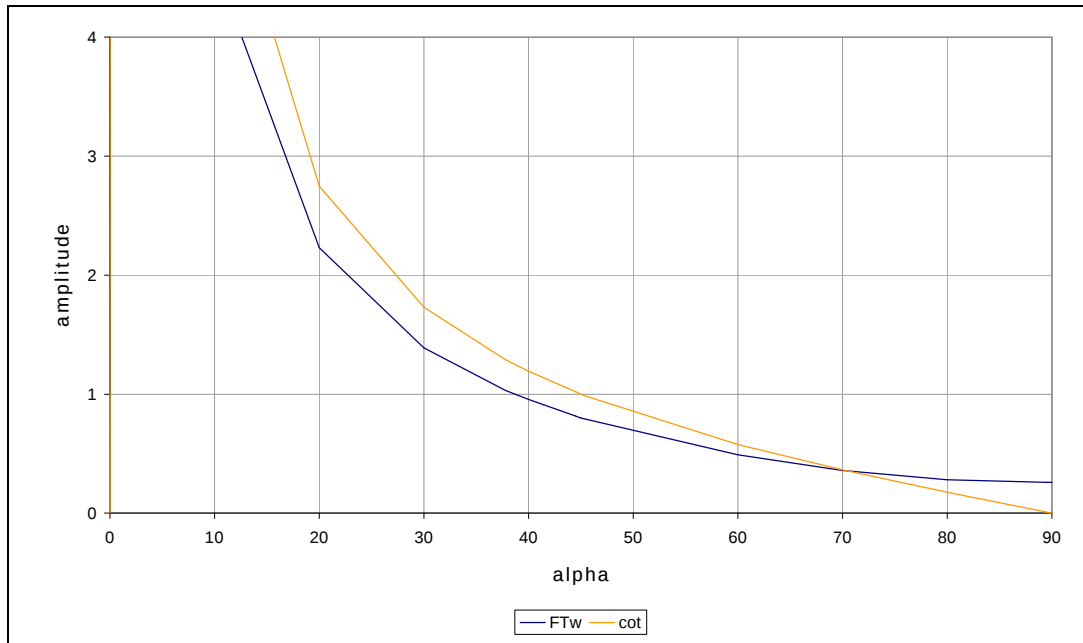


Figura 4.16 - Amplitudes da $FT\ddot{w}(1a6)$ onda P, $n_c = 1$, $h = 2$, rocha, $mc(x)$, e relação trigonométrica de aproximação.

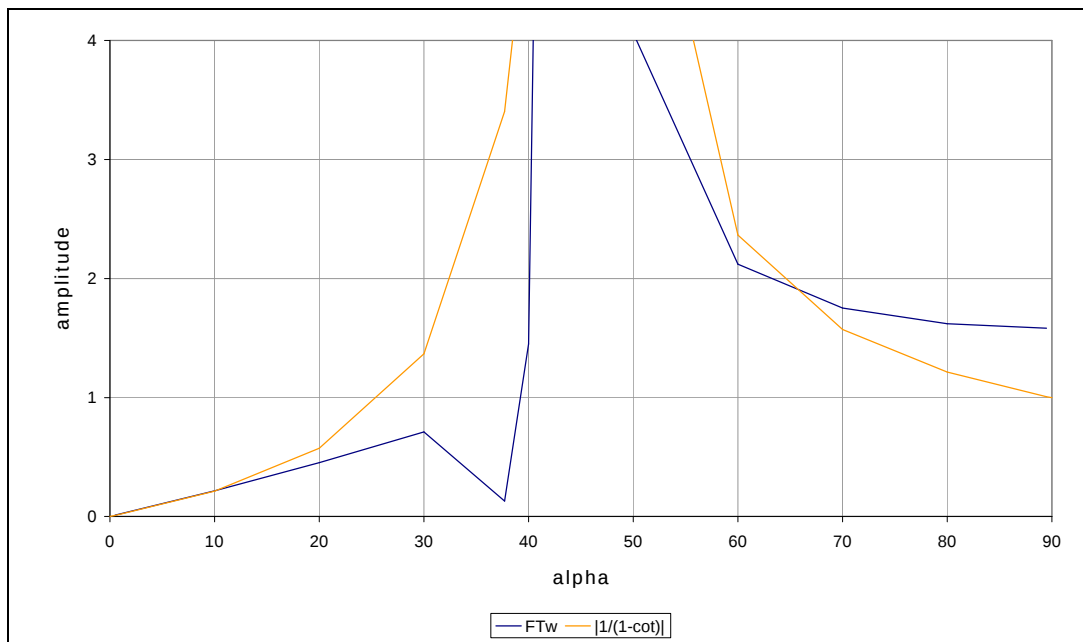


Figura 4.17 - Amplitudes da $FT\ddot{w}(1a6)$ onda SV, $n_c = 1$, $h = 2$, rocha, $mc(x)$, e relação trigonométrica de aproximação.

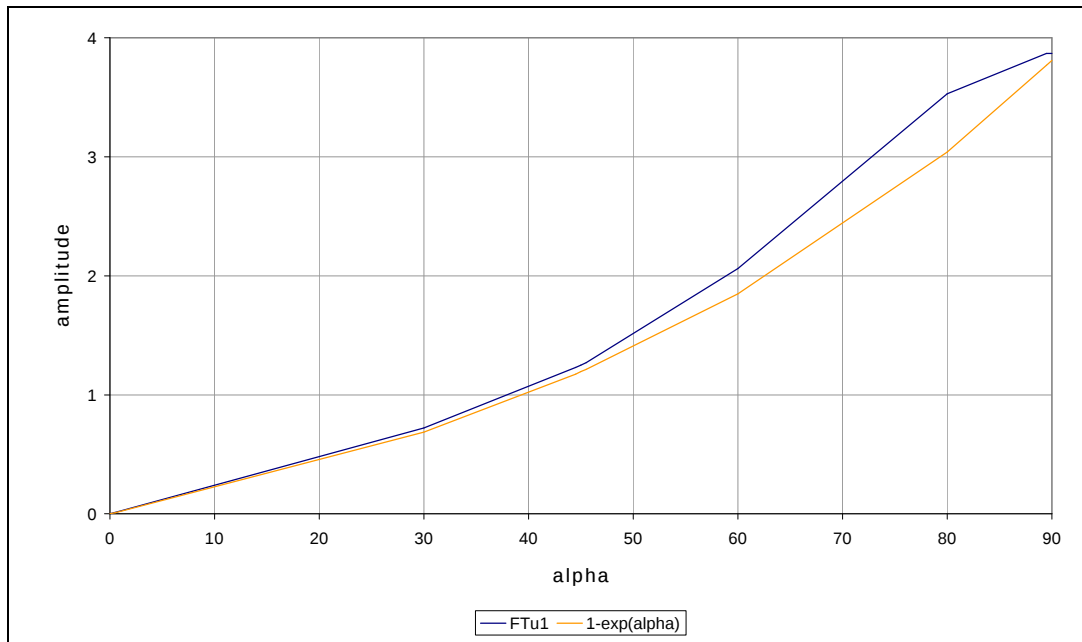


Figura 4.18 - Amplitudes da $FT\ddot{u}(1a6)$ para $f = 0,05$ Hz, onda P, $mc(z)$, e relação trigonométrica de aproximação.

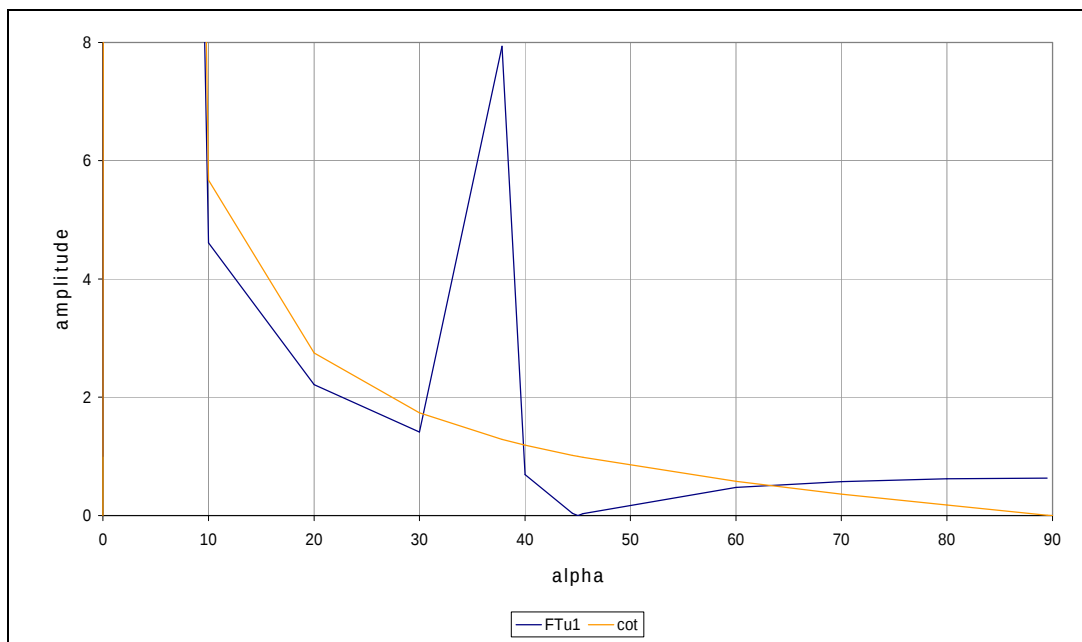


Figura 4.19 - Amplitudes da $FT\ddot{u}(1a6)$ para $f = 0,05$ Hz, onda SV, $mc(z)$, e relação trigonométrica de aproximação.

Comparando-se os gráficos obtidos, Figuras 4.16 a 4.19, com as análises apresentadas por Chen (1980), Figuras 4.20 a 4.23, percebe-se que esse comportamento é intrínseco da resolução da equação de movimento de ondas de corpo. Estas figuras apresentam as amplitudes dos deslocamentos horizontal e vertical para ondas P e SV incidentes com análise da variação do coeficiente de

Poisson. Também pode se perceber a importância do ângulo crítico, nesse caso igual a $37,8^\circ$, para onda SV incidente e o grande efeito do ângulo de incidência no caso da onda P incidente para materiais com baixo coeficiente de Poisson

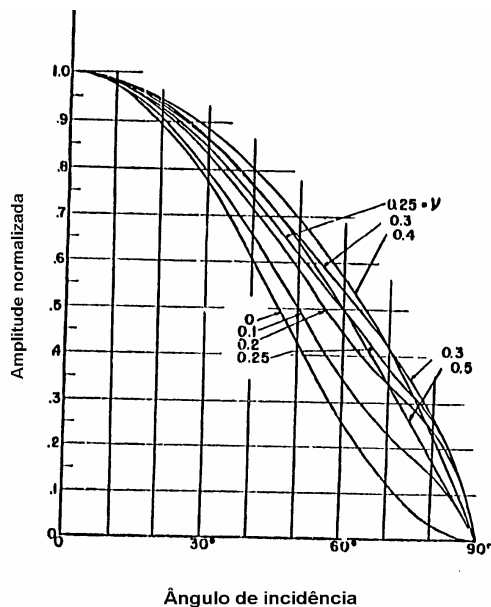


Figura 4.20 – Componente vertical do movimento para onda P incidente. Fonte: Chen, 1980.

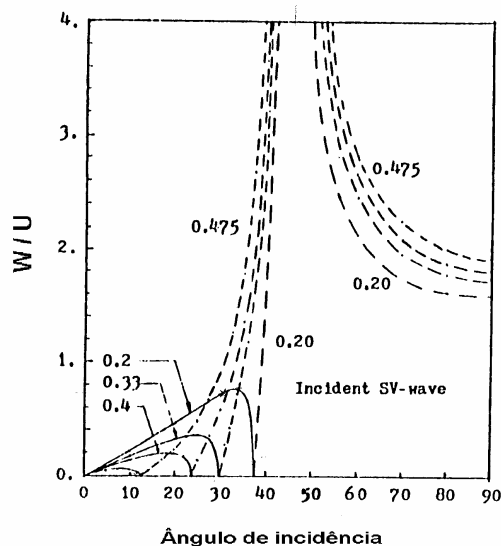


Figura 4.21 – Relação entre deslocamentos, da superfície vertical, (W) e horizontal (U), para onda SV incidente. Fonte: Chen, 1980.

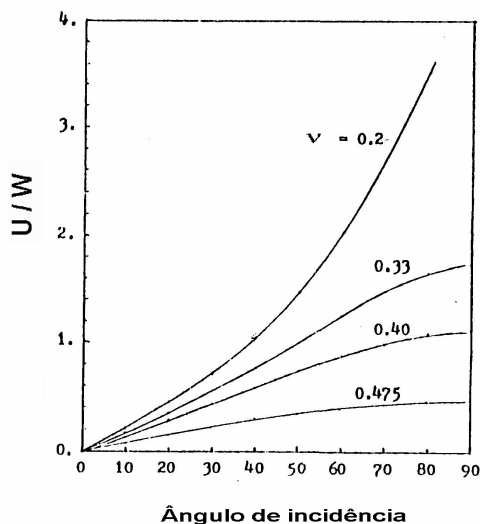


Figura 4.22 - Relação entre os deslocamentos horizontal (U) e vertical (W), da superfície, para onda P incidente. Fonte: Chen, 1980.

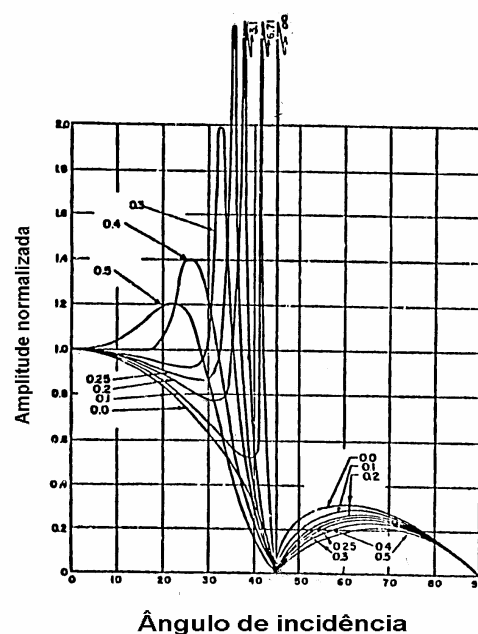


Figura 4.23 - Componente horizontal do movimentos superficial para onda SV incidente. Fonte: Chen, 1980.

A observação interessada das Figuras 4.20 a 4.23 permite reunir elementos para uma recomendação sobre ângulos de incidência das ondas. Constatase que as relações W/U , para ondas SV, e U/W , para as ondas P, atingem valores muito elevados para ângulos de incidência superiores a 30° . Em particular, para as ondas SV o limite é o valor da ângulo crítico, variável com v , como mostra a Figura 4.21.

Em sua tese Chen também conclui sobre o efeito do amortecimento afirmando que as amplificações horizontais são influenciadas pelo amortecimento relativo a onda S enquanto que as verticais pelo amortecimento relativo à onda P.

Analisa-se agora a influência da espessura e da estratificação do terreno na resposta. A Figura 4.24 apresenta a função de transferência para o nó 1, direção x, movimento de controle também em x. Considera-se terreno de solo com uma camada de dois metros (1_2), uma camada de oito metros (1_8) e quatro camadas de dois metros (4_2). Na seqüência, apresentam-se, na Tabela 4.5, as freqüências de pico e suas respectivas amplitudes, para os três casos de terreno mencionados acima. Também é apresentada a função de transferência na direção z, Figura 4.25. Considera-se onda SV a 30° .

Observa-se que, na direção x, as freqüências naturais pouco ou nada são alteradas com a variação da espessura e número de camadas, isso porque, o sistema passa a vibrar com as freqüências da estrutura, principalmente – isto é, para valores de η próximos aos das freqüências naturais da estrutura, o sistema global funciona como se o terreno estivesse parado e a estrutura vibrasse sobre ele, com excitação aplicada entre os dois. Todavia, são alteradas as amplitudes do movimento do terreno com uma camada de oito metros de solo que, com exceção da primeira, aumentam sensivelmente. Já as amplitudes dos casos (1_2) e (4_2) ficam praticamente as mesmas, ou seja, a espessura da primeira camada comanda a resposta. Todos os casos partem do valor um, que é o valor imposto ao sistema na direção do movimento de controle.

Na direção z, Figura 4.25, observa-se uma flexibilização do terreno com o aumento da espessura da camada, indicada pela redução da freqüência natural do solo, de $\approx 37\text{Hz}$ para $\approx 8\text{Hz}$. Também se nota o surgimento de outras freqüências naturais no caso da estratificação do terreno, (4_2). O valor da freqüência fundamental do terreno estratificado coincide com o da freqüência natural do

terreno com uma camada de mesma espessura total do terreno, ou seja, a primeira frequência do caso (4_2) coincide com a do caso (1_8). Novamente, todas as curvas partem do mesmo valor de amplitude correspondente ao da relação trigonométrica para a onda SV a 30° e movimento de controle na direção x.

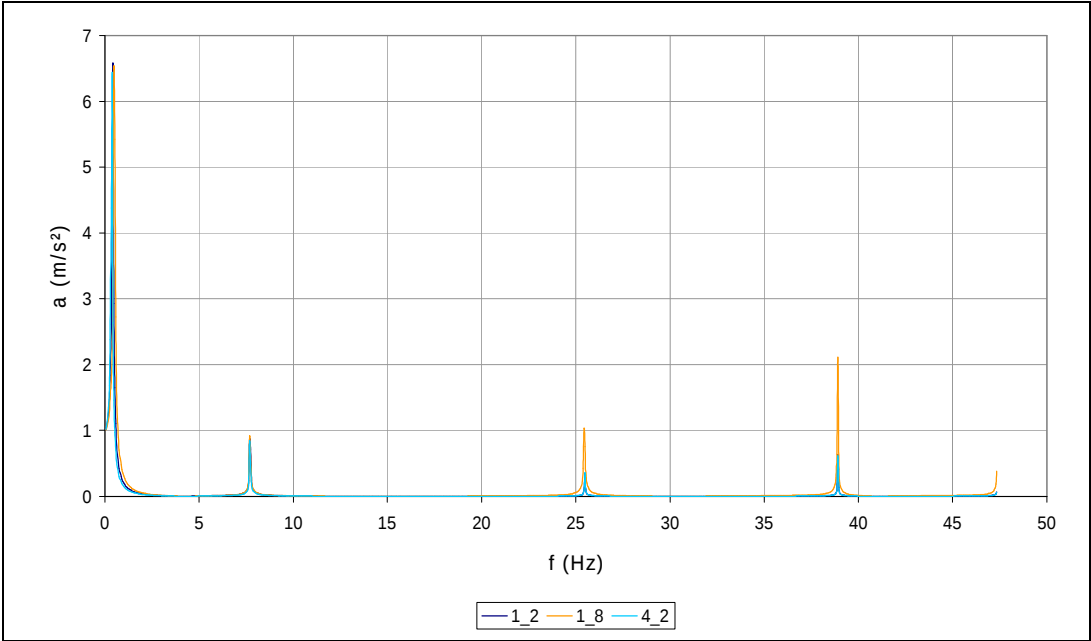


Figura 4.24 - $FT\ddot{u}1$ para variação da espessura e do número de camadas de solo do terreno, SV a 30° e mc(x).

Tabela 4.5 – Frequências e acelerações de pico das $FT\ddot{u}1$ para os três casos de terreno estudados, onda SV a 30° e mc(x).

$n_c = 1$ e $h = 2$ - (1_2)					
f (Hz)	0,43	7,68	25,49	38,90	47,35
a (m/s²)	6,54	0,86	0,35	0,63	0,07
$n_c = 1$ e $h = 8$ - (1_8)					
f (Hz)	0,48	7,68	25,44	38,90	47,35
a (m/s²)	6,49	0,92	1,03	2,12	0,38
$n_c = 4$ e $h = 2$ - (4_2)					
f (Hz)	0,38	7,68	25,49	38,90	47,35
a (m/s²)	6,41	0,84	0,36	0,62	0,06

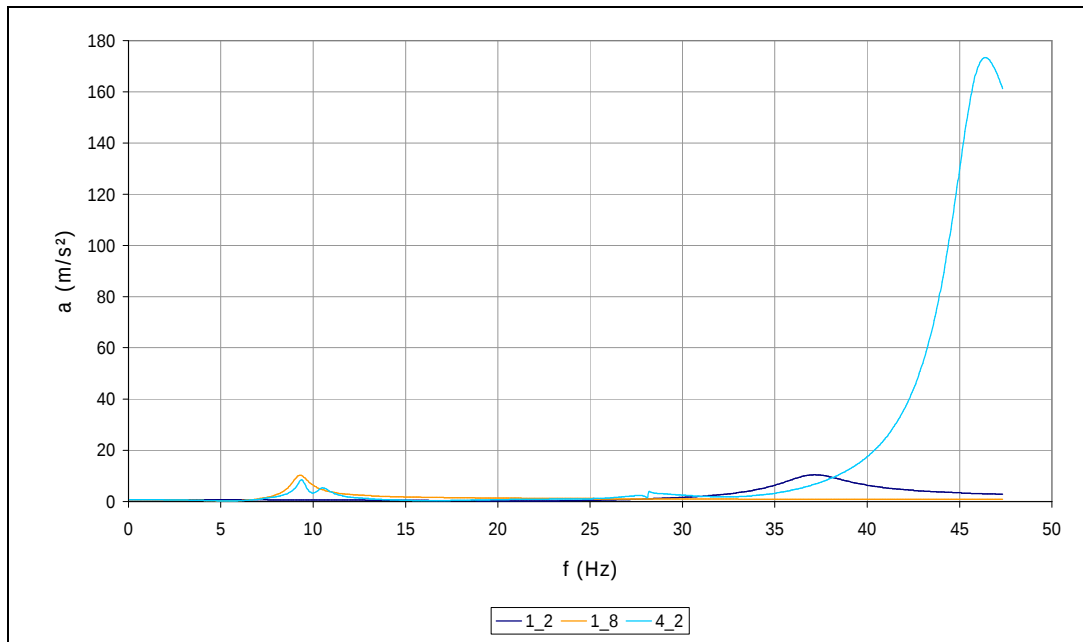


Figura 4.25 - $FT\ddot{w}(1a6)$ para variação da espessura e número de camadas de solo do terreno, onda SV a 30° e mc(x).

Para se estender a compreensão do comportamento do campo-livre na direção x com a variação das camadas de solo, estuda-se novamente o modelo, agora sem massa, com onda P a 30° e movimento de controle na direção z. A Figura 4.26 apresenta as funções de transferência obtidas.

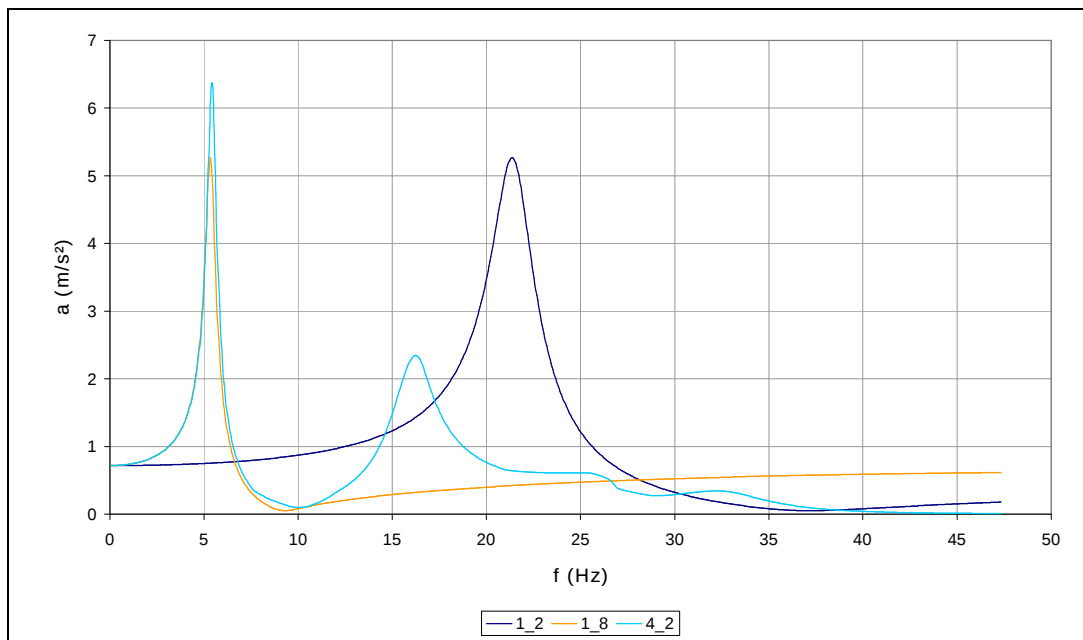


Figura 4.26 - $FT\ddot{u}(1a6)$ para variação da espessura e número de camadas de solo do terreno, onda P a 30°, mc(z) e estrutura sem massa.

O comportamento observado é semelhante ao da função de transferência na direção z , porém com frequências e amplitudes diferentes, correspondentes às da direção em questão. Percebe-se que próximo à frequência natural de 25,49Hz o campo-livre, para terreno com uma ou com quatro camadas de dois metros, apresenta picos nessa região, o que não ocorre no caso de uma camada de oito. Após 30Hz, esses dois casos coincidem, o que, de certa forma, justifica a semelhança das amplitudes das funções de transferência para o sistema com massa, Tabela 4.5.

Uma forma simplificada de representação do campo-livre pode ser a adoção de um sistema como o da Figura 4.27, ou seja, um edifício de múltiplos andares carregado lateralmente, sendo o número de andares correspondentes ao número de camadas do terreno. Essa estrutura trabalha exclusivamente ao cortante e a resolução da mesma recai sobre uma equação de segunda ordem da forma:

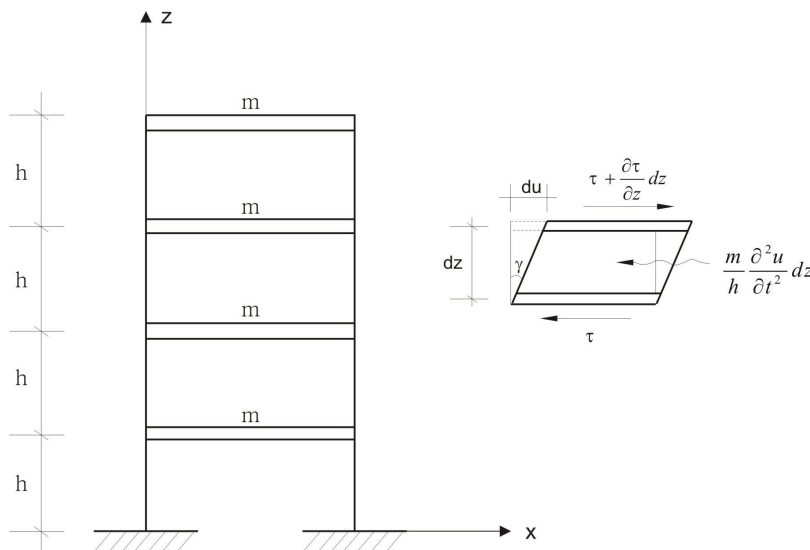


Figura 4.27 - Modelo simplificado para representação do terreno: estrutura trabalhando ao cortante.

$$\frac{k_m h}{m} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (4.1)$$

Onde: k_m - coeficiente de rigidez por metro, ou seja, força para deslocar um metro por metro.

h - altura do andar, ou seja, espessura da camada do terreno.

m - massa por andar.

u - deslocamento.

Que fornece as seguintes frequências naturais como solução da equação:

$$w_{0_n} = \left(n - \frac{1}{2} \right) \pi \sqrt{\frac{k_m h}{m H^2}} \quad (4.2)$$

Onde: H - altura total do edifício, ou seja, espessura do terreno.

Admite-se também, para representação do campo-livre, a seguinte geometria: profundidade (b) unitária e largura (l) igual a oito vezes a altura total. A massa por andar adotada é igual a metade da massa do terreno contida no andar, ou seja:

$$m = \frac{Ms}{2} = \frac{g_s b l h}{2} (t) \quad (4.3)$$

Onde: Ms - massa de terreno do andar.

g_s - massa específica do material do terreno.

Tem-se que na horizontal o terreno trabalha ao cisalhamento, assim a rigidez horizontal, considerando deslocamento unitário, é:

$$k_h = \frac{l b G}{h} \left(\frac{kN}{m} \right) \quad (4.4)$$

Onde: G – módulo de elasticidade transversal do material do terreno.

Já na vertical, o terreno trabalha axialmente, portanto a rigidez é dada por:

$$k_v = \frac{E_c b l}{h} \left(\frac{kN}{m} \right) \quad (4.5)$$

Onde: $E_c = (1 + 2G)$ - módulo de elasticidade longitudinal confinado do solo.

Analisa-se primeiramente um terreno com uma camada de dois metros de solo. Na direção x trabalha-se com a rigidez horizontal, que para o solo em questão é igual a:

$$k_h = \frac{5,5 \cdot 10^4 \cdot 1 \cdot 8 \cdot h}{h} = 4,4 \cdot 10^5 \frac{kN}{m}$$

A massa por andar fica:

$$m = \frac{1,85 \cdot 1 \cdot 8 \cdot 2 \cdot 2}{2} = 29,6t$$

E pela Equação (5.2), a frequência fundamental é:

$$w_{0_1} = \frac{p}{2} \sqrt{\frac{4,4 \cdot 10^5 \cdot 2}{29,6 \cdot 2^2}} = 135 \frac{rad}{s} \rightarrow f_{0_1} = 21,6Hz$$

Que é a frequência de pico indicada na função de transferência para a direção do caso (1_2), Figura 4.26.

Agora se considera o terreno estratificado em quatro camadas de dois metros de solo. A rigidez horizontal e a massa por andar são:

$$k_h = \frac{5,5 \cdot 10^4 \cdot 1 \cdot 8 \cdot 4 \cdot h}{h} = 17,6 \cdot 10^5 \frac{kN}{m} \text{ e } m = \frac{1,85 \cdot 1 \cdot 8 \cdot 8 \cdot 2}{2} = 118,4t$$

Novamente pela Equação (5.2), com as devidas transformações, têm-se as seguintes frequências naturais:

$$f_{0_1} = 5,4Hz, f_{0_2} = 16,2Hz, f_{0_3} = 26,9Hz \text{ e } f_{0_4} = 37,7Hz$$

Observando-se a Figura 4.26 para o caso (4_2) notam-se picos nas frequências próximas às encontradas para o modelo de simulação adotado.

Ao se considerar o terreno na direção z , deve-se trabalhar com a rigidez vertical, Equação (5.5).

Finalmente, discute-se a influência da variação da distância x do ponto de controle ao nó de interação, onde estão sendo solicitadas as respostas. Na Figura 4.28 apresentam-se as funções de transferência na direção x , com variação de x_{PC} nos dois sentidos. As funções de transferência na direção z são apresentadas na Figura 4.29, para x_{PC} negativo, e na Figura 4.30, para x_{PC} positivo. Consideram-se, para ambas direções, ondas SV incidindo a 30° ou a 10° , uma camada de dois metros de rocha e movimento de controle na direção x .

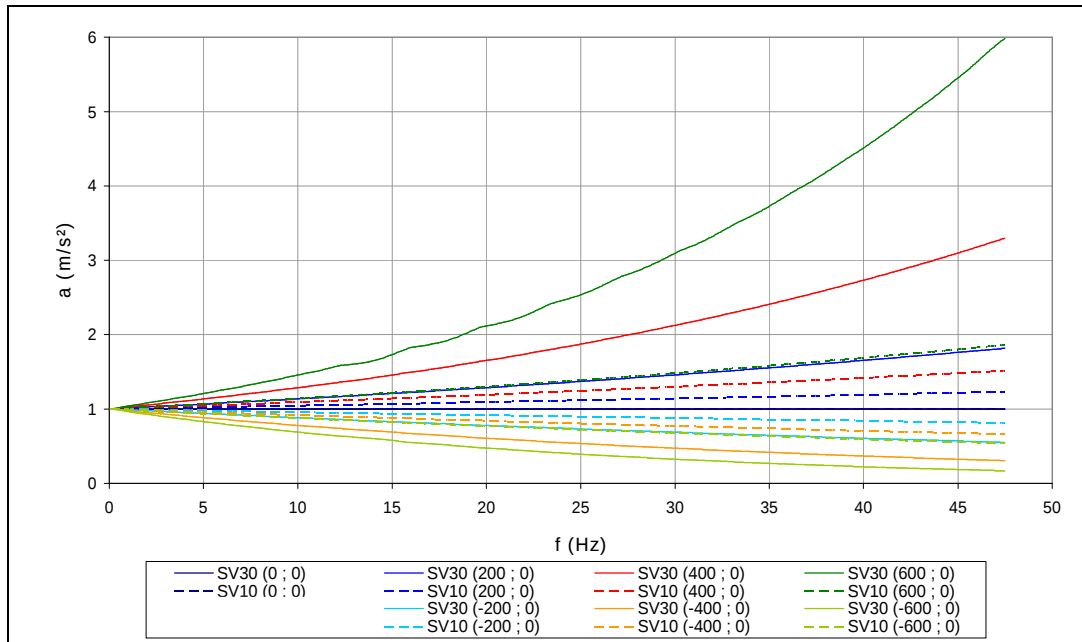


Figura 4.28 – $FT\ddot{u}(1a6)$ ondas SV a 10° ou 30° , $n_c = 1$, $h = 2\text{m}$, rocha, $mc(x)$ e estrutura sem massa, para valores positivos e negativos de x_{PC} .

Nota-se que, para a direção x , direção do movimento de controle, todas as curvas partem do mesmo valor, unitário, e que para a distância x igual a zero as curvas são as mesmas tanto para 10° quanto para 30° . Já quando há alteração da distância as curvas variam exponencialmente com taxa positiva, para $x_{PC} > 0$, e negativa, no caso contrário. Esse comportamento é devido ao fator $\exp(-ikx)$, da Equação (3.6), que propaga os deslocamentos da vertical do ponto de controle aos nós de interação e que, além de variar com a distância x , também varia com k , número da onda propagando-se horizontalmente. Esse número depende do ângulo

de incidência e da natureza da onda considerada, pois $k = k_p \text{sen}(a) = k_s \text{sen}(b)$, onde k_p e k_s são números das ondas incidentes P e SV, respectivamente, e, a e b são os ângulos de incidência das mesmas.

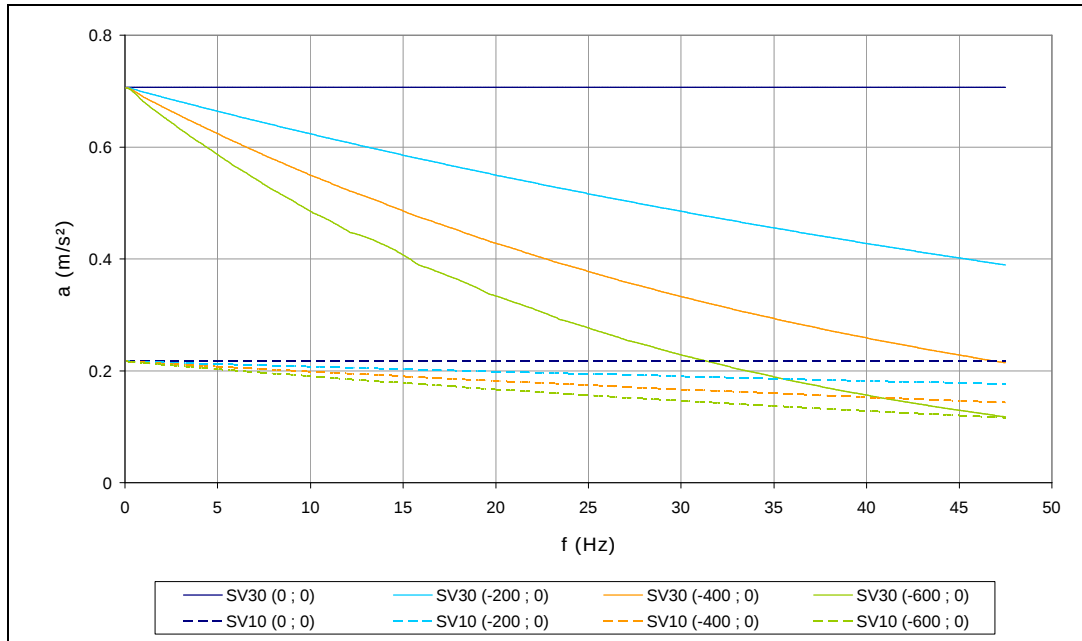


Figura 4.29 – $FT\ddot{w}(1a6)$ ondas SV a 10° ou 30° , $n_c = 1$, $h = 2\text{m}$, rocha, $mc(x)$ e estrutura sem massa, para valores de negativos de x_{PC} .

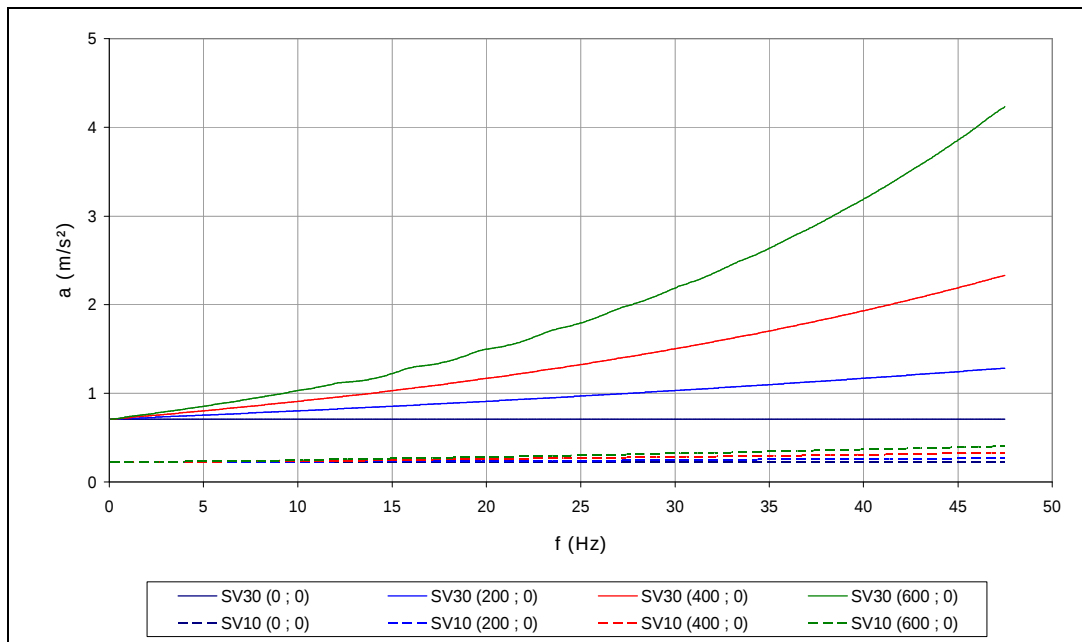


Figura 4.30 – $FT\ddot{w}(1a6)$ ondas SV a 10° ou 30° , $n_c = 1$, $h = 2\text{m}$, rocha, $mc(x)$ e estrutura sem massa, para valores de positivos de x_{PC} .

Na direção perpendicular ao movimento de controle, direção z , cada grupo de curvas parte do valor da componente correspondente ao ângulo da onda incidente. A variação das curvas com a mudança da distância x apresenta o mesmo comportamento anterior, crescendo para valores positivos e atenuando para valores negativos de x , sendo a variação relativa acentuada com o aumento do ângulo de incidência.

Apresentam-se agora os resultados para os mesmos parâmetros anteriores, porém com a consideração do terreno com uma camada de solo, ao invés de rocha. A Figura 4.31 apresenta a função de transferência para a direção x com valores positivos e negativos de x_{PC} . E as Figuras 4.32 e 4.33 as funções de transferência para a direção z , para valores negativos e positivos de x_{PC} , respectivamente.

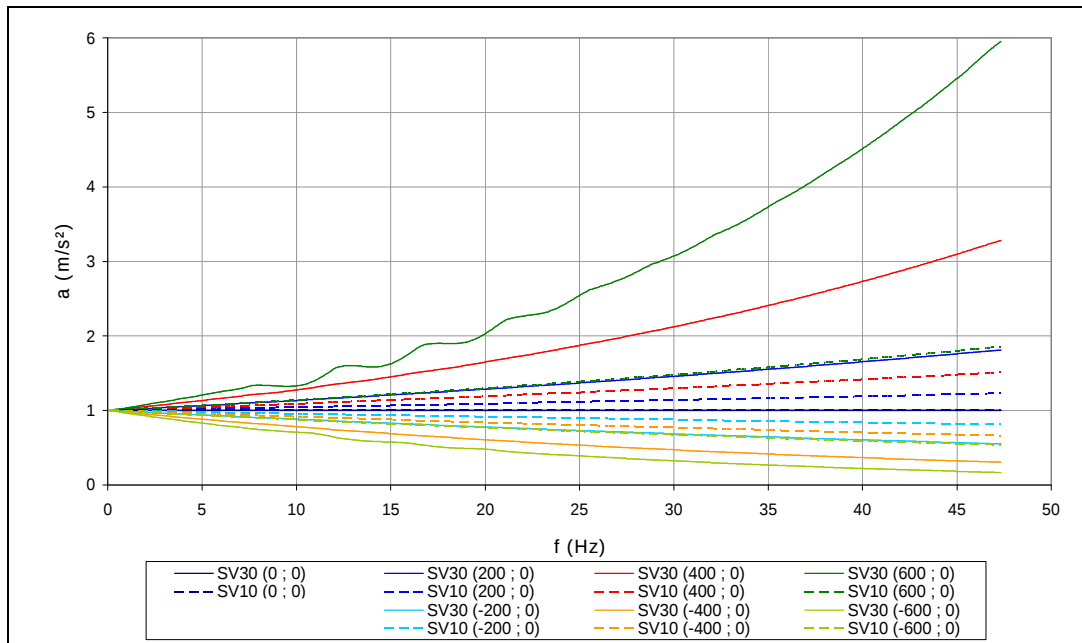


Figura 4.31 – $FT\ddot{u}(1a6)$ ondas SV a 10° ou 30°, $n_c = 1$, $h = 2$ m, solo, $mc(x)$ e estrutura sem massa, para valores positivos e negativos de x_{PC} .

Observa-se o mesmo comportamento geral identificado para o caso de terreno em rocha. Entretanto, na direção z , as curvas apresentam um pico próximo a 37 Hz, frequência natural do solo na vertical, como já visto.

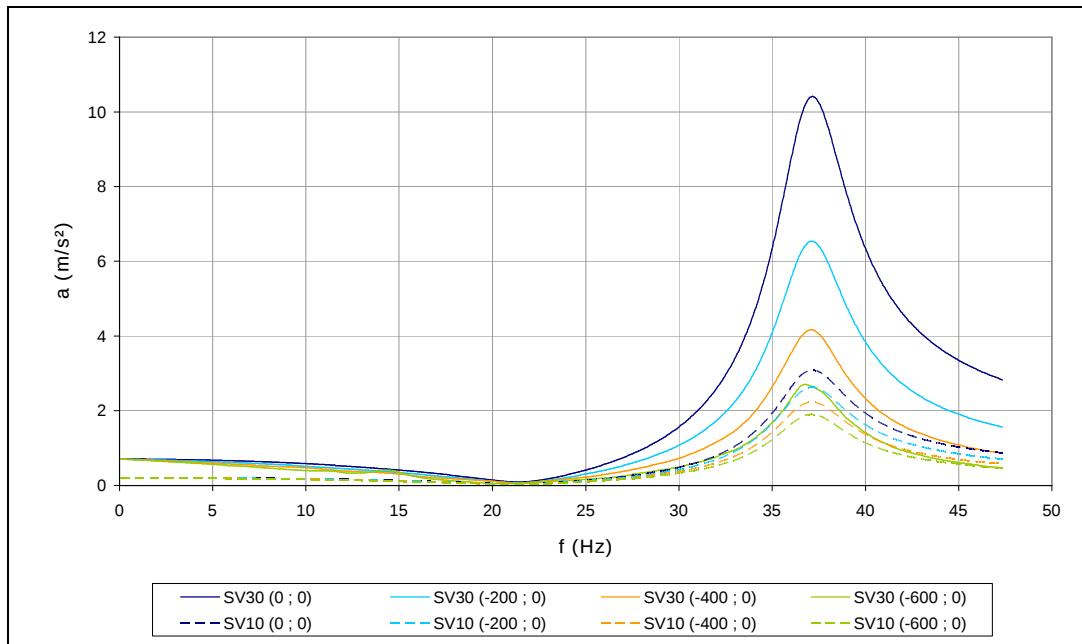


Figura 4.32 – $FT\ddot{w}(1a6)$ ondas SV a 10° ou 30° , $n_c = 1$, $h = 2m$, solo, $mc(x)$ e estrutura sem massa, para valores negativos de x_{PC} .

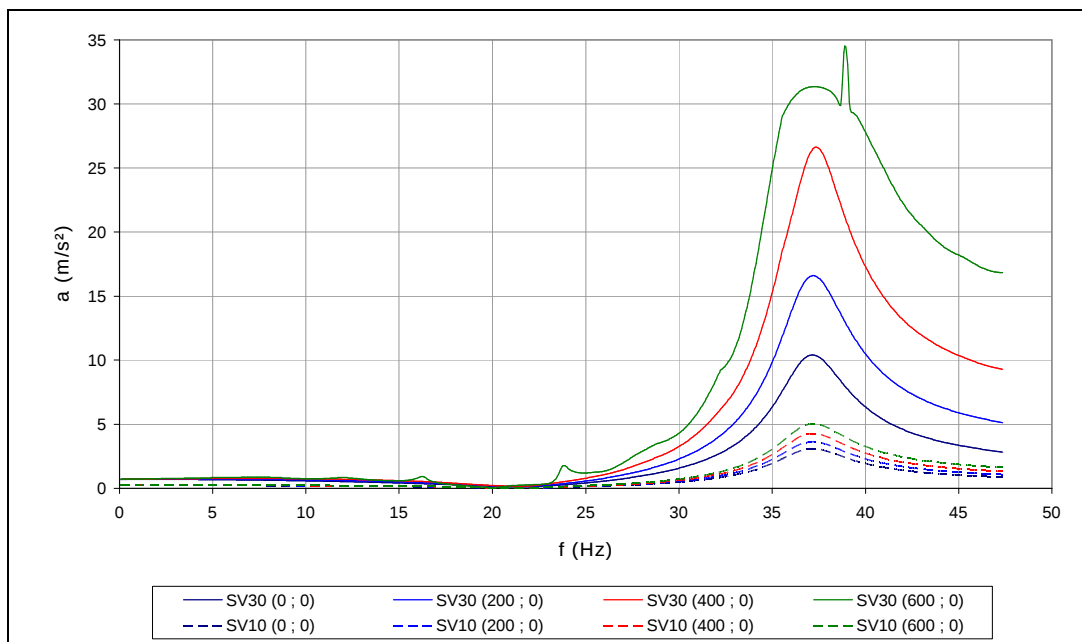


Figura 4.33 – $FT\ddot{w}(1a6)$ ondas SV a 10° ou 30° , $n_c = 1$, $h = 2m$, solo, $mc(x)$ e estrutura sem massa, para valores positivos de x_{PC} .

Considera-se, a seguir, o comportamento das funções de transferência com o aumento da espessura da camada, de dois para oito metros. A Figura 4.34 apresenta a função de transferência para a direção z , terreno em solo, para onda SV incidente a 10° , para valores negativos de x_{PC} , e a Figura 4.35 para valores positivos desse.

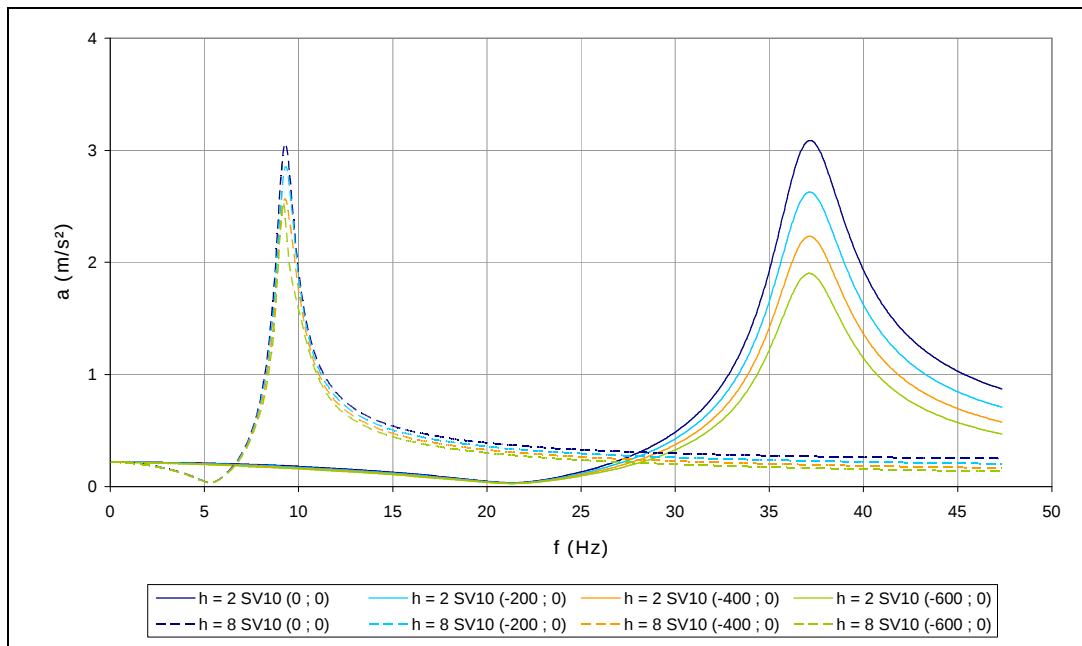


Figura 4.34 – $FT\ddot{w}(1a6)$ ondas SV a 10° , $n_c = 1$, $h = 2$ ou 8 m, solo, $mc(x)$ e estrutura sem massa, para valores negativos de x_{PC} .

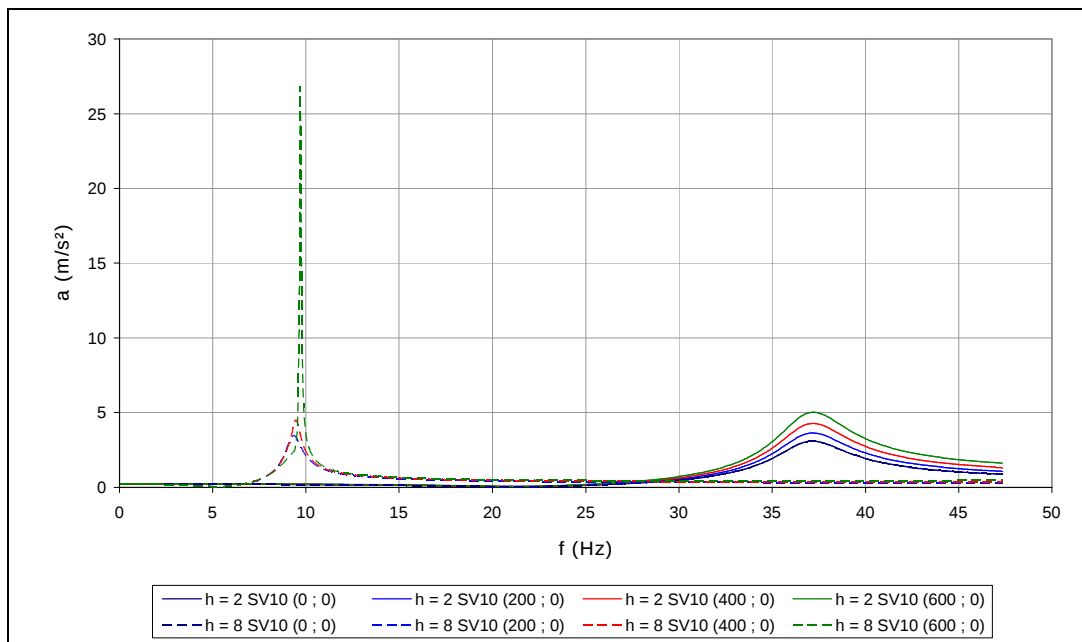


Figura 4.35 – $FT\ddot{w}(1a6)$ ondas SV a 10° , $n_c = 1$, $h = 2$ ou 8 m, solo, $mc(x)$ e estrutura sem massa, para valores positivos de x_{PC} .

As funções de transferência para a direção x e para o caso de terreno em rocha, para ambas as direções, não são apresentadas, pois são praticamente as mesmas da camada de 2 metros, ou seja, Figuras 4.31, 4.28, 4.29 e 4.30.

Observa-se a redução do valor da frequência de pico com o aumento da espessura da camada, ou seja, a flexibilização do terreno. O comportamento com a variação da distância é similar ao já visto, sendo que no caso de valores positivos de x_{PC} a amplificação para a camada de oito metros é cerca de cinco vezes a da camada de dois metros, para a distância de 600 metros. E as atenuações, caso de valores negativos de x_{PC} , são menores para a espessura da camada de oito metros.

Situações semelhantes são analisadas para o movimento de controle segundo a direção z . As observações colhidas são equivalentes às identificadas para esse movimento segundo x , com nuances particulares às inversões de direções.

Combinações de ondas P e SV não fornecem resultados em combinação alguma de ângulos. Os fornecedores do programa, em comunicação direta, já haviam prevenido que não devem ser especificados mais de um tipo de onda em uma execução. Como o SASSI é linear, deve-se fazer a análise para cada onda separadamente e depois combinar as soluções com a porcentagem desejada.

A análise da estrutura com ondas SH só fornece respostas na direção y e, como o movimento de controle também é nessa direção, a função de transferência para qualquer ângulo de incidência é unitária e constante. A utilização dessas ondas é interessante em problemas axissimétricos, uma vez que se obtém as respostas fora do plano.

4.4.2. Ondas superficiais (R)

As Figuras 4.36 e 4.37 apresentam as funções de transferência na direção x e z , respectivamente, para uma camada de rocha de 2m, movimento de controle na direção x . Consideram-se ondas SV incidindo a 30° , 20° ou 10° combinadas com 5% ou 20% de ondas R até 4Hz.

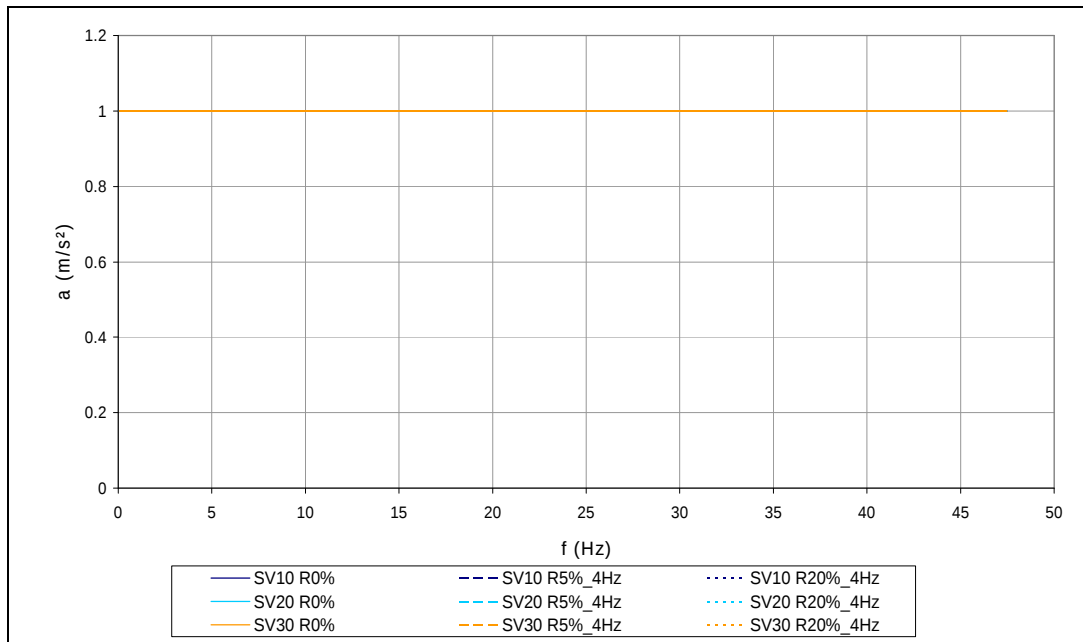


Figura 4.36 - $FT\ddot{u}$ ondas SV+R com variação do ângulo de incidência e do fator de participação, $n_c = 1$, $h = 2\text{m}$, rocha, $mc(x)$, estrutura sem massa.

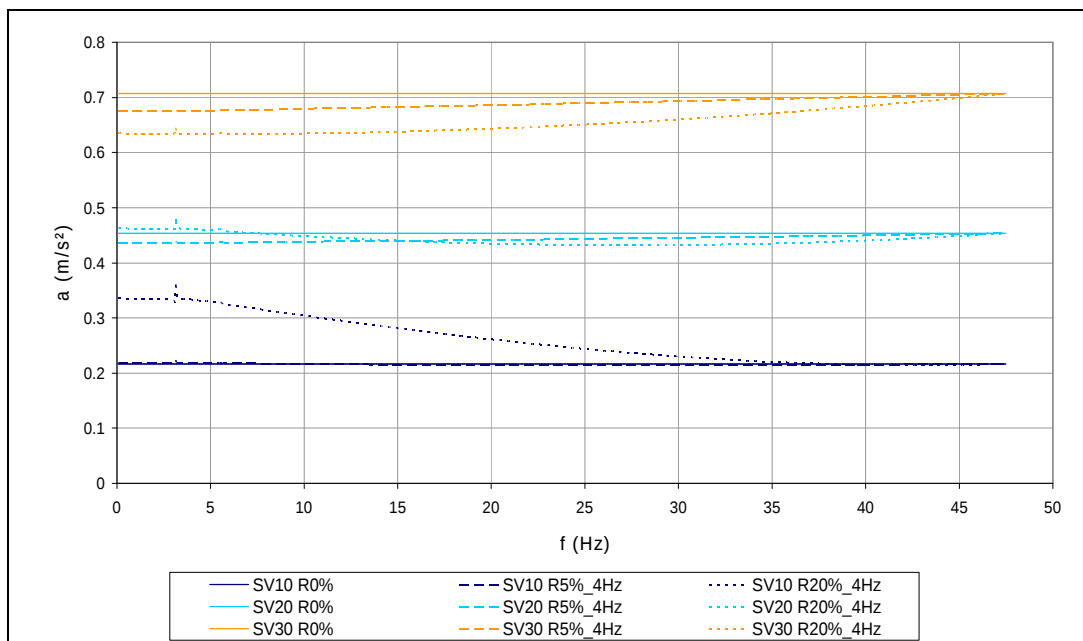


Figura 4.37 - $FT\ddot{w}$ ondas SV+R com variação do ângulo de incidência e do fator de participação, $n_c = 1$, $h = 2\text{m}$, rocha, $mc(x)$, estrutura sem massa.

Constata-se que na direção x , as funções não se alteram nem com o ângulo de incidência da onda SV nem com a porcentagem de onda R, sendo inclusive constantes e unitárias, como observado quando da utilização somente de ondas SV.

Já na direção z , há influência tanto do ângulo de incidência da onda de corpo quanto da participação relativa da onda superficial. A influência da participação de 5% de onda R é crescente com o aumento do ângulo de incidência, reduzindo a resposta final. Com 20% de participação, esse efeito não mantém um padrão definido.

Considera-se agora o caso de uma camada de solo sobre o semi-espaco. A função de transferência na direção x é a mesma da Figura 4.36. Já as funções de transferência na direção z são apresentadas na Figura 4.38.

Novamente, para a direção do movimento de controle, a função é mantida unitária e constante. Já para a direção perpendicular observa-se que, no caso do terreno em solo, as curvas partem com os mesmos valores quando do terreno em rocha, e a influência da onda R no pico, frequência natural da estrutura na direção z , como já visto, praticamente não é sentida. Naturalmente, isso decorre da redução gradual da participação da onda R, de 4 a 48 Hz, feita pelo programa, conforme os dados de entrada dos exemplos em análise.

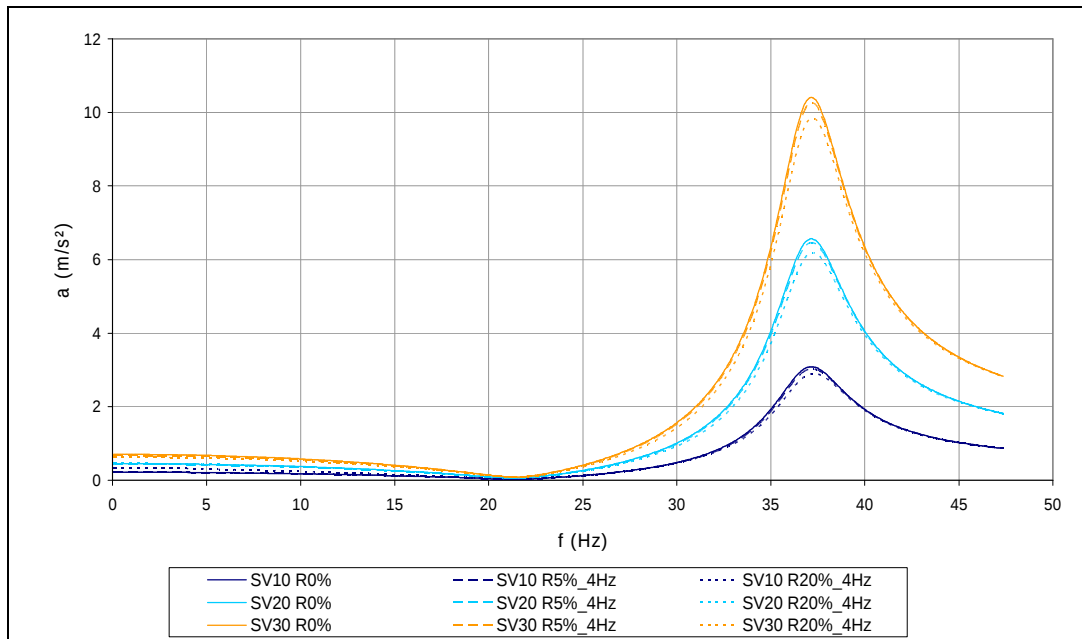


Figura 4.38 - $FT\ddot{W}$ ondas SV+R com variação do ângulo de incidência e fator de participação, $n_c = 1$, $h = 2m$, solo, $mc(x)$, estrutura sem massa.

Apresenta-se a seguir, a influência da onda R com a variação da espessura da camada de rocha, Figura 4.39, e de solo, Figura 4.40, nas funções de transferência para a direção z , considerando-se movimento de controle na direção x . As funções de transferência na direção x são iguais às da Figura 4.36.

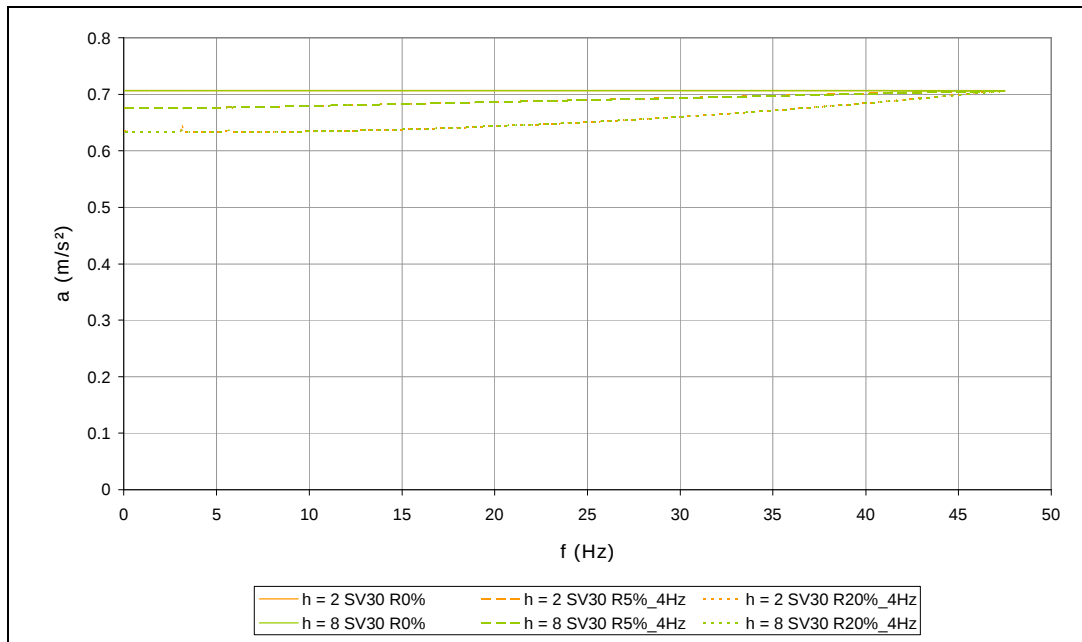


Figura 4.39 – $FT\ddot{w}$ ondas SV30+R com variação do fator de participação, $n_c = 1$, rocha, $mc(x)$, estrutura sem massa, para variação da espessura da camada.

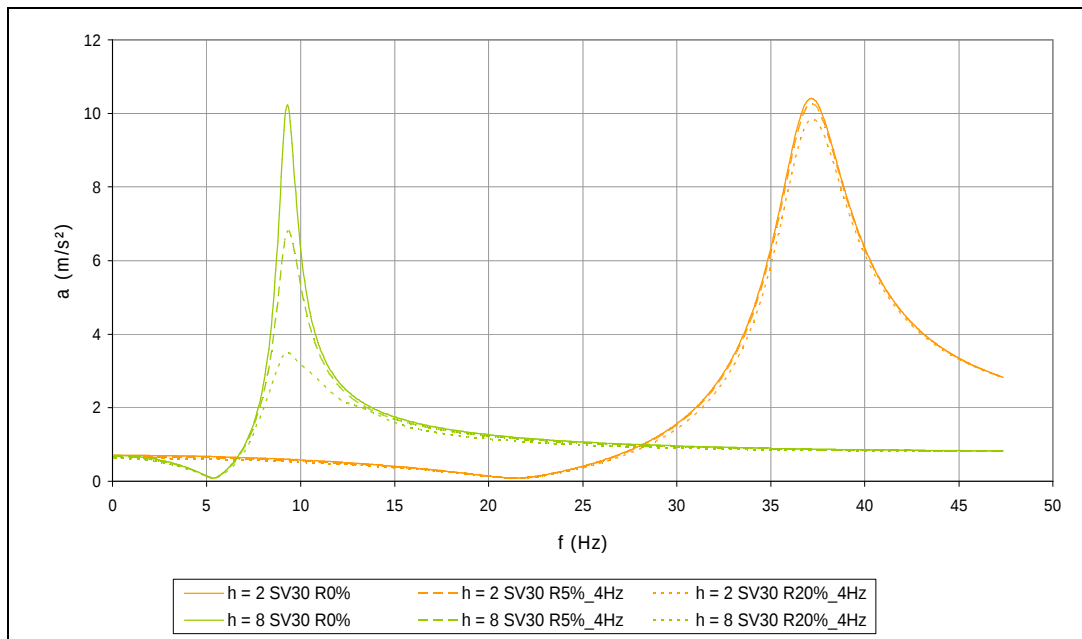


Figura 4.40 - $FT\ddot{w}$ ondas SV30+R com variação do fator de participação, $n_c = 1$, solo, $mc(x)$, estrutura sem massa, para variação da espessura da camada.

Para a direção z, nota-se que no caso de rocha não há alteração nas funções de transferência, quando do aumento da espessura da camada. Já para a camada de solo, além da redução do pico, devida à flexibilização do campo-livre, agora é sentida uma marcante influência da onda R, nessa mesma região, com uma considerável redução de amplitude com o aumento da participação da onda.

Passa-se a analisar a condição de movimento de controle na direção z ; portanto, trabalha-se com onda de corpo P , mantendo-se a incidência a 30° , 20° ou 10° , e onda R com 5% ou 20% de participação até 4 Hz. Volta-se a considerar uma camada de rocha de 2m . A Figura 4.41 apresenta as funções de transferência para a direção x e a Figura 4.42 as mesmas funções para a direção z .

Observa-se que, novamente, para a direção perpendicular ao movimento de controle, direção x neste caso, a influencia da onda R é sentida tanto com a variação do ângulo de incidência da onda de corpo quanto com a porcentagem de participação da onda superficial, sendo essa tão menor quanto o for a incidência. Outra vez, no caso de 20% de participação da onda R não há um padrão a ser destacado.

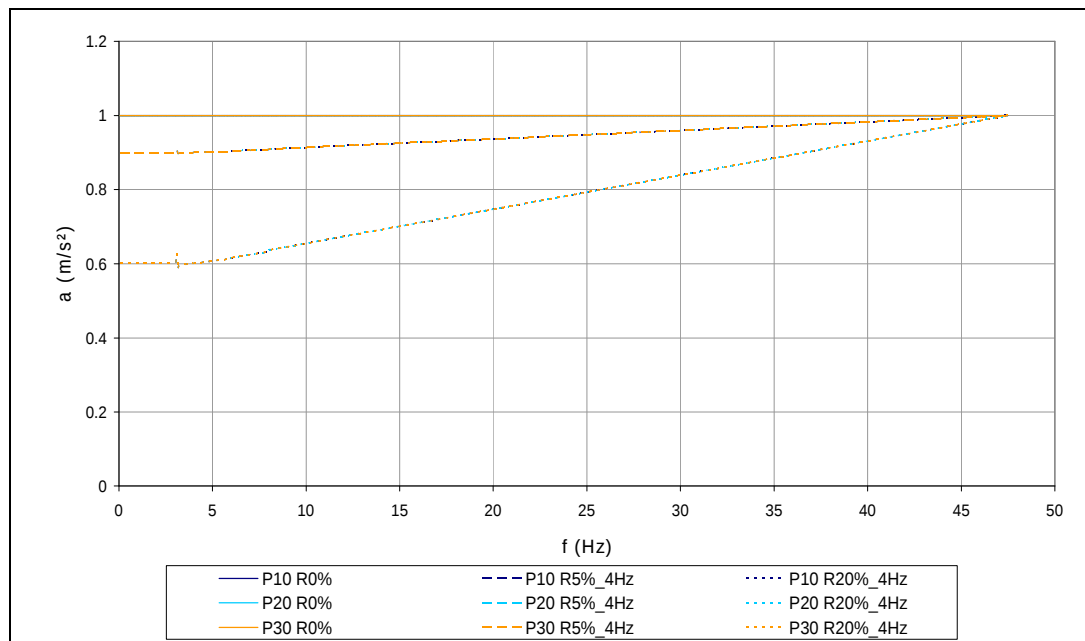
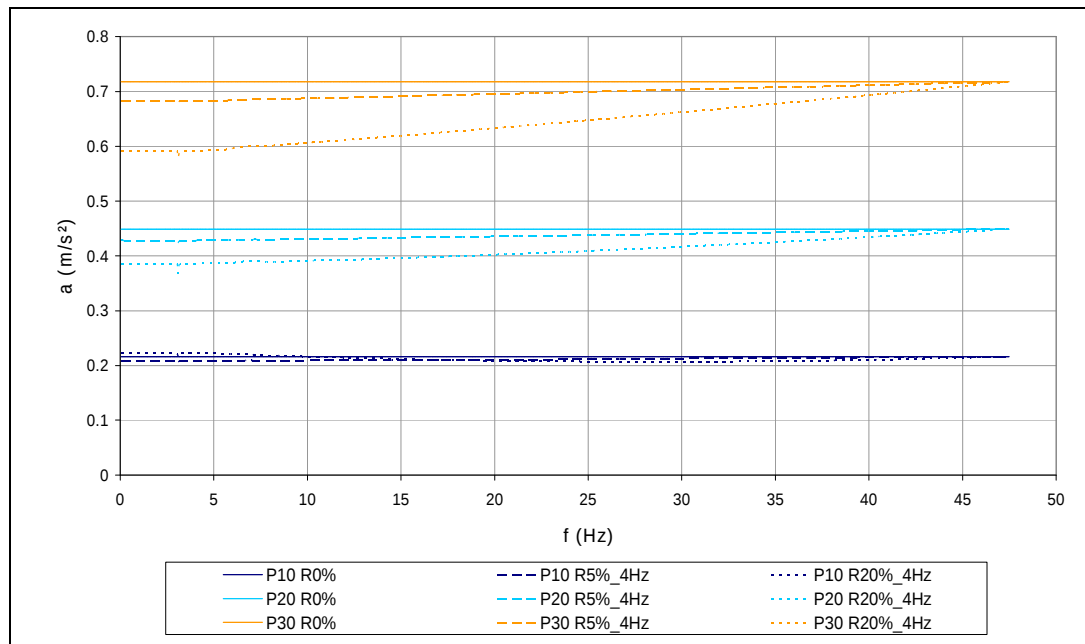
Na direção do movimento de controle, direção z , não há novamente variação com o ângulo de incidência da onda de corpo, porém, agora, há a influência da participação da onda R na resposta, reduzindo as amplitudes em duas vezes o fator de participação da mesma, ou seja:

$$FT\ddot{w}[mc(z)] = 1 - 2h$$

Pode-se entender, então, que o movimento de controle da onda de corpo segundo z é considerado igual a $(1-?)$, e que a onda R está em antifase com a onda de corpo provocando uma segunda redução igual ao valor de $?$ no movimento central.

Apresentam-se agora as funções de transferência quando considerada uma camada de solo, ao invés de rocha. A Figura 4.43 indica as funções de transferência para a direção x e a Figura 4.44 para a direção z .

Para a direção x é observado o mesmo comportamento do caso da camada em rocha, inclusive no pico referente à frequência natural do solo na horizontal. A influência da onda R , reduzindo as respostas, cresce com o ângulo de incidência da onda P e com o fator de participação da onda R , sendo que, para P incidindo a 10° , a influência da onda R praticamente não existe. Na direção z , as funções também são as mesmas do caso de terreno em rocha, exceto para o caso de 20% de participação da onda R que apresenta dois picos, em $\approx 3Hz$ e em $\approx 7Hz$, aparentemente sem lógica.



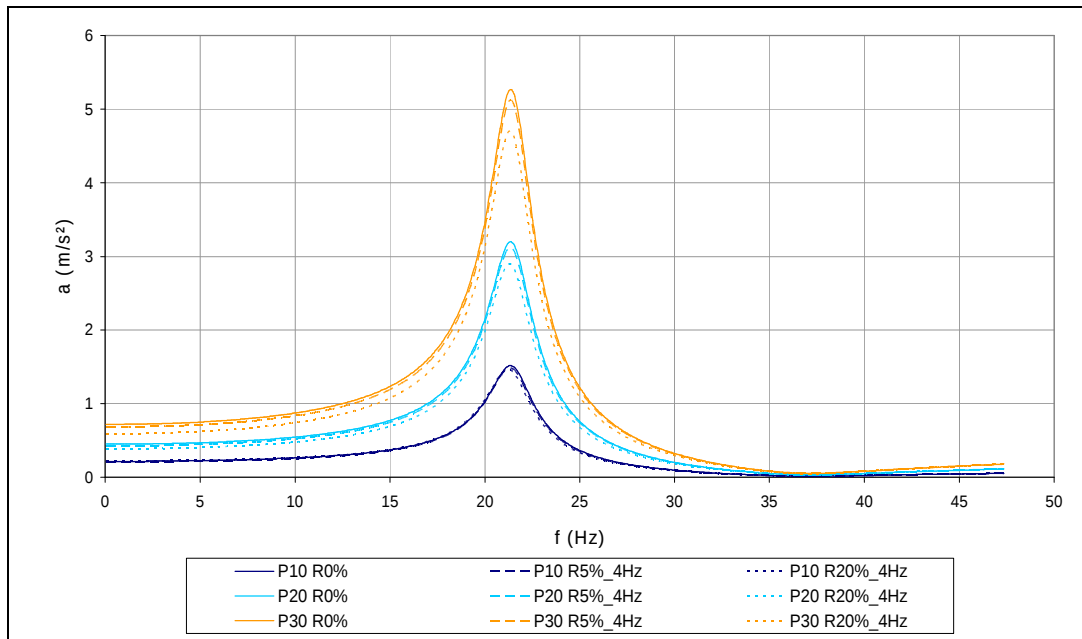


Figura 4.43 - $FT\ddot{u}$ ondas P+R com variação do ângulo de incidência e fator de participação, $n_c = 1$, $h = 2\text{m}$, solo, $mc(z)$, estrutura sem massa.

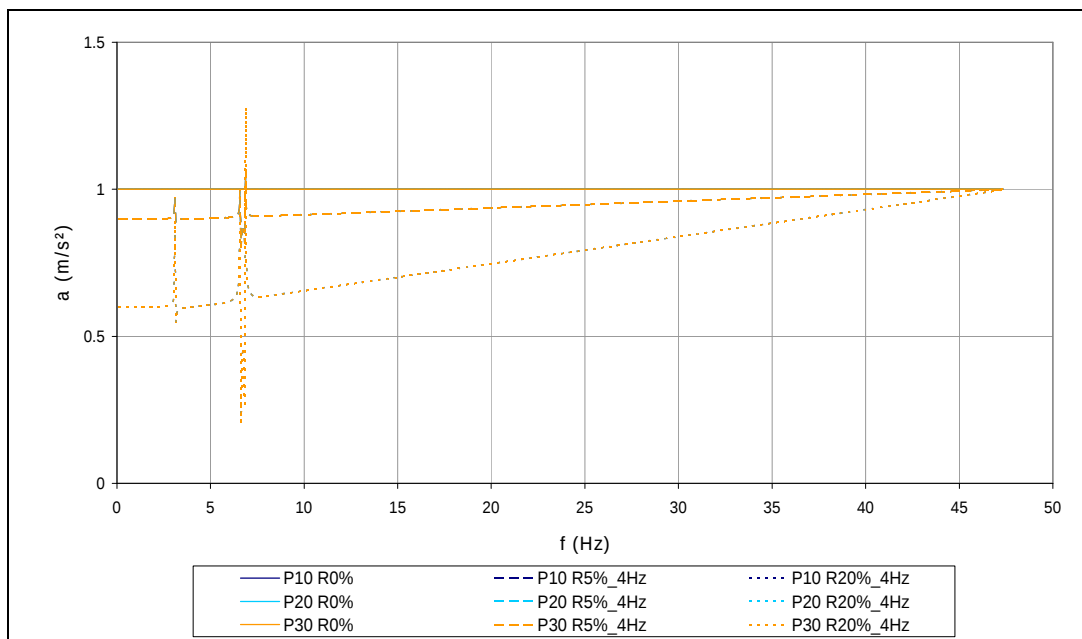


Figura 4.44 - $FT\ddot{w}$ ondas P+R com variação do ângulo de incidência e fator de participação, $n_c = 1$, $h = 2\text{m}$, solo, $mc(z)$, estrutura sem massa.

As funções de transferência segundo x , para a flexibilização do terreno, com aumento da camada de dois para oito metros, são apresentadas na Figura 4.45, terreno em rocha, e na Figura 4.46, terreno em solo, considerando onda P a 30° e fator de participação da onda R de 5% ou 20%.

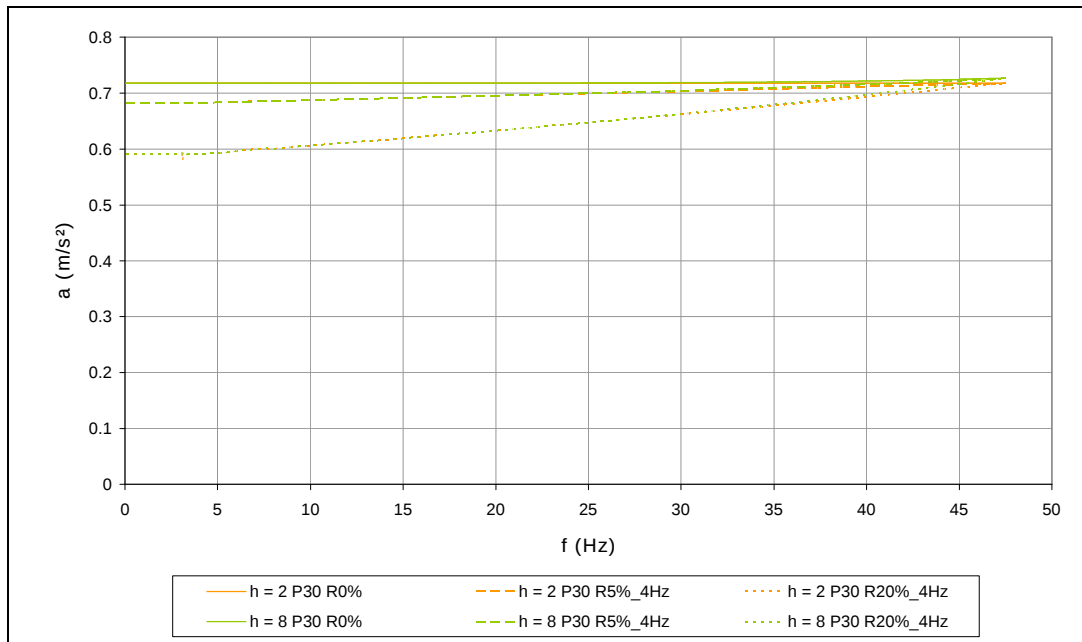


Figura 4.45 – $FT\ddot{u}$ ondas P30+R com variação do fator de participação, $n_c = 1$, rocha, $mc(z)$ estrutura sem massa, para variação da espessura da camada.

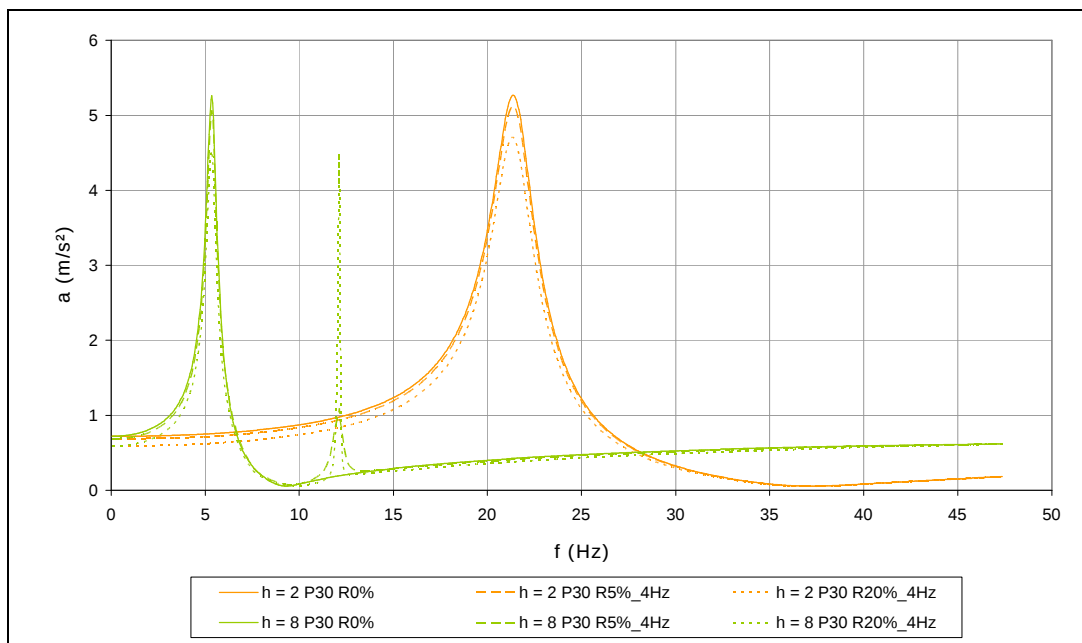


Figura 4.46 - $FT\ddot{u}$ ondas P30+R com variação do fator de participação, $n_c = 1$, solo, $mc(z)$, estrutura sem massa, para variação da espessura da camada.

Nota-se, outra vez, que para o terreno em rocha não há alteração com o aumento da camada. Já para o caso do terreno em solo, há a natural redução do valor da frequência do pico referente à frequência natural do terreno na direção x , $\approx 5,4$ Hz, o qual reduz de amplitude com o acréscimo da participação da onda R. Surge também outro pico, ≈ 12 Hz, sem lógica que, ao contrário, é amplificado com o aumento da participação da onda R.

4.5. Conclusões

O comportamento geral das respostas no 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, e pela direção do movimento de controle adotada. As amplitudes das funções de transferência, no ponto de controle, são mantidas unitárias na direção desse movimento, exceto para movimento de controle segundo z e participação simultânea de onda de Rayleigh (R), quando a amplitude unitária é reduzida em duas vezes o fator de participação da onda R. Na direção perpendicular ao movimento de controle, as amplitudes estão condicionadas à composição de ondas podendo, em alguns casos, superar longamente a unidade.

Ondas SV incidentes geram faixas de utilização restritas, a saber:

- as componentes verticais, segundo z , da resposta tendem a zero para o ângulo de incidência crítico, Equação (2.23), e a partir desse valor a solução assume níveis extremamente altos, no caso movimento de controle segundo x .
- as componentes horizontais da resposta tendem ao infinito próximo a 0° , apresentam valores elevados para o ângulo crítico e nulos para 45° , no caso de movimento de controle segundo z .

Ondas P incidentes não apresentam discontinuidades com a variação do ângulo de incidência, ou seja, são mais bem comportadas. Porém, as amplitudes verticais na região próxima a 0° , para movimento de controle segundo x , são muito elevadas.

Alguns aspectos particulares, ainda que presumíveis, relativos às ondas de incidência, também podem ser destacados:

- onda SV incidindo a 90° , não apresenta resultados;
- ondas SV e P incidindo a 0° não apresentam respostas para as direções z e x , respectivamente;

Assim, resultados confiáveis são obtidos quando do uso de ondas SV incidentes até o valor do ângulo crítico, no caso de movimento de controle segundo x , e ondas P, com incidência até 40° , para movimento de controle segundo z . Sendo que, para incidência superior a 40° , as amplitudes horizontais passam a ser maiores que as verticais. Em tais circunstâncias, as componentes

transversais ao movimento de controle são tão menores quanto os respectivos ângulos de incidência.

A influência da posição do ponto de controle nas amplitudes do campo-livre pode ser assim resumida, uma vez admitido o epicentro com abscissa negativa em relação ao nó de interação considerado: aproximando-se o ponto de controle do epicentro, reduz-se a amplitude da resposta do campo-livre sobre o nó, e, afastando-o, aumenta-se a mesma resposta. O ângulo de incidência também influencia diretamente na variação das respostas da estrutura com a mudança de posição do ponto de controle: menores ângulos, variações relativas reduzidas. O ideal, portanto, é localizar o ponto de controle no centro da projeção horizontal da estrutura, mas a definição fica a cargo do projetista, tendo esse em mente as consequências da localização nesse ou naquele sentido.

O campo-livre pode ser composto pela combinação das ondas de corpo com ondas superficiais, mas não somente destas últimas. E, a participação efetiva das mesmas deve ser nas frequências até 4Hz, aproximadamente, já que a partir desse valor elas perdem a expressão.

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 considerado movimento de controle na direção z. Em todos os casos, para os maiores valores de seu fator de participação as respostas do campo-livre apresentam singularidade sem uma aparente conexão lógica. Em consequência, corroborando com o que é insinuado no manual do SASSI2000, o fator de participação das ondas R convém ser mantido pequeno, $\leq 10\%$.

Quanto às ondas SH e Love, “mutatis mutandis”, ou seja, com transposições adequadas, podem ser usadas estas mesmas idéias gerais de comportamento.