

5

Escolha do conjunto básico de frequências de análise para o SASSI2000

5.1.

Estratégia

Buscando-se uma escolha eficiente de localização das frequências de análise para utilização do programa SASSI sem auxílio de outro programa para definição das frequências naturais do sistema, estuda-se um modelo similar ao do capítulo anterior, porém, com uma camada de terreno de 0,5 metros em rocha, sobre o semi-espaco também rochoso dividido em 10 camadas horizontais, Figura 5.1.

Como sugerido no manual do SASSI, faz-se a análise com frequências igualmente espaçadas para definição das frequências naturais do sistema. Esse número de frequências é variado de 20 em 20 até 100 frequências, número máximo de frequências que podem ser fornecidas para o programa, para definição de um número satisfatório de frequências para uma primeira análise.

As conclusões são tiradas analisando-se as funções de transferência em aceleração fornecidas pelo programa. Essas funções de transferência, como já visto, são transferências do ponto de controle ao nó da estrutura onde está sendo solicitada a resposta. As funções de transferência a que se tem acesso já são as interpoladas. Como mencionado no Capítulo 3, o programa calcula os valores de aceleração para as frequências de análise fornecidas e as demais frequências são interpoladas com base na resposta de um sistema com dois graus de liberdade.

Avalia-se o intervalo de discretização mais conveniente para a faixa de frequência de $0,3...30Hz$ de modo a ser obtida uma boa aproximação na localização das frequências naturais do sistema solo-estrutura e, em consequência, no cálculo das funções de transferência. E, verifica-se o efeito de pequenas variações dos valores das frequências de análise fornecidas nos valores obtidos das frequências naturais do sistema.

Finalizando, é sugerido um roteiro para definição das frequências de análise e, para consolidação do mesmo, faz-se a análise de duas estruturas, uma superficial e outra enterrada, que são o prédio do reator de Angra 3 e a caixa de coleta de água de serviço de Angra 1.

5.2.
Modelo

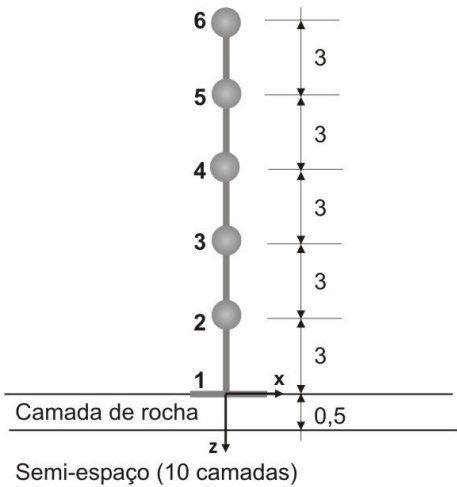


Figura 5.1 – Modelo de estudo: haste superficial com cinco massas translacionais na direção x.

O modelo utilizado é constituído de uma haste de 15m de extensão, com cinco massas translacionais segundo a direção x, de 12600 t cada, dispostas a cada três metros, conforme Figura 5.1.

A haste é modelada com cinco elementos de viga com as propriedades apresentadas na Tabela 5.1.

São restritos os movimentos translacionais dos nós segundo y e z e as rotações em torno dos eixos x e z. No nó de interação as translações são liberadas, sendo restritas as rotações.

O terreno é modelado por uma camada de rocha de 0,5 m de espessura sobre um semi-espaço também de rocha com dez camadas horizontais. As propriedades da rocha também são apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Propriedades dos materiais.

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

5.3. Programa de ensaios

Analisa-se a estrutura diretamente com o programa SASSI2000 utilizando-se 100, número máximo permitido, 80, 60, 40 e 20 frequências de análise, igualmente espaçadas, cobrindo um intervalo de 0,05 a 48 Hz. A frequência máxima de 48 Hz é escolhida sendo menor que $1/(2\Delta t)$ devido a peculiaridades com a transformada de Fourier.

Depois de verificar o número de frequências que fornece resultados satisfatórios, ou seja, que apresentam valores de frequências naturais condizentes com as reais, faz-se novamente a análise da estrutura, porém só com as frequências de pico indicadas na função de transferência, para esse número de frequências de análise, e mais três frequências igualmente espaçadas entre eles, como sugere o manual.

Buscando-se compreender melhor o problema de interpolação, estuda-se a variação da quantidade de frequências de análise indicadas entre as frequências de pico.

Faz-se a comparação da função de transferência obtida utilizando-se as frequências naturais apresentadas pelo SASSI2000, com 100 frequências de análise, mais três frequências igualmente espaçadas entre elas, (SI+3), com a função obtida ao se fornecerem as frequências naturais encontradas com a análise da estrutura no SAP2000, com base fixa, mais três igualmente espaçadas entre elas, (SAP+3).

Por fim, elabora-se o roteiro para definição das frequências de análise com a utilização exclusiva do programa SASSI, consolidando-o nos dois exemplos descritos a seguir:

1) *Prédio do Reator de Angra 3*: Estrutura superficial, sem infra-estrutura e sem solo escavado, com 170 nós, sendo 69 de interação, modelada com 59 elementos de viga, 2 elementos de mola e 88 elementos sólidos 3D. Com um sítio constituído de uma camada de 1,0 m de espessura de rocha mais 10 camadas de semi-espaço de mesmo material. O peso unitário do solo é de 26,5 kN/m³, a velocidade da onda S (V_s) é de 1924,029 m/s com um coeficiente de

amortecimento (ξ_{VS}) de 2% e da onda P (V_P) é 3599,528 m/s com um coeficiente de amortecimento (ξ_{VP}) de 1%. O campo livre é modelado com ondas SV incidindo a 0°. O movimento de controle é na direção x e o ponto de controle no centro da estrutura (coordenadas x e y igual a 0) e no topo da camada, ou seja, na superfície. Os modelos estruturais do prédio do reator e da sua base são apresentados nas Figuras 5.2 e 5.3, respectivamente.

2) *Caixa Coletora de Serviços de Angra1*: Estrutura de concreto, parcialmente enterrada, com 441 nós, sendo 315 de interação. Modelada com 268 elementos de placa, representando as paredes e a infra-estrutura, e 34 elementos de viga, representando a cobertura. A água contida na caixa é representada como massa concentrada. O solo escavado é modelado com 192 elementos sólidos 3D. O sítio é constituído de 20 camadas de solo com espessura e propriedades variáveis, apresentadas na Tabela 5.2, mais 10 camadas de semi-espaco de solo com peso unitário de 26,5 kN/m³, VS de 1924,029 m/s com ξ_{VS} de 2% e VP de 3599,528 m/s com ξ_{VP} também de 2%. O campo livre é modelado com ondas SH incidindo a 0°. O movimento de controle é na direção y e o ponto de controle na extremidade inferior da estrutura (coordenadas x e y igual a 0), no topo da 5ª camada de solo, Figura 5.4.

Tabela 5.2 - Dados de entrada do solo no módulo SITE1

Nº camada	Espessura (m)	r (kN/m ³)	V _S (m/s)	V _P (m/s)	ξ_{VS}	ξ_{VP}
1	0.95	18.5	72.23	143.4	0.05	0.05
2	0.95	18.5	72.23	143.4	0.05	0.05
3	0.95	18.5	84.83	168.41	0.06	0.06
4	0.95	18.5	84.83	168.41	0.06	0.06
5	1.1	18.5	88.58	1524	0.07	0.07
6	1.1	18.5	88.58	1524	0.07	0.07
7	2	18.5	88.96	1524	0.08	0.08
8	2	18.5	89.76	1524	0.08	0.08
9	2	18.5	90.53	1524	0.08	0.08
10	2	18.5	92.1	1524	0.08	0.08
11	2	18.5	93.8	1524	0.08	0.08
12	2	18.5	94.58	1524	0.08	0.08
13	1	18.5	95.58	1524	0.09	0.09
14	2	19	112.79	1524	0.08	0.08
15	2	19	115.15	1524	0.08	0.08
16	2	20.5	151.8	1524	0.1	0.1
17	2	20.5	149.72	1524	0.1	0.1
18	2	20.5	147.51	1524	0.1	0.1
19	4.5	24	1580.64	3290.37	0	0
20	4.5	24	1579.53	3288.05	0	0

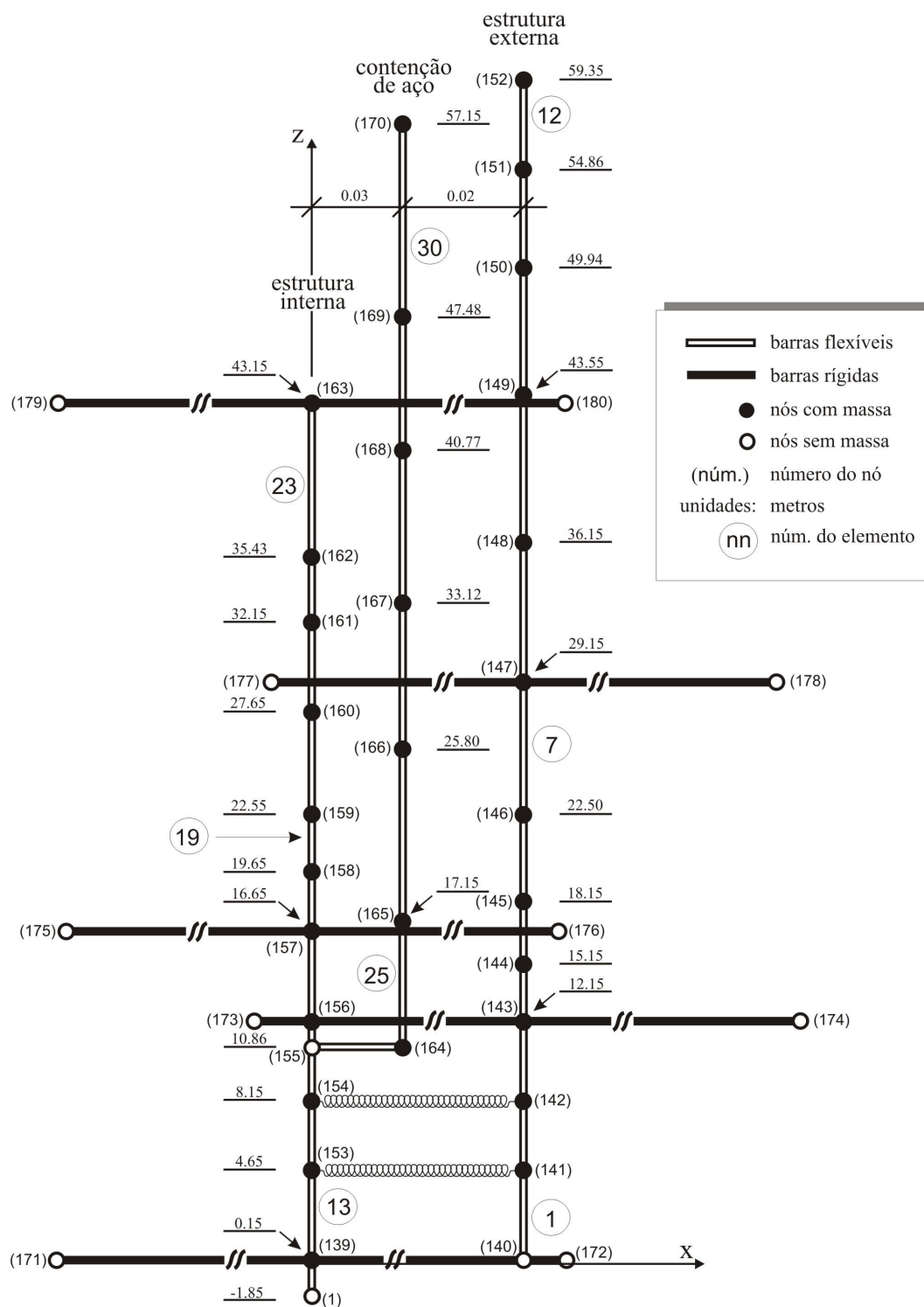


Figura 5.2 – Modelo estrutural do reator de Angra 3. Fonte: Sampaio, 1999.

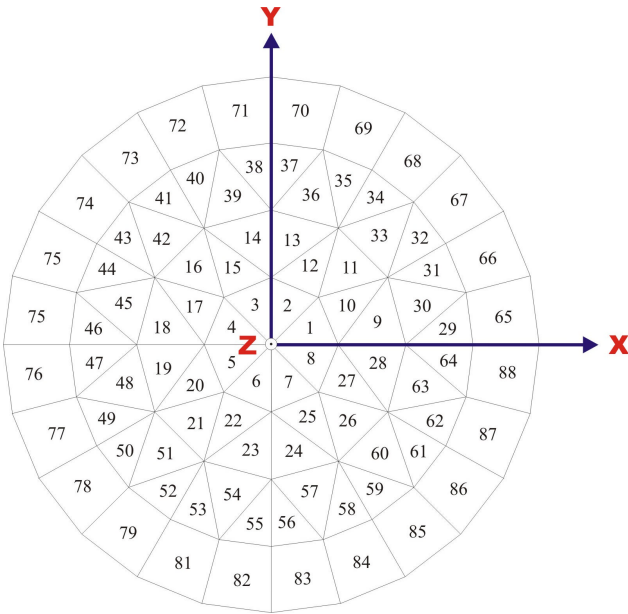


Figura 5.3 – Modelo da base do reator de Angra 3. Fonte: Sampaio, 1999.

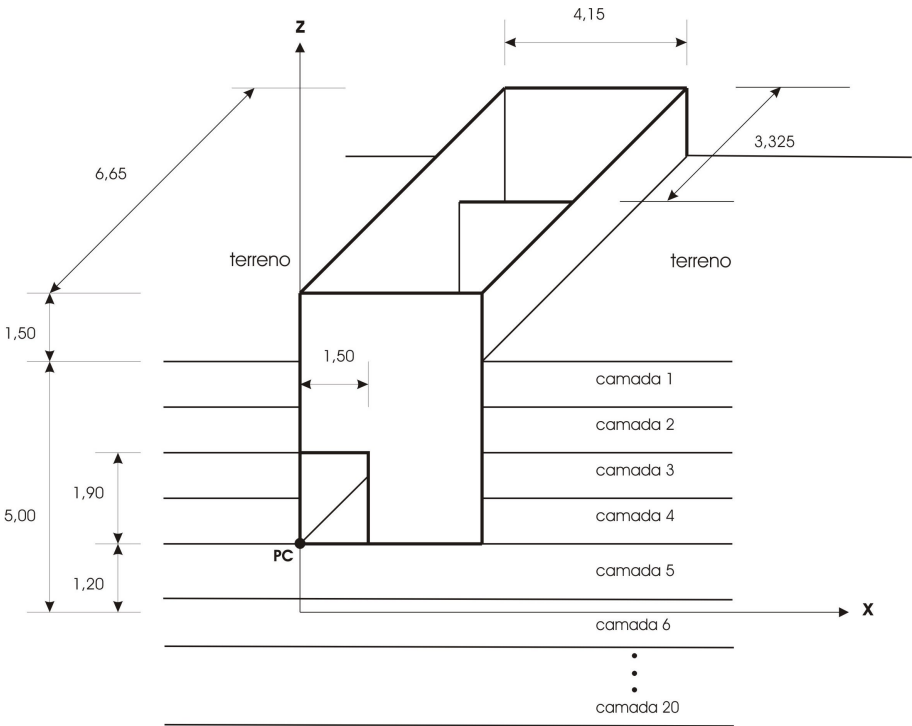


Figura 5.4 – Modelo da caixa coletora de serviços de Angra 1.

5.4. Apresentação e análise dos resultados

Nas Tabelas 5.3 a 5.7 apresentam-se as relações das frequências de pico obtidas com os vários conjuntos de frequências de análise em relação ao conjunto de 100 frequências, para cada nó da estrutura e para cada modo de vibração, ou seja, cada pico da função de transferência. Na sequência apresentam-se duas funções de transferência para a direção x obtidas com o conjunto de 20 frequências de análise nos nós 4, Figura 5.5, e 3, Figura 5.6.

Observa-se que se consegue uma boa definição das frequências naturais da estrutura, picos das funções de transferência, com até 40 frequências igualmente espaçadas.

Tabela 5.3 - Relações de frequências de análise para o nó 6

Modo	RF_i – n° de frequências de análise					$f_{0i}SI_{100}$
	100	80	60	40	20	
1	1,0	1,0	1,0125	1,0125	1,025	3,8184
2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	12,123
3	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	27,158
4	1,0	1,0	1,0	0,9988	0,9976	39,520
5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9970	47,491

$$\text{Sendo } RF_i = \frac{f_{0i} SI}{f_{0i} SI_{100}}$$

Onde: RF_i - relação de frequências de análise do modo i,

$f_{0i} SI$ - frequência do modo i fornecida pelo SASSI2000

$f_{0i} SI_{100}$ - frequência do modo i fornecida pelo SASSI2000 para 100 frequências de análise.

Tabela 5.4 - Relações de frequências de análise para o nó 5.

Modo	RF_i – n° de frequências de análise					$f_{0i}SI_{100}$
	100	80	60	40	20	
1	1,0	1,0	1,0125	1,0125	1,0250	3,8184
2	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9882	12,123
3	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	27,158
4	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	39,473
5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9990	47,491

Tabela 5.5 - Relações de frequências de análise para o nó 4

Modo	RF_i – n° de frequências de análise					$f_{0i}SI_{100}$
	100	80	60	40	20	
1	1,0	1,0	1,0125	1,0125	1,0125	3,8184
2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	12,123
3	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	27,158
4	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0048	39,473
5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0010	47,491

Tabela 5.6 - Relações de frequências de análise para o nó 3

Modo	RF_i – n° de frequências de análise					$f_{0i}SI_{100}$
	100	80	60	40	20	
1	1,0	1,0	1,0125	1,0125	1,0125	3,8184
2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	12,123
3*	1,0	1,0	1,0018	1,0018	-	27,158
4	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0048	39,473
5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0010	47,491

* ver Figura 5.6 – função de transferência.

Tabela 5.7 - Relações de frequências de análise para o nó 2

Modo	RF_i – n° de frequências de análise					$f_{0i}SI_{100}$
	100	80	60	40	20	
1	1,0	1,0	1,0125	1,0	1,0250	3,8184
2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	12,123
3	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	27,158
4	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0024	39,473
5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9940	47,491

Com 20 frequências não se conseguem respostas satisfatórias para todos os nós, pois para alguns nós surgem outras frequências de pico, Figura 5.5, e para outros há o desaparecimento dessas, Figura 5.6.

A omissão da terceira frequência natural, na Figura 5.6, é devida à configuração do terceiro modo de vibração que apresenta ordenada nula correspondente ao nó 3, como pode ser visto na Figura 5.7. Essa figura apresenta os modos de vibração obtidos com o modelo de base fixa no SAP2000, com a simulação, no SAP2000, do terreno por uma mola no nó 1 e os modos obtidos com a utilização do SASSI2000.

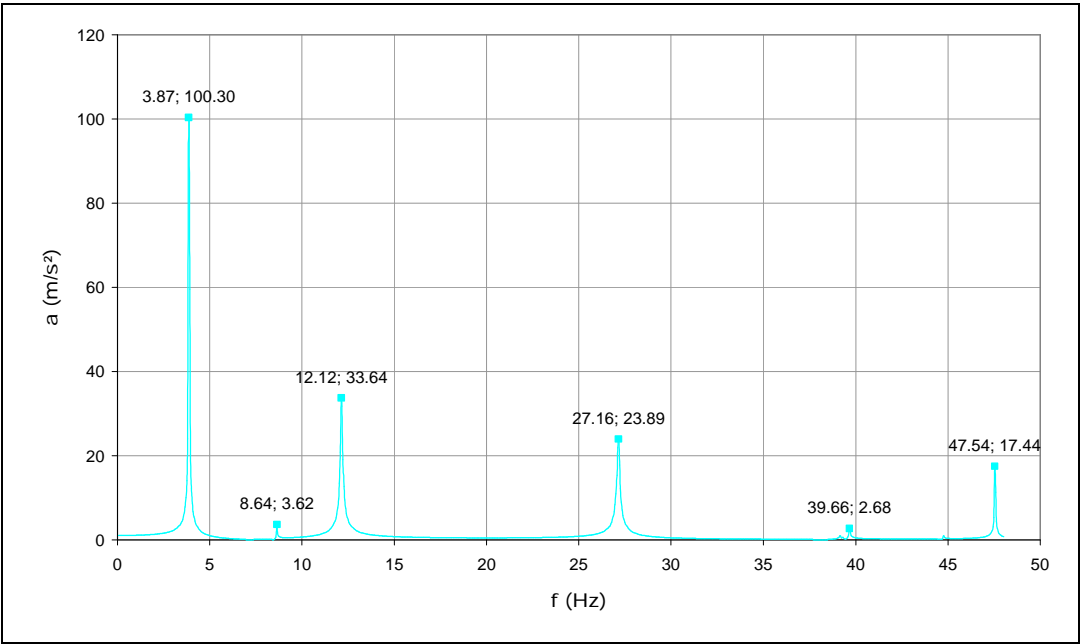


Figura 5.5 – *FTü4* com 20 freqüências de análise.

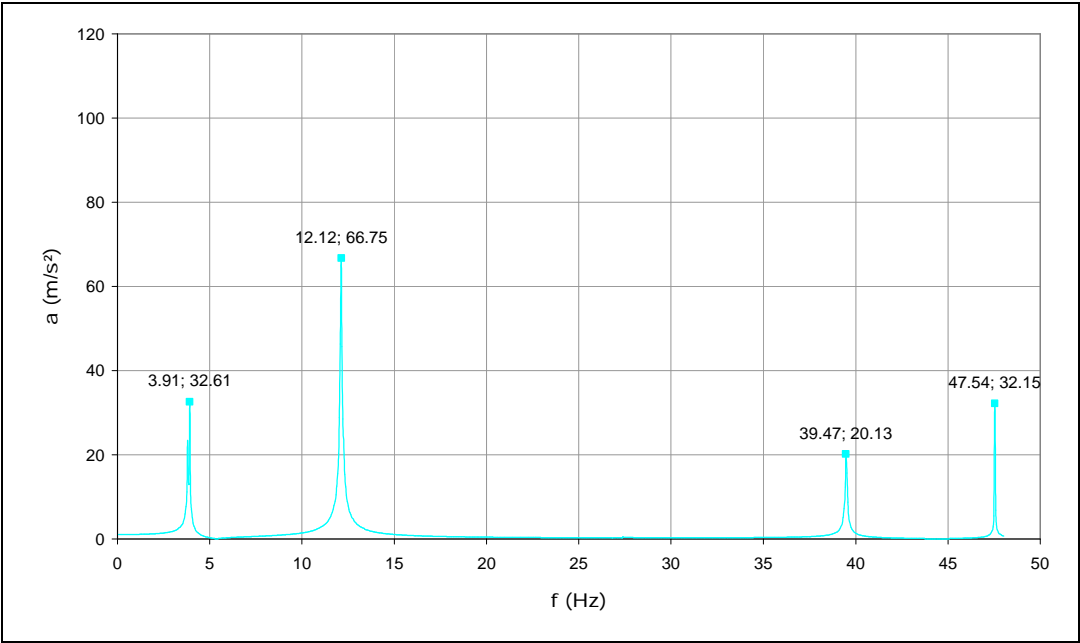


Figura 5.6– *FTü3* com 20 freqüências de análise.

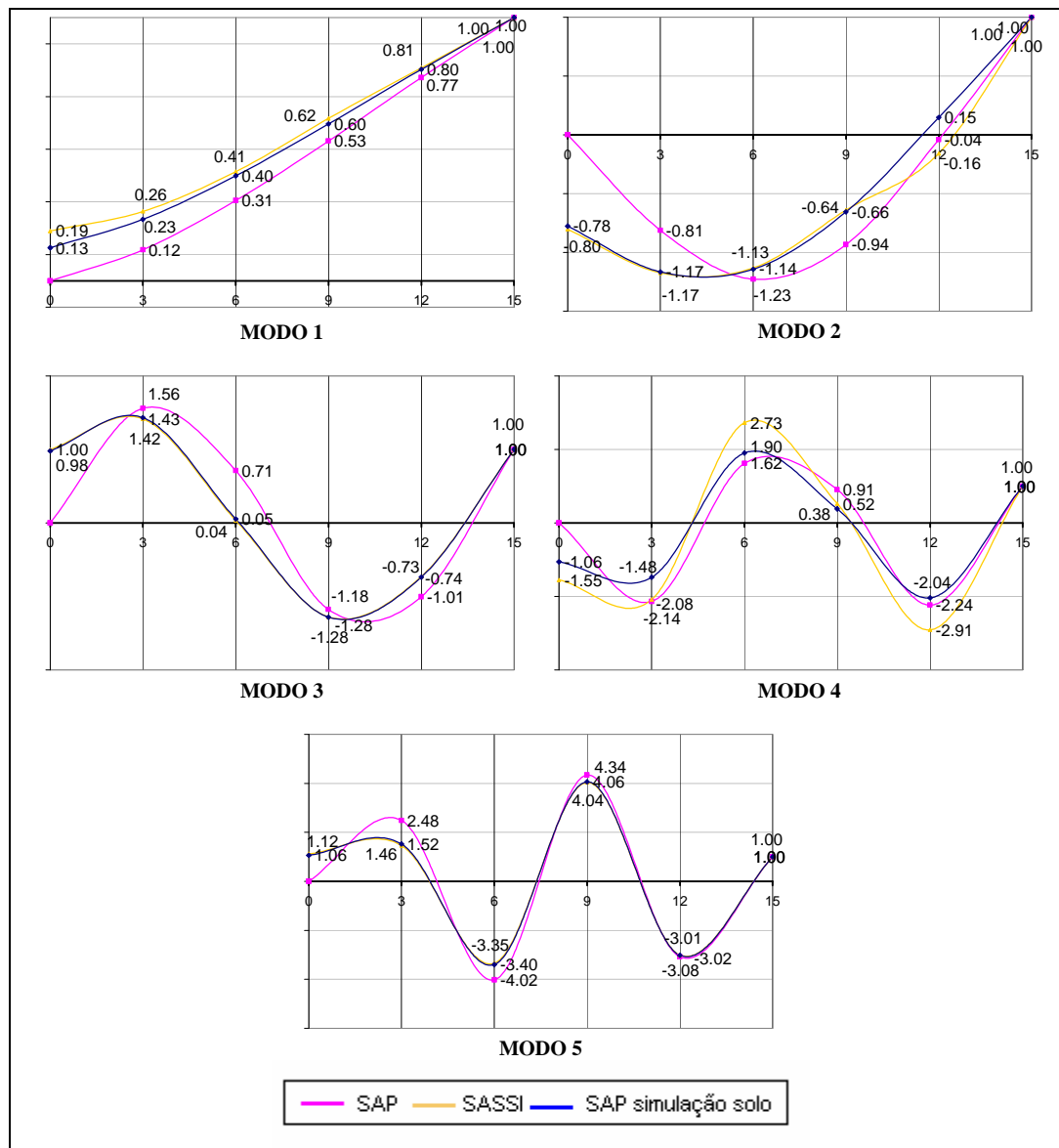


Figura 5.7 - Configuração modal do modelo apresentado na Figura 5.1.

Apesar das amplitudes dos picos das funções de transferência serem diferentes, para cada conjunto de freqüências de análise, a freqüência na qual os picos ocorrem é a mesma, ou praticamente igual. Sendo assim, podem-se definir as freqüências principais utilizando-se 40 freqüências de análise igualmente espaçadas. Depois, faz-se a análise final, para acertar as amplitudes, com as freqüências principais e mais três igualmente espaçadas entre cada uma delas, como indicado no manual.

Demonstra-se, agora, a influência da quantidade de freqüências indicadas entre picos. A Figura 5.8 apresenta a função de transferência quando indicada somente uma freqüência de análise entre os picos, (SI+1e), comparada com a obtida com três freqüências entre os picos encontrados pelo SASSI, (SI+3).

Observa-se que, apesar das frequências principais ficarem marcadas, a função de transferência comporta-se de maneira indesejada e podem surgir outros picos que não correspondem às frequências naturais do sistema. Já para o caso de três frequências de análise entre cada intervalo, ou seja, entre picos, observa-se que a solução flui naturalmente.

Na Figura 5.9 mostra-se a consequência de não se indicar frequência alguma entre picos, (SI+0), não se indicar frequências de análise entre os primeiro e segundo picos e entre os terceiro e quarto picos, (SI+3_0), e entre os primeiro e segundo, terceiro e quarto e quarto e quinto picos, (SI+3_n), comparados com o caso (SI+3). Pode-se perceber que é temerário não indicar frequência alguma entre picos, principalmente nos primeiros intervalos onde as frequências principais são mais próximas. A função de transferência pode, além de não se comportar da maneira desejada, criar outros picos e deslocar os picos existentes. No caso onde não foram indicadas frequências de análise entre os primeiro e segundo picos e entre os terceiro e quarto picos, observa-se que para o primeiro intervalo sem frequência, como elas são próximas, a função de transferência se comporta de forma indesejada criando, inclusive, um pico inexistente, como no caso (SI+3n). Já no segundo intervalo sem frequências os picos são preservados, porém a função de transferência aumenta um pouco. E, quando não indicadas frequências entre os primeiro e segundo, terceiro e quarto e quarto e quinto picos, para o primeiro intervalo sem frequências, o comportamento é o mesmo do caso (SI+3_0), e no segundo e terceiro intervalos sem frequências a quarta frequência principal fica deslocada e ampliada e a última frequência natural não fica marcada.

Assim, independente da quantidade de frequências (≥ 1) colocadas entre duas frequências principais, a localização dos picos dessas é preservada ainda que surjam outros picos e variem as amplitudes. Essas variações são sentidas principalmente na frequência mais baixa.

Finalizando, apresenta-se, na Figura 5.10, a comparação da função de transferência obtida utilizando-se as frequências naturais apresentadas pelo SASSI2000 com 100 frequências de análise mais três frequências igualmente espaçadas entre elas, (SI+3), com a função obtida ao se fornecerem as frequências naturais encontradas com a análise da estrutura no SAP2000, com base fixa, mais três igualmente espaçadas entre elas, (SAP+3).

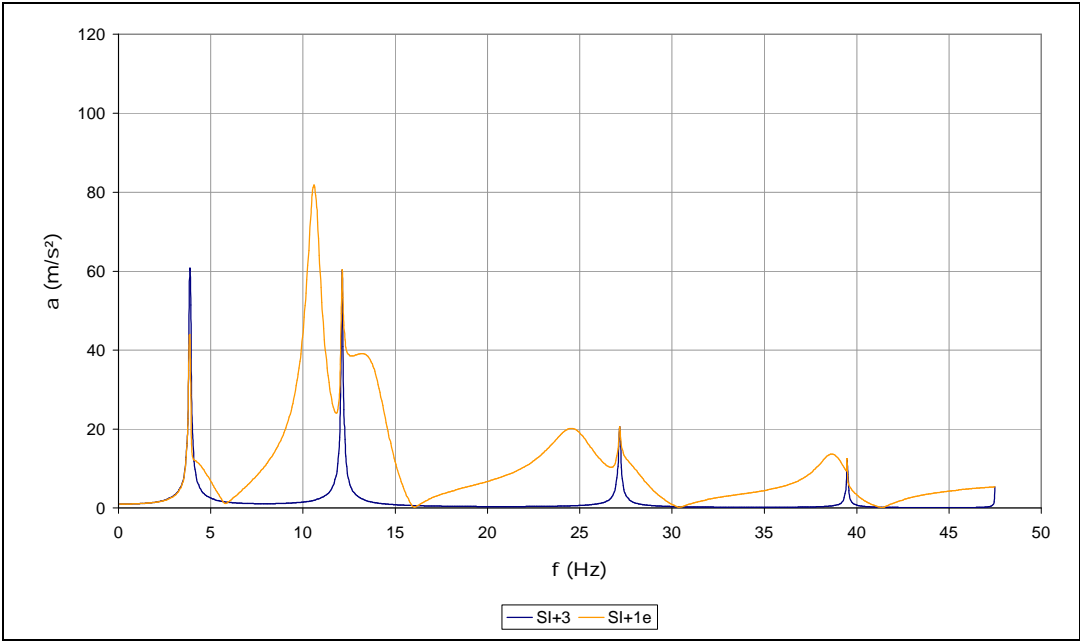


Figura 5.8 – *FTü6* com variação da quantidade de freqüências de análise indicadas em cada intervalo.

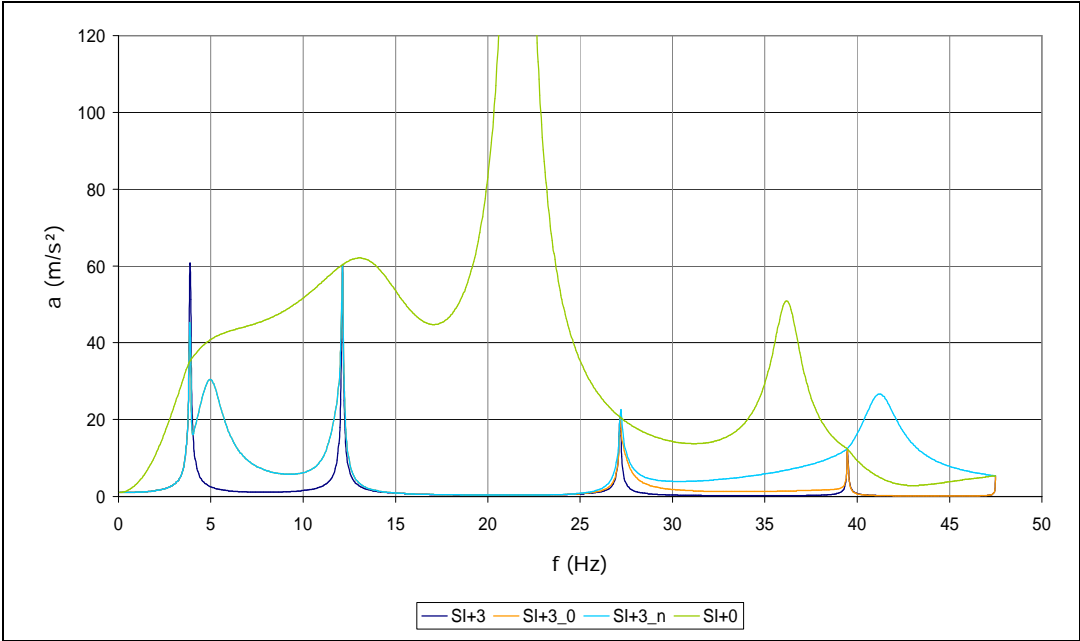


Figura 5.9 – *FTü6* Função com variação da quantidade de freqüências de análise indicadas em cada intervalo.

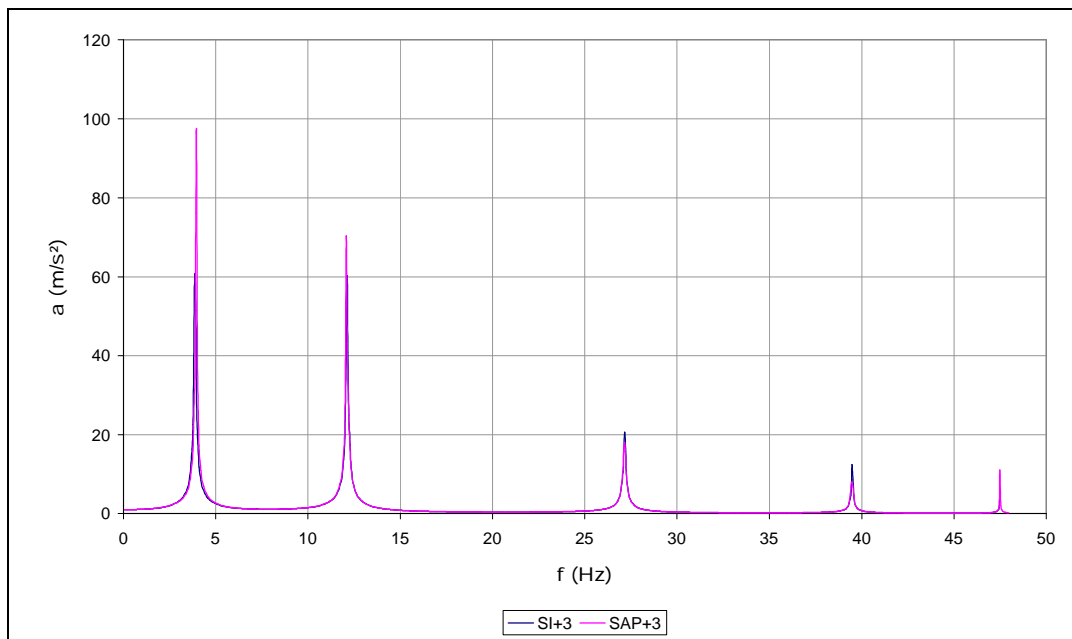


Figura 5.10 – *FTü6* com diferentes frequências naturais.

Observa-se que, apesar das frequências fornecidas pelo SAP2000 serem maiores (4,19; 15,80; 30,33; 41,08 e 47,92 Hz), em função das diferenças nas fundações dos dois modelos, o SASSI2000 com base nelas reconhece as frequências naturais da interação solo-estrutura, porém as amplitudes de acelerações são distintas. Assim, mesmo com a utilização das frequências obtidas com outro programa, para acerto das amplitudes das funções de transferência, deve-se fazer uma nova análise, agora com as frequências reduzidas.

5.4.1.

Proposta para roteiro de definição de frequências no SASSI2000

A obtenção de um conjunto de frequências de análise no SASSI2000 para avaliação de uma estrutura, enterrada ou superficial, para solicitação sísmica, pode ser conseguida pelo emprego do roteiro seguinte:

- 1) Obter o modelo estrutural do sistema a ser analisado, estrutura-fundação-terreno.
- 2) Adotar uma faixa de frequência de interesse de 0 a 50 Hz, escolhida a partir de:

$$f_0 = \frac{1}{2 \times \Delta t} = \frac{1}{2 \times 0,01} = 50 \text{ Hz}$$

Isto é, considerando-se peculiaridades da transformada rápida de Fourier, o desenvolvimento da densidade de espectro de potência dos sismos e o intervalo $\Delta t = 0,01$ s, normalmente usado para a discretização dos sismos.

3) Subdividir a faixa de frequência de interesse em 40 frequências igualmente afastadas ($\Delta f \approx 1,25 \text{ Hz}$) e adotá-las como uma base inicial para o conjunto de frequências de análise.

4) Calcular a função de transferência de aceleração para dois nós representativos da estrutura – considerar para a excitação a direção do movimento de controle e para a resposta a direção do movimento que se deseja medir, x, y ou z.

5) Verificar a união dos valores das frequências correspondentes aos picos obtidos nas duas funções de transferência.

6) Acrescentar entre cada duas frequências de pico, três frequências igualmente espaçadas e completar assim o conjunto de frequências de análise.

5.4.2.

Exemplos de aplicação do roteiro

As frequências naturais do Prédio do Reator de Angra, obtidas com 40 frequências igualmente espaçadas, cobrindo o intervalo até 50 Hz, são 6,05; 7,52; 10,8; 15, 8; 24,3 e 34,2 Hz. Com essas frequências de pico e mais três frequências igualmente espaçadas entre elas define-se o novo conjunto de frequências de análise. Os dois conjuntos de frequências são apresentados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 - Conjuntos de freqüências de análise para o prédio do reator de Angra 3.

Primeiro conjunto – 40 frequências de análise igualmente espaçadas (40 freq)															
*** NÚMERO DAS FREQUÊNCIAS DE ANÁLISE ***															
1	27	53	80	106	132	158	185	211	237	263	290	316	342	368	394
421	447	473	499	526	552	578	604	631	657	683	709	735	762	788	814
840	867	893	919	945	972	998	1024								
*** FREQUÊNCIAS DE ANÁLISE EM Hz ***															
.0	1.3	2.6	3.9	5.2	6.5	7.7	9.0	10.3	11.6	12.9	14.1	15.4	16.7	18.0	19.3
20.5	21.8	23.1	24.4	25.7	26.9	28.2	29.5	30.8	32.1	33.3	34.6	35.9	37.2	38.5	39.8
41.0	42.3	43.6	44.9	46.2	47.4	48.7	50.0								

Segundo Conjunto – frequências de picos mais três (SI+3)															
*** NÚMERO DAS FREQUÊNCIAS DE ANÁLISE ***															
1	32	63	93	124	132	139	147	154	171	188	205	222	247	273	298
323	367	410	454	497	548	599	650	701							
*** FREQUÊNCIAS DE ANÁLISE EM Hz ***															
.0	1.6	3.1	4.5	6.1	6.4	6.8	7.2	7.5	8.3	9.2	10.0	10.8	12.1	13.3	14.6
15.8	17.9	20.0	22.2	24.3	26.8	29.2	31.7	34.2							

A Figura 5.11 apresenta as funções de transferências, obtidas com os dois conjuntos de freqüências de análise, para o nó 157, estrutura interna do reator. Observa-se que quando fornecidas as freqüências de pico mais três a função fica suavizada, as amplitudes são corrigidas e as freqüências de pico que surgiram por problemas de interpolação desaparecem.

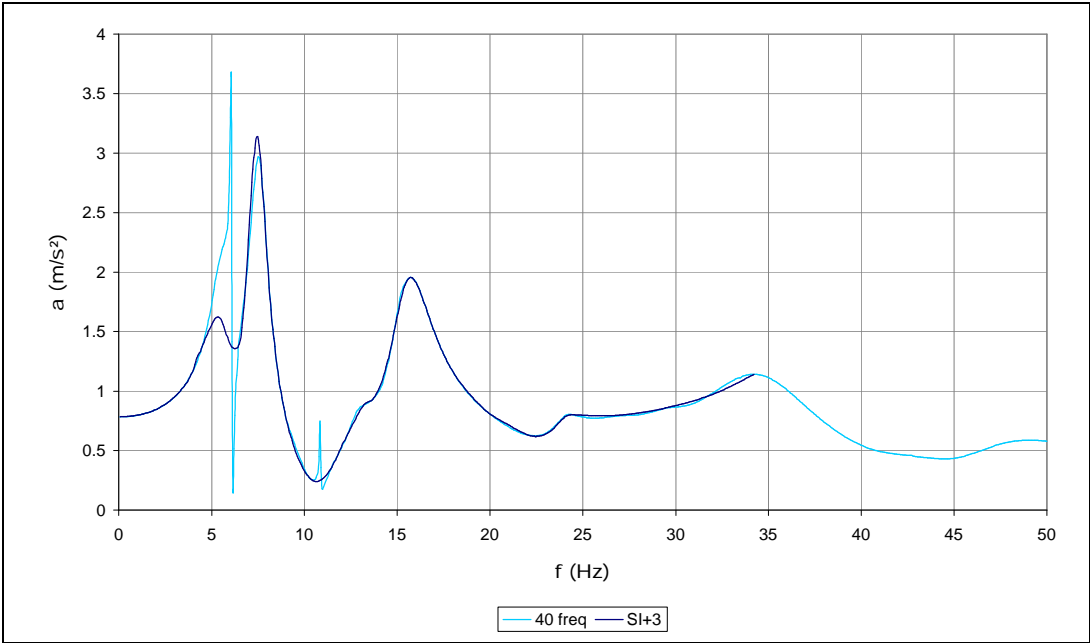


Figura 5.11 – FTü157 , do prédio do reator, para os dois conjuntos de freqüências de análise.

Para a Caixa Coletora de Serviço faz-se a análise das funções de transferência nas três direções (x, y e z), primeiramente utilizando 40 freqüências

de análise igualmente espaçadas cobrindo um intervalo até 50 Hz, ou seja, igual ao conjunto “40 freq” utilizado no exemplo do Reator e apresentado na Tabela 5.8. Então, com base nas funções de transferência para o nó 441, extremidade superior oposta ao encontro dos eixos de referência, encontra-se o novo conjunto de frequências de análise. Como a função de transferência para a direção y apresenta mais frequências de pico: 5,37; 14,99; 27,34; 28,03 e 34,47 forma-se o novo e definitivo conjunto de frequências de análise (SI+3 _ y) com essas frequências mais três frequências igualmente espaçadas entre elas, apresentado na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 - Conjunto final de frequências de análise para a caixa coletora de Angra 1.

Segundo Conjunto – frequências de picos para a direção y mais três igualmente espaçadas (SI+3 _ y)															
*** NÚMERO DAS FREQUÊNCIAS DE ANÁLISE ***															
1	28	56	83	110	159	209	258	307	370	434	497	560	564	567	571
574	607	640	673	706											
*** FREQUÊNCIAS DE ANÁLISE EM Hz ***															
.0	1.4	2.7	4.1	5.4	7.8	10.2	12.6	15.0	18.1	21.2	24.3	27.3	27.5	27.7	27.9
28.0	29.6	31.3	32.9	34.5											

As Figuras 5.12, 5.13 e 5.14 apresentam as funções de transferência para nó 441, para as direções x, y e z, respectivamente. Observa-se que as frequências principais e as amplitudes são ajustadas. Também se pode verificar que as diferenças entre os dois conjuntos não foram muitas, uma vez que não existem frequências principais muito próximas, o que dificulta a análise, como no caso do reator.

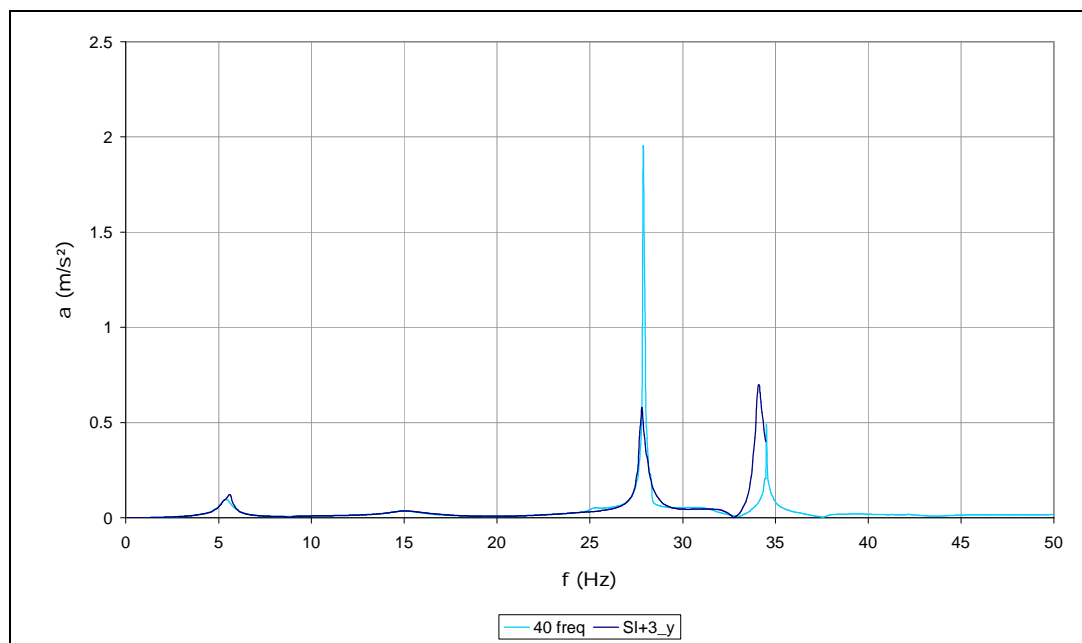


Figura 5.12 - *FTü441*, da caixa coletora,, $mc(y)$, para os dois conjuntos de freqüências de análise.

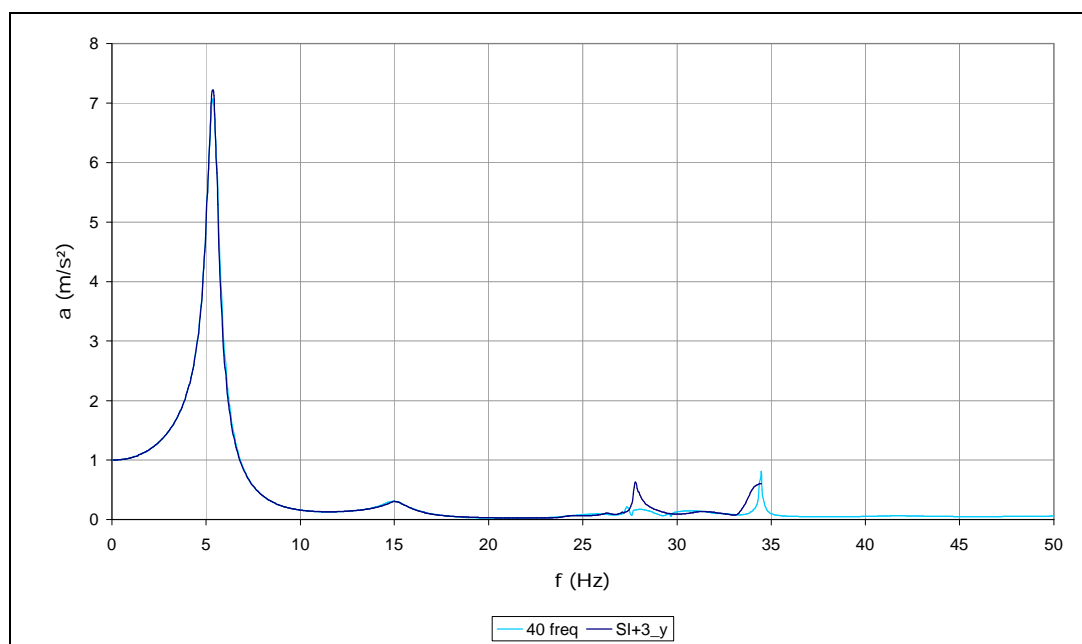


Figura 5.13 - *FTv441*, da caixa coletora, $mc(y)$, para os dois conjuntos de freqüências de análise.

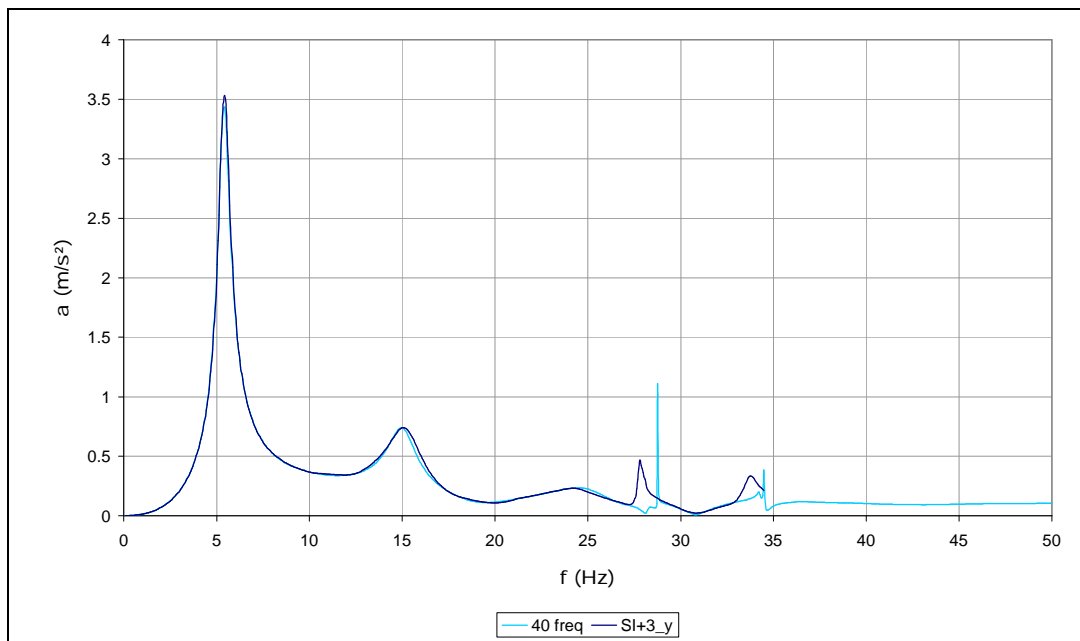


Figura 5.14 - $FT\ddot{w}441$, da caixa coletora, $mc(y)$, para os dois conjuntos de freqüências de análise.

5.5. Conclusões

A utilização de um conjunto inicial de 40 freqüências de análise igualmente espaçadas, cobrindo o intervalo de $1/(N\Delta t) \dots 1/(2\Delta t)$, pois a primeira freqüência de análise tem que ser a de número 1, Equação (3.11) equivalente à Df , Equação (3.10), mostra-se adequada para definição das freqüências naturais do sistema solo-estrutura sem utilização de um programa auxiliar. E, depois de definidos os picos das funções de transferência, a informação das freqüências correspondentes a esses picos mais três igualmente espaçadas entre elas é a melhor opção para definição do conjunto final e obtenção das respostas corrigidas.

O roteiro sugerido, portanto, pode ser aplicado com sucesso.