# 6
# Análise da interação solo estrutura

## 6.1.
## Estratégia

A estrutura definida para esta análise possui três pavimentos, é isosimétrica segundo dois planos verticais, possui área superficial em planta de 36 $m^2$, área lateral de 144 $m^2$, possui 152 barras horizontais e verticais interligadas por 68 nós e, cada barra com 2 metros de comprimento. O procedimento adotado para essa análise consiste: instalar a estrutura superficialmente no site em estudo e, depois, fazer o enterramento pavimento por pavimento. O ponto de controle está sempre localizado na superfície da primeira camada do solo, e exatamente na vertical do centro da estrutura, através de barras que se cruzam fornecendo pontos definidos para a localização do mesmo, ver Figura 6.1. As avaliações apresentadas têm como principal protagonista a vertical do ponto de controle e identificam as variações causadas nas freqüências, modos de vibração e a propagação com a distância; e fornecem, desse modo, resultados para uma análise comparativa antes e depois da inserção da estrutura no campo livre.

Através do programa SAP2000 são feitas análises das freqüências e modos da estrutura servindo de referência para o comportamento da mesma, ver Figura 6.2.

A estrutura possui as seguintes propriedades:

**Tabela 6.1** - Propriedades da estrutura

| **Propriedades da Estrutura** | |
|---|---|
| **Mecânicas** | **Geometria dos elementos de viga** |
| $E = 2.1x\ 10^7\ KN/m^2$<br>$\upsilon = 0.2$<br>$\delta = 1.2\ t/m^2$<br>$\xi = 0\%$ | $A = 0{,}125\ m^2$<br>$S = 0{,}125\ m2$<br>$J = 2{,}60417 \times 10^{-3}\ m^4$ |

A massa total da estrutura e das sobrecargas gravitacionais são simuladas por um valor de $\delta = 1{,}2\ \ t/m^2$ , por andar, e é desprezado o efeito do peso correspondente, $\gamma = 0$. Assim, a relação das massas da estrutura para o solo é:

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421261/CA

$\overline{m} = \frac{4,8}{3 \times 2} \div 1,85 = 0,43$, e a relação entre as freqüências fundamentais é de $7,36 \div 16,83 = 0,44$. Onde 16,83 Hz é a menor freqüência de referência.

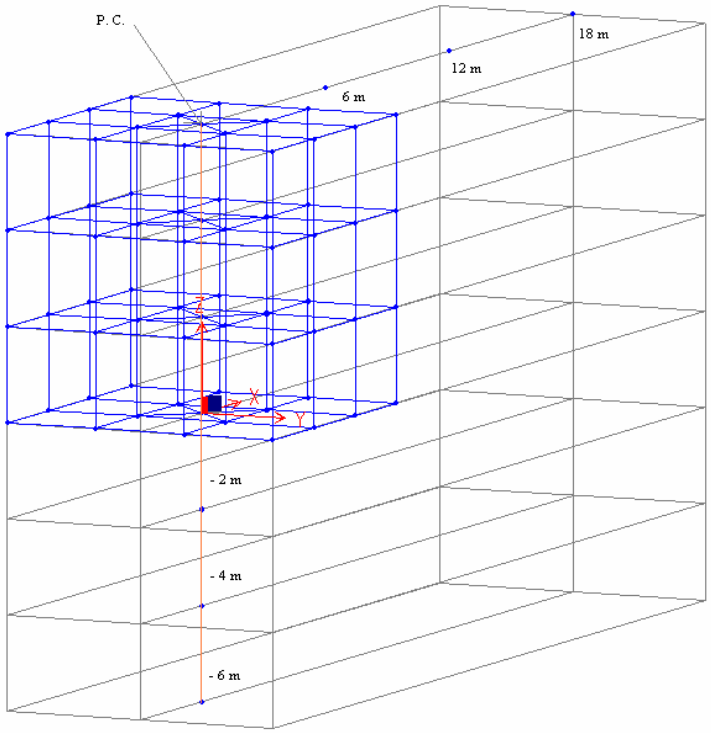


**Figura 6.1 –** Modelo da estrutura enterrada até a 3ª camada do solo e os pontos de leitura.

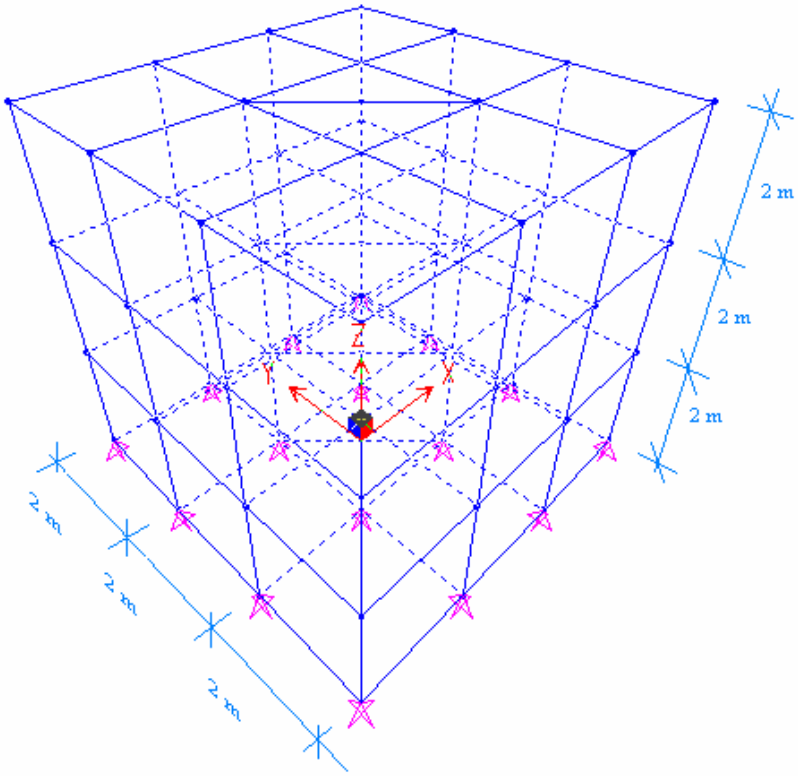


**Figura 6.2 -** Modelo da estrutura no SAP2000

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421261/CA

## 6.2.
## Resultados da interação solo estrutura

As freqüências da estrutura (sobre apoios ideais indeslocáveis à translação) apresentadas pelo SAP2000 são as seguintes:

**Tabela 6.2 -** Freqüências da estrutura

| MODE | PERIOD (TIME) | FREQUENCY (CYC/TIME) | FREQUENCY (RAD/TIME) | EIGENVALUE (RAD/TIME)**2 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.135686 | 7.369957 | 46.306809 | 2144.321 |
| 2 | 0.135686 | 7.369957 | 46.306809 | 2144.321 |
| 3 | 0.130972 | 7.635206 | 47.973414 | 2301.448 |
| 4 | 0.044511 | 22.466380 | 141.160429 | 19926.267 |
| 5 | 0.043725 | 22.870441 | 143.699219 | 20649.465 |
| 6 | 0.043725 | 22.870443 | 143.699232 | 20649.469 |
| 7 | 0.042363 | 23.605724 | 148.319137 | 21998.566 |
| 8 | 0.039679 | 25.202565 | 158.352384 | 25075.478 |
| 9 | 0.039679 | 25.202564 | 158.352379 | 25075.476 |
| 10 | 0.030452 | 32.838310 | 206.329185 | 42571.733 |
| 11 | 0.028024 | 35.683859 | 224.208301 | 50269.362 |
| 12 | 0.028024 | 35.683862 | 224.208316 | 50269.369 |
| 13 | 0.028015 | 35.694574 | 224.275621 | 50299.554 |
| 14 | 0.028015 | 35.694599 | 224.275783 | 50299.627 |
| 15 | 0.027591 | 36.243288 | 227.723292 | 51857.898 |
| 16 | 0.027418 | 36.471992 | 229.160284 | 52514.436 |
| 17 | 0.022415 | 44.613073 | 280.312206 | 78574.933 |
| 18 | 0.022211 | 45.023351 | 282.890059 | 80026.785 |
| 19 | 0.020468 | 48.855954 | 306.971010 | 94231.201 |
| 20 | 0.020468 | 48.855957 | 306.971034 | 94231.216 |
| 21 | 0.017800 | 56.179394 | 352.985546 | 124598.796 |
| 22 | 0.017324 | 57.723311 | 362.686258 | 131541.321 |
| 23 | 0.017324 | 57.723327 | 362.686360 | 131541.395 |
| 24 | 0.016856 | 59.327585 | 372.766209 | 138954.646 |
| 25 | 0.016215 | 61.672342 | 387.498751 | 150155.282 |
| 26 | 0.016204 | 61.712490 | 387.751009 | 150350.845 |
| 27 | 0.015794 | 63.313677 | 397.811566 | 158254.042 |
| 28 | 0.015794 | 63.313832 | 397.812536 | 158254.814 |
| 29 | 0.015485 | 64.579678 | 405.766085 | 164646.116 |
| 30 | 0.014841 | 67.379593 | 423.358469 | 179232.393 |
| 31 | 0.014381 | 69.537253 | 436.915445 | 190895.106 |
| 32 | 0.014381 | 69.537551 | 436.917321 | 190896.745 |
| 33 | 0.014208 | 70.385125 | 442.242786 | 195578.681 |
| 34 | 0.014120 | 70.820946 | 444.981127 | 198008.203 |
| 35 | 0.013234 | 75.562277 | 474.771791 | 225408.254 |
| 36 | 0.013234 | 75.562822 | 474.775211 | 225411.501 |
| 37 | 0.012608 | 79.315428 | 498.353533 | 248356.244 |
| 38 | 0.012523 | 79.853608 | 501.735017 | 251738.027 |
| 39 | 0.012443 | 80.364962 | 504.947951 | 254972.433 |
| 40 | 0.012443 | 80.365393 | 504.950657 | 254975.166 |
| 41 | 0.012321 | 81.163170 | 509.963237 | 260062.503 |
| 42 | 0.012286 | 81.394259 | 511.415214 | 261545.521 |
| 43 | 0.011938 | 83.766290 | 526.319122 | 277011.818 |
| 44 | 0.011893 | 84.081256 | 528.298115 | 279098.898 |

Calculam-se as 44 primeiras freqüências naturais para o modelo da estrutura e, a partir dessas freqüências e modos de vibração, é feita a comparação com as freqüências e modos do conjunto solo + estrutura – solo escavado, isto é, sistema final; nesse confronto, focalizam-se nós da vertical do ponto de controle.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421261/CA

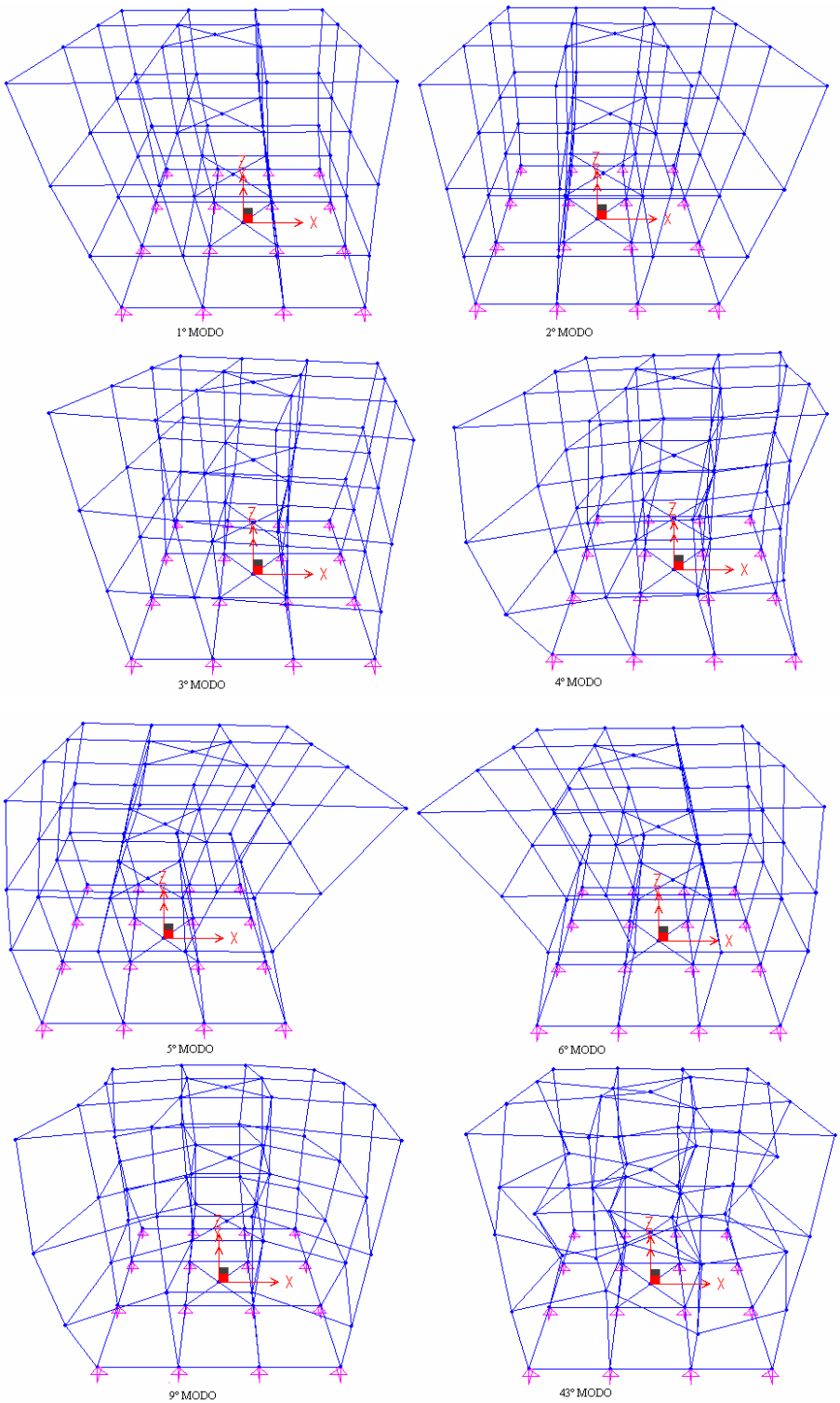


**Figura 6.3 –** Os seis primeiros modos da estrutura e os modos correspondentes às freqüências de 25,20 Hz (9º) e 83,77 Hz (43º).

A Figura 6.3 mostra os seis primeiros modos da estrutura e os modos das freqüências próximos às apresentadas pelo campo-livre na direção X-Z.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421261/CA

As próximas Figuras 6.4 a 6.7, mostram os valores das freqüências do sistema para diversas situações da estrutura, os correspondentes modos de vibração, na vertical do ponto de controle, tanto na direção X como também em Z.

Essas figuras podem ser grupadas em freqüências ímpares, 1º e 3º modo, e freqüências pares, 2º e 4º modo.

As freqüências ímpares associam-se aos modos com predomínio das amplitudes horizontais e o segundo grupo aos modos em que predominam os deslocamentos verticais, isto é, para o caso externo de $\alpha = 0º$, recair-se-ia, respectivamente, nas situações da onda SV para o 1º grupo e da onda P, para o outro grupo, Tabela 4.2.

Para as freqüências ímpares, modos horizontais, a inserção da estrutura no terreno produz os efeitos seguintes:

- ✓ Na condição de estrutura na superfície, ESUP, as freqüências crescem em relação às do campo-livre, CL; percebe-se assim a influência da rigidez da estrutura aumentando discretamente as freqüências do conjunto, solo-estrutura.
- ✓ À medida que se produz o enterramento, os valores das freqüências passam a baixar sob a influência da massa da estrutura que é inserida no lugar do solo escavado;
- ✓ Quanto mais se prossegue o enterramento a configuração modal respectiva afasta-se do campo-livre exibindo conformações afins às dos modos de mesmo valor da estrutura.

Para as freqüências pares o quadro é semelhante invertendo-se, naturalmente, a ordem: primeiro a influência da massa da estrutura reduzindo as freqüências do conjunto solo-estrutura, seguindo-se um acréscimo nessas freqüências em razão da rigidez da estrutura.

Compreende-se que tais efeitos são moderados e sua amplitude está associada às relações de massa e freqüências próprias da estrutura e do campo-livre.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421261/CA

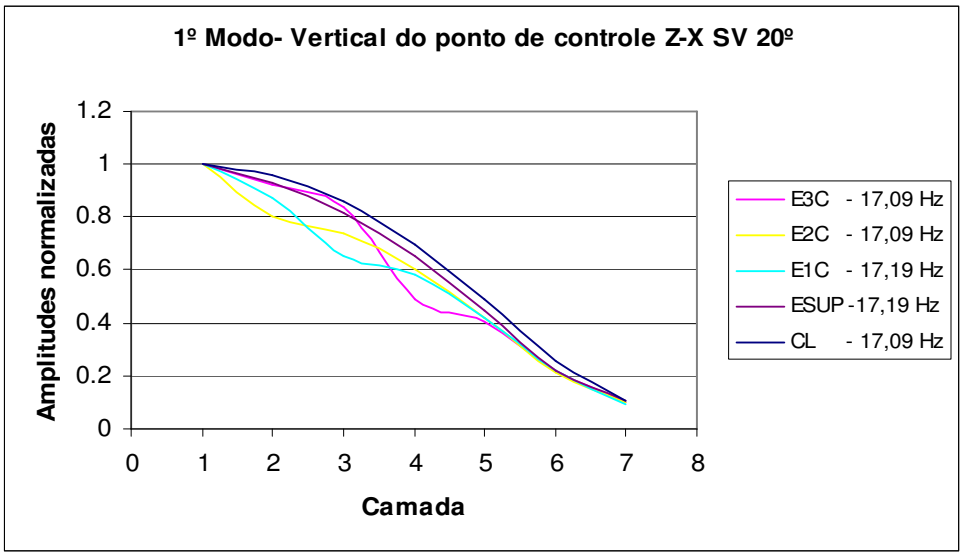


**Figura 6.4 -** 1º Modo, vertical do ponto de controle, variação do nível de enterramento, movimento de controle Z-X, onda SV, α = 20º, solo 3.

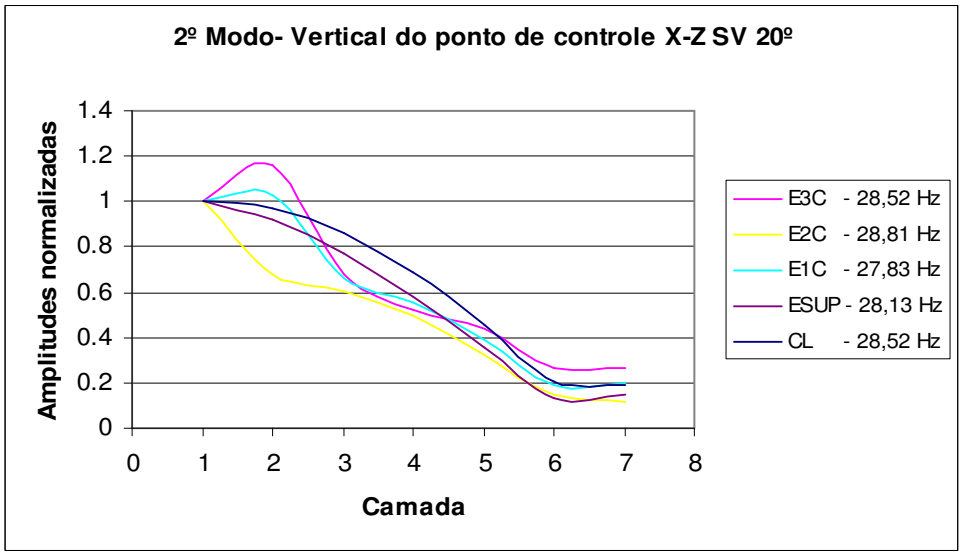


**Figura 6.5** - 2º Modo, vertical do ponto de controle, variação do nível de enterramento, movimento de controle X-Z, onda SV, α = 20º, solo 3.

Para a estrutura enterrada até a segunda camada, direção X-Z, uma freqüência de 8,40 Hz é apresentada e, em nenhuma direção as freqüências do solo têm seus valores próximos de 8Hz; isso sugere que essa freqüência faz parte das freqüências mais baixas da estrutura. Consulta-se a Tabela 6.2 e se vê uma freqüência de 7,63 Hz entre as freqüências da estrutura. A freqüência encontrada é mais elevada, como se poderia esperar, já que a estrutura está enterrada no solo contribuindo assim para uma maior rigidez.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421261/CA

Na Figura 6.6 as configurações são bastante semelhantes para os vários níveis de enterramento, entretanto, a estrutura estando enterrada até a segunda camada, continua a demonstrar resultados um pouco divergentes e, a estrutura enterrada até a 1º camada mostra, na configuração, que os seus maiores deslocamentos ocorrem na superfície do solo.

A análise do quarto modo de vibração demonstra que as configurações são bastante parecidas, a diferença é que os maiores deslocamentos se dão em camadas diferentes para os diversos níveis de enterramento e, para a estrutura enterrada até a segunda camada, o resultado do deslocamento próximo à mesma é bem maior que os demais, ver Figura 6.7.

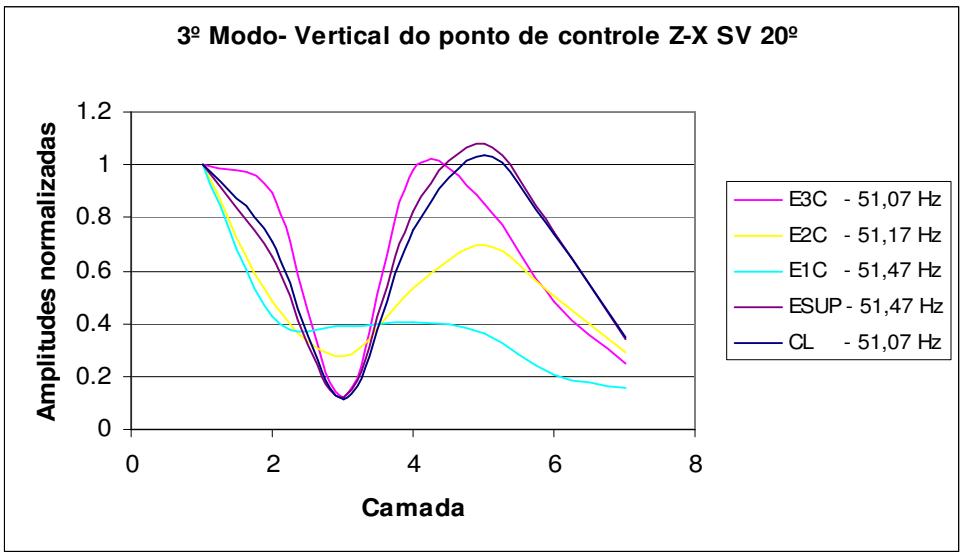


**Figura 6.6** - 3º Modo, vertical do ponto de controle, variação do nível de enterramento, movimento de controle Z-X, onda SV, α = 20º, solo 3.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421261/CA

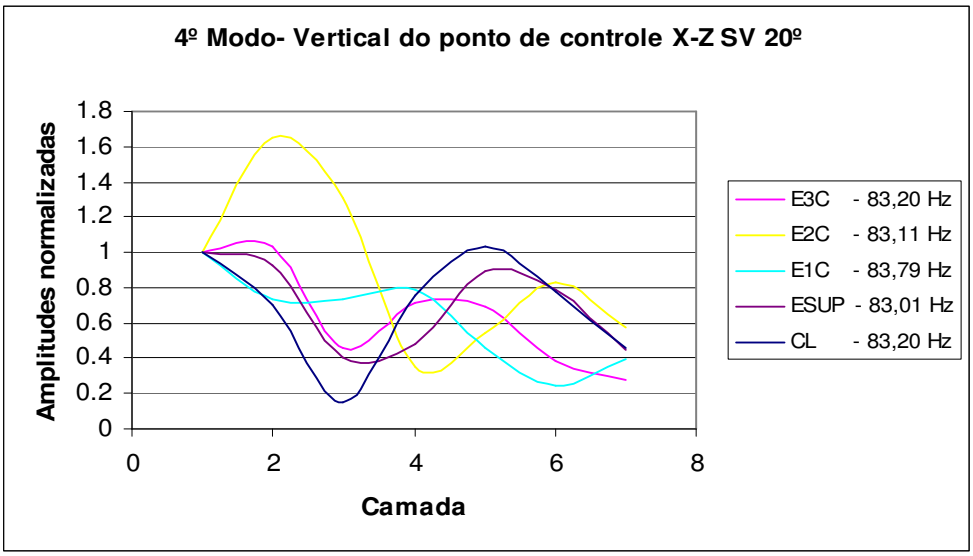


**Figura 6.7** - 4º Modo, vertical do ponto de controle, variação do nível de enterramento, movimento de controle X-Z, 2º modo, onda SV, α = 20º, solo 3.

Agora é analisada a propagação com a distância para os diferentes níveis de enterramento. Nesta análise são colocados pontos no solo a distâncias de 6 , 12 e 18 m do ponto de controle, ver Figura 6.1. Analisando a vertical do ponto de controle nessas distâncias, direção X-Z, os resultados demonstram que ainda ocorrem variações na freqüência do sistema; quanto menor a distância maior a variação não só da freqüência como também da configuração; as amplitudes dos deslocamentos são maiores, no 1º modo, para os níveis de enterramento na 3ª camada; as amplitudes dos deslocamentos são maiores, no 2º modo para o nível de enterramento na 1ª camada, ver Figura 6.8.

A seguir são observados os resultados para pontos localizados somente na superfície do solo para comprovar que a propagação a essas distâncias se daria de forma exponencial. Foram coletados os valores de pico das funções de transferência em cada distância mesmo com uma pequena variação na freqüência, pois, para uma mesmo nível de enterramento, ocorre uma pequena variação para as distâncias de 6, 12 e 18 m.

Os resultados encontrados levam a constatar que existe uma região em torno da estrutura que está sendo modificada e que, com o aumento da distância, ocorre uma atenuação levando as configurações a um mesmo patamar de resposta, ou seja, o próprio campo-livre. Ver Figura 6.9.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421261/CA

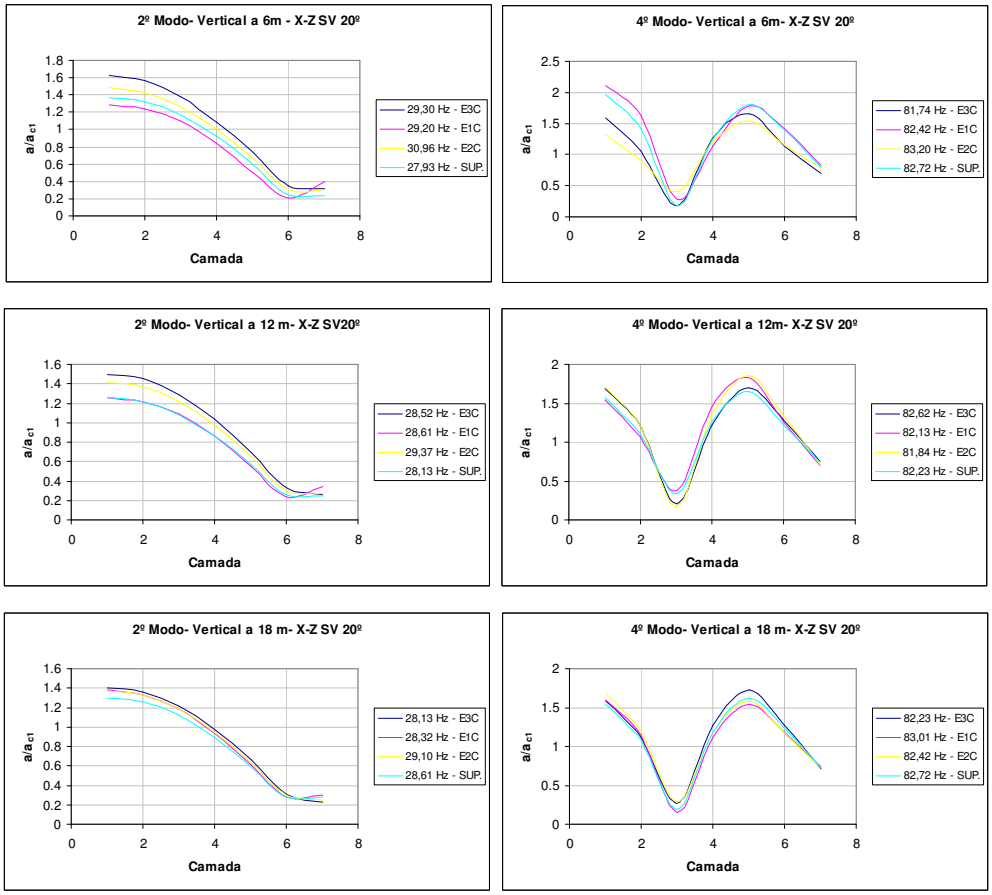


**Figura 6.8 -** Modos de vibração com a distância, variação do nível de enterramento, movimento de controle X-Z, onda SV, α = 20º, solo 3.

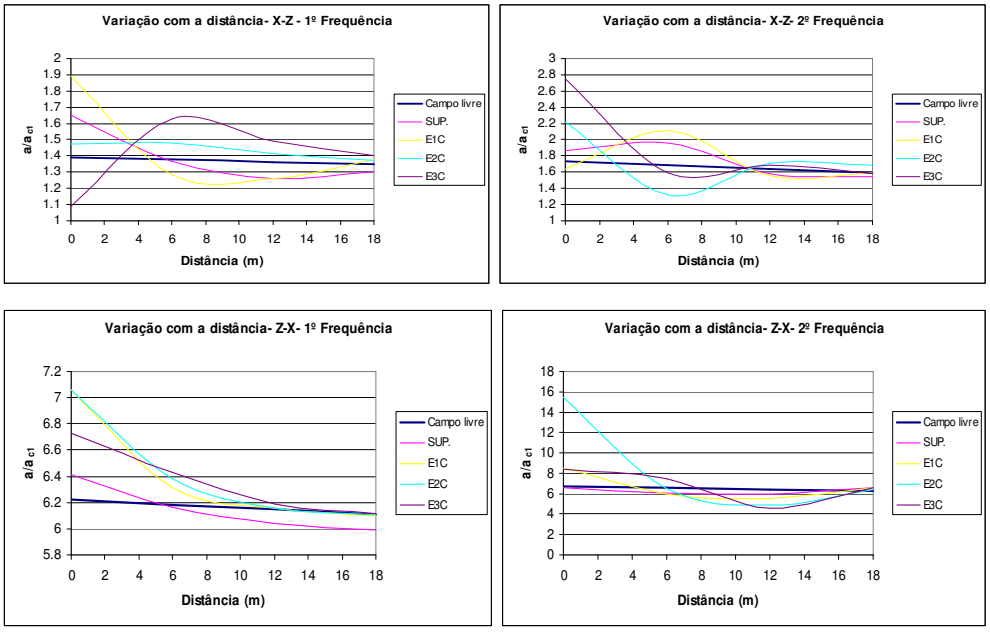


**Figura 6.9 -** Superfície do solo, variação com a distância para vários níveis de enterramento, movimento de controle X-Z e Z-Z, onda SV, α = 20º, solo 3.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421261/CA

## 6.3.
## Conclusões parciais (terreno + estrutura)

A introdução da estrutura no campo-livre modifica os modos de vibração, entretanto, prevalece a configuração do campo-livre; as freqüências sofrem poucas alterações para os vários níveis de enterramento, mas, para a estrutura enterrada até a segunda camada tem-se uma interação mais acentuada com o terreno.

São merecedores de destaque os seguintes pontos:

- ✓ A incorporação da estrutura ao campo livre é precedida pela remoção do solo correspondente ao volume da estrutura;
- ✓ A presença da estrutura, naturalmente, introduz modificações nas freqüências e modos do terreno e, não transparece padrão algum definido de comportamento em função da variação do nível de enterramento.
- ✓ Para as freqüências ímpares, modos horizontais, a inserção da estrutura no terreno produz os efeitos seguintes:
  - Na condição de Estrutura na Superfície, ESUP, as freqüências crescem em relação às do campo-livre, CL; percebe-se assim a influência da rigidez da estrutura aumentando discretamente as freqüências do conjunto, solo-estrutura;
  - À medida que se produz o enterramento, os valores das freqüências passam a baixar sob a influência da massa da estrutura que é inserida no lugar do solo escavado;
  - Quanto mais se prossegue o enterramento, a configuração modal respectiva afasta-se do campo-livre exibindo conformações afins às dos modos de mesmo valor da estrutura;
- ✓ Para as freqüências pares, o quadro é semelhante invertendo-se naturalmente a ordem: primeiro a influência da massa da estrutura reduzindo as freqüências do conjunto solo-estrutura, seguindo-se um acréscimo nessas freqüências em razão da rigidez da estrutura.
- ✓ Compreende-se que tais efeitos são moderados e sua amplitude está associada às relações de massa e freqüências próprias da estrutura e do campo-livre.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421261/CA

- ✓ As modificações no campo-livre estendem-se para além da estrutura até uma distância superior a três vezes a dimensão transversal da estrutura, claro fica que, para obter essa expansão de informação é necessária a criação de nós de interação para os pontos onde essas modificações sejam necessárias.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421261/CA