



XIV Congresso Brasileiro
de Pontes e Estruturas

Análise Dinâmica de Fundação Superficial de um Gerador por Meio do Programa PLAXIS

Kamila Andreia Alves Novo¹, Sergio Hampshire de Carvalho Santos²

¹ UFRJ / mila.tqr@poli.ufrj.br

² UFRJ / sergiohampshire@gmail.com

Resumo

Fundações de máquinas industriais estão sujeitas a cargas variáveis no tempo. Com isso, no projeto dessas estruturas é essencial a análise dinâmica, que tem por objetivo limitar as amplitudes de oscilações a valores admissíveis, tendo em vista evitar danos estruturais, ao meio ambiente e à máquina. Esse tipo de análise é complexo e pode ser simplificado por soluções aproximadas. Este trabalho tem por objetivo principal comparar e validar os resultados de análise dinâmica apresentados pelo programa computacional PLAXIS, que utiliza um método numérico, com os resultados obtidos por soluções analíticas. É analisada uma fundação superficial de um gerador submetida a cargas harmônicas em diferentes frequências, em solo homogêneo e heterogêneo, pelo programa PLAXIS, que utiliza o método dos elementos finitos e também por fórmulas analíticas.

Palavras-chave

análise dinâmica; métodos numéricos; análises comparativas.

Introdução

Os projetos estruturais podem ser analisados como problemas estáticos, quando as condições de contorno não variam no tempo ou variam em intervalos relativamente grandes, ou como problemas dinâmicos, considerando a variação no tempo e os efeitos inerciais. Apesar da simplificação, em alguns casos a análise estática é suficiente e necessária, uma vez que em muitas situações os efeitos inerciais podem ser desconsiderados.

Entretanto, quando esses efeitos inerciais não podem ser desconsiderados, por exemplo, em estruturas de bases de máquinas industriais que gerem vibrações, é necessário que seja realizada uma análise dinâmica, que tem por objetivo estudar o comportamento dessas estruturas ao longo do tempo.

A falta de análise dinâmica em estruturas submetidas a esforços vibratórios, ou a simplificação dessas forças dinâmicas por estáticas equivalentes, impossibilita o dimensionamento correto para prever efeitos dinâmicos, como por exemplo, a ressonância, que pode gerar deslocamentos e vibrações excessivas na estrutura, podendo causar falha estrutural, fadiga do material ou desconforto no uso. Esses efeitos podem ser evitados com a consideração correta da rigidez e do amortecimento do sistema.

Em projetos de fundações de máquinas, a análise dinâmica tem por objetivo principal limitar as amplitudes de oscilações a valores admissíveis, tendo em vista evitar os danos supracitados. Essa limitação está ligada ao afastamento das frequências do sistema das frequências próprias, ou seja, da ressonância. Logo, é importante que se estude o comportamento dessas estruturas ao longo do tempo em diferentes frequências oscilatórias.

Com o avanço tecnológico e o desenvolvimento de rotinas computacionais para automatização da análise de projetos de engenharia, a solução direta de problemas dinâmicos passou a ser mais acessível. Um dos métodos mais utilizados em programas computacionais de análise é o Método dos Elementos Finitos (MEF), que é um método numérico aproximado largamente utilizado tanto para problemas estáticos como para problemas dinâmicos. Porém, esses métodos apresentam soluções aproximadas, com uma margem de erro, sendo necessária uma validação de resultados obtidos com modelos processados em determinados níveis de discretização, com soluções analíticas. Este trabalho resume resultados apresentados na Dissertação de Mestrado da primeira autora, sob a orientação do segundo autor (NOVO, 2023). O trabalho também dá continuidade aos estudos apresentados por OLIVEIRA (2021).

Objetivo

Esta pesquisa objetiva estudar a interação entre o solo e estruturas de fundações de máquinas, analisando as amplitudes de deslocamentos em função das frequências, tendo em vista avaliar o comportamento dessas fundações quando submetidas a carregamentos dinâmicos. Estes estudos são realizados por meio do método dos elementos finitos e validados por meio de soluções analíticas.

Motivação

Em diversos projetos industriais de engenharia nos quais seria necessário um estudo dinâmico, as cargas dinâmicas são muitas vezes simplificadas por cargas estáticas equivalentes. Sendo assim, são obtidos resultados aproximados, que muitas vezes não são validados, uma vez que muitos dos problemas dinâmicos não possuem respostas conhecidas ou consolidadas.

Essas simplificações podem gerar projetos que sejam superdimensionados ou subdimensionados, causando gastos desnecessários ou necessidade de futura recuperação estrutural.

Metodologia

O programa computacional a ser utilizado, o PLAXIS (2020), foi desenvolvido para analisar problemas geotécnicos de Engenharia por meio do Método dos Elementos Finitos, ou seja, com a criação e resolução de uma malha construída a partir de um modelo representativo do problema real. No programa é necessário definir uma faixa de solo que será analisada e atribuir os parâmetros de material para cada camada desta faixa. Em seguida, a estrutura é modelada e são definidas as condições de contorno. A partir da geometria, é necessário definir a dimensão da malha, ou seja, dividir o modelo em nós e elementos. Neste passo, são definidas condições iniciais, como a profundidade do nível d'água e é gerado o campo inicial de tensões. Definida a geometria e as condições de contorno, é possível definir as fases de análise da estrutura e por fim, são extraídos os resultados em formato de quadros e tabelas.

Revisão Bibliográfica

O problema de uma fundação rígida submetida à um carregamento harmônico, pode ser resolvido por meio de uma simplificação para um modelo de massas e molas com seis graus de liberdade, recaindo em um problema de seis equações diferenciais de movimento. Os pioneiros no estudo desse caso em solo homogêneo foram Richart *et al.* (1970), responsáveis pelo desenvolvimento de expressões analíticas para determinação dos coeficientes de rigidez e amortecimento atribuídos a cada grau de liberdade, independentes da frequência, para blocos circulares. Os próximos estudos atualizaram as formulações para cálculo dos coeficientes de rigidez, mantendo as formulações de amortecimento. Wolf e Gazetas (1994) superaram a aproximação para o estudo de fundações retangulares e desenvolveram a própria formulação para este caso, em solo homogêneo. No entanto, a consideração de que o solo sob a fundação é perfeitamente homogêneo e semi-infinito ainda é uma simplificação.

Para a solução em solos estratificados, temos os estudos de Luco (1974) que aproximou ainda mais as formulações anteriores a um caso real, permitindo a consideração da variação das propriedades do solo em diferentes camadas ao longo da profundidade.

Em casos específicos de fundações retangulares superficiais sobre solo homogêneo, o *software* BLOCKSOLVER (Coutinho e Mendes, 2007) efetua toda a análise de forma automatizada, utilizando a formulação de Wolf e Gazetas (1994). O programa calcula automaticamente ou recebe como dados iniciais os coeficientes de impedância (molas e amortecedores), concentrados no centro geométrico da face inferior do bloco de fundação, obtendo como resultados os deslocamentos máximos do centro de gravidade do bloco em função das frequências excitadoras.

O programa computacional PLAXIS V20 (2020) utiliza o método dos elementos finitos para a análise de problemas geotécnicos. São utilizadas as teorias geotécnicas da deformação, do fluxo de água e da consolidação, com suas respectivas formulações pelo Método dos Elementos Finitos.

Desenvolvimento

Na fase de desenvolvimento da pesquisa, foram analisados modelos de fundações superficiais de máquinas submetidas a cargas harmônicas devido à operação das máquinas, com raios iguais a 0,50m e 1,00m. Inicialmente foram considerados modelos com solo homogêneo, com a consideração de apenas uma camada com as mesmas propriedades do material, como mostrado na Figura 1. Em seguida, foram realizadas análises considerando o solo heterogêneo, com a diferenciação das propriedades do solo em duas camadas, conforme figura 2.

Todos os modelos foram analisados considerando casos com e sem amortecimento histerético, correspondente ao amortecimento do material. Quando considerado, a fração de amortecimento crítica foi assumida 0,5%.

O tipo de modelo estudado é o axissimétrico, uma vez que suas propriedades apresentam assimetria em relação a um eixo vertical, com elementos de 15 nós. Em todos os modelos fez-se uso da simetria do problema para facilitar a modelagem, sendo assim, apenas metade de uma seção foi representada.

As deformações foram impedidas nas duas direções na borda inferior do modelo e também na direção horizontal nas bordas laterais. Além disso, na construção do modelo, condições de contorno especiais foram consideradas na análise dinâmica, tendo em vista atender ao fato de que o solo é um meio semi-infinito e evitar que as ondas fossem refletidas nos limites do modelo, de forma a provocar perturbações.

Em todas as análises foram consideradas mais de uma frequência de oscilação, sendo elas: 1Hz, 10Hz, 20Hz e a frequência de ressonância (ver o estudo completo em NOVO, 2023).

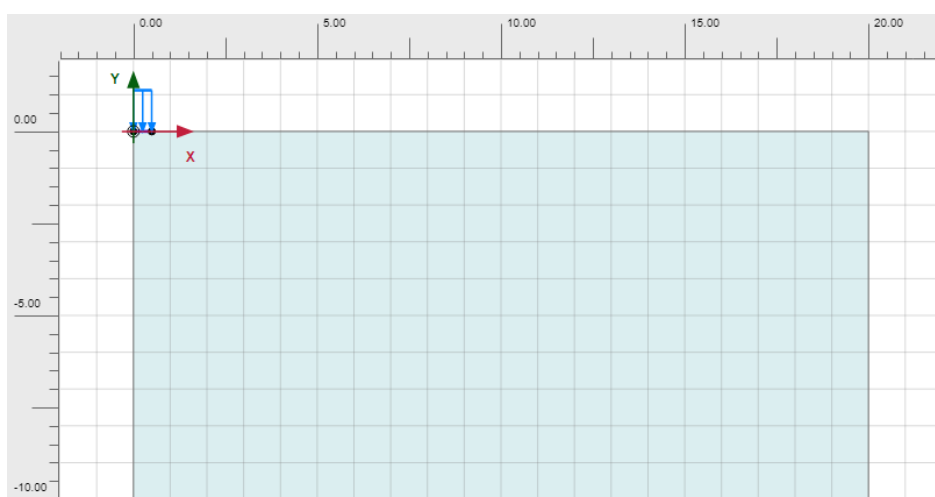


Figura 1 - Modelo no input do programa PLAXIS – Solo Homogêneo

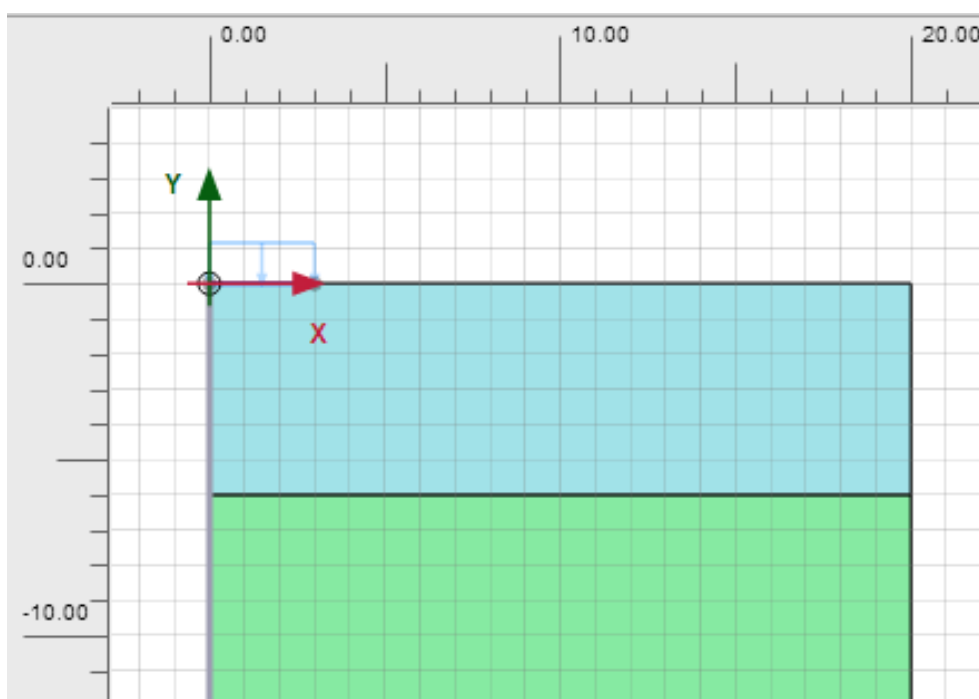


Figura 2 – Modelo no input do programa PLAXIS – Solo Heterogêneo

Análise Prática

Com a certificação dos resultados obtidos nas análises dinâmicas com o programa PLAXIS, com os modelos apresentados anteriormente, será apresentada uma aplicação prática.

Para exemplo prático, é apresentada a fundação direta de uma motobomba, já estudada por SANTOS (2020) utilizando o programa BLOCKSOLVER, desenvolvido por COUTINHO e MENDES (2007).

Apresenta-se um resumo dos dados do problema, que podem ser obtidos de forma completa em SANTOS (2020), adaptados para a análise este artigo. A geometria do bloco é dada na Figura 3.

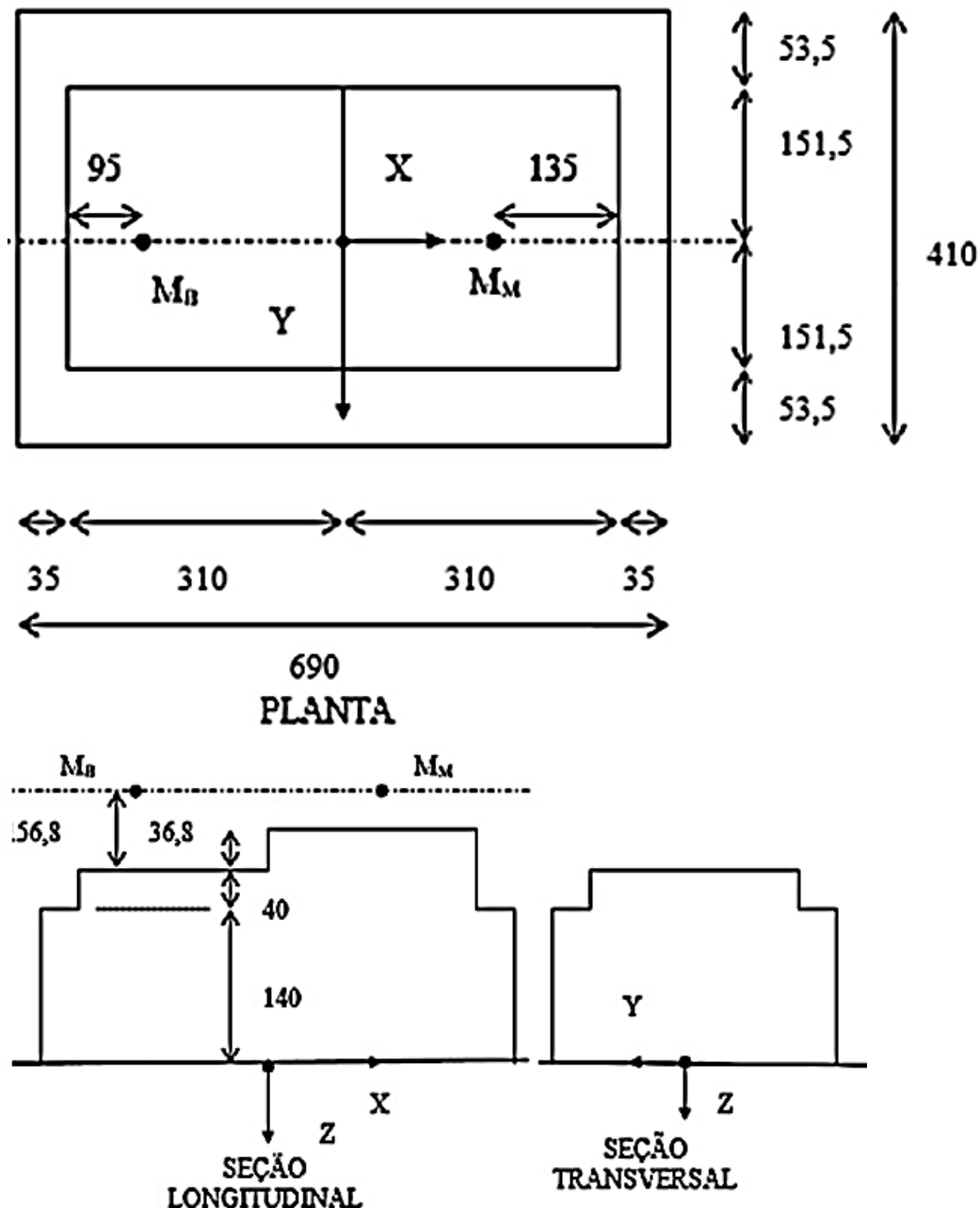


Figura 3 – Geometria da fundação da motobomba

Propriedades consideradas para o solo, no modelo de solo homogêneo:

$$\nu = 0,30 ; \rho = 1,8 \text{ Mg/m}^3 ; G = 45000 \text{ kN/m}^2$$

Propriedades consideradas para o solo, modelo de solo heterogêneo:

$$\nu = 0,30 ; \rho = 1,8 \text{ Mg/m}^3$$

Primeiros 6 m: $G = 35000 \text{ kN/m}^2$ a 58000 kN/m^2

Abaixo dos primeiros 6 m: $G = 132000 \text{ kN/m}^2$

Massas da bomba e do motor:

$$M_B = 8,27 \text{ t} ; M_M = 11,70 \text{ t}$$

Frequência de operação: 710 rpm = 11,83 Hz

Forças nos equipamentos (bomba e motor):

$$F_B = 9,39 \text{ kN} ; F_M = 13,29 \text{ kN}$$

Análise de fundação rígida em solo homogêneo

O Programa BLOCKSOLVER resolve o problema de fundações diretas sobre solo homogêneo de forma totalmente automatizada.

A seguir são apresentadas as telas de solução do programa.

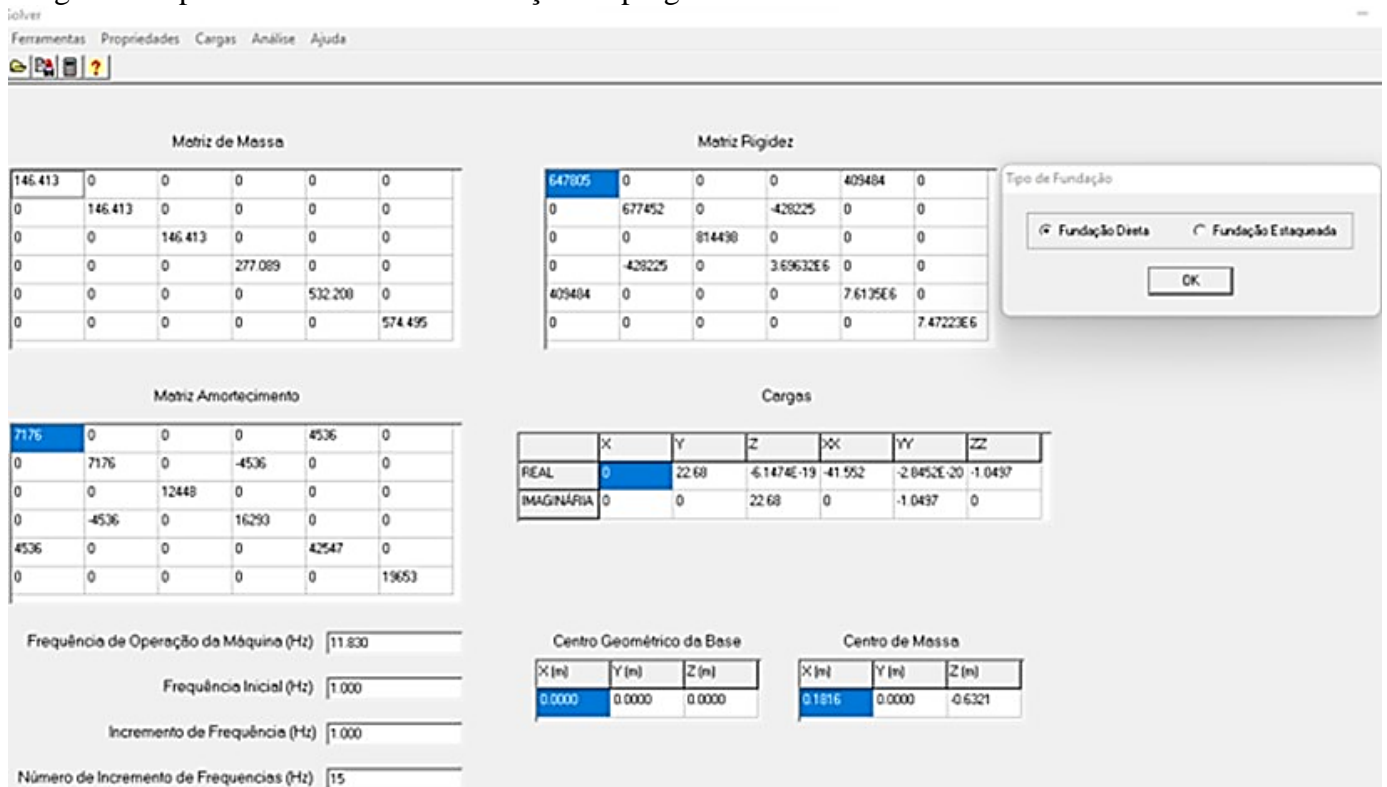


Figura 4 – Tela do BLOCKSOLVER – Matrizes (Tela 1).

Geometria

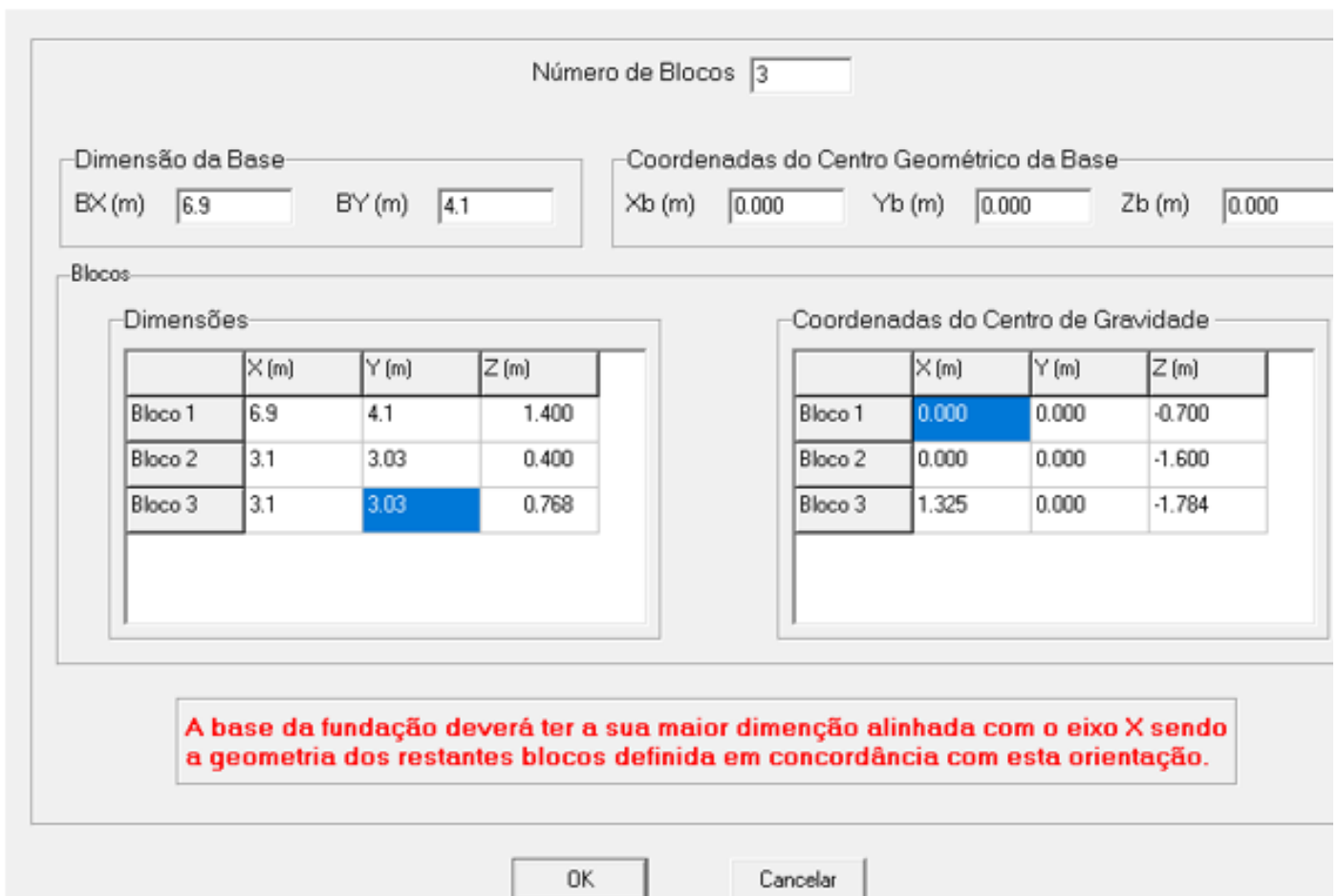


Figura 5 – Tela do BLOCKSOLVER – Geometria da fundação (Tela 2).

Número de Massas Concentradas

Pesos Volumétricos dos Blocos

	(Ton/m ³)
Bloco 1	2.500
Bloco 2	2.500
Bloco 3	2.500

Coordenadas das Massas e Respectivos Valores

	X	Y	Z	(Ton)
Massa 1	-2.15	0.000	1.200	8.270
Massa 2	1.75	0.000	1.200	11.700

OK Cancelar

Módulo de Deformação Transversal (KN/m²)

Coefficiente de Poisson

Massa Volúmica (ton/m³)

OK Cancelar

Figura 6 – Telas do BLOCKSOLVER – Massas concentradas e propriedades do solo (Telas 3 e 4).

Amplitudes Máximas de Carregamento

	X (KN)	Y (KN)	Z (KN)	XX (KN.m)	YY (KN.m)	ZZ (KN.m)
Massa Concentrada 1	0.000	9.390	9.390	0.000	0.000	0.000
Massa Concentrada 2	0.000	13.290	13.290	0.000	0.000	0.000

Ângulos de Fase (graus)

	X	Y	Z	XX	YY	ZZ
Massa Concentrada 1	0.000	0.000	90.000	0.000	0.000	0.000
Massa Concentrada 2	0.000	0.000	90.000	0.000	0.000	0.000

OK Cancelar

Frequência de Operação da Máquina (Hz)

Frequência Inicial (Hz)

Incremento de Frequência (Hz)

Número de Incremento de Frequências (Hz)

OK Cancelar

Figura 7 – Telas do BLOCKSOLVER – Carregamentos e frequências de operação (Telas 5 e 6).

Resultados para a Frequência da Máquina

Frequência de Operação:

Translações:

X (m):

Y (m):

Z (m):

Rotações:

X (rad):

Y (rad):

Z (rad):

Fechar

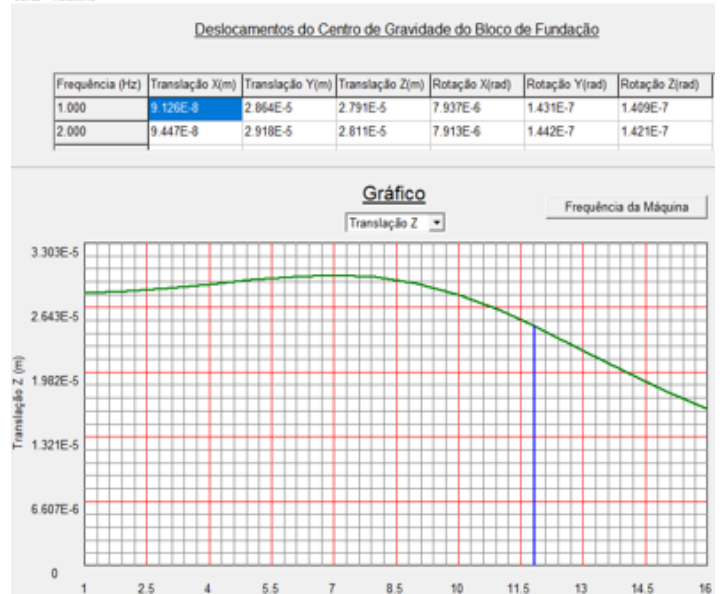


Figura 8 – Telas do BLOCKSOLVER – Resultados (Telas 7 e 8).

O deslocamento vertical para solo homogêneo, obtido com o programa BLOCKSOLVER é então 24,51 µm.

Agora apresenta-se a análise com o PLAXIS. A fundação analisada foi modelada com raio de 3m, equivalente aproximadamente às dimensões retangulares de 6,90m x 4,10m do caso estudado, em solo homogêneo.

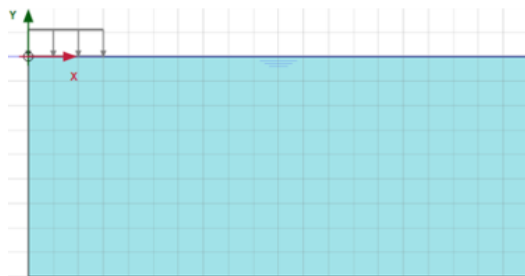


Figura 9 – Tela do PLAXIS – Modelo em solo homogêneo

Tabela 1 – Propriedades do solo e da máquina

Propriedades do solo		
Parâmetro		
Modelo	Linear Elástico	
Tipo	Drenante	
Peso específico	18	kN/m ³
Peso específico saturado	18	kN/m ³
Coefficiente de Poisson	0.3	
Módulo de elasticidade transversal	45	MPa
K0x	0.5	
Propriedades da máquina		
Parâmetro		
Modelo	Motobomba	
Massa bomba	8,27	t
Massa motor	11,70	t
Carga	Harmônica	
Amplitude	10	
Ângulo de fase	0	°
Intervalo dinâmico	0,5	s
Frequência de operação	11,83	Hz

A seguir são apresentados os deslocamentos variando no tempo obtidos pelo programa PLAXIS.

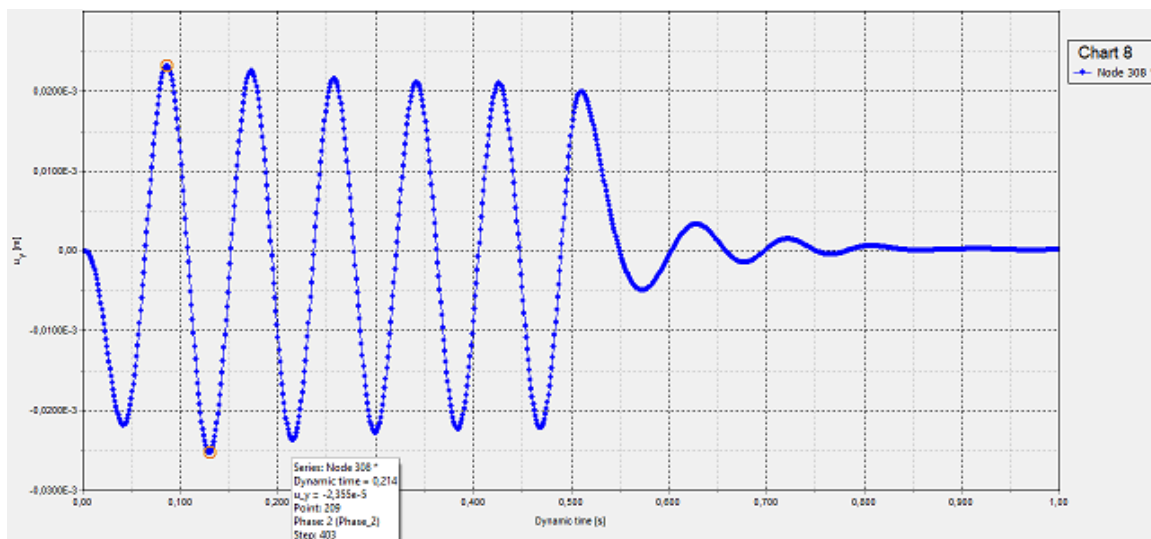


Figura 10 – Gráfico de Deslocamento Vertical x Tempo dinâmico.

O deslocamento vertical para solo homogêneo, obtido com o programa PLAXIS é então 23,55 µm.

Análise de fundação rígida em solo heterogêneo

A análise para solo heterogêneo se baseará nos resultados obtidos com a formulação de Luco (1974). Os resultados são obtidos em uma frequência adimensional a_0 que corresponde a:

$$a_0 = \frac{\bar{\omega}r}{V_{s1}} = \frac{2 \times \pi \times 11,83 \times 3}{\sqrt{35000/1,8}} = 1,6$$

$$a_0 = 1,6:$$

$$K = K_{luco} = 464726 \text{ kN/m}$$

$$C = \frac{Cluco}{\bar{\omega}} = \frac{634872}{2 \times \pi \times 11,83} = 8541,3 \text{ kNs/m}$$

Valores de G_0 e ρ_0 fictícios que reproduzem K e C no BLOCKSOLVER para considerar solo heterogêneo:

$$K = \frac{4Gr}{1-\nu}; 464726 = \frac{4G_0 \times 3}{1-0,3}; G_0 = 27109 \text{ kN/m}^3$$

$$C = \frac{3,4r^2}{1-\nu} \sqrt{\rho G}; 8541,3 = \frac{3,4 \times 3^2}{1-0,3} \sqrt{\rho_0 \cdot 27109}; \rho_0 = 1,408 \text{ t/m}^3$$

A seguir são apresentadas as telas de solução do programa, alteradas relativamente às do solo homogêneo.

The screenshot displays the BLOCKSOLVER software interface with several matrices and parameters:

- Matriz de Massa:** A 6x6 matrix with values: [146.413, 0, 0, 0, 0, 0; 0, 146.413, 0, 0, 0, 0; 0, 0, 146.413, 0, 0, 0; 0, 0, 0, 277.089, 0, 0; 0, 0, 0, 0, 532.208, 0; 0, 0, 0, 0, 0, 574.495].
- Matriz Rigidez:** A 6x6 matrix with values: [390252, 0, 0, 0, 246683, 0; 0, 408112, 0, -257972, 0, 0; 0, 0, 430672, 0, 0, 0; 0, -257972, 0, 2.22675E6, 0, 0; 246683, 0, 0, 0, 4.50954E6, 0; 0, 0, 0, 0, 0, 4.50744E6].
- Matriz Amortecimento:** A 6x6 matrix with values: [4326, 0, 0, 0, -3114, 0; 0, 4326, 0, -3114, 0, 0; 0, 0, 8546, 0, 0, 0; 0, -3114, 0, 10741, 0, 0; 3114, 0, 0, 0, 28143, 0; 0, 0, 0, 0, 0, 12643].
- Cargas:** A table with columns X, Y, Z, XX, YY, ZZ. Values for REAL: X=0, Y=22.68, Z=6.1474E-19, XX=41.952, YY=2.8453E-20, ZZ=-1.0497. Values for IMAGINARIA: X=0, Y=0, Z=22.68, XX=0, YY=-1.0497, ZZ=0.
- Centro Geométrico da Base:** A table with columns X(m), Y(m), Z(m). Values: X=0.0000, Y=0.0000, Z=0.0000.
- Centro de Massa:** A table with columns X(m), Y(m), Z(m). Values: X=0.1816, Y=0.0000, Z=-0.6321.
- Parâmetros de Operação:**
 - Frequência de Operação da Máquina (Hz): 11.830
 - Frequência Inicial (Hz): 1.000
 - Incremento de Frequência (Hz): 1.000
 - Número de Incremento de Frequências (Hz): 15
- Tipo de Fundação:** Radio buttons for 'Fundação Direta' (selected) and 'Fundação Entalhada'. An OK button is present.

Figura 11 – Tela do BLOCKSOLVER – Matrizes

The screenshot displays the soil properties dialog box in BLOCKSOLVER:

- Módulo de Deformação Transversal (KN/m²):** 27109
- Coefficiente de Poisson:** 0.300
- Massa Volúmica (ton/m³):** 1.4082
- Buttons: OK, Cancelar

Figura 12 – Tela do BLOCKSOLVER – Propriedades do solo

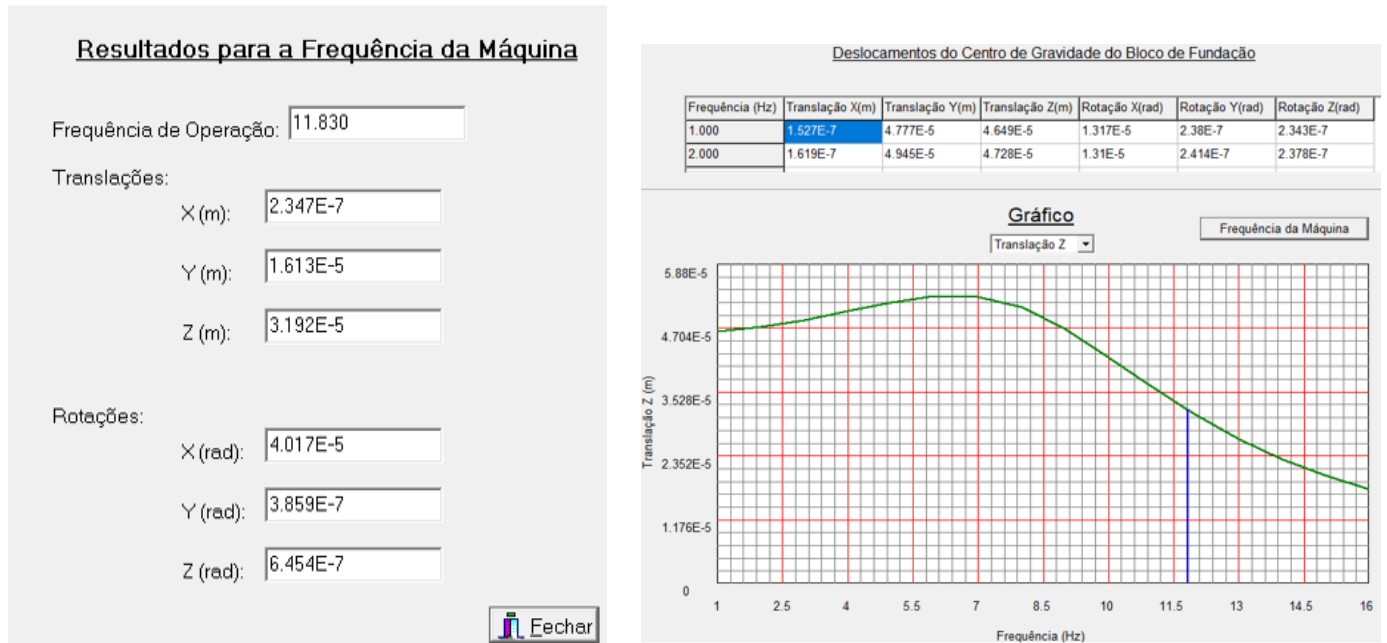


Figura 13 – Telas do BLOCKSOLVER – Resultados

O deslocamento vertical para solo heterogêneo, obtido com o programa BLOCKSOLVER é então 31,92 μm . A fundação analisada foi modelada no PLAXIS com raio de 3m, equivalente aproximadamente às dimensões retangulares de 6,90m x 4,10m do, em solo heterogêneo.



Figura 14 – Tela do PLAXIS – Modelo em solo heterogêneo.

Tabela 2 – Propriedades do solo

Propriedades do solo		
Parâmetro		
Modelo	Linear Elástico	
Tipo	Drenante	
Peso específico	18	kN/m ³
Peso específico saturado	18	kN/m ³
Coeficiente de Poisson	0.35	
Módulo de elasticidade transversal	35 a 132	MPa
K0x	0.5	

A seguir são apresentados os deslocamentos no tempo obtidos pelo programa PLAXIS.

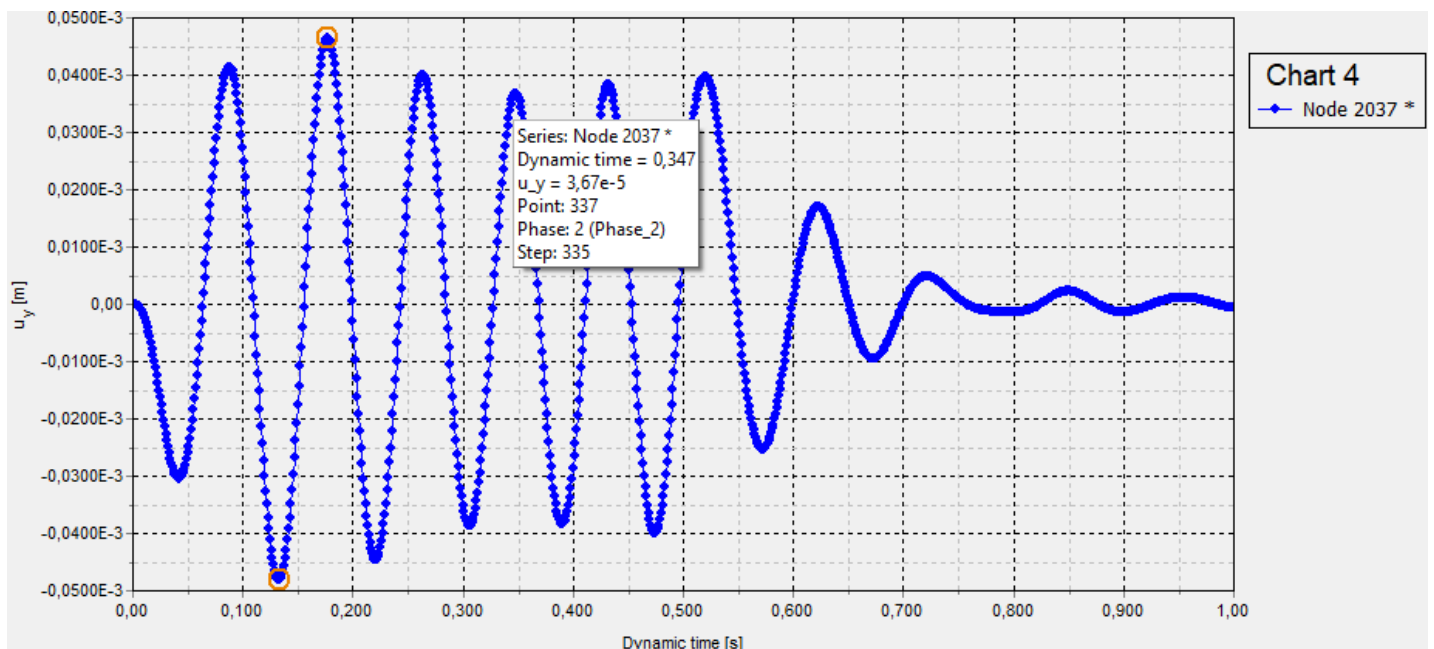


Figura 15 – Gráfico de Deslocamento Vertical x Tempo dinâmico.

O deslocamento vertical para solo heterogêneo, obtido com o programa PLAXIS é então 36,70 μm .

Conclusões

A partir dos resultados apresentados, é possível concluir que:

Os modelos analisados pelo programa PLAXIS geraram resultados com grande concordância com os obtidos analiticamente, o que autoriza o uso do programa PLAXIS em situações mais gerais e complexas que as estudadas.

Na análise prática, mostrou-se como é possível utilizar todas as facilidades do programa BLOCKSOLVER para o caso do solo heterogêneo, a princípio não coberto pelo programa, a partir de resultados obtidos com a formulação de Luco.

Mostrou-se também como esta modelagem pode ser feita com o programa PLAXIS, aproximando-se a fundação retangular por uma circular equivalente, obtendo-se resultados bastante satisfatórios.

Referências Bibliográficas

- COUTINHO, D. S. A, MENDES, C. H. F. Projecto Automatizado de Fundações de Máquinas – Projeto de Graduação, Rio de Janeiro: UFRJ, Escola Politécnica, 2007.
- LUCO, J. E. Impedance Functions for a Rigid Foundation on a Layered Medium. Nuclear Engineering and Design, 1974.
- LYSMER, J. KUHLEMEYER, R. L. Finite Dynamic Model for Infinite Media. Journal of Engineering Mechanics Division, 95, ASCE, 1969.
- NOVO, K. A. A., Análise Dinâmica de Fundação Superficial de um Gerador por Meio do Programa PLAXIS. Rio de Janeiro: UFRJ, Programa de Projeto de Estruturas, Dissertação de Mestrado, 2023.
- OLIVEIRA, A. V. B. R. Análise Numérica de Funções de Impedância em Solo Homogêneo. – Rio de Janeiro: UFRJ, Projeto de Graduação, Escola Politécnica, 2021.
- PLAXIS, 2020. Reference Manual.
- POULOS, H. G. – Elastic solutions for soil and rock mechanics, John Wiley, New York, 1940.
- RICHART, F. E., WOODS, R. D. e HALL Jr., J. R. Vibrations of Soils and Foundations, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1970.
- SANTOS, S. H. C., Fundações de Máquinas, Apostila, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Escola Politécnica, Departamento de Estruturas, 2020.
- WOLF, J.P., Foundation Vibration Analysis Using Simple Physical Models, Prentice Hall, New Jersey, 1994.