



MODELAGEM NUMÉRICA E ESTUDO DA RESPOSTA DINÂMICA DE SISTEMAS ESTRUTURAIS PARA FUNDAÇÕES DE MÁQUINAS

Douglas Martins Cavalcanti Rodrigues

eng.douglas.rodrigues@gmail.com

Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGECIV/FEN/UERJ

Rua São Francisco Xavier, N° 524, Maracanã, 20550-900, Rio de Janeiro/RJ, Brasil

José Guilherme Santos da Silva

Rodrigo Bird Burgos

jgss@uerj.br

rburgos@eng.uerj.br

Departamento de Estruturas e Fundações, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ

Rua São Francisco Xavier, N° 524, Maracanã, 20550-900, Rio de Janeiro/RJ, Brasil

Resumo. *Este trabalho de pesquisa tem por objetivo principal a análise dinâmica determinística, no domínio do tempo, de um sistema estrutural de fundações em concreto armado, quando submetido à ação de um compressor de grande porte instalado em uma indústria para produção de gases do ar. O sistema estrutural em estudo tem como base uma fundação direta com dimensões aproximadas, em planta, de 15m x 12m, necessária para suportar um conjunto compressor-motor de cerca de 190 toneladas, posicionado a 4m de um piso de referência. Para a modelagem numérica do sistema estrutural são empregadas técnicas usuais de discretização, via método dos elementos finitos (MEF), por meio do software CSi SAP2000 V.17.2.0. Com base na metodologia de análise desenvolvida, a resposta estrutural dinâmica do sistema de fundações em concreto armado é devidamente avaliada, em termos dos valores das frequências naturais, deslocamentos e velocidades. Os valores máximos da resposta dinâmica do sistema são comparados com os valores limites recomendados por normas e recomendações de projeto, objetivando uma avaliação criteriosa, no que tange ao desempenho da estrutura em termos de vibrações excessivas e no que tange aos aspectos econômicos envolvidos na concepção do sistema de fundações.*

Palavras-chave: *Fundações de máquinas, Dinâmica estrutural, Modelagem numérica.*

1 INTRODUÇÃO

O dimensionamento de sistemas de fundações para suporte de máquinas rotativas consiste em uma tarefa bastante complexa para os engenheiros civis, pelo fato de que as diversas solicitações envolvidas no problema em questão apresentam naturezas distintas, tais sejam cargas do tipo estáticas ou mesmo ações de caráter predominantemente dinâmico. Esse dimensionamento, caso seja realizado de forma inadequada poderá vir a resultar em fundações superdimensionadas (antieconômicas) ou mesmo, na situação contrária, em fundações subdimensionadas, ocasionando danos aos equipamentos locados sobre a estrutura de suporte, à própria fundação ou até mesmo para as estruturas vizinhas, gerando perdas na produção e, também, riscos à segurança e saúde das pessoas (Dalbone & Sánchez Filho, 2011); (Machado, 2010); (Rodrigues, 2016); (Souza Costa, 2013).

Cabe ressaltar que o projeto de fundações de máquinas engloba, de maneira geral, a análise do equipamento rotativo e as forças dinâmicas geradas durante a operação do mesmo, a avaliação das características do solo e das fundações, a elaboração do projeto para o modelo estrutural e, evidentemente, o estudo da resposta estrutural dinâmica do sistema, a verificação dos deslocamentos, velocidades e acelerações máximas e suas tolerâncias, o projeto dos isoladores (apenas em situações necessárias), o dimensionamento estrutural e, ainda, verificação das tensões máximas no solo (Machado, 2010).

As máquinas rotativas produzem solicitações dinâmicas que são transferidas às fundações por meio de movimentos vibratórios, ou em casos de máquinas sensíveis, estas recebem vibrações por intermédio das fundações. As máquinas podem ser classificadas como: a) as que produzem forças de impacto como martelos de forjas e prensas; b) as que produzem forças periódicas como motores de pistão como compressores e motores à explosão; c) máquinas de alta velocidade, tais como turbinas e compressores rotativos; d) outras máquinas. Estes equipamentos também podem ser classificados com base os valores de suas frequências de operação sendo: a) baixa a média frequência, aquelas com frequências até 500 rpm; b) as de média a altas frequências, com frequências entre 500 a 1000 rpm; c) alta frequência, com frequências superiores a 1000 rpm (Dalbone & Sánchez Filho, 2011).

Considerando-se o estudo da resposta estrutural dinâmica de um sistema de fundações, o principal objetivo do projetista é o de analisar os valores máximos dos deslocamentos, velocidades e acelerações, objetivando garantir que o conjunto equipamentos-fundação trabalhe de forma segura, de preferência, com frequências naturais afastadas tanto quanto seja possível das frequências ressonantes, procurando assegurar o funcionamento adequado dos equipamentos e, bem como, garantindo o conforto humano (Souza Costa, 2013). Deste modo, faz-se necessário analisar e estudar esses movimentos vibratórios durante a fase de projeto da fundação de modo a evitar danos aos equipamentos e às pessoas.

Convém chamar a atenção do leitor para o fato de que várias das simplificações usuais adotadas para a análise dinâmica de sistemas de fundações decorrem de procedimentos referentes à consideração dos equipamentos mecânicos e as fundações como sendo sistemas dinâmicos independentes. Tal procedimento pode levar a resultados pouco confiáveis quando se trata do estudo da resposta estrutural dinâmica do sistema global (Machado, 2010); (Rodrigues, 2016); (Souza Costa, 2013). As máquinas, por induzirem vibrações às suas fundações, devem ser desligadas das estruturas e outras fundações. Esse cenário ideal de projeto nem sempre é possível, portanto quando esse requisito for inviável, deve-se tomar cuidados especiais para evitar que uma transmissão de vibrações ocorra (Machado, 2010).

Finalmente, considerando-se a relevância do tema de pesquisa e a complexidade do assunto, este trabalho de pesquisa tem por objetivo principal a análise dinâmica determinística, no domínio do tempo, de um sistema estrutural de fundações em concreto armado, quando submetido à ação de um compressor de grande porte instalado em uma indústria para produção de gases do ar. O sistema estrutural em estudo tem como base uma fundação direta com dimensões aproximadas, em planta, de 15m x 12m, necessária para suportar um conjunto compressor-motor de cerca de 190 toneladas (Rodrigues, 2016).

Para a modelagem numérica do sistema estrutural são empregadas técnicas usuais de discretização, via método dos elementos finitos (MEF), por meio do software CSi SAP2000 V.17.2.0 (SAP2000, 2016). Com base na metodologia de análise desenvolvida, a resposta estrutural dinâmica do sistema de fundações em concreto armado é devidamente avaliada, em termos dos valores das frequências naturais, deslocamentos, velocidades e acelerações de pico. Os valores máximos da resposta dinâmica do sistema são comparados com os valores limites recomendados por normas e recomendações de projeto, objetivando uma avaliação criteriosa, no que tange ao desempenho da estrutura em termos de vibrações excessivas e no que tange aos aspectos econômicos envolvidos na concepção do sistema de fundações.

2 DESCRIÇÃO DO MODELO ESTRUTURAL

O sistema estrutural investigado refere-se a uma fundação de concreto armado concebida para suportar um sistema motor-compressor, localizada em uma usina siderúrgica em Ouro Branco/MG, Brasil. O modelo estrutural é constituído por um bloco de concreto armado apoiado sobre 20 estacas do tipo hélice com diâmetro de 0,50 m e comprimento aproximado da ordem de 8,50 m. O concreto utilizado no bloco é da classe C30 e o módulo de elasticidade do material é da ordem de $2,60 \times 10^4$ MPa, enquanto que o concreto utilizado nas estacas é da classe C20 e o módulo de elasticidade é da ordem de $2,13 \times 10^4$ MPa. As dimensões em planta do modelo estrutural investigado são de 15,00 m x 11,75 m. O motor fica sobre um pedestal com dimensões, em planta, de 5,55 m x 3,15 m e altura de 3,84 m, enquanto que o compressor fica apoiado sobre dois pedestais, sendo um com dimensões, em planta, de 2,40 m x 1,50 m e outro com 2,40 m x 0,60 m, ambos com altura de 2,66 m. Em seguida, as Figuras 1 a 6, ilustram detalhadamente o sistema estrutural de concreto armado e o maquinário atuante.

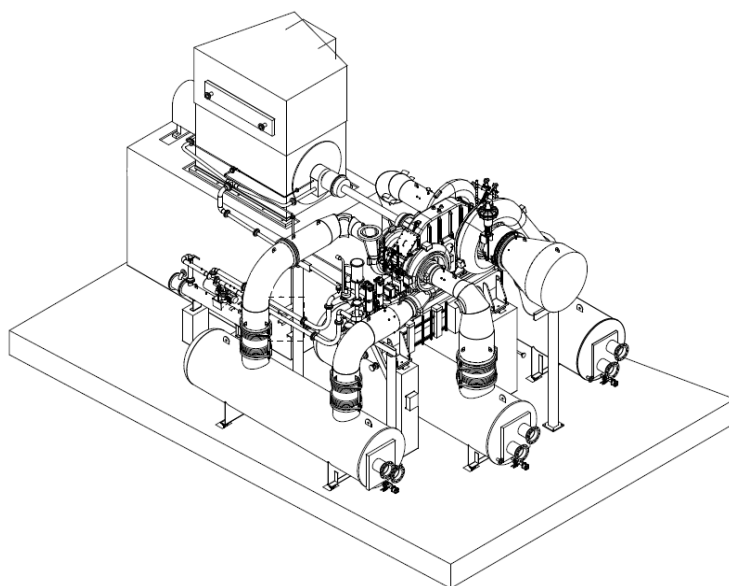


Figura 1. Modelo estrutural: vista isométrica do conjunto fundação-equipamento

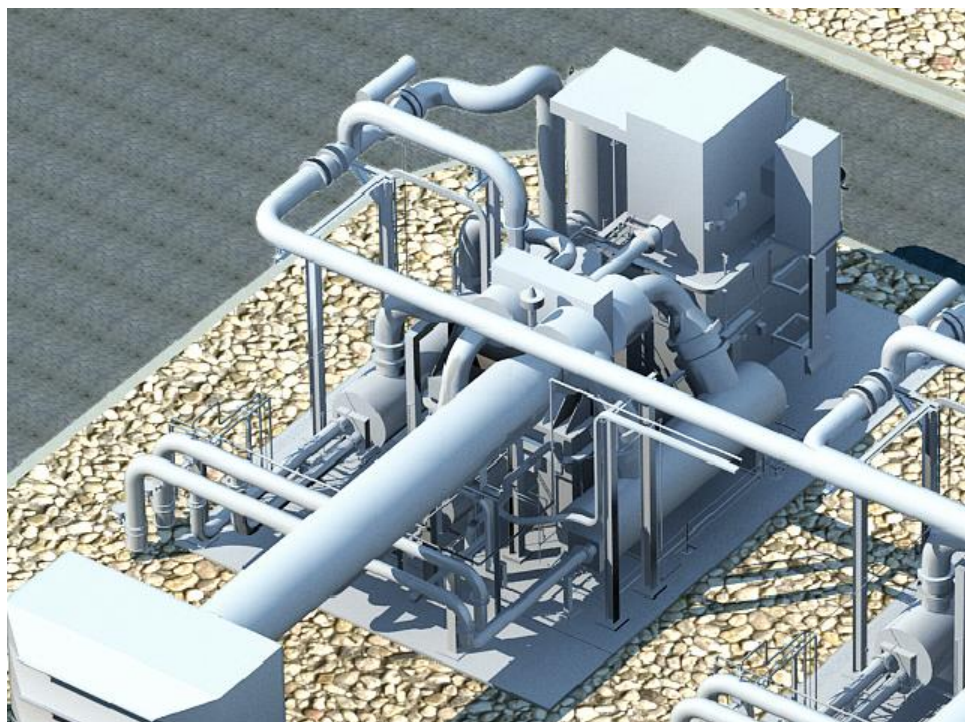


Figura 2. Modelo estrutural: vista isométrica do conjunto fundação-equipamento (Maquete 3D)

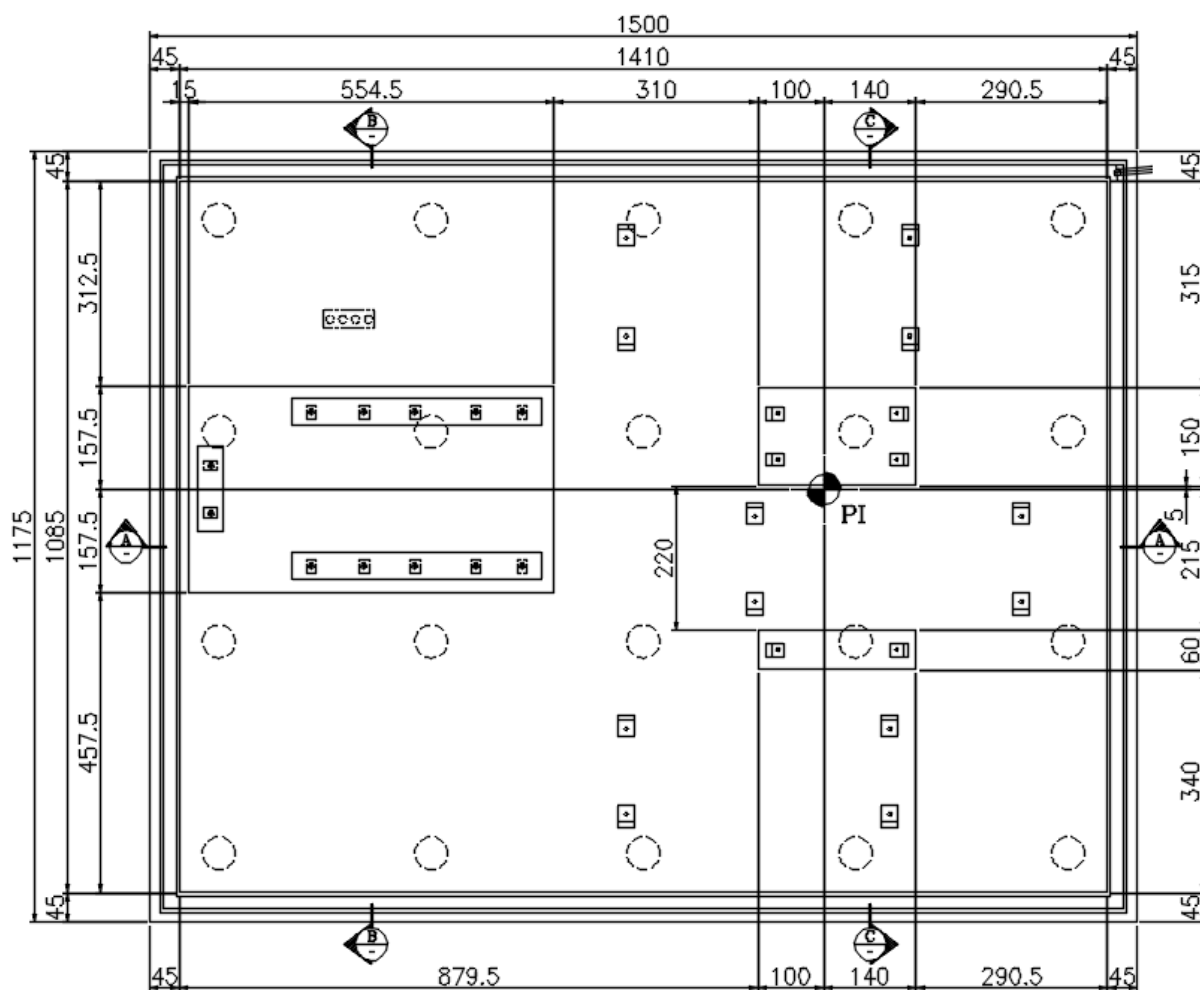


Figura 3. Modelo estrutural: planta global da fundação

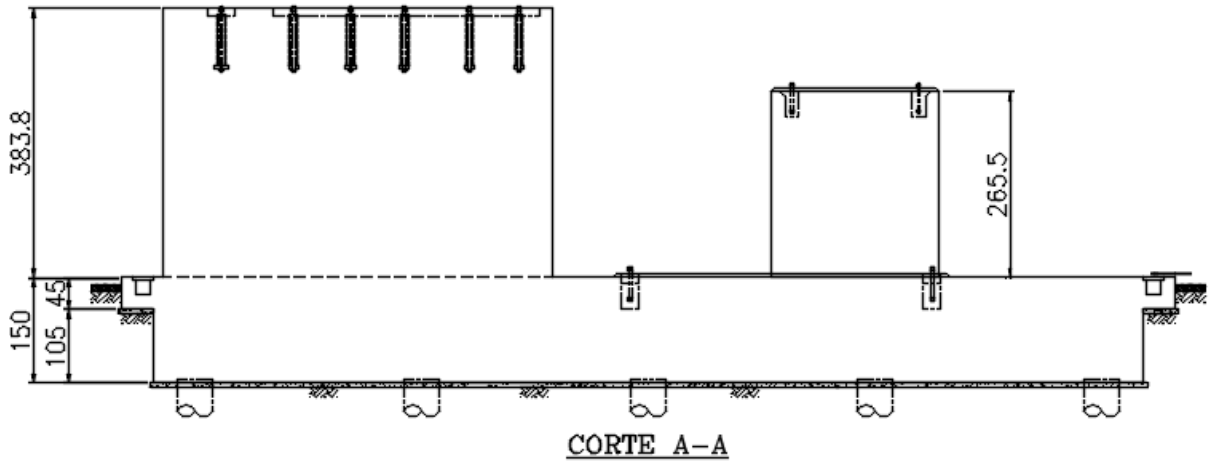


Figura 4. Modelo estrutural: elevação da fundação (Corte A-A)

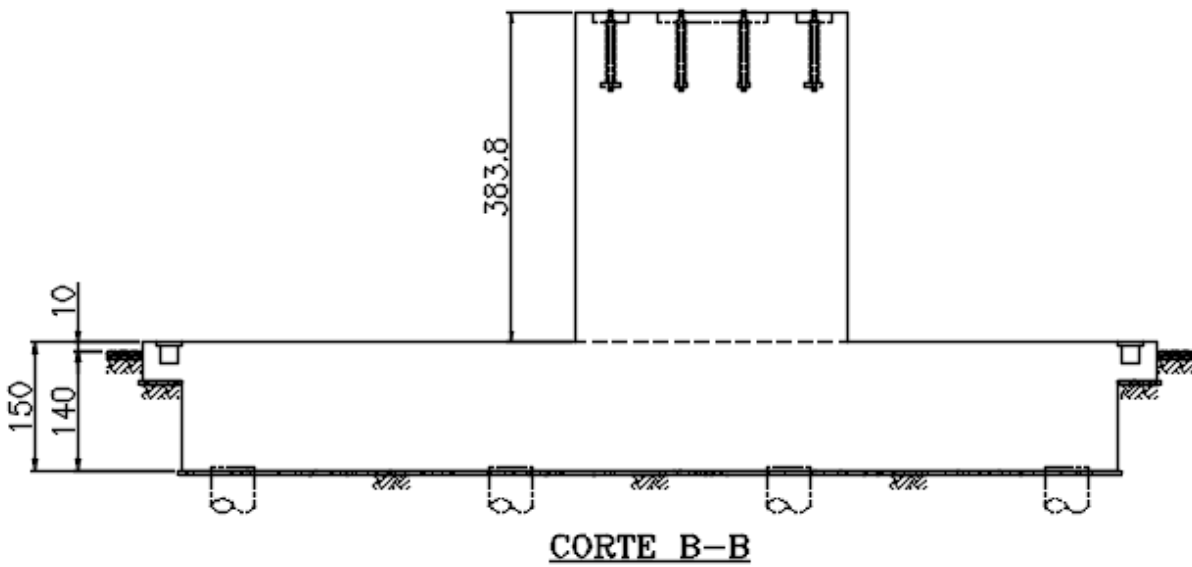


Figura 5. Modelo estrutural: elevação da fundação (Corte B-B)

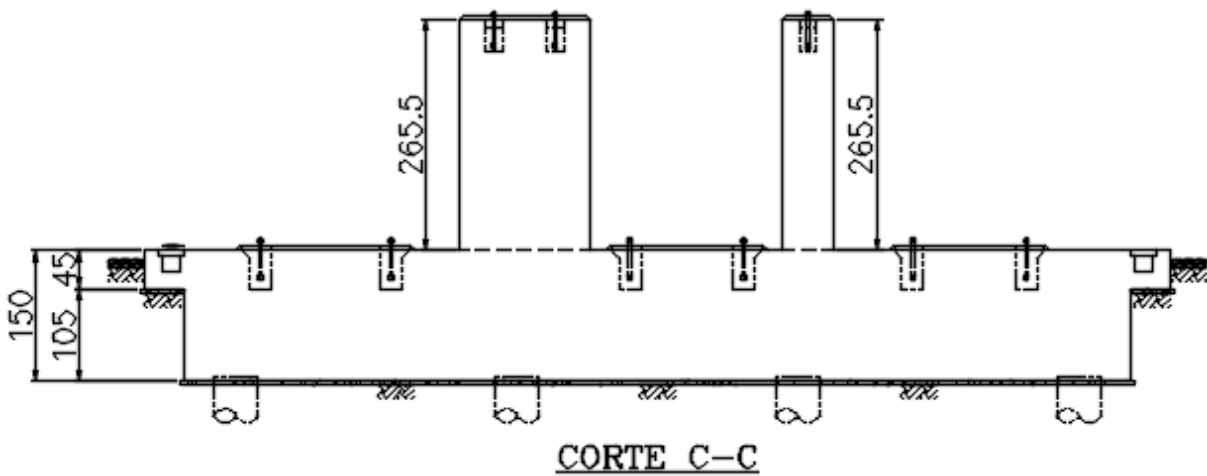


Figura 6. Modelo estrutural: elevação da fundação (Corte C-C)

3 MODELAGEM NUMÉRICA EM ELEMENTOS FINITOS

O modelo numérico-computacional desenvolvido neste trabalho de pesquisa para a análise dinâmica do sistema estrutural investigado, adota técnicas de refinamento de malha usuais presentes em simulações realizadas com base no Método dos Elementos Finitos (MEF) e implementada por meio do uso do programa SAP2000 em sua versão V.17.2.0 (SAP2000, 2016).

No modelo em elementos finitos desenvolvido, as estacas foram representadas através de molas com valores numéricos representativos dos coeficientes de rigidez translacionais do solo correspondentes as 3 direções (X, Y e Z). O bloco de concreto armado foi discretizado com base no emprego de elementos finitos sólidos tridimensionais hexaédricos com 3 graus de liberdade por nó, referentes aos deslocamentos translacionais nas direções X, Y e Z.

As massas dos equipamentos e os carregamentos foram inseridos nos centros de gravidade dos equipamentos e distribuídos para os pontos de ancoragem com a fundação por intermédio do recurso denominado de *Constraint*, que restringe e distribui entre os nós associados os efeitos das cargas e deslocamentos impostos ao sistema. Neste modelo numérico, foi desconsiderado o embutimento lateral do bloco de ancoragem das estacas. Cabe ressaltar que o modelo de elementos finitos desenvolvido apresenta 8146 nós, 6190 elementos finitos sólidos e 24495 graus de liberdade. As Figuras 7 a 12 apresentam o modelo em elementos finitos desenvolvido para a análise dinâmica do sistema equipamentos-fundação.

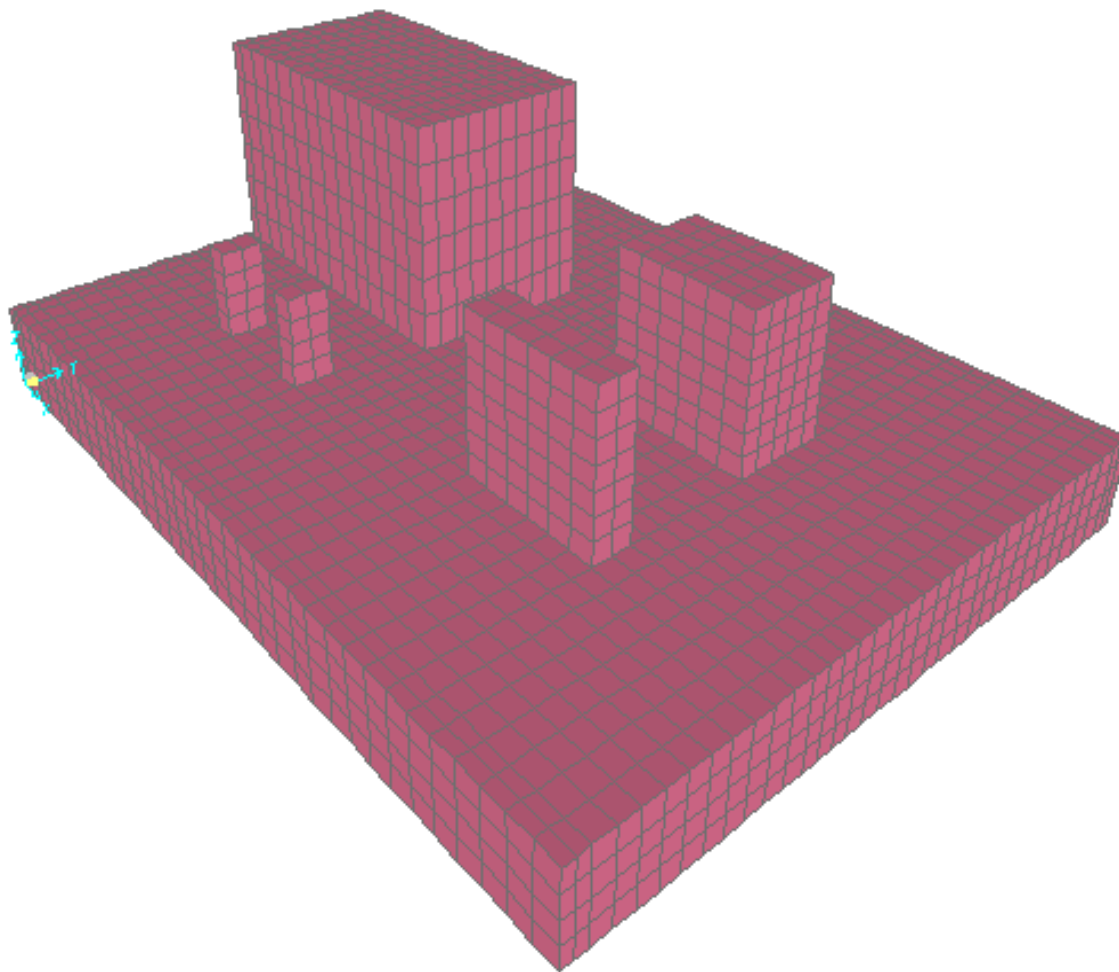


Figura 7. Modelagem em elementos finitos: vista isométrica I

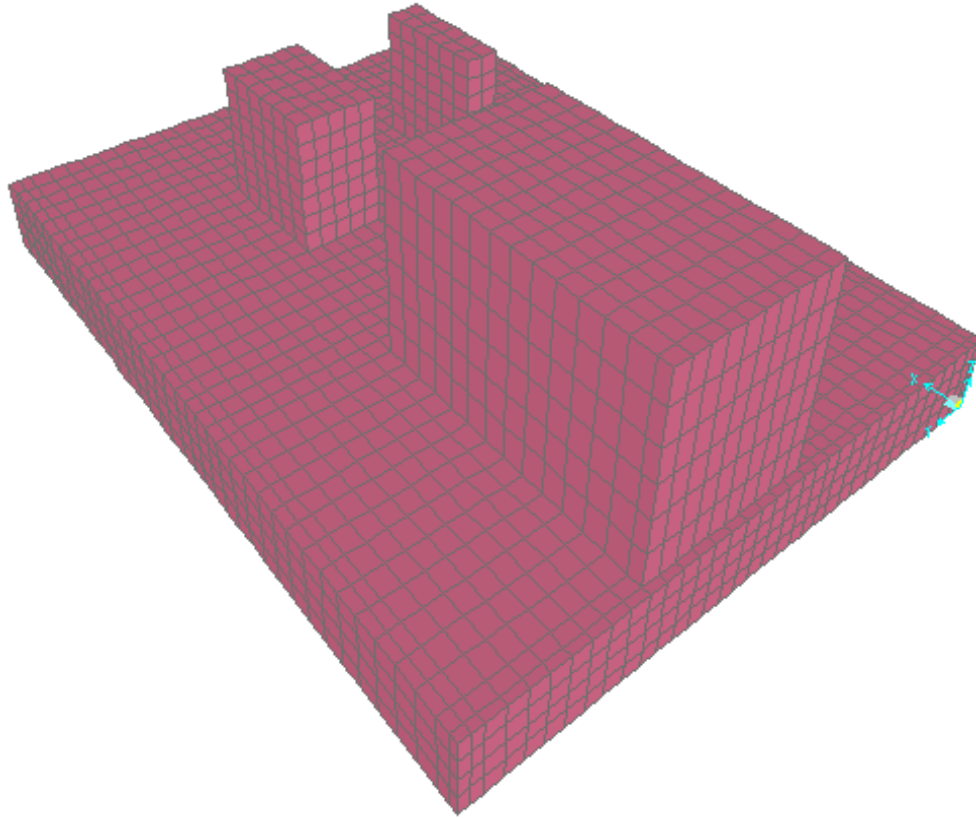


Figura 8. Modelagem em elementos finitos: vista isométrica II

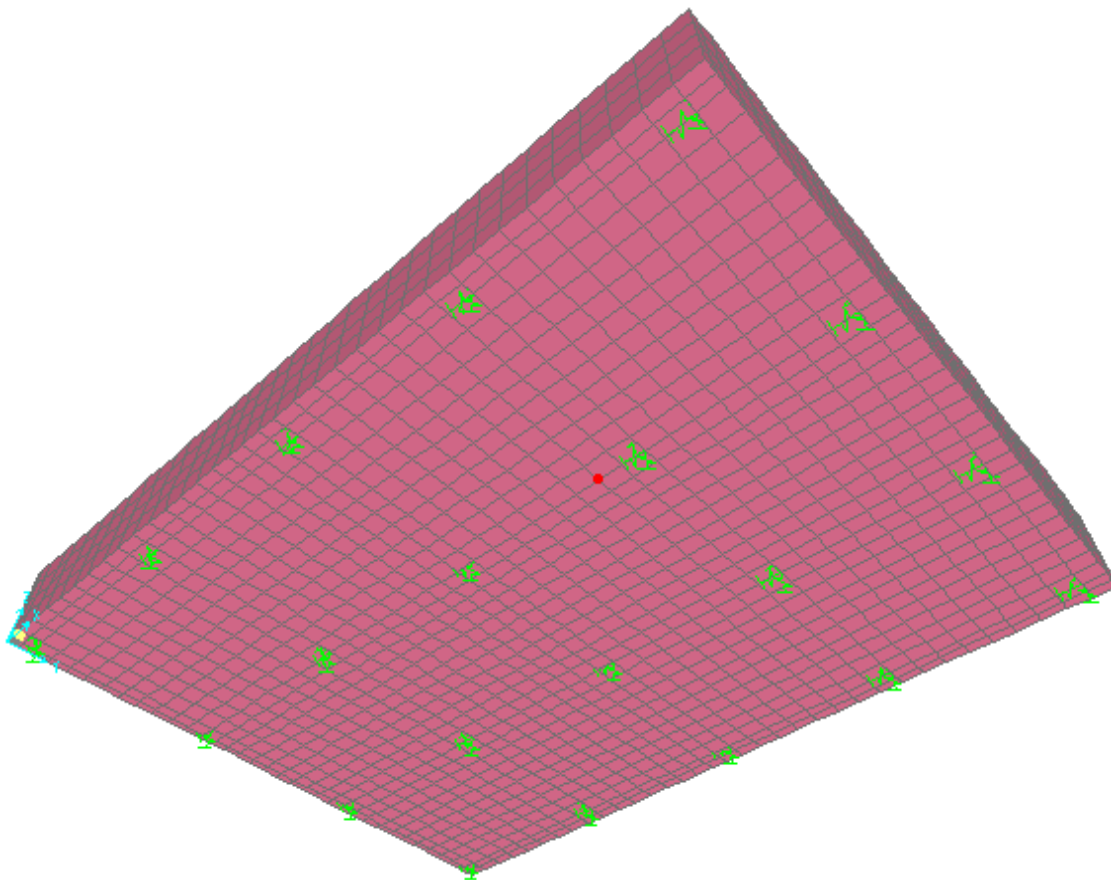


Figura 9. Modelagem em elementos finitos: vista isométrica com as molas representativas das estacas

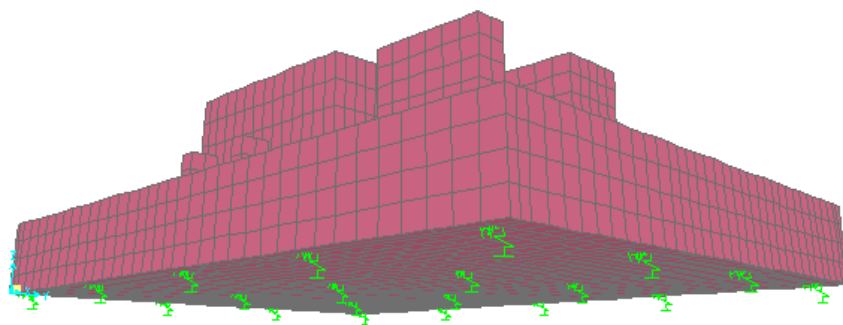


Figura 10. Modelagem em elementos finitos: vista isométrica da infraestrutura e da superestrutura

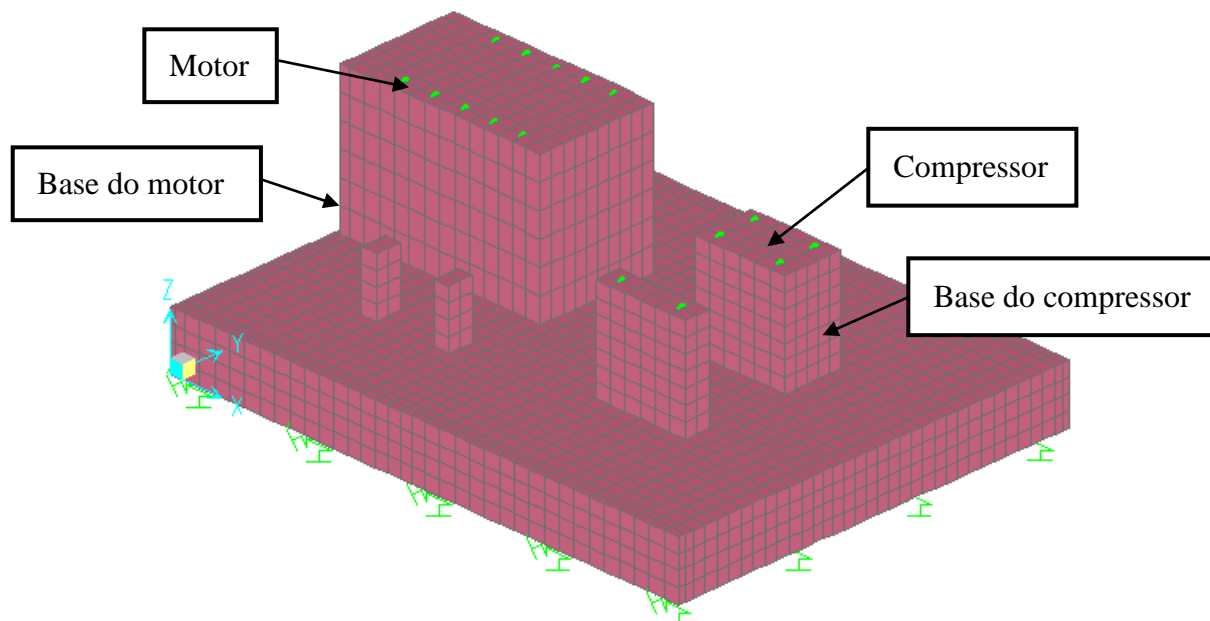


Figura 11. Modelagem em elementos finitos: simulação dos equipamentos assentados sobre as bases

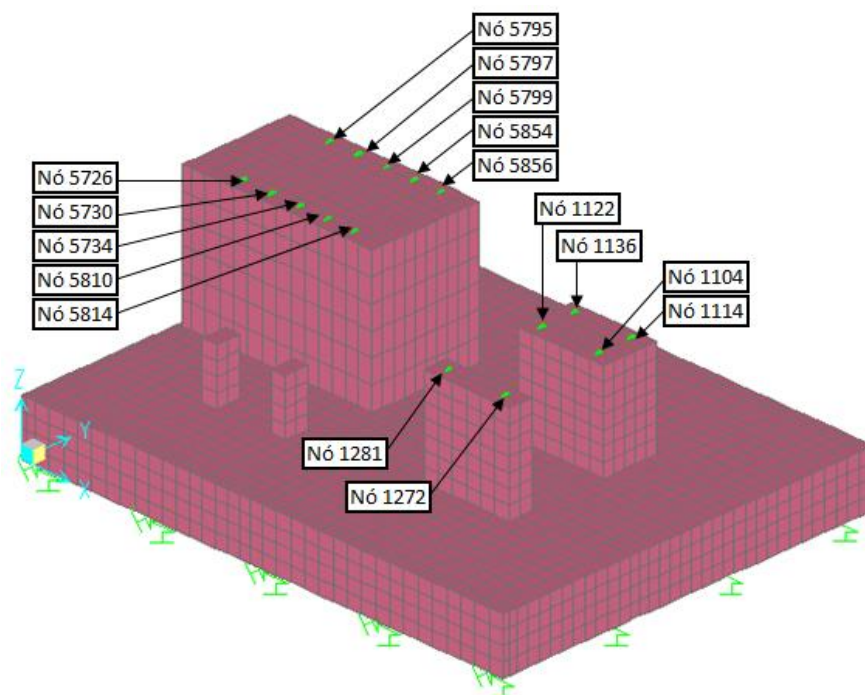


Figura 12. Modelagem em elementos finitos: nós referentes aos chumbadores dos equipamentos

4 ANÁLISE DINÂMICA: VIBRAÇÃO LIVRE

Inicialmente foi realizada uma análise modal sobre o sistema, objetivando o cálculo das frequências naturais (autovalores) e respectivos modos de vibração (autovetores), de modo a verificar o comportamento dinâmico da estrutura em vibração livre. Em seguida, a Tabela 1 apresenta os valores das 12 primeiras frequências naturais e as Figuras 13 a 18 apresentam os modos de vibração mais significativos para avaliação do efeito das ações dinâmicas (vibração forçada). Os valores das frequências naturais e os modos de vibração da fundação foram obtidos, via análise modal, com base no emprego do Método dos Elementos Finitos (MEF), utilizando-se o programa computacional SAP2000 V.17.2.0 (SAP2000, 2016).

Tabela 1. Frequências naturais do sistema

Frequências Naturais (Hz)	
f_{01}	3,21
f_{02}	3,25
f_{03}	4,19
f_{04}	13,81
f_{05}	15,16
f_{06}	15,63
f_{07}	15,97
f_{08}	20,18
f_{09}	29,83
f_{10}	35,04
f_{11}	40,80
f_{12}	46,41

5 ANÁLISE DINÂMICA: VIBRAÇÃO FORÇADA

Neste estudo são analisadas duas situações de projeto para avaliação do desempenho da fundação em termos dos efeitos de vibração forçada, com respeito à sua utilização, considerando-se os carregamentos dinâmicos devido aos equipamentos que atuam sobre a base de concreto (motor e compressor). Em uma primeira situação considera-se apenas o motor operando, enquanto no segundo caso de carregamento, leva-se em conta a operação simultânea das duas máquinas (motor e compressor). Cabe ressaltar que na presente análise, foi adotado um coeficiente de amortecimento estrutural de 1% ($\xi = 0,01$) para o sistema. A modelagem das forças dinâmicas foi considerada de maneira a representar a ação dos equipamentos como sendo cargas harmônicas senoidais [$F(t) = F_0 \sin \omega t$]. A Tabela 2 apresenta as características básicas dos equipamentos atuantes sobre a base de concreto armado.

Tabela 2. Características dos equipamentos: motor e compressor

Equipamento	Peso	Frequência	F_0
Motor	390 kN	188,49 rad/s (30 Hz)	8,5 kN
Compressor	630 kN	188,49 rad/s (30 Hz)	6,3 kN

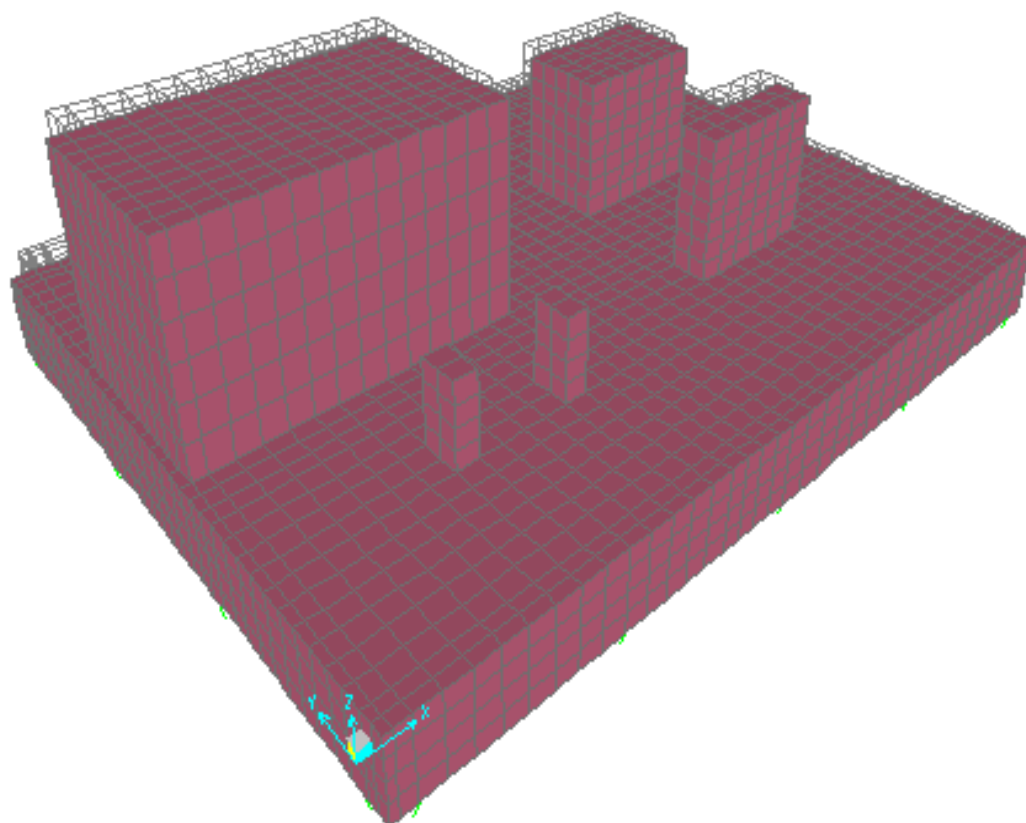


Figura 13. Primeiro modo de vibração ($f_{01} = 3,21$ Hz)

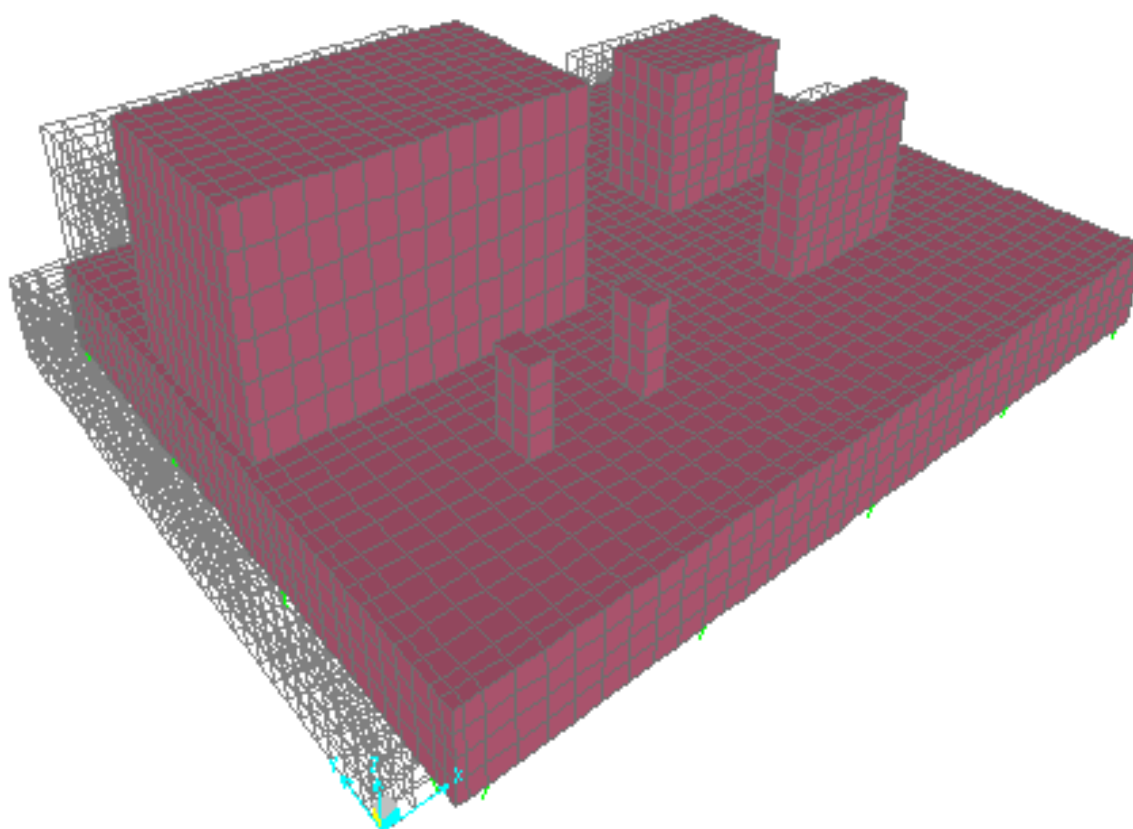


Figura 14. Segundo modo de vibração ($f_{02} = 3,21$ Hz)

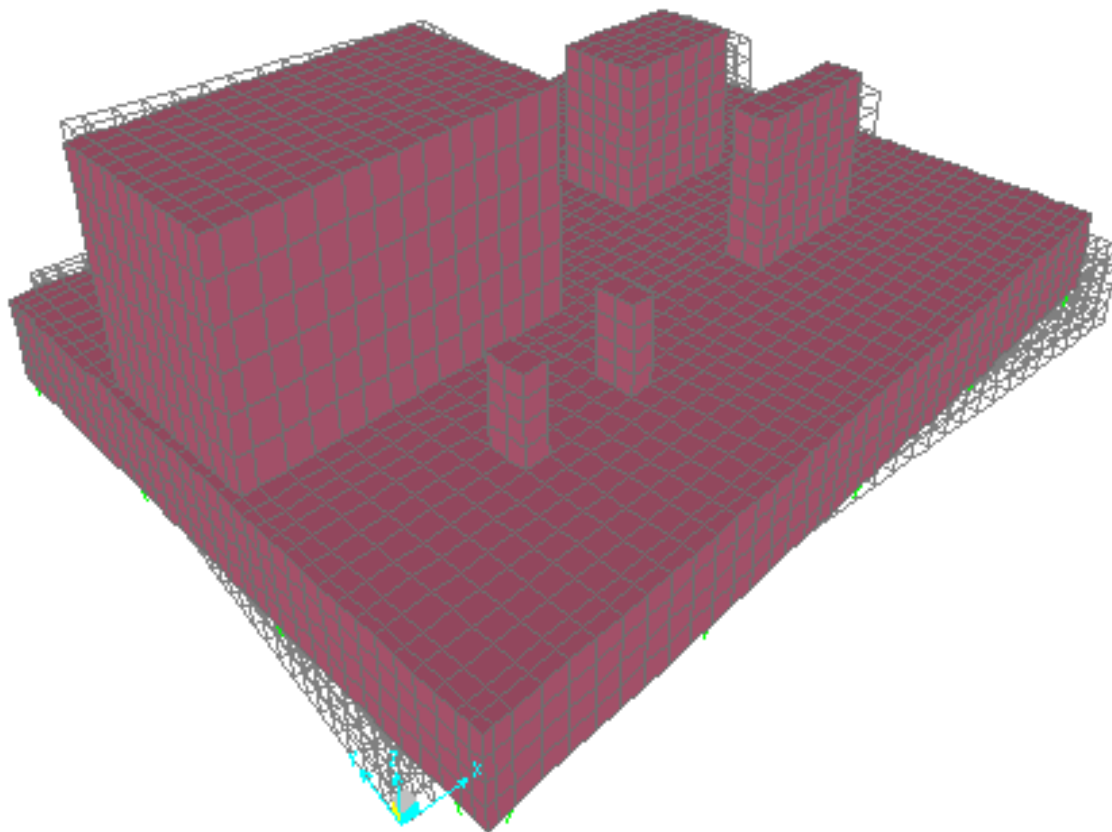


Figura 15. Terceiro modo de vibração ($f_{03} = 4,19$ Hz)

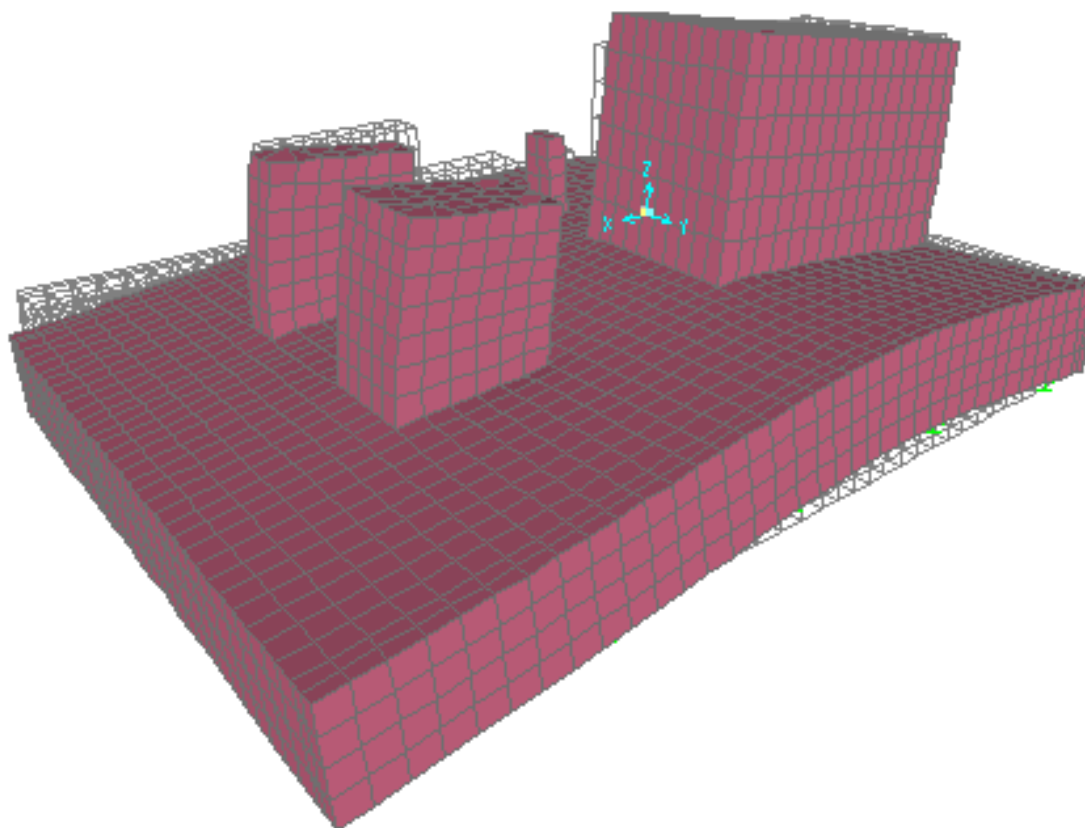


Figura 16. Nono modo de vibração ($f_{09} = 29,83$ Hz)

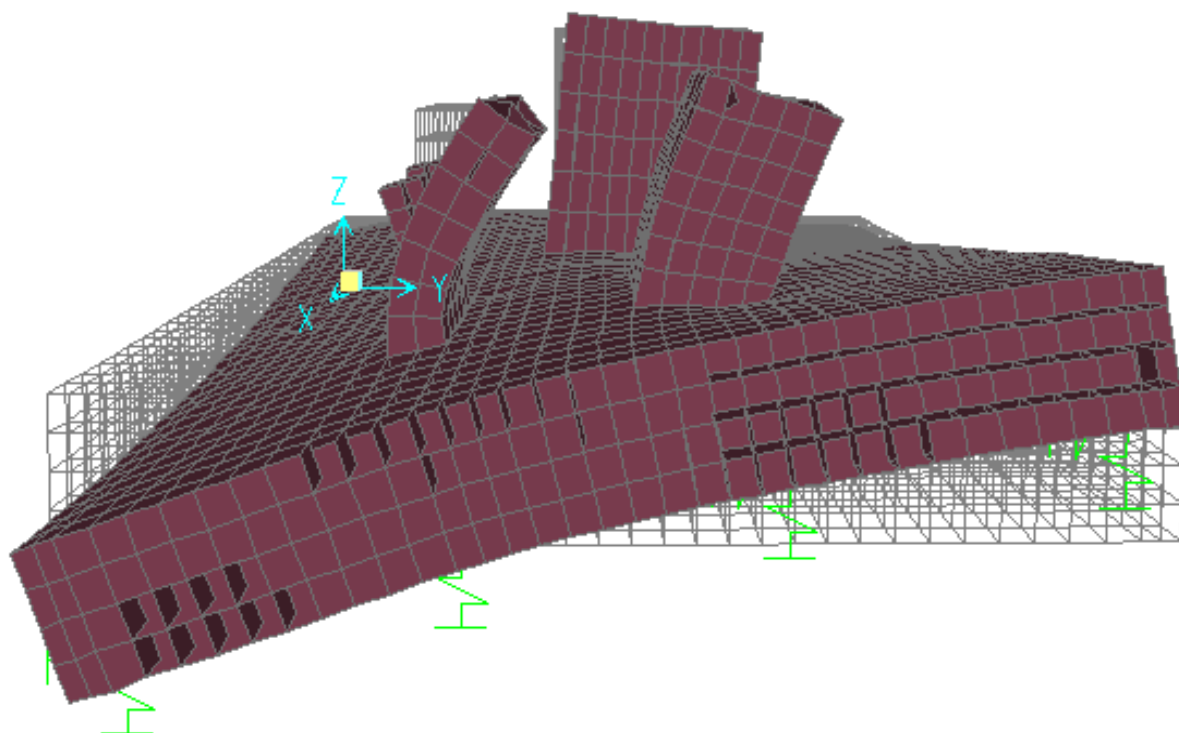


Figura 17. Décimo modo de vibração ($f_{10} = 35,04$ Hz)

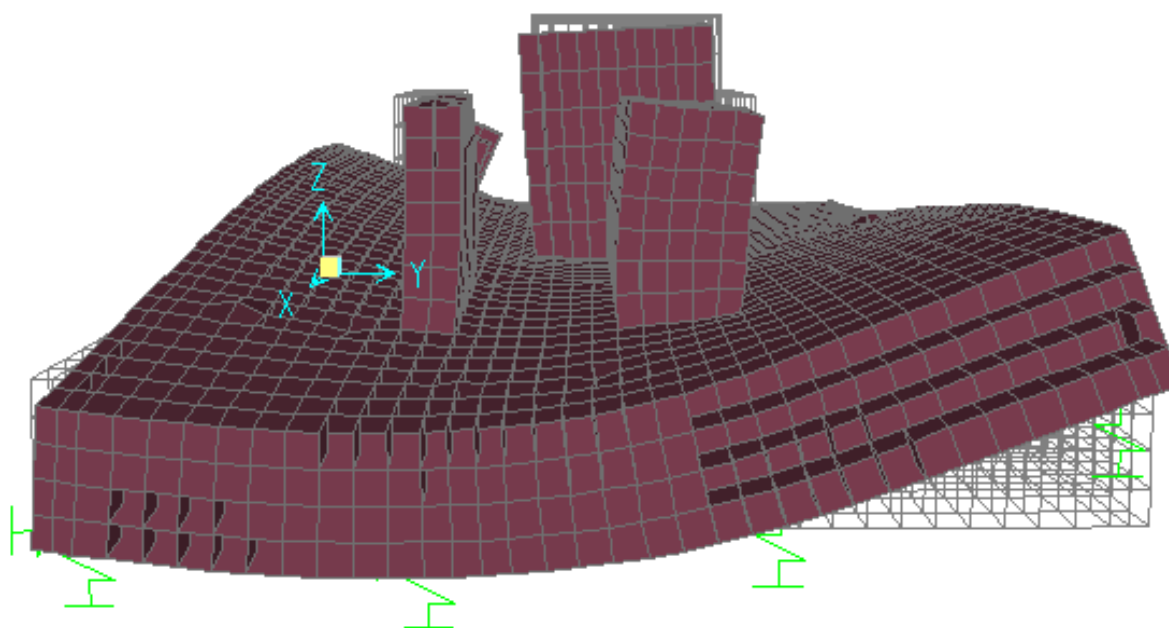


Figura 18. Décimo primeiro modo de vibração ($f_{11} = 40,80$ Hz)

A Figura 19 ilustra o comportamento das forças dinâmicas harmônicas senoidais, no domínio do tempo, utilizadas para simular a ação dos equipamentos (motor e compressor) sobre a base de concreto armado. Na sequência da análise, as Tabelas 3 e 4 apresentam os valores dos deslocamentos e velocidades verticais máximos, com relação a pontos específicos da fundação, nos locais de ancoragem do motor, calculados utilizando os carregamentos descritos anteriormente. Cabe ressaltar que a situação associada ao Caso-I diz respeito apenas ao o motor operando, enquanto no Caso-II, leva-se em conta a operação simultânea das duas máquinas (motor e compressor), conforme apresentado na Tabela 2 e Figura 19.

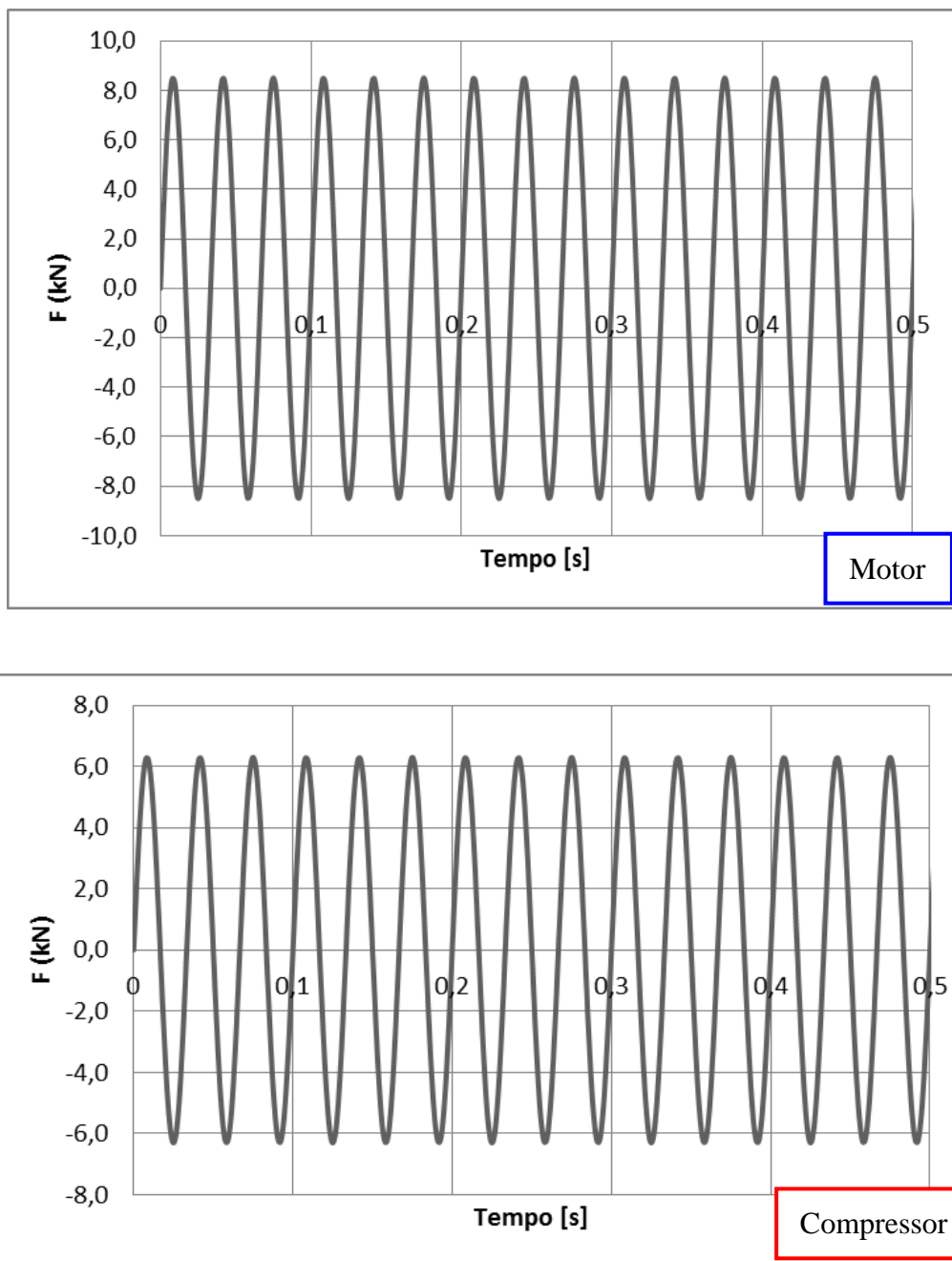


Figura 19. Cargas dinâmicas harmônicas senoidais: motor e compressor

Os valores máximos da resposta estrutural dinâmica do sistema equipamentos-fundação (deslocamentos e velocidades) foram obtidos numericamente com base no emprego do modelo numérico-computacional desenvolvido, via utilização do programa computacional SAP2000 V.17.2.0 (SAP2000, 2016). Estes valores máximos foram comparados os valores limites propostos por normas e recomendações de projeto (ISO 1940-1, 2003). Desta maneira, em sequência, as Figuras 20 a 23 ilustram a resposta estrutural dinâmica do sistema equipamentos-fundação, no domínio do tempo, no que tange aos dois casos de projeto investigados (Caso-I: Motor e Caso-II: Motor + Compressor). Foram escolhidos os nós extremos do sistema de fixação do motor (nós 5795 e 5814).

Tabela 3. Deslocamentos verticais devido aos casos analisados

Caso-I	Nó 5795 (μm)	Nó 5814 (μm)	Amplitude limite (μm)
	1,2	2,2	
Caso-II	Nó 5795 (μm)	Nó 5814 (μm)	60*
	1,0	4,8	

*Para vibração vertical em máquinas com frequência > 1500 RPM (ISO 1940-1, 2003)

Tabela 4. Velocidades verticais devido aos casos analisados

Caso I	Nó 5795 (mm/s)	Nó 5814 (mm/s)	Velocidade limite (mm/s)
	0,2	0,4	
Caso II	Nó 5795 (mm/s)	Nó 5814 (mm/s)	2,8**
	0,2	0,9	

**Informado pelo fabricante e conforme ISO 1940-1, 2003 (ISO 1940-1, 2003)

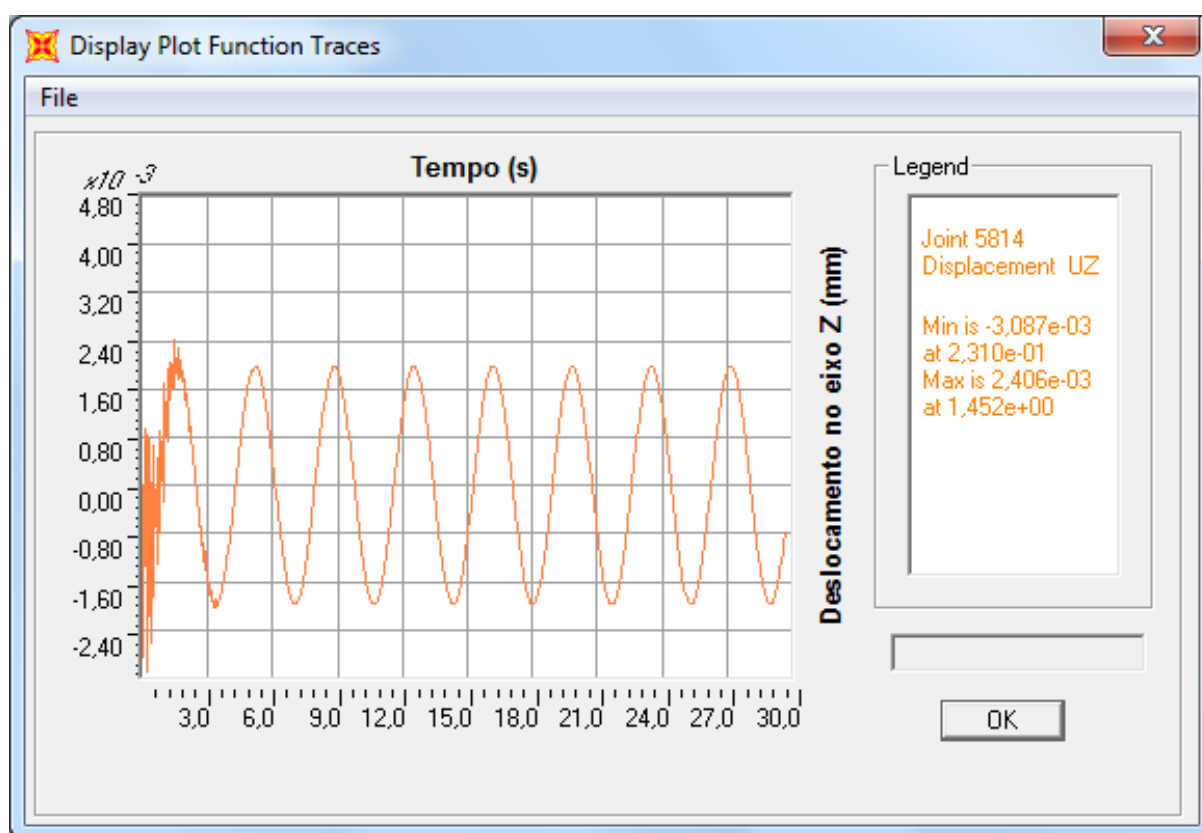


Figura 20. Caso I (Motor): deslocamento vertical U_z (mm) do nó 5814 ao longo do tempo

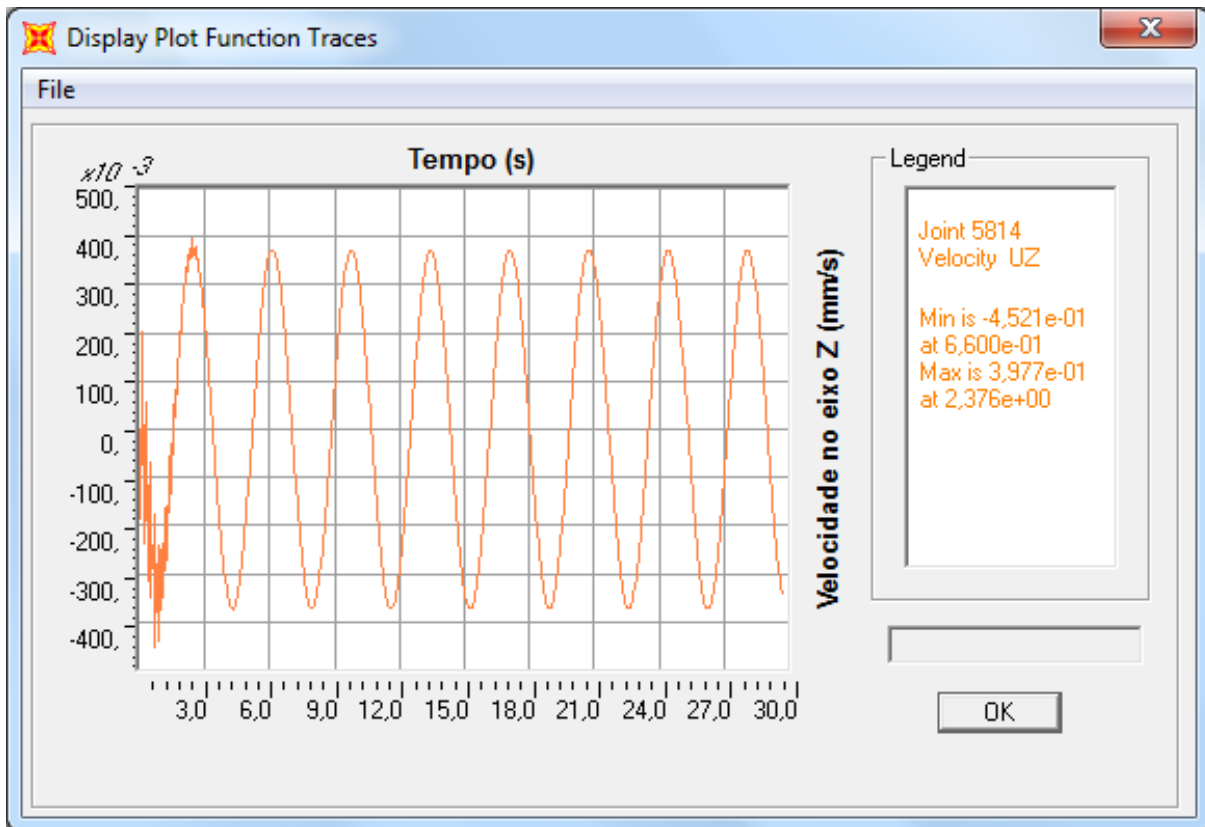


Figura 21. Caso I (Motor): velocidade vertical V_Z (mm/s) do nó 5814 ao longo do tempo

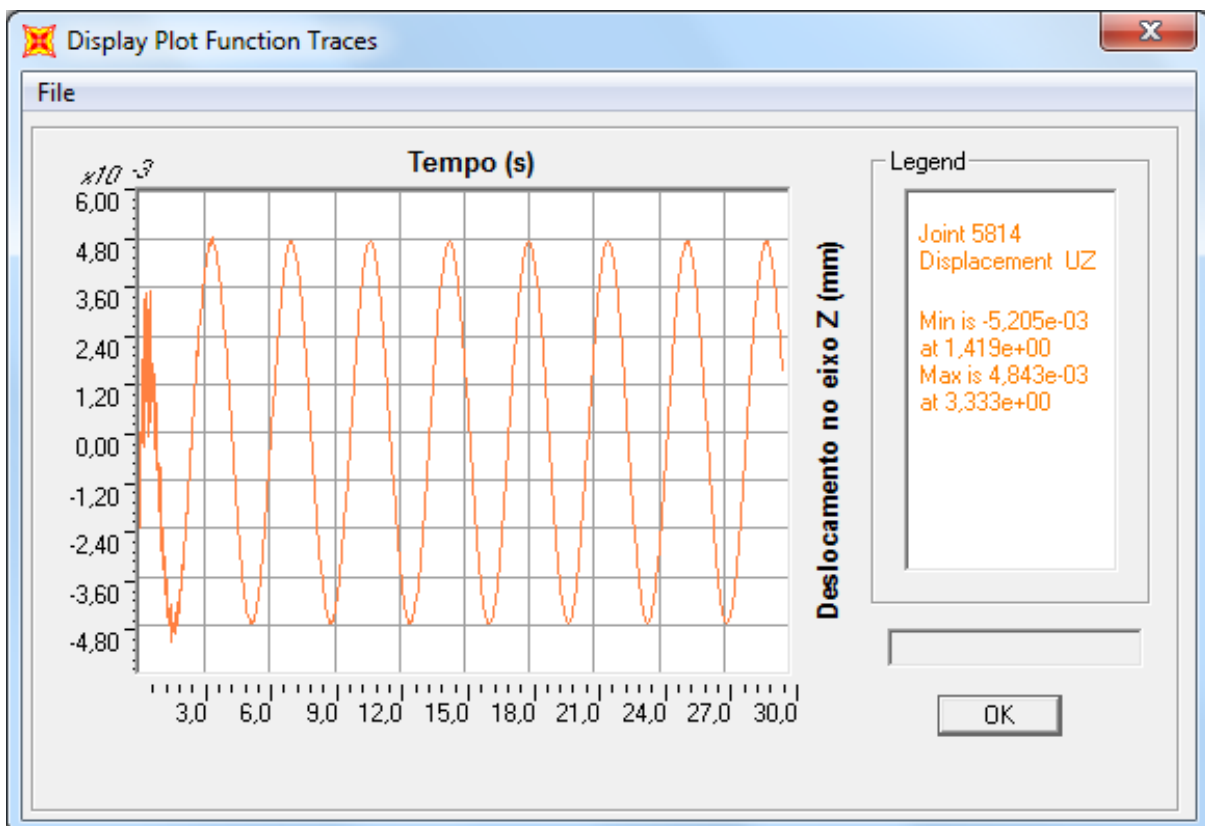


Figura 22. Caso II (Motor + Compressor): deslocamento vertical U_Z (mm) do nó 5814 ao longo do tempo

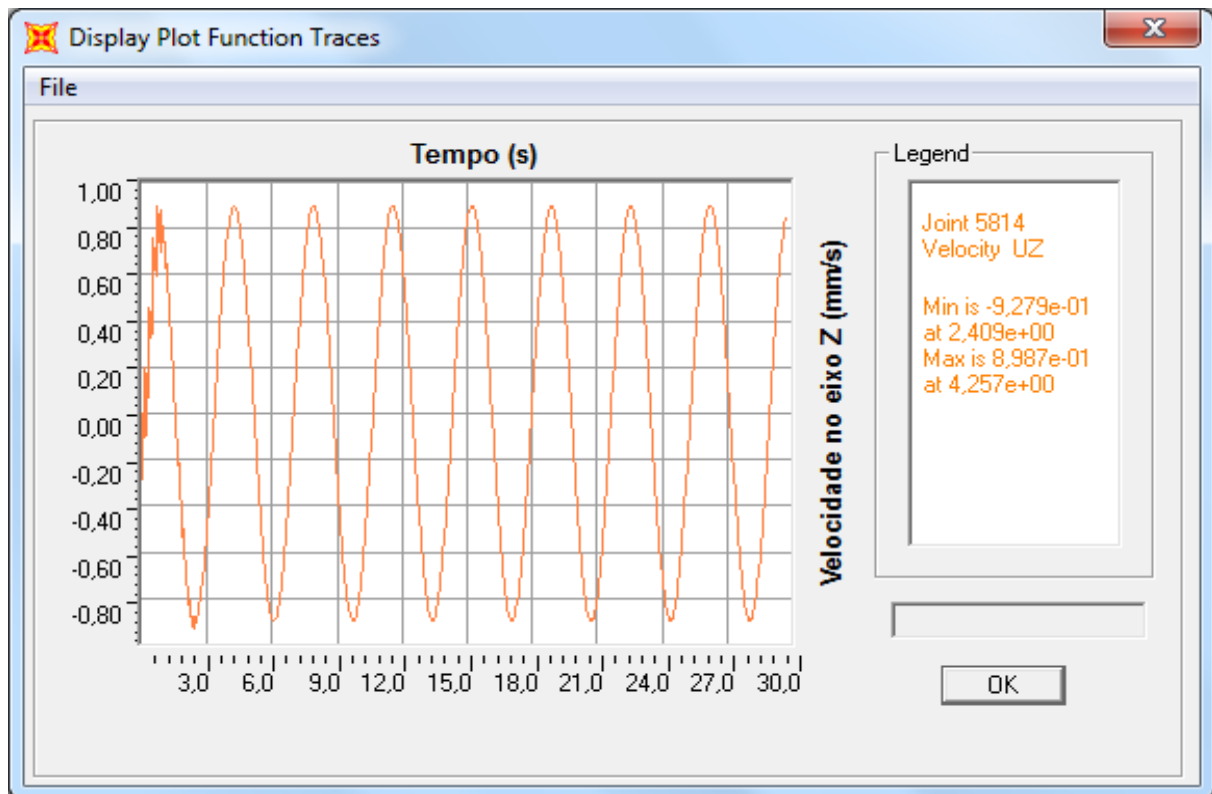


Figura 23. Caso II (Motor + Compressor): velocidade vertical V_z (mm/s) do nó 5814 ao longo do tempo

Convém chamar a atenção do leitor para o fato de que os critérios a serem empregados para a avaliação do desempenho de uma fundação projetada para suporte de equipamentos são geralmente definidos em função dos valores limites de amplitude de deslocamentos, de velocidades e de acelerações, tendo como referência os efeitos provocados em pessoas, na estrutura e na própria máquina. Esses limites dependem da instalação industrial e da função da máquina no processo industrial, e envolvem considerações que vão desde o custo inicial até a manutenção e substituição da máquina (Neto, 1989).

Outro ponto de relevância, diz respeito ao fato de que as amplitudes admissíveis são, geralmente, especificadas pelo fabricante do equipamento. Quando o fabricante não informar estes valores, este dado é recomendado pela norma (ISO 1940-1, 2003). Para a situação em estudo, este valor máximo admissível para as amplitudes é igual a $60 \mu\text{m}$ e para as velocidades tal valor é da ordem de $2,8 \text{ mm/s}$ (ISO 1940-1, 2003).

Considerando-se os resultados referentes à resposta estrutural dinâmica do sistema equipamentos-fundação, Tabelas 3 e 4 e Figuras 20 a 23, pode-se verificar, com clareza, que os valores dos deslocamentos translacionais verticais máximos (Caso-I e Caso-II), apresentam magnitudes da ordem de 12 vezes inferiores ao limite aceitável de projeto [$U_z = 4,8 \mu\text{m} < U_{z\text{lim}} = 60 \mu\text{m}$] (ISO 1940-1, 2003), mesmo considerando-se a situação mais desfavorável de projeto. Tal fato pode ser considerado um indicativo de que a estrutura dimensionada pode ser considerada antieconômica. Por outro lado, os valores das velocidades máximas obtida nesta investigação, da ordem de $0,9 \text{ mm/s}$, correspondem a cerca de 3 vezes menos do que o limite máximo admissível [$V_z = 0,9 \text{ mm/s} < V_{z\text{lim}} = 2,8 \text{ mm/s}$] (ISO 1940-1, 2003), ratificando certo superdimensionamento do projeto estrutural da fundação.

6 CONCLUSÕES

Este artigo investigou o comportamento dinâmico de uma fundação de concreto armado, projetada para suportar um sistema de equipamentos (motor e compressor). O sistema estrutural encontra-se localizado em uma usina siderúrgica na cidade de Ouro Branco/MG, Brasil. Basicamente, o objetivo central do trabalho de pesquisa foi o de verificar o atendimento aos critérios de aceitação normativos e identificar a possibilidade de otimização do projeto estrutural da fundação.

Com base nos valores máximos de deslocamentos e velocidades, obtidos via análise da resposta dinâmica do conjunto equipamentos-fundação, foi possível avaliar o comportamento do modelo estrutural a partir do emprego de recomendações normativas. Os resultados obtidos durante esta investigação indicam que a fundação analisada neste trabalho de pesquisa atende aos critérios normativos com folga [$U_Z = 4,8 \mu\text{m} < U_{Z\text{lim}} = 60 \mu\text{m}$ e $V_Z = 0,9 \text{ mm/s} < V_{Z\text{lim}} = 2,8 \text{ mm/s}$] (ISO 1940-1, 2003), ratificando certo superdimensionamento do projeto estrutural da fundação. A investigação terá sequência, no sentido de proceder a uma otimização do projeto estrutural da fundação, refinando a interação solo-estrutura a fim de verificar os efeitos da simplificação de sua modelagem, avaliando aspectos associados à geometria do sistema, mas tendo em mente que as questões de economia devem levar em conta, também, os aspectos inerentes ao atendimento dos requisitos normativos de projeto e de segurança.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao suporte financeiro fornecido pelas Agências de Fomento à Pesquisa do país, CAPES, CNPq e FAPERJ, que possibilitaram a realização deste estudo.

REFERÊNCIAS

Dalbene, A.R.; Sánchez Filho, E. de S., 2011. Análise Dinâmica de Fundações Diretas para Máquinas Rotativas. *Engenharia Estudo e Pesquisa*. vol. 11, n. 2, pp. 36-46.

ISO 1940-1, 2003. *Mechanical vibration. Balance quality requirements for rotors in a constant (rigid) state. Part 1: specification and verification of balance tolerances*.

Machado, F.G., *Estudo do Comportamento de Fundações Submetidas a Vibrações de Máquinas*. Dissertação de Mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2010.

Neto, E.S.A., 1989. *Introdução à Análise Dinâmica de Fundações de Máquinas*. Dissertação de Mestrado, USP, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil, 1989.

Rodrigues, D.M.C., 2016. *Estudo da Resposta Estrutural Dinâmica de Fundações de Máquinas sobre Estacas* (Em desenvolvimento). Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.

SAP2000 Advanced 17.2.0, Computers & Structures, Inc. 1995 University Avenue - Berkeley, California 94704 USA

Souza Costa, G.A., 2013. *Análise Vibratória de Fundações de Máquinas sobre Estacas*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.