

Análise do Desempenho de Base de Concreto Armado Sujeita a Ações Dinâmicas

Bianca Bruzinga Araújo
Engenheira Civil, CEFET-MG, Belo Horizonte, Brasil, bruzingaic@gmail.com

Thiago Bomjardim Porto
Pesquisador e Professor, Doutor em Geotecnia, UFOP, Ouro Preto, Brasil, thiagoportoeng@gmail.com

RESUMO: Os esforços dinâmicos atuantes nas fundações de equipamentos industriais levam à necessidade de realizar análises rigorosas para que não sejam atingidos os estados limites devido a vibrações excessivas. Esse trabalho verificou o comportamento dinâmico da base aporcada de uma turbina geradora de vapor mediante a variação da espessura do radier. A metodologia dessa pesquisa compreendeu: revisão bibliográfica, definição dos parâmetros pertinentes para a modelagem da fundação de suporte da turbina geradora de vapor, modelagem do pórtico pelo método dos elementos finitos através do software SAP 2000, obtenção dos resultados através da análise de vibração do sistema e da análise de resposta do tempo, obtenção das velocidades da estrutura para cada um dos modelos, análise e comparação dos resultados encontrados e elaboração das principais conclusões. Por meio da análise de vibração foi possível verificar que os modelos que apresentam melhor resposta dinâmica foram os de espessura intermediária, modelo 03 com 3,2m e modelo 04 com 4,2m. Tais modelos possuem frequências com afastamento seguro das frequências de excitação da estrutura e as velocidades da estrutura, estando ambos abaixo do limite estabelecido para que não ocorram danos devido a deslocamentos excessivos, cumprindo assim o objetivo inicial deste estudo de sensibilidade paramétrico.

PALAVRAS-CHAVE: bases de máquinas, análise dinâmica, fundações, MEF.

ABSTRACT: The dynamic forces acting on the foundations of industrial equipment lead to the need to carry out dynamic analyzes so that limit states are not reached due to excessive vibrations. The main objective of this work is to verify the dynamic behavior of the framed base of a steam generating turbine by varying the thickness of the raft. The methodology of this research involved: bibliographical review, definition of the relevant parameters for modeling the support foundation of the steam generating turbine, modeling of the gantry using the finite element method using SAP 2000 software, obtaining results through vibration analysis of the system and time response analysis, obtaining the structure speeds for each of the models, analysis and comparison of the results found and preparation of final reports. From the vibration analysis carried out, it was possible to verify that the models that presented the best dynamic response were those with intermediate thickness, that is, model 03 with 3.2m and model 04 with 4.2m. Such models have frequencies that are safely separated from the structure's excitation frequencies and the structure's speeds, both of which are below the established limit so that damage does not occur due to excessive displacements, thus fulfilling the initial objective of this work.

KEYWORDS: machine bases, dynamic analysis, foundations, FEM.

1 INTRODUÇÃO

Os esforços dinâmicos atuantes nas fundações de equipamentos industriais, levam à necessidade de realizar análises dinâmicas para que não sejam atingidos os estados limites devido a vibrações excessivas provocadas pelo funcionamento de tais equipamentos. Essas vibrações podem ser transmitidas tanto da máquina para a fundação quanto da fundação para o solo (MACHADO, 2010).

Os esforços são classificados como dinâmicos quando há a variação de algum dos seguintes parâmetros: sentido, direção ou ponto de aplicação, em função do tempo. Os carregamentos dinâmicos podem ser classificados entre determinísticos e aleatórios, e podem ser facilmente visualizados em diversas situações. Um exemplo prático seria um avião andando sob uma pista de pouso. O avião ao percorrer a pista em trajetória

linear e velocidade uniforme, representa para a pista um carregamento de magnitude, direção e sentido constantes no tempo, porém o ponto de aplicação da carga varia em função do tempo (BRANDÃO, 1996). Além disso, a taxa de variação (frequência de vibração) do esforço ao longo do tempo irá determinar se a ação pode ser considerada dinâmica, isto é, se as forças inerciais e dissipativas são mobilizadas de forma a apresentarem magnitudes significativas (CLOUGHT; PIENZI, 1993).

Problemas relacionados as fundações de máquinas, seja por dimensionamento ou execução inadequada, pode levar a interrupção da operação ou danos na mesma, gerando prejuízos consideráveis. Além disso, pode acarretar em acidentes com potenciais riscos à segurança das pessoas, sendo assim é de extrema importância a adoção de técnicas e procedimentos adequados tanto no dimensionamento quanto na execução destas fundações (MILET, 2006).

Por desconhecimento dos problemas físicos envolvendo a análise dinâmica, falta de informações das características dos equipamentos e das características geotécnicas do terreno, é frequente a adoção de critérios de projeto conservadores que acarretam projetos estruturais industriais superdimensionados. Além disso, de forma descontrolada, são adotados alguns critérios utilizados no pré-dimensionamento de fundações de bases de equipamentos de pequeno porte.

Um exemplo de edificação em Minas Gerais que sofreu adequações que precisaram de análise dinâmica foi o Estádio Governador Magalhães Pinto (Mineirão) situado em Belo Horizonte-MG. Segundo Lira et al. (2012) nesse foi realizada uma análise de vibração e a análise de *Time History* com o intuito de identificar as frequências mais sensíveis à excitação do público e os níveis de aceleração nos pontos mais sensíveis para a avaliação da estrutura com relação ao conforto humano.

Nesse contexto, este trabalho irá realizar análise dinâmica de um pórtico de sustentação de uma turbina geradora de vapor mediante a variação da espessura do radier. Essa por sua vez, já foi apresentada no estudo de Barbosa (2013), porém com uma solução em fundação profunda do tipo estaqueada. Logo, ao final deste trabalho deseja-se apresentar o modelo com espessura que obteve melhor comportamento dinâmico.

O dimensionamento estrutural e análise estática se apresentam como delimitação deste trabalho, sendo esses possíveis temas para estudos futuros, bem como o estudo do modelo mais econômico.

2 OBJETIVOS

O presente trabalho visa realizar a análise dinâmica da base aporticada de uma turbina geradora de vapor e verificar o comportamento dinâmico da mesma, mediante a variação da espessura do radier. São objetivos específicos desta pesquisa: (a) Estudar sobre interação solo-estrutura de fundações superficiais e sobre análise dinâmica; (b) Elaborar o modelo numérico da base aporticada de uma turbina geradora de vapor com o auxílio do software SAP2000, contemplando as ações estáticas e dinâmicas de projeto; (c) Estudar o comportamento mecânico do sistema perante as ações dinâmicas por meio da análise de vibração e análise de resposta do tempo para 6 modelos; (d) Determinar o modelo que possui melhor comportamento dinâmico.

3 MATERIAS E METODOS

Esta pesquisa se classifica como uma pesquisa quantitativa e qualitativa, visto que para realizar o dimensionamento estrutural foram necessários cálculos e os mesmos possibilitaram análises técnicas. Também foi realizado um estudo de sensibilidade visando avaliar de forma qualitativa a base de uma fundação sujeita a esforços estáticos e dinâmicos provenientes de equipamentos industriais.

A revisão teórica e o estudo de caso desta pesquisa à classificam como de caráter exploratório tendo em vista o aperfeiçoamento técnico e apresentação de conceitos, além de ser uma pesquisa descritiva que descreve os parâmetros adotados e resultados encontrados a partir da análise estrutural.

Para a viabilização desta pesquisa, foram realizadas as seguintes etapas: revisão bibliográfica, definição dos parâmetros pertinentes para a modelagem da fundação de suporte da turbina geradora de vapor, modelagem do pórtico pelo método dos elementos finitos através do software SAP 2000 do fabricante *Computer and Structures, Inc (2002)*, obtenção dos resultados através da análise de vibração do sistema e da análise de resposta do tempo, obtenção das velocidades da estrutura para cada um dos modelos, análise e comparação dos resultados encontrados e confecção dos relatórios finais.

Como limitação deste trabalho tem-se que o mesmo não realizou a análise estática da estrutura, visto que apesar de possuir grandiosa importância no dimensionamento da estrutura, não fazia parte do escopo deste trabalho.

3.1 Definição do pórtico e parâmetros do solo

3.1.1 Dimensões do pórtico

As Figuras 1 e 2 apresentam as plantas 2D e a perspectiva da estrutura 3D que foi analisada por Barbosa (2013). Foi adotada uma fundação profunda em estacas helicoidais com 80 cm de diâmetro espaçadas em 2m entre si, este trabalho em contrapartida adotou uma fundação superficial do tipo radier e análise considerando a contribuição do solo a estrutura. Posteriormente, Araújo (2020) fez estudo paramétrico deste radier.

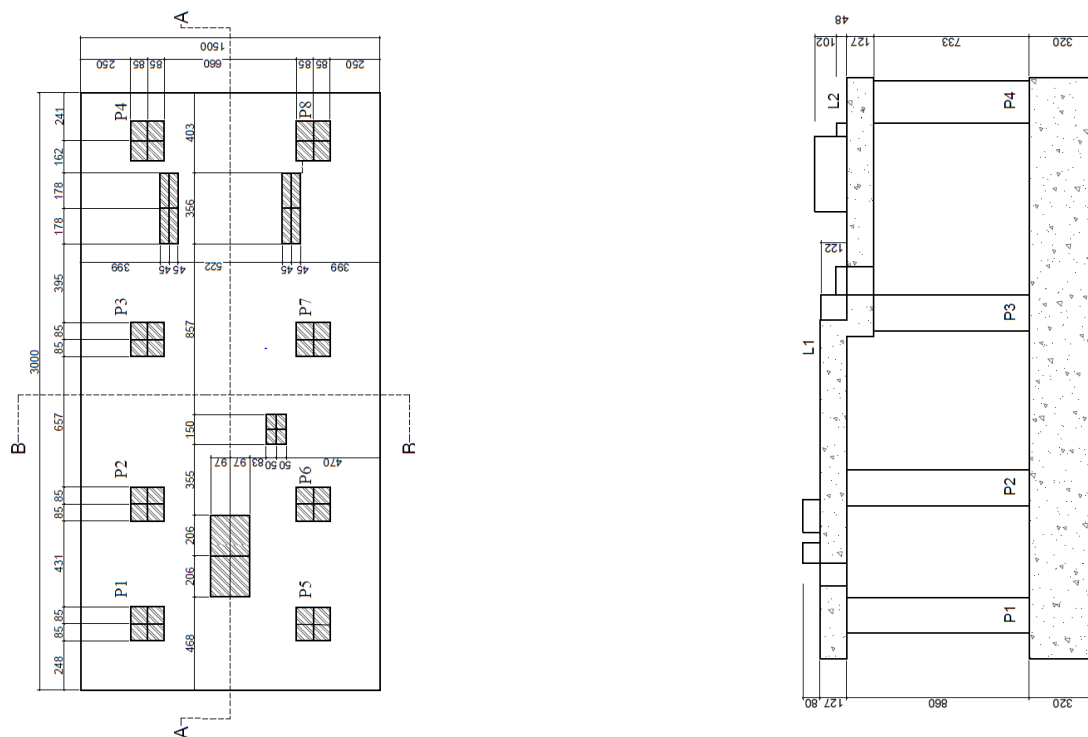


Figura 1. (a) Pilares e maciço sobre radier; (b) Corte longitudinal AA.

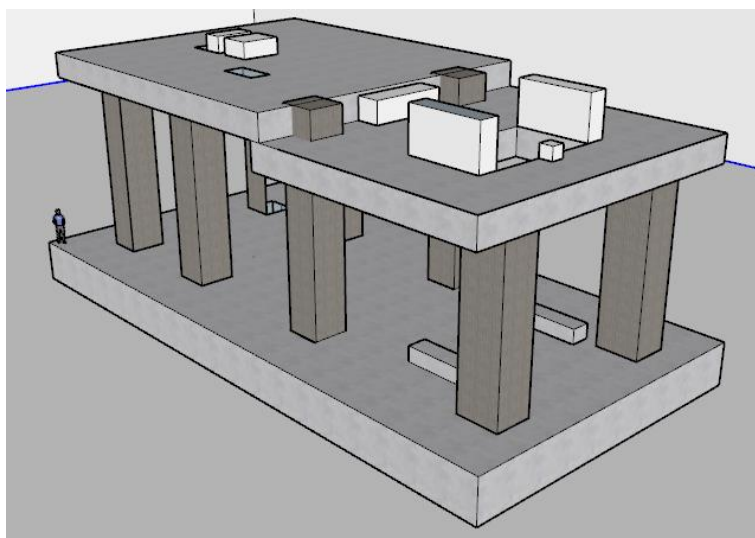


Figura 2. Perspectiva tridimensional da base em concreto armado.

3.1.2 Materiais adotados

Apresenta-se abaixo os parâmetros da estrutura e da fundação adotados no modelo 3D em MEF.

- Parâmetros do concreto utilizado na estrutura do pórtico e do radier:

- Peso específico: $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$
- Resistência: $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$
- Módulo de Elasticidade inicial: $E_i = 30,6 \text{ GPa}$
- Módulo de deformação secante: $E_{cs} = 26,07 \text{ GPa}$
- Relação $a/c \leq 0,55$

- Características do solo de assentamento da fundação do pórtico de sustentação do turbogerador:

- Tipo de solo: Arenoso medianamente compacto
- $SPT_{\text{médio}} = 18$ golpes
- Modulo de elasticidades (E) = 27 MPa
- Coeficiente de Poisson (ν) = 0,3

- Tensão admissível e k_v adotados para o estudo de sensibilidade paramétrico:

- Tensão admissível (σ_s) = 0,36 MPa
- Coeficiente de reação vertical (k_v) = 0,072 kN/cm^3 .

- Premissas para obtenção de k_h :

- Área da fundação (A) = 450 m^2
- Menor lado da fundação (B) = 15 m, Maior lado da fundação (L) = 30 m
- Fator em função de B/L e de ν , (k_T) = 0,926
- Fator definido pela Equação 1 (C) = 296,7

$$C = \frac{E}{1-\nu^2} = \frac{270}{1-0,3^2} = 296,7 \quad (1)$$

Logo o k_h é dado por:

$$k_h = \frac{k_T C}{\sqrt{A}} = \frac{0,926 * 296,7}{\sqrt{450}} = 0,129 \text{ kN/cm}^3 \quad (2)$$

A Tabela 1 apresenta os coeficientes de mola de acordo com a área de influência dos mesmos.

Tabela 1 – Coeficientes de mola para reação vertical e horizontal, adaptado de MORISSON (1993).

Coeficientes de Mola			
Identificação	Coefficiente de Reação Vertical		
	Area (cm²)	k_v (kN/cm³)	k_v (kN/cm²)
K _{v1}	25.600	72	1.843.200
K _{v2}	12.800	72	921.600
K _{v3}	6.400	72	460.800
Identificação	Coefficiente de Reação Horizontal		
	Area (cm²)	k_v (kN/cm³)	k_v (kN/cm²)
K _{h1}	25.600	129,5	3.315.200
K _{h2}	12.800	129,5	1.657.600
K _{h3}	6.400	129,5	828.800

3.1.3 Ações na estrutura

Para modelagem da estrutura foram consideradas como ações atuantes o peso próprio da estrutura, a sobrecarga de utilização (SCU), a carga dos equipamentos, a ação do vento e a variação térmica.

As ações dinâmicas que tiveram enfoque neste trabalho foram as provenientes dos equipamentos necessários para o funcionamento da turbina geradora de vapor. A Tabela 2 apresenta a relação das frequências de vibração e massa de rotação de tais equipamentos, bem como o centro de gravidade dos mesmos. Desta forma, pode-se observar que a menor frequência é de 3600rpm (60 Hz) e que a maior será de 8954rpm (149 Hz).

Tabela 2 – Frequências de operação dos equipamentos, SIEMENS (2013) apud BARBOSA (2013).

Nº	Componente	Centro de Gravidade	Massa do rotor	Frequência
-	Hz	-	kg	rpm
1	HP TURBINE	Q1	590	8954
2	GEAR PINION	Q2	351	8954
3	GEAR WHEEL	Q3	1236	3600
4	GENERATOR	Q4	23362	3600
5	IP - TURBINE	Q5	17900	3600

3.1.4 Modelo numérico

O modelo numérico computacional do pórtico com fundação em radier da estrutura de suporte da turbina geradora possui elementos de barra com seis graus de liberdade e elementos finitos planos isoparamétricos quadrangulares, de oito nós, simulando as lajes e bloco, Figura 3. Abaixo, resumo das características do modelo tridimensional em MEF:

- Número de nós = 2898
- Número de restrições = 1135
- Número de elementos de barra = 300
- Número de elementos de casca = 1473
- Número de elementos de apoio = 4610
- Número de carregamentos = 12
- Número de acelerações de carga = 9
- Número graus de liberdade de rigidez = 10284
- Número de graus de massa de liberdade = 5136

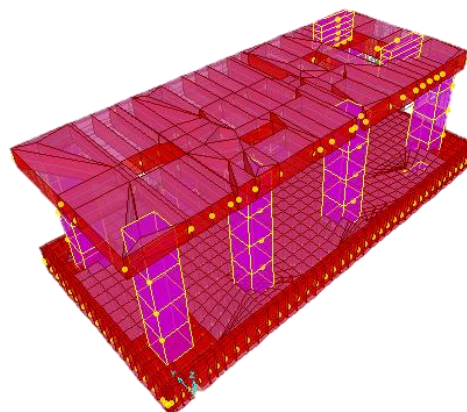


Figura 3 – Modelo Numérico 3D da base em concreto armado em MEF.

Foram realizadas análises de sensibilidade paramétricas para os modelos descritos considerando 12 graus de liberdades: M₁ (H=1,2m); M₂ (H=2,2m); M₃ (H=3,2m); M₄ (H=4,2m); M₅ (H=5,2m); M₆ (H=6,2m).

4 ANÁLISE E COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Visto todos os resultados apresentados no capítulo anterior deste trabalho, apresenta-se aqui a análise conjunta com o intuito de comparar as frequências naturais, modos de vibração e modos de participação em massa dos 6 modelos abordados e a resposta da estrutura no tempo, frente as ações dinâmicas do turbogerador e demais equipamentos instalados no pórtico.

4.1 Análise de vibração

A partir das frequências naturais obtidas para os 12 primeiros modos de vibração analisados em cada um dos 6 modelos foi possível observar que houve aumento da frequência natural dos modelos com a elevação da espessura. Ao aumentar a espessura do radier, há um incremento do peso próprio e sabe-se que a frequência natural de um sistema é inversamente proporcional a massa do mesmo, logo ao aumentar a massa da estrutura há uma redução da frequência natural. No entanto nos resultados obtidos foi possível perceber que ao aumentar a espessura do radier, houve um aumento da frequência natural, isso ocorre pois simultaneamente ao acréscimo

de massa há também o aumento da rigidez do sistema em proporções maiores que o aumento da massa resultando no aumento da frequência natural do sistema.

A Tabela 3 apresenta a porcentagem do incremento da frequência natural de cada um dos modos de vibração do modelo 06, que por sua vez possui maior espessura (620cm) em comparação com o modelo 01 que possui a menor espessura analisada (120cm).

Tabela 3 – Aumento percentual de ω_n em função da espessura.

Aumento da frequência em função da espessura			
MODO 01	11%	MODO 07	5%
MODO 02	10%	MODO 08	12%
MODO 03	10%	MODO 09	9%
MODO 04	4%	MODO 10	11%
MODO 05	4%	MODO 11	13%
MODO 06	9%	MODO 12	14%

Pode-se observar que o modo de vibração com maior variação percentual da frequência em relação a espessura foi o Modo 12 com um aumento de 14%, Figura 4, do modo de vibração 12 do modelo 06.

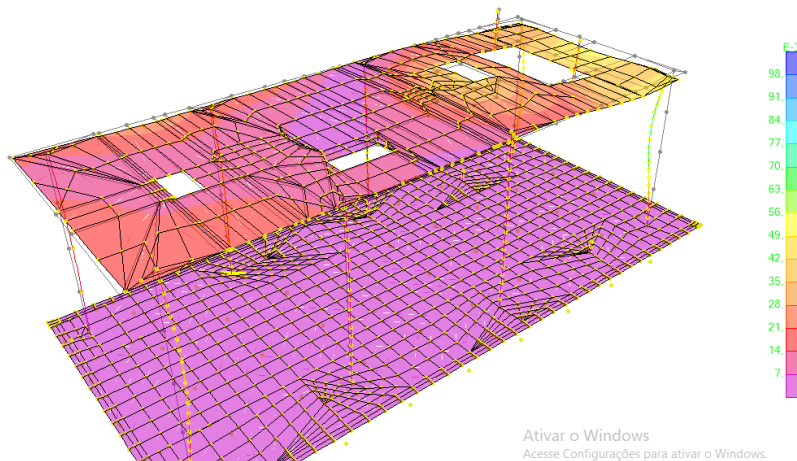


Figura 4 - Modo de Vibração 12 do modelo 06.

No que diz respeito aos modos de participação em massa apresentados nas tabelas do capítulo anterior e nos gráficos do Anexo 2 pode-se observar que o modelo que apresentou os maiores módulos de participação em massa foi o modelo 01, que por sua vez também é o modelo de menor espessura. Em ambos os modelos os modos de vibração mais significativos foram os modos 01, modo 02 e modo 06 por apresentarem maiores valores comparado aos demais modos, sendo estes modos globais.

Além disso, todos os gráficos dos modos de participação apresentaram mudança do comportamento da curva (modo de participação x espessura do radier) justamente entre as espessuras de 200 e 400cm o que abrange os modelos 02 e 03, ou que remete uma mudança da participação da massa nas vibrações da estrutura nessa faixa de espessura.

Verificando se as frequências naturais estão devidamente afastadas das frequências de operação dos equipamentos e sabendo-se que a menor frequência de vibração será 3600 rpm (60Hz) enquanto a maior será 8954 rpm (149 Hz), tem-se na tabela a seguir o afastamento das frequências naturais dos 6 modelos em estudo. A Tabela 3 apresenta os valores respectivos ao afastamento percentual da frequência natural a frequência de excitação do sistema para o modo de vibração 12 que apresentou os maiores valores de frequência natural e para o modo 06 que foi o terceiro modo com maior participação em massa e com maior frequência natural entre os modos de vibração 01 e 02.

Como pode-se observar na Tabela 4, o modelo que possui maior frequência natural é o modelo 06, tanto para o modo de vibração 12 quanto para o modo 06. Conforme os critérios adotados para avaliação da análise de vibração apresentados neste trabalho na Tabela 4, onde a frequência natural da estrutura deve estar a partir de 30% abaixo ou de 30% acima da frequência de excitação, pode-se observar que o modelo 05 e modelo 06

no modo de vibração 12 se aproximam muito do limite, visto que está com frequência natural 31% abaixo da frequência de excitação mais baixa que é a de 60Hz.

Tabela 4 – Afastamento percentual das frequências naturais (F) e de excitação.

Modelo	F crítica	% de afastamento da menor Frequência de excitação	F Modo de vibração 06	% de afastamento da menor Frequência de excitação
Modelo 01	36,37	39%	24,56	59%
Modelo 02	39,71	34%	25,95	57%
Modelo 03	40,55	32%	26,34	56%
Modelo 04	41,10	32%	26,57	56%
Modelo 05	41,30	31%	26,67	56%
Modelo 06	41,41	31%	26,73	55%

4.2 Análise de resposta no tempo

Conforme visto no capítulo anterior as frequências naturais da estrutura se aproximam da frequência de operação do equipamento, sendo assim necessária uma análise de reconstituição no tempo com o intuito de verificar a resposta da estrutura no tempo a partir da opção envelope. As amplitudes encontradas nesse estudo foram maiores para os modelos com radier menos espesso, e por sua vez menos rígidos. A Tabela 5 apresenta a porcentagem dos deslocamento dos modelos em relação ao modelo 06 que é o modelo mais rígido e de maior espessura.

Tabela 5 – Porcentagem de deslocamento em relação ao modelo mais rígido, do autor.

Porcentagem dos deslocamento em relação ao modelo 06		
Modelo	Deslocamento (E ⁻⁴)	% de deslocamento
MODELO 01	5,028	3,88%
MODELO 02	4,88	0,83%
MODELO 03	4,853	0,27%
MODELO 04	4,88	0,83%
MODELO 05	4,841	0,02%

4.2 Análise dos limites de velocidade

É necessário verificar se a estrutura apresenta vibrações abaixo dos limites de velocidade estabelecido por norma para que não ocorra danos na estrutura. Tal limite pode ser extraído da Tabela 6 que em alguns casos apresenta valores limites maiores do que os limites de serviço da estrutura.

Tabela 6 – Limite de velocidade para danos na estrutura, adaptada de DIN 4150-1 (2001).

Limites de velocidade para evitar danos na estrutura					
Tipo de estrutura	Limites de vibração para dano estrutural				
	Curto Prazo Na fundação			Longo Prazo Piso Superior	
	0 a 10Hz	10 a 50Hz	50 a 100Hz	Todas as frequências	
Comercial /industrial	20	20 a 40	40 a 50	40	10
Residencial	5	5 a 15	15 a 20	15	5
Sensível / histórica	3	3 a 8	8 a 10	8	2,5

O valor limite de velocidade que foi utilizado para os modelos analisados foi o de 2,5mm/s visto que trata-se de um valor limite para estruturas sensíveis e considerando carregamento de longo prazo. A partir das velocidades encontradas para cada um dos modelos foi possível observar que o valores de velocidade encontrados não chegam a 1mm, sendo assim, estão abaixo do limite estabelecido de 2,5 mm/s.

5 CONCLUSÕES

A análise dinâmica, apesar de ainda ser um tema pouco estudado é de grande importância para garantir a segurança de algumas estruturas e no caso de bases de máquinas se torna uma análise indispensável, visto as ações dinâmicas que a base recebe provenientes do movimento dos equipamentos. Este trabalho ao realizar o estudo da base de um turbogerador de grande porte, a partir de 6 modelos com radier com espessuras diferentes, visou verificar o comportamento dinâmico dos mesmos perante a variação da espessura.

A partir da análise de vibração, foi possível verificar que a maior frequência natural encontrada foi a do modelo 06 no modo de vibração 12. No entanto é válido ressaltar que o modo de vibração 12 conforme possui baixa participação de massa, ou seja, é responsável pela vibração de apenas uma pequena parcela da estrutura tornando muito improvável o fenômeno de ressonância. Já o modo de participação em massa do modo 06 é um modo global, ou seja, é responsável pela vibração de uma grande parcela da estrutura, sendo assim um modo relevante e determinante para que ocorra o fenômeno de ressonância. No entanto a frequência natural do modelo 06 para este modo de vibração teve afastamento de 55% da menor frequência de excitação do turbogerador o que caracteriza uma distância segura perante os critérios adotados neste trabalho. No que diz respeito as velocidades da estrutura, foi possível concluir que ambos os modelos estudados estão abaixo do limite estabelecido para que não ocorram danos na estrutura devido a deslocamentos excessivos.

Com vista nos resultados da análise de vibração e os resultados da análise de resposta no tempo, onde foram coletadas as amplitudes máximas de deslocamento, foi possível verificar que os modelos que apresentam melhor resposta dinâmica são os de espessura intermediária, ou seja modelo 03 e modelo 04 visto que possuem amplitude de deslocamento e frequência natural intermediária. Além disso tais modelos possuem frequências com afastamento seguro das frequências de excitação da estrutura cumprindo assim o objetivo inicial deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Araújo, B. B. (2020) Avaliação da espessura de um radier em concreto armado sob ações dinâmicas. Trabalho de Conclusão de Curso. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Curvelo-MG.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019) NBR 6122: *Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro.
- Barbosa, P. H. M. (2013) *Influência do solo sob bloco de coroamento na resposta dinâmica em um pórtico de concreto armado*. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte. Disponível em: https://sucupira.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/trabalhoConclusao/viewTrabalhoConclusao.jsf?popup=true&id_trabalho=119343
- Brandão, M. P. (1996) *Fundamentos da dinâmica de estruturas*. PROPESA, 1 Ed. CTA, São José dos Campos, SP.
- Clough, R. W., Penzien, J. (1993) *Dynamics of Structures*, New York, McGraw Hill.
- DIN 4150-1 (2001) *Vibrações na indústria da construção - Parte 1: Determinação preliminar das quantidades de vibração*. Instituto alemão de padronização e.V., Berlim.
- Machado, F. G. (2010) *Estudo do Comportamento de Fundações Submetidas a Vibrações de Máquinas*. (Dissertação) Mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- Milet, R. R. (2006) *Análise comparativa de métodos de cálculo para fundações de máquinas*. 2006. 119 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- Morrison, N. (1993) *Interacción suelo-estructuras: semiespaço de winkler*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- SAP 2000 (2002) Structural Analysis Program, Computers and Structures Inc.