

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
15 a 18 de Setembro de 2020 – Campinas - SP



Análise numérica do efeito do carregamento dinâmico em uma fundação de máquina

Daniel Reis Soidan de Oliveira

Graduando em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil,
danielrsoidan@gmail.com

Jean Rodrigo Garcia

Professor, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, jean.garcia@ufu.br

RESUMO: Em grande parte dos projetos geotécnicos as ações dinâmicas atuantes na fundação são de baixa magnitude e o seu estudo é negligenciado. Além disso, quando elas são consideradas, não é feita uma análise adequada à cerca do desempenho da fundação frente a tais ações, o que pode gerar projetos superdimensionados e onerosos. Assim, o objetivo deste trabalho é verificar, por meio de simulações bidimensionais com elementos finitos, o comportamento de um bloco de fundação submetido à ações dinâmicas verticais oriundas de uma máquina em funcionamento, sendo este um dos casos em que as ações dinâmicas podem superar as ações estáticas em termos de tensões e deformações. Nesse sentido, foram modelados blocos com diferentes massas, seguindo as recomendações da norma N-1848 da Petrobrás, que especifica o dimensionamento adequado para esse tipo de fundação e observou-se que a magnitude das pressões na base e dos recalques do bloco são inversamente proporcionais à massa da fundação, pois esta possui maior rigidez e proporciona maior amortecimento das cargas. No entanto, a redução das tensões causadas pela máquina é semelhante nos blocos com massa muito elevada, logo, o aumento da massa da fundação para valores muito elevados não é recomendado, visto que a carga estática devido ao peso do bloco é elevada, podendo superar a capacidade de carga do solo, e o amortecimento das cargas dinâmicas é semelhante em blocos com espessuras menores.

PALAVRAS-CHAVE: Bloco de Fundação, Análise Numérica, Carregamento Dinâmico, Elementos Finitos.

ABSTRACT: In most part of the geotechnical projects, the dynamic actions active on the foundation have low magnitude and their study is neglected. Furthermore, when they are considered, there is no proper analysis of the foundation's performance against such actions, which may create oversized and expensive projects. Thus, the aim of this work is to check, through bidimensional simulations with finite elements, the behavior of a foundation block subjected to vertical dynamic actions from a working machine, this being one of the cases in which dynamic actions can surpass static actions in terms of stresses and strains. In this sense, blocks with different masses were modeled, following the recommendations of the Petrobrás' standard N-1848, which specifies the adequate dimensioning for this type of foundation, and it was observed that the magnitude of the pressures at the base and the deformations are inversely proportional to the foundation mass, as the last one has greater stiffness and provides greater load damping. However, the reduction of stresses caused by the machine is similar in blocks with very high mass, therefore, increasing the mass of the foundation to very high values is not recommended, since the static load due to the weight of the block is high, being able to surpass the load capacity of the ground, and the damping of the dynamic loads is similar in blocks with smaller thicknesses.

KEYWORDS: Foundation Block, Numerical Analysis, Dynamic Load, Finite Elements.

1 Introdução

Em grande parte dos projetos de fundações, os efeitos devido ao carregamento dinâmico têm sido, não raramente, negligenciados por serem considerados de baixa magnitude ou pela complexidade quando da sua consideração, fazendo com que o risco de colapso estrutural seja elevado. Além disso, instalações industriais



com maquinário de grande porte apresentam esforços dinâmicos consideráveis que podem até superar as cargas estáticas, além de comprometer o desempenho estrutural da fundação e modificar as propriedades do solo ao seu redor. O conjunto desses fatores, juntamente com a ausência de normas específicas para esse tipo de fundação, fazem com que seja necessário um estudo mais aprofundado a respeito dos efeitos causados por cargas dinâmicas no conjunto solo-fundação.

1.1 Efeitos dinâmicos em fundações

Carregamentos dinâmicos são aplicados ao solo e às estruturas geotécnicas por várias fontes, como terremotos, explosões, operação de máquinas, mineração, tráfego, ventos e ações de ondas. Além disso, é conhecido que as propriedades de tensão-deformação do solo e seu comportamento dependem de muitos fatores e podem variar sob ação de cargas dinâmicas, quando comparado com as ações estáticas (Das & Ramana, 2010).

De acordo com Prakash (1981), dentre todos os tipos de fundações, as de máquinas requerem atenção especial, pois a carga dinâmica associada ao movimento das suas partes móveis (vibrações) é aplicada repetitivamente ao longo de um grande período de tempo, sendo necessário que o comportamento do solo seja elástico, caso contrário, a deformação aumentará a cada ciclo. Além disso, segundo Humar (2002), sob certas situações, as vibrações podem causar grandes deslocamentos e tensões consideráveis na estrutura e no solo ao redor.

No entanto, a análise e o projeto de fundações e estruturas submetidas à vibração são considerados um problema muito complexo devido à interação da engenharia estrutural, geotécnica e da teoria da vibração (O'Neill et al., 1979), fazendo com que grande parte dos projetos desse tipo de fundação seja superdimensionado para garantir a segurança, dada à falta de análises realizadas.

Embora seja sempre verificada a capacidade de carga do solo, para garantir a segurança contra o colapso, o que normalmente condiciona o projeto é a limitação dos deslocamentos, imposta pelo fabricante do equipamento (Hachich & Barros, 1998), tendo em vista que, quando submetido à carregamentos dinâmicos, a deformação permanente desenvolvida pelo solo durante cada ciclo é geralmente baixa, porém, sob um grande número de aplicações, a magnitude das deformações permanentes pode ser significativa (O'Reilly & Brown, 1991).

No Brasil, a norma N-1848 da Petrobrás fixa os parâmetros geotécnicos, dimensionais e de verificação de desempenho para a elaboração de projeto de fundações de máquinas estacionárias (rotativas e alternativas), sujeitas à cargas vibratórias.

Logo, é de suma importância analisar o impacto dos carregamentos dinâmicos ao longo do tempo, tanto em função das tensões (capacidade de carga) quanto das deformações (recalques).

Diante do exposto, avalia-se neste trabalho, o comportamento de um bloco de fundação corrido, pré-dimensionado de acordo com as soluções propostas pela N-1848 da Petrobrás, e do solo ao seu redor submetidos à ação dinâmica oriundas de uma máquina em funcionamento por meio de simulações numéricas bidimensionais com elementos finitos. Dentre os resultados gerados, serão analisados o desenvolvimento do recalque da fundação, a variação das pressões na base e do bulbo de tensões gerado devido aos carregamentos estáticos e dinâmicos em função da variação da massa do bloco de fundação.

2 Caracterização do problema analisado

2.1 Cenários de análise

Para atender corretamente as recomendações da N-1848 em relação à tensão admissível do solo e ao peso da fundação, o bloco deve ter largura de 10 metros e 1 metro de altura, sendo este a referência para as análises. Tendo em vista que a simulação será feita em um cenário de duas dimensões, não é definida a terceira dimensão do bloco, de modo que os resultados expressam o comportamento de um bloco corrido, em que seu comprimento tem dimensão muito maior que sua largura.

Além do bloco de referência, serão modelados outros 2 casos com alturas inferiores às recomendadas (0,5m e 0,75m) e outros 3 casos com alturas superiores (1,5m, 2m e 3m), totalizando 6 cenários para análise, onde todos possuem a mesma área de contato entre bloco e solo.

Acima da superfície de ambos os blocos de fundação, será adicionado uma máquina com massa total de aproximadamente 6,5 toneladas posicionada ao longo de 8 metros do bloco. Esta máquina será responsável por produzir as cargas dinâmicas que serão transmitidas para o conjunto solo-fundação.

O solo utilizado em ambas as análises é fictício e possui parâmetros semelhantes à uma argila arenosa, além de possuir baixo módulo de elasticidade, para que os efeitos do recalque e das tensões sejam maiores, fazendo com que os impactos da variação da espessura do bloco sejam melhor visualizados.

O bloco de fundação é composto por material com comportamento semelhante ao concreto armado, seguindo as recomendações da NBR-6120/2019 e de Ardiaca (2009), conforme Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros dos materiais usados na simulação.

Material	Peso específico (kN/m ³)	Ângulo de atrito (°)	Coesão (kPa)	Coeficiente de Poisson	Módulo de Young (MPa)
Solo	18	23	10	0,3	10
Concreto	25	60	300	0,2	28000

2.2 Ações e solicitações

As ações estáticas no sistema correspondem ao peso próprio do bloco de fundação, já incluído no modelo numérico e ao peso próprio da máquina, que será representado por um carregamento uniformemente distribuído de 8 kN/m ao longo de 8 metros de extensão.

Já a ação dinâmica no sistema corresponde à uma carga vertical aplicada na face superior do bloco com amplitude de 10 kN/m, frequência de 5 Hz e variação da carga em função do tempo representada pela equação:

$$q = 10 \times \sin(10 \times \pi \times t) \quad (1)$$

Em que:

q : carga aplicada no bloco, em kN;

t : tempo, em segundos;

As cargas são aplicadas na face superior do bloco de fundação de modo que os centro de gravidade de ambos sejam coincidentes.

2.3 Modelagem numérica

O modelo numérico é composto por uma malha de elementos finitos triangulares com 6 nós distribuídos gradualmente ao redor de todo o modelo 2D, que possui 50 metros de comprimento e 25 metros de profundidade (Figura 1).

Na região de interseção entre o bloco e o solo a densidade dos elementos finitos é maior para garantir maior precisão na análise das pressões da base.

Tendo em vista que o modelo possui dimensões limitadas, é necessário definir condições de extremidade de modo que estas não exerçam influência nos resultados e representem o comportamento real do solo. Deste modo, nas laterais do modelo os deslocamentos horizontais são restringidos, na extremidade inferior, os deslocamentos são impedidos nas duas direções e na extremidade superior o movimento é livre.

Inicialmente, serão calculadas as tensões e as deformações no solo devido à aplicação das cargas estáticas. Logo após, será adicionada a carga dinâmica e serão mensuradas as tensões e deformações no modelo em intervalos de 0,25 segundos até o instante em que o recalque imediato na fundação não sofra variação devido às cargas dinâmicas. Estes intervalos foram determinados previamente para garantir maior precisão na análise e menor tempo de processamento, pois verificou-se que os valores obtidos em análises com intervalos menores apresentavam resultados muito próximos, porém com tempo de processamento elevado.

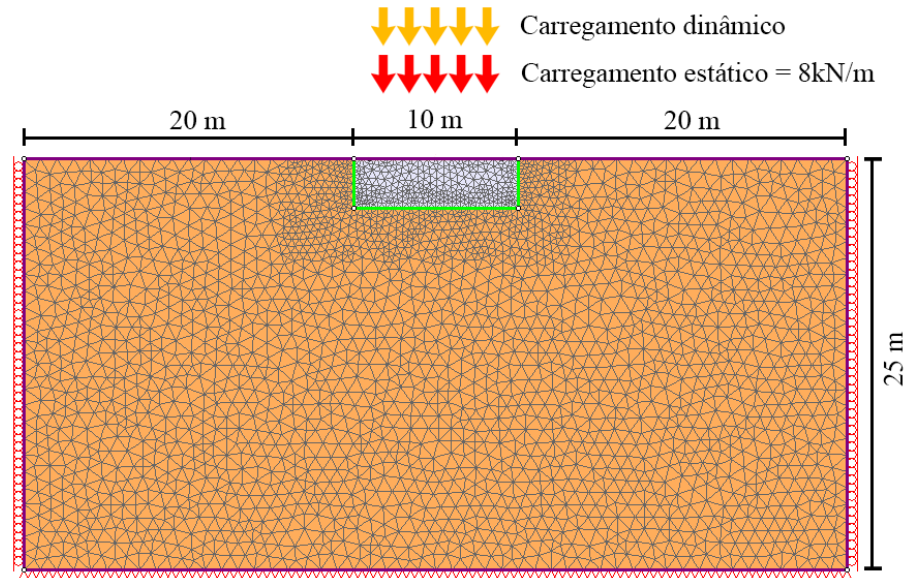


Figura 1. Geometria, malha de elementos finitos e condições de fronteira do modelo.

3 Resultados

3.1 Verificação do modelo

Os deslocamentos nas regiões extremas do modelo são nulos ou de baixa magnitude, logo, as restrições de movimento impostas na modelagem se mostraram adequadas e não interferiram nos resultados. Além disso, verificou-se que para tempos superiores a 2,5 segundos não há variação considerável nos deslocamentos do bloco (Figura 2). Logo, as análises posteriores foram realizadas somente até este instante.

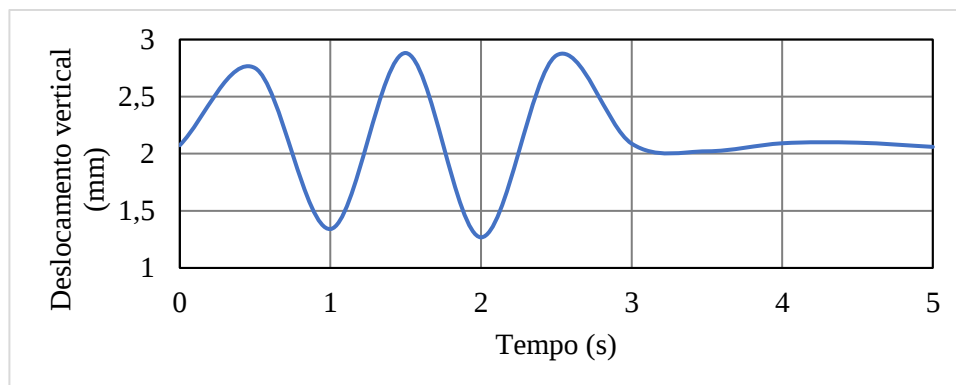


Figura 2. Acréscimo no deslocamento vertical da fundação em função do tempo.

3.2 Recalques

O recalque imediato da fundação pôde ser determinado pelo deslocamento vertical absoluto que ocorre no solo abaixo do bloco devido à ação dos carregamentos estáticos e dinâmicos.

Por meio da simulação com elementos finitos foram determinados o acréscimo no recalque causado pelas cargas estáticas em 45 pontos distintos, partindo desde a base do bloco até a extremidade inferior do modelo completo, devido à adição dos carregamentos dinâmicos. Com isso foram traçadas curvas do aumento do recalque em função da profundidade para cada um dos seis cenários analisados (Figura 3).

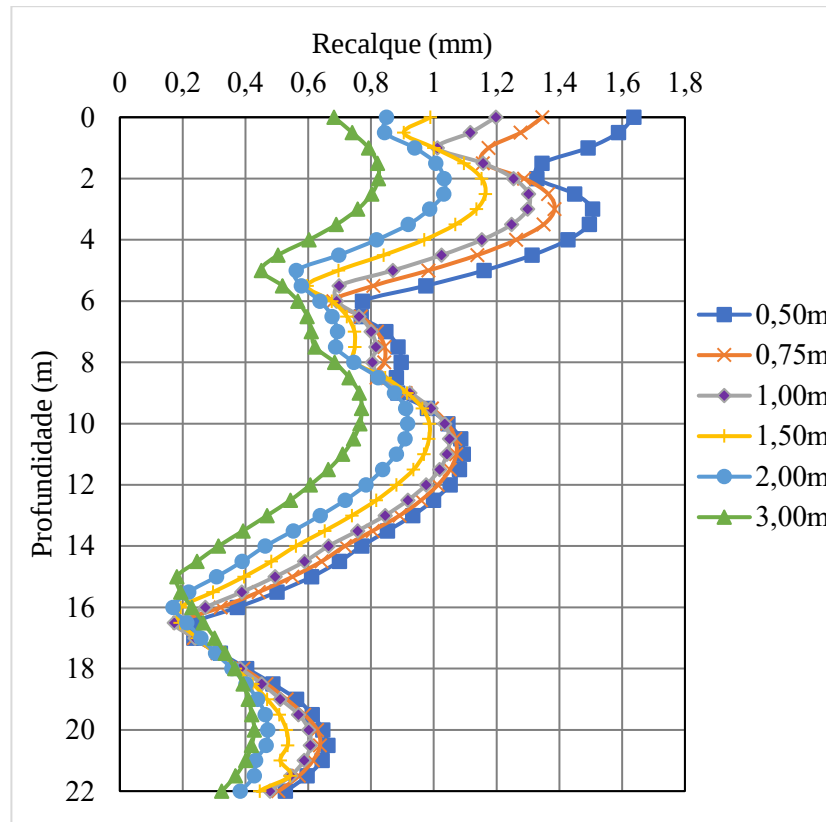


Figura 3. Curvas de recalque do solo devido às cargas dinâmicas.

Com base na análise das curvas, notou-se que nos blocos com espessura maior a intensidade do deslocamento vertical foi inferior à dos blocos com espessura menor, ou seja, a magnitude do recalque causado pelo carregamento dinâmico é inversamente proporcional à espessura do bloco de fundação.

Além disso, o recalque imediato na base do bloco também foi afetado pela variação de sua espessura, sendo este reduzido em aproximadamente 10%, 19% e 32% nos blocos com espessura de 1,5m, 2m e 3m, respectivamente, e acrescido em aproximadamente 6% e 14% nos blocos com espessura de 0,75m e 0,5m, respectivamente. Isto para todos os casos em relação ao recalque do bloco de 1m de espessura.

3.3 Bulbo de tensões

De maneira semelhante à análise de deslocamentos, foi realizado um estudo sobre a distribuição das tensões verticais ao longo de todo o perfil do solo em cada um dos cenários, para determinar os efeitos das cargas dinâmicas no bulbo de tensões gerado pelo peso próprio da fundação e da máquina.

Tendo em vista que a intensidade das ações dinâmicas variam com o tempo, as pressões em cada camada de solo se alteram em cada estágio de análise, logo, a curva resultante apresentada na Figura 4 é composta pela maior tensão observada no ponto ao longo dos 2,5 segundos em que a carga é aplicada, representando o caso mais crítico.

O bulbo de tensões gerado pelo carregamento dinâmico possui forma semelhante à uma função senoidal, devido à propagação dos esforços dinâmicos no solo (Figura 4). Além disso, o acréscimo de tensões ao longo de toda extensão vertical abaixo do bloco diminui conforme a espessura do bloco aumenta.

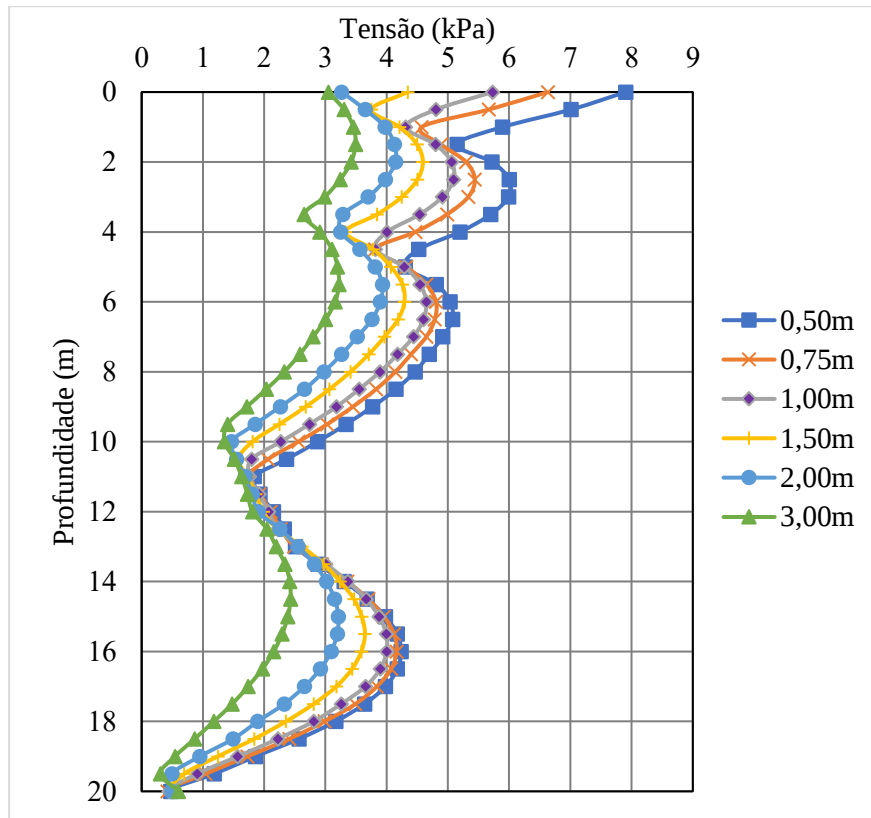


Figura 4. Bulbos de tensões gerado pelo carregamento dinâmico.

3.4 Pressões na base

As pressões na base do bloco de fundação foram determinadas pela média das tensões geradas no solo imediatamente abaixo do solo, sendo este o ponto em que há o maior acréscimo de tensão no solo (PINTO, 2006) e conseqüentemente o ponto mais crítico, tendo em vista que o solo analisado é homogêneo.

Na Tabela 2 são apresentadas as pressões na base nos dois estágios estudados e o acréscimo em cada caso devido à adição das ações dinâmicas.

Nota-se que o acréscimo de tensões na base da fundação é inversamente proporcional à espessura do bloco, apresentando um aumento de 33% e 16% nos blocos de 0,5m e 0,75m, respectivamente, e uma redução de 33%, 33% e 50% nos blocos com espessura de 1,5m, 2m e 3m, respectivamente, ambos em relação ao bloco com altura de 1m.

Tabela 2. Pressões na base dos blocos causadas pelas cargas estáticas e dinâmicas

Espessura do bloco (m)	Tensão carga estática (kPa)	Tensão cargas dinâmica+estática (kPa)	Diferença (kPa)	Variação percentual em relação ao bloco de 1m
0,50	26	34	8	~ 33 %
0,75	31	38	7	~ 16 %
1,00	37	43	6	-
1,50	48	52	4	~ 33 %
2,00	59	63	4	~ 33 %
3,00	82	85	3	~ 50 %

Além disso, verificou-se que a redução nas pressões na base diminui exponencialmente, logo, há um ponto em que o aumento da espessura do bloco não implica na redução das tensões causadas pelo carregamento

dinâmico (Figura 5). Além de que, em blocos com espessuras elevadas, as tensões geradas pelo seu peso próprio podem exceder a capacidade de carga do solo e causar a ruptura independente das cargas dinâmicas aplicadas.

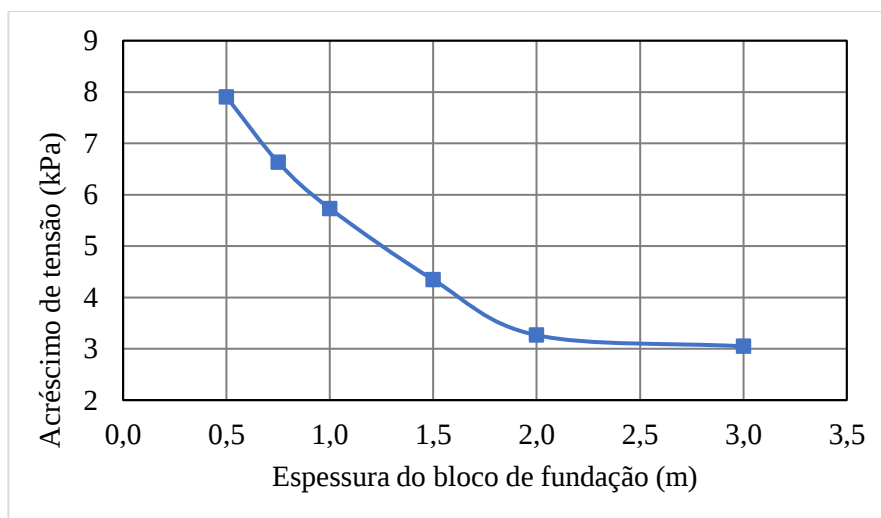


Figura 5. Pressões na base causadas pelo carregamento dinâmico

4 Conclusão

Por meio das simulações dinâmicas realizadas pôde-se concluir que a variação da massa do bloco, por meio da variação da sua espessura, tem impactos significativos no comportamento do solo e no desempenho da fundação, tendo em vista que as tensões e deformações causadas pela aplicação do carregamento dinâmico são reduzidas conforme a massa do bloco aumenta. No entanto, nos blocos com espessura elevada a redução das tensões geradas pelas ações dinâmicas é muito próxima e o aumento das dimensões do bloco se torna prejudicial, visto que as tensões estáticas se tornam muito elevadas.

Tal comportamento é previsto por Barkan (1962) e Das (2010), tendo em vista que a ação dinâmica é aplicada acima do bloco e, por isso, antes de ser transferida para o solo deve percorrer toda a fundação, que possui maior rigidez e consequentemente maior amortecimento, fazendo com que a dissipação das cargas seja maior nos blocos de massa elevada.

Além disso, é importante ressaltar que as simulações realizadas neste trabalho não apresentam valores exatos à cerca do comportamento real de um bloco de fundação submetido as mesmas cargas, tendo em vista que foram feitas simplificações no modelo e alguns fatores são negligenciados, como o adensamento, a presença de água e a heterogeneidade do solo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Uberlândia pela obtenção da licença do *software* utilizado nas análises deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ardiaca, D. H. (2009). *Mohr-Coulomb parameters for modeling of concrete structures*. Plaxis Bulletin.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2019). NBR 6120. *Ações para o cálculo de estruturas de edificações*.
- Barkan, D. D. (1962). *Dynamics of Bases and Foundations*. McGraw-Hill Book Company, Inc.
- Das, B. M., & Ramana, G. V. (2010). *Principles of Soil Dynamics*, 2nd ed.

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
 IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
 IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 15 a 18 de Setembro de 2020 – Campinas - SP



- Hachich, W., & Barros, J. M. C. (1998). Fundações Sujeitas a Esforços Dinâmicos. Em *Fundações: Teoria e Prática*, 2nd ed., p. 751. Pini.
- Humar, J. L. (2002). *Dynamics of Structures*, 2nd ed.
- O'Neill, M., Pincus, G., & Arya, S. (1979). *Design of Structures and Foundations for Vibrating Machines*, 4th ed.. Gulf Publishing Company.
- O'Reilly, M. P., & Brown, S. F. (1991). *Cycling Loads of Soils: from theory to design* , 1st ed.
- Petrobrás. (2011). N-1848. *Projeto de Fundações de Máquinas*.
- PINTO, C. de S. (2006). *Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas*, 3.ed. Oficina de Textos.
- Prakash, S. (1981). *Soil Dynamics*, 1st ed. McGraw-Hill, Inc.