

Comparative analysis of solutions in shallow foundations or in pile foundations for an industrial machine

Análise comparativa de soluções em fundações direta e sobre estacas para um equipamento industrial



L. P. MACABÚ^a
larissamacabu@gmail.com

S. H. C. SANTOS^a
sergiohampshire@gmail.com

S. S. LIMA^a
sdesouzalima@gmail.com

Abstract

This paper presents a methodology for the analysis of reinforced concrete rigid block foundations subjected to the vibrations due to the operation of machines. This analysis is important in the design of great industrial plants, where equipment of great size and high cost is present, and in which an adequate structural behavior is essential for the plant operation. The analysis methodology is initially presented, based on two computer programs, BLOCKSOLVER and PILAY. This methodology is applied in a comparative analysis of solutions in shallow foundations and in pile foundations for a Flue Gas Blower, equipment present in a petrochemical plant. The dynamic analysis is done for the two types of foundation, and also for a parametric variation in the shear modulus of the soil (G). The design of the foundation is done considering the geometrical limitations for the location of the equipment, consequent of the plant layout. The most important results are the maximum displacements, checked against the stringent limitations imposed by the design standards.

Keywords: machine foundations, dynamic analysis.

Resumo

Apresenta-se uma metodologia para a análise de fundações de concreto armado em bloco rígido, submetidas a vibrações decorrentes da operação de máquinas. Esta análise é fundamental no projeto de grandes instalações industriais, em que estão presentes fundações para equipamentos de grandes dimensões e custo elevado, e onde o comportamento estrutural adequado é essencial para a operação destas instalações. É apresentada inicialmente a metodologia de análise, baseada em dois programas computacionais, o BLOCKSOLVER e o PILAY. Esta metodologia é aplicada na análise comparativa de soluções em fundações diretas e sobre estacas de um soprador de gás, equipamento que integra os arranjos das refinarias petroquímicas. A análise dinâmica é feita para os dois tipos de fundação, fazendo também uma variação paramétrica do módulo de deformação transversal do solo (G). O dimensionamento da fundação é feito considerando o espaço limitado para a locação do equipamento determinado pelo arranjo da refinaria. Os resultados mais importantes são os deslocamentos máximos da fundação, que são verificados considerando as rigorosas limitações impostas pelas normas de projeto.

Palavras-chave: fundação de máquinas, análise dinâmica.

^a Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Rio de Janeiro, Brasil.

1. Introdução

O conhecimento dos efeitos das cargas dinâmicas nas estruturas se torna cada vez mais necessário, devido aos crescentes investimentos e construção de novas refinarias com o objetivo de agregar valor à crescente produção de petróleo e gás nacional, levando ao desenvolvimento de novas tecnologias nas mais diversas áreas do conhecimento técnico.

O estudo dos efeitos destas cargas exige o conhecimento específico dos conceitos da Análise Dinâmica, presente em livros clássicos como os de CLOUGH e PENZIEN [1] e também em livros recentemente publicados no Brasil, como SOUZA LIMA e SANTOS [2] e BRASIL e SILVA [3], estes dois últimos voltados especificamente para a Engenharia Civil. Neste último, encontramos também valiosas informações específicas para o projeto de Fundações de Máquinas, tema que se resente de bibliografia atualizada, mesmo a nível internacional. Com o objetivo de completar um quadro sumário de referências nesta área, podemos citar, neste assunto, os livros de ARYA et al. [4], já clássico e o mais recente de BHATIA [5].

Como exemplo de recomendações normativas relevantes, frequentemente seguidas nos projetos de fundações de máquinas no Brasil, podemos citar as normas alemãs DIN 4024-1[6] e DIN 4024-2 [7], e as recomendações da PETROBRAS N-1848 [8] e do American Concrete Institute ACI 351.3R-04 [9].

Este trabalho tem como objetivo apresentar a análise comparativa de soluções em fundações diretas e sobre estacas de um soprador de gás, equipamento que integra os arranjos das refinarias petroquímicas. O estudo de seu comportamento será feito variando alguns parâmetros na análise, como o tipo de fundação (superficial ou profunda) e o módulo de deformação transversal do solo (G).

Os modelos das fundações serão analisados em um programa específico para análise dinâmica de fundações de máquinas, o BLOCKSOLVER (COUTINHO e MENDES [10]). Esse programa fornece os deslocamentos máximos na frequência de operação, o que permite calcular também a máxima velocidade de vibração da fundação. Para a análise das fundações profundas também será utilizado o programa PILAY (NOVAK e ABOUL-ELLA [11]). Este programa fornece os coeficientes de rigidez (K_x , K_y e K_z) e os coeficientes de amortecimento (C_x , C_y e C_z) da fundação, de acordo com as características das estacas e do solo. Esses coeficientes são utilizados como dados de entrada para caracterizar a fundação no programa BLOCKSOLVER. A verificação das velocidades máximas será feita segundo critérios da norma ISO 2372 [12].

O objetivo conceitual principal neste projeto de fundações de máquinas é o de encontrar uma solução que afaste a frequência de operação das frequências próprias do conjunto estrutural, desta forma minimizando os deslocamentos decorrentes da aplicação das cargas dinâmicas. O dimensionamento da fundação será feito considerando o espaço limitado para a locação do equipamento determinado pelo arranjo da refinaria. Este dimensionamento consistirá na definição das dimensões geométricas do bloco e na escolha da melhor solução do ponto de vista dinâmico, em fundação direta ou sobre estacas. Este artigo resume o Projeto de Graduação (MACABÚ [13]) apresentado pela primeira autora, sob a orientação dos dois outros autores.

2. Método de análise

A metodologia de análise se apoia nos programas BLOCKSOL-

VER, para a análise dinâmica das fundações direta e sobre estacas do equipamento e PILAY, para a avaliação dos coeficientes de rigidez e amortecimento de estacas nas direções vertical e horizontal. Estes programas são descritos a seguir.

2.1 O programa BLOCKSOLVER

No caso específico de fundações retangulares diretas sobre solo homogêneo, o BLOCKSOLVER (COUTINHO e MENDES [10]) efetua toda a análise de forma totalmente automatizada. Neste caso, utiliza a formulação de Wolf e Gazetas, encontrada em WOLF [14]. Em casos mais gerais, o programa deve receber, como dados de entrada, coeficientes de impedância (molas e amortecedores), concentrados no centro geométrico da face inferior do bloco de fundação. No caso específico de fundações sobre estacas, estes coeficientes de impedância devem ser inicialmente determinados para as estacas isoladas, pelo programa PILAY.

A análise dinâmica de blocos rígidos, submetidos a cargas harmônicas, recai em um sistema de seis equações diferenciais de movimento. Este sistema de equações pode ser escrito na forma complexa, o que permite seu tratamento de forma matricial, ver CLOUGH e PENZIEN [1]:

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = F.e^{i\omega t} \quad (1)$$

O sistema máquina-fundação tem matrizes M, C e K de massa, amortecimento e rigidez, respectivamente. O vetor F corresponde às amplitudes das forças e dos momentos aplicados. O vetor u(t) coleciona as variações no tempo dos deslocamentos e rotações nos seis graus de liberdade; i é a unidade imaginária e ω é a frequência circular de excitação. Como o problema é harmônico, u(t) pode ser escrito em função de U, que corresponde às amplitudes incógnitas dos deslocamentos e rotações, na forma:

$$u(t) = U.e^{i\omega t} \quad (2)$$

O problema é resolvido pela álgebra matricial complexa:

$$(-\omega^2 M + i\omega C + K).U.e^{i\omega t} = F.e^{i\omega t} \quad (3)$$

$$U = (-\omega^2 M + i\omega C + K)^{-1}.F \quad (4)$$

A matriz de massa M é montada a partir das características geométricas da base e das massas do equipamento. As matrizes de amortecimento e de rigidez C e K do sistema são montadas a partir das propriedades elásticas do solo e do tipo de fundação.

Figura 1 – Corte transversal do soprador

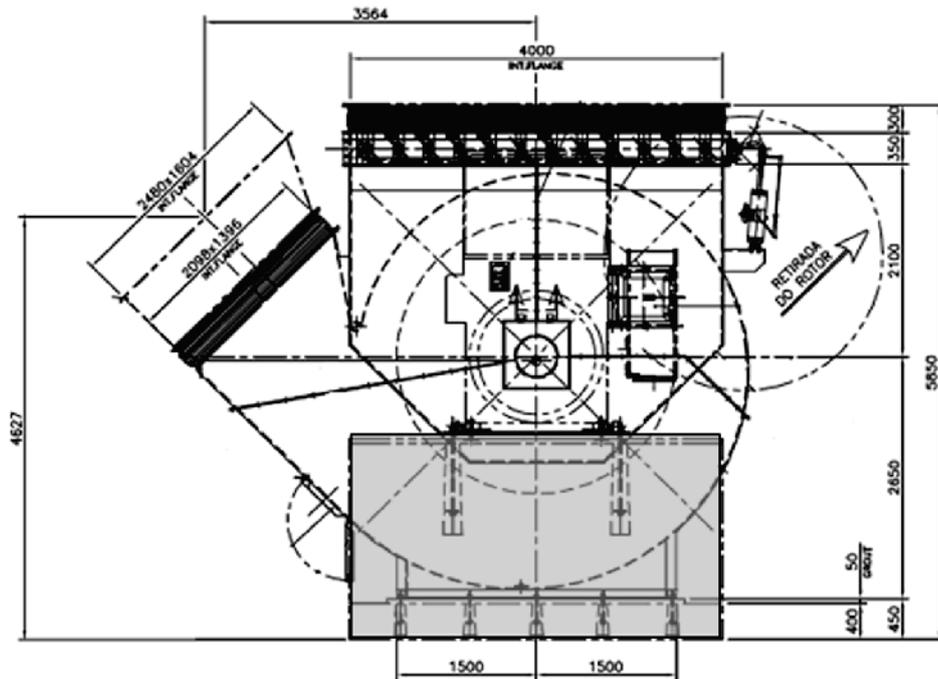


Figura 2 – Corte longitudinal pelo eixo do soprador mostrando os pontos de fixação do equipamento no bloco de concreto da fundação

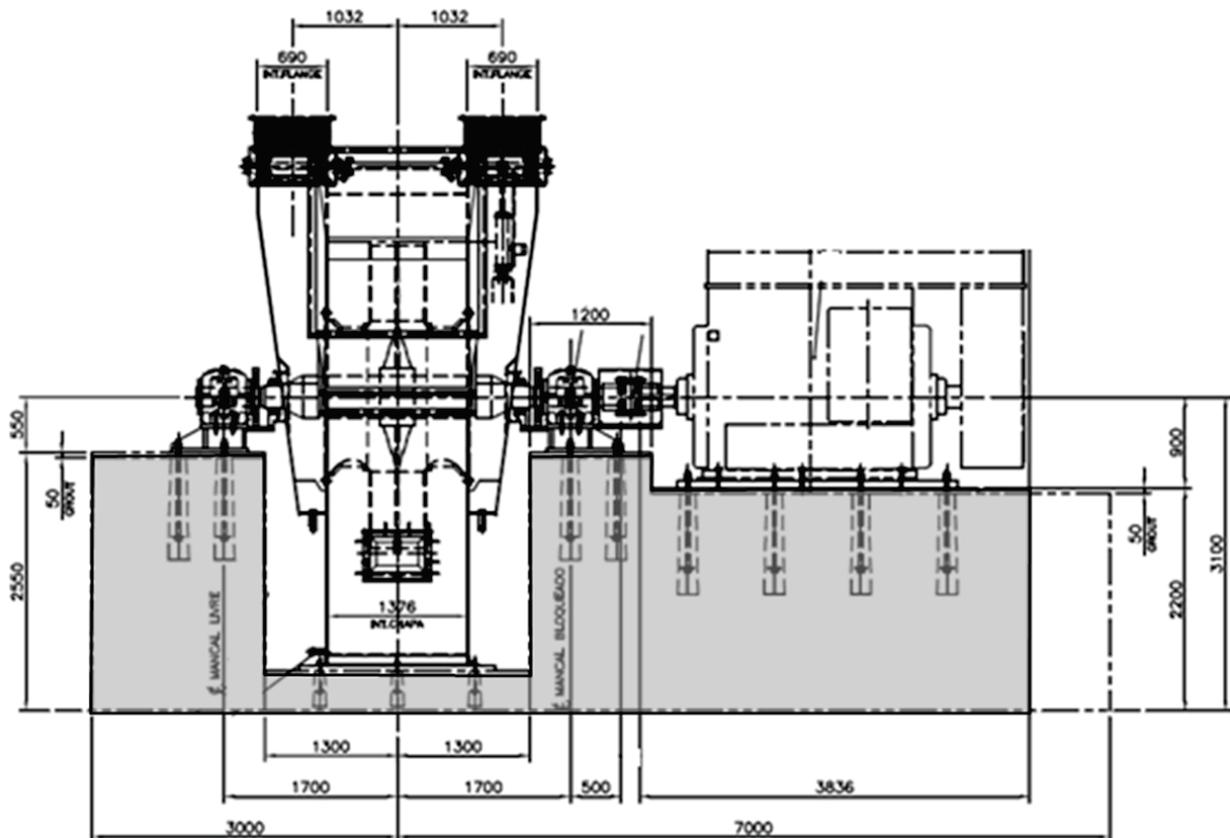


Tabela 1 – Carga estática

Área	I	II	III	IV	Total
Carga estática (N)	-38073	-38073	-209254	-171381	-456781

Tabela 2 – Cargas dinâmicas na fundação

Área	Carga dinâmica normal (N)		Carga dinâmica máxima (N)		Carga axial (N)
	Y	Z	Y	Z	
I	2660	2660	4688	4688	0
II	2660	2660	4468	4468	0

Maiores detalhes sobre a consideração dos efeitos de interação solo-estrutura podem ser encontrados no Projeto de Graduação original (MACABÚ [13]).

2.2 O programa PILAY

O programa PILAY (NOVAK e ABOUL-ELLA [11]) calcula os coeficientes de rigidez e de amortecimento para uma estaca isolada. A partir desses coeficientes, são calculados os coeficientes de rigidez e amortecimento da fundação, considerando o número total e o posicionamento das estacas (considerando o efeito de grupo).

Esses coeficientes são dados de entrada para a análise da fundação profunda no programa BLOCKSOLVER.

O PILAY foi desenvolvido a partir da abordagem de Novak, a qual pressupõe que as camadas de solo são elásticas e contínuas, que a estaca é circular e tem seção transversal sólida, que o material da estaca é elástico linear e que a estaca está perfeitamente conectada ao solo, não ocorrendo separação entre a estaca e o solo. Para o cálculo dos coeficientes de rigidez e amortecimento é necessário definir a velocidade de propagação das ondas de cisalhamento correspondente a cada camada de solo. Características da estaca e do solo também são parâmetros de entrada, como: peso

Figura 3 – Pontos de aplicação das cargas

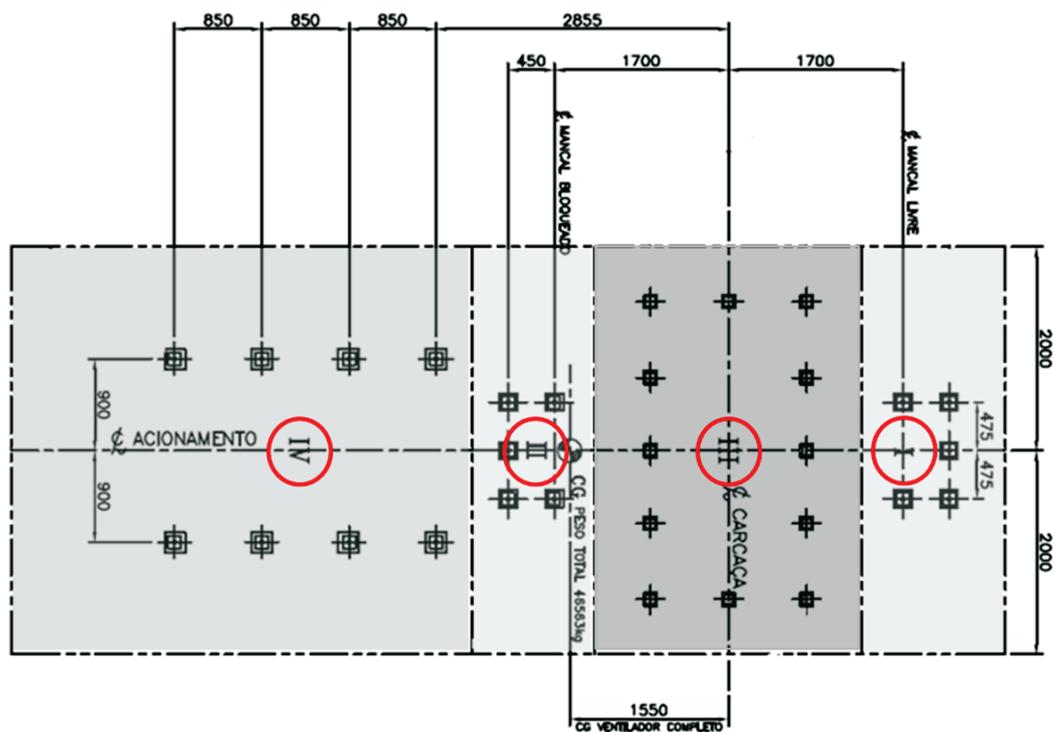
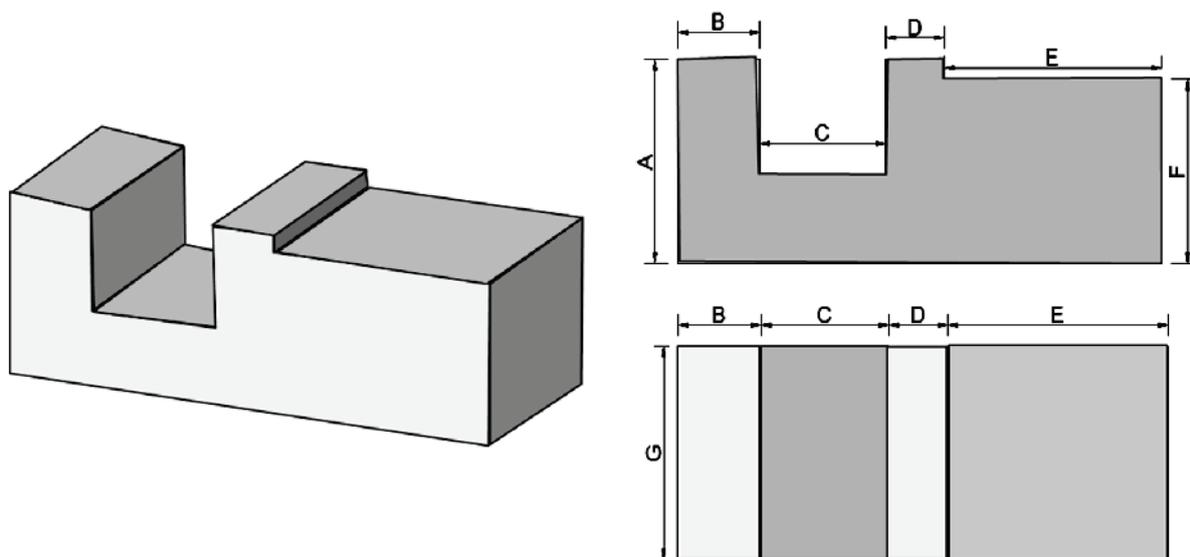


Figura 4 – Esquema das dimensões da base de concreto



específico, coeficiente de Poisson, comprimento da estaca, raio da estaca, área da seção transversal, módulo de elasticidade do material da estaca, momento de inércia da seção transversal da estaca e espessura das camadas representativas do solo.

3. Fundação analisada

É apresentada uma análise comparativa com duas soluções para as fundações de um equipamento montado em uma base rígida em concreto armado, sobre fundação direta e sobre fundação profunda constituída de oito estacas raiz (com diâmetro $\Phi=25$ cm). Foi considerada uma variação paramétrica para o módulo de deformação transversal do solo. As duas soluções são analisadas para os mesmos carregamentos, sendo que a base da fundação sobre estacas necessitou ser maior em planta do que a base para a fundação direta. Este aumento de dimensões foi necessário para atender às limitações de deslocamentos, conforme esclarecido a seguir.

3.1 Características do equipamento – soprador de gás

As dimensões geométricas do equipamento são mostradas em seções transversal e longitudinal nas Figuras 1 e 2, respectivamente. As cargas e seus pontos de aplicação são definidos pelo fornecedor do equipamento. Na Tabela 1 são mostradas as cargas estáticas aplicadas nas áreas I, II, III e IV do equipamento e na Tabela 2 as cargas dinâmicas aplicadas nas áreas I e II, conforme a Figura 3.

As análises foram feitas para dois valores de frequências distintos: na frequência do soprador (19,75 Hz) e na frequência do motor (60 Hz). Os resultados correspondentes às duas frequências foram posteriormente superpostos de acordo com os critérios definidos pela ISO 2372 [12], ou seja, pela raiz quadrada da soma dos quadrados das velocidades efetivas obtidas nas duas frequências.

Tabela 3 – Dimensões das bases

Dimensões das bases (m)			
Fundação direta		Fundação profunda	
A = 3,70	E = 4,50	A = 3,70	E = 5,50
B = 1,70	F = 3,35	B = 2,70	F = 3,35
C = 2,60	G = 4,00	C = 2,60	G = 4,00
D = 1,20		D = 1,20	

Tabela 4 – Variação de G – fundação direta

Módulo de cisalhamento do solo (kPa)		
Fundação direta		
NSPT = 10		
Modelo 1	~50% G	30000
Modelo 2	100% G	72500
Modelo 3	~150% G	108000

Tabela 5 – Variação de G – fundação profunda

	Módulo de cisalhamento do solo (kPa)		
	Fundação profunda		
	1ª camada - $N_{SPT} = 10$	2ª camada - $N_{SPT} = 26$	3ª camada - $N_{SPT} = 53$
Modelo 1 ~ 50% G	30000	80000	135000
Modelo 2 100% G	72500	160000	270000
Modelo 3 ~ 150% G	108000	240000	405000

3.2 Características da base de concreto

A base foi dimensionada seguindo as recomendações do documento da PETROBRAS N-1848 [8]. O centróide da base e o centro de gravidade do conjunto fundação-máquina devem estar na mesma vertical, sendo tolerável uma excentricidade de até 5% com relação à dimensão correspondente, de acordo com estas recomendações.

A altura do bloco de fundação foi determinada para que não fosse menor que 1/5 da menor dimensão em planta da base, nem menor que 1/10 da maior dimensão. A base é de concreto armado, com $f_{ck} = 30$ MPa. As dimensões da base são determinadas de forma a se adequar à geometria do equipamento e estão especificadas na Figura 4 e na Tabela 3.

Adotando-se para a fundação em estacas as mesmas dimensões da base considerada para a fundação direta, as amplitudes resultaram inadmissíveis. Foi necessário então aumentar as dimensões da base da fundação profunda, com o objetivo de aumentar a massa do sistema, reduzindo desta forma os deslocamentos a valores admissíveis.

3.3 Características do solo

O solo, sob a ação das forças induzidas pelo funcionamento das máquinas, apresenta deformações extremamente pequenas, da

ordem de alguns micra (μm). Isso corresponde a deformações específicas muito pequenas, o que permite considerar o comportamento do solo como elástico e linear. As diversas regiões do solo são consideradas como homogêneas. Os diversos parâmetros do solo são considerados conforme definido a seguir.

3.3.1 Módulo de deformação transversal (G), Coeficiente de Poisson (ν) e Massa específica (ρ)

O módulo de deformação transversal do solo foi definido empiricamente, devido à falta de ensaios específicos para sua determinação. Este parâmetro foi avaliado em função do número de golpes do ensaio de SPT, de acordo com OHSAKI e IWASAKI [15]:

$$G = 11,5 \times (N_{spt})^{0,8} \quad (5)$$

O número de golpes do ensaio SPT varia com a profundidade. Esses valores foram definidos a partir do boletim da sondagem à percussão mais representativa para a fundação. Devido à imprecisão da fórmula empírica adotada e também devido ao processo de uniformização das propriedades do solo, procedeu-se a uma variação paramétrica de 50% para mais e para menos no valor de G. Os valores de G utilizados nas três condições de solo estão apresentados nas Tabelas 4 e 5.

Adota-se para o Coeficiente de Poisson o valor de $\nu = 0,35$. A eventual variação no valor numérico deste parâmetro tem influência nos resultados bem menor do que a variação dos valores de G. Para a massa específica é assumido o valor de $\rho = 1,8 \text{ t/m}^3$.

3.3.2 Consideração sobre o nível do lençol freático

A presença do lençol freático elevado amplifica as vibrações e as propaga a longas distâncias, além de poder induzir a compactação em solos arenosos saturados. Desta forma, para viabilizar uma fundação direta é recomendável que a distância do fundo do bloco até o nível d'água mais elevado seja superior a três vezes a menor dimensão da base, como ilustrado na Figura 5.

4. Resultados das análises

4.1 Fundação direta

Os deslocamentos máximos da fundação nas direções X, Y e Z

Figura 5 – Distância mínima entre o fundo da fundação e o N.A.

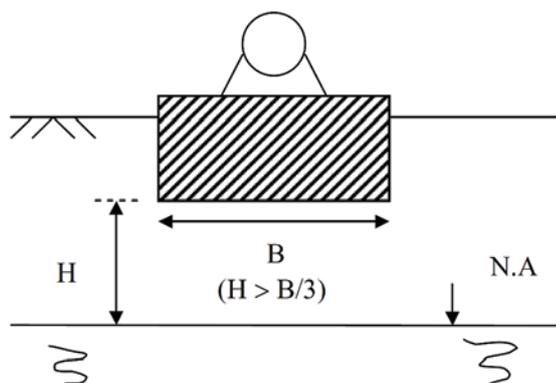


Tabela 6 – Deslocamentos máximos nas direções X, Y e Z para cada valor de G

f (Hz)	G (kN/m ²)	Translação X (10 ⁻³ mm)	Translação Y (10 ⁻³ mm)	Translação Z (10 ⁻³ mm)
19,75	30000	5,2	19,8	18,8
	72500	5,1	28,2	20,1
	108000	5,1	32,6	20,6
60,0	30000	0,2	1,9	1,9
	72500	0,3	1,9	1,9
	108000	0,4	2,0	2,0

Tabela 7 – Velocidades efetivas nas direções X, Y e Z para cada valor de G

G (kN/m ²)	Velocidades efetivas		
	Velocidade X (mm/s)	Velocidade Y (mm/s)	Velocidade Z (mm/s)
30000	0,46	1,81	1,73
72500	0,46	2,53	1,84
108000	0,46	2,91	1,88

seguinte relação (CLOUGH e PENZIEN [1]):

$$v = 2 \times \pi \times f \times d \tag{6}$$

onde:
 v = velocidade (mm/s)
 f = frequência de operação (Hz)
 d = deslocamento (mm)
 Como operam duas frequências diferentes, a velocidade efetiva é definida em função das velocidades acima determinadas, pela expressão a seguir:

$$v_{rms} = \sqrt{(v_1^2 + v_2^2)}/2 \tag{7}$$

para cada frequência de excitação e de acordo com cada valor do módulo de deformação transversal do solo são apresentados na Tabela 6.

As velocidades máximas podem ser encontradas a partir dos valores dos deslocamentos obtidos pelo programa, através da

Figura 6 – Frequência x Translação Y (solução em fundação direta)

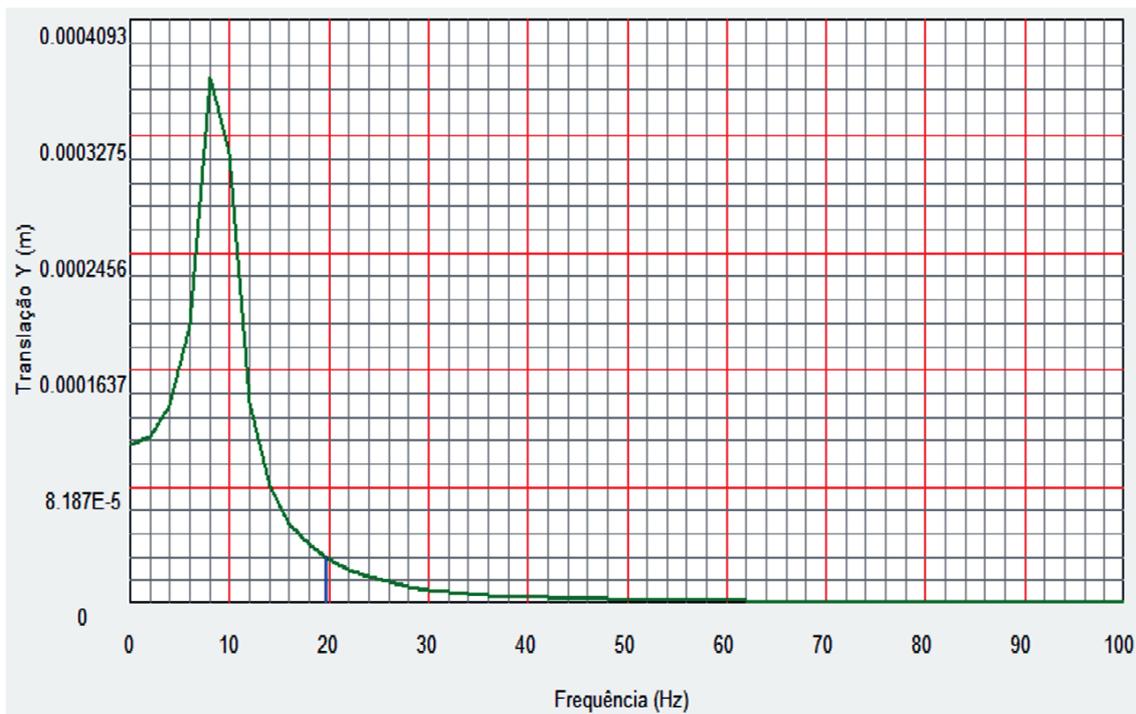


Tabela 8 – Coeficientes de rigidez e de amortecimento – Modelo 1

Modelo 1							
Frequência = 19.75 Hz				Frequência = 60 Hz			
Resultados do PILAY							
Coef. de rigidez		Coef. de amortecimento		Coef. de rigidez		Coef. de amortecimento	
KWW	343660	CWW	407	KWW	355180	CWW	383
KUU	62683	CUU	163	KUU	64855	CUU	150
Considerando as 8 estacas							
Coef. de rigidez		Coef. de amortecimento		Coef. de rigidez		Coef. de amortecimento	
KZ	27492805	CZ	3255	KZ	2841440	CZ	3063
KX = KY	01464	CX = CY	1305	KX = KY	518840	CX = CY	1201
KZZ	5004611	CZZ	13023	KZZ	5178023	CZZ	11983
KXX	2749280	CXX	3255	KXX	2841440	CXX	3063
KYY	24688534	CYY	29227	KYY	25516131	CYY	27505

Dessa forma, a velocidade efetiva é resultante da combinação das velocidades para as frequências de 19,75 Hz e 60 Hz, conforme apresentado na Tabela 7.

De acordo com a ISO 2372 [12], o equipamento em estudo pode ser classificado como máquina pesada (Classe III). Velocidades até 1,8 mm/s encontram-se na faixa ótima, as entre 1,8 a 4,5 mm/s estão na faixa aceitável, as entre 4,5 a 11,2 mm/s estão na faixa tolerável e as velocidades superiores a 11,2 mm/s são inaceitáveis. A máxima velocidade encontrada foi de 2,91 mm/s, que acontece na direção horizontal (Y) para o maior valor do módulo de cisalhamento transversal (G). A velocidade encontra-se então na faixa de classificação aceitável. Portanto, de acordo com os critérios estabelecidos na ISO 2372 [12], e também visto que a frequência própria está distante da frequência de excitação conforme a Figura 6 (obtida com o programa BLOCKSOLVER), a solução adotada é factível.

Em contrapartida, analisando-se a sondagem mais representativa, foi observado que o nível do lençol freático encontra-se a uma distância menor que três vezes a menor dimensão da

base, sugerindo uma análise da solução em fundação sobre estacas.

4.2 Fundação profunda

Para as três situações de rigidez do solo consideradas (Modelos 1, 2 e 3), os valores dos coeficientes de rigidez e amortecimento obtidos pelo programa PILAY, assim como os coeficientes condensados no centro do bloco estão apresentados nas Tabelas 8, 9 e 10 para cada uma das frequências de operação. Nesta avaliação, considerando-se a distância entre as estacas, foi desprezado o efeito de grupo.

Os deslocamentos da fundação nas direções X, Y e Z, para cada frequência de excitação e de acordo com cada valor do módulo de cisalhamento do solo, são apresentados na Tabela 11. As velocidades efetivas, resultantes da combinação das velocidades para as diferentes frequências, são apresentadas na Tabela 12. A máxima velocidade efetiva encontrada foi 4,20 mm/s, que acontece na direção vertical (Z) para o maior valor do módulo de cisalhamento transversal (G), e que também se

Tabela 9 – Coeficientes de rigidez e de amortecimento – Modelo 2

Modelo 2							
Frequência = 19.75 Hz				Frequência = 60 Hz			
Resultados do PILAY							
Coef. de rigidez		Coef. de amortecimento		Coef. de rigidez		Coef. de amortecimento	
KWW	472230	CWW	425	KWW	481210	CWW	417
KUU	117830	CUU	200	KUU	121030	CUU	196
Considering the 8 piles							
Coef. de rigidez		Coef. de amortecimento		Coef. de rigidez		Coef. de amortecimento	
KZ	3777840	CZ	3401	KZ	3849680	CZ	3335
KX = KY	942640	CX = CY	1598	KX = KY	968240	CX = CY	1568
KZZ	9407547	CZZ	15949	KZZ	9663035	CZZ	15652
KXX	3777840	CXX	3401	KXX	3849680	CXX	3335
KYY	33925003	CYY	30537	KYY	34570126	CYY	14084

Tabela 10 – Coeficientes de rigidez e de amortecimento – Modelo 3

Modelo 3							
Frequência = 19.75 Hz				Frequência = 60 Hz			
Resultados do PILAY							
Coef. de rigidez		Coef. de amortecimento		Coef. de rigidez		Coef. de amortecimento	
KWW	559250	CWW	428	KWW	566940	CWW	422
KUU	156710	CUU	216	KUU	160120	CUU	213
Considerando as 8 estacas							
Coef. de rigidez		Coef. de amortecimento		Coef. de rigidez		Coef. de amortecimento	
KZ	4474000	CZ	3421	KZ	4535520	CZ	3372
KX = KY	1253680	CX = CY	1731	KX = KY	1280960	CX = CY	1705
KZZ	12511726	CZZ	17273	KZZ	12783981	CZZ	17015
KXX	4474000	CXX	3421	KXX	4535520	CXX	3372
KYY	40176520	CYY	30722	KYY	40728970	CYY	30284

Tabela 11 – Deslocamentos nas direções X, Y e Z para cada valor de G

f (Hz)	G (%)	Translação X (10 ³ mm)	Translação Y (10 ³ mm)	Translação Z (10 ³ mm)
19,75	50%	3,46	13,42	25,50
	100%	3,13	11,26	35,26
	150%	3,15	8,73	47,46
60,0	50%	0,03	1,58	1,67
	100%	0,05	1,57	1,70
	150%	0,21	1,87	2,17

encontra na faixa de classificação aceitável. Neste caso, a frequência própria ainda está distante da frequência de excitação, conforme a Figura 7.

Como em fundações profundas não existem restrições quanto ao nível elevado do lençol freático, esta se torna uma solução mais adequada relativamente à fundação direta.

5. Conclusões

Neste artigo foi apresentada a sistemática empregada para viabilizar a fundação de um equipamento típico com cargas dinâmicas em uma planta industrial. Para isto foi feita uma análise comparativa de soluções em fundação direta e sobre estacas. Através do

uso dos programas PILAY e BLOCKSOLVER foi possível avaliar os deslocamentos da fundação ocasionados pelo carregamento dinâmico. Os deslocamentos sofridos pela fundação ficam assim bem controlados e limitados.

De posse dos valores dos deslocamentos, foram calculadas as velocidades efetivas correspondentes. Visto que o equipamento em estudo possui duas frequências de excitação, foram calculadas as velocidades efetivas com a combinação de resultados. Na análise da fundação direta, a máxima velocidade encontrada foi 2,91 mm/s, que acontece em uma direção horizontal (Y). Na análise da fundação sobre estacas, a máxima velocidade encontrada foi 4,20 mm/s, ocorrendo na direção vertical (Z). Ambas ocorrem para o maior valor do módulo de deformação transversal (G).

Ainda que a velocidade na fundação sobre estacas esteja 40% maior do que a velocidade na fundação direta, as duas encontram-se na faixa de classificação aceitável de acordo com os critérios estabelecidos pela ISO 2372 [12].

Analisando a sondagem mais representativa, foi observado que o nível do lençol freático encontra-se a uma profundidade menor que três vezes a menor dimensão da base. Assim, a solução ideal fica sendo a fundação sobre estacas.

Para que fossem encontrados resultados satisfatórios para essa última solução, foi necessário aumentar a massa da fundação, aumentando suas dimensões em planta, com o objetivo de diminuir os deslocamentos e afastar a frequência própria da frequência de operação do equipamento. A dificuldade encontrada para este au-

Tabela 12 – Velocidades efetivas nas direções X, Y e Z para cada valor de G

G (%)	Velocidades efetivas		
	Velocidade X (mm/s)	Velocidade Y (mm/s)	Velocidade Z (mm/s)
50%	0,30	1,25	2,28
100%	0,27	1,07	3,13
150%	0,28	0,91	4,20

mento de massa foi a restrição dada pelas fundações vizinhas, de maneira a que não ocorressem interferências.

6. Referências bibliográficas

- [01] CLOUGH, R.W.; PENZIEN, J. Dynamics of Structures, McGraw-Hill Book Co – Second Edition, Singapore, 1993.
- [02] SOUZA LIMA, S.; SANTOS, S.H.C. Análise Dinâmica das Estruturas, Editora Ciência Moderna, Rio de Janeiro, 2008.
- [03] BRASIL, R.M.L.R.F.; SILVA, M.A. Introdução à Dinâmica das Estruturas, Editora Edgard Blücher, São Paulo, 2013.
- [04] ARYA, S.; O'NEILL M.; PINCUS, G. Design of Structures and Foundations for Vibrating Machines, Gulf Publishing, Houston, 1979.
- [05] BATHIA, K.G., Foundations for Industrial Machines, D-CAD Publishers, New Delhi, 2008.
- [06] DEUTCHES INSTITÜT FOR NORMUNG. DIN 4024-1 – Machine Foundations; Flexible Structures that Support Machines with Rotating Elements. 1988.
- [07] DEUTCHES INSTITÜT FOR NORMUNG. DIN 4024-2 – Machine Foundations; Rigid Foundations for Machinery with Periodic Excitation. 1991.
- [08] PETROBRAS. N 1848 – Projeto de Fundações de Máquinas. 2008.
- [09] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 351.3R-04 - Foundations for Dynamic Equipment, 2011.
- [10] COUTINHO, D.S.A.; MENDES, C.H.F. Projecto Automatizado de Fundações de Máquinas. Projeto Final de Curso, Rio de Janeiro, DME/POLI/UFRJ, 2007.
- [11] NOVAK, M.; ABOUL-ELLA, F. PILAY – A Computer Program for Calculation of Stiffness and Damping of Piles in Layered Media. Systems Analysis Control and Design Activity (SAC-DA), The University of Western Ontario, London, Canada, 1977.
- [12] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 2372 – Mechanical Vibration of Machines with Operation Speeds from 10 to 200 rev/s, 1974.
- [13] MACABÚ, L.P. Análise Comparativa de Soluções em Fundação Direta e Sobre Estacas para um Equipamento em uma Instalação Industrial. Projeto de Graduação, Departamento de Estruturas, Escola Politécnica da UFRJ, Setembro de 2011.
- [14] WOLF, P.J. Foundation Vibration Analysis Using Simple Physical Models, Prentice Hall, 1994.
- [15] OHSAKI, Y.; IWASAKI, R. On dynamic shear moduli and Poisson's ratio of soil deposits. Soil and Foundations, JSSMFE, v.14, nº4, p. 59-73, Dec. 1973.

Figura 7 – Frequência x Translação Z (solução em fundação profunda)

