



ANÁLISE COMPARATIVA DE SOLUÇÕES EM FUNDAÇÕES DIRETA E SOBRE
ESTACAS PARA UM EQUIPAMENTO EM UMA INSTALAÇÃO INDUSTRIAL

Larissa Pereira Macabú

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientadores:

Sergio Hampshire de Carvalho Santos

Silvio de Souza Lima

Rio de Janeiro
Setembro de 2011

ANÁLISE COMPARATIVA DE SOLUÇÕES EM FUNDAÇÕES DIRETA E SOBRE
ESTACAS PARA UM EQUIPAMENTO EM UMA INSTALAÇÃO INDUSTRIAL

Larissa Pereira Macabú

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO
DE ENGENHARIA CIVIL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL.

Examinado por:

Prof. Sergio Hampshire de Carvalho Santos, D. Sc.

Prof. Silvio de Souza Lima, D. Sc.

Profa. Flavia Moll de Souza Judice, D.Sc.

Prof. Ricardo Valeriano Alves, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

SETEMBRO DE 2011

Macabú, Larissa Pereira

Análise Comparativa de Soluções em Fundações Diretas e Sobre Estacas para um Equipamento em uma Instalação Industrial / Larissa Pereira Macabú. – Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2011.

XII, 41 p.: Il.; 29,7 cm.

Orientadores: Sergio Hampshire de Carvalho Santos e Silvio de Souza Lima

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Civil, 2011.

Referências Bibliográficas: p. 40

1. Análise Dinâmica. 2. Carga Dinâmica em equipamentos 3. Fundação de Máquinas 4. Fundação Direta e Profunda. I. Santos, Sergio Hampshire de Carvalho, et al. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Civil. III. Título.

“Aos meus pais”

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me abençoar, proteger e conceder sabedoria durante essa longa caminhada de estudos e dedicação.

Ao São Judas Tadeu por toda a força e perseverança que me deste nos momentos quase impossíveis.

Aos meus pais Valter e Glória, exemplos da minha vida, responsáveis por tudo o que sou hoje, fontes de inspiração, confiança e motivação. Agradeço pelo amor incondicional e preocupação que sempre tiveram comigo. A conclusão de mais esta etapa da minha vida não seria possível sem o incentivo e a presença deles.

Agradeço à minha irmã Laila por todas as palavras de apoio, de coragem e de carinho que me deu nessa caminhada, estando sempre presente em todos os momentos da minha vida.

Ao meu namorado Rafael por toda paciência e compreensão nos momentos vividos durante esses anos de graduação.

A minha amiga e companheira de caminhada Claudia por toda a ajuda, paciência e carinho tornando mais doces e mansos os momentos difíceis vividos na graduação.

Ao professor e orientador Sergio Hampshire de Carvalho Santos e ao Co-orientador Silvio de Souza Lima pela atenção, paciência, disponibilidade e ensinamentos, durante a graduação e na realização do projeto final.

Ao Cláudio (Djavan) por estar sempre disposto a ajudar e tornar os meus dias vividos na UFRJ mais fáceis e agradáveis, tendo sempre uma palavra de apoio e esperança.

Aos meus amigos e colegas de graduação.

E a todos os professores e pessoas que contribuíram de alguma forma para a minha formação acadêmica e pessoal.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Civil.

ANÁLISE COMPARATIVA DE SOLUÇÕES EM FUNDAÇÕES DIRETA E SOBRE ESTACAS PARA UM EQUIPAMENTO EM UMA INSTALAÇÃO INDUSTRIAL

Larissa Pereira Macabú

Setembro/2011

Orientadores: Sergio Hampshire de Carvalho Santos, Silvio de Souza Lima.

Curso: Engenharia Civil

A Análise Dinâmica ainda se faz pouco presente na formação do engenheiro civil, porém seu conhecimento se torna cada vez mais necessário devido aos crescentes investimentos em refinarias e indústrias de grande porte. Com o desenvolvimento de novas tecnologias e a modernização dos equipamentos, os projetos estruturais precisam acompanhar as necessidades impostas pela inovação. O presente trabalho tem como objetivo aprofundar os estudos sobre as fundações de equipamentos com cargas dinâmicas, variando alguns parâmetros na análise, como o tipo de fundação e o módulo de cisalhamento transversal do solo (G). Para isto será realizada a análise comparativa de soluções entre fundações diretas e sobre estacas de um equipamento do tipo soprador de gás, utilizando o programa *BlockSolver* para a análise dinâmica e o programa *PILAY* para os cálculos dos coeficientes de rigidez e amortecimento das estacas.

Palavras-chave: Análise Dinâmica. Carga Dinâmica em Equipamentos. Fundação de Máquinas. Fundação Direta. Fundação Profunda.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

COMPARATIVE ANALYSIS OF SOLUTIONS FOR DIRECT FOUNDATIONS
AND IN PILES FOR AN EQUIPAMENT IN AN INDUSTRIAL PLANT

Larissa Pereira Macabú

September/2011

Advisors: Sergio Hampshire de Carvalho Santos, Silvio de Souza Lima

Course: Civil Engineering

The dynamic analysis is still rarely present in the formation of a civil engineer, but this knowledge becomes increasingly necessary due to the growing investments in refineries and large industries. With the development of new technologies and modernization of equipment, structural projects need to follow the requirements imposed by innovation. This study aims to deepen the knowledge on equipment foundations with dynamic loads, varying some parameters in the analysis as the type of foundation and the shear soil modulus (G). For this, a comparative analysis will be performed, of direct foundations and pile foundations of a gas blower equipment, using the program *BlockSolver* for the dynamic analysis and the program *PILAY* for calculating the stiffness and damping coefficients of the piles.

Keywords: Dynamic Analysis. Dynamic Load on Equipment. Machine Foundation. Shallow Foundation. Deep Foundation.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÃO	1
1.2. OBJETIVO	1
2. MÉTODO DE ANÁLISE	3
2.1. FUNDAMENTO	3
2.2. FORÇAS MÍNIMAS A SEREM CONSIDERADAS NO PROJETO DE MÁQUINAS ROTATIVAS.....	5
2.3. VERIFICAÇÃO DAS VELOCIDADES MÁXIMAS PERMITIDAS	6
2.4. VERIFICAÇÃO DAS TENSÕES NO SOLO.....	9
2.5. CARACTERÍSTICAS DO SOLO	9
2.5.1. MÓDULO DE DEFORMAÇÃO TRANSVERSAL (G)	9
2.5.2. MASSA ESPECÍFICA (P).....	12
2.5.3. COEFICIENTE DE POISSON (N).....	13
2.6. FRAÇÃO DE AMORTECIMENTO CRÍTICO (E)	13
2.7. CONSIDERAÇÃO SOBRE A POSIÇÃO DO NÍVEL DO LENÇOL FREÁTICO.....	14
2.8. ANÁLISE AUTOMATIZADA.....	1514
2.8.1. PROGRAMA <i>BLOCKSOLVER</i>	15
2.8.2. O PROGRAMA <i>PILAY</i>	1716
3. ANÁLISE COMPARATIVA DE UMA FUNDAÇÃO TÍPICA EM UMA INSTALAÇÃO INDUSTRIAL	18
3.1. CARACTERÍSTICAS DO EQUIPAMENTO – SOPRADOR DE GÁS	18
3.1.1. DIMENSÕES	18
3.1.2. CARGAS.....	19
3.2. CARACTERÍSTICAS DA BASE.....	21

3.3.	CARACTERÍSTICAS DO SOLO	22
3.3.1.	MÓDULO DE DEFORMAÇÃO TRANSVERSAL (G)	23 ²²
3.3.2.	COEFICIENTE DE POISSON (N).....	24 ²³
3.3.3.	MASSA ESPECÍFICA (P).....	24 ²³
3.4.	FRAÇÃO DE AMORTECIMENTO CRÍTICO (E)	24
3.5.	ANÁLISE DINÂMICA.....	24
3.5.1.	FUNDAÇÃO DIRETA	24
3.5.2.	FUNDAÇÃO PROFUNDA	31
4.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	41 ⁴⁰
5.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42 ⁴¹
6.	ANEXOS	43 ⁴²
6.1.	BOLETIM DE SONDAÇÃO A PERCUSSÃO (SPT).....	43 ⁴²

[P1] Comentário: nos itens 2.5.2, 2.5.3 e 2.6 a formatação das letras gregas foi perdida. Idem no 3.3.2, 3.3.3 e 3.4

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Interação Máquina x Fundação x Solo, [1].	4
Figura 2 – Modelo matemático para blocos rígidos (6GL), [6].	5
Figura 3 – Faixas de velocidades e deslocamentos de acordo com a classe do equipamento [1] apud [6]	8
Figura 4 – Ensaio Cross-hole entre furos de sondagem, [9].	10
Figura 5 – Níveis de importância dos fatores que afetam o valor de G_{max} , de acordo com a referência [8].	11
Figura 6 – Variação de G de acordo com o N_{SPT} , [6].	12
Figura 7 – Distância entre o fundo da fundação e o N.A., [6].	14
Figura 8 – Sistema de eixos adotado	15
Figura 9 – Matriz de rigidez, amortecimento e massa, [6].	16
Figura 10 – Corte transversal do soprador.	18
Figura 11 – Corte longitudinal pelo eixo do soprador mostrando as bases de fixação do equipamento no bloco de concreto da fundação.	19
Figura 12 – Pontos de aplicação das cargas	20
Figura 13 – Base de concreto	22
Figura 14 – Tipo de fundação - Direta	24
Figura 15 – Dimensões da base	25 24
Figura 16 – Massas estáticas	25
Figura 17 – Propriedades do solo – $G = 72500$ kPa	26 25
Figura 18 – Frequência do Equipamento.	26
Figura 19 – Frequência do motor	27 26
Figura 20 – Carga dinâmica e amplitudes	27
Figura 21 – Matriz de Massa	28 27
Figura 22 – Matriz de Amortecimento	28
Figura 23 – Matriz de Rigidez	28
Figura 24 – Gráfico Frequência x Translação Y	31 30
Figura 25 – Tipo de fundação - Profunda.	31
Figura 26 – Dimensões da base	32 31
Figura 27 – Arquivo de entrada do programa <i>PILAY</i> .	34 33
Figura 28 – Arquivo de saída do programa <i>PILAY</i> – Modelo 1	35 34

Figura 29 – Matriz de Massa	<u>3736</u>
Figura 30 – Matriz de Amortecimento	<u>3837</u>
Figura 31 – Matriz de Rigidez	<u>3837</u>
Figura 32 – Gráfico Frequência x Translação Z.....	<u>4039</u>

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Excentricidade e αg , [6].....	65
Tabela 2 – Classe dos equipamentos, [1] apud [6].....	76
Tabela 3 – Faixas de velocidades, [1] apud [6].....	7
Tabela 4 – Massa Específica (ρ), [6].....	13 12
Tabela 5 – Valores de Poisson (ν), [6].....	13
Tabela 6 – Valores de amortecimento (ϵ), [6].....	14 13
Tabela 7 – Carga Estática com Motor.....	19
Tabela 8 – Carga Dinâmica na Fundação.....	20
Tabela 9 – Dimensões das bases.....	21
Tabela 10 – Variação de G – Fundação Direta.....	23
Tabela 11 – Variação de G – Fundação Profunda.....	23
Tabela 12 – Deslocamentos nas direções X, Y e Z para cada valor de G.....	29 28
Tabela 13 – Velocidades nas direções X, Y e Z para cada valor de G.....	29
Tabela 14 – Velocidades combinadas nas direções X, Y e Z para cada valor de G.....	30
Tabela 15 – Valores de G e V_s	33 32
Tabela 16 – Coeficientes de rigidez e amortecimento.....	36 35
Tabela 17 – Deslocamentos nas direções X, Y e Z para cada valor de G.....	38 37
Tabela 18 – Velocidades nas direções x, y e z para cada valor de G.....	39 38
Tabela 19 – Velocidades combinadas nas direções X, Y e Z para cada valor de G...	39 38

1. INTRODUÇÃO

1.1. Introdução e Motivação

A maior parte das faculdades de engenharia civil, no Brasil, não costuma abordar os efeitos das cargas dinâmicas nas estruturas em seus cursos. Porém este conhecimento se torna cada vez mais necessário, devido aos crescentes investimentos e construções 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 humano.

Entre as diversas áreas da ciência, a concepção e o desenvolvimento de fundações para equipamentos com cargas dinâmicas, se destaca por apresentar grandes desafios aos engenheiros civis. Qualquer falha na estrutura ou na fundação de um equipamento dessa importância pode causar sérios danos ao meio ambiente e provocar a interrupção do processo da refinaria, incorrendo em altos custos tanto no reparo do sistema quanto na recuperação do meio ambiente.

Desta maneira, entende-se que fundação de máquinas é uma das etapas mais críticas em um projeto estrutural de uma refinaria, tornando necessário o conhecimento dos efeitos dinâmicos nas estruturas e nas fundações, exigindo, cada vez mais, uma melhor compreensão pelos engenheiros civis deste problema.

Este cenário, de novas tecnologias e descobertas, aliado a um forte crescimento industrial, aumenta a complexidade dos projetos e a consequente necessidade do domínio deste assunto, a fim de garantir a confiabilidade necessária para a perfeita utilização e funcionamento dos sistemas estruturais.

1.2. Objetivo

Este trabalho tem como objetivo realizar a análise comparativa de soluções em fundações diretas e sobre estacas de um soprador de gás (*Flue Gas Blower*), equipamento que integra os arranjos das refinarias petroquímicas.

Um estudo de seu comportamento será feito variando alguns parâmetros na análise, como: o tipo de fundação (superficial ou profunda) e o módulo de cisalhamento transversal do solo (G).

Os modelos das fundações serão analisados em um programa específico para análise dinâmica, o *BlockSolver*. Esse programa fornece os deslocamentos máximos na frequência de operação, permitindo calcular também a máxima velocidade de vibração da fundação.

Para a análise da fundação profunda também será utilizado o programa *PILAY*, que 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 das normas ISO 2372 [1], DIN 4024 [2] e [3] e N-1848 [4]. Objetiva-se, conceitualmente, afastar a frequência de operação das frequências próprias.

Todo o dimensionamento da fundação será feito considerando um espaço limitado para a locação do equipamento determinado pelo arranjo da refinaria.

2. MÉTODO DE ANÁLISE

2.1. Fundamento

A análise dinâmica estrutural é baseada na equação diferencial de equilíbrio dinâmico [7] do sistema de um grau de liberdade. Estuda-se o caso particular em que a excitação é harmônica no tempo, apresentando frequência circular igual a ω . A equação de equilíbrio de forças é expressa na forma:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F \cdot \cos\omega t \quad (2.1-1)$$

onde,

m = massa (kg)

c = coeficiente de amortecimento (kN.s/m)

k = coeficiente de rigidez (kN/m)

x = deslocamento (m) no tempo (s)

\dot{x} = derivada do deslocamento em relação ao tempo (m/s)

\ddot{x} = segunda derivada do deslocamento em relação ao tempo (m/s²)

Considera-se a equação de Euler para a transformação do problema para variáveis complexas:

$$e^{i\beta t} = \cos \beta t + i \sin \beta t \quad (2.1-2)$$

[P2] Comentário: Acertar os formatos

A expressão (2.1-1) pode então ser expressa na forma:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F \cdot e^{i\omega t} \quad (2.1-3)$$

A solução da equação (2.1-3) pode ser expressa na forma:

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{u} \cdot e^{i\omega t} \quad (2.1-4)$$

O que leva à equação (2.1-3) ser expressa na forma:

$$(-\omega^2 \mathbf{M} + i\omega \mathbf{C} + \mathbf{K}) \mathbf{u} e^{i\omega t} = \mathbf{F} e^{i\omega t} \quad (2.1-5)$$

Esta equação pode ser resolvida de forma similar à do problema estático.

Para sistemas com mais de um grau de liberdade, a equação diferencial de movimento do sistema se generaliza para um sistema de equações diferenciais de movimento de N graus de liberdade, em que massa, amortecedor e rigidez se transformam em matrizes de massa, de amortecimento e de rigidez e a força aplicada em um vetor de forças aplicadas. O sistema de equações é análogo à equação (2.1-3):

$$MX'' + CX' + KX = F. e i\omega t \quad (2.1-6)$$

[P3] Comentário: acertar formato

“A definição conceitual da solução depende da geometria da máquina, da frequência de operação e das características do subsolo”, SANTOS [5], de maneira que é necessário conhecer essas três características para se definir a solução.

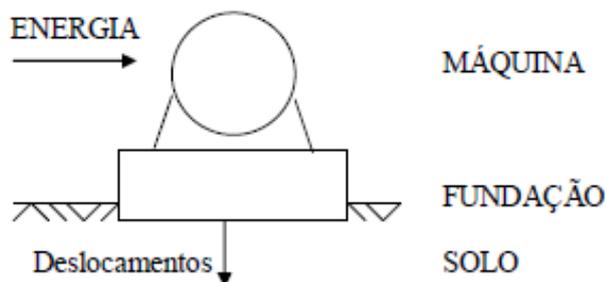


Figura 1 – Interação Máquina x Fundação x Solo, [1][4].

Formatado: Fonte: 10 pt, Negrito

A análise das vibrações de uma fundação pode ser subdividida em quatro formas básicas de movimento:

- ✓ Oscilação vertical;
- ✓ Oscilação horizontal acoplada à rotação, ambas contidas em um plano vertical;
- ✓ Oscilação horizontal acoplada à rotação, em um plano vertical ortogonal ao primeiro;
- ✓ Torção segundo um eixo vertical;

O movimento de um equipamento em funcionamento causa vibrações na estrutura da fundação que são transmitidas ao solo.

Esse movimento é denominado de vibração forçada, dado que ele é decorrente de uma excitação dinâmica externa, como força imposta, com o fornecimento contínuo de energia, [7].

A excitação em análise apresenta variação harmônica no tempo, com variação em seno ou cosseno.

“Na verdade, o que caracteriza um fenômeno como dinâmico não é apenas a sua variabilidade no tempo, mas a interveniência de forças de inércia. A variação no tempo tem que haver, mas tem que ser tal sorte a gerar forças de inércia”, [8].

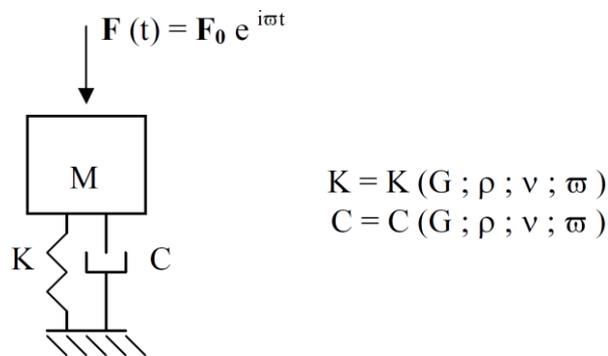


Figura 2 – Modelo matemático para blocos rígidos (6GL), [5][6].

Formatado: Fonte: 10 pt, Negrito

Os esforços reais podem ser substituídos por um sistema equivalente constituído por molas e amortecedores, conforme indicado na Figura 2Figura 2.

Formatado: Fonte: 12 pt, Não Negrito

2.2. Forças mínimas a serem consideradas no projeto de máquinas rotativas

Antes da montagem e instalação as máquinas rotativas são balanceadas para que operem de acordo com as especificações de projeto. Porém durante a operação e utilização das máquinas surgem excentricidades devido a folgas, desgaste e desajustes. Essas excentricidades foram medidas de acordo com as frequências de operação, por MAJOR apud [5]. Estes valores são comparados na tabela a seguir com os valores normativos prescritos pela DIN 4024 [2]

Tabela 1 – Excentricidade e α_g , [5][5].

Formatado: Fonte: 10 pt, Negrito

Frequência de operação (RPM)	Major				DIN 4024
	Em operação ¹		Na ruptura ²		
	e (mm)	α_g	e (mm)	α_g	α_g
3000	0,020	0,200	0,100	1,000	1,200
1500	0,064	0,160	0,320	0,800	0,600
750	0,160	0,100	0,800	0,500	0,300

A força dinâmica mínima a ser considerada no projeto, definida como força desbalanceada K (kN) é determinada pela DIN 4024 [2]:

$$K = 1,2 L \frac{f_m}{50} \quad (2.2-1)$$

Onde,

L = peso do rotor (kN)

f_m = frequência de operação (Hz)

Na falta de informação sobre a massa do rotor, adota-se a massa rotativa igual a 20% da massa total do equipamento.

2.3. Verificação das velocidades máximas permitidas

O bom funcionamento dos equipamentos, o conforto humano e o nível de vibrações que será propagado ao meio através do solo estão diretamente relacionados aos limites das amplitudes dos deslocamentos e das velocidades.

Numa grande planta industrial são feitas medições periódicas destas amplitudes com instrumentos específicos a fim de avaliar o atendimento aos limites pré-estabelecidos.

Os limites adotados para as máquinas rotativas são os definidos pela ISO 2372 [1], a qual determina uma faixa de valores de velocidades efetivas para as diversas classes de equipamentos, conforme as tabelas 2 e 3.

¹ Operação: amplitudes de máquinas normalmente balanceadas.

² Ruptura: amplitudes de máquinas com balanceamento já inadmissível.

Tabela 2 – Classe dos equipamentos, [1][4] apud [5][5]

Classes	Tipo de equipamentos
Classe I	Pequenas Máquinas*
Classe II	Motores elétricos
Classe III	Máquinas pesadas
Classe IV	Turbo-geradores
* output ≤ 15 kW	

Formatado: Fonte: 10 pt, Negrito

Formatado: Fonte: 10 pt, Negrito

Definição das faixas de operação das máquinas:

- Faixa A – Faixa ótima
- Faixa B – Aceitável
- Faixa C – Tolerável
- Faixa D – Inaceitável

Tabela 3 – Faixas de velocidades, [1][4] apud [5][5]

Faixas de velocidades efetiva (mm/s)	Classes de equipamentos			
	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV
0 a 0,71	A	A	A	A
0,71 a 1,12	B			
1,12 a 1,8	C	B		
1,8 a 2,8		C	B	B
2,8 a 4,5	D		D	C
4,5 a 7,1		D		C
7,1 a 11,2			D	D
11,2 a 18,0		D		
Mais que 18,0	D		D	

Formatado: Fonte: 10 pt, Negrito

Formatado: Fonte: 10 pt, Negrito

A figura 3 apresenta graficamente as faixas acima definidas, [1].

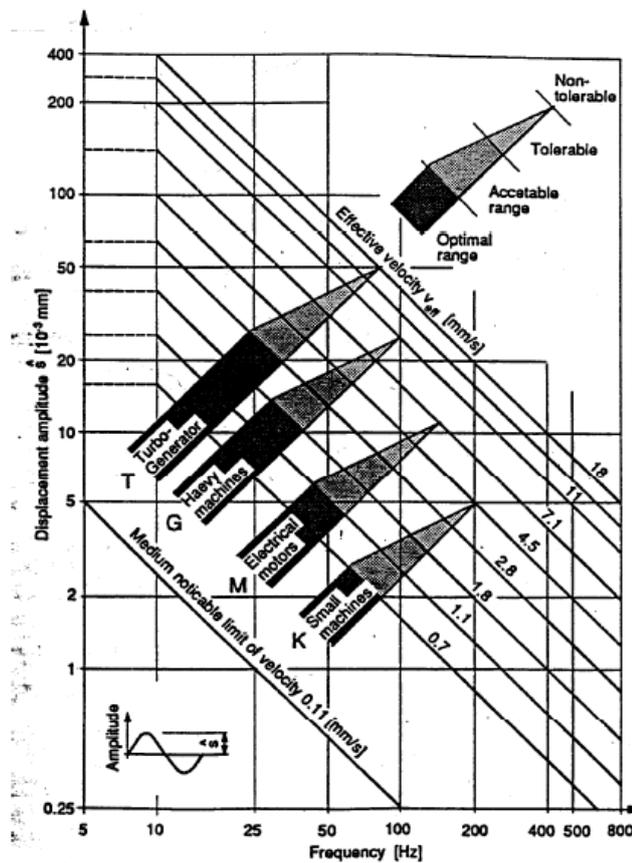


Figura 3 – Faixas de velocidades e deslocamentos de acordo com a classe do equipamento [1][4] apud [5][5]

Formatado: Fonte: 10 pt, Negrito

Formatado: Fonte: 10 pt, Negrito

“Para uma base de equipamento em que existam vibrações ocorrendo em diversas (n) frequências, a velocidade efetiva em um ponto é definida, em função da variação da velocidade $v(t)$ neste ponto pela expressão abaixo, em que a integral é avaliada entre 0 e T, sendo T um determinado instante no tempo”, [5].

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} \quad (2.3-1)$$

Para equipamentos com excitações harmônicas, temos:

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2} \int_0^T (v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2) dt} \quad (2.3-2)$$

Onde os v_i correspondem às velocidades máximas associadas a cada uma das frequências presentes.

2.4. Verificação das Tensões no Solo

A capacidade de carga do solo nas análises dinâmicas deve ser reduzida quando comparada a capacidade de carga das análises estáticas devido às altas acelerações impostas ao solo. Essa redução pode ser feita conforme a N-1848 [4], a qual sugere uma redução de 50% da tensão admissível do terreno.

2.5. Características do Solo

Nas fundações de máquinas o valor dos deslocamentos é o parâmetro limitante do projeto, na ordem de microns. Portanto ficam restringidas ao solo deformações muito pequenas, o que possibilita o emprego de soluções considerando que o comportamento do solo é elástico-linear.

Para o dimensionamento da fundação de máquina é necessário a determinação de parâmetros elásticos do solo, como:

2.5.1. Módulo de deformação transversal (G)

“O módulo de cisalhamento dinâmico do solo é uma propriedade dependente da deformação, decrescendo com o aumento desta. É, entretanto, praticamente constante para amplitudes de deformação cisalhante menores do que 10^{-3} %, sendo nesta situação denominado de módulo de cisalhamento máximo e representado por G_{max} ”, BARROS E HACHICH, [8].

Os valores de G podem ser obtidos em ensaios de campo e de laboratório, ensaios *cross-hole* e coluna ressonante, respectivamente. Os ensaios de campo são utilizados para deformações cisalhantes menores que 10^{-3} % determinando assim G_{max} , que é o módulo de cisalhamento máximo do solo. Os ensaios de laboratório são usados em solos com deformações maiores, até 1%, determinando os valores de G decrescentes com as deformações.

O valor de G fica neste estudo restringido ao valor de G_{\max} o qual é determinado com pequenas deformações, pois para as fundações de máquinas os deslocamentos devem ser muito pequenos.

O ensaio de *cross-hole* é realizado em campo e normalizado pela ASTM D4428-91 (apud [8]). Esse ensaio consiste em gerar ao longo de toda profundidade de um furo ondas sísmicas a partir da excitação de um martelo (fonte). No outro furo com o auxílio de geofones são medidos os tempos de chegada das ondas de compressão e de cisalhamento, possibilitando assim o cálculo das velocidades de propagação de onda, conforme ilustra a [Figura 4](#).

Formatado: Fonte: 12 pt, Não Negrito

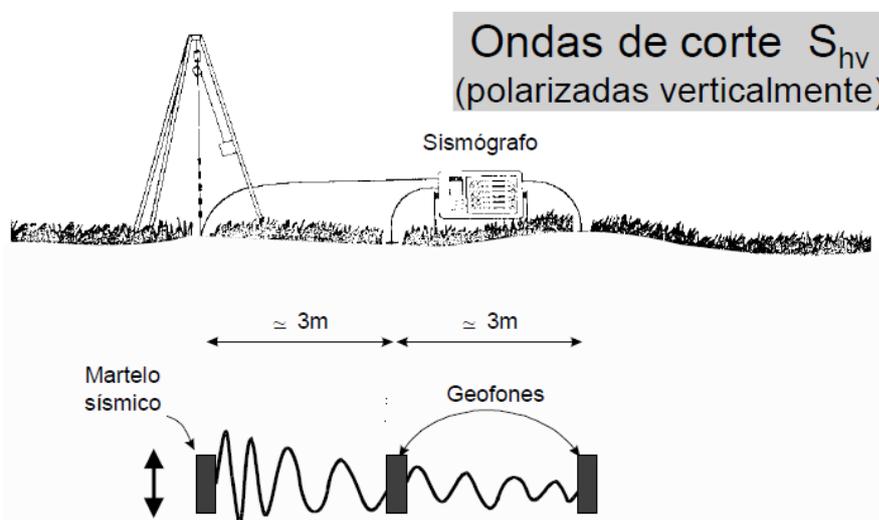


Figura 4 – Ensaio Cross-hole entre furos de sondagem, [9][9].

Formatado: Fonte: 10 pt, Negrito

Pela teoria de propagação tridimensional de ondas determina-se o módulo de deformação transversal e o coeficiente de Poisson através das velocidade de propagação de ondas primária v_p e secundária v_s :

$$G = \rho v_s^2 \quad (2.5.1-1)$$

$$\nu = \frac{1}{2} \frac{(v_p^2 - 2v_s^2)}{v_p^2 - v_s^2} \quad (2.5.1-2)$$

Onde,

G = módulo de deformação transversal (kN/m^2)

ρ = massa específica do solo (t/m^3)

v_s = velocidade de propagação de onda de cisalhamento ou secundária (m/s)

ν = coeficiente de Poisson

“A técnica sísmica denominada *cross-hole*, também conhecida em nosso país por ensaio entre furos, é considerada a mais confiável para determinação *in situ* do módulo de cisalhamento dos solos” [8].

Como normalmente não é programado e executado o ensaio acima, os parâmetros necessários ao projeto podem ser avaliados empiricamente.

Diversos fatores afetam o módulo de cisalhamento máximo dos solos. A figura a seguir classifica esses fatores em níveis de importância.

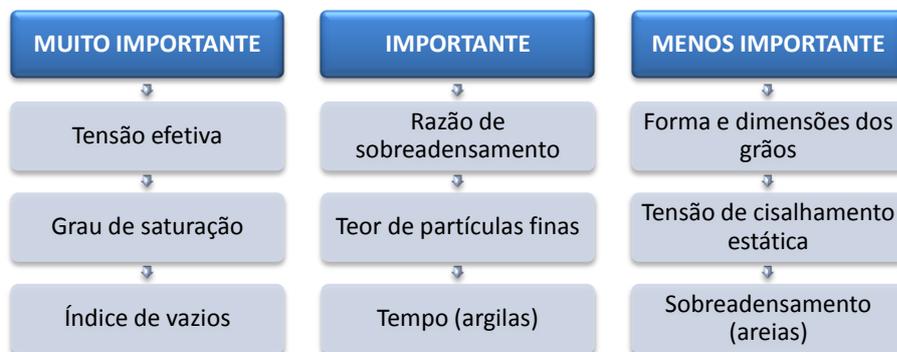


Figura 5 – Níveis de importância dos fatores que afetam o valor de G_{max} , de acordo com a referência [8][8].

Formatado: Fonte: 10 pt, Negrito

Uma das alternativas para estimar o valor de G_{max} é fazer uma correlação direta entre G e o índice de resistência a penetração N do ensaio de SPT. Existem diversas expressões para a estimativa de G_{max} . Foi verificada a validade dessas diversas correlações, sendo a relação de OHSAKI E IWASAKI, apud [8], considerada como a mais adequada:

$$G = 11,5(N_{SPT})^{0,8} \quad (G \text{ em MPa}) \quad (2.5.1-3)$$

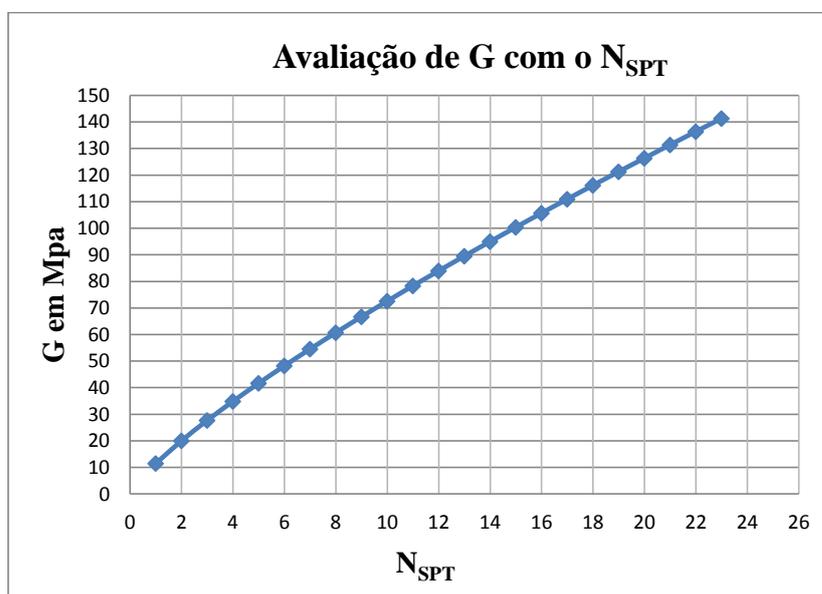


Figura 6 – Variação de G de acordo com o NSPT, [5][5]

Formatado: Fonte: 10 pt, Negrito

“Vale ressaltar que a avaliação do parâmetro G sempre envolverá incertezas e que uma análise paramétrica sempre será necessária, para se investigar como a resposta varia com a possível variação das propriedades do solo”, [5].

Por conseguinte, no nosso estudo de caso serão considerados valores com uma variação de 50% em torno do valor calculado pela expressão 2.6.1.3.

2.5.2. Massa específica (ρ)

A massa específica aparente dos solos depende principalmente da composição mineral do mesmo e do grau de compactação. A massa específica do solo é inversamente proporcional a porosidade do mesmo. Quanto mais espaços vazios em um solo menor o valor da massa específica. Podemos determinar a massa específica do solo a partir da classificação do material, de acordo com a tabela a seguir:

Tabela 4 – Massa Específica (ρ), [5][5].

Tipo de solo	ρ (t/m ³)
Areia	1,70 a 2,10
Argila	1,40 a 2,00
Rocha	2,50 a 2,70

Formatado: Fonte: 10 pt, Negrito

2.5.3. Coeficiente de Poisson (ν)

O coeficiente de Poisson (ν) pode variar nas faixas de valores indicada na Tabela 5 a seguir.

Tabela 5 – Valores de Poisson (ν), [5][5].

Tipo de solo	ν (Poisson)
Areia	0,30 a 0,40
Argila	0,40 a 0,50
Rocha	0,15 a 0,30

Formatado: Fonte: 10 pt, Negrito

2.6. Fração de amortecimento crítico (ε)

A fração de amortecimento crítico é definida como a relação entre o coeficiente de amortecimento real c , e o coeficiente de amortecimento crítico, $c_{crítico}$:

$$\varepsilon = \frac{c}{c_{crítico}} \quad (2.6-1)$$

Diversos fatores afetam a razão de amortecimento dos solos, como a deformação cisalhante, a pressão de confinamento e o índice de plasticidade, [8].

De acordo com SANTOS [5], os valores de amortecimento para uma deformação distorcional de 10^{-4} % correspondente a uma faixa usual de projeto de fundações de máquinas podem ser determinados de acordo com a [Tabela 6](#)~~Tabela 6~~.

Formatado: Fonte: 12 pt, Não Negrito

Tabela 6 – Valores de amortecimento (ϵ), [5][5].

Tipo de solo	ϵ % (amortecimento)
Areia	2,00
Argila	2,00
Rocha	2,00

Formatado: Fonte: 10 pt, Negrito

2.7. Consideração sobre a posição do nível do lençol freático

A presença do lençol freático elevado amplifica as vibrações e as propaga a longas distâncias, além de poder causar compactação em solos arenosos saturados. Desta forma, para viabilizar uma fundação direta é necessário 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 ilustra a [Figura 7](#) [Figura 7](#).

Formatado: Fonte: 12 pt, Não Negrito

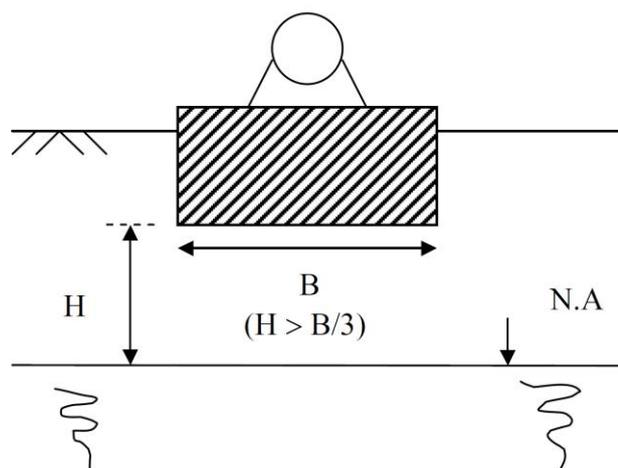


Figura 7 – Distância entre o fundo da fundação e o N.A., [5][5].

Formatado: Fonte: 10 pt, Negrito

Caso essa distância não possa ser atendida recomenda-se utilizar fundação sobre estacas ou dispositivos isoladores de vibração.

2.8. Análise automatizada

A análise dinâmica das fundações direta e sobre estacas do equipamento, consideradas como bloco rígido, será feita pelo programa *BlockSolver*.

Na análise da fundação profunda será utilizado o programa *PILAY* para a avaliação dos coeficientes de rigidez e amortecimento do solo nas direções vertical e horizontal.

2.8.1. Programa *BlockSolver*

O sistema de eixos considerado internamente pelo programa tem origem no centro de massa do conjunto equipamento-fundação, como representado na figura a seguir:

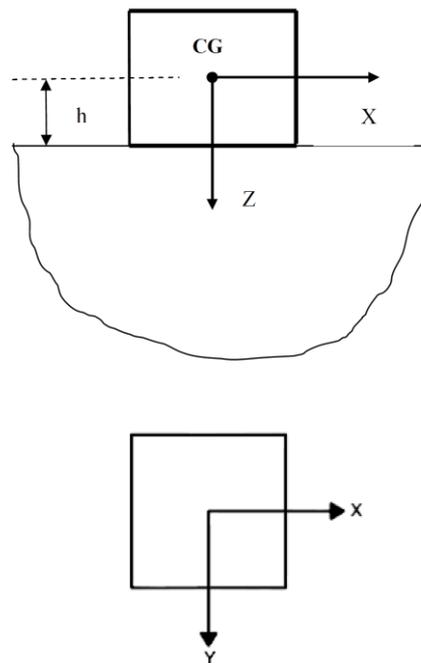


Figura 8 – Sistema de eixos adotado

Para a resolução do sistema de equações com seis graus de liberdade são utilizadas a matriz de rigidez, a matriz de amortecimento e a matriz de massa, K , C e M , respectivamente.

A matriz de massa é diagonal pela coincidência do eixo do sistema com o centro de gravidade.

Essas matrizes são formadas da seguinte maneira:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_x & 0 & 0 & 0 & K_x h & 0 \\ & K_y & 0 & -K_y h & 0 & 0 \\ & & K_z & 0 & 0 & 0 \\ & & & K_{xx} + K_y h^2 & 0 & 0 \\ \text{SIMÉTRICA} & & & & K_{yy} + K_x h^2 & 0 \\ & & & & & K_{zz} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_x & 0 & 0 & 0 & C_x h & 0 \\ & C_y & 0 & -C_y h & 0 & 0 \\ & & C_z & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{xx} + C_y h^2 & 0 & 0 \\ \text{SIMÉTRICA} & & & & C_{yy} + C_x h^2 & 0 \\ & & & & & C_{zz} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & M_y & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & M_z & 0 & 0 & 0 \\ & & & M_{xx} & 0 & 0 \\ \text{SIMÉTRICA} & & & & M_{yy} & 0 \\ & & & & & M_{zz} \end{bmatrix}$$

Figura 9 – Matriz de rigidez, amortecimento e massa, [5][5].

[P4] Comentário: É melhor numerar como equações e não como figuras estas matrizes.

Formatado: Fonte: 10 pt, Negrito

[P5] Comentário: Padronizar os recuos de primeira linha

O problema pode ser descrito e resolvido pelo sistema de equações diferenciais a seguir, [5]:

$$\mathbf{M}u''(t) + \mathbf{C}u'(t) + \mathbf{K}u(t) = \mathbf{F}e^{i\omega t} \quad (2.8.1-1)$$

$$u(t) = ue^{i\omega t} \quad (2.8.1-2)$$

A solução deste sistema de equações é:

$$(-\omega^2 \mathbf{M} + i\omega \mathbf{C} + \mathbf{K})ue^{i\omega t} = \mathbf{F}e^{i\omega t} \quad (2.8.1-3)$$

[P6] Comentário: Colocar na forma de matrizes

Onde,

\mathbf{M} , \mathbf{C} e \mathbf{K} = matrizes de massa, amortecimento e rigidez, respectivamente.

ω = frequência circular (rad/s)

u = vetor de deslocamentos (m e rad)

t = tempo (s)

F = vetor de forças (kN e kN.m)

2.8.2. O programa *PILAY*

O programa *PILAY* calcula os coeficientes de rigidez e amortecimento para uma estaca isolada. A partir desses coeficientes são calculados os coeficientes de rigidez e amortecimento da fundação, considerando o número total de estacas. Esses coeficientes são dados de entrada para a análise da fundação profunda no programa *BlockSolver*.

O *PILAY* é desenvolvido a partir da abordagem de Novak, o 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 [10].

Para o cálculo dos coeficientes de rigidez e amortecimento é necessário conhecer a velocidade da onda de cisalhamento correspondente a cada camada de solo. Características da estaca e do solo também são parâmetros de entrada, como: peso específico, o coeficiente de Poisson, comprimento da estaca, raio da estaca, área da seção transversal, módulo de elasticidade da estaca, momento de inércia da estaca e espessura das camadas representativas do solo.

Com base em testes em estacas com carga dinâmica verificou-se que as condições do local e, em particular, as propriedades das camadas do solo superior influenciam bastante na determinação da rigidez dinâmica lateral do sistema solo-estaca. A frequência natural do sistema solo-estaca é significativamente influenciada pelo tamanho da estaca (diâmetro e comprimento), o procedimento de instalação da estaca, e a rigidez da camada do solo de ponta.

BOOMINATHAN et al. [11] concluíram que o *PILAY* estima com precisão a rigidez dinâmica lateral de estacas cravadas em solo de argila dura, mas superestima a rigidez das estacas moldadas *in loco* e/ou embutidas em solo de argila mole.

Com isso o *PILAY* pode ser utilizado para a estimativa da rigidez de estacas pré-moldadas cravadas em solo duro, mas maior cuidado é necessário quando usá-lo para solo mole e para estacas moldada *in loco*.

3. ANÁLISE COMPARATIVA DE UMA FUNDAÇÃO TÍPICA EM UMA INSTALAÇÃO INDUSTRIAL

Será desenvolvida uma análise comparativa com duas soluções para as fundações de um equipamento vibrante sobre base rígida em concreto armado: fundação direta e fundação profunda com oito estacas raiz ($\Phi 25$). Foi considerada variação paramétrica para o módulo de cisalhamento transversal do solo. As duas soluções são analisadas para o mesmo carregamento, sendo que a base da fundação sobre estacas necessitou ser maior em planta do que a base para fundação direta.

3.1. Características do equipamento – Soprador de Gás

3.1.1. Dimensões (mm)

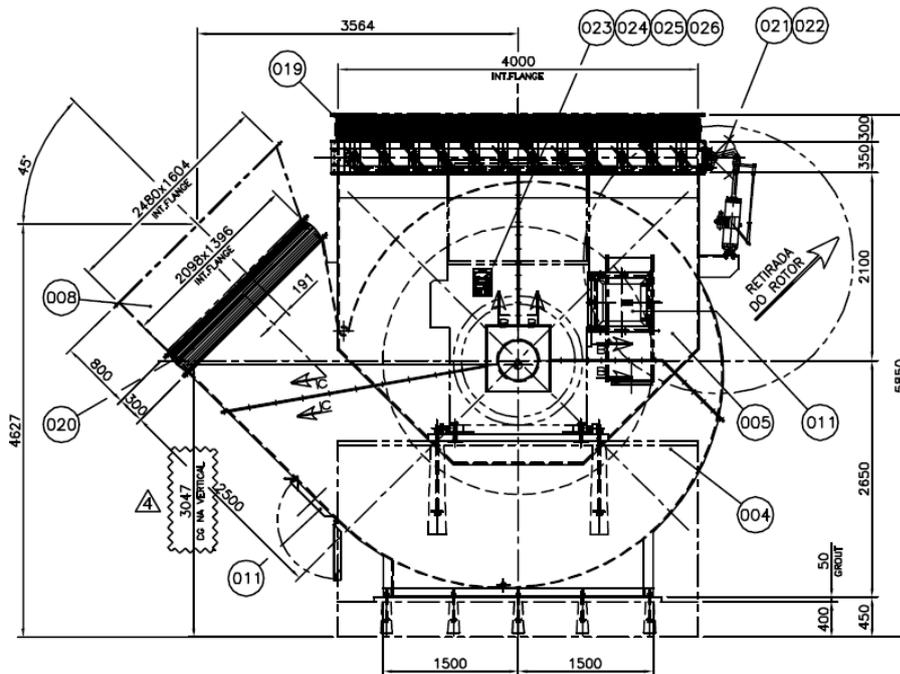


Figura 10 – Corte transversal do soprador

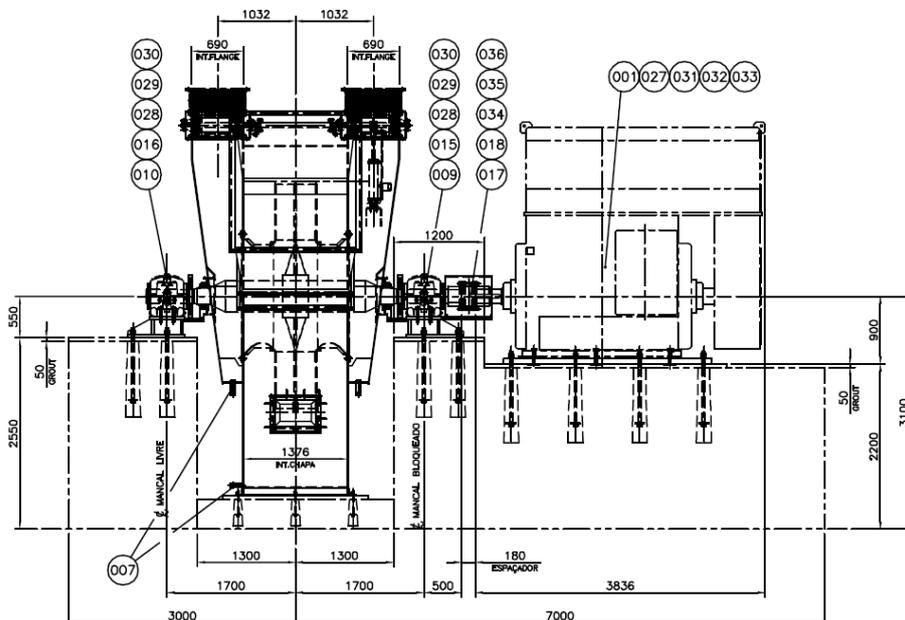


Figura 11– Corte longitudinal pelo eixo do soprador mostrando as bases de fixação do equipamento no bloco de concreto da fundação.

3.1.2. Cargas

As cargas e os pontos de aplicação são determinados pelo fornecedor do equipamento e são locados conforme a geometria do soprador.

Na [Tabela 7](#) foram apresentadas as cargas estáticas aplicadas nas áreas I, II, III e IV do equipamento e na [Tabela 8](#) estão apresentadas as cargas dinâmicas que são aplicadas nas áreas I e II, conforme a [Figura 12](#).

Formatado: Fonte: 12 pt, Não Negrito

[P7] Comentário: onde estão definidas estas áreas

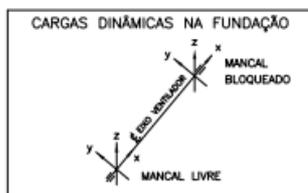
Formatado: Fonte: 12 pt, Não Negrito

Formatado: Fonte: 12 pt, Não Negrito

Tabela 7 – Carga Estática com Motor

Área	I	II	III	IV	Total
Carga Estática (N) com Motor	-38073	-38073	-209254	-171381	-456781

Tabela 8 – Carga Dinâmica na Fundação



Área	Carga Dinâmica Normal (N)		Carga Dinâmica Máxima (N)		Carga Axial (N)
	Y	Z	Y	Z	X
I	2660	2660	46884	46884	0
II	2660	2660	46884	46884	0

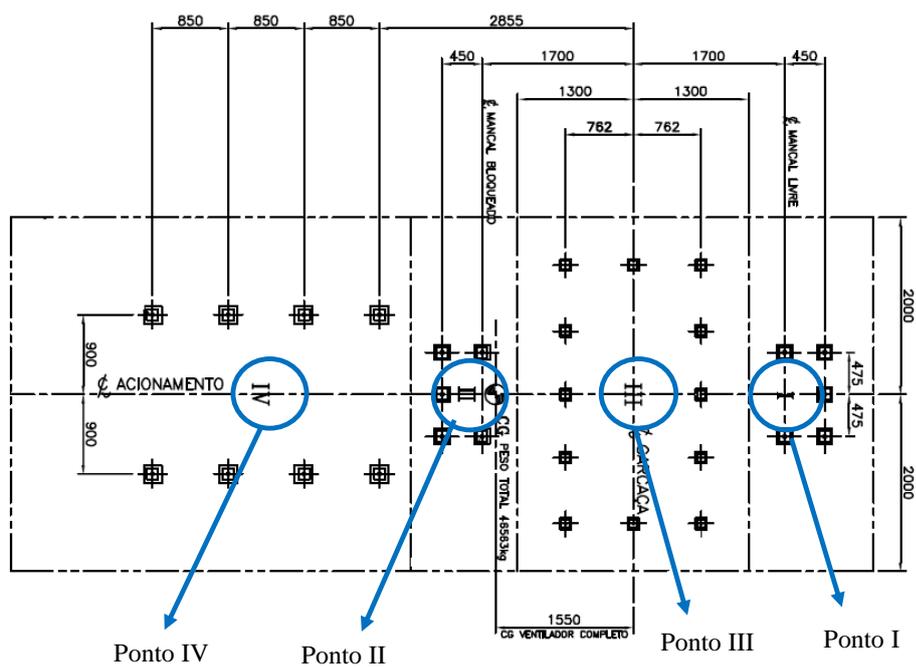


Figura 12 – Pontos de aplicação das cargas

3.2. Características da Base

A base deve ser dimensionada para que o centróide da base e o centro de gravidade do conjunto fundação + máquina estejam na mesma vertical, sendo tolerável uma excentricidade de apenas 5 % com relação à dimensão correspondente.

A altura do bloco da fundação não deve ser menor que 1/5 da menor dimensão em planta da própria base, e 1/10 da maior dimensão, conforme [4].

A base para esse equipamento é de concreto armado, com resistência característica a compressão igual a 30 MPa e fator água/cimento menor ou igual a 0,55 ($a/c \leq 0,55$). O aço utilizado será o CA-50, com resistência no escoamento de 500 MPa.

As dimensões das bases são determinadas de acordo com a geometria do equipamento e estão especificadas na [Figura 13](#) e [Tabela 9](#).

Foi necessário aumentar as dimensões da base da fundação profunda com o objetivo de aumentar a massa do sistema e diminuir o deslocamento vertical.

Formatado: Fonte: 12 pt, Não Negrito

Formatado: Fonte: 12 pt, Não Negrito

Tabela 9 – Dimensões das bases

Dimensões das bases (medidas em metro)							
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		

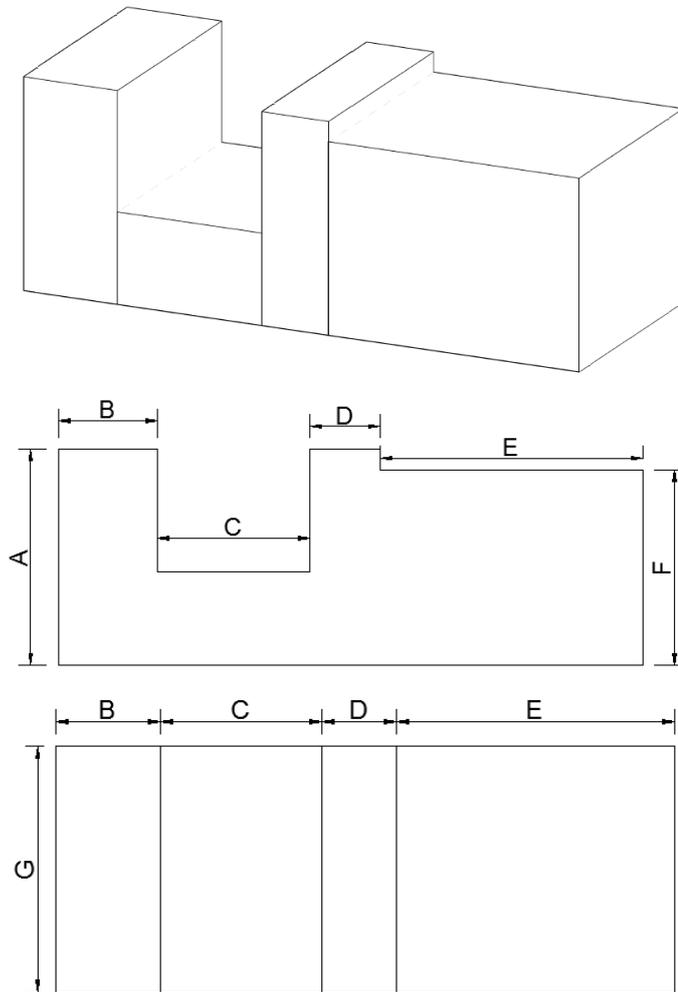


Figura 13 – Base de concreto

3.3. Características do Solo

O solo sofre deformações muito pequenas, permitindo considerar que o seu comportamento é elástico-linear e que a região do solo considerada é homogênea.

Dessa forma, são determinados os parâmetros elásticos do solo, dados a seguir.

3.3.1. Módulo de deformação transversal (G)

O módulo de deformação transversal foi determinado 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:

$$G = 11,5 \times (N_{spt})^{0,8} \quad (3.3.1-1)$$

O número de golpes considerado para a determinação do G varia de acordo com a profundidade de assentamento da fundação. Esse valor foi obtido a partir do boletim de sondagem a percussão, reproduzido no anexo 1.

Devido às diversas metodologias para obtenção do módulo de cisalhamento (G) e a grande incerteza sobre esse valor, foi considerado uma variação de 50% para mais e para menos e os valores utilizados nos modelos estão apresentados na tabela 10 e tabela 11.

Tabela 10 – Variação de G – Fundação Direta

Módulo de Cisalhamento do solo (kPa)		
Fundação DIRETA		
N_{SPT} = 10		
Modelo 1	50% G	30.000
Modelo 2	100% G	72.500
Modelo 3	150% G	108.000

Tabela 11 – 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	30.000	80.000	135.000
Modelo 2	100% G	72.500	160.000	270.000
Modelo 3	150% G	108.000	240.000	405.000

3.3.2. Coeficiente de Poisson (ν)

Adotou-se o valor de ν de 0,35, de acordo com a [Tabela 5](#). A eventual variação deste parâmetro afeta pouco os resultados.

Formatado: Fonte: 12 pt, Não Negrito

3.3.3. Massa específica (ρ)

A massa específica do solo adotada para o projeto é 1,8 t/m³.

3.4. Fração de amortecimento crítico (ϵ)

A fração de amortecimento crítico adotada foi 2% para o projeto desta fundação.

3.5. Análise Dinâmica

A análise dinâmica foi realizada utilizando o programa *BlockSolver*.

Os dados de entrada e os resultados obtidos pelo programa estão apresentados nas figuras a seguir para os dois tipos de fundação.

3.5.1. Fundação DIRETA

1. Escolha do tipo de fundação

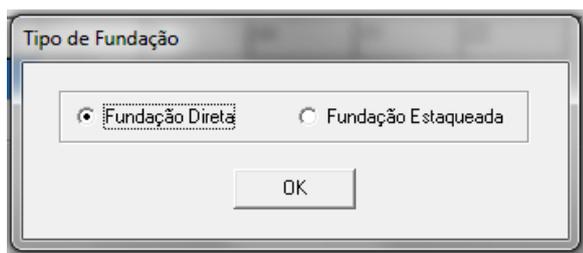


Figura 14 – Tipo de fundação - Direta

2. Geometria da base

Número de Blocos: 4

Dimensão da Base: BX (m) 10.000, BY (m) 4.000

Coordenadas do Centro Geométrico da Base: Xb (m) 0.000, Yb (m) 0.000, Zb (m) 0.000

Dimensões			
Bloco	X (m)	Y (m)	Z (m)
Bloco 1	1.700	4.000	3.700
Bloco 2	2.600	4.000	1.600
Bloco 3	1.200	4.000	3.700
Bloco 4	4.500	4.000	3.350

Coordenadas do Centro de Gravidade			
Bloco	X (m)	Y (m)	Z (m)
Bloco 1	-4.150	0.000	-1.850
Bloco 2	-2.000	0.000	-0.800
Bloco 3	-0.100	0.000	-1.850
Bloco 4	2.750	0.000	-1.675

A base da fundação deverá ter a sua maior dimensão alinhada com o eixo X sendo a geometria dos restantes blocos definida em concordância com esta orientação.

OK Cancelar

Figura 15 – Dimensões da base

3. Massas

- ✓ Peso específico do concreto (2,5 t/m³)
- ✓ Peso do equipamento (t)

Número de Massas Concentradas: 4

Bloco	(Ton/m ³)
Bloco 1	2.500
Bloco 2	2.500
Bloco 3	2.500
Bloco 4	2.500

Massa	X	Y	Z	(Ton)
Massa 1	-3.700	0.000	-4.250	3.810
Massa 2	-0.080	0.000	-4.250	3.810
Massa 3	-2.000	0.000	-4.250	20.930
Massa 4	2.130	0.000	-4.250	17.140

OK Cancelar

Figura 16 – Massas estáticas

4. Propriedades do solo

Devido às incertezas do valor do módulo de cisalhamento transversal do solo, foram feitas três análises para cada uma das frequências, variando o G em 50% para mais e para menos. Os valores do módulo de cisalhamento utilizados nos modelos estão apresentados na tabela 10.

A [Figura 17](#) ~~Figura 17~~ ilustra os dados de entrada.

Formatado: Fonte: 12 pt, Não Negrito

- ✓ Módulo de deformação transversal (G)
- ✓ Coeficiente de Poisson (ν)
- ✓ Massa específica do solo (ρ)

Figura 17 – Propriedades do solo – G = 72500 kPa

5. Frequências

As análises foram feitas considerando dois valores de frequências distintos, frequência do equipamento (19,75Hz) e frequência do motor (60Hz) e em seguida foi feita a superposição dos resultados.

A [Figura 18](#) e a [Figura 19](#) ilustram os dados de entrada referentes às frequências de operação.

Formatado: Fonte: 12 pt, Não Negrito

Formatado: Fonte: 12 pt, Não Negrito

Figura 18 – Frequência do Equipamento

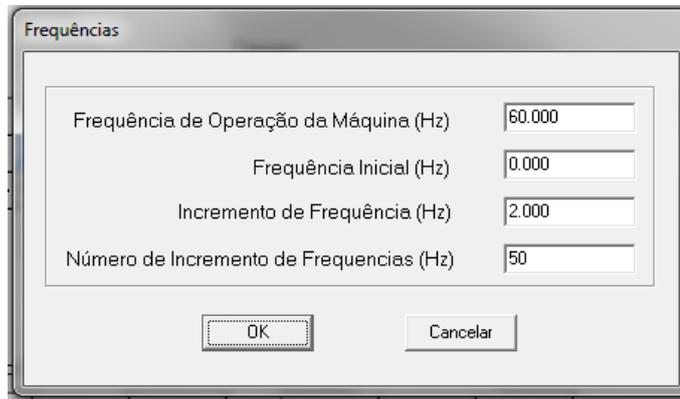


Figura 19 – Frequência do motor

6. Carregamento Dinâmico – Amplitudes

As cargas dinâmicas se alternam com seus valores máximos entre o eixo Y e o eixo Z com um ângulo de fase de 90°.

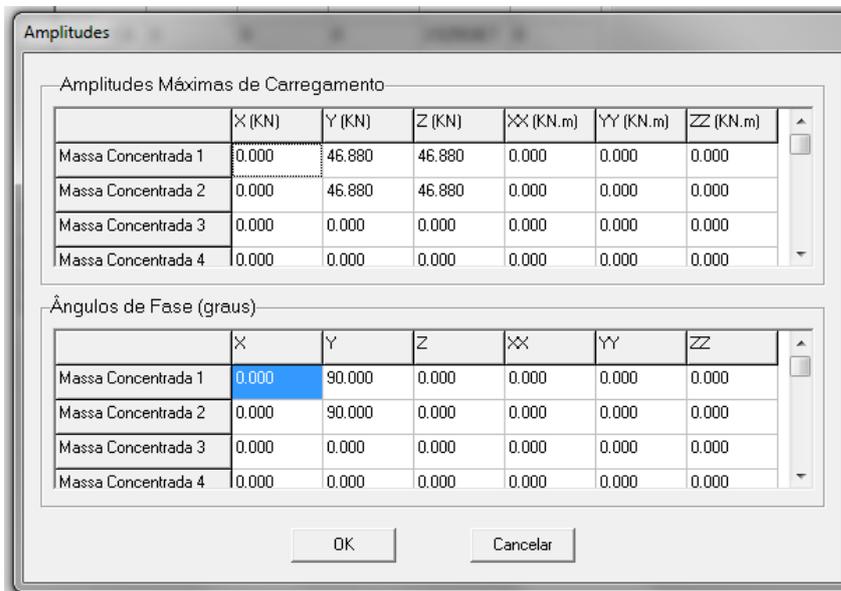


Figura 20 – Carga dinâmica e amplitudes

7. Matrizes

As matrizes de massa, amortecimento e rigidez são geradas automaticamente pelo programa *BlockSolver*. Como exemplo são apresentadas a seguir as matrizes do modelo 2.

[P8] Comentário: o modelo 2 não é o das estacas?

7.1. Matriz de Massa

345.34	0	0	0	0	0
0	345.34	0	0	0	0
0	0	345.34	0	0	0
0	0	0	980.917	0	0
0	0	0	0	879.686	0
0	0	0	0	0	697.835

Figura 21 – Matriz de Massa

7.2. Matriz de Amortecimento

13098	0	0	0	25733	0
0	13098	0	-25733	0	0
0	0	24059	0	0	0
0	-25733	0	73431	0	0
25733	0	0	0	207504	0
0	0	0	0	0	58955

Figura 22 – Matriz de Amortecimento

7.3. Matriz de Rigidez

1.29497E6	0	0	0	2.54417E6	0
0	1.40043E6	0	-2.75135E6	0	0
0	0	1.73182E6	0	0	0
0	-2.75135E6	0	1.32578E7	0	0
2.54417E6	0	0	0	3.52503E7	0
0	0	0	0	0	2.56234E7

Figura 23 – Matriz de Rigidez

8. Resultados

Os deslocamentos máximos 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 12](#)~~Tabela 12~~.

Formatado: Fonte: 12 pt, Não Negrito

Tabela 12 – 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

As velocidades para cada modelo são encontradas a partir dos valores dos deslocamentos obtidos pelo programa, através da seguinte relação:

$$v = 2 \times \pi \times f \times d \quad (3.5.1-1)$$

Onde,

v = velocidade (mm/s)

f = frequência de operação (Hz)

d = deslocamento (mm)

Os valores das velocidades são apresentados na [Tabela 13](#)~~Tabela 13~~.

Formatado: Fonte: 12 pt, Não Negrito

Tabela 13 – Velocidades nas direções X, Y e Z para cada valor de G

f (Hz)	G (kN/m ²)	Velocidade X (mm/s)	Velocidade Y (mm/s)	Velocidade Z (mm/s)
19,75	30000	0,64	2,46	2,33
	72500	0,64	3,50	2,49
	108000	0,63	4,05	2,55
60,0	30000	0,08	0,72	0,73
	72500	0,12	0,73	0,73
	108000	0,15	0,74	0,74

Como operam duas frequências diferentes, a velocidade efetiva em um ponto é definida em função da variação da velocidade nesse ponto, pela expressão a seguir:

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2} \int (v_1^2 + v_2^2)} \quad (3.5.1-2)$$

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 14](#) ~~Tabela 14~~

Formatado: Fonte: 12 pt, Não Negrito

Tabela 14 – Velocidades combinadas nas direções X, Y e Z para cada valor de G

G (kN/m ²)	Velocidade Combinada		
	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

De acordo com a ISO 2372 [1] o equipamento em estudo classifica-se como máquina pesada, Classe III. As faixas de valores de operação da máquina para esta classe estão definidas na [Tabela 3](#) ~~Tabela 3~~.

Formatado: Fonte: 12 pt, Não Negrito

Velocidades até 1,8 mm/s encontram-se na faixa ótima, as de 1,8 a 4,5 mm/s estão na faixa aceitável, as de 4,5 a 11,2 mm/s estão na faixa tolerável e velocidades superiores a 11,2 mm/s são inaceitáveis.

A máxima velocidade encontrada foi 2,91 mm/s, que acontece na direção horizontal (Y) para o maior valor do módulo de cisalhamento transversal (G), e se encontra na faixa de classificação aceitável. Portanto, de acordo com os critérios estabelecidos na ISO 2372 [1], e visto que a frequência própria está distante da frequência de excitação conforme a [Figura 24](#) ~~Figura 24~~, a solução adotada é factível.

Formatado: Fonte: 12 pt, Não Negrito

Em contrapartida, analisando 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.

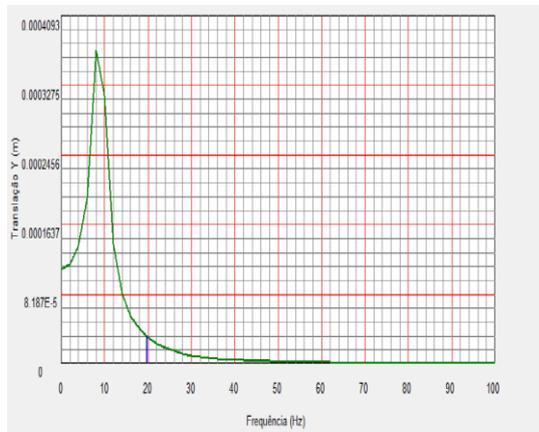


Figura 24 – Gráfico Frequência x Translação Y

3.5.2. Fundação PROFUNDA

1. Escolha do tipo de fundação

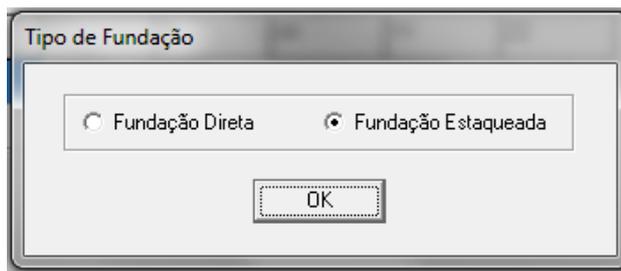


Figura 25 – Tipo de fundação - Profunda

2. Geometria da base

O bloco utilizado na fundação profunda é maior que a base da fundação direta. A [Tabela 9](#) e a [Figura 13](#) mostra essas dimensões e a [Figura 26](#) os dados de entrada no programa.

Formatado: Fonte: 12 pt, Não Negrito

Formatado: Fonte: 12 pt, Não Negrito

Formatado: Fonte: 12 pt, Não Negrito

Geometria

Número de Blocos:

Dimensão da Base: BX (m) BY (m)

Coordenadas do Centro Geométrico da Base: Xb (m) Yb (m) Zb (m)

Blocos

Dimensões				Coordenadas do Centro de Gravidade			
	X (m)	Y (m)	Z (m)		X (m)	Y (m)	Z (m)
Bloco 1	2.700	4.000	3.700	Bloco 1	-4.650	0.000	-1.850
Bloco 2	2.600	4.000	1.600	Bloco 2	-2.000	0.000	-0.800
Bloco 3	1.200	4.000	3.700	Bloco 3	-0.100	0.000	-1.850
Bloco 4	5.500	4.000	3.350	Bloco 4	3.250	0.000	-1.675

A base da fundação deverá ter a sua maior dimensão alinhada com o eixo X sendo a geometria dos restantes blocos definida em concordância com esta orientação.

OK Cancelar

Figura 26 – Dimensões da base

3. Massas

As massas estáticas concentradas em cada bloco são as definidas pelo fornecedor do equipamento, e portanto são as mesmas consideradas no modelo de fundação direta,

Figura 16 ~~Figura 16~~.

Formatado: Fonte: 12 pt, Não Negrito

4. Propriedades da Fundação

A fundação é caracterizada pelos coeficientes de rigidez e coeficientes de amortecimento. Esses coeficientes são calculados através do programa *PILAY*, o qual utiliza propriedades do solo e características das estacas para obtenção dos mesmos.

Foram feitos três modelos no programa *PILAY*, cada modelo analisando duas frequências distintas, 19,75 Hz e 60 Hz. O modelo 1 considera 50% do valor do módulo de cisalhamento transversal, o modelo 2 utiliza integralmente o valor do módulo de cisalhamento transversal calculado através do número de golpes do SPT e o modelo 3 considera 50% a mais do valor do módulo de cisalhamento.

As velocidades da onda de cisalhamento foram calculadas pela equação abaixo, de acordo com os valores do módulo de cisalhamento de cada camada representativa do solo.

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (3.5.2-1)$$

Na ~~Tabela 15~~ Tabela 15 estão apresentados os valores de G e as velocidade de cisalhamento correspondente (v_s), para cada modelo.

Formatado: Fonte: 12 pt, Não Negrito

Tabela 15 – Valores de G e v_s

Modelos <i>PILAY</i>						
	1ª camada		2ª camada		3ª camada	
	G (kPa)	V_s (m/s)	G (kPa)	V_s (m/s)	G (kPa)	V_s (m/s)
Modelo 1	30.000	129,1	80.000	210,8	80.000	273,9
Modelo 2	72.500	200,7	160.000	298,1	160.000	387,3
Modelo 3	108.000	244,9	240.000	365,1	240.000	474,3

Foram utilizadas estacas do tipo raiz, com diâmetro de 25 cm, peso específico de 25 kN/m³, coeficiente de Poisson igual a 0,25. Esse tipo de estaca possui capacidade de carga estrutural de 700 kN. Dessa forma oito estacas são suficientes para suportar o peso do equipamento mais o peso da fundação. De acordo com a sondagem mais representativa para essa fundação são necessários 8 m de comprimento de estaca, calculados através do Método de Aoki e Veloso [8].

As características da fundação citadas anteriormente serão utilizadas como dados de entrada no programa *PILAY*.

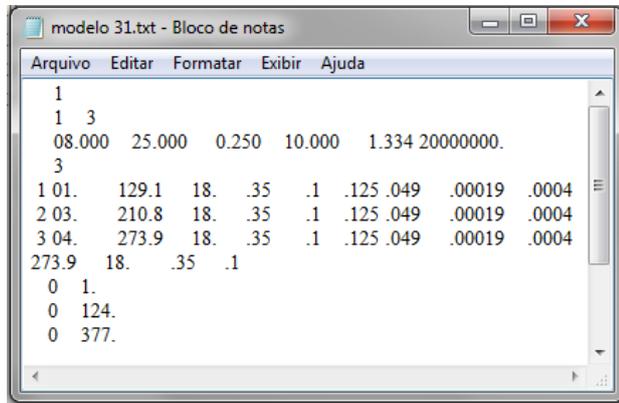


Figura 27 – Arquivo de entrada do programa *PILAY*

INPUT DATA PROBLEM NO. 1

NE= 3 TL= 8.00 VST= 273.900

Formatado: Inglês (Estados Unidos)

EP= 0.2000E+08 PST= 0.0000E+00 GMP= 25.00 GAC= 10.00 PRP= 0.25 SHFC= 1.334

LAYER	TH(I)	VS(I)	GMS(I)	PR(I)	TDL(I)	RO(I)	PAR(I)	PIN(I)	PTJ(I)
1	1.00	129.10	18.00	0.350	0.100	0.125	0.4900E-01	0.1900E-03	0.4000E-03
2	3.00	210.80	18.00	0.350	0.100	0.125	0.4900E-01	0.1900E-03	0.4000E-03
3	4.00	273.90	18.00	0.350	0.100	0.125	0.4900E-01	0.1900E-03	0.4000E-03

SOIL BELOW TIP 273.90 18.00 0.350 0.100

DIMENSIONLESS RATIOS

VST/VC= 0.0968 VB/VST= 1.0000 SQRT GT/EP= 0.0822 TL/RO= 64.00

Formatado: Inglês (Estados Unidos)

OUTPUT DATA PROBLEM NO. 1 FREQUENCY NO. 1 OMG= 1.000 AOT= 0.0005

STIFFNESS AND DAMPING PARAMETERS						PINNED
FW1	FT1	FU1	FP1	FC1	FN1	
0.43631E-01	0.17043E+00	0.32032E-01	0.40192E+00	-0.77775E-01	0.16982E-01	
FW2	FT2	FU2	FP2	FC2	FN2	
0.11714E+00	0.89265E-01	0.18448E+00	0.60202E+00	-0.27177E+00	0.10185E+00	
STIFFNESS AND DAMPING CONSTANTS K1 C1						PINNED
KWW	KZT	KUU	KPP	KPU	KUN	
0.34207E+06	0.43630E+04	0.62321E+05	0.12218E+05	-0.18915E+05	0.33040E+05	

CWW	CZT	CUU	CPP	CPU	CUN
0.41911E+03	0.10429E+01	0.16380E+03	0.83522E+01	-0.30163E+02	0.90430E+02

OUTPUT DATA PROBLEM NO. 1 FREQUENCY NO. 2 OMG= 124.000 AOT= 0.0566

STIFFNESS AND DAMPING PARAMETERS					PINNED
FW1	FT1	FU1	FP1	FC1	FN1
0.43835E-01	0.17029E+00	0.32218E-01	0.40535E+00	-0.78781E-01	0.17092E-01
FW2	FT2	FU2	FP2	FC2	FN2
0.11371E+00	0.89325E-01	0.18370E+00	0.59172E+00	-0.26892E+00	0.10125E+00

STIFFNESS AND DAMPING CONSTANTS K1 C1					PINNED
KWW	KZT	KUU	KPP	KPU	KUN
0.34366E+06	0.43594E+04	0.62683E+05	0.12323E+05	-0.19159E+05	0.33255E+05
CWW	CZT	CUU	CPP	CPU	CUN
0.40683E+03	0.10436E+01	0.16311E+03	0.82093E+01	-0.29848E+02	0.89902E+02

OUTPUT DATA PROBLEM NO. 1 FREQUENCY NO. 3 OMG= 377.000 AOT= 0.1721

STIFFNESS AND DAMPING PARAMETERS					PINNED
FW1	FT1	FU1	FP1	FC1	FN1
0.45303E-01	0.16792E+00	0.33334E-01	0.42558E+00	-0.84958E-01	0.17636E-01
FW2	FT2	FU2	FP2	FC2	FN2
0.10701E+00	0.85585E-01	0.16904E+00	0.50481E+00	-0.23824E+00	0.92541E-01
STIFFNESS AND DAMPING CONSTANTS K1 C1					PINNED
KWW	KZT	KUU	KPP	KPU	KUN
0.35518E+06	0.42986E+04	0.64855E+05	0.12938E+05	-0.20662E+05	0.34312E+05
CWW	CZT	CUU	CPP	CPU	CUN
0.38286E+03	0.99990E+00	0.15009E+03	0.70036E+01	-0.26442E+02	0.82168E+02

Figura 28 – Arquivo de saída do programa PILAY – Modelo 1

Para os três modelos, os valores dos coeficientes de rigidez e amortecimento obtidos pelo programa *PILAY*, como também os coeficientes considerando as oito estacas estão apresentados na [Tabela 16](#) para cada frequência de operação.

Formatado: Fonte: 12 pt, Não Negrito

Tabela 16 – Coeficientes de rigidez e amortecimento

Modelo 1							
Frequência = 19,75 Hz				Frequência = 60 Hz			
Saida do PILAY							
Coef. de Rigidez		Coef. de Amortecimento		Coef. de Rigidez		Coef. de Amortecimento	
KWW	343.660	CWW	407	KWW	355.180	CWW	383
KUU	62.683	CUU	163	KUU	64.855	CUU	150
Considerando 8 estacas							
Coef. de Rigidez		Coef. de Amortecimento		Coef. de Rigidez		Coef. de Amortecimento	
KZ	2.749.280	CZ	3.255	KZ	2.841.440	CZ	3.063
KX = KY	501.464	CX = CY	1.305	KX = KY	518.840	CX = CY	1.201
KZZ	5.004.611	CZZ	13.023	KZZ	5.178.023	CZZ	11.983
KXX	2.749.280	CXX	3.255	KXX	2.841.440	CXX	3.063
KYY	24.688.534	CYY	29.227	KYY	25.516.131	CYY	27.505

Modelo 2							
Frequência = 19,75 Hz				Frequência = 60 Hz			
Saida do PILAY							
Coef. de Rigidez		Coef. de Amortecimento		Coef. de Rigidez		Coef. de Amortecimento	
KWW	472.230	CWW	425	KWW	481.210	CWW	417
KUU	117.830	CUU	200	KUU	121.030	CUU	196
Considerando 8 estacas							
Coef. de Rigidez		Coef. de Amortecimento		Coef. de Rigidez		Coef. de Amortecimento	
KZ	3.777.840	CZ	3.401	KZ	3.849.680	CZ	3.335
KX = KY	942.640	CX = CY	1.598	KX = KY	968.240	CX = CY	1.568
KZZ	9.407.547	CZZ	15.949	KZZ	9.663.035	CZZ	15.652
KXX	3.777.840	CXX	3.401	KXX	3.849.680	CXX	3.335
KYY	33.925.003	CYY	30.537	KYY	34.570.126	CYY	14.084

Modelo 3							
Frequência = 19,75 Hz				Frequência = 60 Hz			
Saída do PILAY							
Coef. de Rigidez		Coef. de Amortecimento		Coef. de Rigidez		Coef. de Amortecimento	
KWW	559.250	CWW	428	KWW	566.940	CWW	422
KUU	156.710	CUU	216	KUU	160.120	CUU	213
Considerando 8 estacas							
Coef. de Rigidez		Coef. de Amortecimento		Coef. de Rigidez		Coef. de Amortecimento	
KZ	4.474.000	CZ	3.421	KZ	4.535.520	CZ	3.372
KX = KY	1.253.680	CX = CY	1.731	KX = KY	1.280.960	CX = CY	1.705
KZZ	12.511.726	CZZ	17.273	KZZ	12.783.981	CZZ	17.015
KXX	4.474.000	CXX	3.421	KXX	4.535.520	CXX	3.372
KYY	40.176.520	CYY	30.722	KYY	40.728.970	CYY	30.284

5. Frequências

As análises foram feitas considerando a frequência do equipamento (19,75Hz) e a frequência do motor (60Hz), e em seguida foi feita a superposição dos resultados.

6. Carregamento Dinâmico – Amplitudes

A carga dinâmica aplicada no modelo de fundação profunda, assim como a carga estática são as mesmas consideradas no modelo de fundação direta e são fornecidas pelo fabricante do equipamento. A [Tabela 8](#) mostra os valores desse carregamento.

Formatado: Fonte: 12 pt, Não Negrito

7. Matrizes

As matrizes de massa, amortecimento e rigidez para cada modelo sobre estacas são geradas automaticamente pelo programa *BlockSolver*. A [Figura 30](#) e [Figura 31](#) ilustram as matrizes geradas para o modelo 1.

Formatado: Fonte: 12 pt, Não Negrito

Formatado: Fonte: 12 pt, Não Negrito

7.1. Matriz de Massa

415.84	0	0	0	0	0
0	415.84	0	0	0	0
0	0	415.84	0	0	0
0	0	0	1151.29	0	0
0	0	0	0	1211.67	0
0	0	0	0	0	1047.45

Figura 29 – Matriz de Massa

7.2. Matriz de Amortecimento

1305	0	0	0	2520	0
0	1305	0	-2520	0	0
0	0	3255	0	0	0
0	-2520	0	8122	0	0
2520	0	0	0	34094	0
0	0	0	0	0	13023

Figura 30 – Matriz de Amortecimento

7.3. Matriz de Rigidez

501464	0	0	0	968386	0
0	501464	0	-968386	0	0
0	0	2.74928E6	0	0	0
0	-968386	0	4.61935E6	0	0
968386	0	0	0	2.65586E7	0
0	0	0	0	0	5.00461E6

Figura 31 – Matriz de Rigidez

8. Resultados

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 17](#).

Formatado: Fonte: 12 pt, Não Negrito

Tabela 17 – Deslocamentos 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	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

As velocidades para cada modelo são encontradas a partir dos valores dos deslocamentos obtidos pelo programa, através da equação (3.5.2-2), e estão apresentadas na [Tabela 18](#) ~~Tabela 18~~.

Formatado: Fonte: 12 pt, Não Negrito

Tabela 18 – Velocidades nas direções x, y e z para cada valor de G

f (Hz)	G (kN/m ²)	Velocidade X (mm/s)	Velocidade Y (mm/s)	Velocidade Z (mm/s)
19,75	50%	0,43	1,67	3,16
	100%	0,39	1,40	4,38
	150%	0,39	1,08	5,89
60,0	50%	0,01	0,59	0,63
	100%	0,02	0,59	0,64
	150%	0,08	0,70	0,82

Dessa forma, a velocidade efetiva é a resultante da combinação das velocidades para as diferentes frequências, conforme apresentado na [Tabela 19](#) ~~Tabela 19~~.

Formatado: Fonte: 12 pt, Não Negrito

Tabela 19 – Velocidades combinadas nas direções X, Y e Z para cada valor de G

G (kN/m ²)	Velocidade Combinada		
	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

A máxima velocidade 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 encontra na faixa de classificação aceitável. Neste caso a frequência própria ainda está distante da frequência de excitação, conforme a [Figura 32](#) ~~Figura 32~~.

Formatado: Fonte: 12 pt, Não Negrito

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

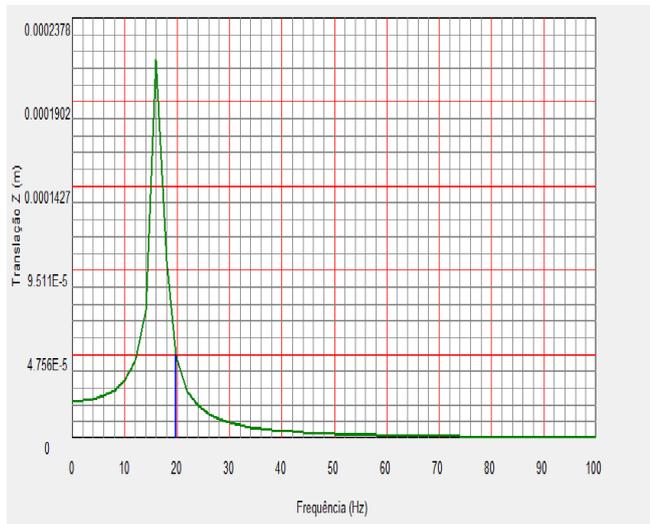


Figura 32 – Gráfico Frequência x Translação Z

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este projeto foi desenvolvido a fim de viabilizar a fundação de um equipamento típico com carga dinâmica em uma planta industrial. Para isto foram feitas análises comparativas das soluções em fundação direta e sobre estacas.

Através do uso do programa *BlockSolver* foi possível mensurar os deslocamentos da fundação ocasionados pelo carregamento dinâmico. Os recalques sofridos pela fundação foram bem controlados e limitados, para que fossem inferiores aos admitidos pelas tubulações que se ligam ao equipamento, a fim de evitar perda de estanqueidade e vazamentos.

De posse dos valores dos deslocamentos, foram calculadas as velocidades correspondentes. Visto que o equipamento em estudo possui duas frequências de excitação foram calculadas as velocidades efetivas.

Na análise da fundação direta, a máxima velocidade encontrada foi 2,91 mm/s, que acontece na direção horizontal (Y) e na análise da fundação sobre estacas, a máxima velocidade encontrada foi 4,20 mm/s, ocorrendo na direção vertical (Z), ambas para o maior valor do módulo de cisalhamento transversal (G).

Esses valores mostram-se coerentes com que era esperado, uma vez que na fundação sobre estacas a rigidez vertical é de 5 a 10 vezes maior que a horizontal, gerando um maior deslocamento nessa direção.

Ainda que a velocidade da fundação sobre estacas esteja 40% maior que a velocidade da fundação direta, as duas encontram-se na faixa de classificação aceitável de acordo com os critérios estabelecidos pela ISO 2372 [1].

Analisando 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, por conseguinte a solução fica limitada ao uso da fundação sobre estacas.

Para que fossem encontrados resultados satisfatórios para esse tipo de 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. Porém esse aumento da dimensão ficou restringido pelas fundações vizinhas de maneira que não ocorressem interferências.

Como sugestão para trabalhos futuros poderia ser feita a análise da estrutura da fundação com um programa de análise estrutural comercial e comparar os resultados com os apresentados pelo programa *BlockSolver*.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ISO 2372 – *Mechanical Vibration of Machines with Operation Speeds from 10 to 200 rev/s*
- [2] DIN 4024, Part 1 – *Machine foundations – Flexible structures that support machines with rotating elements*
- [3] DIN 4024, Part 2 – *Machine foundations – Rigid foundations for machinery subjected to periodic vibration*
- [4] PETROBRAS, N-1848 – *Projeto de Fundações de Máquinas - Rev.B*
- [5] KARL HANSON, S. E Chapter 6: *Fundamental Methods Used In Structural Dynamics*. April 2008
- [6] SANTOS, S.H.C *Fundações de Máquinas*. 2011. 95f. UFRJ, Rio de Janeiro.
- [7] LIMA, Silvio S. e SANTOS, Sergio Hampshire C *Análise Dinâmica das Estruturas*. Rio de Janeiro, Editora Ciência Moderna LTDA, 2008.
- [8] ABMS/ABE, *Fundações: Teoria e Prática*. 2ª ed. São Paulo, Pini, 1998.
- [9] Disponível em: <www.civil.ist.utl.pt/~jaime/6.pdf>, Acesso em: 21 jul. 2011.
- [10] Disponível em http://conference.mst.edu/documents/2010_conference/Section_5.pdf, Acesso em: 28 jul. 2011.
- [11] BOOMINATHAN A. AND AYOTHIRAMAN R *Dynamic response of laterally loaded piles in clay*, Issue GE3 Pag 233–241 - July, 2006
- [12] NBR 6122 – *Projeto e Execução de Fundações*

