3.4 Fundações em Estacas. Estacas Isoladas e Consideração do Efeito de Grupo

São apresentadas, a seguir, as formulações de Poulos e de Novak, esta implementada no programa PILAY para a análise dinâmica de fundações sobre estacas.

• Estacas isoladas, de acordo com Poulos:

- Rigidez vertical, estacas "flutuantes" (sem restrição de deslocamento na ponta) A rigidez é dada por:

$$K_V = \frac{E_S L}{I_P}$$
 $E_S - E$ do solo, $E_P - E$ da estaca,

L, d – comprimento e diâmetro da estaca

 I_P é obtido da Fig. 13.12 de Poulos, em função de L/d e do parâmetro K: K = E_P / E_S



Uma expressão aproximada para a rigidez vertical de estaca longa (Roesset [21],pg.79) é dada por:

$$K_{V} = 0.56 \frac{E_{P}A_{P}}{r} 0.866 \left(\frac{E_{S}}{E_{P}}\right)^{0.5}$$
; r - raio da estaca.

0.5

(o que corresponde a $k_v = 0.739.E_s$; $K_v = \frac{k_v}{\lambda}$; $\lambda = \sqrt{\frac{k_v}{E_p.A_p}}$ e a $I_p = \frac{1.316}{\sqrt{K}}.\frac{L}{d}$)

- Rigidez vertical, estacas "de ponta" (com restrição de deslocamento vertical na ponta) A rigidez é dada por:

$$K_V = \frac{E_P A_P}{I.L}$$
 $E_P - E$ da estaca

 L, A_P – comprimento e área da seção transversal da estaca *I* é obtido da Fig. 13.30 de Poulos, em função de L/d e do parâmetro *K*.



3.13.30 Displacement at top of end-bearing ;

- Rigidez horizontal, estacas de atrito ("flutuantes", ou seja, sem restrição de deslocamento na ponta), para rotação nula no topo da estaca.

A rigidez é dada por:

$$K_{H} = \frac{E_{S}L}{I_{PF}}$$

 I_{PF} é obtido da Fig. 14.4 de Poulos, em função de L/d e do parâmetro K_R

 $K_{R} = \frac{E_{P}.I_{P}}{E_{S}.L^{4}}$ I_{P} – Momento de inércia da estaca

As expressões completas para deslocamentos horizontais e rotações ($\rho \in \theta$), em função das forças horizontais e momentos ($H \in M$), usando-se os parâmetros das Figs. 14.2, 14.3 e 14.5 (estacas de atrito) e 14.11, 14.12 e 14.14 (estacas de ponta fixa ou rotulada) de Poulos são:

$$\rho = I_{\rho H} \cdot \frac{H}{E_s \cdot L} + I_{\rho M} \cdot \frac{M}{E_s \cdot L^2}$$
$$\theta = I_{\theta H} \cdot \frac{H}{E_s \cdot L^2} + I_{\theta M} \cdot \frac{M}{E_s \cdot L^3}$$

Uma expressão aproximada para a rigidez horizontal de estaca longa (Roesset, [21], pg.79) ér:

$$K_H = \frac{2.E_P.I_P}{r^3} \left(\frac{E_S}{E_P}\right)^{0.75}$$

(o que corresponde a
$$k_{\rm H} = 1,246.E_{\rm s}; K_{\rm H} = \frac{k_{\rm h}}{\lambda}; \lambda = \sqrt[4]{\frac{k_{\rm H}}{4.E_{\rm p}.I_{\rm p}}} e a I_{\rm pf} = 0,6.\sqrt[4]{\frac{1}{K_{\rm R}}}$$
)

- Rigidez horizontal, estacas "de ponta" (com ponta rotulada ou engastada), para rotação nula no topo da estaca.

A rigidez é dada por:

$$K_H = \frac{E_S L}{I_{PF}}$$

 I_{PF} é obtido da Fig. 14.4 (estacas de atrito) e 14.13 (estacas de ponta fixa ou rotulada) de Poulos, em função de L/d e de K_R .













("Free-tip")







("Pinned-tip" e "Fixed-tip")

• Formulação do efeito de grupo, de acordo com Poulos:



$$\mathbf{F} = \mathbf{F} \left[\begin{array}{ccc} 1 & \alpha \\ & & \\ \alpha & 1 \end{array} \right] \qquad \mathbf{K} = \mathbf{F}^{-1} = \frac{1}{\mathbf{F}} = \mathbf{K} \left[\begin{array}{ccc} \frac{1}{1 - \alpha^2} & \frac{-\alpha}{1 - \alpha^2} \\ & & \\ \frac{-\alpha}{1 - \alpha^2} & \frac{1}{1 - \alpha^2} \end{array} \right]$$

Em um exemplo em que $\alpha = 0,5$, teremos:

$$\mathbf{K} = \mathbf{K} \begin{pmatrix} 1,333 & -0.666 \\ & & \\ -0,666 & 1,333 \end{pmatrix}$$

- Para efeito de grupo no sentido vertical:

Os fatores "α" são dados na Figs. 13.36 de Poulos para estacas de ponta.

- Para efeito de grupo, no sentido horizontal:

Os fatores " α " são dados na Figs. 14.30 a 14.33 de Poulos, para estacas de atrito (flutuantes), com rotação nula no topo da estaca.





FIG.13.36 Interaction factors for two end-bearing piles resting on a rigid bearing stratum.



Uma avaliação muito aproximada do fator"a" (Gazetas, [22], pg.1534) é dada por:

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{\frac{2s}{d}}}$$

• Exemplo numérico de avaliação de rigidez horizontal de um grupo de estacas, resolução manual pelo Poulos

São utilizadas as Figs. 14.4 e 14.30 do Poulos. Dados: $E_{solo} = 1,2 \times 10^5 \text{ kN/m}^2 \quad v = 0,3 \quad \rho = 2,0 \text{ t/m}^3$ Estacas de concreto (Ep = 3 . 10⁷ kN/m²) com $\phi = 80 \text{ cm} (I_P = \pi \cdot 0,8^4 = 0,02 \text{ m}^4)$ 64



- Estaca isolada (no exemplo, são estacas de atrito, com rotação impedida no topo)

$$\begin{split} K_{R} &= \underbrace{E_{P}}_{E_{S}} \underbrace{I_{P}}_{L^{4}} = \underbrace{3 \cdot 10^{7} \cdot 0.02}_{1,2 \cdot 10^{5} \cdot 30^{4}} = 6,17 \cdot 10^{-6} \text{ (para L/D = 38, I_{PF} \approx 13)} \\ K_{H} &= \underbrace{E_{S}}_{I_{PF}} \underbrace{L}_{PF} = 2,77 \cdot 10^{5} \text{ kN/m} \\ \text{Verificando pela fórmula de Roesset:} \\ K_{H} &= 2,98 \cdot 10^{5} \text{ kN/m} \end{split}$$

Pelo PILAY: $K_{\rm H} = 294070 \text{ kN/m}$

- Estacas em grupo Coeficientes de interação (α_{HH}) para K_R = 10⁻⁵

s /d	β	L/D	$\alpha_{ m HH}$
3,75	0°	38	0,42
3,75	90°	38	0,24
5,3	45°	38	0,26

Matriz dos coeficientes adimensionais de flexibilidade global:

		(1.00	0.42	0.24	0.26	
f1 1		.0.42	1.00	0.26	0.24	
111	:=	0.24	0.26	1.00	0.42	
		0.26	0.24	0.42	1.00	,

Matriz dos coeficientes adimensionais de rigidez global:

 $\boldsymbol{K} = \boldsymbol{F}^1$

Para cada estaca: $K_{CH} = K_H (1,27 - 0,46 - 0,11 - 0,17) = 0,53 K_H$

Para o grupo: $K_{GRUPO} = 4 K_C = 4 .0.53 .2,77 .10^5 = 5,87.10^5 \text{ kN/m}$

• Mesmo exemplo numérico, rigidez vertical, resolução manual pelo Poulos

Para o mesmo exemplo numérico, é calculada a rigidez vertical do grupo de estacas. São utilizadas as Fig. 13.12 e 13.36 do Poulos.

- Estaca isolada (no exemplo, estacas de atrito):
$$\begin{split} K &= \underline{E}_{\underline{P}_{-}} &= \underline{3 \cdot 10^7} = 250 \quad (para \ L/D = 38, \ I_P \approx 3, 35) \\ E_S & 1, 2 \cdot 10^5 \end{split}$$
 $K_V &= \underline{E}_{\underline{S}} \ \underline{L} &= 1, 07 \cdot 10^6 \ kN/m \\ I_P \end{split}$ Verificando pela fórmula de Roesset: $K_V &= 1, 15 \cdot 10^6 \ kN/m$

Pelo PILAY: $K_V = 1228100 \text{ kN/m}$

- Estacas em grupo

Coeficientes de interação (α_{VV}) para K = 250:

s /d	L/D	α VV
3,75	38	0,18
5,3	38	0,15

Matriz dos coeficientes adimensionais de flexibilidade global:

$$f11 := \begin{pmatrix} 1 & .18 & .18 & .15 \\ .18 & 1 & .15 & .18 \\ .18 & .15 & 1 & .18 \\ .15 & .18 & .18 & 1. \end{pmatrix}$$

Matriz dos coeficientes adimensionais de rigidez global:

Para cada estaca:

 $K_C = K_V (1,07 - 0,15 - 0,15 - 0,11) = 0,66 K_V$ Para o grupo:

$$K_{gr} = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} K_{ij}$$

 $K_{GRUPO} = 4 K_{CV} = 4 .0.66 .1,07 .10^6 = 2,82 .10^6 \text{ kN/m}$

Mesmo exemplo numérico, processamento com o PILAY

INPUT DATA PROBLEM NO. 1

NE = 1TL = 30.00VST = 152.000EP= 0.3000E+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 30.00 152.00 20.00 0.300 0.100 0.400 0.5000E+00 0.2000E-01 0.4970E+00 SOIL BELOW TIP 152.00 20.00 0.300 0.100 **DIMENSIONLESS RATIOS** VST/VC= 0.0439 VB/VST= 1.0000 SORT GT/EP= 0.0392 TL/RO= 75.00 OUTPUT DATA PROBLEM NO. 1 FREQUENCY NO. 1 OMG= 1.000 AOT= 0.0026 STIFFNESS AND DAMPING PARAMETERS PINNED FW1 FU1 FP1 FC1 FN1 FT1 0.32425E-01 0.48404E-01 0.31234E-01 0.38896E+00 -0.75264E-01 0.16671E-01 FW2 FT2 FU2 FP2 FC2 FN2 0.73353E-01 0.13772E-01 0.87482E-01 0.33529E+00 -0.13676E+00 0.47108E-01 STIFFNESS AND DAMPING CONSTANTS K1 C1 PINNED KZT KUU KPP KPU KWW **KUN** 0.12159E+07 0.72170E+06 0.29282E+06 0.58344E+06 -0.28224E+06 0.15629E+06 CWW CZT CUU CPP CPU CUN 0.72387E+04 0.54039E+03 0.21583E+04 0.13235E+04 -0.13496E+04 0.11622E+04 OUTPUT DATA PROBLEM NO. 1 FREQUENCY NO. 2 OMG= 30.000 **STIFFNESS AND DAMPING PARAMETERS PINNED** FT1 FC1 FW1 FU1 FP1 FN1 0.32749E-01 0.48104E-01 0.31368E-01 0.39151E+00 -0.75919E-01 0.16727E-01 FW2 FT2 FU2 FP2 FC2 FN2 0.70083E-01 0.13758E-01 0.87191E-01 0.33003E+00 -0.13556E+00 0.46960E-01 STIFFNESS AND DAMPING CONSTANTS K1 C1 PINNED KWW KZT KUU KPP KPU **KUN** 0.12281E+07 0.71722E+06 0.29407E+06 0.58726E+0 -0.28470E+06 0.15682E+06 CWW CZT CUU CPP CPU CUN 0.69161E+04 0.53980E+03 0.21511E+04 0.13028E+04 -0.13377E+04 0.11585E+04

• Aplicação para o bloco de 4 estacas submetido a cargas harmônicas vertical e horizontal

Massa total = 800 t.

Força harmônica = 50 kN, a 300 rpm (5 Hz), considerada como aplicada por um motor elétrico, ao nível das estacas.

Parâmetros das estacas isoladas obtidos na rodada do PILAY acima, com $\omega = 30$ rad/s: $K_{HH} = 0,29407. \ 10^6 \text{ kN/m}$ $C_{HH} = 0,21511. \ 10^4 \text{ kNs/m}$ (rigidez 6% superior à do Poulos) $K_{VV} = 0,12281. \ 10^7 \text{ kN/m}$ $C_{VV} = 0,69161. \ 10^4 \text{ kNs/m}$ (rigidez 15% superior à do Poulos)

Parâmetros das estacas em grupo, considerando como aplicáveis os fatores de grupo avaliados pelo método de Poulos para os coeficientes de rigidez e de amortecimento: Sentido horizontal:

 $K_{HH, GRUPO} = 4 .0.531 .2,9407.10^5 = 6,25 .10^5 \text{ kN/m}$ $C_{HH, GRUPO} = 4 .0,531 .2,1511.10^3 = 4,57 .10^3 \text{ kNs/m}$

Sentido vertical: $K_{VV, GRUPO} = 4 .0.66 .1,2281 .10^{6} = 3,24 .10^{6} \text{ kN/m}$ $C_{VV,GRUPO} = 4 .0,66 .6,9161 .10^{3} = 1,83 .10^{4} \text{ kNs/m}$

- Análise no sentido horizontal:

f = 4,449 Hz

$$\varepsilon = \frac{C}{2\sqrt{K.M}}$$

$$\varepsilon = 0,102$$

$$D = \frac{1}{\left[\left(1 - \beta^2\right)^2 + \left(2\beta\varepsilon\right)^2\right]^{0.5}}$$

Para a freqüência de 5 Hz, o fator dinâmico de amplificação é:

D = 2,834

 $u_H = 2,834$. $\frac{50}{625000} = 227 \ \mu m \text{ (não tolerável, } \ge 160 \ \mu m)$



- Análise no sentido vertical: f = 10,129 Hz ; $\varepsilon = 0,180$ Para a freqüência de 5Hz, o fator dinâmico de amplificação é: D = 1,287 u_V = 1,287 . <u>50</u> = 19,9 µm (faixa ótima) 3240000



3.5 Análise Automatizada

• Formulação

É considerado o sistema de eixos abaixo:



Devem ser consideradas as matrizes:

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

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

A matriz de massa é simétrica pela coincidência da origem do sistema do sistema de eixos com o centro de gravidade.

M_x 0 0 0 0 0 M_v 0 0 0 0 0 0 M_z 0 M =0 0 M_{xx} $M_{yy} \\$ 0 SIMÉTRICA M_{zz} Problema a ser resolvido: $\mathbf{M} \mathbf{u''}(t) + \mathbf{C} \mathbf{u'}(t) + \mathbf{K} \mathbf{u}(t) = \mathbf{F} e^{i \boldsymbol{\omega} t}$ $\mathbf{u}(t) = \mathbf{u} e^{i \boldsymbol{\varpi} t}$ $(-\varpi^2 \mathbf{M} + i \, \varpi \, \mathbf{C} + \mathbf{K}) \, \mathbf{u} \, \mathbf{e}^{i \varpi t} = \mathbf{F} \, \mathbf{e}^{i \varpi t}$ Exemplo numérico • $Bloco = (5,317.5,317.1,8) m^3$

Bloco = (5,317.5,317.1,8) m³ Massa adicional = 40 t ; Massa total = 167,22 Solo: G = 30 MPa; $\rho = 1,8$ t/m³ ; $\nu = 0,35$ Força vertical: F₀ = 50 kN



Nas páginas seguintes, o mesmo problema resolvido com o programa BLOCKSOLVER. Apresentam-se as telas geradas pelo programa.

		Matriz	de Massa						Matriz Ri	gidez			
167.217	0	0	0	0	0		444695	0	0	0	400225	0	-
0	167.217	0	0	0	0		0	444695	0	-400225	0	0	
0	0	167.217	0	0	0		0	0	576690	0	0	0	
0	0	0	334.056	0	0		0	-400225	0	3.82899E6	0	0	
0	0	0	0	334.056	0		400225	0	0	0	3.82899E6	0	
0	0	0	0	0	599.415		0	0	0	0	0	4.68417E6	
		Matriz An	norteciment	to	Tipo de Fu	ndação	Direta			Cargas			
5955	0	0	0	5359		i i unduçub	Diretta		Z	×	< Y	, ZZ	
0	5955	0	-5359	0		C Fundação	Estaqueada		5	0 0	0	0	
0	0	10938	0	0					0	0	0	0	
0	-5359	0	24912	0									
5359	0	0	0	2491									
0	0	0	0	0									
ciar	3 Inte	rn ▼[W 2 Micros	. • 🖸 M	licrosoft	🔄 Disco local.	🏸 E	llocksolver	Adobe	Re PT	💼 Links	* ¢.:::	
c iar olver erramenta:	S Inte	ern • [Jes Cargas Matriz	2 Micros. Análise de Massa	. • 🕑 M	licrosoft	Disco local.	🎤 E	llocksolver	Adobe	Re PT	inks 🖿	" ¢	
Siar Solver Terramenta:	S Propriedad	ern •	Análise		licrosoft	Disco local.	🍂 B	locksolver	Adobe 🚮 Adobe	Re PT gidez	Links	» (1))	-
iolver ierramenta: 167.217	 3 Inte Propriedad 0 167 217 	em •	Análise de Massa Geometria		licrosoft	Disco local.	A E	Nocksolver	Matriz Ri	gidez		* • • • • • • •	
ciar colver erramenta: 167.217 0	S Propriedad O 167.217 O	rr	Análise de Massa Geometria	. • E M	licrosoft	Disco local.	🧖 E	llocksolver	Matriz Ri	Re PT gidez		* <	
iolver ierramenta: 167.217 0 0	O O O	rr • des Cargas Matriz 0 0 0 167.2 0	Análise de Massa lo Geometria	. • E M	licrosoft	Disco local.	🎢 B	locksolver	Adobe	Re PT gidez la maior dime	Links	» <	
Siar Solver erramentar 167.217 0 0 0 0 0	O O O O O O O O O O	rn	Análise de Massa Geometria Núi	. • 💽 M	icrosoft	A bas alinhe blocc	e da funda ada com o sa dafinda	locksolver ação deve eixo X sen em concol	Adobe	Re PT gidez maior dime tria dos res	in Units	× ¢	
Siar Solver For amenta: 167.217 0 0 0 0 0 0 0 0	O O O O O O O O O O O O O	rn	Análise de Massa Geometria Núr	. • 💽 M	licrosoft	A bas alinha blocc	e da fundi ada com o s definida	locksolver ação deve eixo X sen em concoi	Adobe Matriz Ri 2 rá ter a sua. do a geom dância con	Re PT gidez in etria dos res esta orient	nção tantes ação.	× <	-
Siar Solver erramenta: 167.217 0 0 0 0 0 0 0	0 167.217 0 0 0 0 0 0	rn des Cargas Matriz 0 0 167.2 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Análise de Massa Geometria Núr	. • C M	ierosoft	A bas alinha blocos	e da funda ada com o s definida	locksolver ação deve eixo X sen em concoi	Adobe Matriz Ri 2 rá ter a sua do a geome dância con	Re PT gidez lo maior dime etria dos rest n esta orient	incanor Incão Itantes ação.	× < 200	
Siar Solver Terramenta: 167.217 0 0 0 0 0 0 0 0	0 167.217 0 0 0 0 0 0	rn les Cargas Matriz 0 0 167.2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Análise de Massa Geometria Núr	. • € № mero de Blo Dirr X (m)	Icrosoft	A base alinhs blocos Z (m)	e da fund ada com o s definida	ação deve eixo X sen em concol	Adobe Matriz Ri 2 rá ter a sua do a geom dância con	Re PT gidez naior dime stria dos res esta orient	ecourt ec	× • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	
Siar Solver Terramenta: 167.217 0 0 0 0 0	O O O O O O O O O O O O	ern les Cargas Matriz 0 0 167.2 0 0 0 Matris	Análise de Massa Geometria Núr	. • € № mero de Blo Dirr ×(m) > 1 5.312	Icrosoft Decos 1 iensões dos Y (m) 7 5.317	A bas alinha bloccs Blocos Z (m) 1.8	e da funda ada com o s definida	locksolver ação deve eixo X sen em concol BX (m) [Adobe Matriz Ri 2 rá ter a sua do a geom dância con	Re PT gidez maior dime stria dos resta orient	nção ação.	× CRF	-
siar) olver erramenta: 167.217 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Propriedace O O O O O O O O O O O O O	rn les Cargas Matriz 0 0 0 167.2 0 0 0 0 Matriz 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Análise de Massa de Massa Geometria	nero de Blo Dirr X(m) o 1 5.317	icrosoft accos 1 iensões dos Y (m) 7 5.317	A bas alinha blocos 2 (m) 1.8	ee da fundi ada com o is definida	iocksolver ação deve eixo X sen em concor BX (m) ∫	Adobe Matriz Ri a ter a sua do a geom dância con	Re PT gidez maior dime tria dos res n esta orient Dimensão da Base	nção tantes ação.	* C	
5/ar) 5/0 Ver 167.217 0 0 0 0 0 0 5955 0	 Propriedad 0 167.217 0 0 0 0 0 0 0 0 	rn	Análise de Massa Geometria Núr	mero de Blo Dim X (m) o 1 5.312	icrosoft acos 1 iensões dos Y (m) 7 5.317	A bas alinh blocos z Blocos 1.8	ee da funda ada com o is definida	locksolver ação deve eixo X sen em concor BX (m)	Matriz Ri Adobe Matriz Ri do a geomi dância con 5.317	Re PT gidez maior dime tria dos res n esta orient Dimensão da Base	nção tantes ação.	* C	
5/1 ar) 50 lver 167.217 0 0 0 0 0 0 0 5955 0 0 0 0	 Propriedad Propriedad 167.217 0 167.217 0 0 0 0 5955 0 	rn	Análise de Massa Geometria	nero de Blo Dir X (m) o 1 5.317	icrosoft accos 1 iensões dos Y (m) 7 5.317	A bas alinh blocos Z (m) 1.8	ee da funda ada com o is definida	locksolver ação deve eixo X sen em concol BX (m) [BY (m) [Matriz Ri Adobe Matriz Ri Cara sua do a geomi dância con 5.317	Re PT gidez maior dime stria dos res n esta orient Dimensão da Base	nção tantes ação.	* C	
5/1 ar) 50 lver 167.217 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	 Propriedad Propriedad 167.217 0 167.217 0 0 0 595 0 5355 0 -5359 	rn	Análise de Massa Geometria	nero de Blo Dir X (m) o 1 5.317	icrosoft accos 1 iensões dos Y (m) 7 5.317	A bas alinhé blocos Z (m) 1.8	ee da funda ada com o is definida	locksolver ação deve eixo X sen em concol BX (m) [BY (m) [Xb (m)]	Matriz Ri Adobe Matriz Ri Construction rá ter a sua do a geomi dância con 5.317	Re PT gidez maior dime tria dos res n esta orient Dimensão da Base	e Links	* C	
siar solver ierramenta: 167.217 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	 Propriedad Propriedad 167.217 167.217 0 167.217 0 555 0 5355 0 -5359 0 	rn	2 Micros. Análise de Massa Geometria	mero de Blo Dim X (m) o 1 5.317	icrosoft accos 1 iensões dos Y (m) 7 5317	A bas alinhé blocos Z (m) 1.8	ee da fund- ada com o is definida	locksolver ação deve eixo X sen em concol BX (m) [BY (m) [Xb (m) [Matriz Ri Matriz Ri o sá ter a sua do a geom dância con 5.317	Re PT gidez maior dime stria dos res n esta orient Dimensão da Base Coordena	e Links	* C	
5/1 ar) 50 lver 167.217 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	 Propriedad Propriedad 167.217 167.217 0 167.217 0 0 5355 0 -5359 0 0 	rn	2 Micros. Análise de Massa Geometria Núi	mero de Blo Dirr X (m) o 1 5.317	icrosoft accos 1 iensões dos Y (m) 7 5.317 Centro de C	A bas alinhé blocos Z (m) 1.8 àravidade dos	ee da fund- ada com o is definida	locksolver ação deve eixo X sen em concol BX (m) [BY (m) [Xb (m) [Matriz Ri Matriz Ri ca ecom dância con 5.317	Re PT gidez maior dime tria dos res n esta orient Dimensão da Base Coordena Coordena	e Links	* C	
5/1 ar) 5/1 ar) 5/1 ar (1) 5/2 ar (1)	 Propriedace Propriedace 167.217 167.217 0 167.217 0 555 0 5355 0 -5359 0 0 	rn	2 Micros. Análise de Massa Geometria Núi Bioci	mero de Blo Dirr X(m) o 1 5.312	icrosoft accos 1 iensões dos Y (m) 7 5.317 Centro de C Y (m)	A bas alinhá blocos z (m) 1.8 àravidade dos z (m)	ee da funda ada com o is definida	Iocksolver	Adobe Matriz Ri Adobe Ad	Re PT gidez maior dime tria dos rest n esta orient Dimensão da Base Coordena Centro Ge da Base	Links	* C	
Siar Solver erramenta: 167.217 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Compare and a compare and	m Cargas Matriz O O O O O O O O O O O O O O O O O O	2 Micros	mero de Blo Dirr X(m) o 1 5.317	Icrosoft Decos 1 Hensões dos Y (m) 7 5.317 Centro de C Y (m) 0	A bas alinha blocos 2 (m) 1.8 Aravidade dos 2 (m) 0.9	e da funda ada com o s definida	Iocksolver ação deve eixo X sen em concol BX (m) [BY (m) [Xb (m) [Yb (m) [Zb (m)]	Adobe Matriz Ri io rá ter a sua do a geomi dância com 5.317 5.317	Re PT gidez ia maior dime stria dos res esta orient Dimensão da Base Coordena Centro Ge da Base	Linis		
Siar Solver Info.217 0 0 0 0 5955 0 0 5955 0 0 5955 0 0 Frequé	C C	m Cargas Matriz O O O O O O O O O O O O O O O O O O O	Análise de Massa Geometria Núr Bioci	. • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	Icrosoft	A bas alinha blocos 2 (m) 1.8 Gravidade dos 2 (m) 0.9	e da funda ada com o s definida	locksolver ação deve eixo X sen em concol BX (m) [BY (m) [Xb (m) [Yb (m)] Zb (m)]	Adobe Matriz Ri io rá ter a sua do a geom dância com 5.317 5.317	Re PT gidez ia maior dime stria dos res esta orient Dimensão da Base Coordena Centro Ge da Base	Linis		
Siar Solver erramentar 167.217 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	C C	m Cargas Matriz Cargas Matriz Cargas Matriz Cargas Matriz Cargas Matriz Cargas Matriz Cargas Cargas Matriz Carga	Análise de Massa Geometria Núr Bloce	mero de Blo Dirr X(m) o 1 5.317 lenadas do	Icrosoft Decos 1 Decos 1 V (m) Centro de C V (m) 0	A bas alinha blocos 2 (m) 1.8 Gravidade dos 2 (m) 0.9	e da funda ada com o s definida	Iocksolver ação deve eixo X sen em concol BX (m) [BY (m) [Xb (m) [Zb (m)]	Matriz Ri Matriz Ri do a geom dância con 5.317 5.317	Re PT gidez maior dime tria dos res n esta orient Dimensão da Base Coordena Centro Ge da Base	Linis	» С.	
Siar Solver erramentar 167.217 0 0 0 0 0 5955 0 0 5955 0 0 5955 0 0 5955 0 0 5955 0 0 5955 0 0 5955 0 0 5955 0 0 5955 0 0 5955 0 0 5955 0 0 5955 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Compared and the second s	m Cargas Matriz Cargas Matriz Cargas Matriz Cargas Matriz Cargas Matriz Cargas Matriz Cargas Free mento	Análise Análise de Massa Geometria Núr Bioci Bioci	mero de Blo Dirr X (m) 5 1 5.317 lenadas do	Icrosoft accos 1 vensões dos V (m) Centro de C V (m) 0	A bas alinha blocos 2 (m) 1.8 Gravidade dos 2 (m) 0.9	e da funda ada com o s definida	locksolver ação deve eixo X sen em concol BX (m) [BY (m) [Xb (m) [Zb (m) [Adobe Matriz Ri vá ter a sua do a geom dância con 5.317 5.317	Re PT gidez ia maior dime tria dos res n esta orient Dimensão da Base Coordena Centro Ge da Base	das do ométrico		
Siar iolver erramenta 167.217 0 0 0 0 0 5555 0 0 0 0 5555 0 0 0 0 5555 0 0 0 0 5555 0 0 0 0 5555 0 0 0 0 5555 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Compare and a second seco	m Cargas Matriz Cargas Matriz Cargas Matriz Cargas Matriz Cargas Matriz Cargas Matriz Cargas Free mento	Análise Análise de Massa Geometria Núr Bioci Bioci Bioci	mero de Blo Dirr X (m) o 1 5.317	Icrosoft	A bas alinha blocos 2 (m) 1.8 Gravidade dos 2 (m) 0.9	e da funda ada com o s definida	locksolver ação deve eixo X sen em concol BX (m) [BY (m) [Yb (m) [Zb (m) [Adobe Matriz Ri Adobe rá ter a sua do a geom dância con 5.317 5.317	Re PT gidez maior dime tria dos resta esta orient Dimensão da Base Coordena Centro Ge da Base	das do ométrico	» С.	

Image: 1 mining of the set of the s			Matriz	de Massa						Matriz	Rigidez		
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 <	167.217	0	0	0	0	0	—	444695	0	0	0	400225	0
0 0	0	167.217	0	0	0	0		0	444695	0	-400225	0	0
a a a a b b <td>D</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>-</td> <td></td> <td>-</td> <td></td> <td></td> <td>4</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>0</td>	D	0	1	-		-			4				0
0 0 Nimero de Massas Concentradas 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0)	0	Mdss	as							2)		0
0 Nomero de Massas Concentradas Image: Concentradas Image: Concentradas 0 0 0 0 0 0 0 0)	0											0
Image: State of S)	0				Número de	Massas Cond	centradas	1	_			4.68417E6
Per ov Volumico dos Blocs Condenadas das Massas e Pespectivos Volorei Image: Statistica das das massas e Pespectivos Volorei Image: Statistica das das massas e Pespectivos Volorei Frequência de Cp Image: Statistica das massas e Pespectivos Volorei Image: Statistica das massas e Pespectivos Volorei Frequência de Cp Image: Statistica das massas e Pespectivos Volorei Image: Statistica das massas e Pespectivos Volorei Image: Statistica das massas e Pespectivos Volorei Internento de Frequência (Hz) Image: Statistica das massas e Pespectivos Volorei Image: Statistica das massas e Pespectivos Volorei Image: Statistica das massas e Pespectivos Volorei Internento de Frequência (Hz) Image: Statistica das massas e Pespectivos Volorei Image: Statistica das das massas e Pespectivos Volorei Imag		1 and							1.0				
Image: serie of respirations of the presence of			Б	oco Volúm	ico dos P	lacas	Coordo	adac dao	Maccacio	Pochocti	voo Veloroo		
Sign Normal Normal <td></td> <td></td> <td></td> <td>eso volum</td> <td>100 403 D</td> <td></td> <td></td> <td>10003 003</td> <td>10103303 6</td> <td>r tespecti</td> <td>, , , , , , , , , , , , , , , , , , ,</td> <td></td> <td></td>				eso volum	100 403 D			10003 003	10103303 6	r tespecti	, , , , , , , , , , , , , , , , , , ,		
a 965 0	5955	0		([Ton/m3]	J	>	<	Y	Z	(Ton)		177
a a b a b a b a b a b a b a b a b a b a b a b a b a b a b a b a b a b a b a b a c b c c c c c c c c c c <td>D</td> <td>5955</td> <td>E</td> <td>Bloco 1</td> <td>2.5</td> <td></td> <td>Massa 1 (</td> <td>).</td> <td>0.</td> <td>0.9</td> <td>40.</td> <td></td> <td>0</td>	D	5955	E	Bloco 1	2.5		Massa 1 ().	0.	0.9	40.		0
2.555 0 <td>)</td> <td>0</td> <td></td> <td>0</td>)	0											0
323 0 Fequência de Op Incremento de Frequência (H) 1 Nunero de Incremento de Frequência (H) 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1<	D	-5359											U
Fequéncia de Op Fequéncia de Op Incemento de Frequência (H) Intermento de Frequênc	5359	0											
Frequência de Op Image Image Incremento de Frequências (H) image Incremento de Frequência image Incremento de Frequência image Incremento de Frequência (H) image	n	0	-										
Frequência da De OK Canceir Massa Incremento de Frequência (H2) 1 Nomeo de Incremento de Frequências (H2) 10	50		- 2										
Frequência de Op Image: Central													
Image: Control of Prequêncie (Hz) 0 Numero de Incemento de Prequêncie (Hz) 00 Image: Control of Prequêncie (Hz)	Frequê	ncia de Op	2			[IK I	Ca	ancelar				Massa
Incremento de Frequencia (H) 1 Numero de Incremento de Frequencia (H) 20													Z (m)
Incemento de Frequência (H) I Número de Incremento de Frequencias (H) Image: Comparação de Maguino (H) Image: Comparação de Maguino (H) Image: Comparação de Maguino (H) Image: Comparação de Maguino (H) Image: Comparação de Maguino (H) Image: Comparação de Maguino (H) Frequência de Operação de Maguino (H) Image: Comparação de Maguino (H) Image: Comparação de Maguino (H) Image: Comparação de Maguino (H) Frequência de Operação de Maguino (H) Image: Comparação de Maguino (H)													0 0.9000
Nimero de Incremento de Frequencias (H) 50		Increr	nento de E	requência	(Hz) 0.1			,					
Matriz de Masia Matriz Figidez 167.217 0	iar	Tota		W 2 Micros	. 199	Microcoft	Dicco local		Plaakaabuar	1 M	be Pe	T - Link	
Matriz de Massa Matriz Rigidez 187.217 0	i ar	3 Inte	ern 🔻 [👿 2 Micros.		Microsoft	Disco local	🥬	Blocksolver	M Ad	obe Re F	PT 💼 Link	s
157.217 0 </th <th>iar olver erramentas</th> <th>© 3 Inte</th> <th>ern • [</th> <th>2 Micros Análise</th> <th></th> <th>Microsoft</th> <th>Disco local</th> <th> 🎢</th> <th>Blocksolver</th> <th>Adı 🕅</th> <th>obe Re F</th> <th>PT 💼 Link</th> <th>s * ∢<u></u>⊒∦≣</th>	iar olver erramentas	© 3 Inte	ern • [2 Micros Análise		Microsoft	Disco local	🎢	Blocksolver	Adı 🕅	obe Re F	PT 💼 Link	s * ∢<u></u>⊒∦≣
0 167.217 0 </td <td>iar olver erramentas</td> <td>S Inte</td> <td>ern • [des Cargas Matriz</td> <td>2 Micros. Análise de Massa</td> <td></td> <td>Microsoft</td> <td>Disco local</td> <td> 🧖</td> <td>ölocksolver</td> <td>Ad Matriz</td> <td>ibe Re F Rigidez</td> <td>PT 💼 Link</td> <td>∝ * ∢<u>⊉</u>®</td>	iar olver erramentas	S Inte	ern • [des Cargas Matriz	2 Micros. Análise de Massa		Microsoft	Disco local	🧖	ölocksolver	Ad Matriz	ibe Re F Rigidez	PT 💼 Link	∝ * ∢<u>⊉</u>®
0 167.217 0 0 0 0 576690 0 0 0 0	olver erramentas	S Inte Propriedad	ern • [des Cargas Matriz	Análise de Massa 0	0	Microsoft	Disco local	444695	Blocksolver	Matriz	Rigidez	PT 🖮 Link	∝ » ∢ ⊉∌
0 0 334.056 0 0 0 400225 0 3.82899E6 0 0 0 0 0 0 0 3.82899E6 0 0 3.82899E6 0 0 0 3.82899E6 0 0 3.82899E6 0 0 3.82899E6 0 0 4.68417E6 Matriz Amorteciment Módulo de Distorção Transversal (KIV/m2) 30000 3.8289E6 0	iar olver erramentas 167.217 D	© 3 Inte Propriedad	ern	Análise de Massa 0 0	0	Microsoft	Disco local	🥖 I 444695 0	Blocksolver 0 444695	Matriz 0 0	Rigidez 0 -400225	PT 🖮 Link 400225 0	
0 0	olver olver erramentas 167.217 0 0	© 3 Inte Propriedad	ern	Análise de Massa 0 0 0 0 0 0 0 0 0	▼ 0 0 0 0	Microsoft	Disco local	A44695 0 0	Blocksolver 0 444695 0	Matriz 0 0 576690	Rigidez 0 -400225 0	PT im Link 400225 0 0	
0 0 0 0 0 0 0 0 4.6841726 Matriz Amoteciment Módulo de Distorção Transversal (KN/m2) 30000 argas argas 5955 0 6.359 0 6.359 0 <td>olver erramentass 167.217 0 0</td> <td>© 3 Inte Propriedad 0 167.217 0 0</td> <td>ern</td> <td>Análise Análise Análise O O O O O 334.056</td> <td></td> <td>Microsoft</td> <td>Disco local</td> <td>444695 0 0 0</td> <td>Blocksolver 0 444695 0 -400225</td> <td>Matriz 0 0 576690 0</td> <td>Rigidez 0 400225 0 3.82899E</td> <td>PT im Link 400225 0 0 6 0</td> <td></td>	olver erramentass 167.217 0 0	© 3 Inte Propriedad 0 167.217 0 0	ern	Análise Análise Análise O O O O O 334.056		Microsoft	Disco local	444695 0 0 0	Blocksolver 0 444695 0 -400225	Matriz 0 0 576690 0	Rigidez 0 400225 0 3.82899E	PT im Link 400225 0 0 6 0	
a b b c ktorrte Matriz Amorteciment Módulo de Distorção Transversal (KN/m2) 30000 argas 5955 0 0 0 0 0 0 035 0 0 0 0 036 0 0 0 0 038 0 0 0 0 -5359 0 0 0 0 0 5559 0 0 0 0 0 0 0 6 VY ZZ 0 0 0 0 0 0 0 <td>iar olver erramentas 167.217 D D D D</td> <td>© 3 Inte Propriedac 0 167.217 0 0 0</td> <td>ern</td> <td>2 Micros. Análise de Massa 0 0 0 334.056 0</td> <td></td> <td>Microsoft 0 0 0 0 0</td> <td>Disco local</td> <td>444695 0 0 0</td> <td>0 444695 0 -400225</td> <td>Matriz 0 0 576690 0</td> <td>Rigidez 0 400225 0 3.8289951</td> <td> 400225 0 0 6 3.82899E </td> <td></td>	iar olver erramentas 167.217 D D D D	© 3 Inte Propriedac 0 167.217 0 0 0	ern	2 Micros. Análise de Massa 0 0 0 334.056 0		Microsoft 0 0 0 0 0	Disco local	444695 0 0 0	0 444695 0 -400225	Matriz 0 0 576690 0	Rigidez 0 400225 0 3.8289951	 400225 0 0 6 3.82899E 	
Matriz Amorteciment Módulo de Distorção Transversal (KN/m2) j0000 argas 5955 0 <td< td=""><td>iar olver erramentas 167.217 D D D D D</td><td>0 Propriedad 0 167.217 0 0 0 0</td><td>ern</td><td>Análise Análise C Massa O O O O O O O O O O O O O O O O O O</td><td>0 0 0 0 0 0</td><td>Microsoft 0 0 0 0</td><td>Disco local</td><td>444695 0 0 0</td><td>Blocksolver 444695 0 400225</td><td>Matriz 0 0 576690 0</td><td>Bigidez 0 400225 0 3.82899E1 1</td><td> 400225 0 0 3.82899E 0 </td><td>0 0 0 0 0 6 0 4 6841766</td></td<>	iar olver erramentas 167.217 D D D D D	0 Propriedad 0 167.217 0 0 0 0	ern	Análise Análise C Massa O O O O O O O O O O O O O O O O O O	0 0 0 0 0 0	Microsoft 0 0 0 0	Disco local	444695 0 0 0	Blocksolver 444695 0 400225	Matriz 0 0 576690 0	Bigidez 0 400225 0 3.82899E1 1	 400225 0 0 3.82899E 0 	0 0 0 0 0 6 0 4 6841766
5355 0	iar olver erramentas 167.217 D D D D D D D D	© 3 Inte Propriedad 0 167.217 0 0 0 0 0	ern Cargas Matriz 0 0 167.217 0 0 0 0	Mg 2 Micros. Análise 0 0 0 0 0 334.056 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0	Microsoft 0 0 0 0	Disco local	444695 0 0 0	Blocksolver 0 444695 0 -400225	Matriz 0 0 576690 0	Bigidez 0 400225 0 3.82899E1	PT Image: I	 C C
0 5355 0 -5359 0 -5359 0 <t< td=""><td>iar olver erramentas 167.217 0 0 0</td><td>0 167.217 0 0 0</td><td>ern o des Cargas Matriz 0 0 167.217 0 0 0 0 0 0 0</td><td>Análise Análise 0 0 0 0 334.056 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0</td><td>0 0 0 0 0 0 0</td><td>Microsoft 0 0 0 0 0 0 0</td><td>Disco local</td><td>444695 0 0 0 0 0</td><td>0 444695 0 -400225</td><td>Add Matriz 0 0 576690 0</td><td>Rigidez 0 400225 0 3.82899EI</td><td> 400225 0 0 3.82899E1 0 </td><td> </td></t<>	iar olver erramentas 167.217 0 0 0	0 167.217 0 0 0	ern o des Cargas Matriz 0 0 167.217 0 0 0 0 0 0 0	Análise Análise 0 0 0 0 334.056 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0	Microsoft 0 0 0 0 0 0 0	Disco local	444695 0 0 0 0 0	0 444695 0 -400225	Add Matriz 0 0 576690 0	Rigidez 0 400225 0 3.82899EI	 400225 0 0 3.82899E1 0 	
0 10938 0 Massa Volúmica (ton/m3) 1.8 0 <t< td=""><td>iar olver erramentas 167.217 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0</td><td>0 167.217 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0</td><td>ern o Matriz 0 0 167.217 0 0 0 Matriz Arr 0 0</td><td>With 2 Micros. Análise de Massa. 0 0 334.056 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0</td><td>0 0 0 0 0 0</td><td>Microsoft 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0</td><td>Disco local</td><td>444695 0 0 0 nsversal</td><td>0 444695 0 -400225 30000 0.35</td><td>Add Matriz 0 0 576690 0</td><td>Rigidez 0 400225 0 3.82899E</td><td>27 mm Link 400225 0 0 6 0 3.8289951 0 ∞ 1</td><td> Comparison of the second second</td></t<>	iar olver erramentas 167.217 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 167.217 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	ern o Matriz 0 0 167.217 0 0 0 Matriz Arr 0 0	With 2 Micros. Análise de Massa. 0 0 334.056 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0	Microsoft 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Disco local	444695 0 0 0 nsversal	0 444695 0 -400225 30000 0.35	Add Matriz 0 0 576690 0	Rigidez 0 400225 0 3.82899E	27 mm Link 400225 0 0 6 0 3.8289951 0 ∞ 1	 Comparison of the second second
0 -5359 0 24912 3359 0 0 0 339 0 0 0 60 0 0 0 Centro Geométrico da Base Y (m) Y (m) Z (m) Y (m) Y (m) Z (m) 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000	iar olver erramentas 167.217 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 167.217 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	ern • Matriz 0 0 167.217 0 0 0 Matriz An 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Image: 2 Micros. Análise Image: 2 Image: 2 Massa. Image: 2 Image: 2 Image: 2 Massa. Image: 2 Image: 2	0 0 0 0 0 0	Microsoft 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Disco local Distorção Trai (KIV/m2) ciente de Pois	444635 0 0 0 nsversal sson	0 444695 0 -400225 30000 0.35	Matriz 0 0 0 576690 0	Rigidez 0 400225 0 3.82899E	YT mm Unit 400225 0 0 0 6 0 3.82899E 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 4.68417E6 0
5353 0	iar olver erramentas 167.217 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 167.217 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	ern • Matriz des Cargas Matriz 0 0 167.217 0 0 0 0 Matriz Ann 0 0 10938	Image: 2 Micros. Análise Image: 2 Image: 2 Micros. Image: 2 Image: 2 Image: 2 Image: 2 <td>0 0 0 0 0 0</td> <td>Microsoft 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0</td> <td>Disco local</td> <td>444655 0 0 0 nsversal sson</td> <td>0 444695 0 -400225 30000 0.35</td> <td>Matriz 0 0 576690 0</td> <td>Bigidez 0 400225 0 3.82899E1 Image: State Sta</td> <td>YT min Unit 400225 0 0 0 0 3.82899E1 0 0 0</td> <td>0 0 0 0 0 0 0 0 4.68417E6 0</td>	0 0 0 0 0 0	Microsoft 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Disco local	444655 0 0 0 nsversal sson	0 444695 0 -400225 30000 0.35	Matriz 0 0 576690 0	Bigidez 0 400225 0 3.82899E1 Image: State Sta	YT min Unit 400225 0 0 0 0 3.82899E1 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 4.68417E6 0
Control Cancelar 0	iar olver erramentas 167.217 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 167.217 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 5955 0 -5359	ern • Matriz des Cargas Matriz 0 0 167.217 0 0 0 0 Matriz An 0 0 10938 0	Image: 2 Micros. Análise Análise Image: 2 Micros. Image: 2 Micro. Image: 2 Micro. <td>0 0 0 0 0 0</td> <td>Microsoft 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0</td> <td>Disco local Distorção Tra (KN/m2) ciente de Pois ssa Volúmica (ton/m3)</td> <td> ≯1 444635 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0</td> <td>0 444695 0 400225 30000 0.35 1.8</td> <td>Matriz 0 0 576690 0</td> <td>Bigidez 0 400225 0 3.82899E1 Image: State of the state of the</td> <td>YT million Unitable 400225 0 0 0 0 3.82899E1 0 0 0</td> <td> ○ ○</td>	0 0 0 0 0 0	Microsoft 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Disco local Distorção Tra (KN/m2) ciente de Pois ssa Volúmica (ton/m3)	≯1 444635 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 444695 0 400225 30000 0.35 1.8	Matriz 0 0 576690 0	Bigidez 0 400225 0 3.82899E1 Image: State of the	YT million Unitable 400225 0 0 0 0 3.82899E1 0 0 0	 ○ ○
Frequência de Operação da Máquina (Hz) 5 Centro Geométrico da Base Centro de Massa Frequência Inicial (Hz) 0 00000	iar olver erramentas 167.217 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 167.217 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	ern • • • • • • • • • • • • • • • • • •	Image: 2 Micros. Análise Image: 2 Micros. Image: 2 Micro. Image: 2 Micro. <td>0 0 0 0 0 0</td> <td>Microsoft 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0</td> <td>Disco local Distorção Trai (KN/m2) ciente de Pois ssa Volúmica (ton/m3)</td> <td> ≱1 444695 0 0 0 1sversal sson</td> <td>0 444695 0 -400225 30000 0.35 1.8</td> <td>Matriz 0 0 576690 0</td> <td>Bigidez 0 400225 0 3.82899E0 3.82899E0</td> <td>PT Image: height state sta</td> <td>S ** < 22 0</td>	0 0 0 0 0 0	Microsoft 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Disco local Distorção Trai (KN/m2) ciente de Pois ssa Volúmica (ton/m3)	≱1 444695 0 0 0 1sversal sson	0 444695 0 -400225 30000 0.35 1.8	Matriz 0 0 576690 0	Bigidez 0 400225 0 3.82899E0 3.82899E0	PT Image: height state sta	S ** < 22 0
Frequência de Operação da Máquina (Hz) 5 Centro Geométrico da Base Centro de Massa Frequência Inicial (Hz) 0 0 00000 0.0000 <td< td=""><td>jar olver erramentas 167.217 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0</td><td>0 167.217 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0</td><td>ern • • • • • • • • • • • • • • • • • •</td><td>Image: 2 Micros. Análise Análise Ide Massa 0 0 334.056 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 23539 0 24912 0</td><td>0 0 0 0 0 0 1 5 Solo</td><td>Microsoft 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0</td><td>Disco local Distorção Trai (KN/m2) ciente de Pois cissa Volúmica (ton/m3)</td><td> ≯1 444695 0 0 0 ns∨ersal sson</td><td>0 444695 0 400225 30000 0.35 1.8</td><td>Matriz 0 0 576690 0</td><td>Bigidez 0 0 400225 0 3.82899E1 X </td><td>PT Image: height handling 400225 0 0 0 6 0 382899E1 0 0 0 0 0 0 0</td><td>S ** < 22 O − − − − − − − − − − − − − − − − − − −</td></td<>	jar olver erramentas 167.217 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 167.217 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	ern • • • • • • • • • • • • • • • • • •	Image: 2 Micros. Análise Análise Ide Massa 0 0 334.056 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 23539 0 24912 0	0 0 0 0 0 0 1 5 Solo	Microsoft 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Disco local Distorção Trai (KN/m2) ciente de Pois cissa Volúmica (ton/m3)	≯1 444695 0 0 0 ns∨ersal sson	0 444695 0 400225 30000 0.35 1.8	Matriz 0 0 576690 0	Bigidez 0 0 400225 0 3.82899E1 X	PT Image: height handling 400225 0 0 0 6 0 382899E1 0 0 0 0 0 0 0	S ** < 22 O − − − − − − − − − − − − − − − − − − −
Frequência de Operação da Máquina (Hz) 5 Centro Geométrico da Base Centro de Massa Frequência Inicial (Hz) 0 0 00000 0.0000 <td< td=""><td>iar olver erramentas 167.217 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0</td><td>0 167.217 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0</td><td>ern • Matriz des Cargas Matriz 0 0 167.217 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0</td><td>Image: 2 Microssic Análise Análise Image: 2 Massa Image: 2 Massa</td><td>0 0 0 0 0 2 3 Solo</td><td>Microsoft 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0</td><td>Disco local</td><td>444695 0 0 0 nsversal sson</td><td>0 444695 0 400225 30000 0.35 1.8</td><td>Matriz 0 0 576690 0</td><td>Rigidez 0 400225 0 3.82899E1 3.82899E1</td><td>PT ■ Lnh 400225 0 0 0 3.8289951 0 0 0</td><td>0 0 0 0 0 0 0 0 6 0 4.68417E6</td></td<>	iar olver erramentas 167.217 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 167.217 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	ern • Matriz des Cargas Matriz 0 0 167.217 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Image: 2 Microssic Análise Análise Image: 2 Massa	0 0 0 0 0 2 3 Solo	Microsoft 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Disco local	444695 0 0 0 nsversal sson	0 444695 0 400225 30000 0.35 1.8	Matriz 0 0 576690 0	Rigidez 0 400225 0 3.82899E1 3.82899E1	PT ■ Lnh 400225 0 0 0 3.8289951 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 6 0 4.68417E6
K(m) Y(m) Z(m) Incremento de Frequência (Hz) 0.1 Número de Incremento de Frequencias (Hz) 250	iar olver erramentas 167.217 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 167.217 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	ern • • • • • • • • • • • • • • • • • •	Image: 2 Micros. Análise Análise Image: 2 Micros.	0 0 0 0 0 2 3 Solo	Microsoft 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Disco local	444695 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 444695 0 400225 30000 0.35 1.8 2ancelar	Add Matriz	Rigidez 0 -400225 0 3.82899E1	27 m L00 400225 0 0 0 6 0 3.8289952 0	0 0 0 0 0 0 0 4.68417E6
Incremento de Frequência (Hz) 0.1 Número de Incremento de Frequencias (Hz) 250	iar olver erramentas 167.217 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 167.217 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	ern • • • • • • • • • • • • • • • • • •	With 2 2 Micros. Análise Image: Image of the state of the sta	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Microsoft 0 0 0 0 Módulo de I Coefi Mas	Disco local Distorção Tra (KN/m2) ciente de Pois ssa Volúmica (ton/m3)	444695 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 444695 0 444695 0 -400225 30000 - 0.35 - 1.8 - Cancelar -	Add Matriz 0 0 576690 0	Rigidez 0 -400225 0 3.82899E1	27 ■ Unit 400225 0 0 0 6 0 3.82899E0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	©
Incremento de Frequência (Hz) 0.1	iar olver erramentas 167.217 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 167.217 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	em • Matriz des Cargas Matriz 0 0 167.217 0 0 0 0 0 0 0 10938 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	With 2 2 Micros. Análise 0 0 0 0 0 334.056 0 0 0 334.056 0 0 - - 0 - - 0 - - 0 - - 0 - - 0 - - 0 - - 24912 0 - 0 - -	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Microsoft 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Disco local Distorção Trai (KN/m2) ciente de Pois ssa Volúmica (ton/m3)	≯ 1 444695 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 444695 0 444695 0 -400225 30000 0.35 1.8	Add Matriz 0 0 576690 0	Rigidez 0 400225 0 3.82899E1	PT ■ Unit 400225 0 0 0 6 0 3.82899E1 0 0 0 0 0 0 0 0 0	O O
Número de Incremento de Frequencias (Hz) 250	iar olver erramentas 167.217 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 167.217 0 0	em • • • • • • • • • • • • • • • • • •	Image: Control of the second	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Microsoft 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Disco local	 444695 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 444695 0 444695 0 -400225 30000 -0.35 1.8	Add Matriz 0 0 576690 0 C C C	Rigidez 0 -400225 0 3.82899E1	PT m Luni 400225 0 0 0 6 0 3.82899E1 0 0 0 0 0 0 0 0 0	 ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○
Número de Incremento de Frequencias (Hz) 250	iar olver 167.217 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 167.217 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	em • • • • • • • • • • • • • • • • • •	Image: Second	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Microsoft 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Disco local	 444695 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 444695 0 444695 0 -400225 30000	Matriz 0 0 0 576690 0	Rigidez 0 -400225 0 3.82899E1	PT m L(n) 400225 0 0 0 6 0 3.82899E(0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	
	iar olver olver 167.217 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 167.217 0 0 ncia de Op 0	m o Matriz Matriz 0 0 167.217 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Image: 2 Micros. Ambilize Ambilize Ambilize Ambilize Base of the second	0 0 <t< td=""><td>Microsoft 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0</td><td>Disco local</td><td>444695 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0</td><td>0 444695 0 444695 0 -400225 30000 - 0.35 - 1.8 - Cecométrico - Y (m) 0.0000</td><td>Add Add A</td><td>Rigidez 0 400225 0 3.82899E 3.82899E</td><td>PT m L(n) 400225 0 0 0 6 0 3.82893E(0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0</td><td></td></t<>	Microsoft 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Disco local	444695 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 444695 0 444695 0 -400225 30000 - 0.35 - 1.8 - Cecométrico - Y (m) 0.0000	Add A	Rigidez 0 400225 0 3.82899E 3.82899E	PT m L(n) 400225 0 0 0 6 0 3.82893E(0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	
	iar olver erramentas 167.217 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	C 3 Interest C 3 Int	m o Matriz Matriz 0 0 167.217 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Image Interest. In	0 0 <t< td=""><td>Microsoft 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0</td><td>Disco local</td><td> 444695 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0</td><td>0 444695 0 400225 30000 0.35 1.8 30000 0.35 1.8 30000 0.35 1.8 2 x→x→x→x→x→x→x→x→x→x→x→x→x→x→x→x→x→x→x</td><td>Add Matriz 0 0 576690 0 C C C</td><td>Rigidez 0 400225 0 3.82899E 3.82899E argas </td><td>YT m L(n) 400225 0 0 0 6 0 3.82893E1 0</td><td>O</td></t<>	Microsoft 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Disco local	 444695 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 444695 0 400225 30000 0.35 1.8 30000 0.35 1.8 30000 0.35 1.8 2 x→x→x→x→x→x→x→x→x→x→x→x→x→x→x→x→x→x→x	Add Matriz 0 0 576690 0 C C C	Rigidez 0 400225 0 3.82899E 3.82899E argas	YT m L(n) 400225 0 0 0 6 0 3.82893E1 0	O
	iar iver ver io io io io io io io io io io	C 3 Interest C 3 Int	em • • • • • • • • • • • • • • • • • •	Image Image <th< td=""><td>0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0</td><td>Microsoft 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0</td><td>Disco local</td><td></td><td>0 444695 0 444695 0 400225 30000 0.35 1.8 30000 0.35 1.8 30000 0.9 1.8 30000 0.9 1.8 30000 1.8 30000 1.8 30000 1.8 30 30000 1.8 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30</td><td>✓ Add Matriz 0 0 576690 0</td><td>Rigidez 0 400225 0 3.82899E1 argas argas X 0.000</td><td>YT mm L101 400225 0 0 0 3.82893E1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0</td><td>O O</td></th<>	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Microsoft 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	Disco local		0 444695 0 444695 0 400225 30000 0.35 1.8 30000 0.35 1.8 30000 0.9 1.8 30000 0.9 1.8 30000 1.8 30000 1.8 30000 1.8 30 30000 1.8 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30	✓ Add Matriz 0 0 576690 0	Rigidez 0 400225 0 3.82899E1 argas argas X 0.000	YT mm L101 400225 0 0 0 3.82893E1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	O O

Ferramen												ا لک رک
	itas Proprieda	ides Cargas	Analise									
		Matriz d	e Massa					Matriz Hi	igidez			
167.217	167	0	0 0	0		444695	0	0	0	400225		
0	0	Amplitudes										
0	0				Amplitudos M	lávimec do (Cerrogem	onto				
0	0				Ampliquest	l=	Lanegame	sinto	1			
0	0		Massa Concer	× (KN	1) Y (KN)	Z (KN)	0 XX (KN.m)	0	ZZ [KN.m]			
			inassa concor	Kidda i	30.	30.	0.	0.	0.			
5955	0											
0	595											
0	0				Ângul	os de Fase ((graus)					
0	-53			- 10	- 100	- 1	l.c.	l	1			
0	0		Massa Consor	X atrada 1	Ŷ	Z 00	×	NY	ZZ.			
			Massa Concer		•	. 90		•	¥			
Frea	uência											
					OK	1	Cancelar					
Númo	ro do la											
, tunio												
ckSolver Ferramen	itas Proprieda	ades Cargas	Análise									- 8
		Matriz d	e Massa					Matriz Ri	igidez			
167.217	0	0	0 0	0		444695	0	0	0	400225	0	
0	167.217	0	🥬 Frequênci	ias							0	
0	0	167.217									0	
0	0	0	-	Frequência	de Operação	da Máquina	(Hz)	5		E.	5 0	
0	0	0									4.68417E6	
	100 M	1			Frequ	uência Inicial	(Hz)		_			
		Matriz Amr										
					Incremento de							
EOEE	0	0	-			e Frequência	(Hz)	0.1	_			
5955 0	0	0	-	NIGorana ala I		e Frequência	(Hz)	0.1		Ţ	w zz	
5955 0 0	0 5955 0	0 0 10938		Número de l	ncremento de	e Frequência Frequencias	: (Hz) s (Hz)	250				
5955 0 0 0	0 5955 0 -5359	0 0 10938 0		Número de l	ncremento de	e Frequência Frequencias	: (Hz) : (Hz)	0.1			YY ZZ 0 0 0 0	
5955 0 0 0 5359	0 5955 0 -5359 0	0 0 10938 0 0		Número de l	ncremento de	• Frequência Frequencias	(Hz) s (Hz) Cancelar	0.1			YY ZZ 0 0 0 0	
5955 0 0 0 5359 0	0 5955 0 -5359 0 0	0 0 10938 0 0 0 0		Número de l	ncremento de	Frequência Frequencias	(Hz) s (Hz) Cancelar	0.1	-		YY ZZ 0 0 0 0	
5955 0 0 0 5359 0	0 5955 0 -5359 0 0	0 0 10938 0 0 0 0		Número de l	ncremento de	Prequência	(Hz) s (Hz) Cancelar	0.1			YY ZZ 0 0 0 0	
5955 0 0 5359 0 Freq	0 5955 0 -5359 0 0 uencia de O	0 0 10938 0 0 0 0 0	Máquina (Hz)	Número de l	ncremento de	Frequência Frequencias	(Hz) s (Hz) Cancelar Geométric:	0.1 [250		Centro d	W ZZ 0 0 0 0	
5955 0 0 5359 0 Freq	0 5955 0 -5359 0 0 uência de 0	0 0 10938 0 0 0 0 vperação da Frequênc	Máquina (Hz) [iia Inicial (Hz)]	Número de l	ncremento de	Frequência	(Hz) s (Hz) Cancelar Geométric Y (m) o oooo	0.1 250 0 da Base 2 (m) 0.0000	×(m)	Centro d	YY ZZ 0 0 0 0 e Massa 2 (m) 10 2 (m)	
5355 0 0 5359 0 Freq	0 5955 0 -5359 0 0 0 uência de O	0 0 10938 0 0 0 0 Peração da Frequênc	Máquina (Hz) [cia Inicial (Hz)]	Número de l	ncremento de	Frequência Frequencias Centro (((m)) (0.000)	(Hz) s (Hz) Geométric Y (m) 0.0000	0.1 250 0 da Base 2 (m) 0.0000	×(m)	Centro d	YY ZZ 0 0 0 0 0 0 e Massa 2 (m) 000 0.9000	
5955 0 0 5359 0 Freq	0 5955 0 -5359 0 0 0 uência de O	0 0 10938 0 0 0 0 vperação da Frequênc	Máquina (Hz) [cia Inicial (Hz) [equência (Hz)]	Número de I 5 0	ncremento de	Prequência Frequencias Centro (X(m) 0.0000	(Hz) s (Hz) Geométric Y (m) 0.0000	0.1 250 0 da Base 2 (m) 0.0000	×(m) 0 000	Centro d Y (m 0 0.00	YY ZZ 0 0 0 0 0 0 0 2 (m) 000 0.9000	
5955 0 0 53559 0 Freq	0 5955 0 -5359 0 0 uência de O Incre	0 0 10938 0 0 0 0 0 0 received a Frequência	Máquina (Hz) [cia Inicial (Hz)] equência (Hz)] quencias (Hz)]	Número de I 5 0 0.1 250	ncremento de	Prequência Frequencias Centro (X(m) 0.0000	(Hz) s (Hz) Geométric Y (m) 0.0000	0.1 250 0 da Base 2 (m) 0.0000	×(m) 0.000	Centro d	YY ZZ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	
5955 0 0 5359 0 Freq Núme	0 5955 0 5359 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 10938 0 0 0 Frequênc ermento de Fre	Máquina (Hz) [cia Inicial (Hz)] equência (Hz)] quencias (Hz)]	Número de l	ncremento de	Prequência Frequencias Centro (X(m) 0.0000	(Hz) s (Hz) Geométric Y (m) 0.0000	0.1 250 0 da Base 2 (m) 0.0000	×(m) 0.000	Centro d Y (m 0 0.00	YY ZZ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	
5955 0 0 5353 0 Freq Núme	0 5955 0 5359 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 10938 0 0 0 0 Frequênc emento de Fre	Máquina (Hz) [cia Inicial (Hz) [equência (Hz) [quencias (Hz) [Número de I	ncremento de	Prequência Frequencias Centro (X(m) 0.0000	(Hz) s (Hz) Geométric Y (m) 0.0000	0.1 250 0 da Base Z (m) 0.0000	×(m) 0 000	Centro d Y (m 0 0.00	YY ZZ 0 0 0 0 0 2 0 2 0 0.9000	
5955 0 0 5359 0 Freq Núme	0 5955 0 -5359 0 uência de O Incre ro de Increm	0 0 10938 0 0 0 0 Peração da Frequênc emento de Fre	Máquina (Hz) [cia Inicial (Hz) [equência (Hz)] quencias (Hz)]	Número de I 5 0 0.1 250	ncremento de	Prequência	(Hz) s (Hz) <u>Cancelar</u> <u>Geométric</u> Y (m) 0.0000	0.1 250 0 da Base 2 (m) 0.0000	×(m) 0.000	Centro d	YY ZZ 0 0 0 0 0 0 0 0 2 (m) 00 0 0.9000	



Matriz de Massa

167.217	0	0	0	0	0
0	167.217	0	0	0	0
0	0	167.217	0	0	0
0	0	0	334.056	0	0
0	0	0	0	334.056	0
0	0	0	0	0	599.415

444695	0	0	0	400225	0
0	444695	0	-400225	0	0
0	0	576690	0	0	0
0	-400225	0	3.82899E6	0	0
400225	0	0	0	3.82899E6	0
0	0	0	0	0	4.68417E6

Matriz Rigidez

Matriz Amortecimento

5955	0	0	0	5359	0
)	5955	0	-5359	0	0
)	0	10938	0	0	0
)	-5359	0	24912	0	0
5359	0	0	0	24912	0
)	0	0	0	0	13483

	×	Y	Z	×	YY	ZZ
REAL	0	50	50	0	0	0
IMAGINÁRIA	0	0	0	0	0	0

×(m)

0.0000

Cargas

Frequência de Operação da Máquina (Hz)	5
Frequência Inicial (Hz)	0
Incremento de Frequência (Hz)	0.1

Número de Incremento de Frequencias (Hz) 250

X (m)

0.000



Centro Geométrico da Base

Z (m)

0.0000

Y (m)

0.0000



Centro de Massa

Z (m)

0.9000

Y (m)

0.0000



4. CRITÉRIOS DE PROJETO

4.1 Classificação das Fundações

As seguintes informações estão envolvidas em um projeto de Fundações de Máquinas:

- Análise do equipamento e avaliação das forças dinâmicas presentes durante a operação
- Avaliação das características elásticas do solo e dos materiais de fundação
- Elaboração do modelo estrutural
- Análise dinâmica
- Verificação dos deslocamentos máximos quanto às tolerâncias
- Projeto de isoladores (eventual)
- Dimensionamento estrutural e verificação das tensões máximas no solo

O quadro abaixo dá uma classificação genérica das Fundações de Máquinas (Srinivasalu [6], pg.2):

Grupo de Máquinas	Movimento Principal	Tipo de Máquina	Faixa de Freqüência	Tipo de Fundação
Máquinas de movimento periódico	Movimento de rotação uniforme	Geradores, motores elétricos, turbinas, bombas centrífugas	$(Alta) \ge 1000$ rpm	Fundações flexíveis: Pórticos ou blocos maciços com pequena base e/ou isolador adequado
	Movimento de rotação uniforme simultâneo a um	Máquinas de mecanismo biela- manivela:	(Baixa) 0-500 rpm	Fundações rígidas: Blocos maciços com grande base
	movimento retilíneo alternativo	motores a piston (gás ou diesel) e compressores a piston	(Média) 300-1000 rpm	Bloco com isolador
Máquinas de movimento não-periódico	Movimento de vai-e-vem seguido de choque	Martelos-pilão e martelos de forja		Bloco maciço ou vasado com absorvedor de choque

Máquinas leves com pequenas forças de inércia não necessitam de cuidados especiais (tornos, impressoras, teres, pequenas bombas, etc.).

O esquema básico de um Turbogerador é mostrado a seguir.



4.2 Definição das Cargas Dinâmicas a Serem Consideradas

• Forças dinâmicas em máquinas rotativas

Causas do desbalanceamento das máquinas: imperfeições iniciais, problemas no transporte, desgaste, folgas, etc.



• Forças dinâmicas em máquinas biela-manivela



$$\begin{split} \alpha &= r/L \text{ ; sen } \beta = \alpha \text{ sen } \varpi t \\ Z_b &= r \cos \varpi t + L \cos \beta \end{split}$$

$$\begin{split} F_{y} &= m_{rot} r \varpi^{2} \operatorname{sen} \varpi t \\ F_{z} &= m_{rec} Z_{b}^{**} + m_{rot} r \omega^{2} \cos \varpi t \quad \text{ou} \\ F_{z} &= (m_{rec} + m_{rot}) r \omega^{2} \cos \varpi t + m_{rec} \frac{r^{2}}{L} \omega^{2} \cos 2 \varpi t + \dots \end{split}$$

A carga do braço deve ser estaticamente distribuída entre m_{rot} e m_{rec} . A força no sentido Z tem uma parcela "primária" e uma "secundária". Todas as forças devem ser fornecidas pelos fornecedores dos equipamentos. Normalmente quando há vários cilindros é possível se "balancear" as forças dinâmicas.

- Exemplo numérico de avaliação de forças dinâmicas em máquinas biela-manivela
- Determinar as forças dinâmicas provocadas por um motor monocilíndrico, cujas características são: Velocidade de rotação: 1000 rpm

Manivela: r = 4'' = 0,102m Biela: L = 15''= 0,381m Peso desbalanceado: $W_{rec} = 19lb = 0,084 \text{ kN}$ Peso do motor : W = 2270 lb = 10kN Solução: $\varpi = 2 \cdot \pi \cdot 1000/60 = 104,7 \text{ rad/s}$ $m_{rot} = 20\%$ da massa do motor = 0,2 $\cdot 1 = 0,2t$ (adotado) $F_y = 0,2 \cdot 0,102 \cdot 104,7^2 \text{ sen } 104,7t = 223,6 \text{ kN} \cdot \text{sen } 104,7t$ $F_z = (0,0084+0,2) \cdot 0,102 \cdot 104,7^2 \cos 104,7t + 0,0084 \cdot 0,102^2 \over 0,381} 104,7^2 \cos 2.104,7t$ $= 233,0 \cos 104,7t + 2,514 \cos 209,4t$ • Forças mínimas a serem consideradas no projeto de máquinas rotativas

As máquinas rotativas são balanceadas antes de sua montagem. Porém, na operação real, excentricidades surgem devido a folgas, desajustes e desgaste. Excentricidades típicas (e), para diversos valores de freqüência de operação (em RPM), encontradas nas partes móveis das máquinas rotativas, são dadas na tabela abaixo, segundo Major ([5], Vol.3, pg. 106). Observar que:

$$F_{R} = m_{rot} r \omega^{2} = m_{rot} e (2\pi f_{RPM}/60)^{2} = \alpha_{g} g m_{rot}$$

$$\alpha_{g} = e (2\pi f_{RPM}/60)^{2} / g \qquad g = 9.81 m/s^{2}$$

Freqüência de	Em operaçã	ăo (Major)	Na ruptur	DIN 4024	
operação	e (mm)	$lpha_{ m g}$	e (mm)	$lpha_{ m g}$	$\alpha_{ m g}$
(RPM)		•		•	
3000	0,020	0,20	0,100	1,00	1,20
1500	0,064	0,16	0,320	0,80	0,60
750	0,160	0,10	0,800	0,50	0,30

A situação de operação corresponde às amplitudes de máquinas normalmente balanceadas. A situação de ruptura corresponde às amplitudes de máquinas com balanceamento já inadmissível.

A DIN 4024 ([17], item 5.4.4) define a força desbalanceada "K" para o projeto:

 $K = 1,2 \cdot L \cdot \underline{f_m}$
50L é o peso do rotor e $\underline{f_m}$ é a freqüência de operação em Hz $K = 0,235 \cdot m_{rot} \cdot f_m$ $\alpha_g = 0,235 \cdot f_m / g$

Estas forças correspondem a uma velocidade de 38mm/s. Na tabela acima, os valores resultantes da aplicação da fórmula da DIN 4024 são apresentados, para comparação com os critérios do Major.

Na falta de outras informações, pode-se adotar no projeto que a massa rotativa seja de 20% da massa total do equipamento. É muito conservador o critério da DIN 4024, de limitar na análise, o valor das frações de amortecimento crítico a 25%.

Em geradores, normalmente deve-se prever um momento gerado em uma situação de curtocircuito. Este momento pode ser avaliado (Major, [5], Vol.3, pg.85) por uma das expressões (ver também a DIN 4024, item 5.5.2):

M = 40 W (M em kN.m, W = capacidade do gerador em MW)

$$M = \frac{G_r.r.N}{3800}$$

(G_r – peso do rotor, r – raio externo do invólucro do rotor, N- rotação em RPM)

Exemplo numérico de determinação de forças a serem consideradas no projeto de máquinas rotativas
 Determinar as forças dinâmicas a serem consideradas em um turbogerador com as características

abaixo. Completar o esquema com a expressão analítica das forças, incluindo sua defasagem no tempo. Potência: 12000kW

Peso total, incluindo o rotor: 1100kN Peso das partes rotativas: 200 kN Velocidade de rotação: 2100 rpm = 35 Hz



• Forças dinâmicas em máquinas à percussão (Srinivasalu, pg. 104)



- Martelos de efeito simples (queda)

Velocidade de impacto:

 $u' = \eta \sqrt{2.g.h.}$ ($\eta = 0,9 - \text{eficiência}$)

- Martelos de efeito duplo (queda + pressão de ar ou vapor) Velocidade de impacto:

$$u' = \eta \sqrt{2.g.h.\left(1 + \frac{A.p}{W}\right)}$$
 ($\eta = 0,55 \text{ a } 0,8, \text{ em média } 0,65$)

(A - área do êmbolo; p - pressão média sobre o êmbolo; W - peso do martelo)

- Dinâmica do choque

Quantidade de movimento antes do choque = Quantidade de movimento após o choque $m_2 u' = m_2 u_1' + m_1 u_0'$



Hipótese de Newton:

 $\xi = \underline{u_0' - u_1'}$ ($\xi \notin o \text{ coeficiente de restituição}$)

u' $\xi = 1$ – choque perfeitamente elástico $\xi = 0$ – choque perfeitamente plástico

Valores típicos de ξ : $\xi = 0,50$ Martelos que forjam peças de aço: $\xi = 0,50$ Martelos que trabalham metais a frio: $\xi = 0,25$ Martelos que forjam metais não ferrosos: $\xi = 0,10$

• Exemplo numérico de avaliação de forças dinâmicas em máquinas à percussão

- Verificar se é admissível o deslocamento máximo após o impacto, para a fundação para o martelo de queda livre com as características:

Peso do martelo: 10kN Peso do conjunto bigorna-fundação: 750 kN Coeficiente de restituição: 0,25 Altura de queda: 1,8 m Dimensões da base: (3,5 . 3,5) m² Módulo de deformação transversal e massa específica do solo: G = 40 MPa ; $\rho = 1,8 \text{ t/m}^3$ Coeficiente de Poisson v = 0,25Solução: $u' = 0,9.\sqrt{2.9,81.1,8} = 5,35m/s$ $\begin{array}{ll} u_{0}{}^{\prime}=& \underline{1+\xi} & u^{\prime} & \mu=75, 0/1, 0=75 & \xi=0, 25 \mbox{ (adotado)} \\ u_{0}{}^{\prime}=& 0, 088 \mbox{m/s}=88 \mbox{ mm/s} \\ M=& m_{1}+m_{2}=75+1=76t \end{array}$

Considerando inicialmente um sistema não amortecido:

$$K = K_{Z} = \frac{4,7.G.b}{1-v} = \frac{4,7.40000.1,75}{1-0,25} = 438667 \, kN \, / \, m$$

$$\omega = \sqrt{K \, / \, M} = 75,97 \, \text{rad/s}$$

$$u = \frac{u_{0}'}{\omega} \text{sen } \varpi t = 1,16 \, \text{sen } 72,8t \qquad u_{MAX} = 1,16 \, \text{mm (OK, ver item } 4.3.2)$$

Considerando o sistema como amortecido:

$$r = (4cd/\pi)^{1/2} = (3.5^2/\pi)^{1/2} = 1.975m; \quad C = \frac{3.4 \cdot r^2}{1 - v} \cdot \sqrt{\rho \cdot G} = \frac{3.4 \cdot 1.975^2}{1 - 0.25} \cdot \sqrt{1.8 \cdot 40000} = 4744 \text{ kN.s/m}$$

O deslocamento do sistema de um grau de liberdade amortecido (ξ =0,41) é representado gráficamente abaixo, fornecendo u_{MAX} = 0,69mm (OK)



4.3 Verificação das Tolerâncias de Deslocamentos

As limitações das amplitudes dos deslocamentos estão ligadas ao bom funcionamento dos equipamentos (critérios a serem definidos pelos fabricantes), ao conforto humano e ao nível de vibrações que será admitido propagar ao meio ambiente, através do solo. Existem instrumentos específicos para a medição de amplitudes de vibrações. Em um grande complexo industrial, a medição periódica destas amplitudes faz parte da rotina de manutenção das máquinas.

4.3.1 Limitações para Máquinas Rotativas

Para máquinas rotativas, podem ser empregados os limites definidos pela ISO 2372 [16]. A Tabela 2 desta norma, abaixo reproduzida, fornece as faixas de operação para as diversas Classes de Equipamentos, conforme definido a seguir:

Classe I – Pequenas máquinas ("output" ≤ 15 kW)

Classe II – Motores elétricos

Classe III – Máquinas pesadas

Classe IV – Turbo-geradores

Faixas de velocidade	Classes de equipamentos					
efetiva (mm/s)	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV		
0 a 0,71	А	А				
0,71 a 1,12	В		А	А		
1,12 a 1,8		В				
1,8 a 2,8	С		В			
2,8 a 4,5		С		В		
4,5 a 7,1			С			
7,1 a 11,2	D			С		
11,2 a 18,0		D	D			
Mais do que 18,0				D		

Definição das diversas faixas de operação das máquinas:

- Faixa A – Faixa ótima

- Faixa B – Aceitável

- Faixa C – Tolerável

- Faixa D - Inaceitável

A Fig. 2.4, reproduzida da ISO 2372, representa graficamente as faixas acima definidas.

Para uma base de equipamento em que existam vibrações ocorrendo em diversas (n) freqüências, a velocidade efetiva (*rms* - "root mean square") 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:

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T}} \cdot \int v^2(T) dt$$

No caso das excitações serem harmônicas:

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot (v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2)}$$

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

4.3.2 Limitações para Máquinas de Impacto As limitações para bigornas são:

Peso dos Martelos	δ_{ADM} na bigorna	δ_{ADM} no bloco de	Espessura	
		fundação	mínima do bloco	
< 1t	1 mm	1,2 mm	1,00 m	
< 2t	2 mm	1,2 mm	1,25 m	
< 3t			1,50 m	
< 4t	3 a 4 mm	1,2 mm	1,75 m	
< 6t			2,25 m	

Pode ser projetado um isolamento elástico entre o bloco de fundação e o solo (ver Major).



igure 2.4: Effective velocity levels for operation of different machines (according to [VDI 2056]).

be the

77

4.4 Verificação das Tensões no Solo

Devido às altas acelerações impostas ao solo, a capacidade de carga em condições dinâmicas, deve ser considerada como menor do que a capacidade em condições estáticas. Os fatores de redução fornecidos na tabela a seguir devem ser considerados.

Tipo de Máquina	Fator de redução
Martelos	0,4
Máquinas de alta velocidade de	0,8
rotação (em torno de 3000 rpm)	
Máquinas de baixa velocidade de	1,0
rotação	

Deve ser considerada a possibilidade de compactação de solos arenosos submetidos a solicitações em altas frequências.

4.5 Detalhamento dos Elementos Estruturais. Requisitos de Projeto

4.5.1 Fadiga dos elementos estruturais

Os materiais submetidos a cargas alternadas atingem a ruptura sob uma carga menor do que a estática. Critério de fadiga:

 $E_d = \gamma_f (E_e + \gamma_v E_v)$

E_d - valor de cálculo do efeito elástico considerado

 γ_f - coeficiente de majoração das cargas

Ee, Ey – parcelas estática e dinâmica do elástico considerado

 γ_y – coeficiente de fadiga

Podem ser adotados os valores abaixo para o coeficiente de fadiga:

 $\gamma_y = 2 - Concreto armado e protendido, metais$

 $\gamma_y = 3$ – Madeira, concreto simples, alvenaria, pedra

4.5.2 Recomendações gerais de projeto



O lençol freático propaga vibrações a longas distâncias. Como alternativa à limitação na dimensão máxima dos blocos, acima definida, pode-se pensar em fundações sobre estacas, ou em utilizarem-se dispositivos isoladores de vibração.

Nos casos de tubulações ligadas às máquinas suportadas pelos blocos, devem-se definir as tolerâncias nos deslocamentos máximos, de forma a se evitar perda de estanqueidade e possíveis vazamentos.

As bases de equipamentos devem estar separadas por juntas das fundações das estruturas vizinhas. Estas devem estar acima das bases dos equipamentos, considerando um talude máximo de 1:3 (ver figura a seguir). As bases devem estar adequadamente protegidas contra eventuais vazamentos de óleo.

Normalmente o "outline", ou seja, as dimensões em planta do bloco, acima do nível do terreno, é definido pela Engenharia Mecânica. Esta também deve fornecer as cargas estáticas e dinâmicas correspondentes à operação normal e em condição de acidente (por exemplo, cargas de curto-circuito), produzidas pelo equipamento.



O C.G. (centro de gravidade) do conjunto máquina-fundação deve estar próximo do centróide da base (uma tolerância máxima de 5% de excentricidade com relação à dimensão correspondente é recomendada).

Existem recomendações de, para se evitar a condição de ressonância, atender-se aos seguintes limites para β ($\beta = \omega/\omega$, freqüência excitante/ freqüência própria):

 $\beta \le 0.5$ ou $\beta \ge 2$ (instalações principais)

 $\beta \le 0.6$ ou $\beta \ge 1.5$ (instalações secundárias)

 $\beta \ge 3$ (máquinas com anti-vibradores)

4.6 Exemplos de projeto

• Fundação em bloco sobre estacas

Seja a fundação esquematizada a seguir. Verificar se os deslocamentos verticais e horizontais são admissíveis pela ISO 2372.





ESTAQUEAMENTO



 $(r = 0, 15 \text{ m}; a = 0,0707\text{m}^2; I = \pi.\text{r}^3/4 = 0,0004\text{m}$ Propriedades consideradas para o solo: v = 0,30 $\rho = 1,8 \text{ Mg/m}^3$ Primeira camada: e = 0,8Segunda camada: e = 0,4Massa da bomba e do motor: $M_B = 8,27 \text{ t}; M_M = 11,70 \text{ t}$ Freqüência de operação: 710 rpm = 11,83 Hz



- Avaliação da faixa de variação do módulo de deformação transversal do solo (G), nas duas camadas de solo.

Primeira avaliação, diretamente pelo SPT: G = 11,5 $(N_{SPT})^{0,8}$ (G em MPa)

(Ohsaki e Iwasaki, 1973)

Primeira camada: G = 20 a 42 MPa

Para a segunda camada, a expressão não será aplicável.

Para a determinação analítica do G, será empregada a expressão:

G = 218 $\sigma_m^{1/2}$ (2,17 - e)² / (1+e) (G e σ_m em MPa)

No caso da fundação sobre estacas, não serão consideradas as tensões devidas ao peso da fundação e do equipamento.

Serão considerados os valores e = 0.8 ou 0.4 e $\rho = 1.8$ t/m³

A 2,00m de profundidade (aproximadamente o topo das estacas), temos: $\sigma_{VS} = 18 \cdot 2,00 = 36 \text{ kPa} = 0,036 \text{ MPa}$ $G = 218 \ 0,036^{1/2} \ (2,17 - 0,8)^2 / (1+0,8) = 43 \text{ MPa}$ (V_S = 155 m/s) A 8,00m de profundidade (interface entre as camadas), temos: $\sigma_{VS} = 18 \cdot 3,35 + 8 \cdot 4.65 = 97,5 \text{ kPa} = 0,0975 \text{ MPa}$ $G = 218 \ 0,0975^{1/2} \ (2,17 - 0,8)^2 / (1+0,8) = 71 \text{ MPa}$ (V_S = 199 m/s) A 10,00m de profundidade (aproximadamente a ponta das estacas), temos: $\sigma_{VS} = 18 \cdot 3,35 + 8 \cdot 6.65 = 114 \text{ kPa} = 0,114 \text{ MPa}$ $G = 218 \ 0,114^{1/2} \ (2,17 - 0,4)^2 / (1+0,4) = 165 \text{ MPa}$ (V_S = 302 m/s)

- Avaliação dos coeficientes de rigidez K_{WW} e K_{UU} , nas direções vertical e horizontal (com rotação nula), das estacas consideradas como isoladas

Os coeficientes são avaliados através de um processamento do programa PILAY, apresentado na folha seguinte. São usadas, para efeito deste exemplo, propriedades "médias" para as camadas. Os resultados mais relevantes para a análise são:

KWW = 0.52031E+06CWW = 0.86111E+03KUU = 0.12771E+06CUU = 0.30065E+03

Rigidez da estaca isolada, no sentido horizontal, pelo Poulos:

 $\begin{array}{l} Adota\text{-se para } E_S \ o \ valor \ E_S = 180 \ MPa \\ K_R = \underbrace{E_P \ I_P}_{E_S \ L^4} = \underbrace{3 \ . \ 10^7 \ . \ 0.0004}_{1.8 \ . \ 10^5 \ . \ 8^4} = 1,63. \ 10^{-5} \ (para \ L/D = 27, \ I_{PF} \ \approx 10) \\ K_H = \underbrace{E_S \ L}_{I_{PF}} = 1,44 \ . \ 10^5 \ kN/m \\ I_{PF} \end{array}$

Rigidez da estaca isolada, no sentido vertical, pelo Poulos: $K = \underbrace{E_P}_{E_S} = \underbrace{3.10^7}_{1,8.10^5} = 167 \text{ (para L/D} = 27, I_P \approx 3,2, I \approx 0,50)$ $K_V = \underbrace{E_S L}_{I_P} = 4,50 \cdot 10^5 \text{ kN/m (como estaca de atrito):}$ $K_V = \underbrace{E_P A_P}_{I \cdot L} = 5,30 \cdot 10^5 \text{ kN/m (como estaca de ponta)}$

- Avaliação dos coeficientes de rigidez global K_{GRUPO}, nas direções vertical e horizontal, das estacas consideradas em grupo

No sentido horizontal (para forças aplicadas na direção Y)

$\alpha_{\Pi\Pi}$ pur α_{R} 10						
Estacas	d/s	β	L/D	$\alpha_{\rm HH}$		
1-2	0,12	90°	27	0,09		
1-3	0,06	90°	27	0,05		
1-4	0,11	0°	27	0,16		
1-5	0,08	43°	27	0,10		
1-6	0,05	62°	27	0,05		

Coeficientes de interação (α_{HH}) para $K_{R} = 10^{-5}$

INPUT DATA PROBLEM NO. 1

NE= 2 TL= 8.00 VST= 302.000

EP= 0.3000E+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 6.00 177.00 18.00 0.300 0.100 0.150 0.7070E-01 0.4000E-03 0.8000E-03 2 2.00 302.00 18.00 0.300 0.100 0.150 0.7070E-01 0.4000E-03 0.8000E-03 SOIL BELOW TIP 302.00 18.00 0.300 0.100 DIMENSIONLESS RATIOS VST/VC= 0.0872 VB/VST= 1.0000 SQRT GT/EP= 0.0740 TL/RO= 53.33 OUTPUT DATA PROBLEM NO. 1 FREQUENCY NO. 1 OMG= 74.000 AOT= 0.0368 STIFFNESS AND DAMPING PARAMETERS PINNED FC1 FW1 FT1 FU1 FP1 FN1 0.36797E-01 0.18764E+00 0.35918E-01 0.40805E+00 -0.82538E-01 0.19281E-01 FW2 FT2 FC2 FN2 FU2 FP2 0.89558E-01 0.17024E+00 0.58488E+00 -0.25147E+00 0.92358E-01 0.12261E+00 STIFFNESS AND DAMPING CONSTANTS K1 C1 PINNED KPU KUN KWW KZT KUU KPP 0.52031E+06 0.12009E+05 0.12771E+06 0.32644E+05 -0.44020E+05 0.68555E+05 CUU CWW CZT CPP CPU CUN 0.28469E+01 0.30065E+03 0.23240E+02 -0.66614E+02 0.86111E+03 0.16310E+03 FN1 FN2 KUN CUN FOR PINNED HEAD. OTHER PARAMETERS AND CONSTANTS = 0.0

84

Matriz dos coeficientes adimensionais de flexibilidade global:

$$f1 := \begin{pmatrix} 1.00 & 0.09 & 0.05 & 0.16 & 0.10 & 0.05 \\ 0.09 & 1.00 & 0.09 & 0.10 & 0.16 & 0.10 \\ 0.05 & 0.09 & 1.00 & 0.05 & 0.10 & 0.16 \\ 0.16 & 0.10 & 0.05 & 1.00 & 0.09 & 0.05 \\ 0.10 & 0.16 & 0.10 & 0.09 & 1.00 & 0.09 \\ 0.05 & 0.10 & 0.16 & 0.05 & 0.09 & 1.00 \end{pmatrix}$$

Matriz dos coeficientes adimensionais de rigidez global:

$$k1 = \begin{pmatrix} 1.04 & -0.06 & -0.03 & -0.15 & -0.08 & -0.03 \\ -0.06 & 1.05 & -0.06 & -0.08 & -0.14 & -0.08 \\ -0.03 & -0.06 & 1.04 & -0.03 & -0.08 & -0.15 \\ -0.15 & -0.08 & -0.03 & 1.04 & -0.06 & -0.03 \\ -0.08 & -0.14 & -0.08 & -0.06 & 1.05 & -0.06 \\ -0.03 & -0.08 & -0.15 & -0.03 & -0.06 & 1.04 \end{pmatrix}$$

Para cada estaca:

Estacas 1, 3, 4 e 6:	$K_{CH} =$	$K_{\rm H}(1,04-0,06-0,03-0,15-0,08-0,03) = 0,69 K_{\rm H}$
Estacas 2 e 5:	$K_{CH} =$	$K_{\rm H}(-0.06 + 1.05 - 0.06 - 0.08 - 0.14 - 0.08) = 0.63 K_{\rm H}$

Para efeito deste exemplo, é considerado um fator de redução médio, no sentido horizontal, igual a 0,67 (simplificadamente igual para os dois sentidos X e Y). É desprezada a redução no sentido vertical (coeficientes α sempre inferiores a 0,1):

KWW	= 520310	kN/m	
CWW	= 861	kN.s/m	
KUU	= 0,67 . 1277	10 = 85566	kN/m
CUU	= 0,67 . 300,7	7 = 201	kN.s/m

- Coeficientes de rigidez condensados no CG do topo das estacas

- 1. Sentidos horizontais X e Y K11 = K22 = 6 . 85566 = 513396 kN/m C11 = C22 = 6 . 201 = 1206 kN.s/m
- 2. Sentido vertical Z K33 = 6 . 520310 = 3121860 kN/m C33 = 6 . 861 = 5166 kN.s/m
- 3. Sentido rotacional XX K44 = 6 . 520310 . 1,35² = 5689590 kN.m C44 = 6 . 861 . 1,35² = 9415 kN.s.m

- 4. Sentido rotacional YY K55 = 4 . 520310 . 2,55² = 13533263 kN.m C55 = 4 . 861 . 2,55² = 22395 kN.s.m
- 5. Sentido torsional ZZ $K66 = 85566 \cdot (6 \cdot 1,35^2 + 4 \cdot 2,55^2) = 3161236 \text{ kN.m}$ $C66 = 201 \cdot (6 \cdot 1,35^2 + 4 \cdot 2,55^2) = 7426 \text{ kN.s.m}$

- Avaliação das amplitudes dos deslocamentos

Considera-se forças dinâmicas iguais a 20% do peso dos equipamentos, numa freqüência de 710 rpm (11,83 Hz).

$$\begin{split} F_B &= 0,2 \ . \ 82,7 = 16,54 \ kN \ ; \ F_M = 0,2 \ . \ 117 = 23,4 \ kN; \ F = 39,94 \ kN \\ 1. \ No \ sentido \ vertical: \\ Massa \ total \ do \ sistema: \\ M &= [6,00 \ . \ 3,60 \ . \ 1,40 + 2,65 \ . \ 2,53 \ . \ (0,40 + 0,768)] \ . \ 2,5 + 8,27 + 11,7 = 115,1 \ t \\ \varpi &= 2 \ . \ \pi \ . \ 710/60 = 74,35 \ rad/s \qquad f=26,21 Hz \\ \bullet \ Desprezando \ o \ amortecimento: \end{split}$$

Amplit:=
$$\frac{F}{K - \omega^2 M}$$

 $\delta v = 16.069$

• Considerando o amortecimento:

Amplit:= $\frac{F}{K + i\omega \cdot C - \omega^2 M}$ $\delta v0 = 15.698 - 2.428i$

O módulo do deslocamento será de: $\delta v = 15.885$ (Faixa ótima para uma máquina pesada)



2. No sentido horizontal:

As propriedades de massa de rotação são avaliadas na planilha abaixo:

Volume	а	b	с	Massa	Zcg	M.Zcg	M.(Z- Zcg)^2	Мхх
1	3,600	6,000	1,400	75,600	0,700	52,920	30,580	93,996
2	2,530	2,650	0,400	6,705	1,600	10,727	0,467	3,666
3	2,530	2,650	0,768	12,873	1,784	22,965	2,584	7,500
Mb + Mm	0,000	0,000	0,000	19,970	3,368	67,259	82,457	0,000
Soma				115,147		153,871	116,087	105,162
	-				ZCG=	1,336		221,249

$$\left\{ \begin{array}{ccc} -\varpi^2 & \left(\begin{array}{ccc} M & 0 \\ 0 & J_{XX} \end{array} \right) & + & \left(\begin{array}{ccc} K_Y & -K_Y h \\ -K_Y h & (K_{XX} + K_Y h^2) \end{array} \right) \right\} \left(\begin{array}{ccc} u_Y \\ u_{XX} \end{array} \right) & = \left(\begin{array}{ccc} P \\ M \end{array} \right)$$

 $\varpi=74,35~rad/s$; M = 115,1t; J_{XX}=221,25~t.m^2; K_Y=513396 kN/m ; K_{XX}= 5689590 kN.m

P = 39,94 kN; M = (3,368-1,336) . P = 81,16 kN.m

• Desprezando o amortecimento: $u = \left(-2.056 \times 10^{-4} -9.65 \times 10^{-6}\right)$

Que tem como módulo $u = 205.8 \ \mu m$

Os picos correspondem às freqüências próprias de 9,4 Hz e 27,0 Hz.

• Considerando o amortecimento: $u(11.833) = -1.886 \times 10^{-4} - 5.736i \times 10^{-5}$

Que tem como módulo $u = 197,1 \ \mu m$

(Faixa tolerável para uma máquina pesada)



• Fundação direta em bloco

É analisado o mesmo bloco do exemplo anterior, agora em fundação direta.

 $K_{z} = \frac{G}{1-\nu} . \beta_{z} . \sqrt{4.c.d}$ 2c = 6,00m ; 2d = 3,60m Adota-se G = 50MPa e $\beta_{z} = 2,2$ $K_{z} = 730334$ kN/m Raio equivalente para cálculo do coeficiente de amortecimento: $r = (4cd/\pi)^{1/2}$ r = 2,62m Coeficiente de amortecimento C_{z} :

$$C_Z = \frac{3.4.r^2}{1-v}\sqrt{\rho.G}$$

 $C_z = 10019 \text{ kN.s/m}$

Desprezando o amortecimento:

 $\delta v = 428.5$

Considerando o amortecimento, o módulo do deslocamento será de:

 $\delta v = 53.167$

(Faixa aceitável para um turbo-gerador)

Variação do deslocamento vertical com a freqüência do carregamento:



5. ISOLAMENTO DE VIBRAÇÕES

5.1 Isolamento Ativo e Passivo. Isolamento à Distância. Isolamento por Barreiras

O isolamento ativo corresponde à situação em que se deve evitar que o equipamento transmita para o meio ambiente um nível inadmissível de vibrações.

No isolamento passivo, um equipamento sensível deve ser protegido contra vibrações que estão sendo produzidas externamente.

Transmissibilidade no isolamento ativo: •



T_r é relação entre a força transmitida à base e a força aplicada.

$$T_{\rm r} = \frac{f_{\rm MAX}}{p_0} = \frac{\left[1 + (2\beta\epsilon)^2\right]^{1/2}}{\left[\left(1 - \beta^2\right)^2 + (2\beta\epsilon)^2\right]^{1/2}} \quad \beta = \frac{\varpi}{\omega}$$

Transmissibilidade no isolamento passivo:



Tr é relação entre deslocamentos (ou acelerações) absolutas da massa e deslocamentos (ou acelerações) impostos ao apoio.

$$T_{r} = \frac{u_{\text{MAX,ABS}}}{u_{\text{MAX,APOIO}}} = \frac{\left[1 + (2\beta\epsilon)^{2}\right]^{1/2}}{\left[\left(1 - \beta^{2}\right)^{2} + (2\beta\epsilon)^{2}\right]^{1/2}} \quad \beta = \frac{\varpi}{\omega}$$

-

A mesma expressão se aplica para os dois casos. Observar no exemplo abaixo que para $\beta > 1,41$, o isolamento é eficiente e que a transmissibilidade aumenta com o amortecimento.



Expressando de outra forma a "transmissibilidade", na ausência de amortecimento:

$$\beta^{2} - 1 = \frac{1}{T}; \beta^{2} = \frac{T+1}{T}; \frac{W}{K} = \frac{0.25.(2\pi)^{2}}{\varpi^{2}} \cdot \frac{\sigma^{2}}{\omega^{2}}$$

O que leva à expressão aproximada: $\delta_{EST} = \underbrace{0.25}_{f_{APLIC}^2} \underbrace{(T+1)}_{T} \qquad f_{APLIC} = \varpi / 2\pi$

Em uma outra formulação, usando o exemplo do item 1.4.1,



 $\beta = u_2 / u_0$ (relação que ocorreria sem/com a mola *k* com a amplitude em M); a eficiência se dá somente para $\beta \le -1$. Na figura abaixo, $\alpha = 0,5$ e $\underline{n_1} = 2$



• Isolamento à distância

Pode-se atender à condição de isolamento passivo pela redução das vibrações à distância.



A amplitude das vibrações verticais no ponto P pode ser avaliada considerando-se a expressão abaixo, de atenuação das ondas de Rayleigh, que na superfície, são as mais lentamente amortecidas.

$$u_P = u_R \cdot \sqrt{r_1 / r_2} \cdot e^{-\alpha(r_2 - r_1)}$$

(amortecimento de radiação).(amortecimento do material) Valores de α : $\alpha = 0.04 \text{ a } 0.12 \text{ m}^{-1}$ (em solos secos é maior o α) $\alpha = 0.04$ é típico de solos saturados e solos fofos; $\alpha = 0.06$ é típico de solos parcialmente saturados e solos médios; $\alpha = 0.10$ é típico de solos densos

• Isolamento por barreiras

A eficiência de barreiras (usando bentonita, isopor, etc.) depende essencialmente da sua capacidade de interceptar as ondas de Rayleigh. A profundidade a ser atingida deve ser da ordem do comprimento de onda das ondas R, o que teoricamente elimina cerca de 98% da energia incidente. A prática tem indicado que uma redução de cerca de 90% das amplitudes de vibração podem ser conseguidas com uma profundidade de trincheira da ordem de 1,5 vezes o comprimento de onda de Rayleigh.

O comprimento de onda é maior quanto menor a freqüência de excitação. (é melhor o isolamento em altas freqüências):

 $L = V_R \cdot T$

Considerando uma velocidade típica para as ondas de Rayleigh de 50 a 250 m/s e uma faixa de freqüências de 5 a 50 Hz, o comprimento das ondas de Rayleigh variará tipicamente entre 5 e 15 m.

5.2 Propriedades dos Materiais Isolantes. Dispositivos Mecânicos Comerciais.

5.2.1 Isolamento com molas

Propriedades do aço – E = 2,1 x 10^8 kN/m²; G = 8,4 x 10^7 kN/m²; $\upsilon = 0,25$



Rigidez vertical de uma mola: $K_v = \frac{1}{n} = \frac{G d^4}{8 D^3}$ Carga vertical admissível: $P = \frac{\tau \pi d^3}{8 \alpha D}$

 $\tau = 400.000 \text{ kN/m}^2$ (tensão admissível do aço no cisalhamento)

$$\alpha = 1 + 1,25 \, \underline{d} + 0,875 \, \underline{d}^2 + \underline{d}^3$$

Rigidez horizontal, expressa em função da vertical:

$$K_{\rm H} = K_{\rm V} \frac{1}{0,385.\alpha.[1+0,77.(h/D)^2]}$$

Onde $h = L - \delta_Z$

 δ_Z é o deslocamento vertical da mola sob a ação da carga de trabalho (P)

5.2.2 Outros materiais isolantes

Pode-se utilizar: madeira, cortiça, feltro, borracha. Isoladores industrializados: metálicos (Vibtech, colchões de ar, tapetes ranhurados, etc.)

• Exemplo numérico - Isolamento das vibrações

Para os dois casos estudados no item 4.6, verificar a possibilidade de projetar um isolamento entre as máquinas e o bloco, com isoladores metálicos da VIBTECH ou similar que reduzam as vibrações para 20% das obtidas sem isolamento.

Fundação em estacas:

Usando um VIBTECH V1135 (24X), com freqüência própria de 5 Hz: $\alpha = 19,97/95,177 = 0,21$ $\omega_2^2 = 19130/19,97 = 958 \quad \omega_2 = 30,95 \text{ rad/s}$ $\varpi = 74,4 \text{ rad/s; } n_2 = 0,415$ $\omega_1^2 = 3121860/114,6 = 27241 \quad \omega_1 = 165,0 \text{ rad/s; } n_1 = 2,22$ $n_2^2 = \underbrace{1 - (1 + \alpha) n_1^2}_{(1 + \alpha)(\beta - 1)(n_1^2 - 1)} \quad 0,415^2 = \underbrace{1 - (1 + 0,21) \cdot 2,22^2}_{(1 + 0,21).(\beta - 1)(2,22^2 - 1)}$ $n_2^2 = \underbrace{1 - (1 + \alpha) n_1^2}_{(1 + \alpha).(\beta - 1).(n_1^2 - 1)} \quad 0,415^2 = \underbrace{1 - (1 + 0,21) \cdot 2,22^2}_{(1 + 0,21).(\beta - 1).(2,22^2 - 1)}$ $\beta = -5,063 \text{ (OK)}$

Fundação direta:

Usando um VIBTECH V1134 (20X), com freqüência própria de 7 Hz: $\omega_2^2 = 38631/19,97 = 1934 \quad \omega_2 = 43,98 \text{ rad/s}; n_2 = 0,591$ $\omega_1^2 = 730334/114,6 = 6373 \quad \omega_1 = 79,83 \text{ rad/s}; n_1 = 1,07$

$$n_2^2 = \frac{1 - (1 + \alpha) \cdot n_1^2}{(1 + \alpha) \cdot (\beta - 1) \cdot (n_1^2 - 1)} \quad 0,591^2 = \frac{1 - (1 + 0,21) \cdot 1,07^2}{(1 + 0,21) \cdot (\beta - 1) \cdot (1,07^2 - 1)}$$

 $\beta = -5,29$ (OK)

6. **BIBLIOGRAFIA**

- [1] Clough, R.W. e Penzien, J., Dynamics of Structures, Second Edition.
- [2] Paz., M., Structural Dynamics Theory and Computation 4th Edition.
- [3] Chopra, A. K., Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering
- [4] Richart, F.E., Woods, R.D. e Hall Jr., J.R., Vibrations of Soils and Foundations, 1970
- [5] Major, A., Dynamics in Civil Engineering Analysis and Design Vols. I a IV
- [6] Srinivasalu, P., Vaidyanathan, C.V. Handbook of Machine Foundations
- [7] ABMS/ ABEF, Fundações Teoria e Prática Editora Pini
- [8] Carvalho, L. J., Análise de Fundações de Máquinas, Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal Fluminense (UFF), 1988.
- [9] Gazetas, G., Dobry, R., Tassoulas, J.L., Vertical Response of Arbitrarily Shaped Embedded Foundations, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 6, Junho 1985.
- [10] Gazetas, G., Tassoulas, J. L., Horizontal Stiffness of Arbitrarily Shaped Embedded Foundations, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 113, No. 5, Maio 1987.
- [11] Hatzikonstantinou, E., Tassoulas, J. L., Gazetas, G. et al., Rocking Stiffness of Arbitrarily Shaped Embedded Foundations, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 115, No. 4, Abril 1989.
- [12] 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 (SACDA), The University of Western Ontario, London, Canada, December 1977.
- [13] Luco, J. E., Impedance Functions for a Rigid Foundation on o Layered Medium, Nuclear Engineering and Design 31, 1974, 204-217.
- [14] Poulos, H. G., Davis, E. H., Elastic Solutions for Soil and Rock Mechanics, John Wiley, New York, 1974.
- [15] Poulos, H. G., Davis, E. H., Pile Foundation Analysis and Design, John Wiley, New York, 1980.
- [16] ISO 2372 Mechanical Vibration of Machines with Operation Speeds from 10 to 200 rev/s
- [17] DIN 4024, Part 1 Machine foundations Flexible structures that support machines with rotating elements
- [18] DIN 4024, Part 2 Machine foundations Rigid foundations for machinery subjected to periodic vibration
- [19] Gazetas, G., Formulas and Charts for Impedances of Surface and Embedded Foundations, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 117, No. 9, September 1991, 1363-1381.
- [20] Wolf, J.P., Foundation Vibration Analysis Using Simple Physical Models, Prentice Hall, 1994.
- [21] Roesset, J.M. e Angelides, D., Dynamic Stiffness of Piles, in Numerical Methods in Offshore Piling, Institution of Civil Engineers, London, 1980, 75-81.
- [22] Gazetas, G. et al., Dynamic Interaction Factors for Floating Pile Groups, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 117, No. 10. October 1991, 1531-1548.
- [23] Gazetas, G., Analysis of Machine Foundation Vibrations: State of the Art, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1983, Vol. 2, No. 1
- [24] Souza Lima, S. e Santos, S.H.C., Análise Dinâmica das Estruturas, Editora Ciência Moderna, Rio de Janeiro, 2008.
- [25] American Concrete Institute, Foundations for Dynamic Equipment, ACI 351.3R-04, 2004.
- [26] Bhatia, K. G., Foundations for Industrial Machines, D-CAD Publishers, New Delhi, 2008