



OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL DE UMA FUNDAÇÃO DE CONCRETO ARMADO SUBMETIDA A SOLICITAÇÕES DINÂMICAS PROVENIENTES DE UM CONJUNTO MOTOR-COMPRESSOR

Matheus Abreu Lopes

matheus.lopes1@hotmail.com

Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, PPGEM/FEN/UERJ

Rua Fonseca Teles, 121, São Cristóvão, 20940-903, Rio de Janeiro/RJ, Brasil

Francisco José da Cunha Pires Soeiro

José Guilherme Santos da Silva

Rodrigo Bird Burgos

soeiro@uerj.br

jbss@uerj.br

rburgos@eng.uerj.br

Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ

Departamento de Estruturas e Fundações, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ

Rua São Francisco Xavier, Nº 524, Maracanã, 20550-900, Rio de Janeiro/RJ, Brasil

Resumo. Este artigo objetiva a otimização de uma fundação de concreto armado, projetada para suportar um conjunto de equipamentos mecânicos motor-compressor de alta capacidade. O sistema estrutural analisado consiste de um bloco de fundação de concreto armado, com dimensões em planta de 15m x 11m e possui 1,5m de altura. O bloco de fundação é suportado por 20 estacas de concreto, com 8,5m de comprimento e 0,5m de diâmetro. O sistema estrutural é submetido a carregamentos dinâmicos, oriundos dos equipamentos mecânicos (motor e compressor) em regime operação permanente sobre o bloco de fundação. Para a otimização tem-se como função objetivo do problema o volume global da estrutura, objetivando a redução do mesmo, mediante a avaliação da resposta estrutural dinâmica do modelo. Neste trabalho utiliza-se uma técnica de otimização estrutural, com base no emprego de Algoritmos Genéticos (AG), por meio de uma adequação das interfaces entre os programas ANSYS e MATLAB. Os resultados obtidos neste estudo mostram que através do uso dos Algoritmos Genéticos (AG) torna-se possível obter reduções consideráveis em relação ao volume de concreto utilizado no projeto das fundações.

Palavras-chave: Fundações de concreto, Otimização estrutural, Análise de vibrações.

1. INTRODUÇÃO

O dimensionamento e a previsão do comportamento de uma estrutura sujeita a um carregamento predominantemente estático é uma tarefa de realização corriqueira aos engenheiros projetistas. Entretanto, quando se tratam de estruturas sujeitas a carregamentos de natureza dinâmica, tal tarefa se torna um pouco mais complexa. O dimensionamento de fundações para suporte de máquinas é um trabalho que exige dos engenheiros conhecimentos de análise dinâmica de estruturas para um projeto satisfatório. Caso seja realizado de forma inadequada, esse dimensionamento pode resultar em fundações antieconômicas, superdimensionadas, ou até mesmo em um caso oposto, onde o projeto torna-se inseguro devido ao subdimensionamento, colocando em risco o sistema fundação-equipamento, inclusive a vida das pessoas (Dalbone & Sanchez Filho, 2011); (Machado, 2010); (Rodrigues, 2016); (Souza Costa, 2013).

Encontrar o projeto ideal, que seja seguro e econômico, é uma tarefa de muita complexidade, pois existem diversas restrições impostas ao problema. Nas últimas décadas, a área da Otimização ganhou bastante espaço para aplicação em problemas de engenharia. Diversos algoritmos de otimização foram propostos e implementados em programas computacionais, facilitando as etapas de projeto. Aliar a otimização com análise dinâmica, permite ao projetista, encontrar configurações de projeto que atendam melhor às condições de operação da estrutura (Lopes, 2017).

Otimização, por definição, significa o processo de busca do resultado ótimo ou ideal, extraindo o melhor rendimento possível, a partir de técnicas para selecionar as melhores alternativas, valores ou resultados para se atingir os objetivos desejados. Do ponto de vista da matemática, o termo otimização ou programação matemática está relacionado ao estudo de problemas cujo propósito é maximizar ou minimizar funções a partir da escolha sistemática dos valores de variáveis reais ou inteiras dentro de um conjunto viável (Ponte, 2015).

O algoritmo genético, é um algoritmo de otimização criado por John Holland na década de 60 e desenvolvido principalmente na década de 70, e se baseia nos estudos de Charles Darwin. Na teoria evolucionista de Darwin os indivíduos que conseguem uma melhoria genética, tornando-se mais adequados ao ambiente atual que habitam, viverão possivelmente mais, gerando mais descendentes, ou seja, a informação genética será espalhada para as próximas gerações enquanto as condições do meio indiquem que seus genes são vantajosos neste ambiente. O algoritmo genético é uma técnica que combina a sobrevivência dos mais aptos com a troca de informações de uma forma estruturada, onde um problema no mundo real é modelado através de um conjunto de indivíduos que são soluções potenciais que melhor se ajustam ao ambiente. De forma análoga à teoria da evolução, os indivíduos são selecionados, se reproduzem e sofrem mutação, obtendo deste modo uma nova geração de indivíduos que também atendem às necessidades do ambiente. Após certo número gerações espera-se convergir para uma geração de elite que corresponda a uma solução ótima ou quase ótima para o problema (Borges, 1999); (Zini, 2009).

O presente trabalho de pesquisa tem como objetivo a otimização de um sistema estrutural em fundações de concreto armado, projetado para suportar um conjunto motor-compressor de alta capacidade. O sistema estrutural em questão localiza-se em uma planta industrial de uma usina siderúrgica e consiste em uma fundação em concreto armado com dimensões em planta de, aproximadamente, 15m x 11m com 1,5m de altura. A otimização estrutural proposta busca a máxima redução possível do volume da estrutura, levando-se em conta a resposta dinâmica

da fundação quando submetida aos carregamentos dinâmicos provenientes do conjunto motor-compressor. (Lopes, 2017)

Para a otimização, foi aplicado um algoritmo genético através do software MATLAB R2015b, em conjunto com o software ANSYS, o qual foi utilizado para a modelagem em elementos finitos visando a obtenção da resposta dinâmica estrutura em picos de deslocamentos, velocidades, acelerações e frequências naturais. Como restrições de projeto, foram utilizadas as recomendações de projeto de acordo com as normas ACI-351, DIN 4024, ISO 2372, ISO 2631, NR-15 e Norma Petrobrás N-1848. Tais normas abordam conceitos sobre a segurança de operação dos equipamentos, conforto humano e critérios de projeto estrutural.

2. APRESENTAÇÃO DO MODELO ESTRUTURAL

A fundação em questão localiza-se em uma planta industrial de uma usina siderúrgica em Ouro Branco/MG, Brasil. Trata-se de um bloco de concreto armado que se apoia sobre 20 estacas do tipo hélice, com diâmetro de 0,50m e comprimento de em torno de 8,50m. O bloco de concreto possui dimensões em planta de aproximadamente 15,00m x 11,75m com 1,50m de altura. O motor fica apoiado em uma base de concreto com dimensões de 5,55m x 3,15m e altura de 3,84m. Já o compressor possui duas bases de apoio com dimensões de 2,40m x 1,50m e 2,40m x 0,60m, ambas com altura de 2,66m. O concreto utilizado para o bloco de concreto possui módulo de elasticidade da ordem de 26 GPa enquanto que o utilizado para as estacas possui módulo de elasticidade de cerca de 21 GPa. As Figuras de 1 a 5 apresentam as imagens da fundação e os detalhes dimensionais.

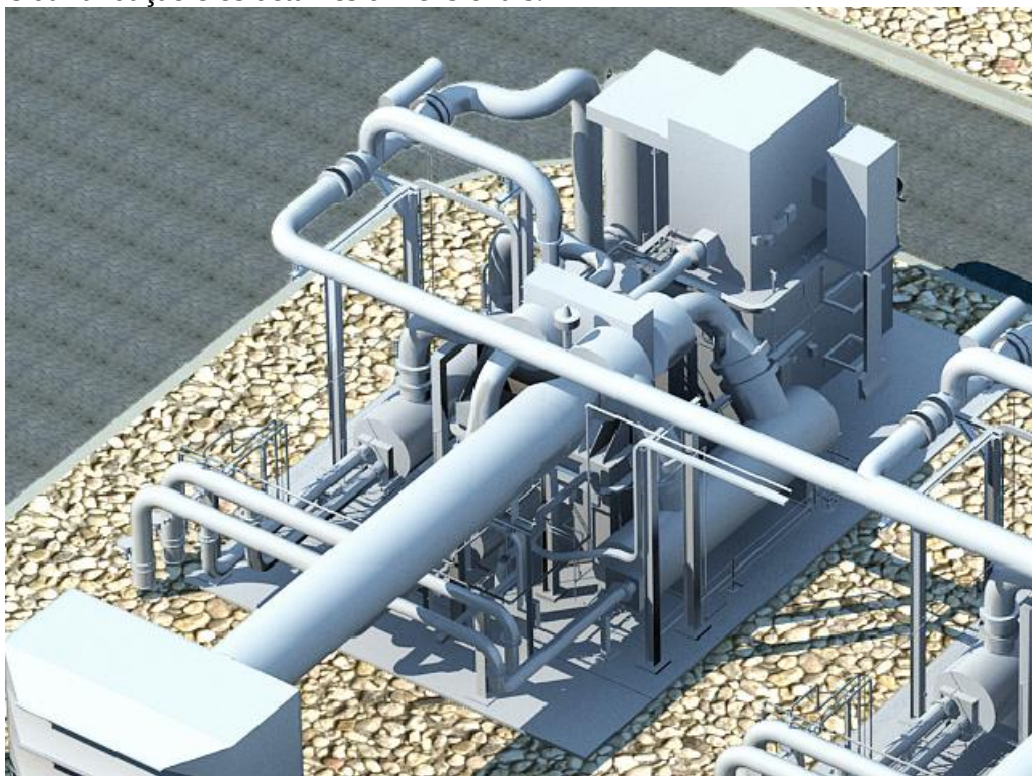


Figura 1. Isométrica do conjunto fundação-equipamento

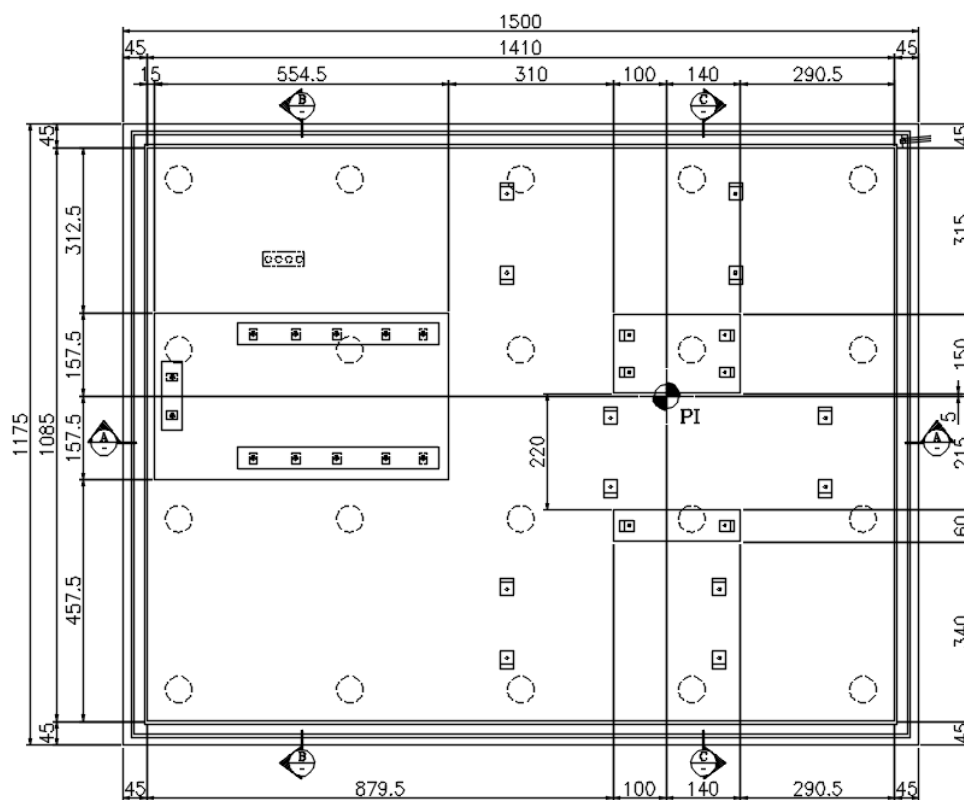


Figura 2. Modelo estrutural: planta da fundação

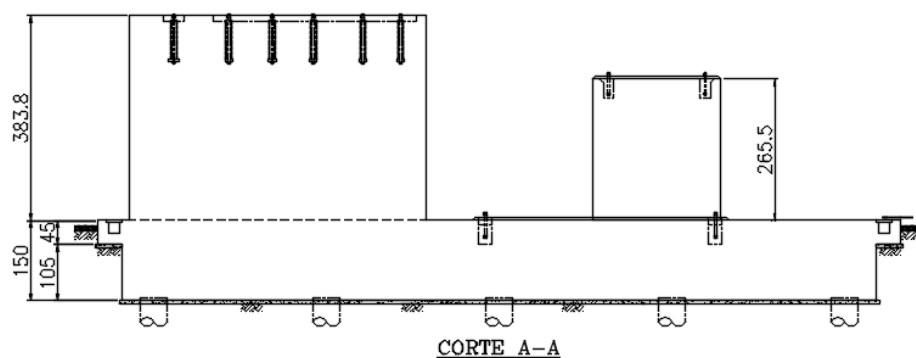


Figura 3. Modelo estrutural: elevação da fundação (Corte A-A)

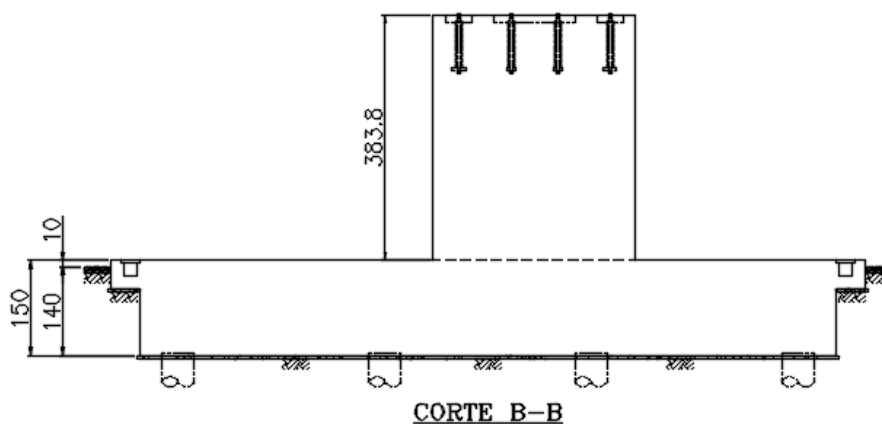


Figura 4. Modelo estrutural: elevação da fundação (Corte B-B)

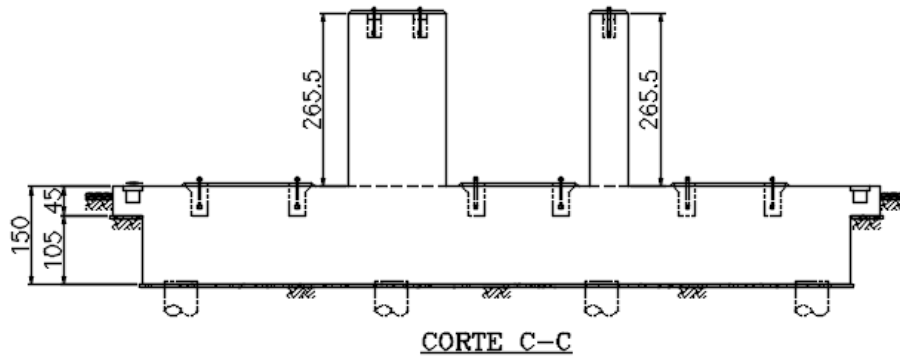


Figura 5. Modelo estrutural: elevação da fundação (Corte C-C)

3. MODELAGEM EM ELEMENTOS FINITOS

A modelagem por elementos finitos foi desenvolvida através do software ANSYS, utilizando elementos sólidos tridimensionais hexaédricos de 8 nós, com 3 graus de liberdade por nó, cada um associado aos deslocamentos translacionais relativos aos três eixos cartesianos. As estacas foram modeladas a partir de elementos de molas lineares com os coeficientes de rigidez relativos aos deslocamentos translacionais (X,Y,Z) referentes à rigidez associada das estacas e do solo. A estrutura em questão resultou em um modelo com 8876 nós e 6590 elementos, em um total de 26588 graus de liberdade. As Figuras 6 e 7 apresentam o modelo em elementos finitos desenvolvido neste estudo.

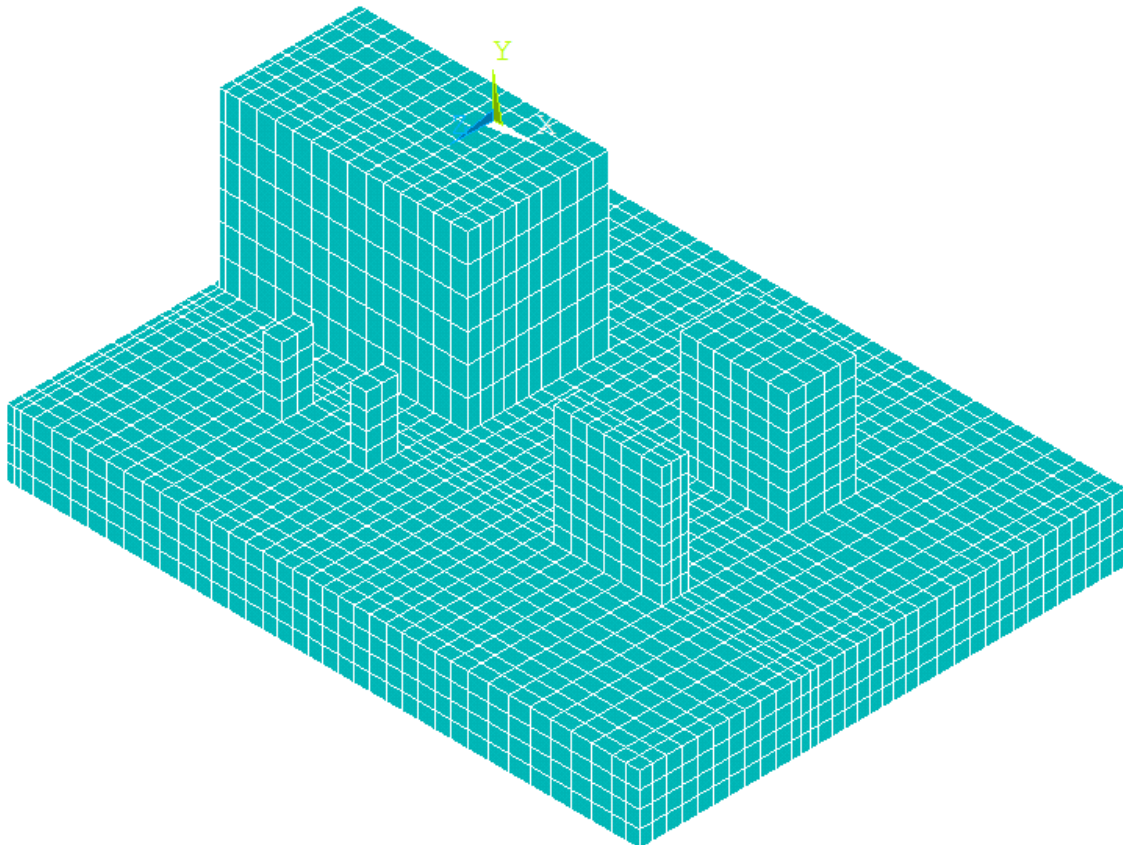


Figura 6. Modelo estrutural no ANSYS

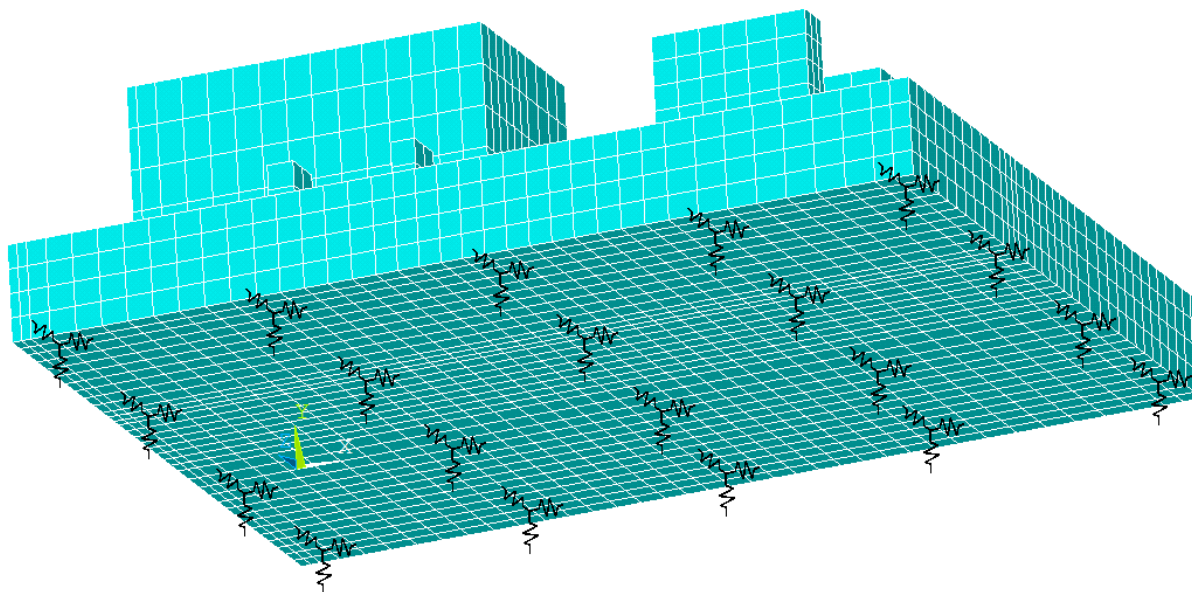


Figura 7. Modelo estrutural no ANSYS – Vista das molas representativas

4. FREQUÊNCIAS NATURAIS E MODOS DE VIBRAÇÃO

A análise modal consiste em resolver o problema de autovalores e autovetores associados à condição de vibração livre da estrutura. Para tal problema, foram extraídos os primeiros 10 modos de vibração da estrutura. A Tabela 1 apresenta as frequências naturais associadas aos modos de vibração:

Tabela 1. Modos e frequências naturais da estrutura

Modo	Frequência Natural Associada (Hz)
1	3,46
2	3,55
3	4,35
4	15,49
5	18,09
6	19,49
7	26,13
8	28,90
9	37,67
10	44,46

Em seguida, as Figuras 8 a 13 apresentam os seis primeiros modos de vibração, e bem como os efeitos físicos associados a cada modo.

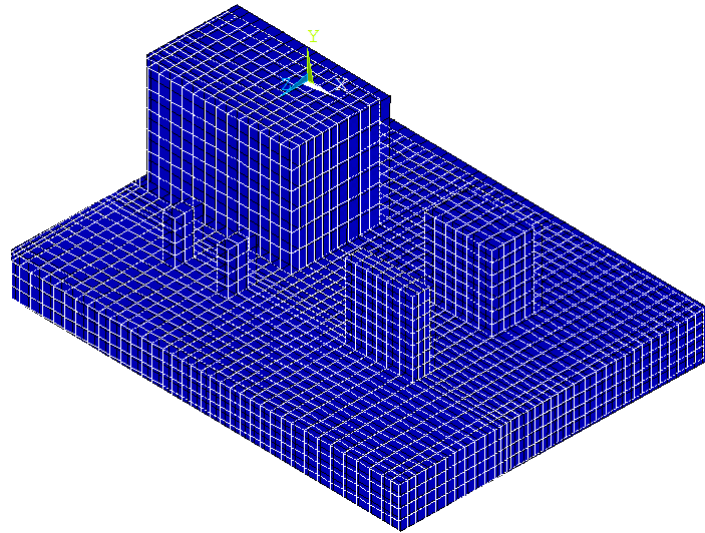


Figura 8. Primeiro modo de vibração – Translação em Z (3,46 Hz)

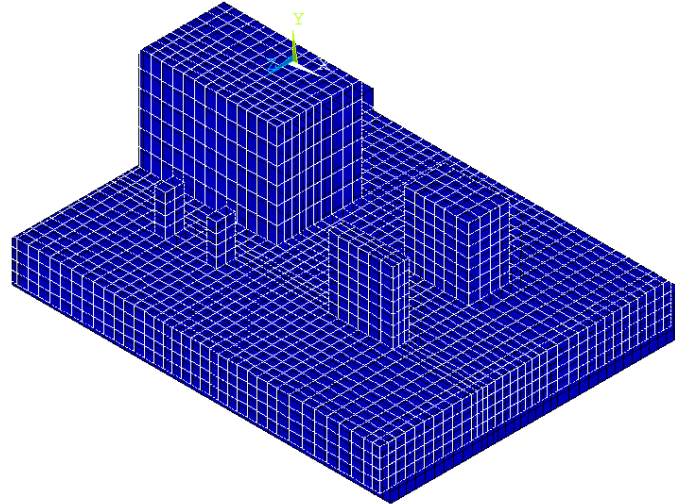


Figura 9. Segundo modo de vibração – Translação em X (3,55 Hz)

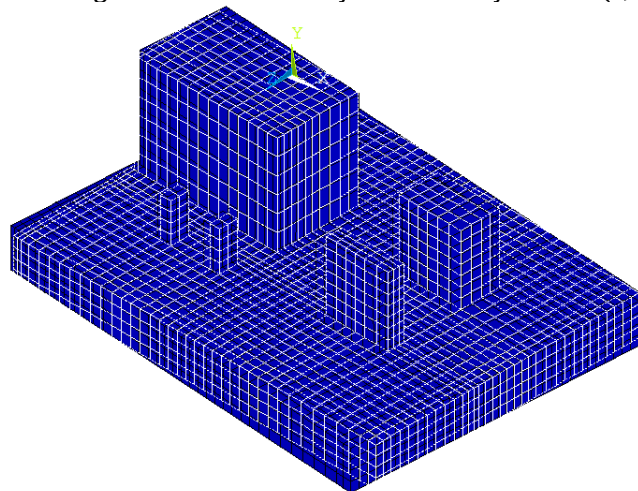


Figura 10. Terceiro modo de vibração – Rotação em Y (4,35 Hz)

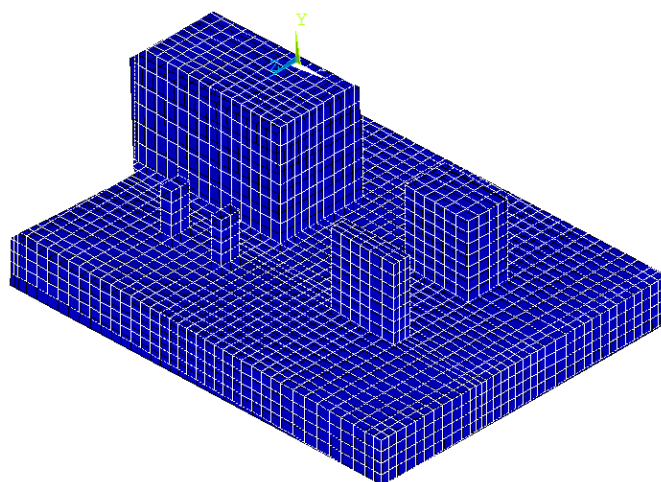


Figura 11. Quarto modo de vibração – Flexão no plano XZ em torno de Z (15,49Hz)

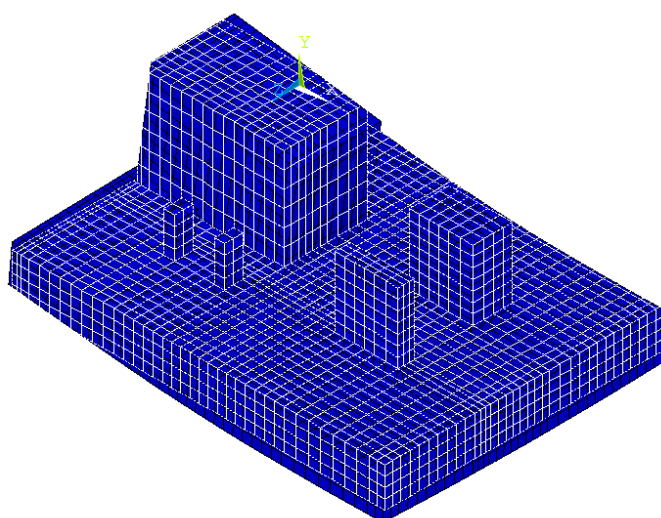


Figura 12. Quinto modo de vibração – Flexão no plano XZ em torno de Z (18,09 Hz)

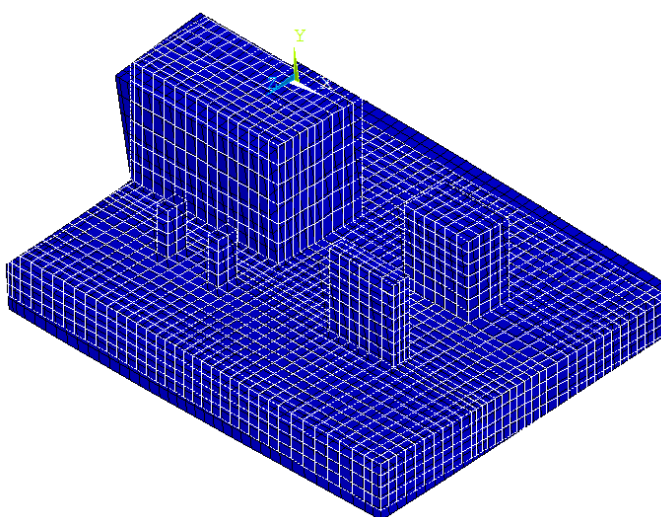


Figura 13. Sexto modo de vibração – Flexão no plano XZ em torno de X (19,49 Hz)

5. ANÁLISE DE VIBRAÇÃO FORÇADA

A estrutura em questão suporta um conjunto motor-compressor que opera com carregamentos cíclicos bem definidos, de modo que a análise dinâmica foi desenvolvida com base em um carregamento determinístico senoidal, simulando a condição de desbalanceamento rotativo proveniente de tais máquinas. A Tabela 2 apresenta dados dos equipamentos, a partir dos quais foi possível estabelecer a amplitude da força senoidal, bem como a sua frequência de operação.

Tabela 2. Dados do carregamento dos equipamentos.

Equipamento	Frequência de Operação	Amplitude da Força
Motor	188,49 rad/s (30 Hz)	8,5 kN
Compressor	188,49 rad/s (30 Hz)	6,3 kN

É válido ressaltar que o carregamento senoidal proveniente do desbalanceamento rotativo dos equipamentos, atua em todas as direções no plano YZ, com componentes nas direções Y e Z, de tal forma que quando o carregamento atinge sua máxima amplitude na direção Z, seu valor é nulo na direção Y e vice-versa. Dessa forma, existem dois carregamentos senoidais defasados de 90°. Logo, o desbalanceamento rotativo induz carregamentos em todas as direções no plano YZ, dado pela soma vetorial das componentes Y e Z em cada instante de tempo. As Figuras 14 e 15 apresentam gráficos que ilustram o comportamento das componentes Y e Z de tais carregamentos ao longo do tempo.

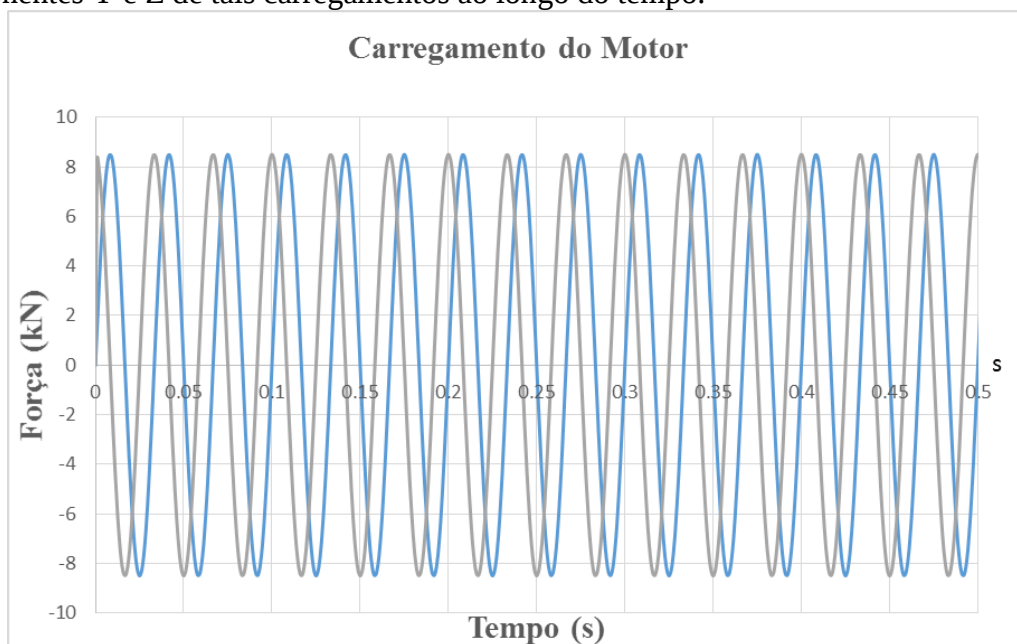


Figura 14. Gráfico do comportamento das componentes Y e Z do carregamento do motor

Dessa forma, o carregamento dinâmico de cada equipamento foi modelado pelo carregamento senoidal com suas respectivas amplitudes e inseridos nos nós referentes aos chumbadores dos equipamentos, representados pelos nós nomeados de A a J para o motor e K a O para o compressor (Figura 16).

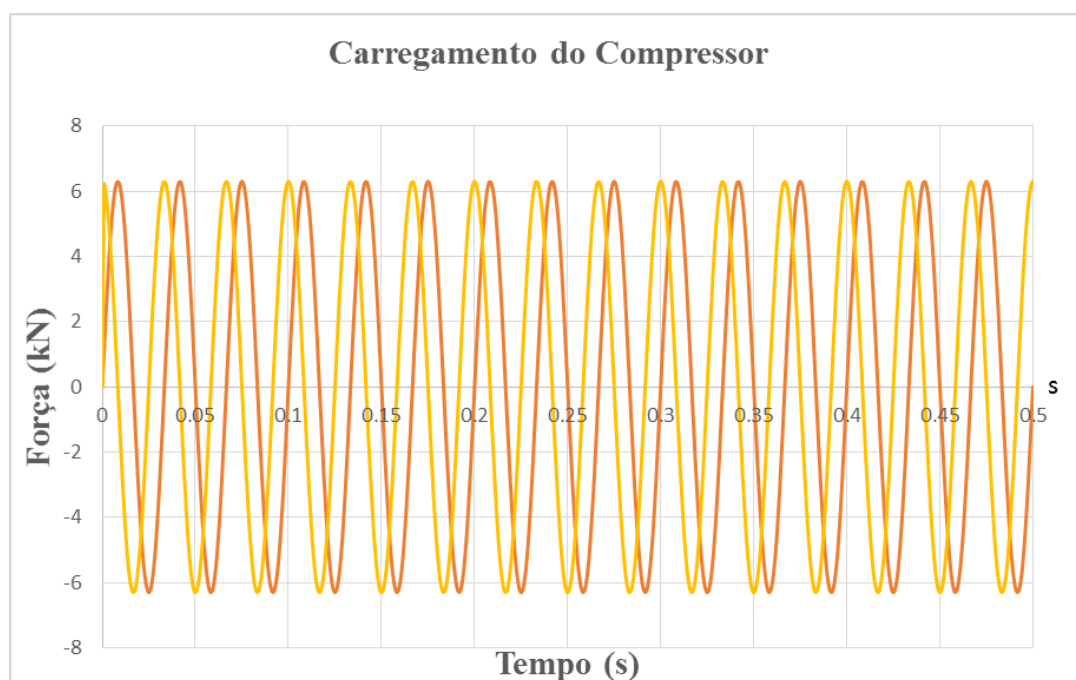


Figura 15. Gráfico do comportamento das componentes Y e Z do carregamento do motor

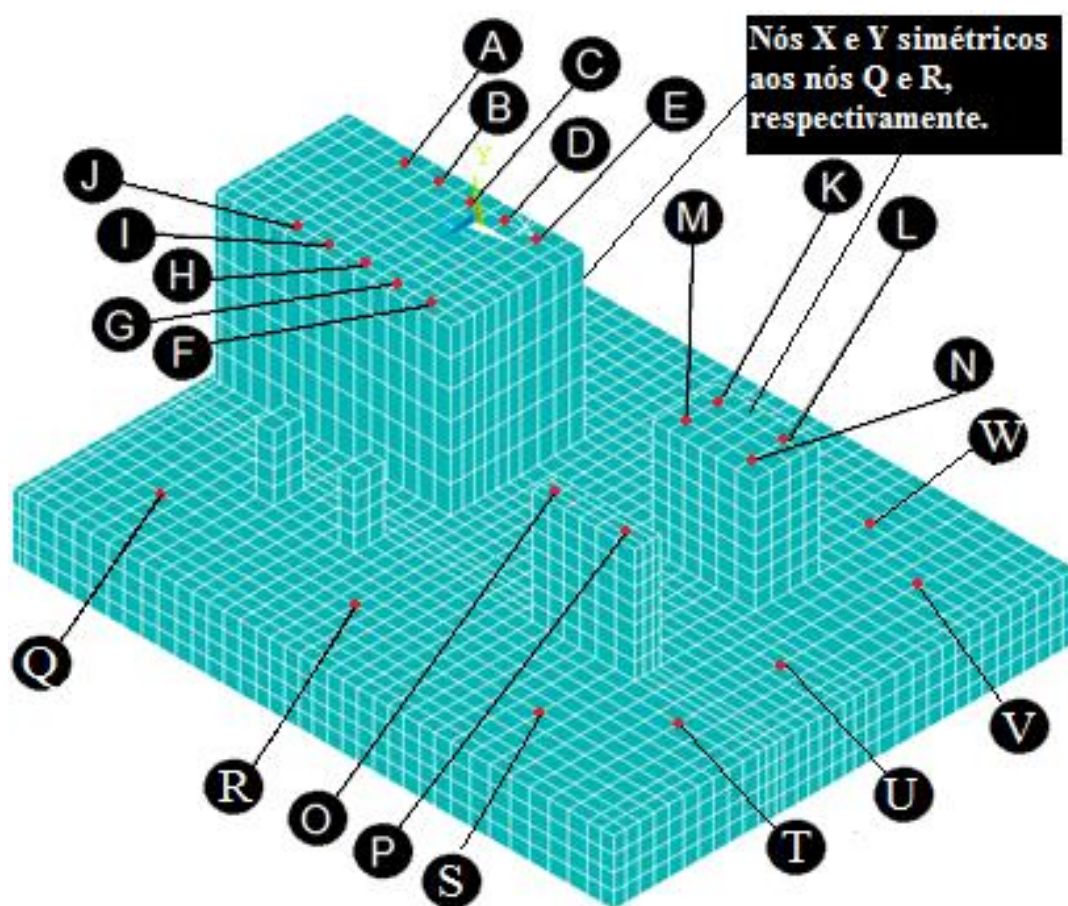


Figura 16. Gráfico do comportamento das componentes Y e Z do carregamento do motor

A Tabela 3 apresenta os valores máximos dos deslocamentos e velocidades que ocorrem nos nós analisados, resultante dos carregamentos inseridos em tais nós.

Tabela 3. Deslocamentos e Velocidades Máximos

Nó	Deslocamento Máximo (μm)	Velocidade Máxima (mm/s)
A	3,81	0,48
B	3,53	0,48
C	3,35	0,48
D	3,42	0,47
E	3,56	0,51
F	3,91	0,51
G	3,80	0,51
H	3,71	0,51
I	3,77	0,60
J	4,00	0,65
K	4,42	0,69
L	5,10	0,99
M	3,60	0,75
N	4,38	0,89
O	3,82	0,66
P	4,06	0,78

Para tais valores, dá-se o devido destaque ao nó L, representativo de um dos chumbadores do compressor, o qual apresenta as maiores amplitudes em termos de deslocamento (5,10 μm) e velocidade (0,99 mm/s). É válido ressaltar que todos os valores apresentados pela Tabela 10 são absolutos, de forma a considerar os máximos deslocamentos e velocidades absolutas, sem levar em conta o sentido (positivo ou negativo) em relação ao eixo Y.

Quanto às acelerações, foram analisados nove pontos da fundação, escolhidos em uma região da estrutura na qual existe uma área de trânsito de pessoal, a fim de se avaliar a condição de conforto humano e segurança do pessoal que trabalha no local. A Figura 16 apresenta os pontos analisados, nos nós nomeados de Q à Y. A Tabela 4 apresenta os valores máximos absolutos (sem referência ao sentido em que ocorrem) para tais acelerações. Verificando-se os resultados apresentados na Tabela 4, é possível verificar que os nós S, V e W apresentam os maiores valores para as acelerações, da ordem de 0.30 m/s^2 .

Tabela 4. Acelerações máximas

Nó	Aceleração Máxima (m/s^2)
Q	0,21
R	0,24
S	0,32
T	0,24
U	0,15
V	0,34
W	0,36
X	0,14
Y	0,15

6. OTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL VIA ALGORITMO GENÉTICO

A aplicação do algoritmo genético ao problema teve como objetivo a redução do volume total da estrutura, buscando uma nova configuração do projeto, de modo a atender aos requisitos recomendados por normas. Tais requisitos foram definidos com base em normas para a verificação da estrutura, em seus aspectos de concepção geométrica e frequências naturais, normas para verificação dos equipamentos, de modo a atender as recomendações de segurança de operação das máquinas, e normas para verificação de segurança das pessoas e conforto humano. A Figura 17 apresenta, esquematicamente, as variáveis de projeto. Tais variáveis foram definidas como a altura do bloco de coroamento das estacas e as duas alturas das bases nas quais os equipamentos se apoiam.

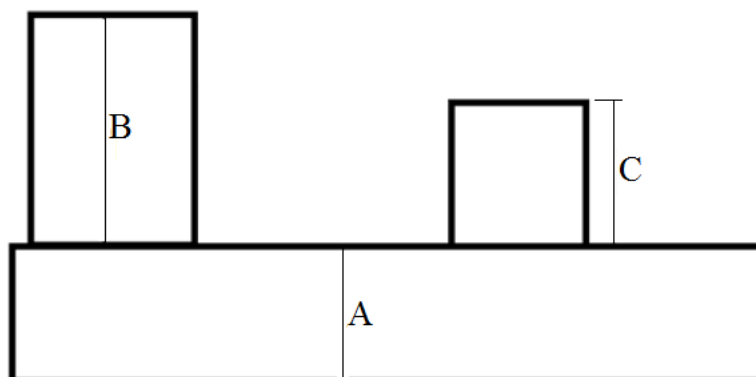


Figura 17. Detalhe esquemático das variáveis de projeto.

As restrições de projeto foram estabelecidas com base nos deslocamentos, velocidades, acelerações e frequências naturais a partir dos limites estabelecidos pelas normas ISO 2372, DIN 4024-1/2, ISO 2631, ACI-351, Norma Petrobrás N-1848. A Tabela 5 apresenta os limites máximos para os deslocamentos, velocidades e acelerações obtidas nos pontos específicos da estrutura:

Tabela 5. Limites máximos	
Restrição	Valor Limite
Deslocamentos (μm)	20,00 (Máximo)
Velocidades (mm/s)	2,80 (Máximo)
Acelerações (m/s^2)	1,00 (Máximo)
$\left\ \frac{f_f - f_{ni}}{f_f} \right\ $	10% (Mínimo)

Para as frequências naturais, foi utilizada como restrição uma diferença mínima de 10% entre as frequências naturais mais elevadas calculadas em relação à frequência de operação de 30Hz. Foram utilizadas apenas as seis primeiras frequências naturais da estrutura, para fins de restrição de projeto.

Foram desenvolvidas duas análises de otimização, utilizando o algoritmo genético com 20 gerações de 90 indivíduos em cada. As duas análises realizadas diferem entre si em relação às taxas de *crossover* e de mutação utilizadas. Para a primeira análise, foram utilizadas como taxa de *crossover* o valor fixo em 70% e para a taxa de mutação em 10%. Já na segunda análise, tais taxas apresentaram valores variando ao longo das gerações, tendo a taxa de *crossover* iniciado em 70% e reduzindo até 50% e a de mutação iniciando em 10% e aumentando até chegar em 30%.

7. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

O projeto da estrutura, com sua configuração inicial, possui um volume de 310,70 m³. Após a aplicação do algoritmo genético ao problema em questão, na primeira análise, chegou-se a uma configuração com volume final de 157,00 m³, de tal forma que houve uma redução de, aproximadamente, 49,40% do volume original da estrutura. Para a segunda análise, houve uma redução de 49,30% da estrutura, resultando em um volume total de 157,30 m³. A Tabela 6 apresenta as novas dimensões propostas, em comparação com as dimensões originais.

Tabela 6. Novas dimensões propostas pelas análises de otimização

Dimensão	Original	Otimizada (1ª Análise)	Diferença	Otimizada (2ª Análise)	Diferença
A	1,500 m	0,70 m	53,33%	0,70 m	53,33%
B	3,838 m	2,25 m	41,38%	2,31 m	39,81%
C	2,655 m	1,95 m	26,55%	1,79 m	32,58%

Quanto às frequências naturais das configurações de projeto propostas pelas duas análises de otimização, as Tabelas 7 e 8 apresentam os valores referentes aos seis primeiros modos de vibração, em comparação com os valores originais de projeto e também com a restrição de uma diferença mínima de 10% em relação à frequência de operação dos equipamentos, no valor de 30 Hz.

Tabela 7. Frequências naturais da nova configuração proposta pela primeira análise

f_n	Otimizada (Hz)	Original (Hz)	Diferença	Restrição (% 30 Hz)
1	4,84	3,46	39,9%	-0,74
2	5,00	3,55	40,8%	-0,73
3	6,23	4,35	43,2%	-0,69
4	19,36	15,49	25,0%	-0,25
5	22,40	18,09	23,8%	-0,15
6	26,83	19,49	37,7%	-0,01

Tabela 8. Frequências naturais da nova configuração proposta pela segunda análise

f_n	Otimizada (Hz)	Original (Hz)	Diferença	Restrição (% 30 Hz)
1	4,84	3,46	39,9%	-0,74
2	5,00	3,55	40,8%	-0,73
3	6,25	4,35	43,6%	-0,69
4	19,23	15,49	24,2%	-0,26
5	22,38	18,09	23,7%	-0,15
6	26,68	19,49	36,9%	-0,01

Para as velocidades e deslocamentos máximos absolutos obtidos pela análise dinâmica das novas configurações de projeto propostas pelas análises de otimização, as Tabelas de 9 à 12 apresentam os valores, em comparação com à configuração original da estrutura e seus limites máximos (recomendados por normas) utilizados como restrições de projeto.

Tabela 9. Deslocamentos máximos na configuração proposta pela primeira análise.

Nó	Otimizada (μm)	Original (μm)	Diferença	Restrição (Máximo 20 μm)
A	15,46	3,81	306%	-4,54
B	14,11	3,53	300%	-5,89
C	12,79	3,35	282%	-7,21
D	13,25	3,42	287%	-6,76
E	14,40	3,56	304%	-5,60
F	11,87	3,91	204%	-8,13
G	12,36	3,80	225%	-7,64
H	12,87	3,71	247%	-7,13
I	13,38	3,77	255%	-6,62
J	14,56	4,00	264%	-5,44
K	10,63	4,42	140%	-9,37
L	15,74	5,10	209%	-4,26
M	9,84	3,60	173%	-10,16
N	14,65	4,38	234%	-5,35
O	11,12	3,82	191%	-8,88
P	13,85	4,06	241%	-6,15

Tabela 10. Deslocamentos máximos na configuração proposta pela segunda análise

Nó	Otimizada (μm)	Original (μm)	Diferença	Restrição (Máximo 20 μm)
A	14,10	3,81	270%	-5,90
B	12,43	3,53	252%	-7,57
C	11,89	3,35	255%	-8,11
D	12,90	3,42	277%	-7,10
E	14,29	3,56	301%	-5,71
F	11,18	3,91	186%	-8,82
G	11,53	3,80	203%	-8,47
H	11,89	3,71	220%	-8,11
I	12,23	3,77	224%	-7,77
J	13,73	4,00	243%	-6,27
K	10,63	4,42	141%	-9,37
L	16,52	5,10	224%	-3,48
M	10,99	3,60	205%	-9,01
N	16,61	4,38	279%	-3,39
O	11,72	3,82	207%	-8,28
P	14,84	4,06	265%	-5,16

Tabela 11. Velocidades máximas na configuração proposta pela primeira análise.

Nó	Otimizada (mm/s)	Original (mm/s)	Diferença	Restrição (Máximo 2.8 mm/s)
A	2,56	0,48	433%	-0,24
B	2,27	0,48	374%	-0,53
C	2,14	0,48	347%	-0,66
D	2,18	0,47	363%	-0,62
E	2,40	0,51	370%	-0,40
F	2,08	0,51	308%	-0,72
G	2,10	0,51	311%	-0,70
H	2,13	0,51	317%	-0,67
I	2,15	0,60	259%	-0,65
J	2,34	0,65	260%	-0,46
K	1,85	0,69	169%	-0,95
L	2,79	0,99	182%	-0,01
M	1,61	0,75	115%	-1,19
N	2,49	0,89	180%	-0,31
O	2,05	0,66	210%	-0,75
P	2,59	0,78	232%	-0,21

Tabela 12. Velocidades máximas na configuração proposta pela segunda análise.

Nó	Otimizada (mm/s)	Original (mm/s)	Diferença	Restrição (Máximo 2.8 mm/s)
A	2,21	0,48	361%	-0,59
B	2,00	0,48	316%	-0,80
C	1,95	0,48	306%	-0,85
D	2,12	0,47	351%	-0,68
E	2,39	0,51	368%	-0,41
F	1,91	0,51	274%	-0,89
G	1,94	0,51	280%	-0,86
H	1,97	0,51	287%	-0,83
I	2,01	0,60	234%	-0,79
J	2,13	0,65	228%	-0,67
K	1,77	0,69	157%	-1,03
L	2,79	0,99	182%	-0,01
M	1,83	0,75	144%	-0,97
N	2,77	0,89	211%	-0,03
O	1,90	0,66	188%	-0,90
P	2,77	0,78	255%	-0,03

No que diz respeito às acelerações máximas absolutas, calculadas pela análise dinâmica das configurações de projeto propostas pelas análises de otimização, as Tabelas 13 e 14 apresentam tais valores em comparação com a configuração original de projeto e pelo limite estabelecido por norma como restrição de conforto humano.

Tabela 13. Acelerações máximas na configuração proposta pela primeira análise

Nó	Otimizada (m/s ²)	Original (m/s ²)	Diferença	Restrição (1,0 m/s ²)
Q	0,74	0,21	254%	-0,26
R	0,62	0,24	157%	-0,38
S	0,55	0,32	72%	-0,45
T	0,60	0,24	150%	-0,40
U	0,59	0,15	291%	-0,41
V	0,68	0,34	101%	-0,32
W	0,55	0,36	52%	-0,45
X	0,56	0,14	297%	-0,44
Y	0,71	0,15	373%	-0,29

Tabela 14. Acelerações máximas na configuração proposta pela segunda análise

Nó	Otimizada (m/s ²)	Original (m/s ²)	Diferença	Restrição (1,0 m/s ²)
Q	0,67	0,21	217%	-0,33
R	0,58	0,24	143%	-0,42
S	0,50	0,32	57%	-0,50
T	0,61	0,24	156%	-0,39
U	0,63	0,15	323%	-0,37
V	0,68	0,34	99%	-0,32
W	0,52	0,36	45%	-0,48
X	0,59	0,14	325%	-0,41
Y	0,64	0,15	326%	-0,36

As Tabelas 9,10,13 e 14 apresentam as restrições em deslocamentos e acelerações e verifica-se que tais valores encontram-se, ainda, abaixo dos valores estabelecidos por normas, com uma certa diferença considerável, para as configurações de projeto propostas pelas duas análises de otimização. Já para as velocidades máximas absolutas obtidas para a configuração de projeto proposta pela primeira análise de otimização (Tabela 11), é possível constatar que a velocidade do nó L aproximou-se bastante do limite estabelecido pela norma, de 2,8 mm/s. A Tabela 12 apresenta os valores para as velocidades máximas absolutas obtidas para configuração de projeto proposta pela segunda análise de otimização e, para os nós L, N e P, tais velocidades atingiram valores bem próximos aos limites permitidos pelas restrições normativas.

Em relação às restrições em frequências naturais, verifica-se que para os valores referentes aos primeiros seis modos de vibração, todas atendem à diferença mínima de 10%, em relação à frequência de operação dos equipamentos, no valor de 30 Hz. As Figuras 18 e 19 apresentam a evolução do algoritmo genético ao longo das gerações, com o valor da função objetivo para o melhor indivíduo e o valor médio da função objetivo para os indivíduos a cada geração.

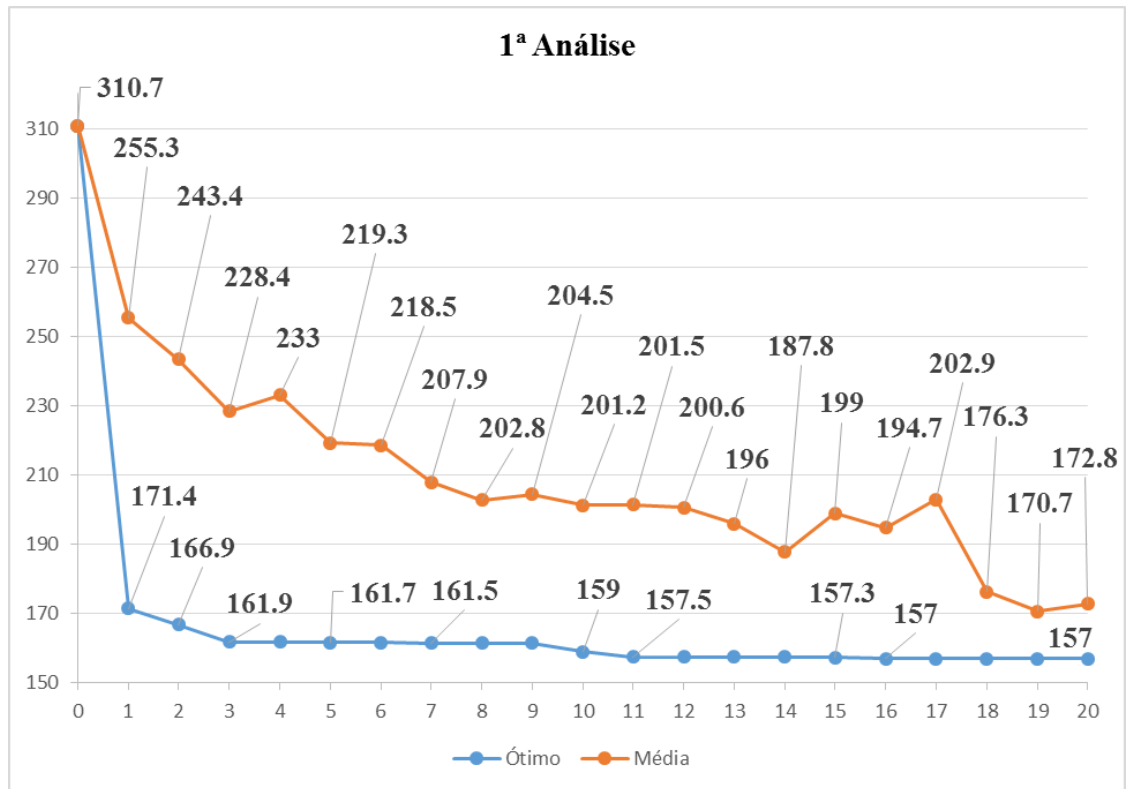


Figura 18. Gráfico da evolução do algoritmo genético da primeira análise

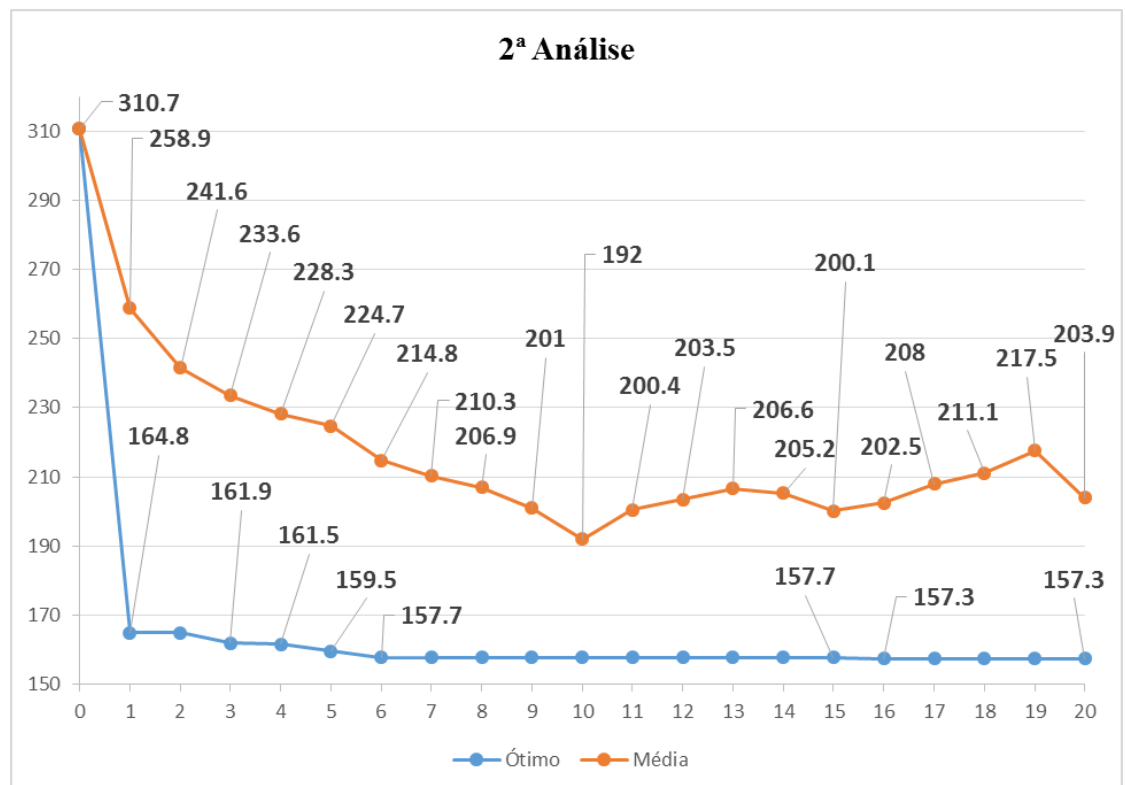


Figura 19. Gráfico da evolução do algoritmo genético da segunda análise

8. CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho foi desenvolver um modelo de otimização estrutural de uma fundação projetada para suportar um conjunto motor-compressor de alta capacidade, aliado à análise dinâmica da estrutura, a fim de prever os comportamentos e restringir, no problema de otimização, os deslocamentos, velocidades, acelerações e frequências naturais da estrutura. Para isso, foi aplicado ao problema um algoritmo genético, utilizando-se a interface MATLAB-ANSYS, a fim de se obter a melhor redução possível do volume estrutural da fundação, sem comprometer o funcionamento dos equipamentos, a segurança das pessoas e as recomendações geométricas de projeto.

Foram realizadas duas análises de otimização, as quais diferem entre si apenas nos parâmetros utilizados para a taxa de crossover e a probabilidade de mutação. A primeira análise foi realizada com a taxa de crossover fixa em 70% e a probabilidade de mutação em 10%. Já a segunda análise foi realizada com uma variação desses parâmetros ao longo das gerações, de tal forma que a taxa de crossover iniciou em 70%, reduzindo até 50% e a probabilidade de mutação começou em 10%, aumentando até chegar em 30% na última geração.

A partir das duas análises de otimização realizadas, constatou-se que a redução percentual do volume original da estrutura permaneceu em torno de 49,4%, reduzindo de 310,7 m³ para 157 m³ na primeira análise e 157,3 m³ para a segunda análise. Considerando-se um custo médio de R\$ 250,00 por metro cúbico de concreto, verifica-se uma possibilidade de economia em torno de R\$ 38000,00 por fundação e, de R\$ 76000,00 para as duas fundações existentes.

Quanto às restrições, os limites de acelerações e deslocamentos máximos definidos por normas foram respeitados, com uma certa diferença considerável. Quanto aos limites de velocidade máximas impostas à estrutura em suas duas novas configurações de projeto, foram observados valores bem próximos aos estabelecidos por normas, de forma que esta foi uma das restrições que limitou a otimização estrutural.

No que tange às restrições em frequências naturais, foram consideradas para fins de restrição de projeto, as 6 primeiras frequências naturais do sistema, conforme preconizado pela Norma DIN-4024-1/2. Os valores calculados para tais modos de vibração nas duas configurações de projeto propostas pelas análises de otimização conseguiram atender à diferença mínima de 10% da frequência de operação dos equipamentos, conforme recomendação normativa.

Em termos de comparação entre as duas análises de otimização realizadas, não foram observadas vantagens em se utilizar taxas de *crossover* e probabilidades de mutação variáveis ao longo das gerações. Comparando-se os gráficos das Figuras 18 e 19, foi possível observar que na primeira análise, o valor da média da função objetivo para os indivíduos ao longo das gerações apresenta uma tendência a se aproximar do valor ótimo, ou seja, a população encontra-se cada vez mais apta e os indivíduos cada vez com características mais parecidas. Já para a segunda análise, a partir da 10^a geração verifica-se que a média para a função objetivo dos indivíduos apresenta-se instável, aumentando até 13^a geração, depois reduzindo até 15^a, aumentando novamente até a 19^a e reduzindo mais uma vez na 20^a. Tal instabilidade justifica-se pelo aumento da mutação, aumentando a diversificação da população que compõe a geração futura.

Quanto à evolução do algoritmo genético, percebeu-se que, para as duas análises realizadas, a busca pelo indivíduo mais apto ocorreu de forma parecida, tendo já na primeira geração encontrado um indivíduo que atendesse ao projeto de uma forma bem mais econômica que a configuração original e encontrando o indivíduo ótimo a partir da 16ª geração.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho de pesquisa agradecem ao suporte financeiro fornecido pelas Agências de Fomento à Pesquisa do país: CAPES, CNPq e FAPERJ.

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. “ACI 351 – Foundations for Dynamic Equipment.” Farmington Hills, Michigan, United States of America, 2004.

BORGES, C. C. H. “Algoritmos Genéticos para Otimização em Dinâmica de Estruturas”, COPPE/UFRJ, D.Sc, 1999.

DALBONE, A.R.; SÁNCHEZ FILHO, E. de S., 2011. “Análise Dinâmica de Fundações Diretas para Máquinas Rotativas.” Engenharia Estudo e Pesquisa. vol. 11, n. 2, pp. 36-46.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. “DIN 4024-1 – Machine Foundations – Rigid Foundations for Machinery Subjected to Periodic Vibration”, Berlin, German, 1988.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. “DIN 4024-2 – Machine Foundations – Rigid Foundations for Machinery Subjected to Periodic Vibration.” Berlin, German, 1991.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. “ISO 2372: Mechanical Vibration of Machines with Operating Speeds from 10 to 200 rev/s.” Basis for Specifying Evaluation Standards. 1974

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. ISO 2631-1: “Mechanical Vibration and Shock - Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration – Part 1: General Requirements.” 1997.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. ISO 2631-2: “Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration – Part 2: Human Exposure to Continuous and Shock-Induced Vibrations in Buildings (1 to 80Hz).” 2001.

LOPES, M. A. “Otimização estrutural de uma fundação de concreto armado submetida a solicitações dinâmicas provenientes de um conjunto motor-compressor de alta capacidade.” Dissertação de Mestrado (Em desenvolvimento). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PPGEM, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil, 2017.

MACHADO, F.G., “Estudo do Comportamento de Fundações Submetidas a Vibrações de Máquinas.” Dissertação de Mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2010.

NORMA REGULAMENTADORA. NR 15. anexo nº 8: Vibrações - Alterado pela Portaria SSMT n.º 12, Ministério do Trabalho, Brasil. 1983.

PETROBRAS – PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. – “N-1848 – REV. C – Projeto de Fundações de Máquinas.” Rio de Janeiro, Brasil, 2011.

RODRIGUES, D. M. C. ; SILVA, J. G. S. ; BURGOS, R. B. “Modelagem Numérica e Estudo da Resposta Dinâmica de Sistemas Estruturais para Fundações de Máquinas.” In: CILAMCE 2016

SOUZA COSTA, G.A., 2013. “Análise Vibratória de Fundações de Máquinas sobre Estacas.” Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PGE CIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.

ZINI, E. O. C. “Algoritmo Genético Especializado na Resolução de Problemas com Variáveis Contínuas e Altamente Restritos”, UNESP, M.Sc, 2009.