



# VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de  
maio de 2014  
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



## **Análise dinâmica de estrutura de base de bombas sobre reservatório**

**Filipe Neri de Souza<sup>1</sup>, Lineker Max Goulart Coelho<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Chemtech Serviços de Engenharia e Software LTDA / fneridesouza@yahoo.com.br

<sup>2</sup>Universidade Federal de Viçosa / Chemtech Serviços de Engenharia e Software LTDA /  
linekermax@yahoo.com.br

### **Resumo**

O dimensionamento de estruturas para fins industriais requer muitas vezes a realização de verificações pouco convencionais. No caso de equipamentos particularmente, se eles forem rotativos e/ou vibratórios as estruturas nos quais estão apoiados devem ser dimensionadas para suportar os esforços dinâmicos gerados durante o seu funcionamento. Além disso, deve ser verificado também se a frequência natural de vibração da estrutura diverge das frequências de operação dos equipamentos de modo a evitar o fenômeno de ressonância. Para bases de equipamentos que estão diretamente apoiados no solo tais verificações podem ser realizadas por métodos relativamente simples tendo em vista que normalmente trata-se de bases em formas básicas como cubos e paralelepípedos, permitindo considerá-lo como um sistema massa-mola simples. Entretanto, quando estes tipos de equipamentos estão suportados em estruturas com formas complexas ou mesmo em fundações tipo bloco sobre estacas a análise dos efeitos dinâmicos deve ser mais aprofundada. Neste contexto o presente trabalho tem por objetivo apresentar o procedimento utilizado e os resultados obtidos para a análise dinâmica de uma estrutura industrial de forma complexa: casa de bombas sobre um reservatório. Este estudo abrangerá os principais pontos relativos aos critérios e métodos utilizados para realização das verificações dinâmicas, o procedimento de modelagem computacional da estrutura e a análise dos resultados. O estudo revela os esforços dinâmicos aos quais a estrutura em questão está submetida e mostra também que ela não está sujeita a um aumento considerável de esforços internos devido aos deslocamentos excessivos que poderiam ser provocados pelo fenômeno de ressonância.

### **Palavras-chave**

Fundações; análise dinâmica; estruturas industriais; equipamentos rotativos.

### **Introdução**

O dimensionamento de estruturas industriais exige a consideração de situações e carregamentos pouco convencionais. Além de peso próprio, sobrecargas e demais carregamentos estáticos normalmente utilizados nos dimensionamentos de elementos estruturais deve-se também considerar os carregamentos dinâmicos provocados por equipamentos vibratórios e rotativos que requerem atenção especial, pois tais esforços podem provocar fenômenos como ressonância e fadiga, os quais podem levar a estrutura ao colapso.

Ressalta-se que as análises dinâmicas de estruturas por métodos computacionais compreendem basicamente duas etapas. A primeira delas trata-se da determinação dos modos



# VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014  
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



de vibração da estrutura cada qual sempre associado a uma frequência natural ( $f$ ). Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2007), para assegurar comportamento satisfatório das estruturas sujeitas a vibrações, a frequência natural da estrutura ( $f$ ) deve ser pelo menos 20% superior à frequência de cargas externas, a qual é denominada frequência crítica ( $f_{crit}$ ), que depende do uso da edificação e/ou das especificações dos equipamentos.

Além desta análise, avalia-se também a resposta da estrutura no tempo, ao ser submetida por uma vibração forçada. Neste caso avaliam-se as velocidades e acelerações dos nós devido à vibração provocada. A norma N-1848 (Petrobras, 2011) preconiza que estruturas sujeitas a esforços dinâmicos sejam avaliadas pela sua severidade de vibração a qual é obtida estabelecendo-se classes de máquinas vibratórias em função das características dos equipamentos e de faixas de severidade em função das velocidades de vibração.

## Objetivo

O presente trabalho tem por objetivo apresentar o procedimento utilizado e os resultados obtidos para a análise dinâmica de uma estrutura industrial de forma complexa: base de bombas sobre um reservatório.

## Material e Métodos

A estrutura analisada consiste em um reservatório de água construído em concreto armado sobre o qual está apoiado um conjunto moto-bomba. Ressalta-se que o reservatório possui fundações do tipo estacas. O motor encontra-se sobre a laje do reservatório e a bomba encontra-se a cerca de 3 m abaixo deste nível. Ressalta-se que as cargas da estrutura metálica da casa de bombas não foram contempladas nesta análise. A Figura 1 mostra um modelo 3D da geometria do reservatório. As tabelas 1 e 2 apresentam respectivamente os dados gerais do conjunto moto-bomba e do reservatório.

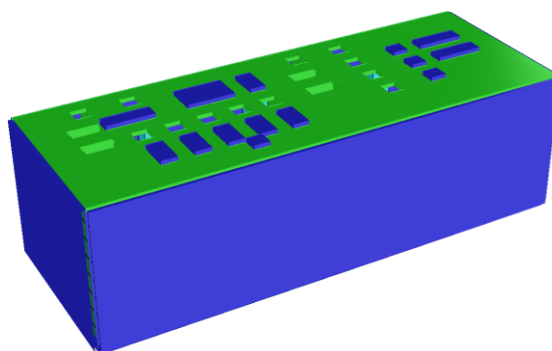
**Tabela 1 – Características do conjunto moto-bomba.**

Rotação (Hz)	29,50
Peso Bomba (kN)	26,00
Peso do Motor (kN)	23,00



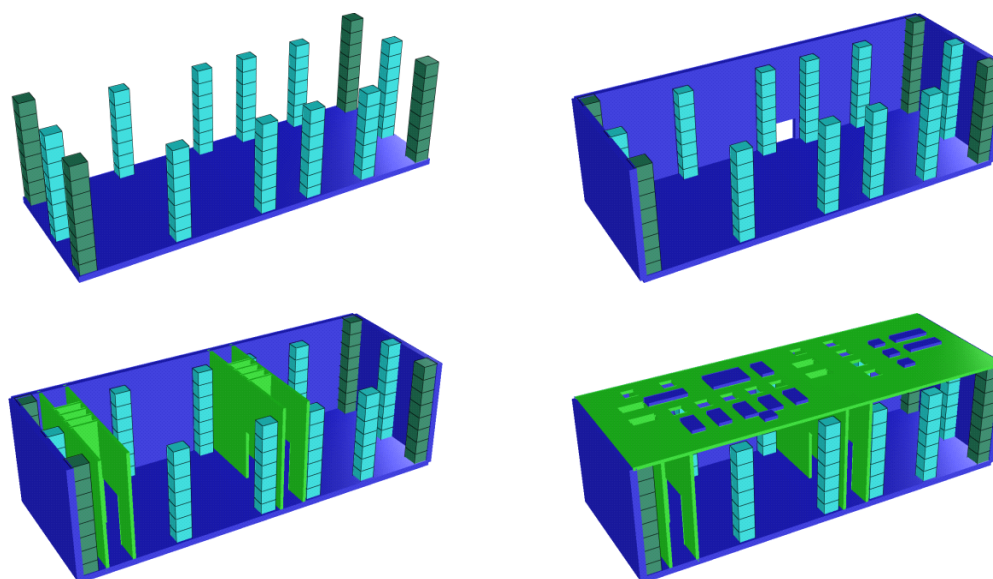
**Tabela 2 – Características da estrutura do reservatório.**

Resistência do concreto (MPa)	15
Largura (m)	8,80
Altura (m)	7,00
Comprimento (m)	24,00
Espessura das paredes (cm)	40,00
Espessura da laje de piso (cm)	40,00
Espessura da laje de cobertura (cm)	20,00
Dimensões dos pilares (cm x cm)	100,00 x 80,00

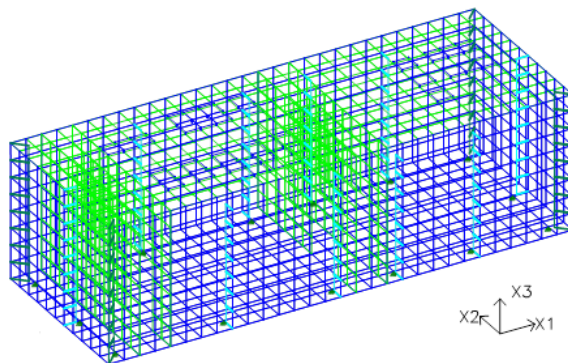


**Figura 1 – Modelo 3D do reservatório.**

A análise dinâmica foi realizada por meio de modelagem computacional pelo método dos elementos finitos utilizando o software Strap®. Detalhes do modelo de cálculo adotado são fornecidos em STRAP (2011). A Figura 2 apresenta detalhes gerais das estruturas que compõem o reservatório e a Figura 3 mostra a malha de elementos finitos utilizada para discretizá-lo.



**Figura 2 – Características geométricas gerais do reservatório.**



**Figura 3 – Malha de elementos finitos do modelo discretizado do reservatorio e eixos globais adotados.**

A análise dinâmica dividiu-se em duas etapas. Primeiramente fez-se uma análise modal de modo a se obter as frequências naturais principais, em termos de mobilização da massa da estrutura. Foram escolhidos os modos de vibração que eram responsáveis pelas maiores porcentagens de massa mobilizada, o número de modos selecionados corresponde à quantidade mínima que permitia obter um valor de 90% de massa mobilizada.

Em seguida fez uma análise de resposta no tempo submetendo à estrutura as cargas dinâmicas devido à bomba e ao motor. A resposta no tempo foi avaliada com base na norma N-1848 (Petrobras, 2011) a qual classifica a severidade de vibração da estrutura por meio de sua velocidade eficaz, cujo cálculo é realizado conforme a Equação 1.

$$V_{ef} = \sqrt{V_{X1}^2 + V_{X2}^2 + V_{X3}^2} \quad (1)$$

De acordo com a documentação do equipamento, o centro de gravidade (CG) de cada elemento do conjunto está localizado da seguinte forma:

- CG do Motor a 1580mm do nível da laje superior;
- CG da Bomba a 3000mm abaixo do nível da laje superior.

Barras fictícias foram inseridas com o intuito de apenas transferir os esforços dos CG's até a laje, conforme se observa na Figura 4. Foram analisados os quatro nós nos limites periféricos do *skid* conjunto motor-bomba, são eles: 8725, 8732, 8845 e 8852.

Por meio da Equação 2 determinaram-se as seguintes cargas de desbalanceamento:

- 3,5kN para a bomba;
- 4,0kN para o motor.



# VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014  
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



$$P_0 = m(R\omega)\omega \quad (2)$$

Onde:

$P_0$ : amplitude da carga dinâmica (kN);

$m$ : massa total em rotação (kg);

$\omega$ : frequência do equipamento (rad/s);

$R\omega$ : grau de qualidade do balanceamento do equipamento.  $R\omega = 0.0025m/s$ . (Petrobras, 2011)

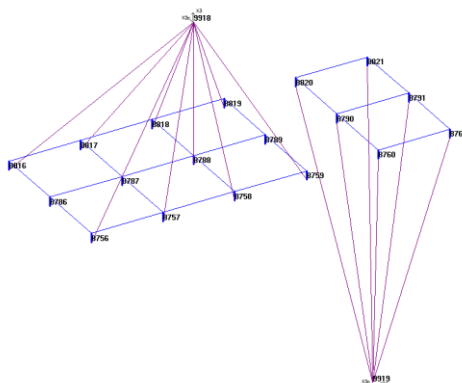


Figura 4 – Barras fictícias introduzidas no modelo para representar a distancia do rotor ao skid.

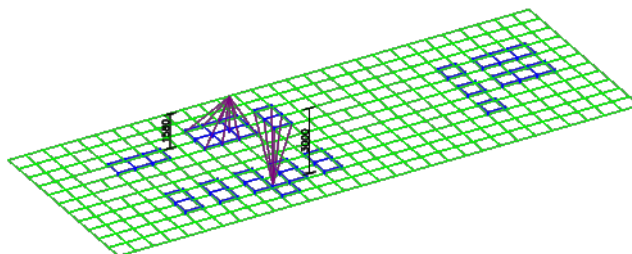


Figura 5 – Posição do conjunto moto bomba na laje do reservatório.

## Resultados

### Análise modal

Foram necessários 154 modos de vibração para se atingir um valor de 90% de massa mobilizada pela carga dinâmica. Cada modo de vibração possui uma frequência natural associada, e a Tabela 3 mostra aqueles com maior participação. A Tabela 3 apresenta também os modos com maior influência nas translações sobre os eixos principais.



# VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21,22 e 23 de maio de 2014  
RIO DE JANEIRO

Realização:



COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

**Tabela 3 – Modos de vibração com participação de massa maior do que 1%.**

Nºdo Modo	Período (s)	Mn/Mtot*	Fn** (kN)	Frequência Natural (Hz)	Translação Máx no Nó (mm)	Direção da translação máxima
4	0,0608	0,01	9,89	16,4344	8679	X3
5	0,0548	0,095	89,41	18,241	8799	X3
6	0,0534	0,172	159,54	18,7261	8769	X3
7	0,0521	0,055	50,74	19,2047	8666	X3
8	0,05	0,156	139,9	19,9861	8665	X3
9	0,0494	0,033	29,26	20,2229	7272	X3
10	0,0478	0,011	9,33	20,9263	8669	X3
12	0,0413	0,024	19,72	24,227	7284	X3
26	0,0293	0,011	7,97	34,0883	9578	X1
35	0,0259	0,017	11,61	38,5566	9778	X1
37	0,0252	0,049	33,11	39,7029	9660	X1
81	0,0164	0,024	14,29	60,8297	9919	X1
82	0,0162	0,019	11,5	61,582	9212	X2

**\*\*Fn = Somatório de forças externas em todas as direções globais.**

**\*Mn/Mtot: Relação entre as massas mobilizadas pelo modo de vibração e a massa total da estrutura.**

Além dos modais apresentados, notou-se que modo de vibração numero 21 apresenta uma frequência natural igual a 29,75 Hz, a qual se aproxima da frequência do conjunto moto-bomba (29,5 Hz). Entretanto, como este modo mobiliza uma pequena parcela da massa da estrutura (0,7%) seus efeitos foram desprezados. Além disso, conforme observado na Tabela 3 vários modos de vibração apresentam frequências naturais inferiores a 1,2 vezes a frequência de operação do equipamento rotativo (29.5 Hz) o que resulta no não atendimento das prescrições da NBR 6118 (ABNT, 2007), porém como o principal foco do estudo é a laje onde se apoiará a bomba, os modos de vibração translacionais encontram-se em uma faixa segura, logo, não há problema com ressonância.

As Figuras 6 a 8 apresentam o comportamento da estrutura para os modos de vibração de maior participação nas translações.



# VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014  
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:

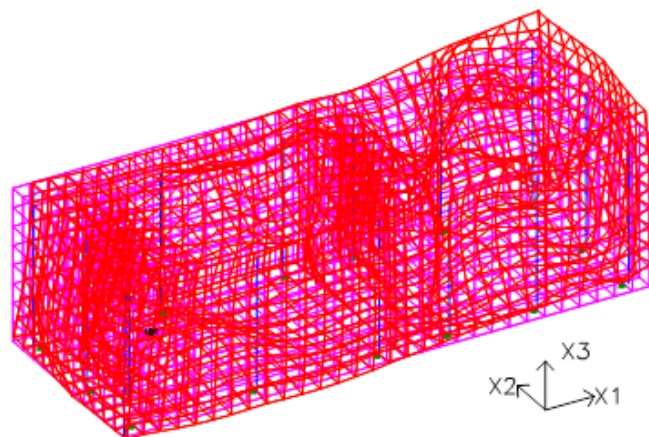


Figura 6 – Modo de vibração nº 37 – Translação em X1.

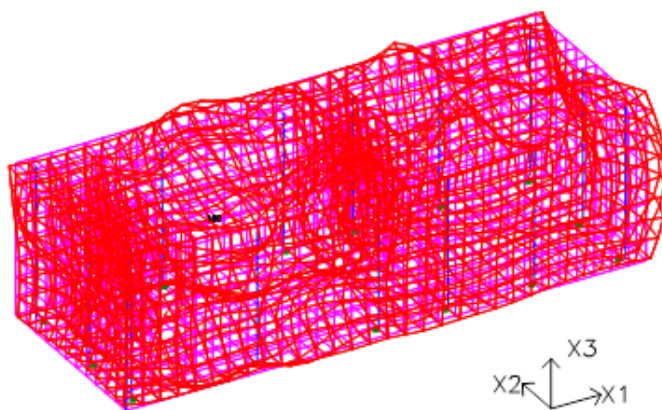


Figura 7 – Modo de vibração nº 82 – Translação em X2.

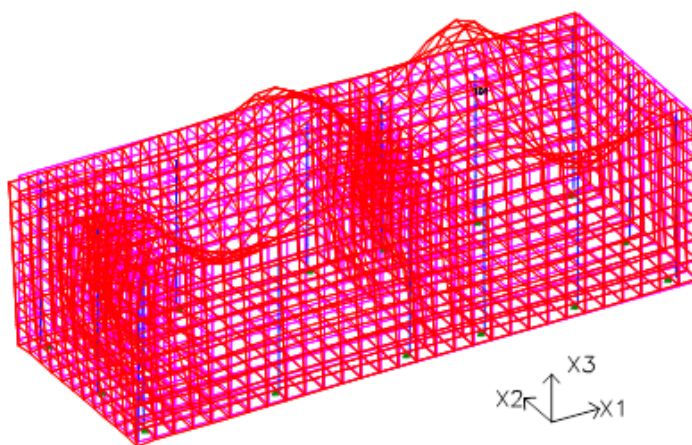


Figura 8 – Modo de vibração nº 6 – Translação em X3.



# VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014  
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



## Resposta no tempo

A Tabela 4 apresenta os valores das velocidades eficazes para cada nó. Além disso, as Figuras 9 a 11 mostram a resposta no tempo para o nó 8725 em cada direção.

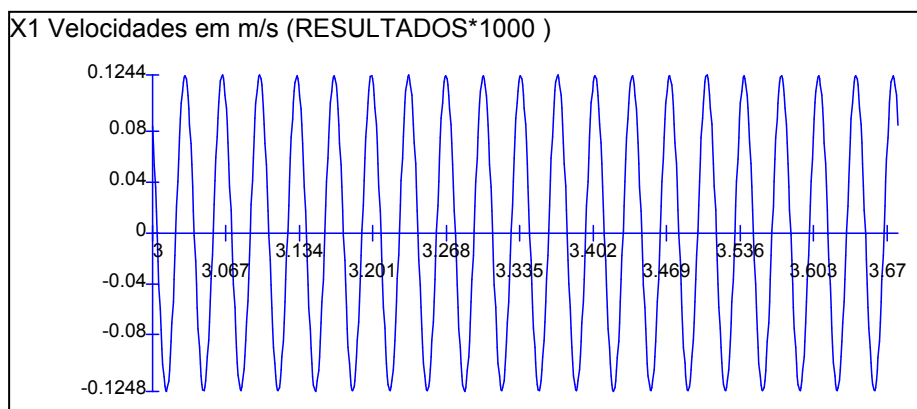


Figura 9 – Resposta no tempo do nó 8725 – Velocidade na Direção X1.

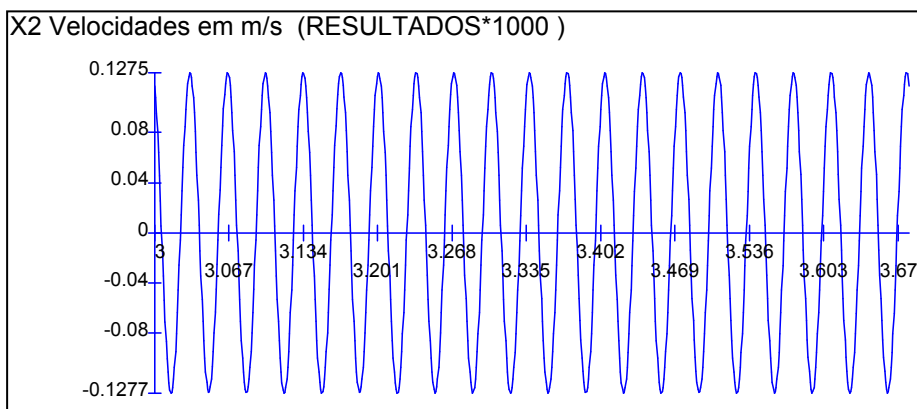


Figura 10 – Resposta no tempo do nó 8725 – Velocidade na Direção X2.

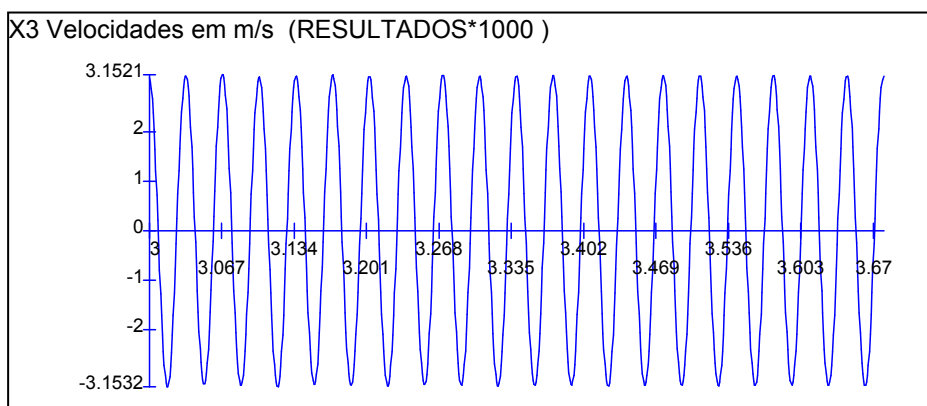


Figura 11 – Resposta no tempo do nó 8725 – Velocidade na Direção X3.





# VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de maio de 2014  
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



**Tabela 4 – Velocidades eficazes para os nós estudados.**

Nó	$V_{ef}$ [mm/s]
8725	3,15
8732	6,13
8845	1,56
8852	2,75

Segundo classificação da norma N-1848 (Petrobras, 2011) o equipamento em questão pertence à Classe IV: máquinas motrizes grandes e outras máquinas grandes com massas rotativas, montadas sobre fundações que são relativamente flexíveis na direção de medição de vibração.

Conforme o critério de classificação de Petrobras (2011) da severidade de vibração da estrutura por meio de sua velocidade eficaz, os resultados de resposta no tempo para os nós 8725, 8845 e 8852 indicam que estes se enquadram nas classes A e B que correspondem respectivamente a classe bom e satisfatório.

O nó 8732, por sua vez, foi enquadrado na classe C o que indica um resultado pouco satisfatório e deverá ser pesquisado com mais precisão no projeto de detalhamento com todos os carregamentos aplicados tais como peso das estruturas metálicas da cobertura da casa de bombas entre outros.

## Conclusões

Para o modo de vibração numero 21, que apresentou frequência natural próxima a do conjunto moto-bomba, apesar de possuir pequena porcentagem em massa mobilizada, recomenda-se um estudo mais aprofundado dos efeitos locais provocados pela carga dinâmica e o efeito de ressonância no mesmo. Além disso, para o nó 8732, que apresentou uma velocidade dentro da faixa C, o que indica um resultado pouco satisfatório, sugere-se que este deve ser avaliado com mais precisão. Além disso, no projeto de detalhamento deve-se aprimorar as análises por meio da incorporação das cargas relativas à estrutura metálica da casa de bombas a qual poderá influenciar consideravelmente as frequências naturais da estrutura e conseqüentemente nas conclusões do estudo.



# VII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas

21, 22 e 23 de  
maio de 2014  
RIO DE JANEIRO

COMEMORANDO 40 ANOS DA PONTE RIO NITEROI

Realização:



## Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. 2007.
- PETROBRAS – PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. N-1848 – REV. C – Projeto de Fundações de Máquinas. Rio de Janeiro, Brasil. 2011.
- STRAP. Manual do usuário STRAP. ATIR. 2011.