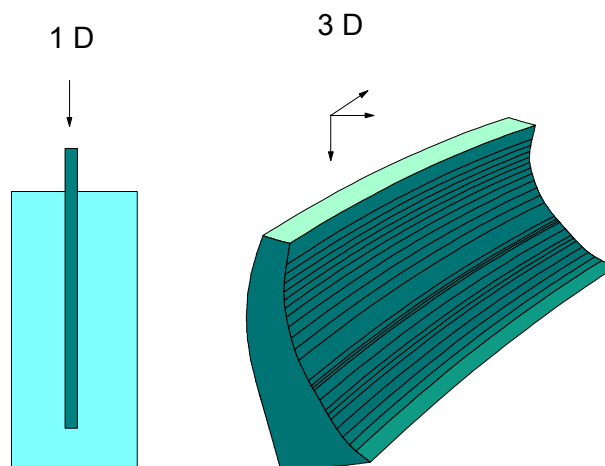


## Provas de carga dinâmicas em estruturas

Por Alberto Ortigão, *PhD*<sup>1</sup> & Alan Jeary, *DSc*<sup>2</sup>

### Introdução

As provas de carga dinâmicas em estacas já são conhecidas no meio geotécnico e de fundações desde os anos 80. Constan de aplicar um impacto em uma estaca (Figura 1) através do martelo de cravação e medir as vibrações por meio de acelerômetros instalados junto à cabeça da mesma. O passo seguinte consiste em calibrar um modelo matemático dinâmico ajustando os resultados às medições. Uma vez calibrado, o modelo pode então ser usado também para modelar um carregamento estático e obter os deslocamentos da estaca.



**Figura 1** Semelhanças entre as provas de carga dinâmicas em estacas (1D) e a análise Pias (3D)

---

<sup>1</sup> Terratek Ltda, Rio de Janeiro  
[www.terratek.com.br](http://www.terratek.com.br)  
[terratek@terratek.com.br](mailto:terratek@terratek.com.br)  
tel 21- 2533 5170 ou 21-9987 7356

<sup>2</sup> Professor Universidade Western Sydney, Australia

A mesma filosofia pode ser aplicada às estruturas, porém com maior complexidade, pois se trata de um modelo tri-dimensional.

A Tabela 1 compara as semelhanças e diferenças entre as provas de carga em estacas e as dinâmicas 3D.

**Tabela 1** Comparação prova de carga dinâmica em estacas e análise *Pias*

Característica	Prova de carga dinâmica em estacas	Análise <i>Pias</i>
<b>Dimensões</b>	Uni-dimensional	Tri-dimensional
<b>Fonte de excitação</b>	Vibrações forçadas com um bate-estacas	Vibrações naturais da estrutura devido ao vento, tráfego e ações externas
<b>Análise numérica</b>	unidimensional	tri-dimensional
<b>Resultados</b>	Capacidade de carga	Integridade estrutural, identificação de danos e análise sob carregamentos adicionais

O objetivo das provas de carga em estruturas é a determinação da integridade estrutural, a detecção de danos e a análise da estrutura sob novos carregamentos.

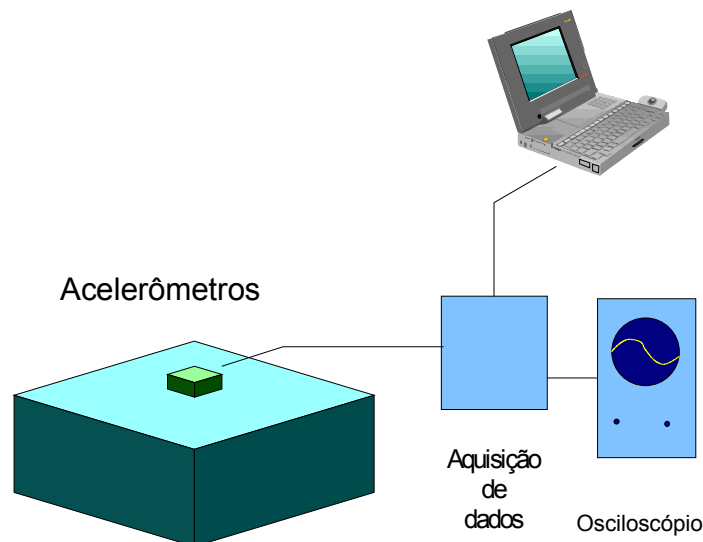
Esta tecnologia já foi aplicada com sucesso em mais de sessenta grandes estruturas, incluindo grandes barragens, várias pontes e edifícios altos nos seguintes países: Grã-Bretanha, Suíça, Hong Kong, Malásia, Singapura, Estados Unidos e Brasil. Entre as obras analisadas por este método constam: barragem PCH Areal, Rio de Janeiro; Torre de TV de Brasília; o mais alto prédio do mundo: a Petronas Tower, Kuala Lumpur e muitas outras.

### **Medições de vibrações**

As medições são realizadas pelo *Pias* (*Portable integrity assessment system*) e se medem as vibrações na estrutura devido às ações do vento, tráfego e temperatura. Não há necessidade de forçar vibrações, o que tornaria o processo muito mais trabalhoso e mais caro.

### **Instrumentos de medição**

O conjunto de equipamentos de medição (Figura 2) dispõe de acelerômetros ultra-sensíveis e processador inteligente que coleta os dados para análise. O *Pias* se conecta a um osciloscópio e um notebook PC que permitem verificar a qualidade dos dados e realizar análises expeditas de campo.



**Figura 2** *Pias Portable Integrity Assessment System*

### Sensores

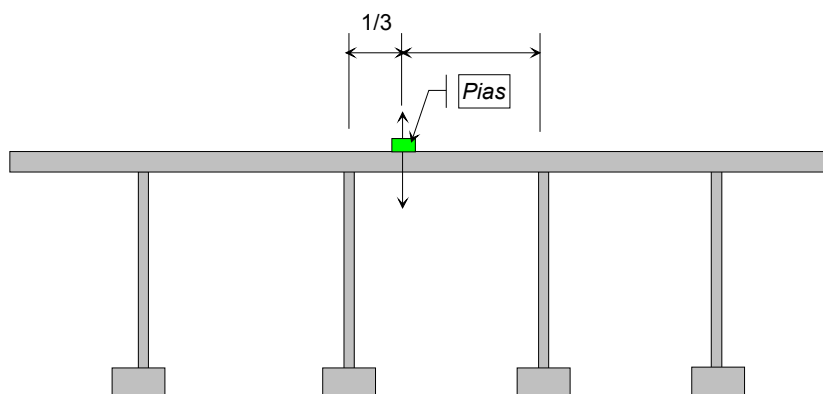
O *Pias* utiliza acelerômetros como sensores da movimentação das estruturas. Os acelerômetros apresentam as seguintes vantagens: podem ser calibrados diretamente no local da obra e têm resposta linear e precisa.

Os sensores empregados no *Pias* são extremamente sensíveis e capazes de medir até  $10^{-8} g$ , onde  $g$  é a aceleração da gravidade. O menor deslocamento que os sensores podem medir depende da frequência. Por exemplo, se a frequência de vibração for de 0.1 Hz, o *Pias* mede deslocamentos de 0.02  $\mu\text{m}$ , mas a 1 Hz, mede 0.0002  $\mu\text{m}$ , ou seja, a aproximadamente ao comprimento de onda da luz.

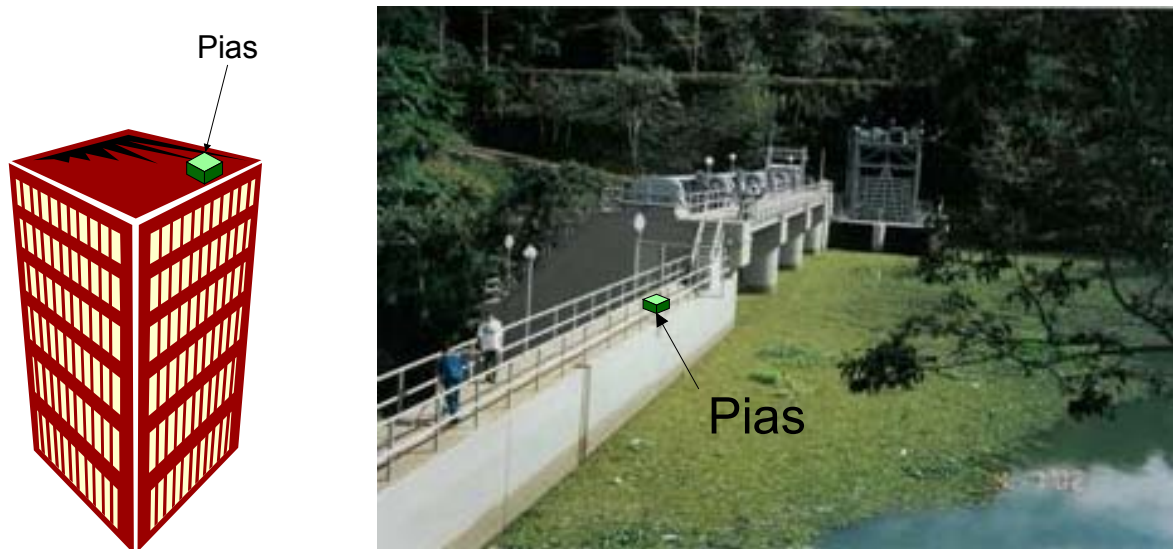
Esta grande sensibilidade permite ao *Pias* monitorar os efeitos na estruturas causados pelo tráfego, vento, variação térmica diária, deterioração de algum elemento estrutural, ou efeitos de obras executadas na proximidade tais como escavações ou cravação de estacas.

### Locais das medições

A Figura 3 indica as posições melhores para a realização das medições em pontes. As acelerações serão medidas no sentido vertical e horizontal ao longo do eixo longitudinal. A Figura 4 indica os locais preferencias de medições em prédios altos e barragens.



**Figura 3** Local das medições em pontes



**Figura 4** Local das medições em edifícios altos e barragens de concreto

### Coleta de dados

O *Pias* dispõe de uma plataforma de coleta de dados baseada em especificações militares, ou seja, dispõe de uma eletrônica ultra-estável e acurada para coletar os dados e arquivá-los na memória flash do sistema e transferi-los a um cartão magnético *Smartcard* de 8 Mbytes.

Durante a aquisição o operador verifica a qualidade dos sinais através de um osciloscópio e através de análise spectral *on-line* via um notebook PC conectado ao sistema. Cada ponto de medição dura em geral 3 horas para adquirir os dados.

### Especificações técnicas do *Pias*



- Conversão A/D em 16 bits
- Amplificação dos sinais de 1, 10, 100 e 1000 vezes
- Filtro passa-baixo anti-aliasing de 5 Hz
- Faixa de frequência do sistema: DC até 5 Hz
- Faixa dos acelerômetros 0.5 g ou 1 g
- Resolução na frequência: 0.05Hz
- Taxa de amostragem:: 30 a 400 Hz
- Filtro digital: Butterworth de 9 pólos
- Sensibilidade:  $10^{-8}$  g
- Suporta separação de frequência modal de 0.05 Hz
- Algoritmo de análise: Simplex com otimização de Fibonacci
- Dimensões: 200mm x 165mm x 285mm
- Massa: 11 kg
- Bateria: 12V Chumbo
- Taxa de transmissão ao PC: 19200 bps

**Figura 5** Equipamento de medição portátil *Pias*

## Processamento dos resultados

Os dados das medições são processados pelo *Pias* empregando técnicas sofisticadas de análise de sinais digitais para obter o espectro e o amortecimento das vibrações.

### Análise espectral

Os dados coletados são submetidos a uma análise espectral usando técnicas digitais entre 0 e 10 Hz com uma largura de banda de análise suficiente para resolver os picos do espectro, obtendo-se:

1. as frequências de ressonância;
2. as acelerações máximas;
3. os deslocamentos máximos em cada frequência de ressonância,
4. as rotações da obra.

Estes dados são comparados com alguns critérios e padrões pré-estabelecidos observados em estruturas que entraram em colapso.

### Análise do amortecimento

Os dados de vibrações serão analisados através de técnica denominada *decréscimos randômicos* proposta originalmente por Cole (1973) para análise de vibrações da nave espacial da NASA (*shuttle*). Esta técnica foi melhorada por Jeary (1992 a & b) para análise de estruturas permitindo relacionar os amortecimentos com a amplitude de deslocamentos.

A curva de amortecimento (Figura 6) de todas as estruturas apresentam três partes distintas: um platô de baixas amplitudes, uma faixa de transição e um platô de altas amplitudes.

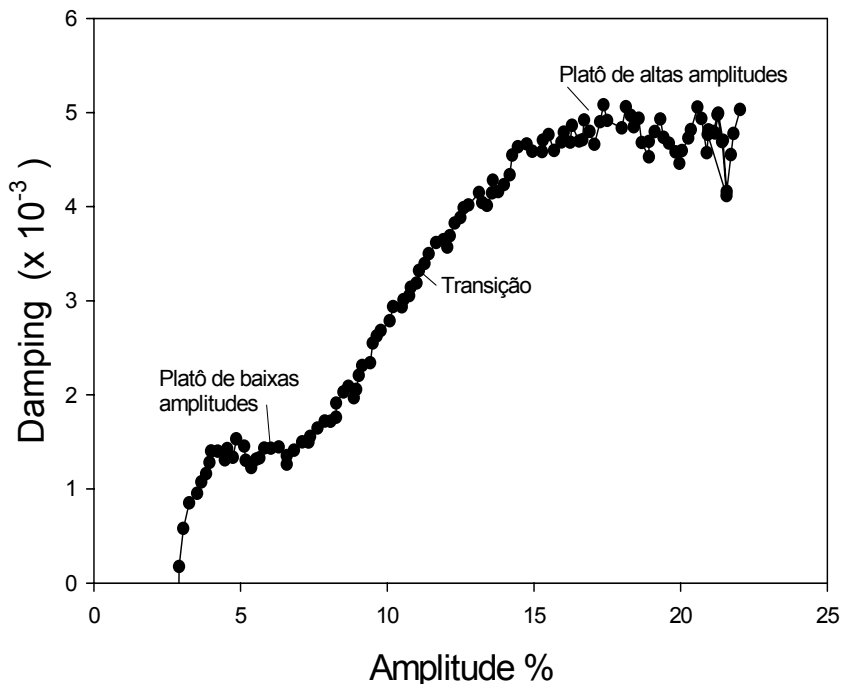


Figura 6 Amortecimento versus amplitude de uma estrutura

A medição da curva de amortecimento tem dois objetivos. Primeiro, permitir extrapolação do amortecimento no modelo numérico para a situação de carregamento final. O segundo objetivo é verificar a ocorrência de danos ou envelhecimento entre duas medições.

A extrapolação da resposta da estrutura para o carregamento de projeto pode-se, então, levar em conta a curva de amortecimento que é não-linear. Observações nas estruturas demonstram que uma mudança de 100% no amortecimento podem acompanhadas por uma alteração de somente 3% no espectro. Por esta razão, a modelagem da resposta para as cargas de projeto depende bastante desta medição acurada do amortecimento não-linear.

Uma alteração na sua forma está relacionada com envelhecimento da estrutura e estado de fissuração (Jeary 1997, 2001). Por esta razão, dispor destas curvas, permitirá em medições futuras, verificar se a estrutura envelheceu ou fissurou no intervalo entre as mesmas.

### **Modelagem numérica**

O passo seguinte é de modelagem matemática da estrutura através de programa de computador *Microstran*, que permite análise modal e o espectro. O modelo é então, ajustado alterando-se a rigidez de elementos estruturais selecionados com base na experiência até ocorrer a concordância de, pelo menos, cinco ressonâncias observadas e calculadas.

Com o modelo calibrado, passa-se ao cálculo de tensões e deformações em qualquer ponto da estrutura, verificando-se se o estado de tensões atende a normas usuais. Além disso, verifica-se também a estrutura quanto a momentos e esforços cortantes.

### **Crítérios de verificação de desempenho da estrutura**

Há dois tipos de critério de desempenho a analisar. O primeiro está relacionado ao desempenho do material. O segundo, ao comportamento global da estrutura, analisando-se sua resistência à ruptura iminente. São verificados padrões de comportamento quando à fadiga, estabilidade e momentos, em relação critérios de aceitação propostos por normas brasileiras, européias e americanas.

### **O uso final do modelo**

Finalmente, o modelo calibrado pode ser empregado para verificar a resposta da estrutura sob diferentes cenários de solicitações, incluindo as condições do projeto inicial. Com isso pode-se concluir sobre integridade da estrutura.

### **Aplicações**

Neste item apresentam-se algumas aplicações

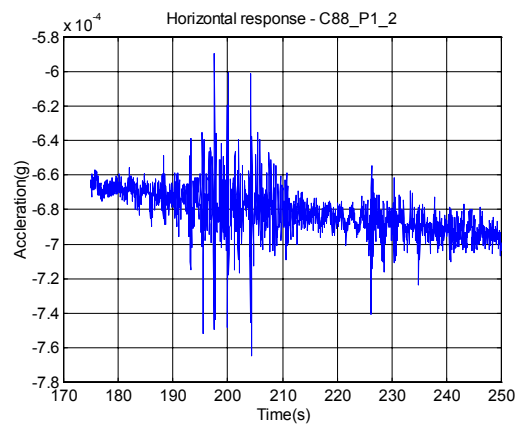
#### **Prova de carga em ponte de acesso e estrutura de cais**

Um antigo cais em Niterói (Figura 7) será utilizado para construção de módulos de plataformas de petróleo e necessitava suportar uma carga de 980 kN de um guindaste. O cais apresenta vários danos visíveis devido à corrosão e o projetista estrutural decidiu verificar a integridade do mesmo face ao novo carregamento.

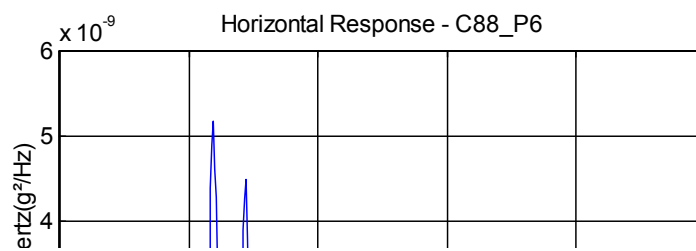
Foram selecionados cinco pontos de medição com o Pias sobre a ponte e cada um dos dolphins. A Figura 8 apresenta o equipamento de medição e um dos gráficos com um sinal de de aceleração.



**Figura 7** Ponte de acesso e cais, Niterói, Rio de Janeiro



**Figura 8** Medições de vibração com Pias e gráfico de acelerações versus tempo

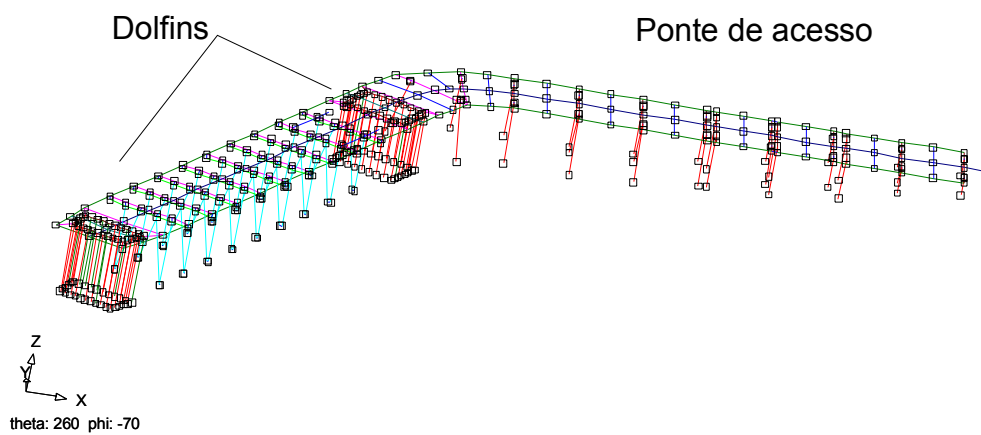


**Figura 9** Exemplo de espectro das vibrações

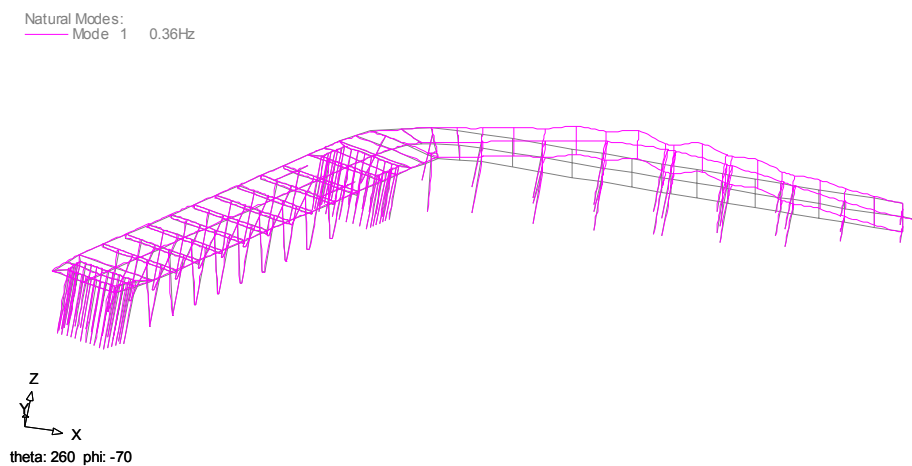
Cada um dos sinais obtidos foi tratado e obtido resultados dos espectros, conforme exemplo da Figura 9.

O modelo matemático elástico-linear é então elaborado (Figura 10) representando os elementos estruturais e as suas propriedades – módulo de Young e coeficiente de Poisson. O passo seguinte é uma fase de várias tentativas ajustando-se gradativamente a rigidez dos elementos estruturais até que o modelo teórico se ajuste aos cinco primeiros modos de vibração medidos. Somente, então, o modelo matemático pode ser considerado calibrado.

Em seguida aplicou-se o carregamento devido ao guindaste e observou-se ruptura de estacas da ponte de acesso (Figura 12) e também do dolfim localizado na extremidade da estrutura. Com isso, o projetista decidiu recuperar totalmente o cais.

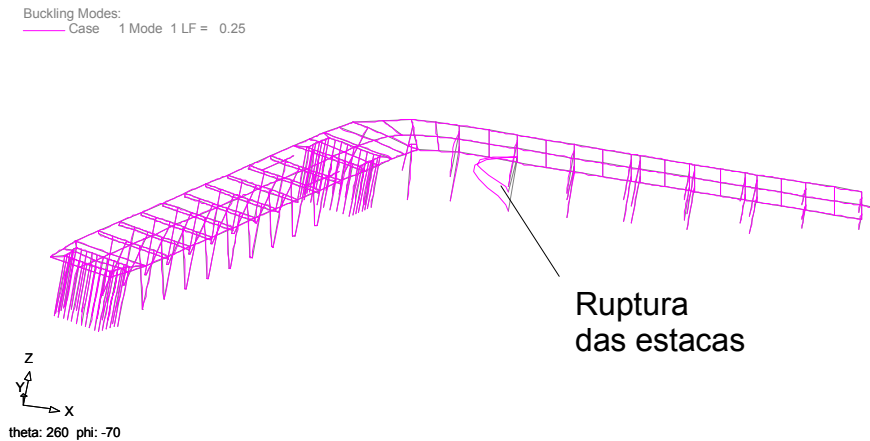


**Figura 10** Modelo matemático da estrutura



**Figura 11** Modelo calibrado, primeiro modo, 0.36 Hz

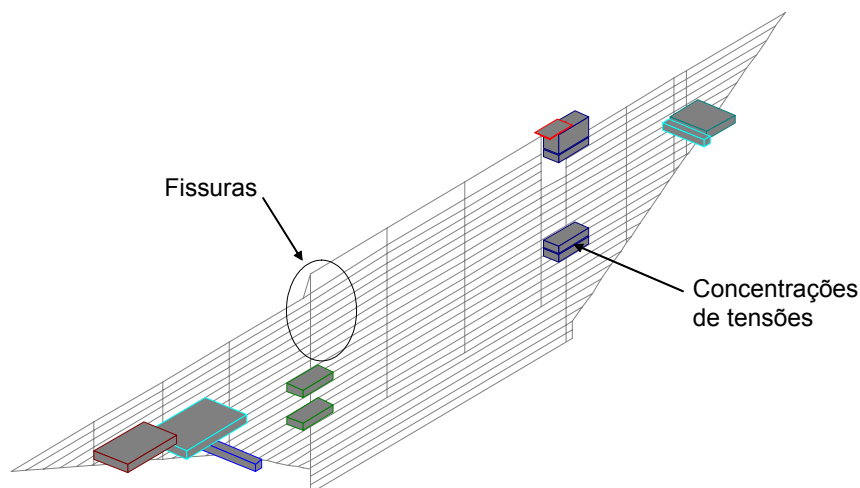




**Figura 12 Ruptura das estacas sob carregamento do guindaste**

### **Investigação de danos em barragem de concreto**

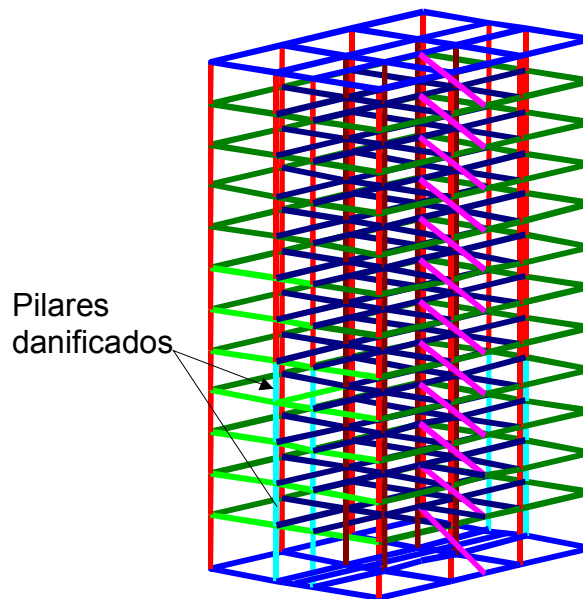
Trata-se de uma barragem de concreto construída em 1948 com 30 m de altura e cerca de 120 m de comprimento (Figura 4) com um vertedouro central, localizada no estado do Rio. Junto ao pilar direito dos vertedouro observam-se várias fissuras. O programa de medições com o Pias foi realizado em dois pontos no topo da estrutura. O modelo foi calibrado e a Figura 13 apresenta o resultado da análise de tensões, que indica alívio na região fissurada e concentração de tensões mais abaixo e também no pilar oposto. Tais concentrações de tensões são devido principalmente ao primeiro modo de vibração da obra. Este estudo permitiu descobrir a causa dos problemas e a forma mais eficaz de recuperação estrutural.



**Figura 13 Identificação de zonas danificadas em barragem de concreto**

### **Identificação de danos em prédio**

Jeary (2002) discutiu detalhadamente este exemplo que é sumarizado aqui. Trata-se da estrutura de um prédio mostrada na Figura 14 que sofreu danos de um terremoto. A análise Pias da estrutura permitiu localizar os danos estruturais.



**Figura 14** Identificação de elementos estruturais danificados em prédio alto

### Conclusões

As provas de carga dinâmicas em estruturas utilizam a mesma filosofia das provas dinâmicas de estacas, porém são tri-dimensionais. Esta tecnologia se baseia em mais de 30 anos de experiência em medições em estruturas. O equipamento de medição que se dispõe atualmente é tão sensível que permite a medição de vibrações naturais das estruturas, sem forçar. Os dados dados são tratados por técnicas avançadas de tratamento de sinais digitais e obtendo-se o espectro e o amortecimento das vibrações.

O passo seguinte é a elaboração de um modelo matemático estrutural que é calibrado com dados de campo, ajustando-se a rigidez de elementos estruturais por tentativa e erro. Este trabalho resulta na identificação e localização dos danos estruturais e permite, em seguida, a análise da estrutura sob quaisquer condições de carregamento.

Esta tecnologia já foi aplicada e testada com sucesso a vários tipos de estruturas, tais como, pontes, cais, torres, barragens, prédios e outras.

### Referências

- Cole H.A.jr. 1973. On-line failure detection and damping measurements by random decrement signatures. NASA-CR-2205. March 1973.
- Jeary, A.P. (1992), Establishing Non-Linear Damping Characteristics of Structures from Non-Stationary response Time-Histories, *The Structural Engineer*, Vol. 70, No. 4, 18 February 1992
- Jeary A.P. (1997) *Designer's guide to the dynamic response of structures*, E & F Spon, 235 p.
- Jeary A P (2002) *The identification of damage in large structures*, Report UWS univ of western Sydney, Australia
- Jeary A P, Chiu G C & Wong J C K (2001) *Wholistic structural appraisal*, Conf. on Structural Monitoring. ICOSSAR. San Diego, June 2001.