

## Provas de cargas dinâmicas em grandes estruturas

### RESUMO

Este documento estabelece o procedimento a ser adotado em provas de carga dinâmicas em grandes estruturas com os seguintes objetivos:

1. Análise de integridade estrutural;
2. Detecção de danos estruturais
3. Estudos de degradação e vida útil
4. Verificação de estabilidade sob aumento de carga

São realizadas medições de vibrações naturais, sem forçar, em determinados elementos estruturais. Tais medições permitem obter o espectro e o amortecimento estrutural em baixas frequências de 0 a 10 Hz. Em seguida, elabora-se um modelo matemático da estrutura e calibra-se o modelo. Finalmente usa-se o modelo para analisar os resultados.

A norma apresenta a instrumentação empregada, a análise das medições, da modelagem matemática e a obtenção e interpretação dos resultados.

### ABSTRACT

This document establishes the procedure for the dynamic load tests on large structures.

### SUMÁRIO

Prefácio

Objetivo

Referências

Filosofia de metodologia

Princípios do método dinâmico

Grandezas a medir

Medição de vibrações naturais

Instrumentos de medição

Plano de instrumentação

Processamento dos resultados

Modelagem numérica

Crítérios de verificação e desempenho da estrutura

Relatório final

### 1. PREFÁCIO

Esta norma estabelece procedimento para realização de provas de carga dinâmicas em grandes estruturas. Descrevem-se os objetivos, metodologia e medições de vibrações, processamento das leituras de vibração, classificação dos dados estruturais, modelagem matemática, calibração do modelo e interpretação de resultados.

### 2. OBJETIVO

Fixar as condições mínimas que devem ser atendidas para a realização de provas de cargas dinâmicas com vibrações naturais em grandes estruturas.

### 3. REFERÊNCIAS

Para a aplicação desta Norma as referências listadas a seguir deverão ser consultadas. As normas citadas fazem parte integrante deste documento.

#### 3.1. Normas ABNT

- a) ABNT NBR 06118 Projeto e execução de obras de concreto armado
- b) ABNT NBR 07187 Projeto e execução de pontes de concreto armado e protendido
- c) ABNT NBR 06122 Projeto e execução de fundações
- d) ABNT NBR 07808 Símbolos gráficos para projetos de estruturas

#### 3.2. Normas internacionais

Rilem Dynamic behaviour of Concrete Structures - Final report of Rilem 65 MDB Committee. March 1985. Elsevier, Amsterdam. ISBN 0-44442624-8 vol.13.

Rilem The dynamic behaviour of concrete structures. Recommendations of good practice for methods of testing and design. (Rilem 65MDB committee). Rilem Conference on the Long term observation of structures. Budapest Sept. 1984.

BS6177:1982. Selection and use of elastomeric bearings for vibration isolation of buildings. British Standards Institution. UDC 699.842:69.021:678.074. 1982.

ISO/DIS 4866 Mechanical vibration and shock - measurement and evaluation of vibration effects on buildings - guidelines for the use of basic standard methods. UDC 69.058:534.834. International standards organisation 1986.

CS1 Testing Concrete - HK Government construction standard no. 1. December 1990.

Code of Practice for wind Loading for Hong Kong. 1996.

#### 3.3. Critérios de desempenho

**Varição de frequência:** High rise building response damping and period nonlinearities. Hart DiJulio and Lew. 5<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering. 1974.

**Nível de vibração:** Manual for the design of reinforced concrete structures. Institution of Structural Engineers, London, UK. October 1985.

**Rotações** Manual for the design of reinforced concrete structures. Institution of Structural Engineers, London, UK. October 1985.

**Resposta estrutural :**Code of practice for the structural use of concrete. CP110.1972.

Structure Response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting. US Department of the Interior. Bureau of Mines report RI 8507. 1980.

**Micro-fissuramento:**The Phenomena of rupture and flow in solids. G.I. Taylor. Proc. Royal Society. 1920.

#### 3.4. Pontes

1. US design code AASHTO (LRFD). Manual for the condition evaluation of bridges. 1994
2. UK standards BS 5400 and BD 44/95
3. Australian code AUSTRROADS

#### 3.5. Percepção humana de vibrações

4. The physiological evaluation of vibration measurements. R.I.Meister 1937. AkusticheZ

### 3.6. Desempenho estrutural e danos estruturais

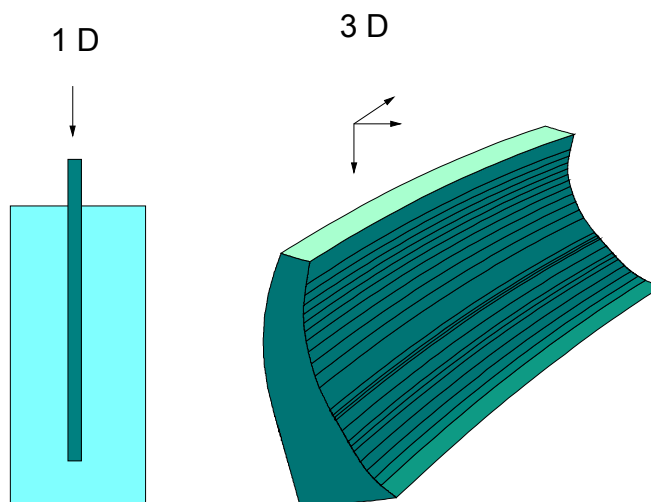
5. DIN 4150 Protection against Vibration in Building Construction. German Institute for Standards. Berlin 1939.
6. Designer's Guide to the Dynamic response of Structures. A.P. Jeary 1997
7. Manual for the design of reinforced concrete structures. Institution of Structural Engineers, London, UK. October 1985.
8. Structural Vibration and damage. R.J. Steffens. 1973. Building Research establishment, UK.
9. Structure Response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting. US Department of the Interior. Bureau of Mines report RI 8507. 1980.

### 3.7. Publicações técnicas

- AASHTO Manual for Condition Evaluation of Bridges. 2<sup>nd</sup> edition, American Association of State Highway Officials
- Bendot J S & Piersol A G (2000) Random data: analysis and measurement procedures, Wiley, NY
- Cole H.A Jr. 1973. On-line failure detection and damping measurements by random decrement signatures. NASA-CR-2205. March 1973.
- Engineering Systems Ltd (2002) Microstran, version 8, Turramurra, Australia
- Jeary A P & Winney P E (1972) : Determination of Structural Damping of a large multiflue chimney from response to wind excitation. Inst. of Civil Engineers Proceedings, Tech. Note No. 65, pages 569-577, Dec. 1972.
- Jeary A P (1992): Establishing non-linear damping characteristics of structures from non-stationary response time-histories. The Structural Engineer. Vol 70 No. 4. pp 61-66. 18 February 1992.
- 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) Holistic structural appraisal, Conf. on Structural Monitoring. ICOSSAR. San Diego, June 2001.
- Jeary A.P. (1997) Designer's guide to the dynamic response of structures, E & F Spon, 235 p.
- 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
- Koch H W. (1953). Determining the effects of vibration in buildings, V.D.I.Z. 95, 21, 744-747.
- Ortigao J A R & Jeary A P (2003) Provas de cargas dinâmicas estruturais, Simp. IBC, São Paulo
- Rilem The dynamic behaviour of concrete structures. Recommendations of good practice for methods of testing and design. (Rilem 65MDB committee).

**4. FILOSOFIA**

A filosofia adotada nas provas pode ser facilmente entendido pela semelhança com as provas de carga dinâmicas em estacas, cujo uso é disseminado no país (Figura 1), porém de muito maior complexidade e a três dimensões. A Tabela 1 compara as principais semelhanças e diferenças.



**Figura 1** Semelhanças entre as provas de carga dinâmicas em estacas (1D) e em uma estrutura (3D)

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

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

**5. PRINCÍPIOS DO MÉTODO DINÂMICO**

A resposta de uma estrutura é dada pela seguinte equação, obtida em livros de dinâmica estrutural (e.g., Jeary, 1997)

$$x_r = F_r \left( \frac{K_r^{-1}}{1 - \frac{f^2}{f_r^2} + i 2\zeta_r \left( \frac{f}{f_r} \right)} \right) \tag{1}$$

Onde:

$x_r$  = deslocamentos ou resposta da estrutura;

$F_r$  = forças aplicadas;

$K_r$  = rigidez estrutural, ou seja, a constante de mola que aplica uma força no sentido oposto à direção do deslocamento;

$f$  = frequência;

$f_r$  = frequência de ressonância;

$\zeta_r$  = parâmetro de amortecimento;

$i$  = número imaginário ( $i = \sqrt{-1}$ )

O índice  $r$  na equação anterior se refere a um determinado modo de deslocamentos da estrutura em que há amplificação dos deslocamentos, ou ressonância. Também denominado de modo de ressonância, que ocorre na frequência de ressonância. O modo de deslocamento é independente do carregamento. A ressonância é maior ou menor em função da quantidade de amortecimento que ocorre naquela frequência. O amortecimento consiste na taxa de perda de energia da estrutura, causada pelo atrito entre partes ou atrito entre as superfícies das microfissuras do material.

### 5.1. Comportamento estático

Considerando  $f=0$  na equação (1), obtém-se:

$$x(0) = \frac{F(0)}{K(0)} \quad (2)$$

Esta equação mostra que a resposta estática é obtida como produto da força aplicada pelo inverso da rigidez, ou seja, o comportamento estático é um caso particular do dinâmico.

### 5.2. Comportamento dinâmico na frequência de ressonância

Considerando  $f=f_r$  na equação (1), obtém-se:

$$x_r = \frac{F_r}{2K_r \zeta_r i} \quad (3)$$

Esta equação mostra que a resposta para o modo  $r$  é amplificada por um fator  $1/(2\zeta)$  em relação à resposta estática.

### 5.3. Comportamento de um sistema não amortecido

Em um sistema massa-mola não amortecido, a frequência de ressonância ( $f_r$ ) é dada por:

$$f_r = \sqrt{\frac{K_r}{m_r}} \quad (4)$$

Onde:

$K_r$  = rigidez modal

$m_r$  = massa modal, *i.e.*, a massa que tem inferência no deslocamento modal

Esta equação que também consta em qualquer livro de dinâmica demonstra a relação entre rigidez e frequência de ressonância.

## 6. GRANDEZAS A MEDIR

Nas provas de cargas dinâmicas serão medidas vibrações naturais da estrutura sem forçar. As vibrações naturais ocorrem devido a ações externas do vento, tráfego, etc, não sendo necessário aplicar nenhuma carga ou carregamento especial.

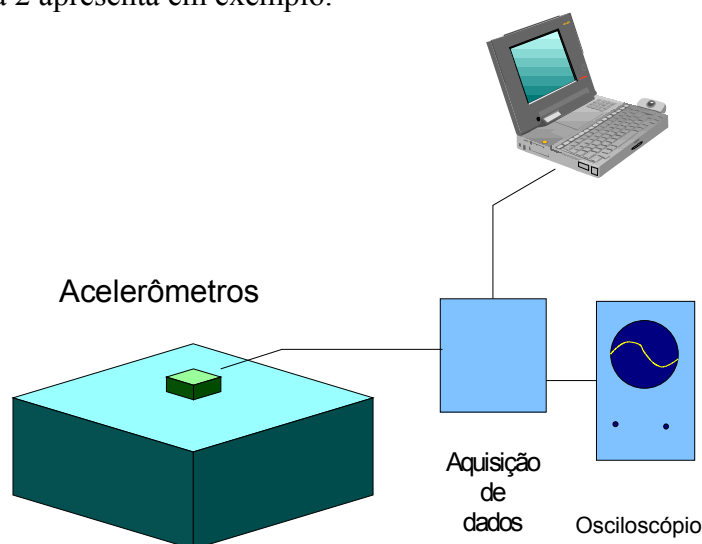
## 7. A MEDIÇÃO DE VIBRAÇÕES NATURAIS

As principais vantagens da metodologia adotada nesta norma são:

1. As vibrações são fáceis de medir e, desde que o plano de instrumentação seja bem feito, as medições conseguem sofrer a influência de toda a estrutura.
2. As vibrações naturais dispensam o uso de excitação com vibradores ou qualquer tipo de carga de teste;
3. Os acelerômetros têm como referência a gravidade, por isso determina-se no início dos testes a linha base, ou leitura de referência. Além disso, como o valor da gravidade é conhecido, os sensores são, ipso facto, calibrados no início do teste.

## 8. INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO

O conjunto de equipamentos de medição (Figura 2) necessita de acelerômetros ultra-sensíveis e processador para aquisição de dados. Várias configurações de equipamentos podem ser empregadas. A Figura 2 apresenta em exemplo.



**Figura 2** Exemplo de configuração de equipamento para a medição de vibrações

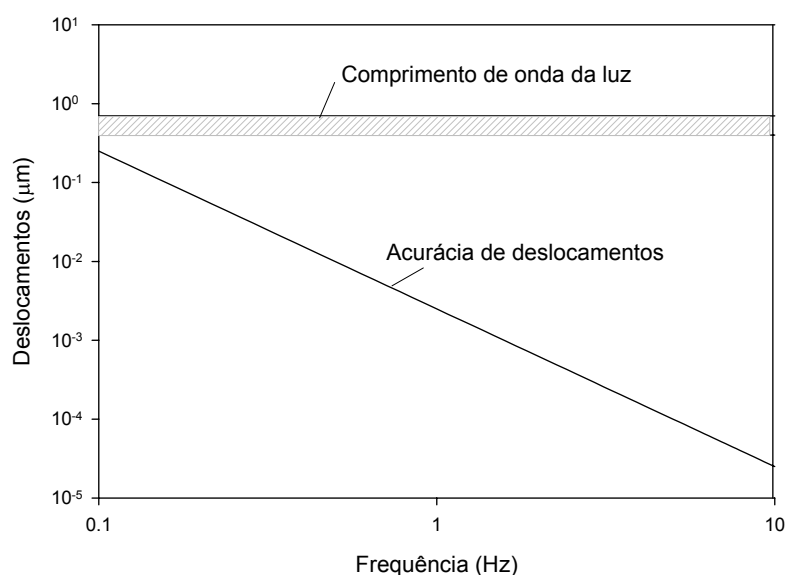
A principal característica do equipamento é a ultra-sensibilidade para medir vibrações de baixíssimas amplitudes e frequência muito baixas. Deverão ser empregados acelerômetros capazes de medir até  $10^{-8} g$ , onde  $g$  é a aceleração da gravidade.

O equipamento de medição de aquisição de dados deverá ter as seguintes características mínimas (Tabela 2):

**Tabela 2 Características a serem atendidas pelos equipamentos de medição e aquisição de dados**

Característica	Valores
Sensores: alcance ou faixa de leituras dos acelerômetros	0 a 1 g
Sensibilidade dos sensores e do sistema de aquisição de dados	Igual ou melhor que $10^{-8}$ g (número dez elevado à potência menos oito vezes a aceleração da gravidade)
Direção das medições	Vertical e horizontal
Aquisição de dados com conversão analógica-digital (A/D)	Igual ou maior que 16 bits
Amplificação dos sinais	1, 10, 100 e 1000 vezes
Filtro passa-baixo anti-aliasing	10 Hz
Faixa de frequência do sistema	0 a 10 Hz
Resolução na frequência	Melhor que 0,0001 Hz
Taxa de amostragem	30 a 400 Hz
Filtro digital: mínimo	54 dB por oitava (roll-off)
Separação de frequência modal	0,05 Hz

Utilizando-se sensores e o sistema de aquisição de dados com as características acima, a acurácia obtida na medição de deslocamentos pode ser calculada admitindo-se movimento harmônico simples. A acurácia resultante consta da Figura 3, onde é comparada com o comprimento de onda da luz (0,4 a 0,7  $\mu\text{m}$ ).



**Figura 3 Acurácia necessária dos deslocamentos**

## 9. PLANO DE INSTRUMENTAÇÃO

### 9.1. Documentos necessários

Para a elaboração do plano de monitoramento e posterior análise dos resultados é necessário obter as seguintes informações:

1. Projeto de formas da estrutura
2. Relatório de inspeção visual da estrutura

As informações acima são imprescindíveis. No caso de não haver o projeto da estrutura, será realizado um levantamento detalhado das dimensões da mesma e o desenho de formas em escala apropriada, além de inspeção visual e levantamento de patologias.

As seguintes informações são úteis, porém não imprescindíveis:

- Memória de cálculo
- Projeto estrutural detalhado

### 9.2. Posições das medições na estrutura

As medições de vibrações são programadas em locais e nos sentidos que possam ser influenciadas por grande parte da mesma. A seleção destes pontos depende do tipo e forma da estrutura, do comportamento dinâmico da mesma e do tipo de dano esperado. Sejam alguns exemplos:

#### *Pontes*

A Figura 4 indica as posições melhores para a realização das medições na laje das pontes, nos pilares e nos blocos de fundação. As posições indicadas P1 a P4 têm o seguinte objetivo:

A posição tipo P1, realizada no terço da laje de cada vão, tem por objetivo medir a resposta de cada laje. As posições P2 e P3 tem por objetivo medir o comportamento dos pilares e permitir analisar também o comportamento da fundação. As acelerações serão medidas no sentido vertical e horizontal no sentido transversal.

#### *Edifícios altos e torres*

Nos edifícios altos e torres a melhor posição é no topo, porém fora do eixo de simetria da estrutura de forma a medir os modos de torção. Os sentidos mais importantes são longitudinal e transversal.

#### *Barragens*

Na crista da barragem e fora do eixo de simetria, sentidos longitudinal e transversal.

#### *Coberturas em balanço*

As medições mais importantes são na ponta da mesma no sentido vertical e transversal.

### 9.3. Tempo de medição e quantidade de dados

A qualidade dos dados de campo depende não só da acurácia dos sensores e do sistema de aquisição de dados, bem como da taxa de amostragem e tempo de leituras em cada ponto. Para a análise espectral é necessário ter resolução da resposta no entorno de uma ressonância. Para tal, o critério é que a largura de banda da análise seja pelo menos quatro vezes menor que a largura da ressonância. Isso corresponde ao critério de um mínimo quatro pontos plotados no entorno de um pico de ressonância.

É necessário também obter a média de flutuações estatísticas causadas pela excitação randômica da estrutura. O erro nesse caso deve ser limitado a 10%, o tempo de registro vezes a largura de banda da análise deverá ser pelo menos 100.

O tempo mínimo de registro de dados, será então:

$$T = \frac{200}{f_r \zeta_r} \text{ (em segundos)} \quad (5)$$

Onde  $f_r$  e  $\zeta_r$  respectivamente a frequência modal e o amortecimento.

No caso de lajes, a frequência fundamental depende da largura do vão e pode ser estimada empiricamente através da equação:

$$f_r = L^{-0.9} \quad (6)$$

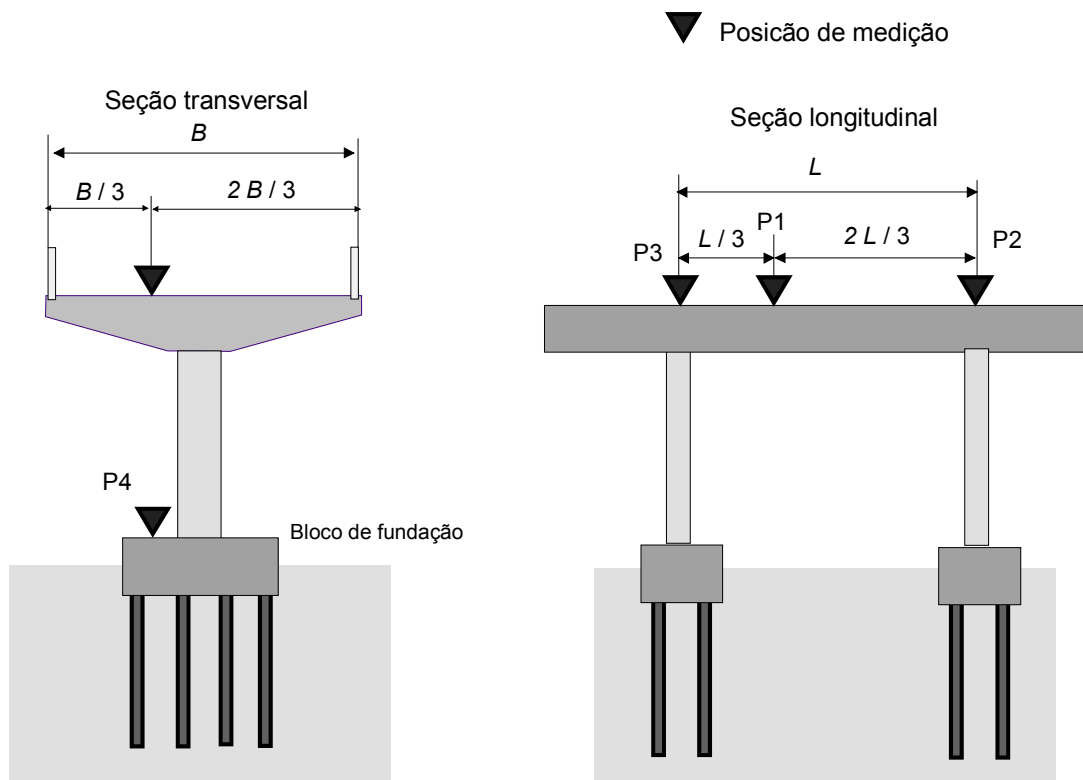
onde  $L$  é a largura do vão em metros e  $f_r$  é fornecido em Hertz

Com esta quantidade de dados, o modo “ $r$ ” terá erro inferior a 4% e 10% de variância, fornecendo uma estimativa com erro global não superior a 10.8%, suficiente para os objetivos das análises.

Exemplo:

Para a frequência de 0,5 Hz e amortecimento de 2%, o tempo necessário de leituras será:

$$T = \frac{200}{0.5 \times 0.02} = 20000 \text{ s} = 5,6 \text{ horas}$$



**Figura 4 Posição das medições em pontes**

## 10. PROCESSAMENTO DOS RESULTADOS

Os dados das medições serão processados por softwares comerciais de análise de sinais digitais que tenham sido testados e sejam confiáveis e para as seguintes análises:

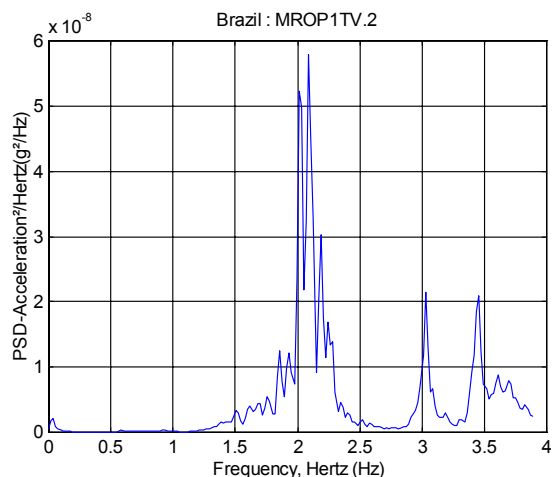
### 10.1. Análise espectral

Os dados coletados são submetidos à 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:

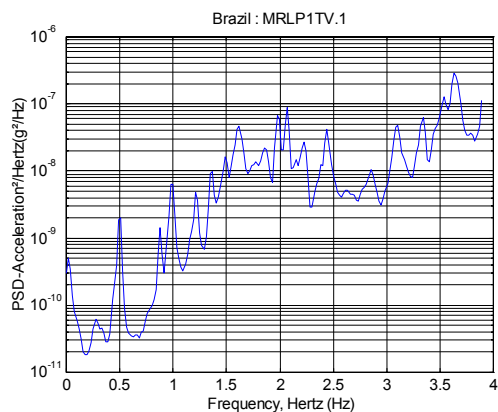
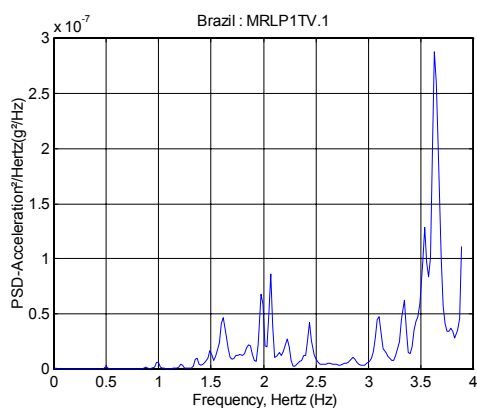
1. as frequências de ressonância;
2. as acelerações máximas;
3. os deslocamentos máximos em cada frequência de ressonância,
4. as torções ou rotações da obra.

A Figura 5 apresenta a maneira em que devem ser apresentados os resultados do espectro de medições em uma estrutura. As ordenadas representam-se as amplitudes de aceleração ao quadrado normalizadas em relação à largura de banda, ou seja,  $g^2/Hz$ , onde  $g$  é a aceleração da gravidade. As abscissa está representada a frequência na escala de 0 a 10 Hz. Os picos do espectro correspondem às frequências de ressonâncias da estrutura.

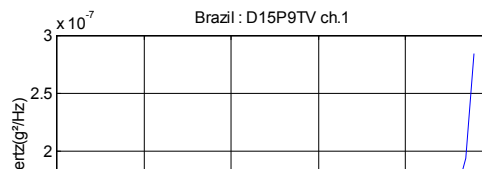
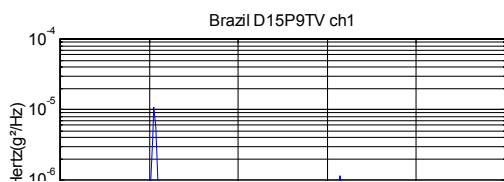
A Figura 6(a) apresenta um espectro com uma ressonância principal a cerca de 3,6 Hz e várias ressonâncias em frequências inferiores. Neste caso, como tais ressonâncias de baixa frequência podem ter papel importante para a análise do comportamento, plota-se também o mesmo resultado conforme Figura 6(b) com a escala das ordenadas em escala logarítmica.



**Figura 5 Exemplo de espectro de uma estrutura**



**Figura 6 Exemplo de espectro de uma estrutura apresentando várias ressonâncias abaixo da ressonância principal: (a) esquerda, escala aritmética das ordenadas; (b) escala logarítmica**



**Figura 7 Exemplo de espectro de uma estrutura apresentando (a) várias ressonâncias na faixa de 0 a 10 Hz; (b) ampliação do espectro na faixa de 0 a 1 Hz**

A Figura 7(a) apresenta um espectro de uma estrutura com várias ressonâncias e uma de baixíssima frequência. Devido à importância desta ressonância para a análise do comportamento, a Figura 7(b) amplia-se a escala os resultados apresentando-os na faixa de 0 a 1 Hz.

### 10.2. Análise do amortecimento

O amortecimento estrutural é uma informação extremamente importante para se analisar dinamicamente uma estrutura. A literatura técnica se refere aos seguintes métodos:

### 10.3. Método da autocorrelação

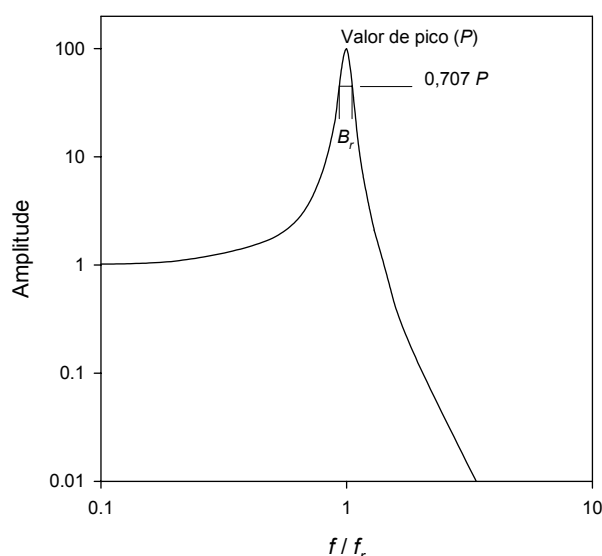
Jeary e Winney (1972) apresentam a metodologia detalhada do método de autocorrelação que fornece um valor global de amortecimento, mas não fornece uma relação com a amplitude. Este método não deve ser aplicado.

### 10.4. Método da largura de banda de meia potência

Usando análise espectral é possível obter uma estimativa do amortecimento em cada ressonância. Entretanto, tal qual o método anterior, este método fornece resultados médios e não permite obter uma relação entre o amortecimento e a amplitude. Neste caso, para uma ressonância bem definida, como a da Figura 5, necessita-se localizar duas posições na curva de ressonância (tal como na frequência de 3,05 Hz na Figura 5), em que a resposta é 0,707 vezes o valor de pico. A largura de banda ( $B_r$ ) entre os dois pontos é medida e o amortecimento é dado por:

$$\zeta_r = \frac{B_r}{2f_r}$$

Na Figura 5 ressonância é de 2,1 Hz e a resposta neste valor é fragmentada. Este tipo de resposta é comum para estruturas reais e torna esta metodologia às vezes difícil de ser aplicada, por isso também não deve ser empregado.



**Figura 8** Amplitude versus razão  $f/f_r$

### 10.5. Método dos deslocamentos induzidos

É possível determinar o amortecimento forçando vibrações e interrompendo a fonte de excitação, ou introduzindo um deslocamento forçado, que é removido rapidamente, permitindo a estrutura oscilar. Nesta situação a estrutura oscila e gradualmente dissipará energia. Plotando-se a

envoltória das oscilações versus tempo, obtém-se o amortecimento. Este método é difícil de aplicar, face à dificuldade de aplicar os deslocamentos forçados, por isso também não é recomendado.

#### 10.6. Método dos decrementos randômicos;

Este é o método recomendado por esta norma, que fornece a curva de amortecimento versus amplitude (Figura 9). Todas estruturas, independente do material, apresentam uma curva semelhante, com as seguintes características (Figura 10 Representação simplificada da curva de amortecimento versus amplitude): (a) um platô de baixa amplitude; (b) uma região de transição; e, (c) um platô de altas amplitudes.

Esta metodologia, é tratada com detalhes por Jeary (1992) e é adotada nesta norma pois é a única que fornece a curva que relaciona o amortecimento com as amplitudes (Figura 9).

Para sua aplicação, as seguintes condições devem ser observadas:

- Os dados a serem empregados precisam ser obtidos de um conjunto de medições auto-estacionárias e randômicas (e.g., Bendot & Piersol, 2000). É necessário testar a estacionaridade e randomicidade dos dados através de teste estatístico.
- Não pode ocorrer sobreposição na janela de amplitudes.
- O tamanho de cada janela amplitude não deverá exceder 5% da faixa total;
- Pontos individuais de amortecimento / amplitude devem ser obtidos de médias com 1000 pontos de medição.
- Pontos individuais com amortecimento / amplitude menores que 100 médias devem ser rejeitados.

A Figura 9 apresenta a curva resultante que deve ser obtida para cada estrutura submetida a prova de carga dinâmica.

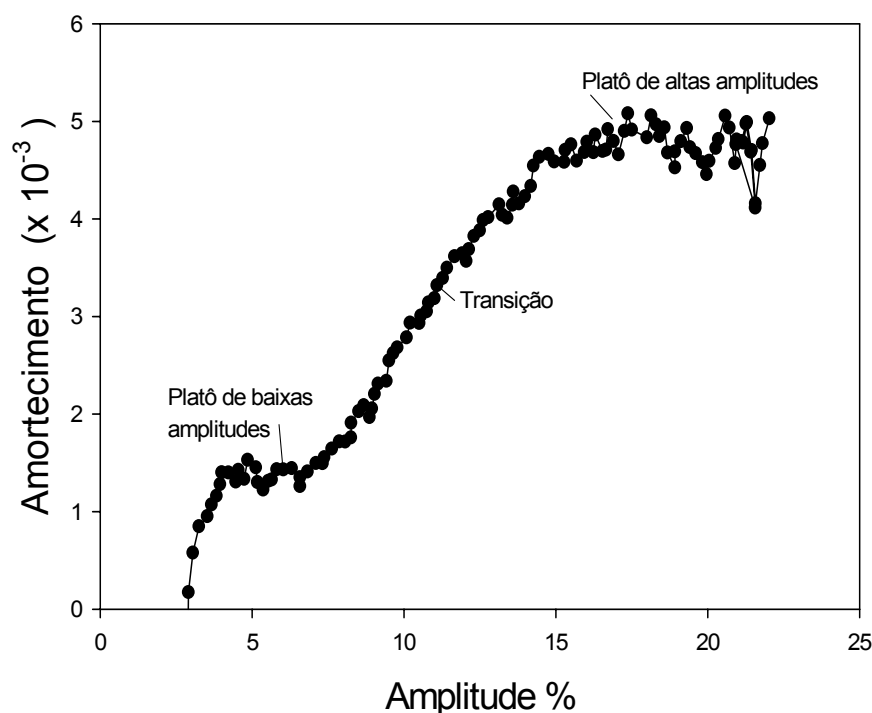
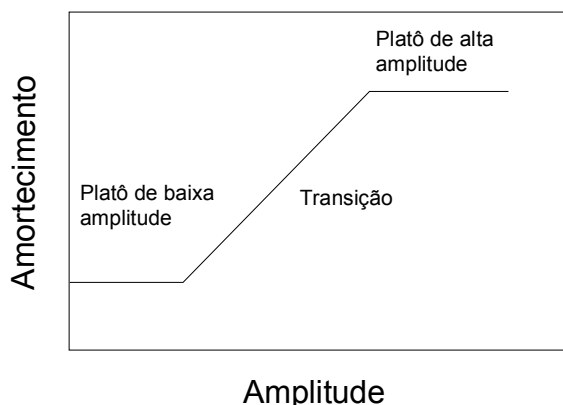


Figura 9 Amortecimento versus amplitude de uma estrutura



**Figura 10** Representação simplificada da curva de amortecimento versus amplitude

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. Por esta razão, dispor destas curvas, permitirá em medições futuras, verificar se a estrutura envelheceu ou fissurou no intervalo entre as medições.

## 11. MODELAGEM NUMÉRICA

O passo seguinte é de modelagem matemática da estrutura através de programa de computador de análise dinâmica estrutural, que permite análise modal no domínio da frequência e a obtenção do espectro teórico.

Os passos são os seguintes:

1. Entrada de dados da geometria da estrutura em um programa que permita tratamento a três dimensões;
2. Entrada de dados das propriedades da estrutura, tais como módulo de Young, coeficiente de Poisson e amortecimento de todos elementos estruturais correspondentes à estrutura são
3. Executar o programa e obter as frequências de ressonância para cada modo de deslocamento

O modelo é então, ajustado alterando-se a rigidez de elementos estruturais selecionados com base na experiência e ajuste por tentativas e erros 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 nas estruturas. Além disso, verifica-se também a estrutura quanto a momentos e esforços cortantes.

## 12. CRITÉRIOS 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.

### 12.1. Índice de vibração

O índice de vibração ( $V$ ) é um parâmetro empírico muito empregado para analisar o nível de danos estruturais. Foi originalmente desenvolvido por Koch (1953) utilizando um banco de dados com um grande número de estruturas com vários níveis de danos.

$$V = 10 \log(160\pi^4 A^2 f^3) \quad (5)$$

onde:

$A$  = amplitude de vibrações em centímetros (cm);

$f$  = frequência em Herz (Hz)

Os valores de  $V$  deverão ser obtidos em cada ponto de medição a partir, tanto das medições, quanto dos valores fornecidos pela modelagem numérica para as diversas condições de carregamento.

A relação empírica entre os valores de  $V$  e o nível de danos estrutural é fornecida pela Tabela 3.

**Tabela 3 Nível de danos em função do índice de vibração V**

$V$	Nível de danos
10 - 30	Nenhum dano
30 - 40	Danos leves
40 - 50	Danos severos
50 - 60	Colapso

### 12.2. 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.

## 13. RELATÓRIO FINAL

O relatório final deverá apresentar:

1. Objetivo da prova de carga
2. Descrição da estrutura e do seu estado;
3. Desenhos de projeto de formas da estrutura;
4. Localização das medições e a sua direção em relação à estrutura, designando-se  $V$  (vertical), transversal ( $T$ ) e longitudinal ( $L$ );
5. Características dos equipamentos de medição, comparando-os com os requisitos mínimos da Tabela 2
6. Espectros medidos;
7. Curvas de amortecimento versus amplitude de deslocamentos;
8. Descrição do modelo matemático e do programa de computador empregado;
9. Características do modelo matemático;
10. Resultados do modelo em termos de modos de vibração e frequências;
11. Resultados da modelagem matemática (esforços normais, cortantes e momentos) para os diversos cenários de carregamento;
12. Tabela comparativa de frequências medidas e modeladas: (a) correspondentes à estrutura sã e (b) estrutura com danos simulados;

13. Tabela de valores de índice de vibração ( $V$ ) para cada posição de medição, correspondentes a valores tanto medidos, quanto calculados pelo modelo para as diversas condições de solicitação.
14. Conclusões
15. Recomendações