

Informativo Técnico-Científico ITC04-Amortecimento/ATCP

# Amortecimento: classificação e métodos de determinação

**ATCP Engenharia Física**

[www.atcp.com.br](http://www.atcp.com.br)

São Carlos - Brasil

Autores: Cossolino LC; Pereira AHA

[Revisado e publicado online em 01/11/2010]

## ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO.....	3
2.	TIPOS DE AMORTECIMENTO.....	3
2.1	Amortecimento Interno .....	3
2.1.1	Amortecimento Viscoelástico.....	4
2.1.2	Amortecimento Histerético.....	6
2.2	Amortecimento Estrutural .....	7
2.3	Amortecimento Fluídico .....	7
3.	MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO.....	7
3.1	Método do Decremento Logarítmico .....	8
3.2	Método da largura de banda .....	9
4.	APLICAÇÕES DO AMORTECIMENTO .....	10
5.	CONCLUSÕES .....	13
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	13

## 1. INTRODUÇÃO

O amortecimento, ou atrito interno, é uma das propriedades mais sensíveis de materiais e estruturas, tanto em escala macro quanto microscópica,<sup>1</sup> sendo particularmente sensível à presença de trincas e micro-trincas.<sup>2</sup> É o fenômeno pelo qual a energia mecânica de um sistema é dissipada<sup>3</sup> (principalmente pela geração de calor e/ou energia). O amortecimento determina a amplitude de vibração na ressonância e o tempo de persistência da vibração depois de cessada a excitação.

Além da aplicação clássica no estudo de metais e em engenharia civil (devido à importância do amortecimento para a integridade de estruturas no caso de abalos sísmicos), a caracterização do amortecimento também vem sendo empregada no estudo de concretos para a avaliação do dano.<sup>4,5</sup>

Por exemplo, no caso de danos por choque térmico, a tensão mecânica induzida pelo gradiente de temperatura provoca a nucleação e propagação de micro-trincas e trincas que degradam as propriedades mecânicas do material determinando em grande parte a sua vida útil.<sup>6,7</sup> A nucleação e evolução destas micro-trincas e trincas podem ser monitoradas com a caracterização do amortecimento, que aumenta devido ao atrito entre as paredes destas trincas.<sup>4,5</sup> Esta caracterização também é empregada para a verificação da qualidade e resistência de soldas e juntas, análise de dano a maquinário industrial e motores e adequação de salas acústicas.

O amortecimento de um sistema ou material pode ser classificado de três formas principais: interno, estrutural e fluídico. O interno está associado aos defeitos na microestrutura, granularidade e impurezas do material e a efeitos termoelásticos causados por gradientes locais de temperatura. Já o estrutural está associado a perdas de energia por atrito em juntas, parafusos e articulações semi-rígidas. Por último, o fluídico ocorre por resistência ao arraste em meio fluídico, por exemplo, a conversão de energia cinética de um pêndulo em energia térmica para o ar.

Existem diversos métodos para determinação do amortecimento, os quais podem ser obtidos basicamente por dois caminhos: mediante a duração da resposta do sistema a uma excitação transitória (exemplo: método do decremento logarítmico) e em função da resposta do sistema em função da frequência (exemplo: método da largura de meia banda de potência). O método do decremento logarítmico calcula o amortecimento a partir da atenuação da resposta acústica do material ou estrutura após uma excitação por impulso. O método da largura de meia banda de potência calcula o amortecimento através da análise da frequência do sinal oriundo da vibração, a partir da relação entre a largura de banda e a frequência central de uma ressonância. Ambos os métodos consideram um modelo para os cálculos, normalmente o modelo de amortecimento viscoelástico. A escolha do método depende principalmente da faixa do amortecimento e da frequência de vibração.<sup>3</sup>

Nos tópicos seguintes apresentamos os tipos de amortecimento e as maneiras de calculá-los.

## 2. TIPOS DE AMORTECIMENTO

Como mencionamos anteriormente, ocorrem três formas principais de dissipação de energia em um sistema oscilatório:

- Amortecimento ou atrito interno;
- Amortecimento estrutural;
- Amortecimento fluídico.

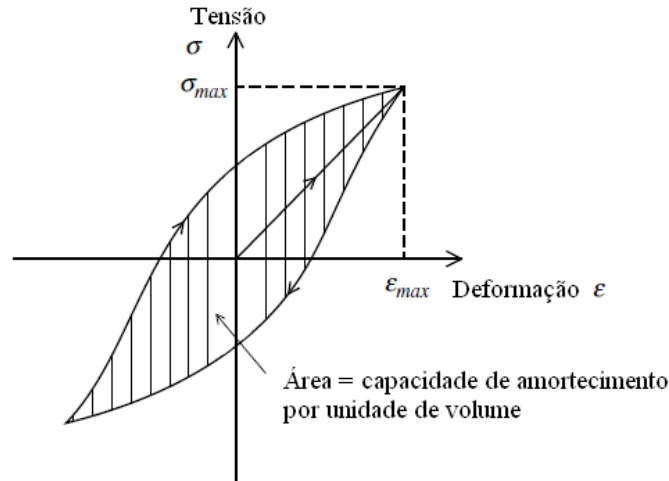
A caracterização do sistema é importante para entender como a energia mecânica é dissipada e sua dependência com a velocidade e com a amplitude de vibração. Um modelo de amortecimento deve ser escolhido para representar essa dissipação de energia mecânica e permitir o cálculo de parâmetros comparativos de amortecimento.

Faremos uma breve explicação de cada um, dando especial atenção àquele que é objeto de maior interesse neste Informativo Técnico Científico, o chamado amortecimento interno.

### 2.1 Amortecimento Interno

O amortecimento interno está associado aos defeitos de microestrutura, como por exemplo, contornos de grãos e impurezas; efeitos termoelásticos causados por gradientes locais de temperatura; efeitos de correntes de Foucault em materiais ferromagnéticos; movimentos de discordâncias em metais; e

movimento das cadeias em polímeros. Existem dois tipos diferentes de modelos que são utilizados para representar o amortecimento interno, o amortecimento viscoelástico e o amortecimento histerético. O nome histerético é hoje impróprio, porque todos os tipos de amortecimento interno estão associados com efeitos da curva de histerese.<sup>3</sup> A tensão ( $\sigma$ ) e a deformação ( $\epsilon$ ) estão relacionadas como mostra a Figura 1.



**Figura 1:** Curva de histerese típica para amortecimento mecânico.<sup>3</sup>

Desta forma, a capacidade de amortecimento por unidade de volume, chamada de  $d$ , é dada por uma integral cíclica:

$$d = \oint \sigma d\epsilon \quad (1)$$

Para qualquer dispositivo amortecedor há uma curva de histerese correspondente. Neste caso, a integral cíclica da força com o respectivo deslocamento, que corresponde à área da curva de histerese, é igual ao trabalho feito pela força de amortecimento. Daí resulta que esta integral é a energia dissipada por ciclo de movimento. Isto é, a capacidade de amortecimento, quando dividida pelo volume do material, fornece a capacidade de amortecimento por unidade de volume.<sup>3</sup>

### 2.1.1 Amortecimento Viscoelástico

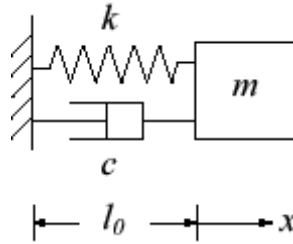
O movimento de um sistema pode ser descrito por equações diferenciais, baseadas na Lei de Newton, que envolvem parâmetros variáveis no tempo. Os sistemas podem também ser classificados de acordo com o número de graus de liberdade (GDL) do movimento, ou seja, o número de coordenadas independentes para descrever o movimento.<sup>9</sup>

No modelo viscoelástico parte-se do pressuposto de que a natureza do amortecimento é viscosa e a força de atrito é proporcional à velocidade, representando uma oposição ao movimento, sendo descrita pela equação:

$$F = -c \dot{x}, \quad (2)$$

onde  $c$  é uma constante de proporcionalidade e  $\dot{x}$  a velocidade de deslocamento de uma massa em relação a um ponto fixo. Como exemplo de um sistema com amortecimento, podemos imaginar um pistão dentro de um cilindro preenchido com um líquido, considerando o sistema como massa-mola-amortecedor com um grau de liberdade<sup>3</sup> como ilustrado na Figura 2. Sendo  $m$  a massa,  $k$  a constante elástica da mola e  $c$  o coeficiente de amortecimento viscoso, podemos representar este sistema pela seguinte equação:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (3)$$



**Figura 2:** Modelo de um oscilador harmônico amortecido (amortecedor viscoelástico).

Reescrevendo esta equação, temos:

$$\ddot{x} + \frac{c}{m} \dot{x} + \frac{k}{m} x = 0 \quad (4)$$

Definindo-se

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{e} \quad \zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (5)$$

onde  $\omega_0$  é a frequência natural de vibração e  $\zeta$  representa a taxa de amortecimento ou apenas amortecimento. Desta forma, reescrevendo a equação, e utilizando-se os novos parâmetros temos que:

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_0\dot{x} + \omega_0^2 x = 0 \quad (6)$$

e assumindo a solução<sup>10</sup>

$$x = e^{\gamma t}, \quad (7)$$

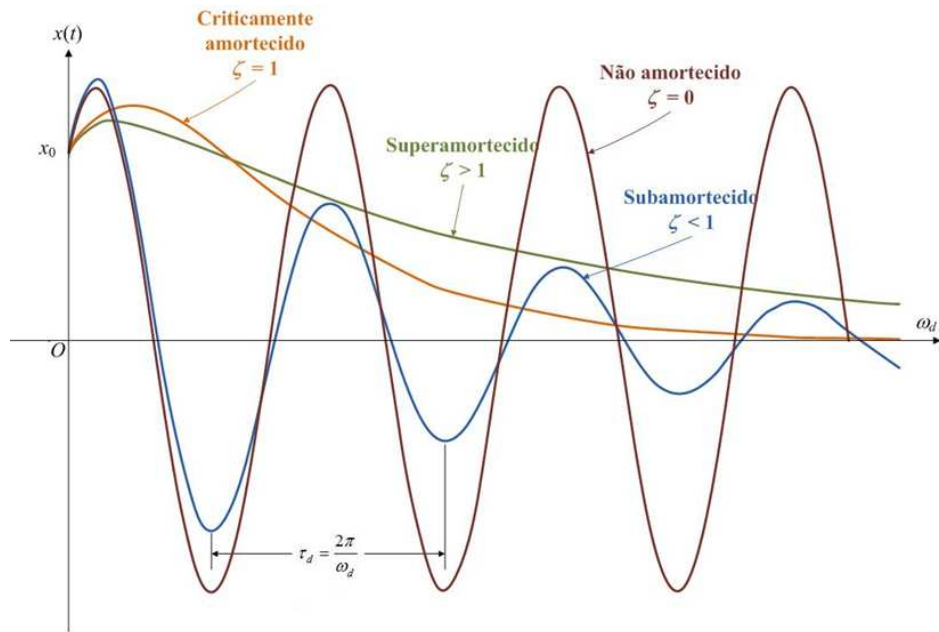
chegamos a  $\gamma$  descrito por

$$\gamma = \omega_0(-\zeta \pm \sqrt{\zeta^2 - 1}) \quad (8)$$

Desta forma, o comportamento descrito pela equação acima depende da solução de  $\gamma$ :

- ✓ Para  $\zeta > 1$ : há duas soluções reais e chamamos de caso superamortecido;
- ✓ Para  $\zeta = 1$ : há uma solução real e chamamos de caso criticamente amortecido;
- ✓ Para  $0 \leq \zeta < 1$ : há duas soluções complexas e chamamos de caso sub-amortecido.

Os casos superamortecido e criticamente amortecido são não-oscilatórios (Figura 3) e, portanto, não serão discutidos neste Informativo Técnico Científico.



**Figura 3:** Ilustração dos fatores de amortecimento.

A solução em que  $0 \leq \zeta < 1$ , sistema sub-amortecido, possui a equação:

$$x(t) = A_0 e^{-\zeta\omega_0 t} \cos(\omega_d t + \varphi) \quad (9)$$

em que  $A_0$  é a amplitude inicial de vibração,  $\varphi$  é a fase inicial da vibração e  $\omega_d$  é chamada de frequência natural amortecida e é descrita por:

$$\omega_d = \omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (10)$$

Este modelo é conhecido como sistema linear amortecido com um grau de liberdade.<sup>3,10</sup> Assumindo que a ressonância de materiais pode ser vista como uma associação de vários sistemas de um grau de liberdade, o modelo de vibração é dado por:

$$x(t) = \left[ \sum_{i=1}^N A_i e^{-\zeta_i \omega_{ni} t} \cos(\omega_{di} t + \varphi_i) \right] + R_{wn} \quad (11)$$

em que  $A_i$ ,  $\zeta_i$ ,  $\omega_{ni}$ ,  $\omega_{di}$ ,  $\varphi_i$  são, respectivamente, amplitude inicial, amortecimento, frequência natural de vibração, frequência natural amortecida e fase inicial do  $i$ -ésimo modo de vibração. O termo  $R_{wn}$  é um ruído branco descorrelacionado do sinal.

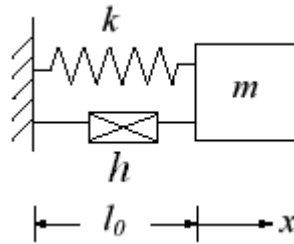
### 2.1.2 Amortecimento Histerético

Para alguns tipos de materiais, observa-se que a força do amortecimento não depende significativamente da frequência de oscilação (ou frequência do movimento harmônico). Este tipo de amortecimento interno é chamado de amortecimento histerético.

A constante de amortecimento neste caso pode ser representada por:

$$c = \frac{h}{\omega} \quad (12)$$

que é válida para o movimento harmônico de frequência  $\omega$ . Esta situação é vista na Figura 4.



**Figura 4:** Modelo de um oscilador harmônico amortecido (amortecedor histerético).

Assim, a equação que descreve o amortecimento histerético é:

$$F = -\frac{h}{\omega} \dot{x}, \quad (13)$$

## 2.2 Amortecimento Estrutural

O amortecimento estrutural é resultado da dissipação de energia mecânica causada por fricção devido ao movimento relativo entre componentes e por impacto ou contato intermitente nas articulações de um sistema mecânico ou estrutural.<sup>3</sup> O comportamento da energia de dissipação depende do sistema mecânico em particular e, portanto, é extremamente difícil desenvolver um modelo analítico generalizado. A dissipação de energia é normalmente representada pelo modelo de Coulomb.

Uma grande proporção da energia mecânica dissipada em edifícios, pontes, trilhos e muitas outras estruturas de engenharia civil e maquinários, como robôs e veículos, ocorre através do mecanismo de amortecimento estrutural. Neste sentido o amortecimento interno torna-se normalmente insignificante comparado ao amortecimento estrutural.

Este tipo de amortecimento é também conhecido como amortecimento de Coulomb (deslizamento entre superfícies secas ou com lubrificação deficiente); a força é constante e proporcional à normal às superfícies deslizantes e em sentido contrário ao movimento.<sup>11</sup>

$$F = c \operatorname{sgn}(\dot{q}) \quad (14)$$

onde  $c$  representa uma constante de fricção e  $\dot{q}$  o deslocamento relativo.<sup>3</sup> A função *signum* é definida por:<sup>3</sup>

$$\operatorname{sgn}(v) = \begin{cases} 1 & \text{para } v \geq 0 \\ -1 & \text{para } v < 0 \end{cases} \quad (15)$$

## 2.3 Amortecimento Fluídico

Este tipo de amortecimento corresponde a um componente mecânico movendo-se em um fluido. A força de arraste é expressa em função da densidade do fluido,  $\rho$ , de uma constante de arraste,  $c$ , (em função do número de Reynold's e da geometria) e da velocidade relativa,  $\dot{q}$ .<sup>3</sup>

$$F = \frac{1}{2} c_d \rho \dot{q}^2 \operatorname{sgn}(\dot{q}) \quad (16)$$

## 3. MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO

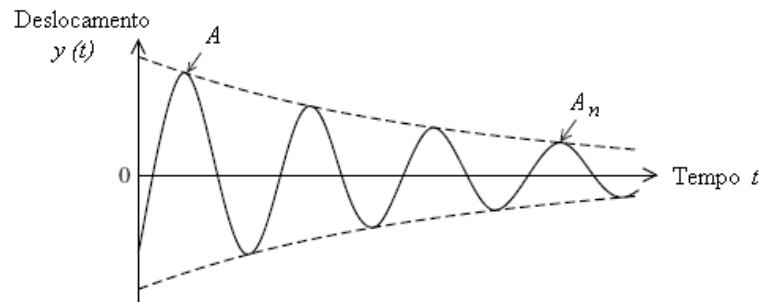
Os métodos de determinação do amortecimento são diversos e a escolha depende principalmente da faixa de amortecimento e da frequência de vibração.<sup>3</sup> Os mais utilizados, o do decremento logarítmico e o da meia banda serão vistos com maiores detalhes, enquanto que os demais podem ser encontrados nas referências aqui citadas, como por exemplo na [referência 3](#).

É importante ressaltar que para os cálculos que se seguem, utilizamos o modelo do amortecimento viscoelástico (descrito acima).

### 3.1 Método do Decremento Logarítmico

O decremento logarítmico, que é consequência de um simples impulso provocado no sistema (em vibração livre) é obtido através da razão entre duas amplitudes sucessivas do sinal. O termo decremento logarítmico refere-se à taxa de redução logarítmica, relacionada com a redução do movimento após o impulso, pois a energia é transferida para outras partes do sistema ou é absorvida pelo próprio elemento. Representa o método mais utilizado para calcular o amortecimento.

Quando um sistema oscilatório com um grau de liberdade, com amortecimento viscoso é excitado por um impulso (técnica de excitação por impulso, *Sonelastic*®) sua resposta vem na forma de decaimento no tempo (Figura 5), dada por:



**Figura 5:** Resposta ao impulso para um oscilador simples.<sup>3</sup>

$$y(t) = y e^{-\zeta \omega_0 t} \sin(\omega_d t) \quad (17)$$

Esta equação é análoga à equação 9, onde a frequência natural amortecida, dada pela equação 10, é:

$$\omega_d = \omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2}.$$

Se a resposta no tempo  $t = t_n$  é denotada por  $y$ , e a resposta no tempo  $t = t_n + 2\pi r / \omega_d$  é denotada por  $y_n$ , então, da equação 17, temos que:

$$\frac{y_n}{y} = \exp\left(-\zeta \frac{\omega_0}{\omega_d} 2\pi r\right), \quad n = 1, 2, \dots \quad (18)$$

Suponha que  $y$  corresponde a um ponto no decaimento da função com magnitude igual a  $A$ , e que  $y_n$  corresponde ao pico,  $r$  ciclos mais tarde, com magnitude  $A_n$ . Assim, temos que:

$$\frac{A_n}{A} = \exp\left(-\zeta \frac{\omega_0}{\omega_d} 2\pi r\right) = \exp\left[-\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} 2\pi r\right] \quad (19)$$

onde o valor da frequência amortecida (Equação 10) foi utilizado. Desta forma, o decremento logarítmico ( $\delta$ ), é obtido por:

$$\delta = \frac{1}{n} \ln\left(\frac{A}{A_n}\right) = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (20)$$

Em termos do amortecimento ( $\zeta$ ), temos:



$$\zeta = \frac{1}{\sqrt{1+(2\pi/\delta)^2}} \quad (21)$$

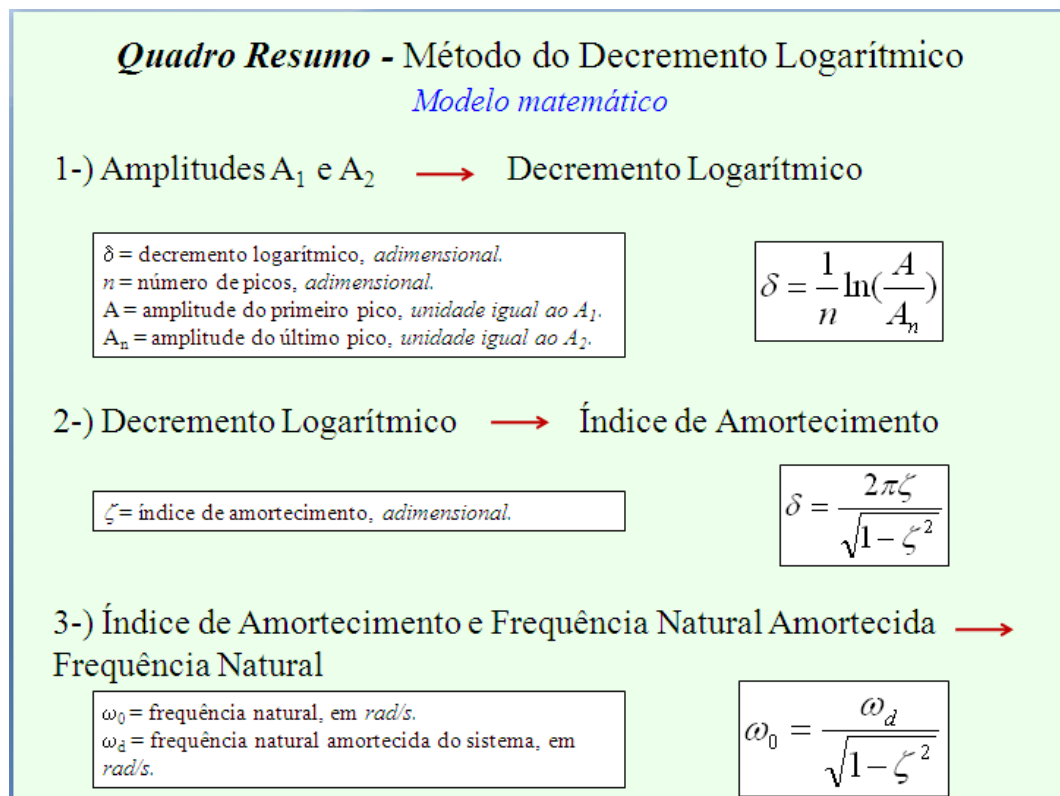
Quando o amortecimento é baixo ( $\zeta < 0,1$ ), a frequência de amortecimento é praticamente igual à frequência natural, ou seja,  $\omega_d \cong \omega_0$ , e então a Equação 19 pode ser escrita como:

$$\frac{A_n}{A} \cong \exp(-\zeta 2\pi r) \quad (22)$$

ou ainda,

$$\zeta = \frac{1}{2\pi} \ln\left(\frac{A}{A_n}\right) = \frac{\delta}{2\pi} \quad \text{para } \zeta < 0,1 \quad (23)$$

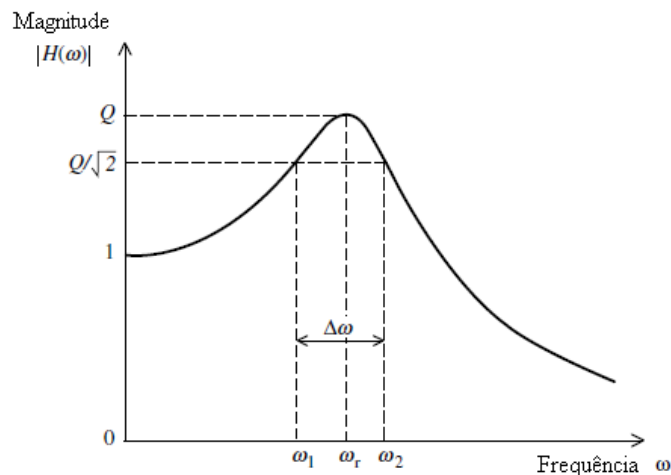
A figura abaixo apresenta um resumo dos principais conceitos apresentados a respeito do método do decremento logarítmico.



**Figura 6:** Resumo das principais informações para a determinação do amortecimento pelo método do decremento logarítmico.

### 3.2 Método da largura de banda

Neste método a medida do amortecimento é baseada na resposta da frequência. A largura da banda (a meia potência) é definida como a largura da curva da resposta de frequência quando a magnitude ( $Q$ ) é  $(1/\sqrt{2})$  vezes o valor do pico.<sup>3</sup> Este valor é denotado por  $\Delta\omega$ , como pode ser visto pela Figura 7.



**Figura 7:** Método da largura de banda para determinação do amortecimento em um sistema com um grau de liberdade.<sup>3</sup>

O valor de  $\Delta\omega$  pode ser relacionado com o amortecimento da seguinte forma:

$$\Delta\omega = 2\zeta\omega_0 = 2\zeta\omega_r \quad (24)$$

e portanto, o amortecimento pode ser estimado através da largura de banda, usando a relação:

$$\zeta = \frac{1}{2} \frac{\Delta\omega}{\omega_r} \quad (25)$$

Há ainda outros métodos para determinação do amortecimento, que não serão tratados neste Informativo Técnico Científico, uma vez que os principais métodos (Decremento Logarítmico e Largura de Banda) foram explicitados.

#### 4. APLICAÇÕES DO AMORTECIMENTO

A aplicação clássica do amortecimento diz respeito à área de engenharia civil, no sentido de garantir a integridade das estruturas no caso de abalos sísmicos. Porém a caracterização do amortecimento é empregada também para verificação da qualidade e resistência de soldas e juntas, análise de dano a maquinário industrial e motores, ajuste de salas acústicas e estudo de concretos refratários para a avaliação do dano por choque térmico. Dada a sua grande importância, apresentamos abaixo, com maiores detalhes, as aplicações mais relevantes.

✓ **Engenharia Civil:** Nas duas últimas décadas, o uso da chamada técnica de isolamento sísmico de base em estruturas civis, para a proteção de edifícios contra eventuais terremotos, tem-se desenvolvido rapidamente e tem alcançado ampla aceitação na engenharia sísmica. As vantagens que esta tecnologia fornece no comportamento dinâmico de estruturas submetidas à ação sísmica fazem desta técnica uma alternativa dos métodos convencionais para combater terremotos, que são baseados somente na resistência estrutural e na capacidade de dissipação de energia. Esta nova estratégia tecnológica tem como principal objetivo a prevenção de danos dos elementos estruturais e não estruturais dos edifícios, os quais podem conter pessoas, equipamentos valiosos, ou material perigoso. Desta maneira os edifícios isolados, fornecem mais segurança do que os edifícios não isolados.<sup>12</sup>

O conceito de isolamento de base<sup>13</sup> consiste em desacoplar o edifício ou a superestrutura das componentes horizontais do movimento do solo, pela interposição de elementos estruturais de baixa rigidez horizontal, entre a superestrutura e a fundação. Isto permite que a frequência fundamental do edifício com isolamento de base seja inferior à frequência fundamental deste, se executado com base fixa, bem como à frequência predominante de excitação sísmica.

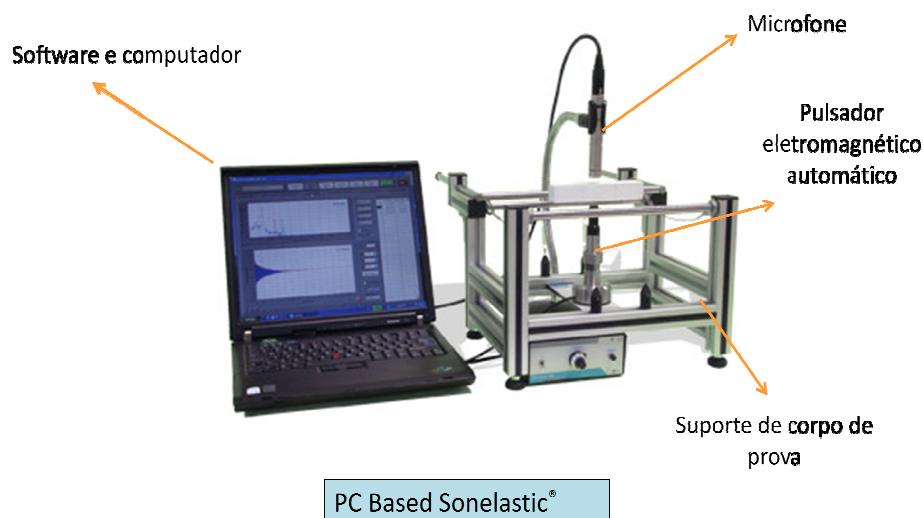
Este tipo de isolamento vem sendo empregado em diversos países, em usinas nucleares, edifícios, pontes e plataformas de petróleo.

✓ **Concretos Refratários:** O conhecimento do amortecimento tem sido empregado no estudo de concretos refratários para a avaliação do dano por choque térmico.<sup>4,5</sup> A tensão mecânica induzida pelo gradiente de temperatura do choque térmico provoca a nucleação e propagação de micro-trincas e trincas que degradam as propriedades mecânicas do material determinando em grande parte a sua vida útil.<sup>6,7</sup> A nucleação e a evolução destas micro-trincas e trincas podem ser monitoradas com a caracterização do amortecimento.<sup>4,5,8</sup>

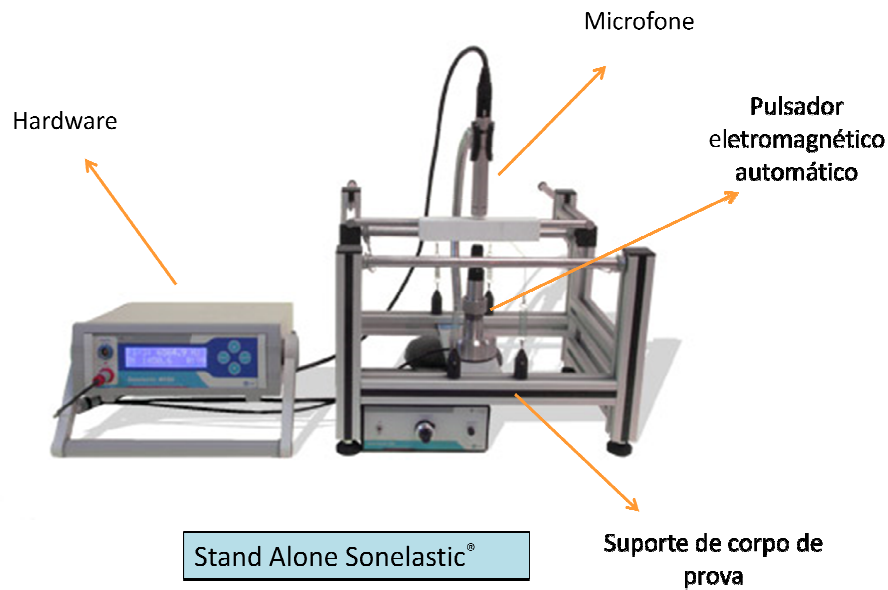
A técnica de excitação por impulso é utilizada no cálculo do amortecimento. O impacto de um pino metálico excita as frequências flexionais e torcionais do corpo de prova; utilizando-se o método do decremento logarítmico (para o modelo de amortecimento viscoelástico) determina-se o amortecimento. Equipamentos modernos, como o Sonelastic®, fornecem as frequências naturais, além das harmônicas e o amortecimento dos mais diversos tipos de materiais, de maneira prática e rápida. O equipamento utiliza um software, especialmente desenvolvido, para calcular o decremento logarítmico e fornecer o valor do amortecimento além dos módulos elásticos (<http://www.atcp.com.br/pt/produtos/caracterizacao-materiais/sonelastic.html>).

Este equipamento possibilita ainda, medições em função da temperatura, permitindo um estudo das mudanças nas características microestruturais dos materiais. O ensaio é não-destrutivo e, portanto, o corpo de prova pode voltar às suas condições normais de trabalho, se for o caso.

A medição dos módulos elásticos juntamente com o amortecimento através da técnica de excitação por impulso possibilita um estudo detalhado do amortecimento associado ao atrito interno e sua microestrutura, uma vez que amostras com dano apresentam um aumento significativo no valor do amortecimento.

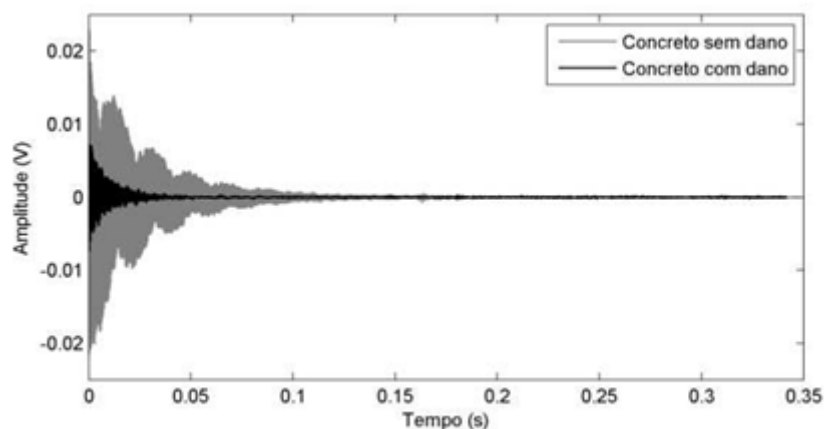


**Figura 8:** Equipamento desenvolvido pela ATCP do Brasil, Sonelastic®, para medição do amortecimento e dos módulos elásticos através do método de excitação por impulso.



**Figura 9:** Equipamento desenvolvido pela ATCP do Brasil, [Sonelastic®](#), para medição do amortecimento e dos módulos elásticos através do método de excitação por impulso. Nesta configuração o software está embarcado em um hardware.

O software desenvolvido para o equipamento [Sonelastic®](#), gera gráfico como o que é mostrado a seguir:



**Figura 10:** Comparação entre o sinal no tempo de um concreto que possui dano e um concreto sem dano. (Fonte: MUSOLINO, B.C., PEREIRA, A.H.A., RODRIGUES, J.A., MACIEL, C.D., Algoritmo para a determinação do coeficiente de amortecimento de materiais pela técnica da excitação por impulso. Trabalho completo submetido para o XVIII Congresso Brasileiro de Automática).

A [Figura 10](#) permite a visualização das mudanças no amortecimento, temos um gráfico de duas amostras irmãs de refratários, sendo uma com dano (representada pela cor preta) e outra sem dano (cor cinza). Ambas foram excitadas com impacto com força análoga, mesmo assim é possível observar uma maior absorção de energia no sinal da amostra com dano, ou seja, um amortecimento maior.

Assim, fica evidente a importância do amortecimento na investigação da qualidade e resistência dos diferentes tipos de materiais.

## 5. CONCLUSÕES

Apresentamos neste Informativo Técnico Científico o conceito de amortecimento e os tipos de classificação nos quais ele se divide. Mostramos os métodos de determinação experimental bem como as importantes aplicações e desta forma, podemos inferir que:

O amortecimento é uma das propriedades mais sensíveis de materiais e estruturas, sendo seu conhecimento fundamental para diversas aplicações, como:

- ✓ Estudo de materiais, para a avaliação de alterações microestruturais e ocorrência de defeitos
- ✓ Estudo de concretos refratários, para avaliação do dano por choque térmico;
- ✓ Construção civil, a fim de evitar os desastres causados por abalos sísmicos;
- ✓ Verificação da qualidade e resistência de soldas e juntas;
- ✓ Ajuste de salas acústicas, etc.

A determinação desta importante propriedade pode ser conseguida facilmente através de equipamentos avançados e disponíveis no mercado nacional ([Sonelastic®](#)).

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

<sup>1</sup> LAZAN, B.J. **Damping of Materials and Members in Structural Mechanics**. Oxford, USA: Pergamon Press, 1968.

<sup>2</sup> DIETERLE, R., BANCHMANN, H. Experiments and Models for the Damping Behaviour. **International Association for Bridge and Structural Engineering Report of the Working Comissions**, v. 34, p. 69-82, 1981.

<sup>3</sup> SILVA, C.W. **Vibration Damping, control, and design**. Vancouver, Canada: Taylor & Francis Group, 2007.

<sup>4</sup> COPPOLA, J.A., BRADT, R.C. Thermal-Shock Damage in SiC. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 56(4), p. 214-218, 1973.

<sup>5</sup> TONNESEN, T., TELLE, R. Thermal Shock Damage in Castables: Microstructural Changes and Evaluation by a Damping Method. **Ceramic Forum Internacional**, v. 84(9), p. E132-136, 2007.

<sup>6</sup> HASSELMAN, D.P.H. Unified Theory of Thermal Shock Fracture Initiation and Crack Propagation in Brittle Ceramics. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 82(11), p. 600-604, 1969.

<sup>7</sup> KINERY, W.D. Factors Affecting Thermal Stress Resistance of Ceramic Materials. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 38(1), p. 3-15, 1955.

<sup>8</sup> CHOWDHURY, S.H. **Damping Characteristics of Reinforced and Partially Prestressed Concrete Beams**, PhD Thesis, Griffith University, 1999.

<sup>9</sup> ALMEIDA, S.F. Análise Dinâmica Experimental da Rigidez de Elementos de Concreto Submetidos à Danificação Progressiva até a Ruptura. 2005. 193f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2005.

<sup>10</sup> THORBY, D. **Structural Dynamics and Vibrations in Practice - An Engineering Handbook**. Oxford, UK: Elsevier Ltd, 2008.

<sup>11</sup> DIÓGENES, H.J.F. Análise Tipológica de Elementos e Sistemas Construtivos Pré-Moldados de Concreto do Ponte de Vista de Sensibilidade a Vibração em Serviço. 2010. 248f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2010.

<sup>12</sup> CANO, N.A.O. Resposta Sísmica de Edifícios com Sistemas de Isolamento de Base. 2008. 110f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2008.

<sup>13</sup> KELLY, J.M., NAEIM, F. **Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice**. John Wiley & Sons, New York: United States of America, 1999.

Você tem sugestões e/ou críticas para melhorar este informativo?

Envie para [apl@atcp.com.br](mailto:apl@atcp.com.br). Obrigado!