

Diploma de Formação Avançada em Engenharia de Estruturas

Sistemas de Protecção Sísmica de Estruturas

Luís Guerreiro

3 de Maio de 2007



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO  
ICIST

INTRODUÇÃO

**Sistemas de Protecção Sísmica:**

São dispositivos que melhoram o comportamento sísmico das estruturas sem o recurso à capacidade de deformação das estruturas.

Podem actuar alterando as características dinâmicas da estrutura ou aumentando a sua capacidade de dissipar energia.

**Classificação dos Sistemas de Protecção Sísmica:**

- Sistemas Passivos – não necessitam de fornecimento de energia
- Sistemas Activos – necessitam de energia para controlar o movimento da estrutura
- Sistemas Semi-activos – necessitam de energia para modificar as características dos dispositivos



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO  
ICIST

## INTRODUÇÃO

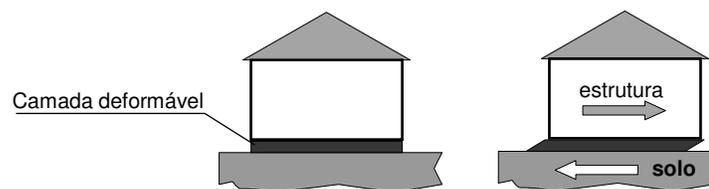
### Sistemas de Protecção Passiva:

- Isolamento de Base
- Dissipadores de Energia: Histeréticos  
Viscosos  
Visco-elásticos
- Ligas com memória de forma (SMA “*Shape memory alloys*”)



### Isolamento de Base – O conceito

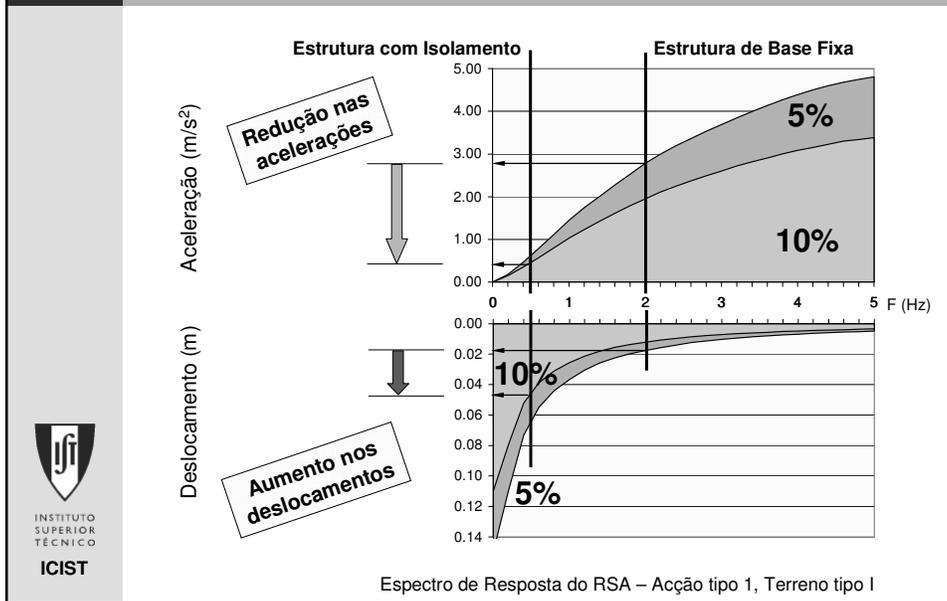
De acordo com o conceito de Isolamento de Base o edifício (ou estrutura) é “separado” das componentes horizontais do movimento do solo através da interposição de uma camada com baixa rigidez horizontal entre a estrutura e a fundação.



A consequência imediata da interposição de uma camada deformável é a redução da frequência própria de vibração.



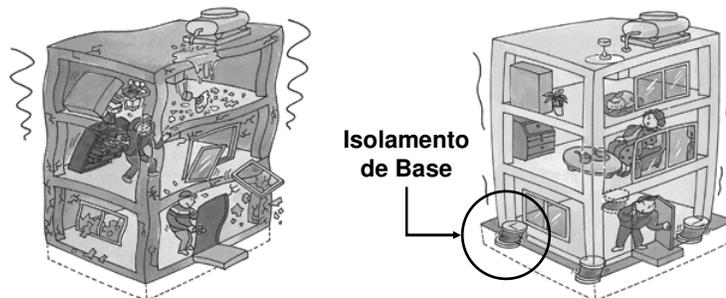
### Isolamento de Base – Vantagens e Inconvenientes



### Isolamento de Base – As deformações

Numa estrutura com isolamento de base os deslocamentos horizontais concentram-se ao nível da camada de isolamento. A restante estrutura quase não se deforma, comportando-se como um corpo rígido.

Aumentam os deslocamentos, mas não a deformação  
As acelerações são reduzidas



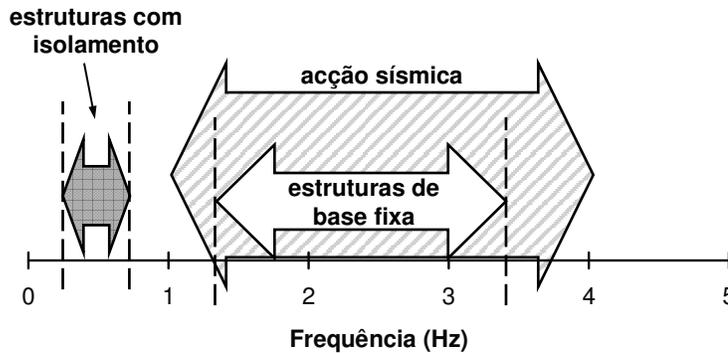
Sem Isolamento de Base

Com Isolamento de Base



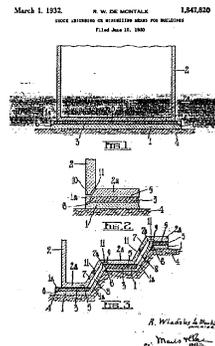
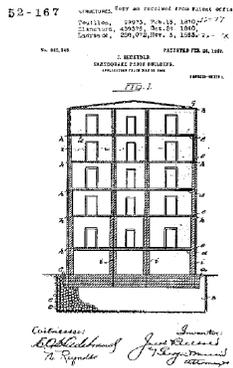
### Isolamento de Base – A acção sísmica

A frequência própria das estruturas isoladas tem ainda a vantagem de ser inferior às frequências com maior conteúdo energético da acção sísmica.



### Evolução dos Sistemas de Isolamento de Base – O início

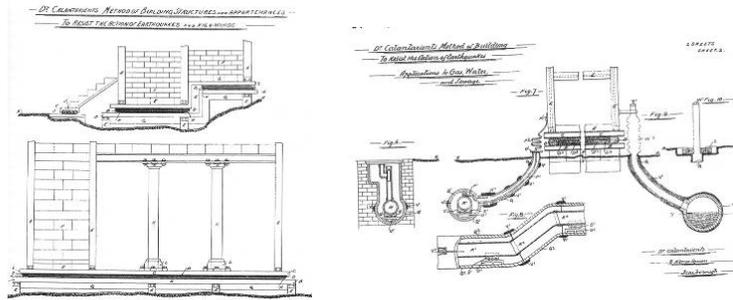
No início do sec. XX aparece a primeira referência a um sistema de protecção sísmica que pode ser considerado Isolamento de Base.



Este sistema foi patenteado em Munique no ano de 1906 e consistia numa placa rígida que servia de base de suporte ao edifício e que, por sua vez, estava assente sobre um conjunto de roletes de material rijo.

### Evolução dos Sistemas de Isolamento de Base – 1909

Em 1909 foi registada outra patente, desta vez por um médico, Dr. Calantarients, que concebeu uma solução em que o edifício assenta sobre uma camada de talco.



Como se pode observar na figura, além da solução de isolamento, o Dr. Calantarients concebeu um conjunto de dispositivos para ligação das condutas ao exterior com capacidade para acomodar grandes deslocamentos.



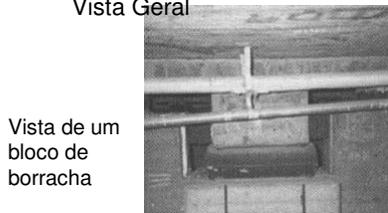
### Evolução dos Sistemas de Isolamento de Base – 1969

Em 1969 surge em Skopje, na então Jugoslávia, aquele que é apontado como o primeiro exemplo de aplicação de isolamento de base – a escola Heinrich Pestalozzi.



Vista Geral

Este edifício encontra-se assente em blocos de borracha não reforçada, e ligado ao exterior por elementos fusíveis. Logo que estes elementos fusíveis se quebrem o edifício fica a vibrar livremente sobre os apoios de borracha.



Vista de um bloco de borracha



Blocos de vidro - Fusíveis



## Isolamento de Base – Características essenciais

Características que um sistema de isolamento de base deve apresentar:

- Capacidade de suporte
- Baixa rigidez horizontal
- Capacidade de dissipação de energia ( $\zeta > 5\%$ )
- Capacidade de restituição à posição inicial



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO  
ICIST

## Tipos de Sistemas de Isolamento de Base

Actualmente são os seguintes os principais tipos de Sistemas de Isolamento de Base:

- Blocos de Borracha de Alto Amortecimento - HDRB
- Blocos de Borracha com Núcleo de Chumbo - LRB
- Sistema Pendular com Atrito - FPS
- Blocos de apoio de Borracha em associação com dissipadores

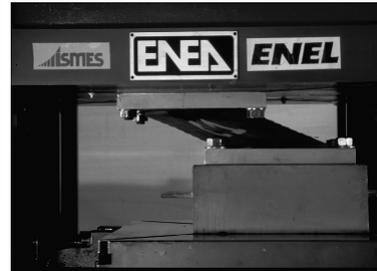
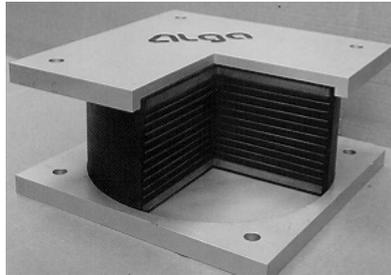


INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO  
ICIST

## Tipos de Sistemas de Isolamento de Base – HDRB

### Blocos de Borracha de Alto Amortecimento – HDRB (*High Damping Rubber Bearing*)

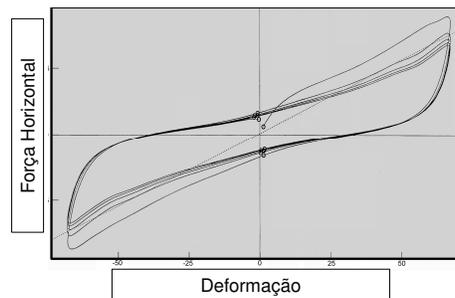
Através da utilização de aditivos apropriados as propriedades de amortecimento da mistura de borracha são optimizadas. Desta forma são conseguidos amortecimentos entre 10% e 20%.



## Tipos de Sistemas de Isolamento de Base – HDRB

### Propriedades dos apoios HDRB

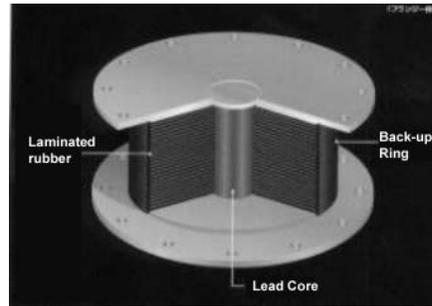
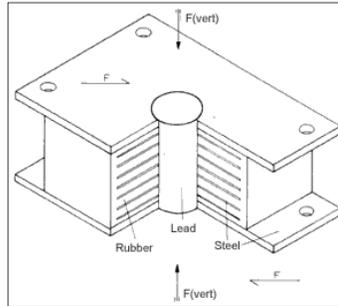
- Coeficientes de amortecimento entre 10% e 20%
- Módulo de distorção (G) entre 0.4MPa e 1.4MPa
- A rigidez diminui com o aumento da distorção
- Para grandes distorções a rigidez volta a aumentar



## Tipos de Sistemas de Isolamento de Base – LRB

### Blocos de Borracha com Núcleo de Chumbo – LRB (*Lead Rubber Bearing*)

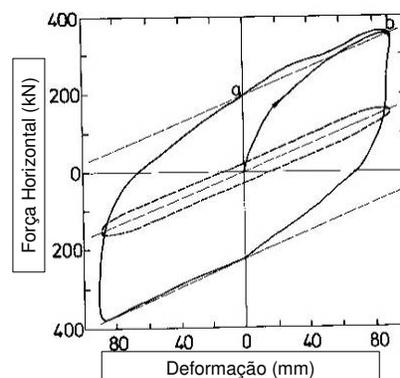
Bloco de apoio de borracha corrente ao qual foi adicionado um núcleo de chumbo cilíndrico. O bloco de apoio tem um comportamento bi-linear conseguindo elevados valores de amortecimento através da plastificação do núcleo de chumbo



## Tipos de Sistemas de Isolamento de Base – LRB

### Propriedades dos apoios LRB

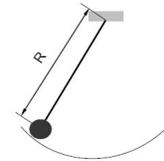
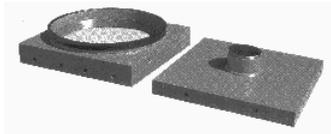
- A rigidez após a cedência do bloco é a rigidez da borracha
- A tensão de cedência ao corte do chumbo é cerca de 10MPa
- A rigidez antes da cedência é cerca de 10x a rigidez após cedência



Tipos de Sistemas de Isolamento de Base – FPS

Sistema Pendular com Atrito – FPS  
(*Friction Pendulum System*)

Sistema composto por dois elementos de aço sobrepostos. Um dos elementos apresenta no seu interior uma superfície côncava. Sobre esta superfície desliza a outra peça contendo uma ponta de aço com a extremidade articulada e revestida por um material compósito de baixo atrito.



Movimento do pêndulo



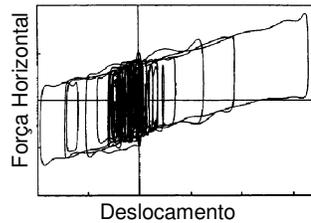
Movimento do sistema FPS



Tipos de Sistemas de Isolamento de Base – FPS

Sistema FPS

A dissipação de energia é feita por atrito. A recuperação da estrutura à posição inicial é conseguida através dum mecanismo de funcionamento inspirado no movimento do pêndulo.



Movimento do pêndulo



Movimento do sistema FPS



## Tipos de Sistemas de Isolamento de Base – Dissipadores

### Blocos de apoio de Borracha em associação com dissipadores

Este tipo de Sistema de Isolamento é uma associação de elementos de baixa rigidez horizontal com sistemas de dissipação de energia. Os elementos de baixa rigidez desempenham a função de suporte, sem qualquer exigência ao nível do amortecimento. Poderão ser blocos de apoio correntes ou sistemas deslizantes.

Os dissipadores têm como única função garantirem o nível de amortecimento necessário. Poderão ser dissipadores viscosos ou histeréticos.



## Métodos de Análise – Introdução

O método correcto para a análise de estruturas com isolamento é a análise dinâmica no domínio no tempo, pois o comportamento dos sistemas de isolamento de base é não linear.

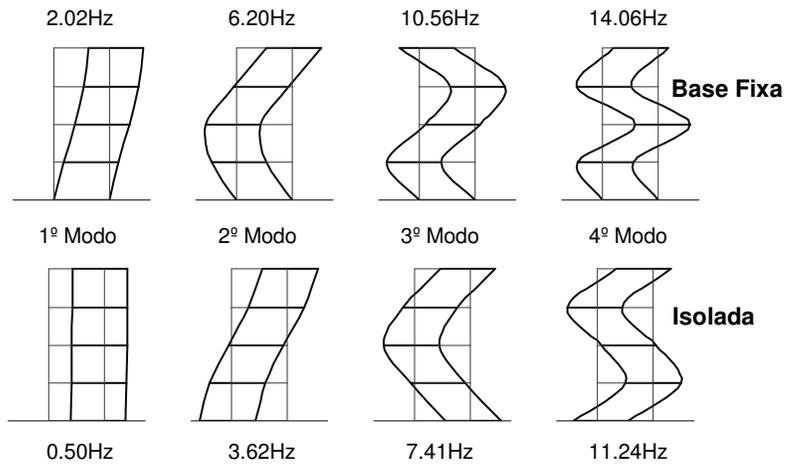
Alguns sistemas têm um comportamento próximo do linear mas têm amortecimento superior ao da estrutura pelo que invalida a análise modal clássica.

Embora o uso da análise modal não seja correcto, este método de análise permite obter bons resultados e, sobretudo, permite compreender o comportamento da estrutura isolada através da observação dos seus modos de vibração.



Métodos de Análise – Características dos modos de vibração

Comparação dos modos de vibração de uma estrutura isolada com os modos de uma estrutura de base fixa



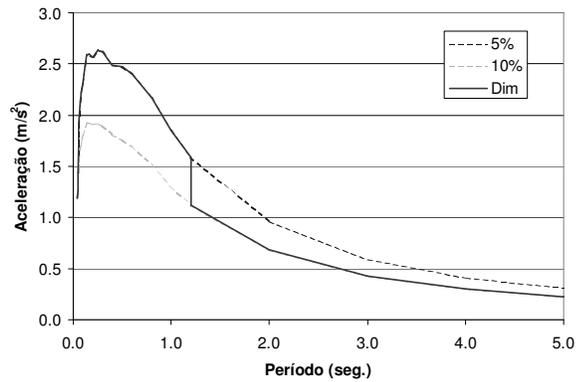
Métodos de Análise – Importância de cada modo

Modo	Base Fixa		Isolada	
	%Massa	Acum.	%Massa	Acum.
1	85.369	85.369	99.917	99.917
2	10.562	95.931	0.078	99.995
3	3.242	99.173	0.004	99.999
4	0.826	99.999	0.001	100.00

No caso da estrutura com isolamento de base o primeiro modo representa a quase totalidade da reposta.

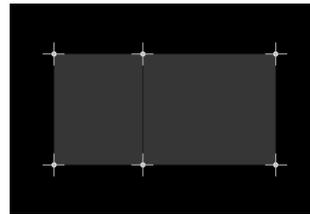
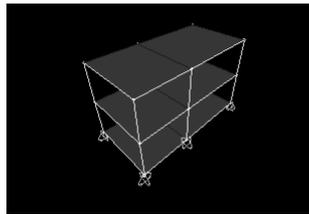


### Métodos de Análise – Espectro de resposta simplificado

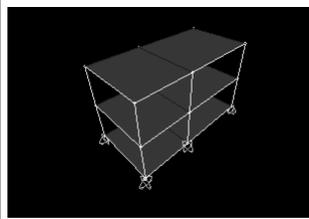


### Métodos de Análise – Modos 3D (isolamento)

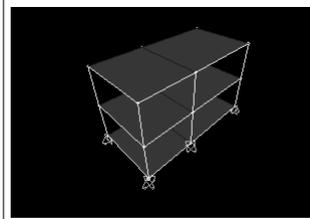
1º Modo – 0.57Hz



2º Modo – 0.58Hz

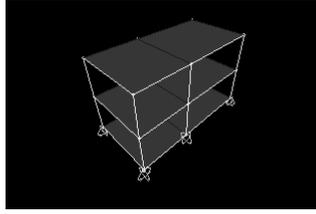


3º Modo – 0.63Hz



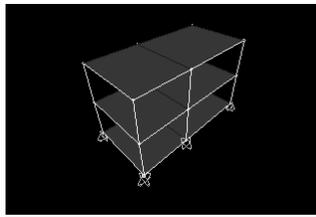
Métodos de Análise – Modos 3D (estrutura)

4º Modo – 6.28Hz

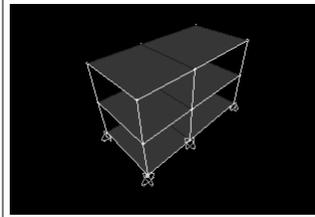


Dada a proximidade das frequências dos modos de vibração é indispensável a utilização do método **CQC** na combinação modal.

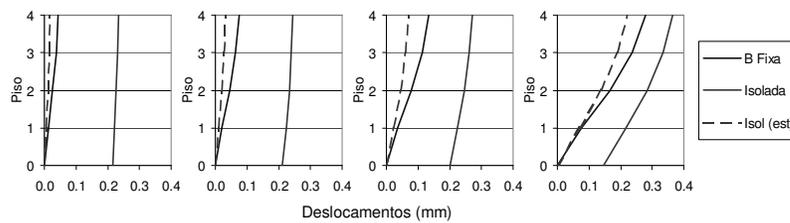
5º Modo – 6.45Hz



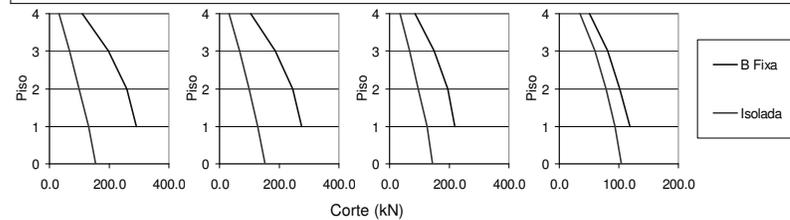
6º Modo – 7.04Hz



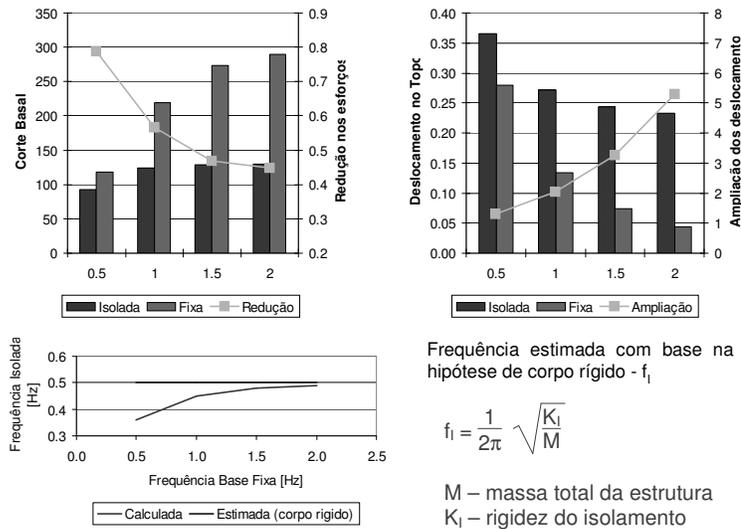
Métodos de Análise – Eficácia do Isolamento (1)



2.0 Hz	1.5 Hz	1.0 Hz	0.5 Hz	Freq. Base Fixa
0.5 Hz	0.5 Hz	0.5 Hz	0.5 Hz	Freq. Isolada
4	3	2	1	Relação



Métodos de Análise – Eficácia do Isolamento (2)



Métodos de Análise – Métodos simplificados (1)

**D** - Deslocamento no isolamento ao nível do centro de rigidez  
**V** - Força de corte basal total

$$D = S_D(f_i, \zeta_i)$$

$$V = K_i * S_D(f_i, \zeta_i)$$

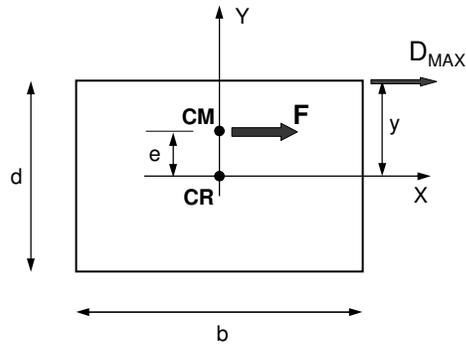
$f_i$  – frequência da estrutura isolada  
 $\zeta_i$  – coeficiente de amortecimento do isolamento  
 $K_i$  – rigidez total do isolamento  
 $S_D$  – espectro de resposta de deslocamentos



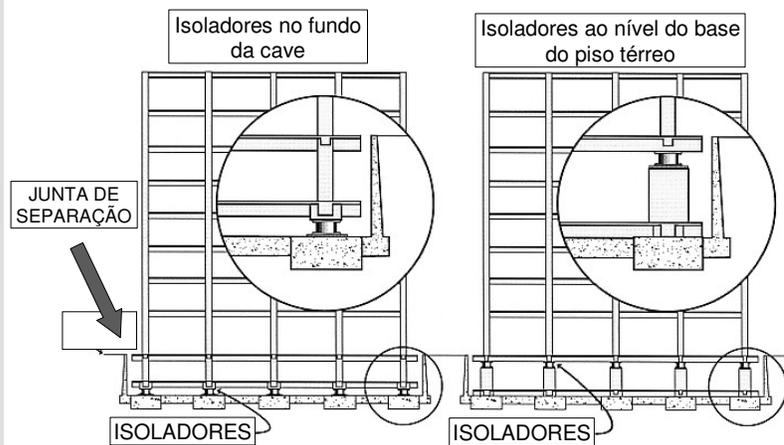
Métodos de Análise – Métodos simplificados (2)

$D_{MAX}$  - Deslocamento máximo no isolamento

$$D_{MAX} = D \left[ 1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right]$$

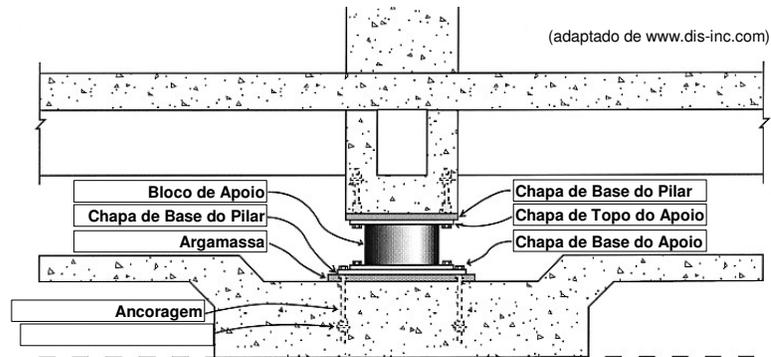


Pormenorização – Localização dos aparelhos de apoio



(adaptado de [www.dis-inc.com](http://www.dis-inc.com))

### Pormenorização – Implantação do bloco de apoio



### Pormenorização – Fases de construção



Pormenorização – Fases de construção



Pormenorização – Fases de construção



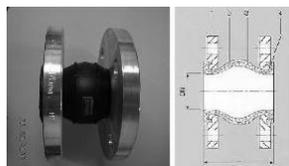
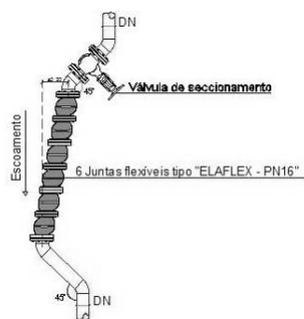
### Pormenorização – Fases de construção



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

ICIST

### Pormenorização – Ligações flexíveis em condutas de água



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

ICIST

Pormenorização – Ligações flexíveis em tubagens



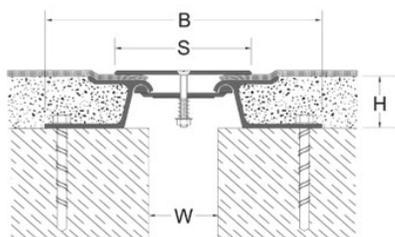
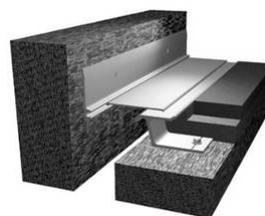
Rede de Incêndios



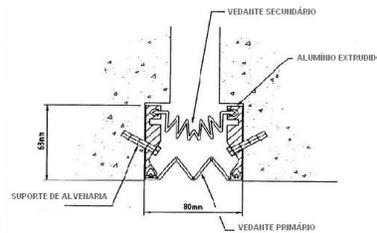
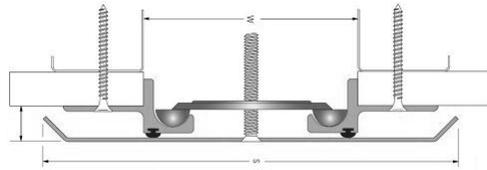
Rede de Gás



Pormenorização – Juntas em pavimentos

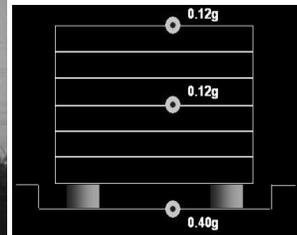


### Pormenorização – Juntas em paredes



### Exemplos de Aplicação – O edifício “WEST-1” em Kobe

O aumento da popularidade do isolamento de base no Japão ficou a dever-se essencialmente ao bom desempenho do edifício “*West Japan Postal Savings Computer Center (West-1)*” durante o sismo de Kobe.



Este edifício situa-se a cerca de 30 km do local do epicentro do sismo de Kobe de 1995. No topo foram medidas acelerações de 0.12g quando nas fundações abaixo dos isoladores foram medidas acelerações de 0.40g.

### Exemplos de Aplicação – EUA



*“Foothill Communities Law and Justice Center”* Rancho Cucamonga, Califórnia



Foi o primeiro edifício com isolamento de base a ser construído nos EEUU e o primeiro no mundo a utilizar HDRB. Está localizado a 20km da falha de S. André.

Área – 1600 m<sup>2</sup>  
Nº de Pisos – 4  
Nº de apoios – 98  
Máximo deslocamento – 380mm.

*“Fire Command and Control Facility”* Los Angeles, Califórnia



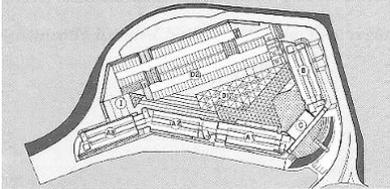
Alberga os computadores e os sistemas de comunicação para gestão de emergências na zona de Los Angeles.

[nisee.berkeley.edu/lessons/kelly.html](http://nisee.berkeley.edu/lessons/kelly.html)

### Exemplos de Aplicação – ITÁLIA



Edifício da Telecom - Ancona



O conjunto é composto por cinco edifícios de 7 pisos. O deslocamento máximo de projecto é de 145mm. Foram utilizados apoios do tipo HDRB.

## Exemplos de Aplicação – Nova Zelândia



*“William Clayton Building”, Wellington*

Foi o primeiro edifício do mundo a utilizar apoios do tipo LRB.

Foi terminado em 1981.

Tem uma estrutura de betão armado apoiada em 80 blocos LRB.

*“Te Papa – Museum of New Zealand”  
Wellington*

Edifício com 35000m<sup>2</sup> e 23 metros de altura.

142 apoios LRB.

36 apoios deslizantes em *teflon*



[www.robison-seismic.co.nz](http://www.robison-seismic.co.nz)



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

ICIST

## Exemplos de Aplicação – Turquia



*Aeroporto Ataturk, em Istambul*

O isolamento destina-se a isolar somente a cobertura.

Foram utilizados 130 dispositivos do tipo FPS.

A cobertura tem uma área de 250x225m<sup>2</sup>.

Os dispositivos estão colocados no topo das colunas, a cerca de 7m do solo.

Embora ainda em construção quando ocorreu o sismo de 1999, as colunas sofreram alguns danos pelo que foi decidido utilizar isolamento sísmico. É apresentada como uma obra de reforço.



[www.earthquakeprotection.com](http://www.earthquakeprotection.com)



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

ICIST

## Exemplos de Aplicação – Portugal



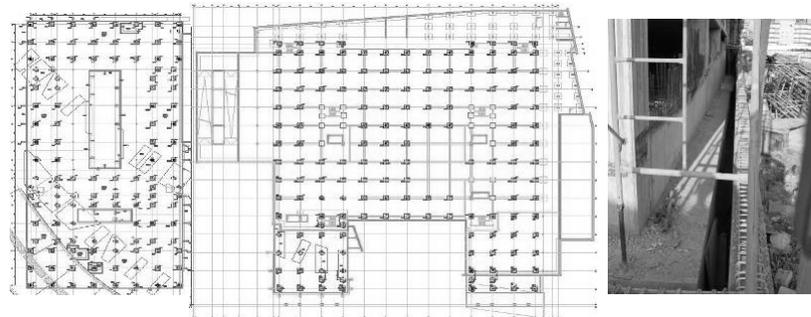
### *“Hospital da Luz”*

Primeiro edifício com isolamento de base a ser construído em Portugal

O conjunto é composto por dois edifícios separados, com um total de 315 aparelhos de apoio (HDRB).



## Exemplos de Aplicação – Portugal



## Hospitais com Isolamento de Base



Tokyo Rinkai Hospital



Augusta, Siracusa, Sicília



Martin Luther King Drew Medical Centre



Kyorin University School of Medicine



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO  
ICIST

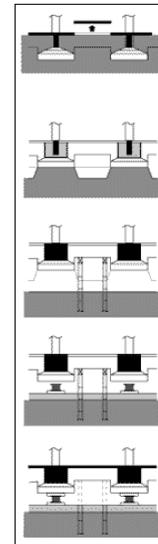
## Reforço Sísmico com Isolamento de Base (1)

São já diversos os exemplos de estruturas reforçadas sísmicamente através do uso de isolamento de base.

Para aplicar isolamento de base a uma estrutura existente é necessário “desligar” a estrutura das fundações existentes e voltar a “montá-la” sobre o novo sistema.



Hospital dos Veteranos  
Long Beach, Califórnia



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO  
ICIST

## Reforço Sísmico com Isolamento de Base (2)



*Oakland "City Hall"*  
Oakland, Califórnia

Este edifício sofreu danos durante o sismo de Loma Prieta, 1989.

A reabilitação terminou em 1995.

Construção em 1913



Foram utilizados 110 apoios LRB, com diâmetros entre 740mm e 940mm.

Durante o processo de instalação dos apoios, as colunas foram levantadas cerca de 2.5mm.

Foi criado um fosso à volta do edifício com 0.5m de largura.



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

ICIST

[www.businessimagegroup.com](http://www.businessimagegroup.com)

## Reforço Sísmico com Isolamento de Base (3)



*S. Francisco "City Hall"*  
S. Francisco, Califórnia

Este edifício foi construído em 1912.

Sofreu danos durante o sismo de Loma Prieta, 1989.

A reabilitação terminou em 1998.

Foram utilizados 530 apoios LRB.

Muitas das colunas estão apoiadas em 4 blocos.



Fase de construção



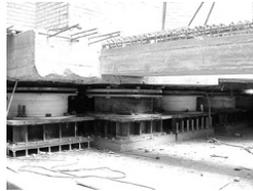
INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

ICIST

### Reforço Sísmico com Isolamento de Base (4)



*Los Angeles "City Hall"* - Los Angeles, Califórnia  
 Estrutura metálica com 28 pisos, concluída em 1928.  
 Sofreu danos durante o sismo de Northridge, 1994.  
 É actualmente o edifício mais alto com isolamento de base.



Fases de construção



Solução de isolamento de base:

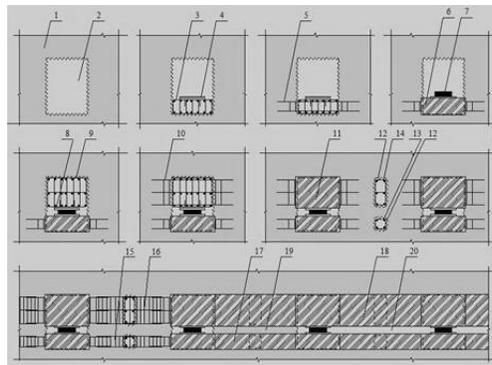
- 475 HDRB
- 60 apoios deslizantes
- 64 amortecedores viscosos



### Reforço Sísmico com Isolamento de Base (5)



*Escola na Arménia*



## Reforço Sísmico com Isolamento de Base (6)

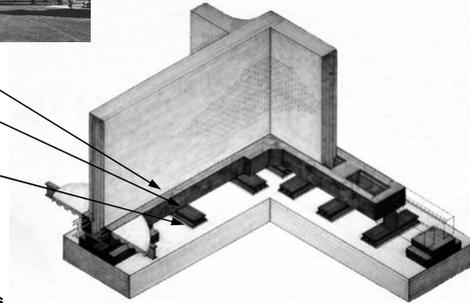


*Salt Lake City and County Building*

Estrutura composta por paredes de alvenaria não reforçada e pavimentos de madeira.

Foram utilizados 447 apoios de dois tipos: normais de borracha e de borracha com núcleo de chumbo (LRB).

- 1 - Execução das vigas laterais em BA.
- 2 - Abertura de buracos para os apoios.
- 3 - Colocação da base dos apoios.
- 4 - Colocação dos apoios.
- 5 - Colocação em carga dos apoios.
- 6 - Corte total da parede abaixo das vigas.



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO  
ICIST

## Reforço Sísmico com Isolamento de Base (7)



*Salt Lake City and County Building*



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO  
ICIST

## Reforço Sísmico com Isolamento de Base (8)



*Mackay School of Mines,  
Nevada, USA*



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

ICIST

Estrutura composta por paredes de alvenaria não reforçada e pavimentos de madeira. Isolamento de base com 67 apoios do tipo HDRB mais 42 apoios deslizantes com teflon.

## Regulamentação

Actualmente já existe regulamentação a regular a aplicação de isolamento de base a edifícios e a pontes.

### **Estados Unidos:**

Uniform Building Code (UBC) – International Conference of Building Officials

Guide Specifications for Seismic Isolation Design – AASHTO

### **Europa:**

Eurocódigo 8 (Capítulo 10)

Eurocódigo 8 – Parte 2, Pontes (Capítulo 7)

Norma Italiana



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

ICIST

## Eurocódigo 8 - Edifícios

### 10.9 Análise Estrutural

.....

O comportamento do sistema de isolamento deve apresentar as seguintes características:

- A rigidez para a deformação de dimensionamento é pelo menos 50% da rigidez para 20% da deformação de dimensionamento;
- O coeficiente de amortecimento é inferior a 30%;
- A curva força-deslocamento não varia mais do que 10% devido à taxa de aplicação das cargas ou devido à variação da carga vertical;
- O aumento da força de restituição quando a deformação varia entre 50% e 100% do deslocamento de dimensionamento deve ser superior a 2.5% do peso.



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

ICIST

## Eurocódigo 8 - Edifícios

### 10.9 Análise Estrutural

.....

#### 10.9.3 Análise Linear Simplificada

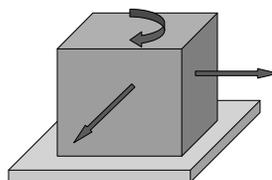
Neste método é assumido que a estrutura se comporta como um corpo rígido que se move sobre a superfície de isolamento. São considerados dois movimento horizontais de translação e o movimento de rotação em torno de um eixo vertical.

O período da estrutura deve verificar a seguinte condição:

$$3T_f < T_{eff} < 3s$$

A relação entre a rigidez vertical e a rigidez horizontal deve obedecer à seguinte regra:

$$K_v > 150 K_{eff}$$



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

ICIST

## Apoios Elastoméricos – Rigidez Vertical

A deformação vertical dum lâmina de elastómero resulta da soma de duas componentes de deformação de origem distinta. Uma primeira parcela é devida à deformação da lâmina por distorção ( $K_v(\gamma)$ ), enquanto a outra componente resulta da variação de volume da camada de elastómero ( $K_v(v)$ ). Assumindo que a deformação total é a soma das duas componentes de deformação, obtém-se a seguinte expressão para o cálculo da rigidez vertical:

$$K_v = \frac{K_v(\gamma) K_v(v)}{K_v(\gamma) + K_v(v)}$$

$$K_v(\gamma) = \beta_2 \frac{G S^2 A}{h_{el}} \quad (\text{rigidez vertical devida à distorção})$$

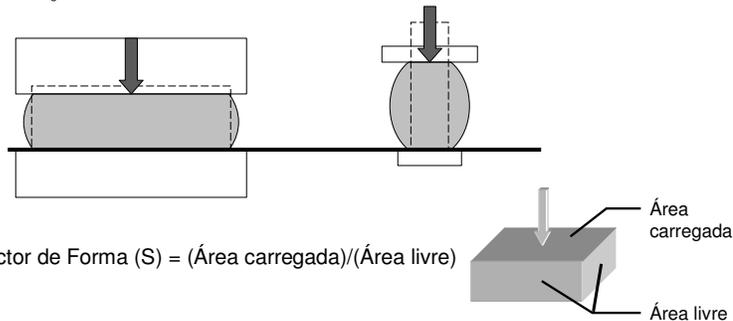
$$K_v(v) = \frac{E_b A}{h_{el}} \quad (\text{rigidez por variação de volume})$$



## Apoios Elastoméricos – Rigidez Vertical

Os elastómeros são substâncias quase incompressíveis que se deformam mais por alteração da forma do que pela variação de volume.

A relação tensão-deformação dum bloco de elastómero depende muito da sua forma. Se o bloco for baixo e com uma grande secção transversal, a sua rigidez será muito maior do que seria se a relação entre a altura e a secção transversal fosse elevada. A rigidez do bloco depende muito da sua capacidade de deformação lateral.



### Apoios Elastoméricos – Rigidez Vertical

$$K_v(\gamma) = \beta_2 \frac{G S^2 A}{h_{el}} \quad (\text{rigidez vertical devida à distorção})$$

$$K_v(v) = \frac{E_b A}{h_{el}} \quad (\text{rigidez por variação de volume})$$

com,

$E_b$  - módulo de compressibilidade do elastómero ( $E_b \sim 2000$  MPa);

$G$  - módulo de distorção do elastómero ( $G \sim 0.7$  a  $2.0$  MPa);

$\beta_2$  - coeficiente que depende da forma da secção:

$\beta_2$	(Kelly, 1993)	(CEN/TC 167, 2001)
bloco com secção circular	6	5
bloco com secção quadrada	6.73	5



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

ICIST

### Apoios Elastoméricos – Rigidez Vertical

A deformação vertical de um conjunto de lâminas de elastómero pode ser calculada a partir da rigidez vertical de cada uma das camadas  $K_{vi}$ :

$$K_v = \frac{1}{\sum \frac{1}{K_{vi}}} \quad (\text{rigidez vertical de um conjunto de camadas})$$

Se as camadas forem todas iguais, a expressão anterior pode ser simplificada tomando a seguinte forma:

$$K_v = \frac{K_{vi}}{n}$$

sendo  $n$  o número de camadas.

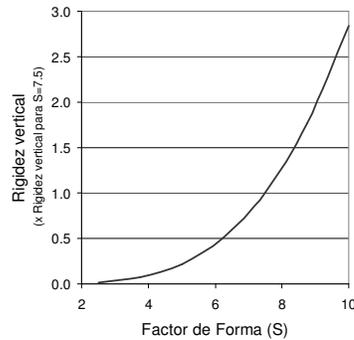


INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

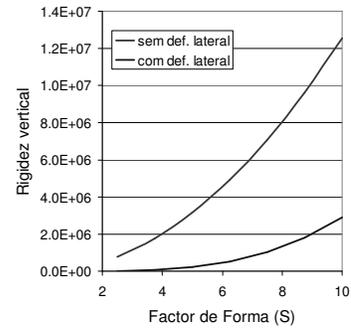
ICIST

### Apoios Elastoméricos – Rigidez Vertical

Influência do Factor de Forma (S) na rigidez dum camada de elastómero



Influência da deformação lateral na rigidez dum camada de elastómero



### Apoios Elastoméricos – Rigidez Horizontal

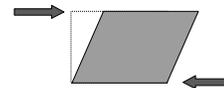
No caso de blocos de elastómero cintado, o valor da rigidez do conjunto pode ser calculado a partir do valor do módulo de distorção (G) do elastómero que o constitui. Como o bloco é constituído pela justaposição de camadas de elastómero, a deformação horizontal do conjunto é o somatório das deformações individuais de cada camada. Por seu lado, a deformação de cada camada, devido à sua pequena espessura, é essencialmente por corte. Desta forma a relação entre a rigidez do bloco e o módulo de distorção obedece à seguinte expressão:

$$K_h = \frac{GA}{h_{el}}$$

G - módulo de distorção;

A - área em planta do bloco;

$h_{el}$  - altura total em elastómero (somatório das espessuras das várias camadas).



### Apoios Elastoméricos – Rigidez Horizontal

Se a carga vertical sobre o bloco for próxima da carga crítica ( $N_{cr}$ ), então a rigidez horizontal do bloco deve ser calculada através da seguinte expressão:

$$K_h = \frac{GA}{h_{el}} \left( 1 - \frac{N^2 h_{el}}{GA h_T N_E} \right)$$

em que,

- $G$  - módulo de distorção;
- $A$  - área em planta do bloco;
- $h_{el}$  - altura total de elastómero (somatório das várias camadas);
- $h_T$  - altura total do bloco;
- $N$  - carga vertical sobre o bloco;
- $N_E$  - carga vertical de Euler.



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

ICIST

### Apoios Elastoméricos – Rigidez Horizontal

A carga vertical de Euler pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$N_E = \beta_1 \pi^2 \frac{G S^2 I}{h_T h_{el}}$$

sendo,

$S$  - factor de forma da secção, obtido pela relação entre a área carregada e a área livre de carga do bloco, considerando somente a altura total de elastómero:

bloco com secção circular de diâmetro  $\phi$  -  $S = \frac{\phi}{4t}$

bloco com secção rectangular ( $a \times b$ ) -  $S = \frac{ab}{2(a+b)t}$

$I$  - momento de inércia da secção.

$t$  - espessura duma camada de elastómero.

$\beta_1$  - coeficiente definido em função da forma do bloco:

bloco com secção circular -  $\beta_1 = 2$

bloco com secção quadrada -  $\beta_1 = 2.214$



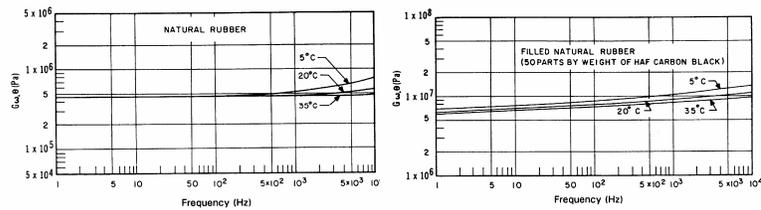
INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

ICIST

## Apoios Elastoméricos - Propriedades dinâmicas

### 1- Influência da frequência no valor de G

Os elastómeros não são perfeitamente elásticos, apresentam algum amortecimento interno e a rigidez tem tendência a aumentar quando a frequência de deformação aumenta. Esta última característica só é aparente para frequências de deformação muito superiores às que ocorrem em aparelhos de apoio de estruturas.

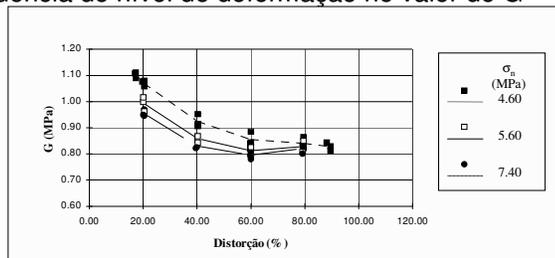


Influência da frequência no Módulo de Distorsão (G) do elastómero.  
(Adaptado de Kelly, 1993)



## Apoios Elastoméricos - Propriedades dinâmicas

### 2 - Influência do nível de deformação no valor de G



Para valores de distorção inferiores a 100% verifica-se uma diminuição do valor de G com a distorção. Esta diminuição é mais acentuada para valores de distorção inferiores a 50%.

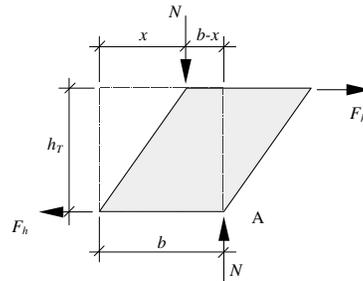
Para grandes valores de distorção (> a 300%) volta a registar-se um aumento da rigidez.

### 3 - Influência do esforço normal no valor de G

A influência do esforço normal no valor de G é desprezável



Apoios Elastoméricos - Estabilidade ao rolamento

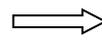


$$F_h = K_h x_{max}$$

$$K_h = \frac{GA}{h_{el}}$$

$$\sigma_N = \frac{N}{A}$$

$$N (b - x_{max}) = h_T F_h$$



$$\frac{x_{max}}{b} = \frac{1}{1 + \frac{G h_T}{\sigma_N h_{el}}}$$



Apoios Elastoméricos - Pré Norma CEN/TC 167 N 185

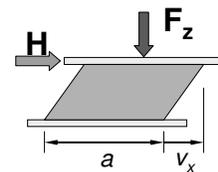
Máxima distorção:

$$\epsilon_{t,d} = \epsilon_{c,d} + \epsilon_{q,d} + \epsilon_{\alpha,d}$$

$\epsilon_{c,d}$  – distorção devido às cargas de compressão

$\epsilon_{q,d}$  – distorção devido aos movimentos horizontais

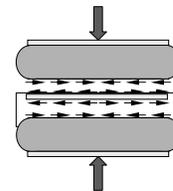
$\epsilon_{\alpha,d}$  – distorção devido à rotação



$$\epsilon_{t,d} < 5$$

$$\epsilon_{c,d} = \frac{1.5 F_{z,d}}{G A_r S}$$

$$A_r = A \left( 1 - \frac{v_{x,d}}{a} - \frac{v_{y,d}}{b} \right)$$

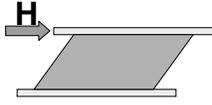
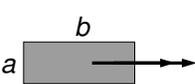


### Apoios Elastoméricos - Pré Norma CEN/TC 167 N 185

$$\varepsilon_{q,d} = \frac{V_{xy,d}}{T_q} \quad \varepsilon_{q,d} < 0.7$$

$$\varepsilon_{\alpha,d} = \frac{(a^2 \alpha_{a,d} + b^2 \alpha_{b,d}) t_i}{2 \sum (t_i^3)}$$

$V_{xy,d}$  – máximo deslocamento horizontal  
 $T_q$  – espessura total de elastómero  
 $\alpha_{a,d}$  – ângulo de rotação ao longo de **a**  
 $\alpha_{b,d}$  – ângulo de rotação ao longo de **b**  
 $t_i$  – espessura de cada camada de elastómero



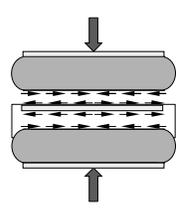
INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO  
ICIST

### Apoios Elastoméricos - Pré Norma CEN/TC 167 N 185

Chapas de reforço:

$$t_s = \frac{K_p F_{z,d} (t_1 + t_2) \gamma_m \gamma_f}{A_r f_y} \quad t_s \geq 2\text{mm}$$

$t_1$  e  $t_2$  – espessura de elastómero de cada lado da chapa de aço  
 $f_y$  – tensão de cedência do aço  
 $\gamma_m$  – Factor de segurança parcial  $\gamma_m = 1$  (sem buracos)  
 $\gamma_m = 2$  (com buracos)  
 $\gamma_f$  – factor de segurança parcial ( $\gamma_f = 1$ )  
 $K_p$  – factor de correcção ( $K_p = 1.3$ )





INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO  
ICIST

## Qualificação de Sistemas - Ensaios

Deverão ser sempre considerados dois tipos de ensaios:

- Ensaios para qualificação dos sistemas de isolamento;
- Ensaios de recepção.

Ensaios de qualificação -

Destinam-se a caracterizar o comportamento dos sistemas de isolamento em função dos diversos parâmetros que definem os isoladores.

Ensaios de recepção -

Conjunto de testes cujo objectivo é garantir que os isoladores utilizados apresentam as características indicadas pelo fabricante.



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

ICIST

## Qualificação de Sistemas - Tipos de Ensaios

Os ensaios de caracterização devem permitir determinar:

- Rigidez horizontal;
- Amortecimento.

Devem também permitir avaliar a influência dos seguintes parâmetros na rigidez e no amortecimento:

- Temperatura;
- Envelhecimento;
- Carga vertical;
- Frequência de aplicação das cargas.

É ainda necessário garantir a estabilidade do apoio à aplicação simultânea de deformação horizontal e carga vertical.



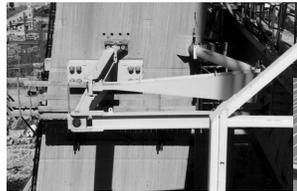
INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

ICIST

## Dissipadores - Introdução

Actualmente existem vários tipos de sistemas de dissipação de energia, sendo os mais comuns os dissipadores histeréticos e os dissipadores do tipo viscoso. Estes dois tipos de sistema apresentam uma versatilidade que favorece a sua utilização, sendo fácil a sua introdução no sistema estrutural e permitem uma grande liberdade, por parte do projectista, na definição das suas características.

Dissipador Histerético



Ponte Vasco da Gama

Dissipador Viscoso



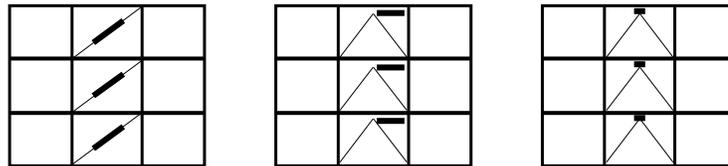
(www.alga.it)



## Dissipadores de Energia

O objectivo é dotar as estrutura de dispositivos com capacidade de dissipação de energia.

Esta dissipação está associada à deformação da estrutura, pelo que os dispositivos devem ser colocados por forma a acompanhar a deformação desta. Para otimizar o seu desempenho os sistemas de dissipação devem estar colocados de forma a maximizar a sua deformação.

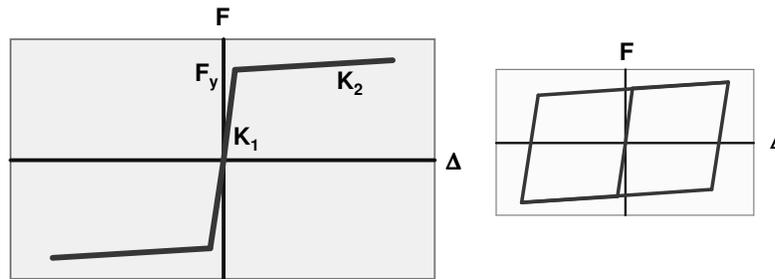


Exemplos de localização dos dissipadores



### Dissipadores Histeréticos

Os dissipadores histeréticos tiram partido da capacidade de deformação plástica de elementos metálicos, normalmente de aço. Nestes sistemas a força depende da deformação imposta ao dissipador e os parâmetros de controlo são a rigidez inicial ( $K_1$ ), a rigidez após-cedência ( $K_2$ ) e o nível de cedência ( $F_y$ ).



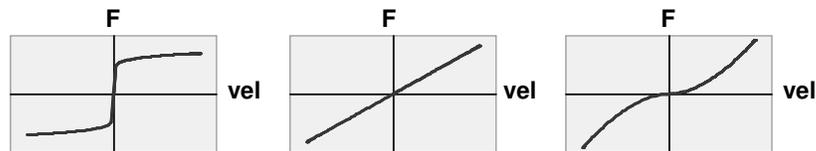
### Dissipadores Viscosos

Nos sistemas viscosos de dissipação de energia a força depende da velocidade relativa entre as suas extremidades. O tipo de relação força-velocidade que cada tipo de dissipador apresenta depende essencialmente das características de fluído utilizado, podendo ser considerada a seguinte expressão geral:

$$F = C |v|^\alpha \text{ sinal}(v)$$

$C, \alpha$  – Constantes do dissipador;

$v$  - velocidade



$\alpha = 0.10$

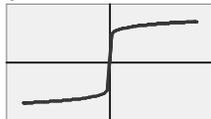
$\alpha = 1.00$

$\alpha = 1.80$



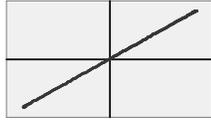
### Dissipadores Histeréticos

$\alpha = 0.10$



- A força cresce bruscamente para valores baixos de velocidade;
- A força tende para um limite máximo;
- Aparelho “fixo” até ao limite máximo de força.

$\alpha = 1.00$



- A força cresce linearmente com a velocidade;
- Dissipador viscoso linear;
- Aplicação directa do conceito de coeficiente de amortecimento ( $\zeta$ ).

$\alpha = 1.80$



- Forças quase nulas para valores baixos de velocidade;
- Aumenta a taxa de crescimento da força com o aumento da velocidade;
- Aparelho móvel para baixas velocidades.

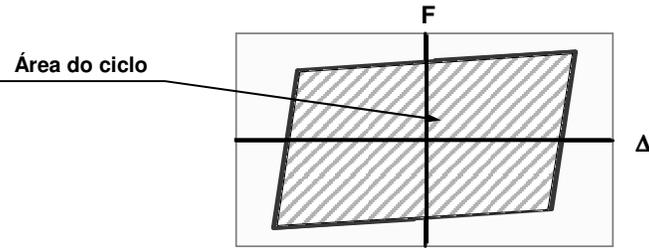


INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO  
ICIST

### Amortecimento

O amortecimento que um determinado dissipador introduz na estrutura é medido pela sua capacidade de dissipação energia em cada ciclo. Essa dissipação pode ser por histerése (dissipadores histeréticos) ou por comportamento viscoso (dissipadores viscosos).

A energia dissipada em cada ciclo pode ser avaliada através do cálculo da área interior do ciclo medida na curva que relaciona a força no dissipador com a sua deformação.



Área do ciclo

Relação Força-Deformação do dissipador



INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO  
ICIST

### Amortecimento

Para um determinado ciclo é possível estimar o valor do coeficiente de amortecimento equivalente a partir da seguinte expressão:

$$\zeta = \frac{\text{Área do Ciclo}}{2\pi F_{\max} d_{\max}}$$

$F_{\max}$  – máxima força medida na estrutura;  
 $D_{\max}$  – máxima deformação medida na estrutura.

A capacidade de dissipação de energia de um dissipador será tanto melhor quanto mais “rectangular” for o seu ciclo completo, na relação força-deformação.



### Amortecimento

Nos dissipadores histeréticos a forma do ciclo força-deformação é muito influenciada pela relação entre a rigidez após cedência ( $k_2$ ) e a rigidez inicial. Outro parâmetro que também é marcante é o valor da força de cedência. Se a força de cedência for muito elevada o dissipador plastifica poucas vezes, dissipando menos energia.

Relação  $k_2/k_1$  →

$k_2/k_1 = 1\%$	$k_2/k_1 = 5\%$	$k_2/k_1 = 10\%$	$k_2/k_1 = 50\%$

Relação Força-Deformação

← Amortecimento



### Amortecimento

Nos dissipadores viscosos a forma do ciclo força-deformação é condicionada pelo valor do parâmetro  $\alpha$ .

Valores de  $\alpha$  ➔

Relação Força-Velocidade				
$\alpha = 0.10$	$\alpha = 0.25$	$\alpha = 0.50$	$\alpha = 1.00$	$\alpha = 1.80$

Relação Força-Deformação				

➔ Amortecimento

INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO  
**ICIST**

### Amortecimento

Nos dissipadores viscosos o parâmetro  $C$  não altera a forma do ciclo força-deformação, mas aumenta a área interna do ciclo. O aumento do valor de  $C$  conduz a uma maior capacidade de dissipação de energia mas, como contrapartida, aumenta a força no dissipador.

$\alpha = 0.10$		$\alpha = 1.80$	
$C = 2000$	$C = 3000$	$C = 28000$	$C = 50000$
Valores de $C$ ➔	Amortecimento ➔	Valores de $C$ ➔	Amortecimento ➔
Força no Dissipador ➔		Força no Dissipador ➔	

INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO  
**ICIST**

## Métodos de Análise

A maioria dos sistemas de dissipação de energia têm comportamento não linear.

Os dissipadores histeréticos têm comportamento fisicamente não-linear, sendo aliás essa a propriedade que é explorada com a finalidade de dissipar energia.

Nos dissipadores viscosos a não linearidade advém da sua lei de comportamento, que é representada por uma equação não linear:

$$F = C |v|^\alpha \text{ sinal}(v)$$

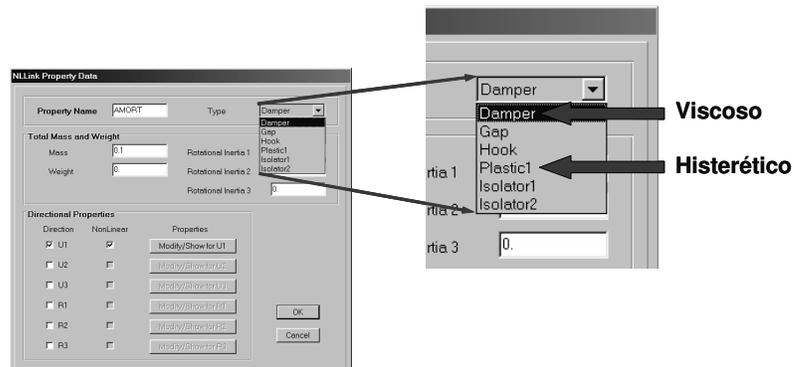
Somente para  $\alpha=1$  a equação atrás referida é linear, tornando mais fácil o problema da análise da resposta.

Desta forma o único método possível para calcular correctamente a resposta duma estrutura com dissipadores é através da utilização de um programa de **análise dinâmica não linear**.



## Métodos de Análise

Programas comerciais têm um conjunto de elementos que permitem simular os diversos tipos de dissipadores. No caso do SAP2000 estes elementos são designados por **NLLink**.



### Métodos de Análise

"Damper"

$$F = k d = C |v|^\alpha \text{ sinal}(v)$$

**NLink Property Data**

Property Name: AMORT    Type: Damper

**Total Mass and Weight**

Mass: 0.1    Rotational Inertia 1: 0  
Weight: 0    Rotational Inertia 2: 0  
Rotational Inertia 3: 0

**Directional Properties**

Direction	NonLinear	Properties
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input checked="" type="checkbox"/>	Modify/Show for U1
<input type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for U2
<input type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for U3
<input type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R1
<input type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R2
<input type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R3

OK    Cancel

**NLink Directional Properties**

Identification

Property Name: AMORT  
Direction: U1  
Type: Damper  
NonLinear: Yes

**Linear Properties**

Effective Stiffness: 0  
Effective Damping: 0

**NonLinear Properties**

Stiffness: 500000 →  $k$   
Damping: 2550 →  $C$   
Damping Exponent: 0.25 →  $\alpha$

OK    Cancel

INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO  
ICIST

### Métodos de Análise

**NLink Property Data**

Property Name: AMORT    Type: Plastic1

**Total Mass and Weight**

Mass: 0.1    Rotational Inertia 1: 0  
Weight: 0    Rotational Inertia 2: 0  
Rotational Inertia 3: 0

**Directional Properties**

Direction	NonLinear	Properties
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input checked="" type="checkbox"/>	Modify/Show for U1
<input type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for U2
<input type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for U3
<input type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R1
<input type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R2
<input type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R3

OK    Cancel

**NLink Directional Properties**

Identification

Property Name: AMORT  
Direction: U1  
Type: Plastic1  
NonLinear: Yes

**Linear Properties**

Effective Stiffness: 0  
Effective Damping: 0

**NonLinear Properties**

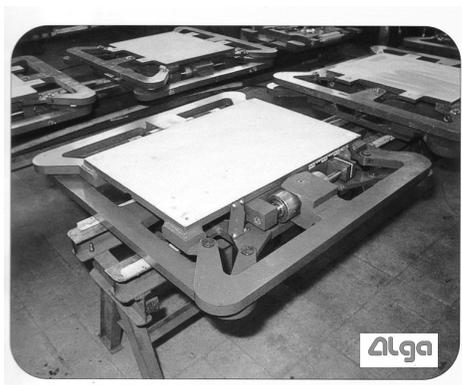
Stiffness: 300000 →  $k_1$   
Yield Strength: 1950 →  $F_y$   
Post Yield Stiffness Ratio: 0.01 →  $k_1/k_2$   
Yielding Exponent: 20

OK    Cancel

INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO  
ICIST

## Soluções de Dissipadores

### Dissipadores histeréticos PND e PNUD



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

ICIST

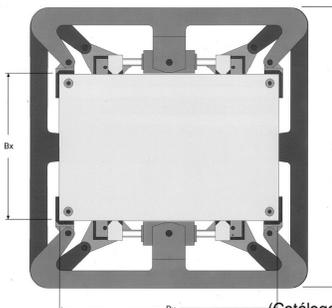
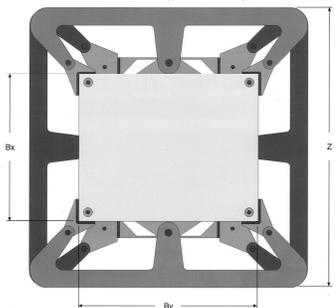
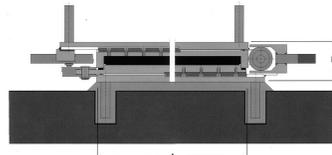
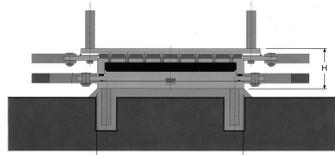
(Catálogo ALGA)

## Soluções de Dissipadores

### PND Dissipadores Algasism PNUD

Dissipador histerético de aço

Dissipador histerético de aço  
Livre para acções lentas



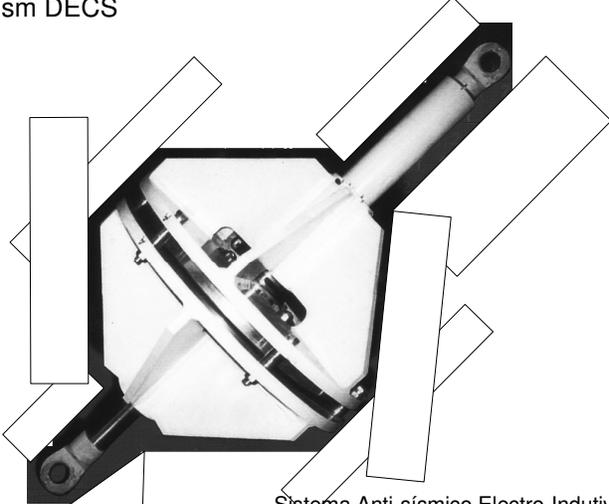
INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

ICIST

(Catálogo ALGA)

**Soluções de Dissipadores**

**Algasism DECS**



**Sistema Anti-sísmico Electro-Indutivo**

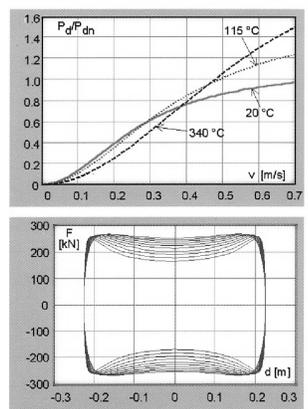


INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO  
**ICIST**

(Catálogo ALGA)

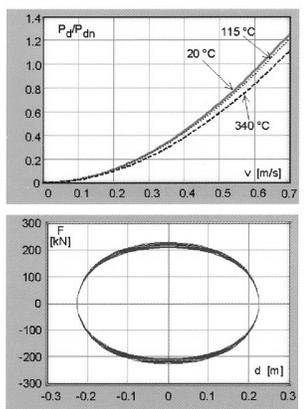
**Soluções de Dissipadores**

**Algasism DECS**



 Disco d'aluminio  
Aluminium disk

**Modelos de Comportamento**



 Disco in lega di rame - nichel  
Copper - Nickel alloy disk

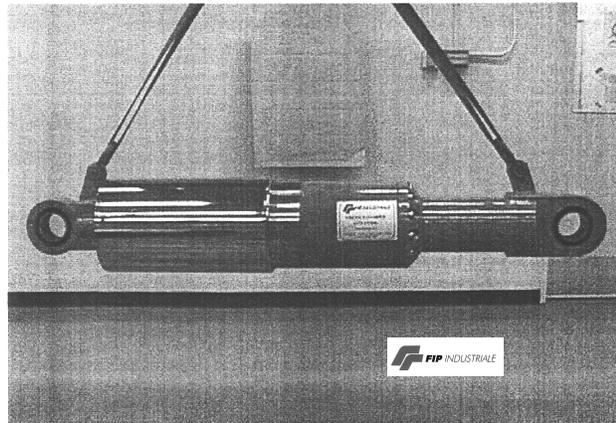


INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO  
**ICIST**

(Catálogo ALGA)

## Soluções de Dissipadores

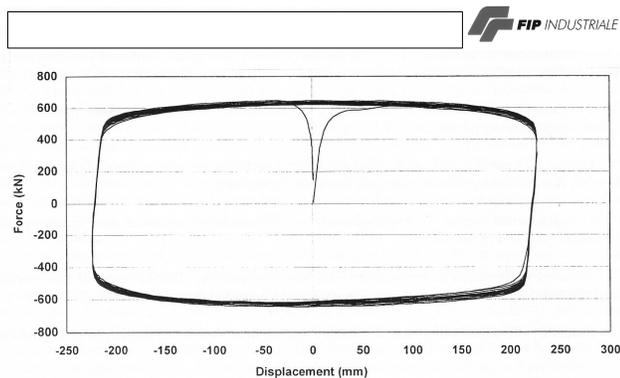
### Dissipador Viscoso Não Linear



(Infanti e Castellano, 2001)

## Soluções de Dissipadores

### Dissipador Viscoso Não Linear



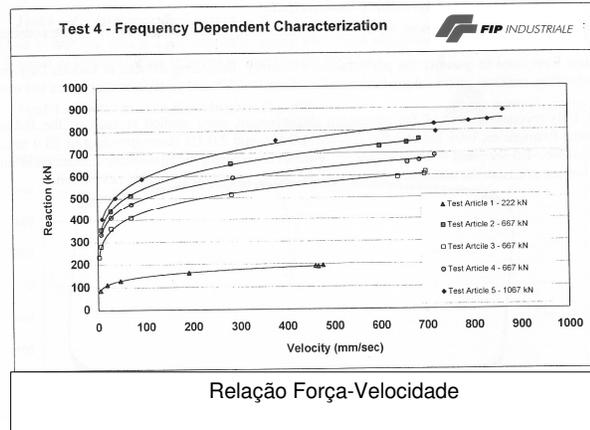
Modelo típico de comportamento dos Dissipadores Viscosos FIP



(Infanti e Castellano, 2001)

Soluções de Dissipadores

Dissipador Viscoso Não Linear

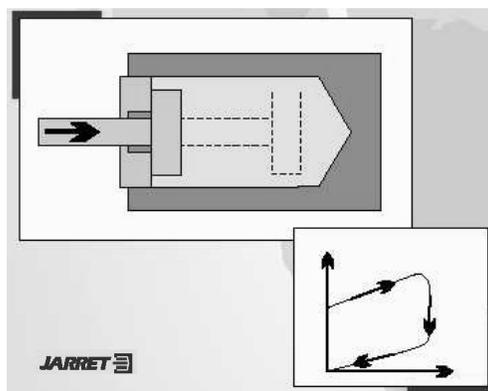


(Infanti e Castellano, 2001)



Soluções de Dissipadores

Dissipador Viscoso Não Linear



$$F = F_0 + kx + Cv^\alpha$$

com  $\alpha$  entre 0.1 e 0.4



(www.jarret.fr)

## Dissipadores Viscosos

Os dissipadores semelhantes aos amortecedores dos automóveis e motos.

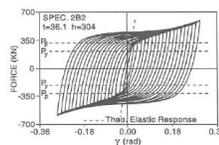
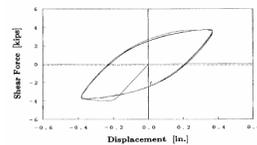
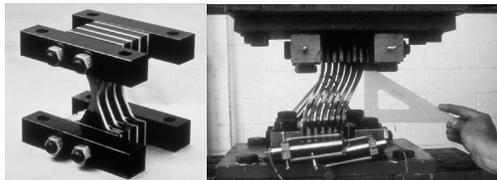
O seu funcionamento consiste na imposição de um movimento a um êmbolo, que força a passagem de um pistão através de um fluido (eventualmente óleo).



## Dissipadores Histeréticos

Estes dissipadores tiram partido do comportamento após cedência dos metais (comportamento histerético).

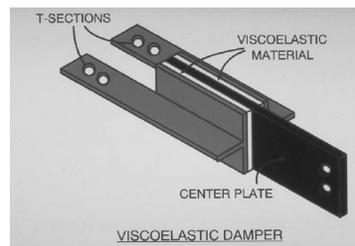
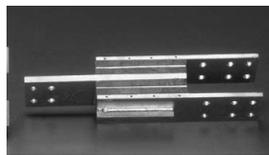
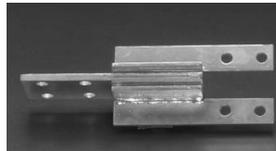
Na sua maioria são dissipadores em aço.



## Dissipadores Visco-elásticos

Os dissipadores visco-elásticos utilizam polímeros com características tais que dissipam energia em função do deslocamento (elástico) e da velocidade.

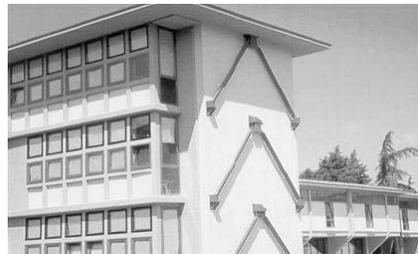
Têm normalmente o aspecto de pequenas pastilhas rectangulares que deformam por corte.



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

ICIST

## Dissipadores Visco-elásticos



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO

ICIST

*Escola "Gentile Fermi", Ancona, Itália*

## Dissipadores Histeréticos



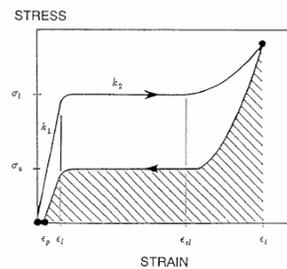
*Duas escolas em Potenza, Itália  
Adaptado de Martelli*



## Materiais com memória de Forma (SMA)

**SMA**s apresentam propriedades muito particulares: podem recuperar de grandes deformações por variação de temperatura (efeito de memória) ou por descarga (efeito superelástico).

**SMA**s apresentam grande capacidade de dissipação de energia, permitem a imposição de grandes deformações e excelente capacidade para suportar elevado número de ciclos de carga/descarga (resistência à fadiga)



A capacidade de recuperação na fase superelástica é a característica com maior potencial para aplicações em engenharia sísmica.



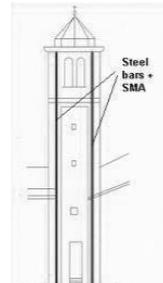
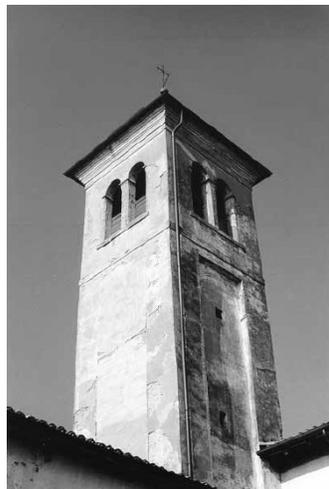
Materiais com memória de Forma (SMA)



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO  
ICIST

*Basílica de S. Francisco em Assis, Itália*

Materiais com memória de Forma (SMA)



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO  
ICIST

*Igreja de S. Giorgio em Trignano, Itália*

**Diploma de Formação Avançada em Engenharia de Estruturas**

**Sistemas de Protecção Sísmica de Estruturas**

Luís Guerreiro  
*luis.guerreiro@civil.ist.utl.pt*

**3 de Maio de 2007**



INSTITUTO  
SUPERIOR  
TÉCNICO  
**ICIST**