



INSTITUTO
SUPERIOR
TÉCNICO

DECivil

Mestrado de Engenharia de Estruturas

Dinâmica e Engenharia Sísmica

Sistemas de Dissipação de Energia

Luís Guerreiro

Maio, 2006

INTRODUÇÃO

- A ideia de reduzir a resposta sísmica de estruturas através da utilização de sistemas de dissipação de energia não é recente.
- A investigação e o investimento realizado pela a indústria no desenvolvimento de sistemas de dissipação de energia tornaram este tipo de protecção sísmica facilmente acessível. A demonstrar esta afirmação estão os muitos exemplos de aplicação existentes por todo mundo, não sendo Portugal excepção neste assunto.
- Como o comportamento sísmico de estruturas com sistemas de dissipação de energia é muito diferente do de estruturas convencionais, os métodos de análise e dimensionamento têm que ser revistos e adaptados a este tipo de solução.

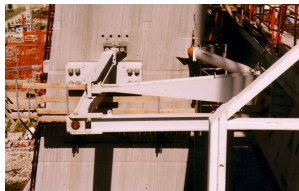
INTRODUÇÃO

- A utilização de sistemas de dissipação de energia no dimensionamento sísmico de pontes e viadutos corresponde a uma alternativa simples e económica face à concepção tradicional destas estruturas, segundo a qual o comportamento sísmico depende do desempenho de um conjunto de “rótulas plásticas” com comportamento não-linear.
- Um dos principais problemas na utilização de sistemas de dissipação de energia é a maior complexidade da análise dinâmica comparativamente com o que acontece ao dimensionar o viaduto com base a capacidade dúctil dos seus pilares. Para este último tipo de análise existe disponível um conjunto de coeficientes de comportamento que permitem estimar o resultado final a partir de uma análise dinâmica linear, enquanto que para avaliar a resposta do viaduto com dissipadores é inevitável o recurso a uma análise não linear no domínio do tempo.

INTRODUÇÃO

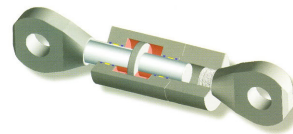
Actualmente existem vários tipos de sistemas de dissipação de energia, sendo os mais comuns os **dissipadores histeréticos** e os **dissipadores do tipo viscoso**. Estes dois tipos de sistema apresentam uma versatilidade que favorece a sua utilização, sendo fácil a sua introdução no sistema estrutural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

Dissipador Histerético



Ponte Vasco da Gama

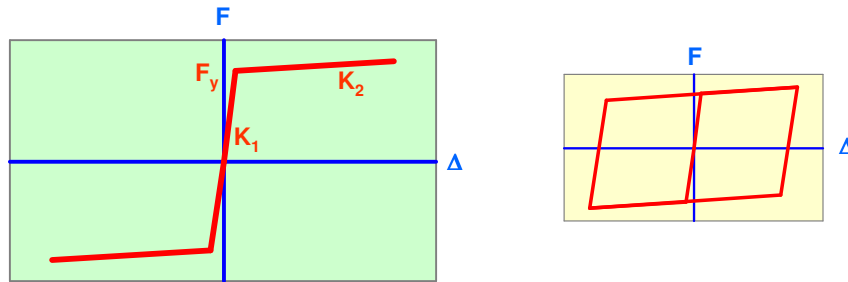
Dissipador Viscoso



(www.alga.it)

INTRODUÇÃO – 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).



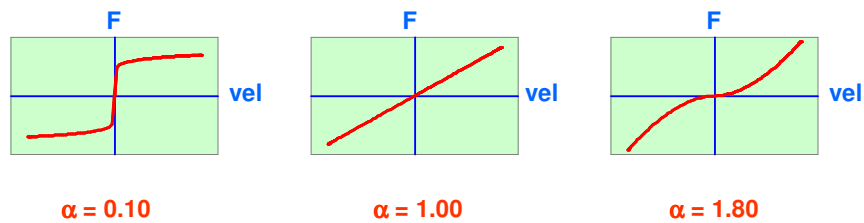
INTRODUÇÃO – Dissipadores Viscosos

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:

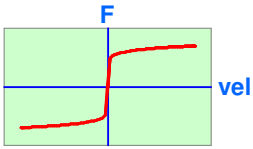
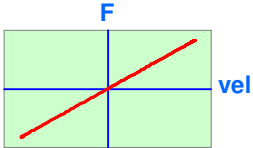
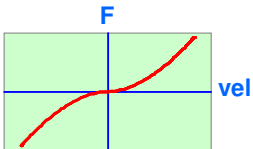
$$F = C |v|^\alpha \text{ sinal}(v)$$

C, α – Constantes do dissipador;

v - velocidade



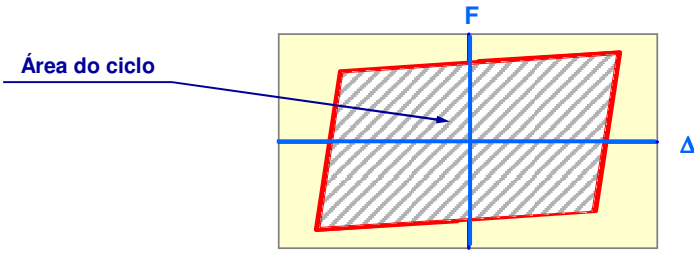
INTRODUÇÃO – Dissipadores Viscosos

$\alpha = 0.10$		<ul style="list-style-type: none"> ▪ A força cresce bruscamente para valores baixos de velocidade; ▪ A força tende para um limite máximo; ▪ Aparelho “fixo” até ao limite máximo de força.
$\alpha = 1.00$		<ul style="list-style-type: none"> ▪ A força cresce linearmente com a velocidade; ▪ Dissipador viscoso linear; ▪ Aplicação directa do conceito de coeficiente de amortecimento (ζ).
$\alpha = 1.80$		<ul style="list-style-type: none"> ▪ 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.

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.



Relação Força-Deformação do dissipador

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 “retangular” for o seu ciclo completo, na relação força-deformação.

AMORTECIMENTO

Nos dissipadores hysteréticos 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

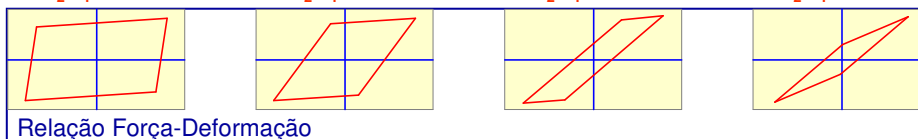


$k_2/k_1 = 1\%$

$k_2/k_1 = 5\%$

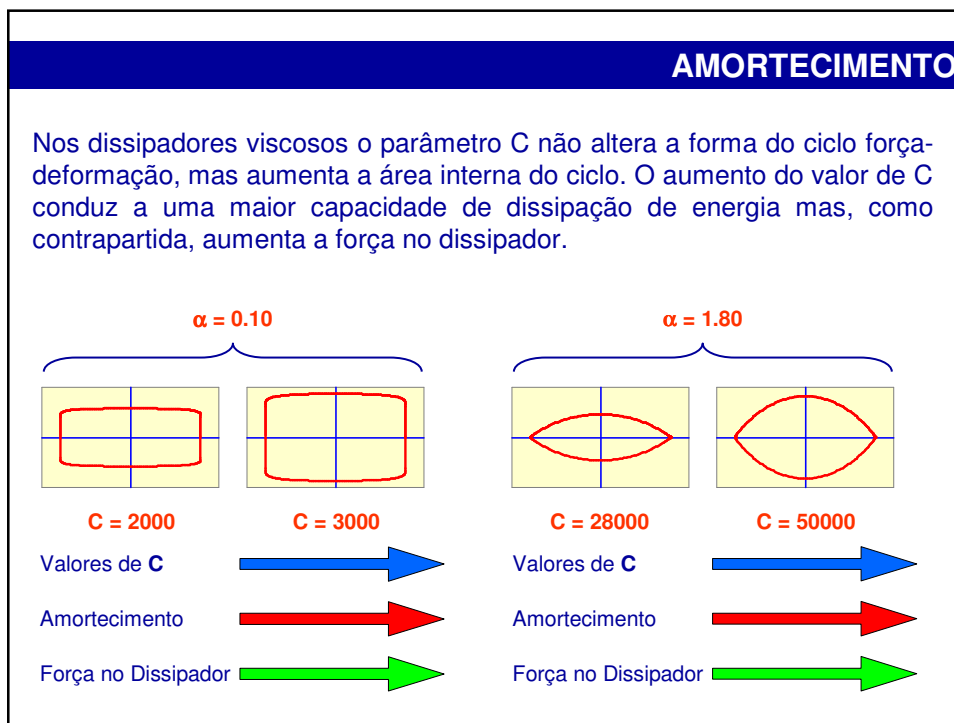
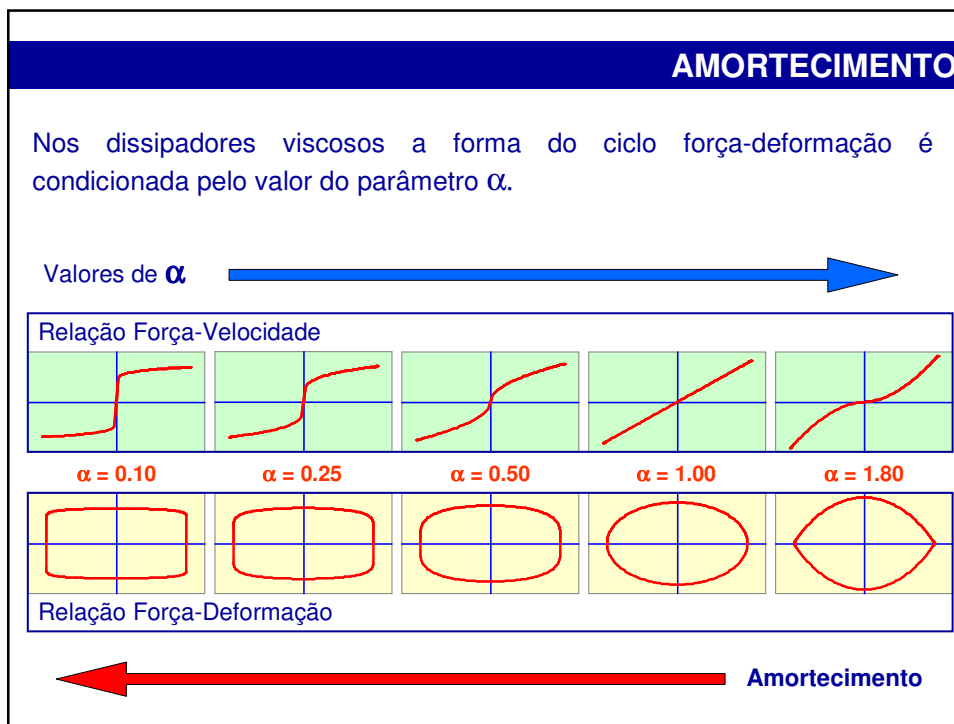
$k_2/k_1 = 10\%$

$k_2/k_1 = 50\%$



Relação Força-Deformação

← Amortecimento



MÉTODOS DE ANÁLISE

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

Os dissipadores hysteréticos 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

Para realizar uma análise dinâmica não linear é necessário ter a representação da acção dinâmica através de uma série de acelerações ao longo do tempo. No caso da análise sísmica, estas séries devem ser representativas da acção sísmica de dimensionamento a considerar.

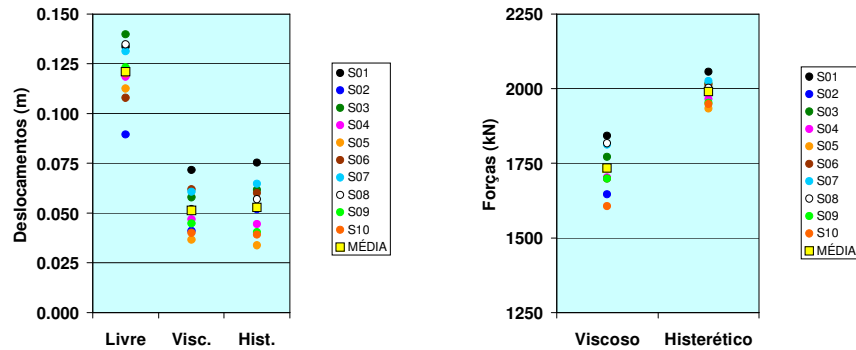
As séries de acelerações (acelerogramas) podem ser reais ou geradas artificialmente.

Dada a grande aleatoriedade na definição da acção, nenhuma conclusão pode ser obtida com base na análise da resposta de uma só série de acelerações.

Deverão ser sempre utilizados valores médios das respostas da estrutura a um número suficiente de séries de aceleração. Esse número nunca deve ser inferior a 6, sendo aconselhável a utilização de 10 séries diferentes.

MÉTODOS DE ANÁLISE

Nesta figura é mostrado um exemplo de como pode variar o resultado em função da série de acelerações considerada.



MÉTODOS DE ANÁLISE

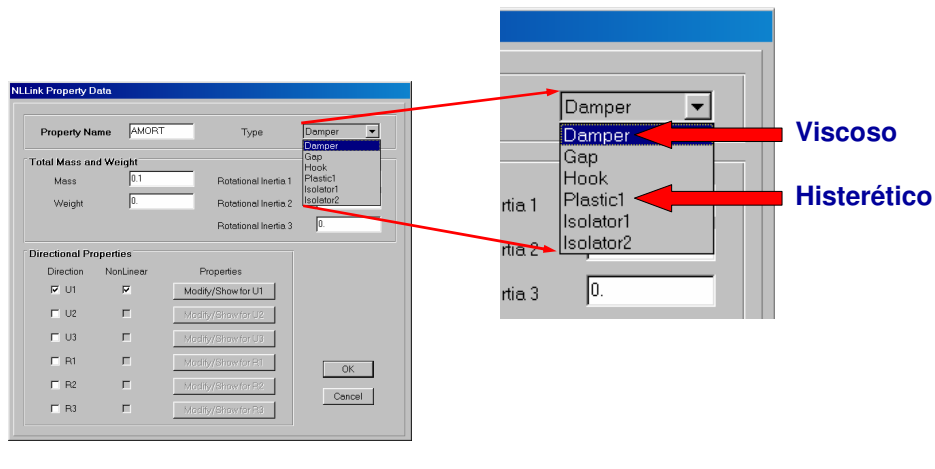
Actualmente já existem no mercado programas de análise não linear que permitem calcular a resposta de estruturas com dissipadores, quer eles sejam histeréticos ou viscosos.

O programa SAP2000 NonLinear é um exemplo de programa com estas capacidades.

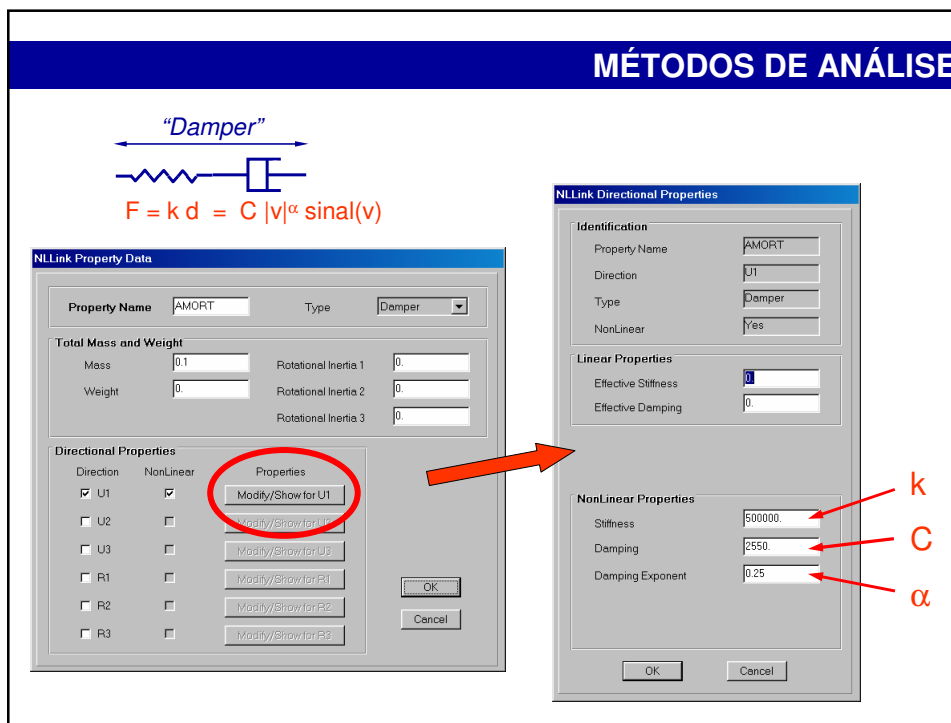
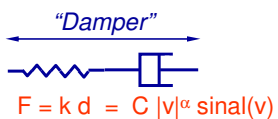
É importante realçar a necessidade de analisar criticamente os resultados obtidos analiticamente. Se é verdade que esta preocupação deve estar sempre presente no espírito do engenheiro que faz análise de estruturas, quanto se manipula uma ferramenta de análise não linear este cuidado deve ser redobrado. O aumento do número de variáveis em jogo e a falta de domínio sobre algumas das variáveis em jogo aconselham prudência na utilização deste tipo de programas de análise.

MÉTODOS DE ANÁLISE

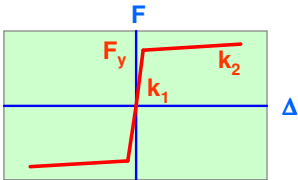
O programa SAP2000 NonLinear tem um conjunto de elementos que permite simular os diversos tipos de dissipadores. Estes elementos são designados por **NLLink**.



MÉTODOS DE ANÁLISE



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

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

Linear Properties

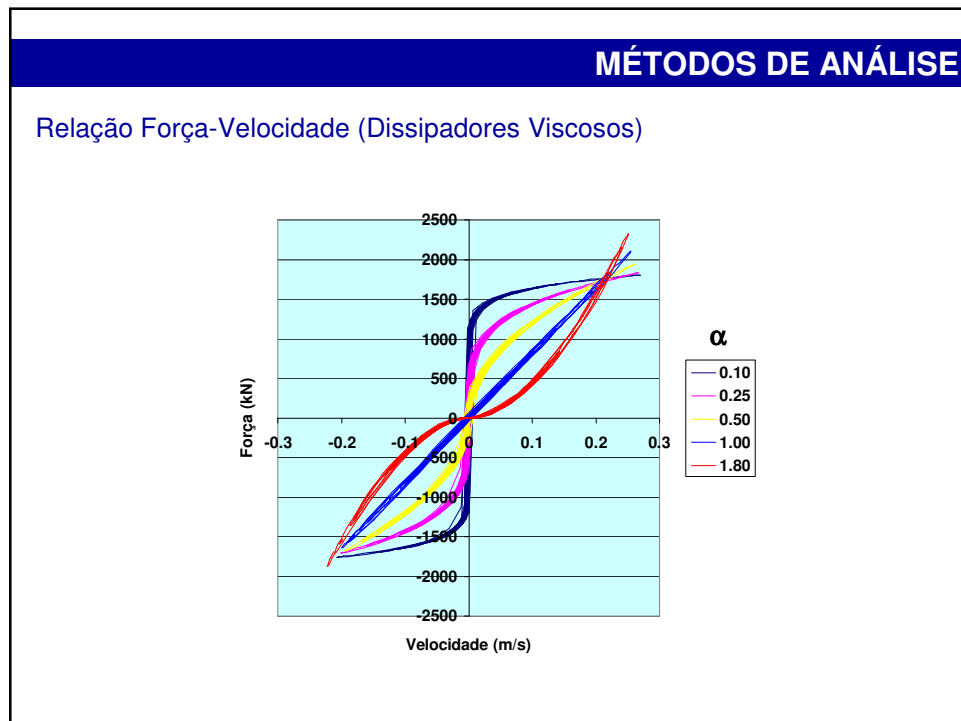
Effective Stiffness: 0
Effective Damping: 0

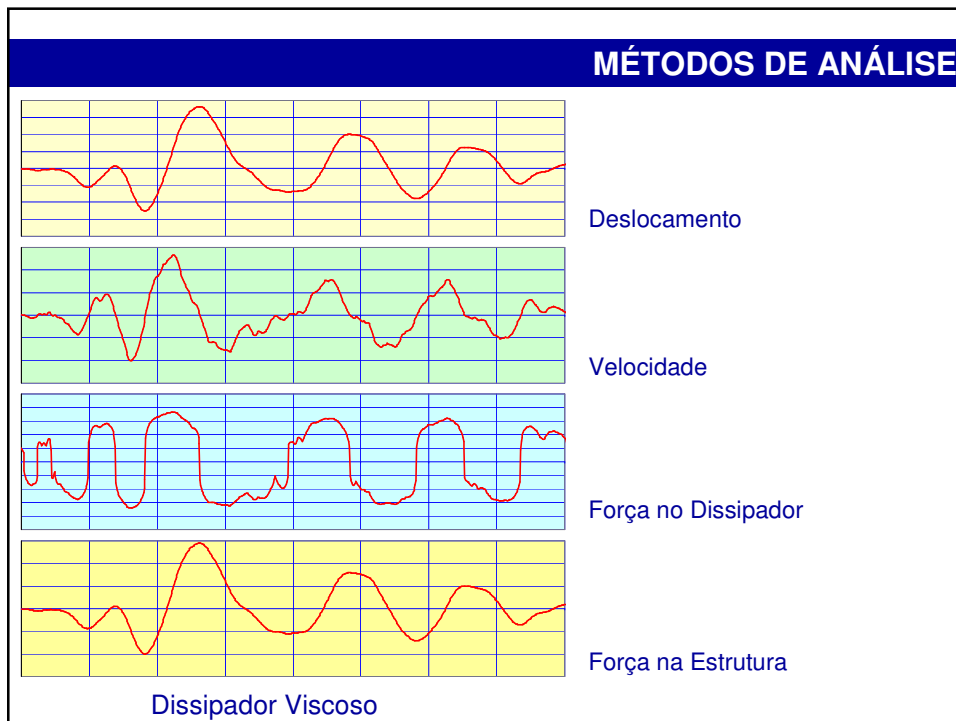
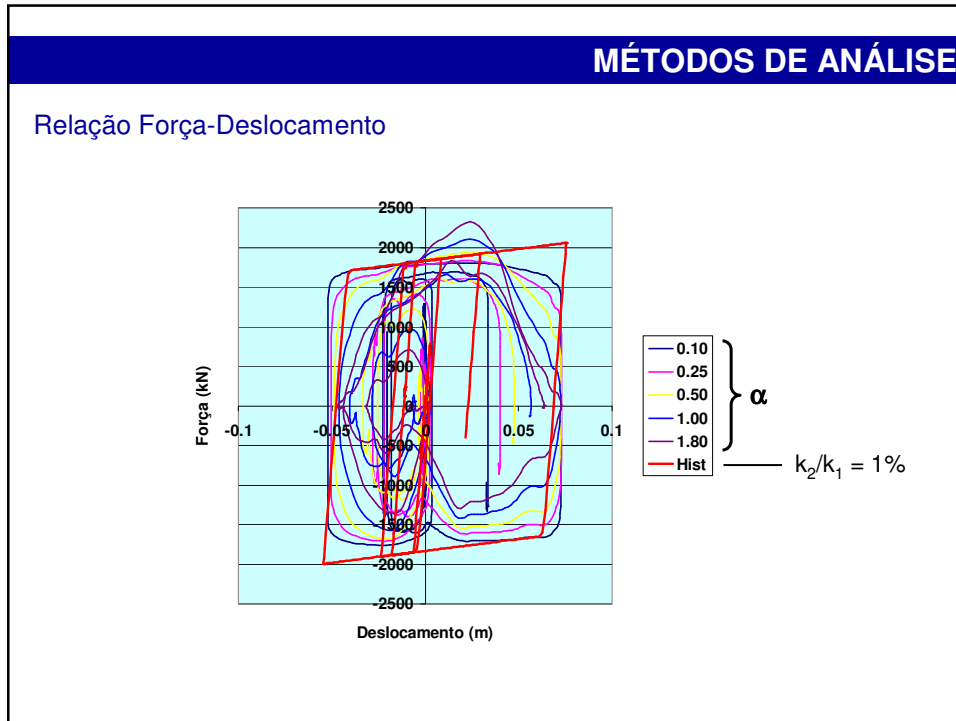
NonLinear Properties

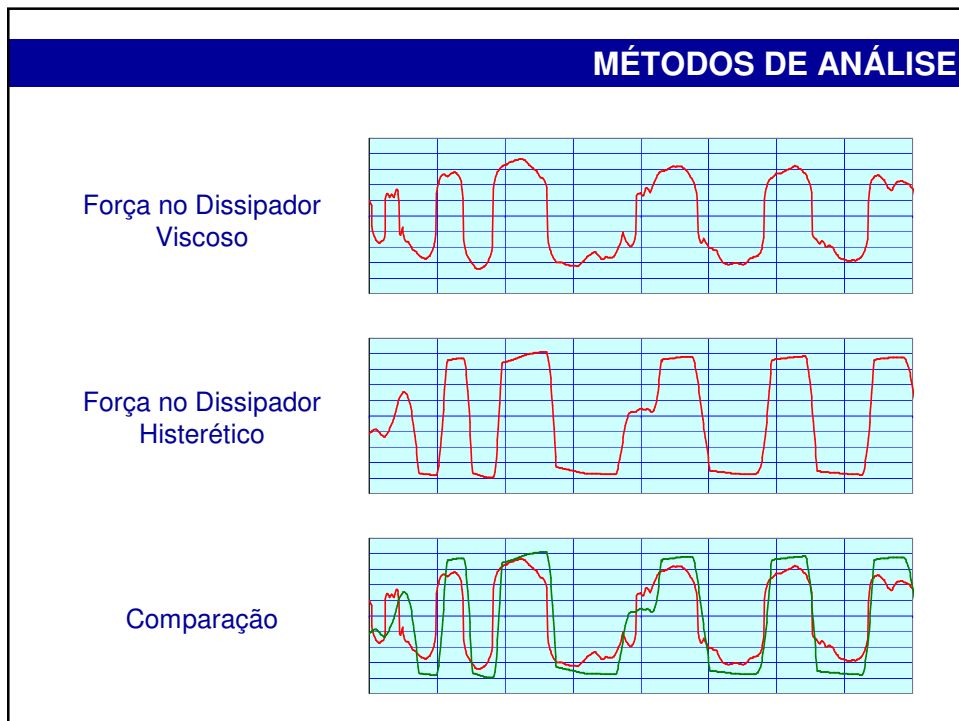
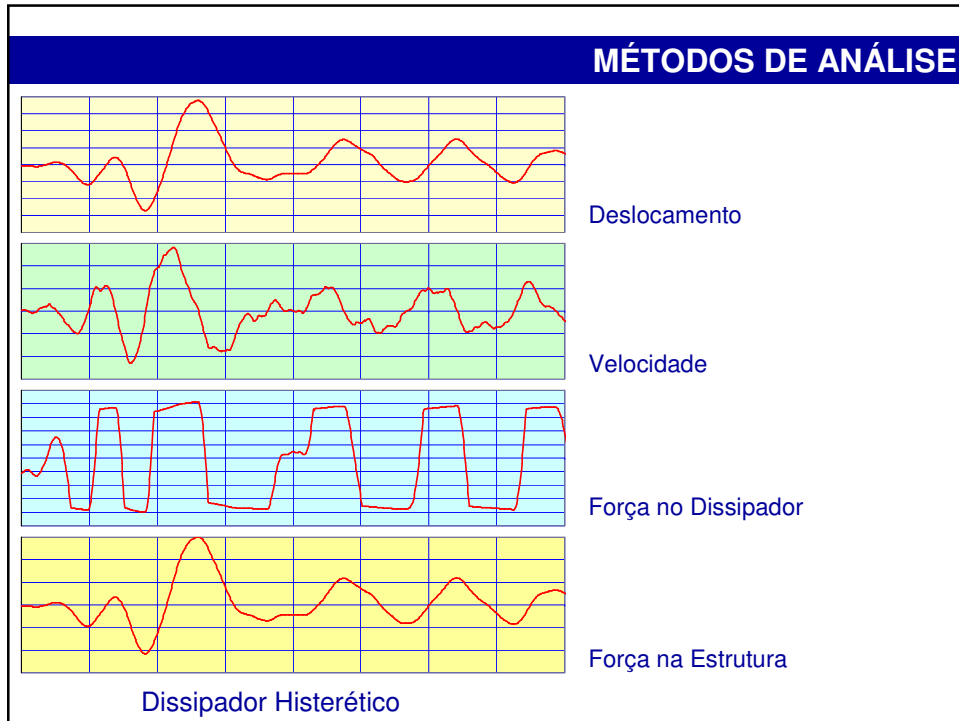
Stiffness: 300000
Yield Strength: 1850
Post Yield Stiffness Ratio: 0.01
Yielding Exponent: 20

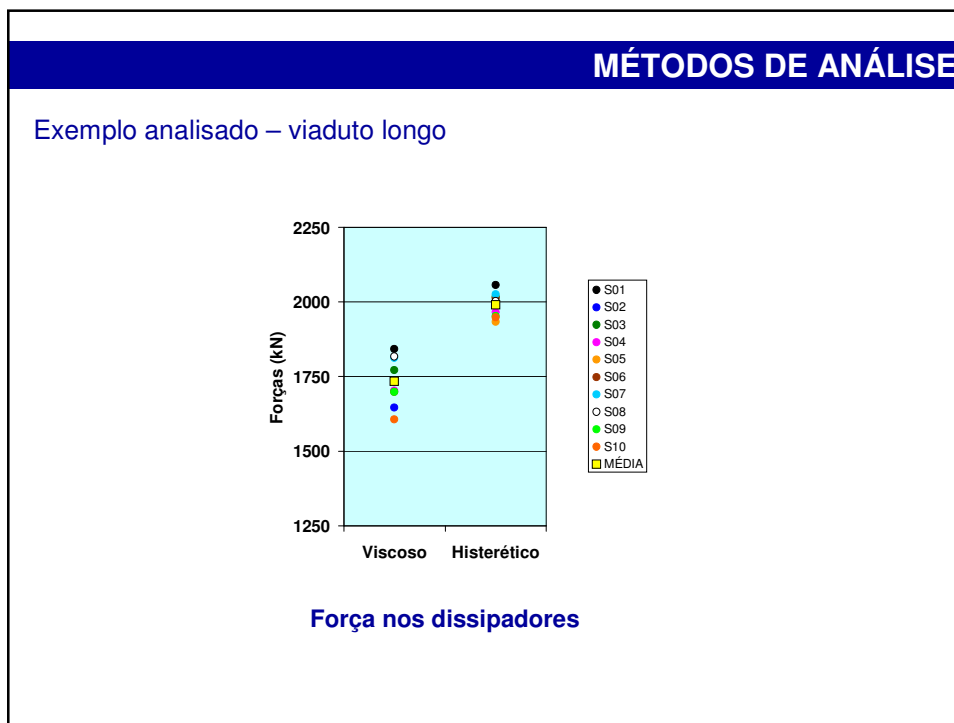
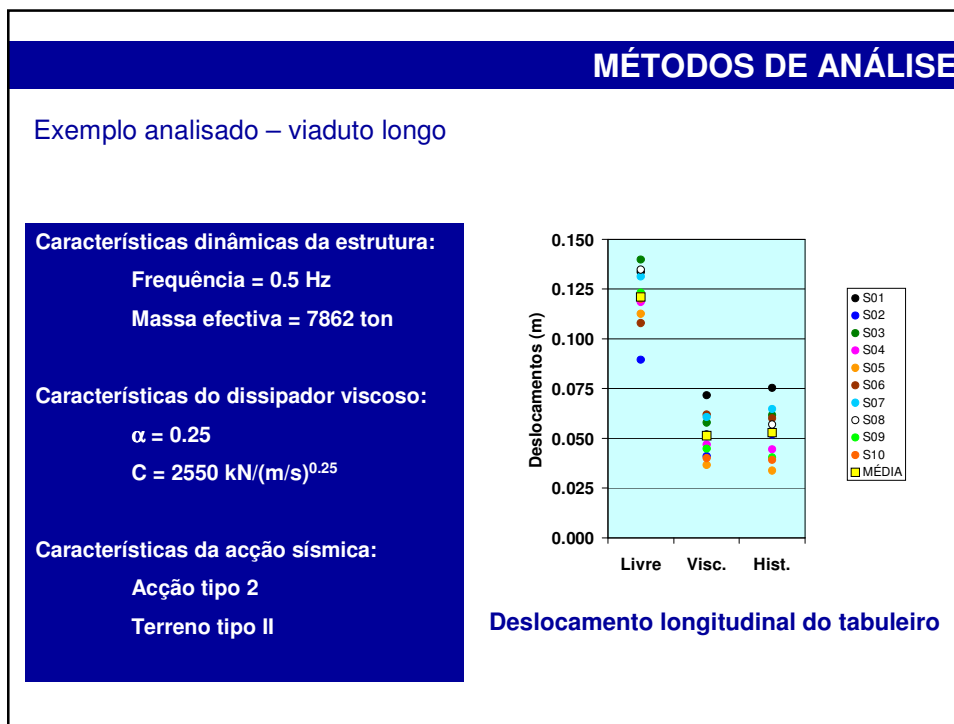
OK Cancel

Annotations: Red arrows point from k_1 to Stiffness, F_y to Yield Strength, and k_1/k_2 to Post Yield Stiffness Ratio.









MODELOS SIMPLIFICADOS

O facto da análise sísmica de estruturas com dissipadores não lineares ser complexa e, por vezes, morosa levou à procura de métodos simplificados. O objectivo da utilização destes métodos é conseguir obter numa forma expedita uma estimativa aproximada do resultado pretendido.

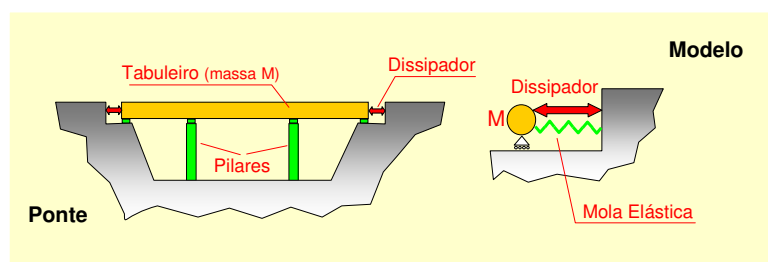
A utilização destes métodos expeditos não poderá substituir uma análise não linear mais completa, permitindo apenas realizar um pré-dimensionamento dos sistemas de dissipação de energia.

O método que se apresenta de seguida é o resultado final de um projecto desenvolvido no IST e que deu origem a uma dissertação de mestrado.

O estudo realizado teve como objectivo a determinação de um conjunto de âbacos que permita a estimativa do deslocamento máximo no tabuleiro e a máxima força no dissipador, para as acções sísmicas do RSA, em função dos parâmetros C e α que caracterizam o dissipador.

MODELOS SIMPLIFICADOS

No desenvolvimento do estudo considerou-se o modelo simplificado esquematizado na figura.



Este modelo de um grau de liberdade garante uma boa aproximação dos resultados quando a ponte em análise é aproximadamente recta. Os resultados obtidos com este modelo não são adequados à análise de pontes em curva.

MODELOS SIMPLIFICADOS

Para facilitar a análise, e tornar os resultados mais gerais, foram utilizados parâmetros adimensionais na caracterização dos sistemas de dissipação. Assim o parâmetro C, um dos dois parâmetros que caracterizam os dissipadores viscosos, foi substituído pelo parâmetro C', que tem o seguinte significado:

$$C' = C/M \quad \text{em que M é a massa do tabuleiro}$$

No estudo foram analisados modelos com frequência própria variando entre 0.5Hz e 1.50Hz.

Foram considerados dissipadores com as seguintes características:

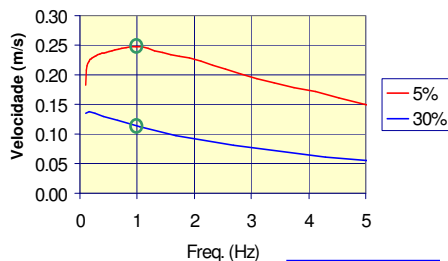
Parâmetro α – 0.10, 0.25, 0.50 e 0.75

Parâmetro C' – Valores entre 0.10 e 3.10

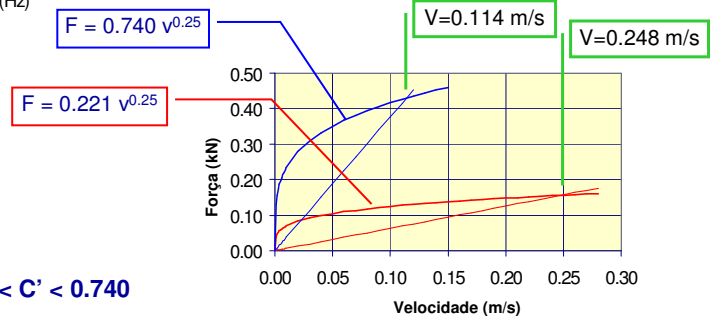
Os valores de C' foram estimados por forma a obter valores de amortecimento equivalente entre 5% e 30%. A gama de valores de C' a utilizar varia com o valor da frequência da estrutura e com o valor do parâmetro α .

MODELOS SIMPLIFICADOS

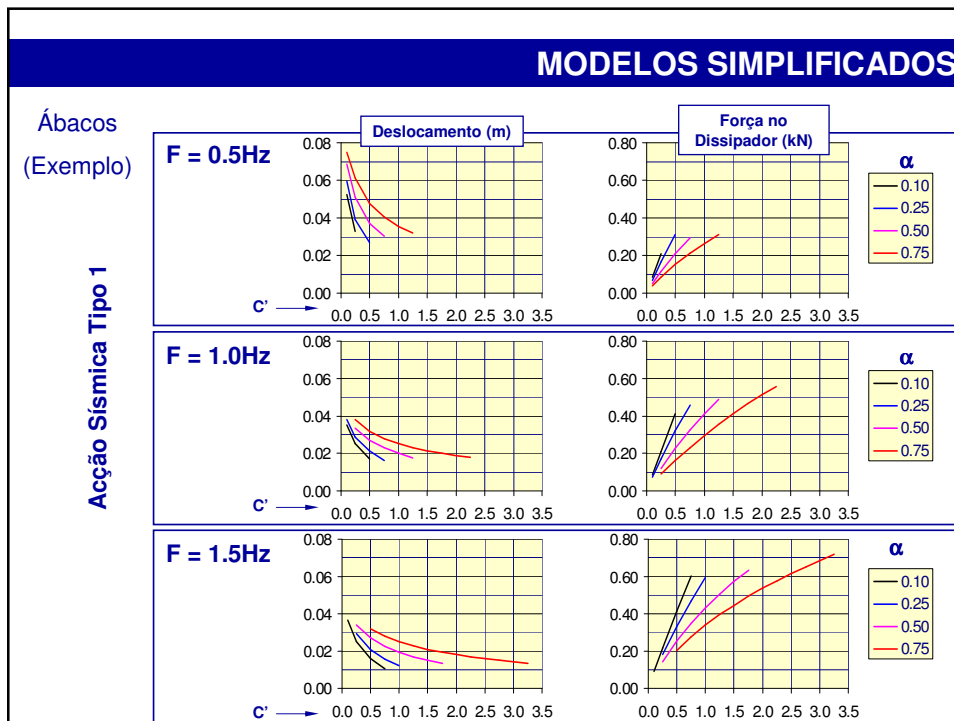
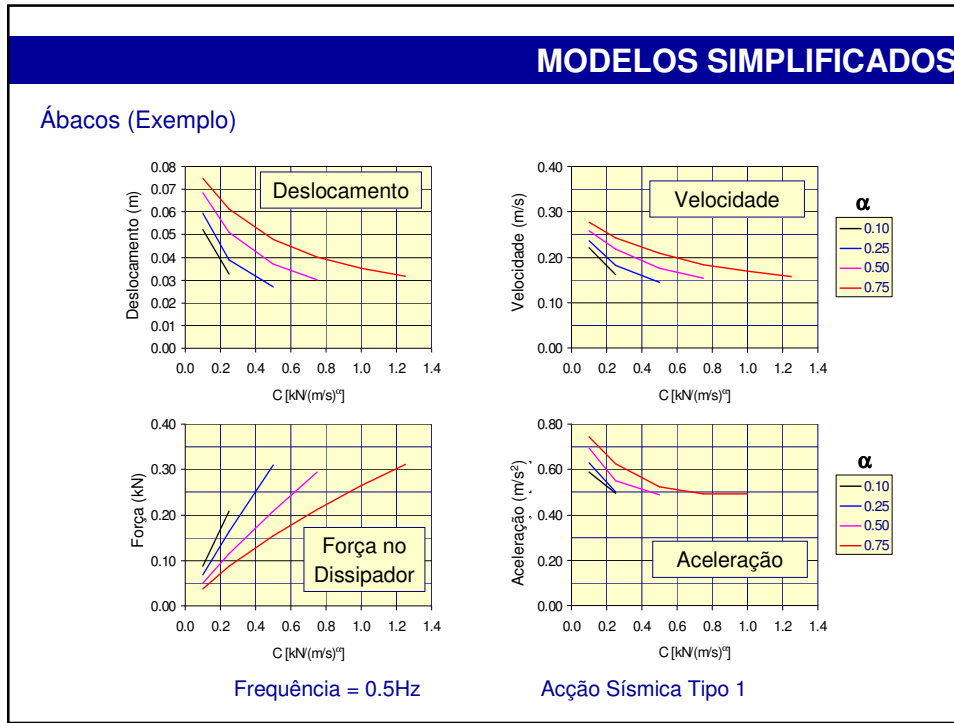
Espectro de Resposta de Velocidade



Calibração dos valores de C' (Frequência = 1.0 Hz)



Solução: $0.221 < C' < 0.740$



MODELOS SIMPLIFICADOS

Um dos problemas detectado com os dissipadores com α muito baixo, é o decréscimo do amortecimento com o aumento da velocidade máxima.

Quando uma dada solução é calibrada para uma determinada velocidade máxima, se essa velocidade for excedida o valor do amortecimento decresce.

Na figura superior está representada a variação do coeficiente de amortecimento equivalente com o factor de escala da velocidade máxima (para a velocidade de projecto o factor é unitário).

Amortecimento equivalente

Factor de Escala da Velocidade

Amortecimento equivalente

Factor de Escala da Velocidade

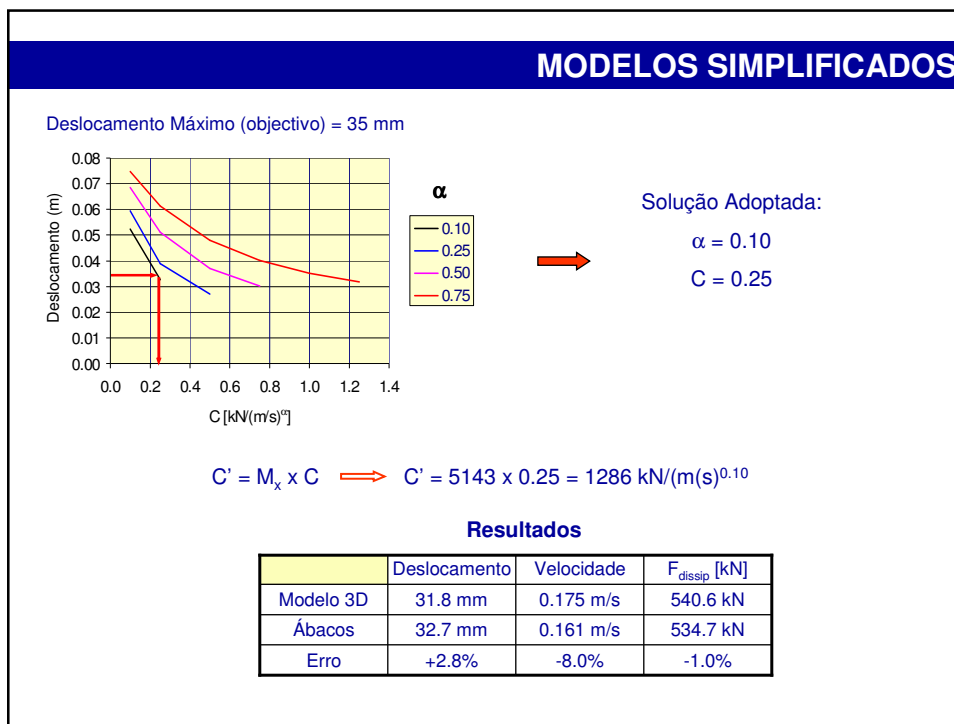
MODELOS SIMPLIFICADOS

Exemplo de aplicação a um modelo de ponte

Ponte sobre a ribeira de Guadalim (Alqueva)

Mode	Freq. [Hz]	Longitudinal	Transversal	Vertical
1	0.568	73.969	0	0
2	0.688	0	61.869	0
3	1.172	0	-1.856	0
4	1.687	0	0	2.213
5	1.740	0	33.934	0
6	1.995	0	0	0.001
7	2.443	0	0	-7.582
8	2.546	0	-1.938	0
9	2.973	-0.002	0	-0.002
10	3.503	0	0.002	35.565

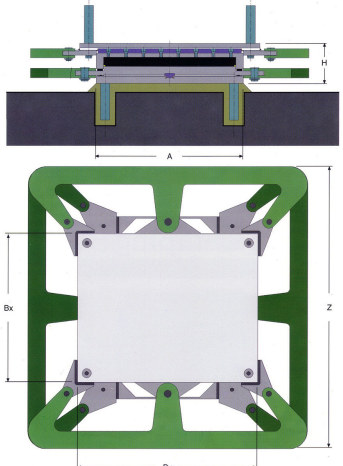
Características dinâmicas (M = 5143 ton)



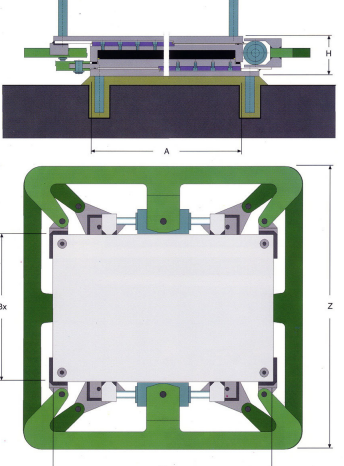
SOLUÇÕES DE DISSIPADORES

Dissipadores Algasism

PND
Dissipador hysterético de aço



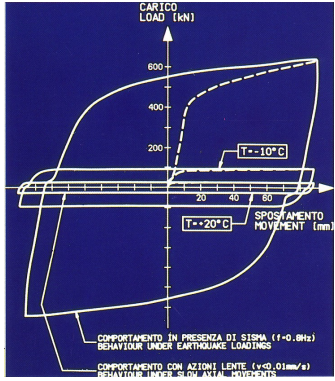
PNUD
Dissipador hysterético de aço
Livres para acções lentas



(Catálogo ALGA)

SOLUÇÕES DE DISSIPADORES

Dissipadores Algasism PND e PNUD



Modelo de Comportamento

DIMENSIONI - DIMENSIONS [mm]

PND - DISPOSITIVI FISSI - FIXED DEVICES									
Segnatura - Mark	Fy	Fy	A	Bx	By	Z	Z	H	
PND 3000 / 150 / 150 -	150	225	440	440	820	1158	1180	174	
PND 4000 / 150 / 150 -	200	300	510	510	860	1167	1270	180	
PND 5000 / 150 / 150 -	250	375	570	570	880	1403	1260	185	
PND 6000 / 150 / 150 -	300	450	620	620	910	1270	1340	185	
PND 7000 / 150 / 150 -	350	525	670	670	970	1271	1460	210	
PND 8000 / 150 / 150 -	400	600	720	720	990	1327	1395	210	
PND 9000 / 150 / 150 -	450	675	760	760	1010	1340	1435	210	
PND 10000 / 150 / 150 -	500	750	800	800	1060	1402	1490	222	
PND 12000 / 150 / 150 -	600	900	880	880	1160	1395	1495	229	
PND 15000 / 150 / 150 -	750	1125	980	980	1210	1490	1692	248	
PND 18000 / 150 / 150 -	900	1350	1080	1080	1310	1493	1867	256	
PND 20000 / 150 / 150 -	1000	1500	1130	1130	1330	1580	1961	260	

PNUD - DISPOSITIVI MOBILI - SLIDING DEVICES									
Segnatura - Mark	Fy	Fy	A	Bx	By	Z	Z	H	
PNUD 3000 / 150 / 150 - 150(+/-75)	225(+75)	440	440	1130	1122	1205	174		
PNUD 4000 / 150 / 150 - 200(+75)	300(+75)	510	510	1130	1148	1253	180		
PNUD 5000 / 150 / 150 - 250(+75)	375(+75)	570	570	1140	1200	1260	185		
PNUD 6000 / 150 / 150 - 300(+75)	450(+75)	620	620	1150	1253	1323	185		
PNUD 7000 / 150 / 150 - 350(+75)	525(+75)	670	670	1180	1266	1455	210		
PNUD 8000 / 150 / 150 - 400(+75)	600(+75)	720	720	1195	1314	1380	210		
PNUD 9000 / 150 / 150 - 450(+75)	675(+75)	760	760	1205	1323	1435	210		
PNUD 10000 / 150 / 150 - 500(+75)	750(+75)	800	800	1240	1402	1490	222		
PNUD 12000 / 150 / 150 - 600(+75)	900(+75)	880	880	1280	1380	1493	229		
PNUD 15000 / 150 / 150 - 750(+75)	1125(+75)	980	980	1310	1490	1692	248		
PNUD 18000 / 150 / 150 - 900(+75)	1350(+75)	1080	1080	1340	1493	1867	256		
PNUD 20000 / 150 / 150 - 1000(+75)	1500(+75)	1130	1130	1360	1580	1961	260		

■ BASSA SISMICITA' - LOW SEISMICITY ■ ALTA SISMICITA' - HIGH SEISMICITY

SIGNIFICATO DELLE SIGLATURE - KEY OF MARKS

es.: **PNUD 20000 / 150 / 150 - 1500 (+/-75)**

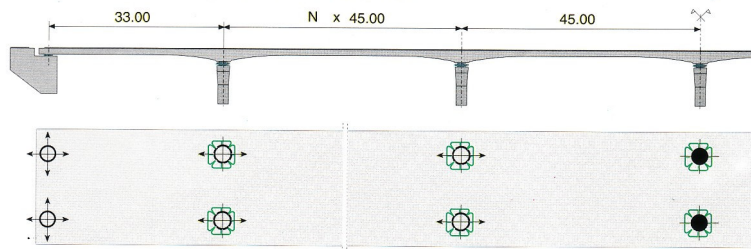
20000 = Carico verticale [kN] - Vertical Load [kN]
150/150 = Movimento elastoplastico longitudinale / trasversale (mm)
Hysteretic longitudinal / transversal displacement (mm)
1500 = Forza di snervamento longit. / trasv. [kN] - Fy nel diagramma carico-spostamento
Yield longit. / transv. force [kN] - Fy in the typical load-deflection plot
+/-75 = Escursione termica [mm] - Thermal displacement [mm]

(Catálogo ALGA)

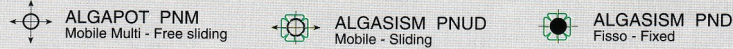
SOLUÇÕES DE DISSIPADORES

Dissipadores Algasism PND e PNUD

ESEMPIO DI DISPOSIZIONE - TYPICAL LAYOUT



LEGENDA SIMBOLI - SYMBOLS

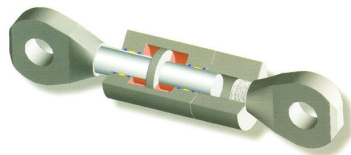


Exemplo de aplicação

(Catálogo ALGA)

SOLUÇÕES DE DISSIPADORES

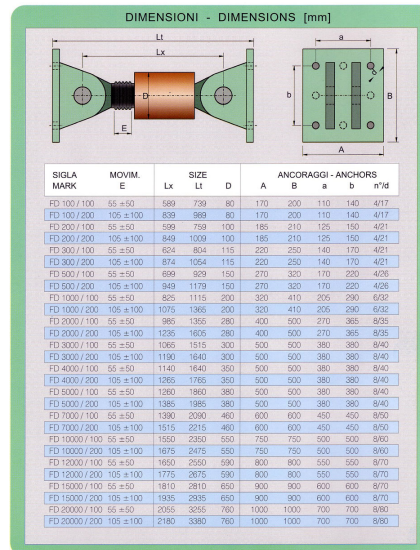
Dissipadores Algasism FD (Viscosos)



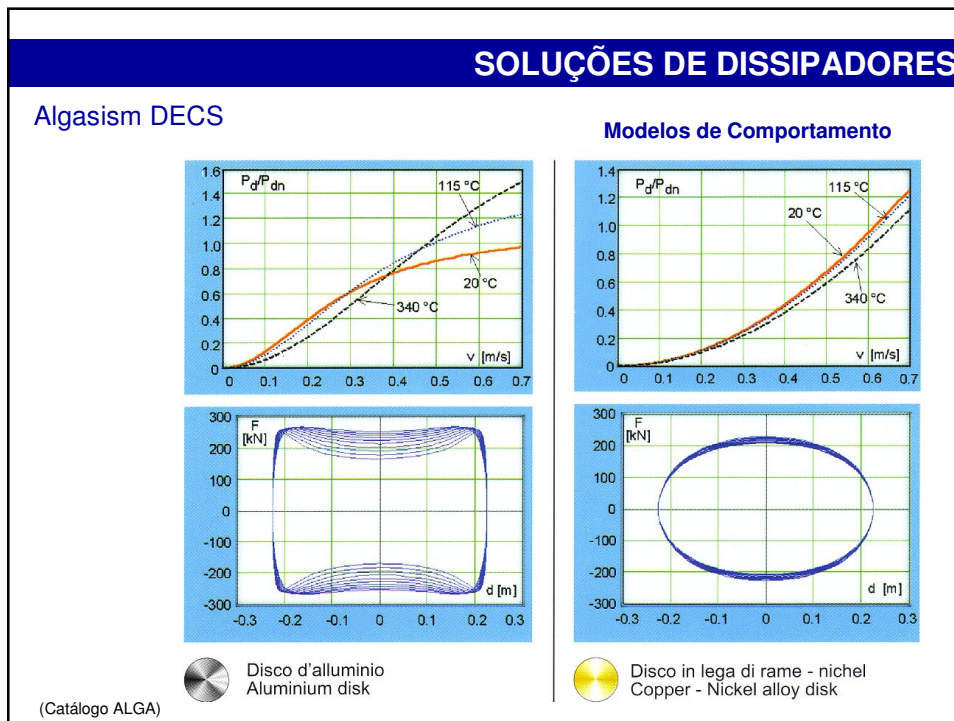
Dissipadores viscosos que, de acordo com o fabricante, tem uma força baixa para ações lentas e funciona como rígido para ações rápidas.

FD 2000/100:

- Força de projecto de 2000kN
- Deslocamento máximo de 100mm



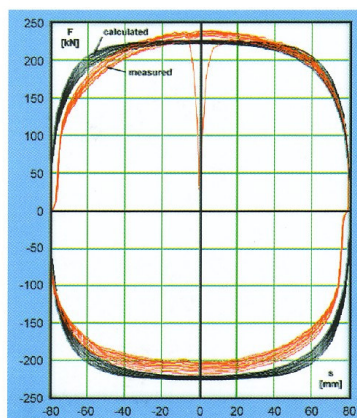
(Catálogo ALGA)



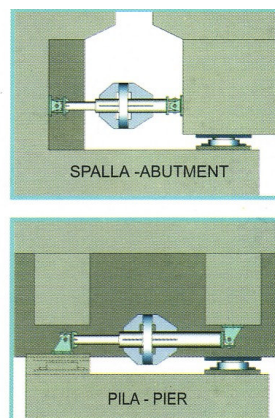
SOLUÇÕES DE DISSIPADORES

Algasism DECS

Resultados de Ensaio Dinâmicos



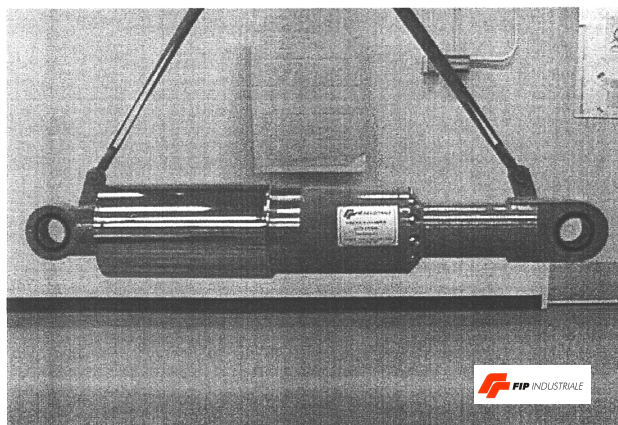
Instalação tipo



(Catálogo ALGA)

SOLUÇÕES DE DISSIPADORES

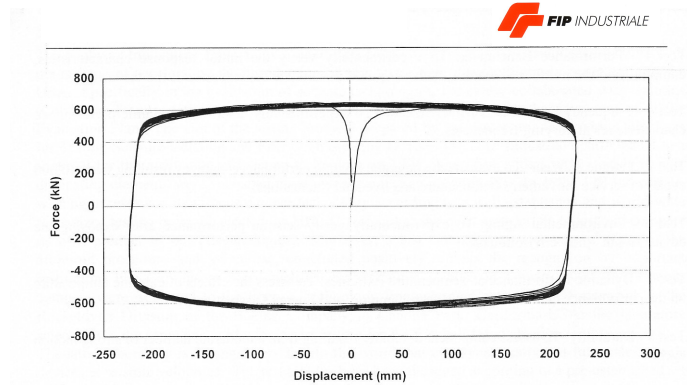
Dissipador Viscoso Não Linear



(Infanti e Castellano, 2001)

SOLUÇÕES DE DISSIPADORES

Dissipador Viscoso Não Linear

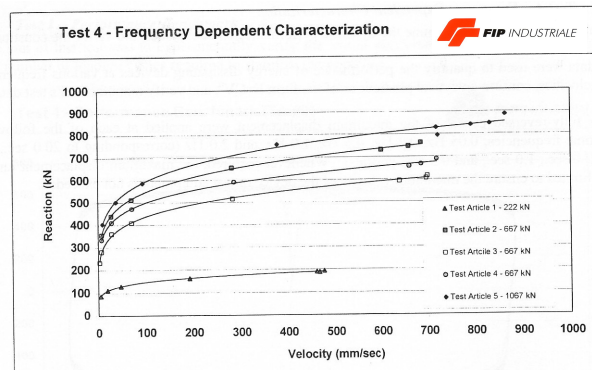


Modelo típico de comportamento dos Dissipadores Viscosos FIP

(Infanti e Castellano, 2001)

SOLUÇÕES DE DISSIPADORES

Dissipador Viscoso Não Linear

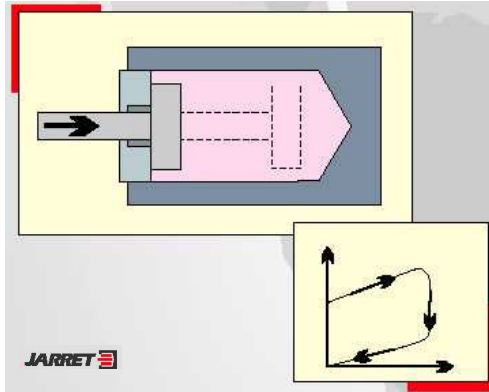


Relação Força-Velocidade

(Infanti e Castellano, 2001)

SOLUÇÕES DE DISSIPADORES

Dissipador Viscoso Não Linear



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

com α entre 0.1 e 0.4

(www.jarret.fr)

BIBLIOGRAFIA

Jerónimo, Eva – “Análise Dinâmica de Pontes com Dissipadores Viscosos”, Dissertação de Mestrado, IST, 2001.

Infanti, S.; Castellano, G. – “Viscous Dampers: a Testing Investigation According to the Hitec Protocol”, Fifth World Congress on Joints, Bearings and Seismic Systems for Concrete Structures, Roma, 2001.

Guerreiro, L.; Azevedo, J.; Virtuoso, F. – “Use of Paraseismic Dissipative Devices in Viaducts”, 11th European Congress on Earthquake Engineering, Paris, 1998.

Virtuoso, F.; Guerreiro, L.; Azevedo, J. – “Modelling the Seismic Behaviour of Bridges with Viscous Dampers”, 12th World Congress on Earthquake Engineering, Auckland, 2000.

Guerreiro, L.; Jerónimo, E. – “Seismic Displacement Evaluation of Bridges with Non-Linear Viscous Dampers”, Third World Congress on Structural Control, Como, 2002.

Catálogos Alga

www.alga.it

www.jarret.fr