

## COMPORTAMENTO SÍSMICO EXPERIMENTAL DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO REFORÇADAS COM DISPOSITIVOS DISSIPADORES DE ENERGIA

**Ema COELHO**  
C3ES, LNEC  
Lisboa

**A. CAMPOS-COSTA**  
C3ES, LNEC  
Lisboa

**E. C. CARVALHO**  
C3ES, LNEC  
Lisboa

**F. C. PONZO**  
Univ. della Basilicata  
Potenza, Italy

**M. DOLCE**  
Univ. della Basilicata  
Potenza, Italy

### SUMÁRIO

Apresenta-se um programa experimental realizado na plataforma sísmica do LNEC, em colaboração com a Universidade de Basilicata, no âmbito do projecto Europeu ECOEST II, cujo objectivo foi a aplicação de técnicas de controlo passivo, baseadas em sistemas de contraventamento com dissipadores, na reabilitação sísmica de estruturas existentes de betão armado.

### 1. INTRODUÇÃO

Com o objectivo de estudar a eficácia de técnicas de controlo passivo aplicadas à reabilitação sísmica de estruturas existentes de betão armado, foi desenvolvido um programa experimental na plataforma sísmica do LNEC, por solicitação da Universidade de Basilicata, no âmbito do projecto Europeu ECOEST II – *European Consortium of Earthquake Shaking Tables* [1]. O programa consistiu no ensaio sísmico de estruturas em pórtico de betão armado, reforçadas com sistemas de contraventamento metálico com dispositivos dissipadores de energia.

Os ensaios foram realizados no LNEC, em dois modelos de pórticos espaciais com 4 pisos, construídos à escala 1/4 e dimensionados apenas para cargas verticais, sem resistência sísmica específica, de acordo com a regulamentação Italiana anterior a 1970. Estudaram-se dois sistemas de contraventamento, associados a materiais e tecnologias diferentes, constituídos por elementos metálicos com dispositivos dissipadores baseados, num caso, na capacidade de dissipação de energia plástica do aço, e, em alternativa, nas propriedades “superelásticas” e dissipativas de ligas metálicas especiais com memória de forma (SMA - *Shape Memory Alloys*). Realizaram-se ensaios em modelos reforçados com cada um dos sistemas e em modelos sem contraventamento, considerando como excitações sísmicas duas componentes horizontais dos registos de Colfiorito e Nocera do sismo de Umbria de 1997.

Descrevem-se as principais características dos modelos experimentais e os ensaios realizados, sendo apresentadas as metodologias de ensaio e os resultados experimentais obtidos. Tratou-se de um programa experimental de interesse e dimensão apreciáveis, em especial no que respeita à instrumentação utilizada e ao número de variáveis medidas. Com base nos resultados dos ensaios, fazem-se algumas considerações sobre a adopção de técnicas de controlo passivo na reabilitação de estruturas de betão armado sem dimensionamento sísmico específico.

## 2. DESCRIÇÃO DOS MODELOS EXPERIMENTAIS

### 2.1 Geometria e massa dos modelos

Foram construídos dois modelos, à escala 1/4, de edifícios em pórtico de betão armado com 4 pisos, simétricos em planta e com dois vãos de 1,125m numa direcção e um vão de 1,25m na direcção perpendicular, concebidos de forma a serem representativos de um protótipo de referência, cuja estrutura foi dimensionada de acordo com a regulamentação Italiana anterior a 1970 [2]. Apresenta-se na figura 1 um esquema da geometria dos modelos.

O dimensionamento da estrutura do protótipo foi efectuado na Universidade de Basilicata, considerando apenas cargas verticais, nomeadamente as cargas permanentes ( $3,22 \text{ kN/m}^2$  nos pisos 1, 2, 3 e  $3,02 \text{ kN/m}^2$  no piso 4) e as sobrecargas correspondentes a uma utilização para habitação ( $2,0 \text{ kN/m}^2$  nos pisos 1 a 3 e  $0,8 \text{ kN/m}^2$  no piso 4), não tendo sido especificamente prevista qualquer resistência a forças horizontais.

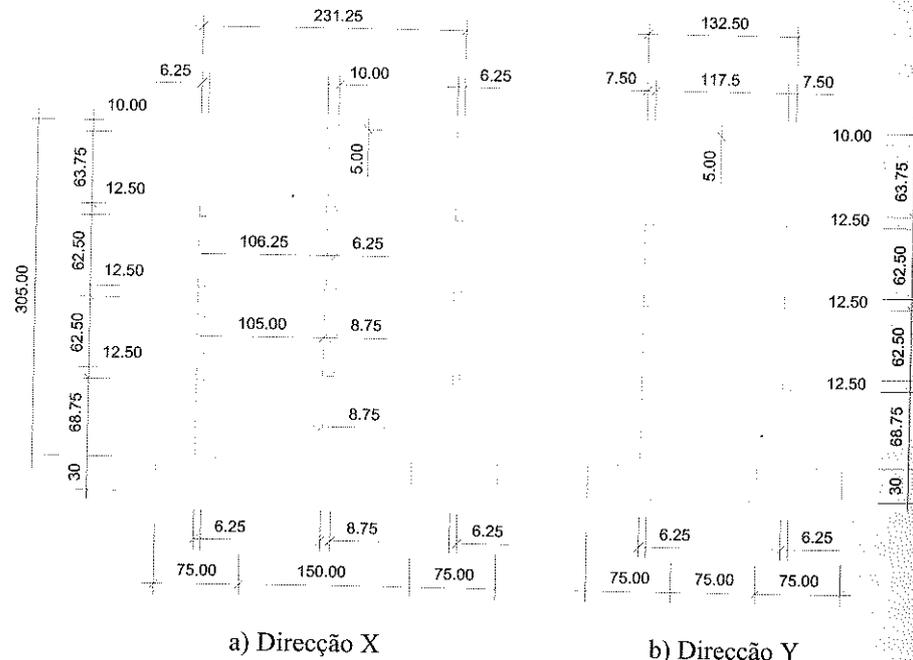


Figura 1: Geometria dos modelos (dimensões em cm)

Tabela 1 – Pesos adicionais aplicados aos modelos experimentais

Pisos	Modelos simétricos			Modelos assimétricos		
	1º vão	2º vão	Total	1º vão	2º vão	Total
1, 2 e 3	12 kN	12 kN	24 kN	---	12 kN	12 kN
4	6 kN	6 kN	12 kN	---	6 kN	6 kN
Total	42 kN	42 kN	84 kN	---	42 kN	42 kN

De forma a reproduzir as cargas totais aplicadas ao protótipo de referência (cargas permanentes de acabamentos e revestimentos de piso e sobrecargas de utilização) e a respeitar as condições de semelhança, que se traduziram pela verificação simultânea das leis de Froude e Cauchy, foi necessária a aplicação nos modelos dos pesos adicionais indicados na tabela 1. Estes foram materializados pela colocação nos pisos de massas metálicas de 6,0 kN, constituídas por blocos de aço, amarradas às lajes dos diferentes pisos e dispostas como se ilustra na figura 2.

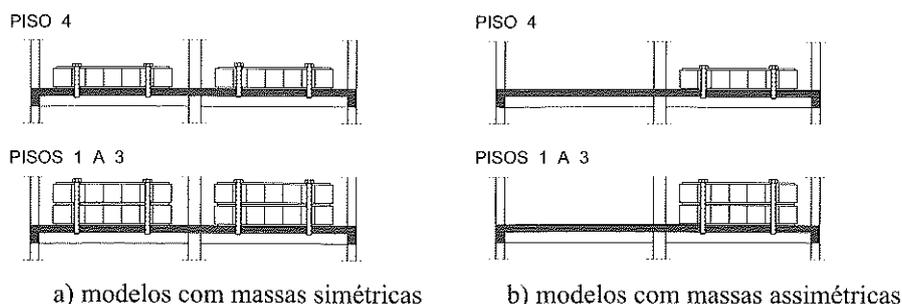


Figura 2: Disposição das massas adicionais nos pisos dos modelos

De forma a introduzir assimetria na resposta dinâmica dos modelos, realizaram-se alguns ensaios considerando uma disposição assimétrica das massa adicionais, tendo sido aplicado apenas metade do peso adicional necessário, o que conduziu à não verificação das condições de semelhança nos modelos assimétricos. Ainda que nos modelos simétricos se tenha reproduzido tanto quanto possível o valor do peso adicional, a disposição das massas utilizada nestes modelos não reproduz exactamente a distribuição de cargas no protótipo, pelo que a resposta da estrutura do protótipo deve ser cuidadosamente interpretada. Nota-se no entanto que o objectivo principal dos ensaios foi a comparação entre estruturas sem qualquer reforço sísmico e contraventadas, pelo que a distorção introduzida não constituiu assim um problema essencial.

## 2.2 Características dos materiais

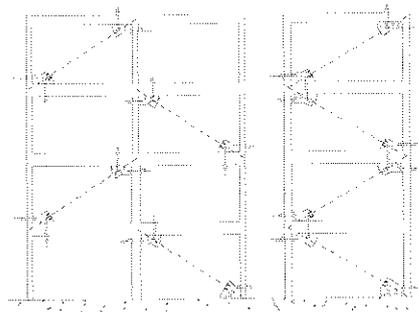
Tendo em conta a escala geométrica dos modelos, e de forma a respeitar as condições de semelhança, utilizou-se na construção dos modelos um “micro-betão” realizado a partir de inertes finos. Estes betões têm-se mostrado razoavelmente representativos dum betão corrente, mesmo em situações nas quais se pretende estudar o comportamento dinâmico em fase inelástica, introduzindo no entanto algumas modificações no comportamento dos modelos em particular distorcendo a deformação específica, atrasando a fissuração por flexão, e aumentando as suas características de aderência [2]. Tais alterações podem minorar-se doseando de forma

equilibrada os diferentes componentes do “micro-betão” e as dimensões dos inertes. O “micro-betão” utilizado foi preparado no LNEC e a sua composição foi definida de forma a obter um material próximo de um betão B25 (tensão média de compressão aos 28 dias de 28 N/mm<sup>2</sup>). Utilizou-se um cimento Portland de presa rápida (II 32,5) e um agregado constituído pelos inertes areia e brita fina com grãos de dimensão entre 0,06 e 6 mm.

De acordo com a regulamentação referida, foram calculadas as percentagens de armadura para o protótipo, considerando o aço italiano FeB38K controlado (tensão de cedência nominal 375 N/mm<sup>2</sup>), com aderência melhorada. De forma a reproduzir as armaduras do protótipo, utilizaram-se varões de diâmetros entre 3 e 6 mm, de aço para parafuso fabricado em Itália, com características de aderência semelhantes às do aço pretendido. Dado que o processo de obtenção deste aço envolve um encruamento significativo do material com aumento da tensão de rotura, foi efectuado em Basilicata um tratamento térmico dos varões para obtenção das características mecânicas adequadas. A escolha das armaduras dos modelos foi baseada nos resultados dos ensaios de tracção de varões tratados, representativos do aço usado, considerando factores de escala das características mecânicas (valores de cedência e últimos da tensão e deformação), tendo em conta os diâmetros utilizados, de forma a respeitar a semelhança.

### 2.3 Sistemas de contraventamento

A intervenção de reabilitação foi projectada na Universidade de Basilicata e consistiu na colocação na estrutura em pórtico de betão armado inicial de elementos metálicos de contraventamento com dispositivos dissipadores [2], nos vários pisos e nas duas direcções X e Y, dispostos como se ilustra na figura 3. Numa direcção (X), os contraventamentos foram colocados na diagonal, um por piso em vãos alternados, de forma a transmitir aos pilares extremos parte das cargas verticais aplicadas na zona central da laje e assim reduzir a variação do esforço axial nos pilares centrais. Na outra direcção (Y), foram dispostos também na diagonal e um por piso.



a) Direcção X

b) Direcção Y

Figura 3: Disposição dos contraventamentos

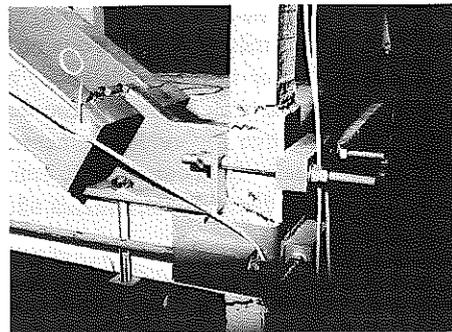


Figura 4: Pormenor da zona de ligação

A ligação dos contraventamentos aos elementos de betão foi efectuada por peças metálicas ancoradas através de quatro parafusos pré-esforçados a chapas metálicas colocadas na face oposta

do respectivo elemento de betão armado, como está ilustrado na figura 4. De forma a distribuir a força transmitida aos contraventamentos, a superfície de betão em contacto com os elementos metálicos foi previamente coberta com argamassa epoxídica. Adicionalmente, foi colocado um tirante  $\phi$  6 de aço ao longo do contorno exterior das lajes dos pisos. O pré-esforço introduzido pelo tirante permitiu reduzir a fendilhação das vigas e aumentar o confinamento dos nós, melhorando as condições de ancoragem. Um dos sistemas de contraventamento é constituído por elementos metálicos com unidades dissipativas em aço, materializadas por um dispositivo de lamelas de aço macio com forma apropriada, fixadas aos elementos de contraventamento, estando a dissipação de energia associada ao comportamento plástico em flexão das lamelas. Cada unidade é composta por quatro lamelas duplas, de dimensões variáveis nos diferentes pisos e direcções, definidas de acordo com o projecto [2]. Estudou-se ainda um sistema baseado na utilização de ligas metálicas com memória de forma (SMA), particularmente eficiente do ponto de vista funcional [3]. Este sistema de contraventamento é constituído por elementos metálicos associados a um dispositivo de fios em liga níquel-titânio [4]. Além da capacidade de dissipação de energia e recuperação da rigidez elástica, este material evidenciou boa durabilidade, elevada resistência à fadiga e à corrosão, e as propriedades mecânicas do dispositivo desenvolvido mostraram-se significativamente estáveis ao longo do tempo.

### 3. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

#### 3.1 Excitação sísmica

Consideraram-se acelerogramas reais registados durante o sismo de Umbria (Setembro 1997), tendo-se considerado as componentes E-W e N-S do registo de Colfiorito e a componente E-W do registo de Nocera, respectivamente com acelerações de pico de de 0,23g, 0,20g, e 0,53g.

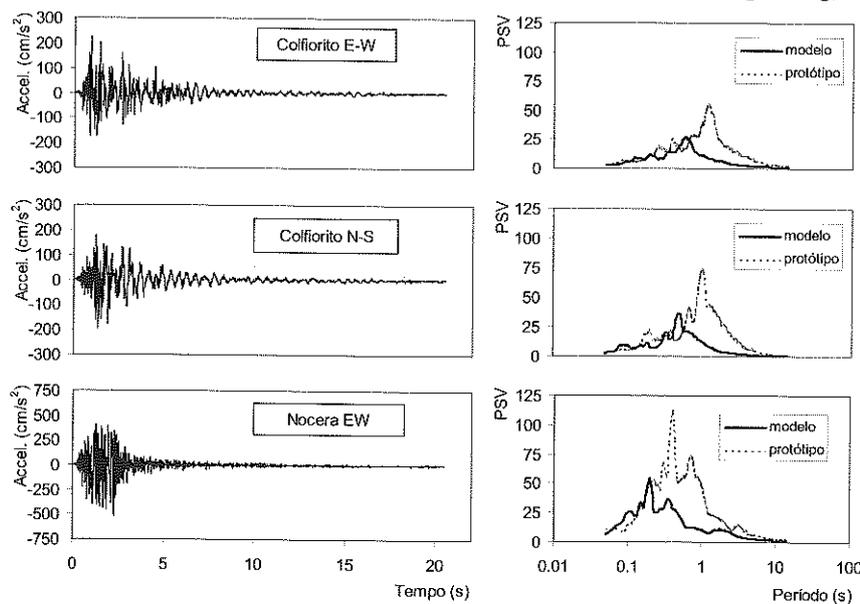


Figura 5 – Acelerogramas nominais de ensaio e espectros de resposta

Representam-se na figura 5 os acelerogramas nominais de ensaio, obtidos dos registos reais afectados na escala do tempo de um factor 2, de modo a respeitar as condições de semelhança ( $t_p/t_M = \lambda^{1/2} = 2$ ;  $a_p/a_M = 1$ ). Apresentam-se ainda os espectros de resposta relativos aos registos reais (protótipo) e às séries de ensaio (modelo), evidenciando o efeito da escala dos modelos.

Os sinais injectados nos actuadores da plataforma foram definidos com base numa adaptação prévia, tendo em conta as funções de transferência de todo o sistema (plataforma, actuadores e massa de um modelo), e a fim de aplicar na base dos modelos os movimentos que mais se aproximassem dos sinais pretendidos. As estruturas foram solicitadas com sinais homotéticos dos acelerogramas nominais de ensaio correspondentes aos registos do sismo de Umbria, resultantes da consideração de uma sequência de valores crescentes da aceleração máxima.

### 3.2 Metodologia de ensaio

O programa experimental consistiu na realização de oito ensaios, considerando os dois modelos em pórtico associados a combinações dos dois sistemas de contraventamento com diferentes disposições de massa e direcções de excitação sísmica, tendo ainda sido realizados ensaios em modelos de referência sem qualquer intervenção de reabilitação [1].

Tabela 2 – Características dos modelos ensaiados

Modelo		B0	B1	B1/A	B1/B	B1/BR	B2	B2/A	B2/B
Estrutura		Nº 1	Nº 2	Nº 2	Nº 2	Nº 2	Nº 2	Nº 2	Nº 2
Massas	Simétricas	X	X	X	X	X			
	Assimétricas						X	X	X
Dissipadores		---	---	Aço	SMA	SMA	---	Aço	SMA

Tabela 3 – Programa de ensaios realizados

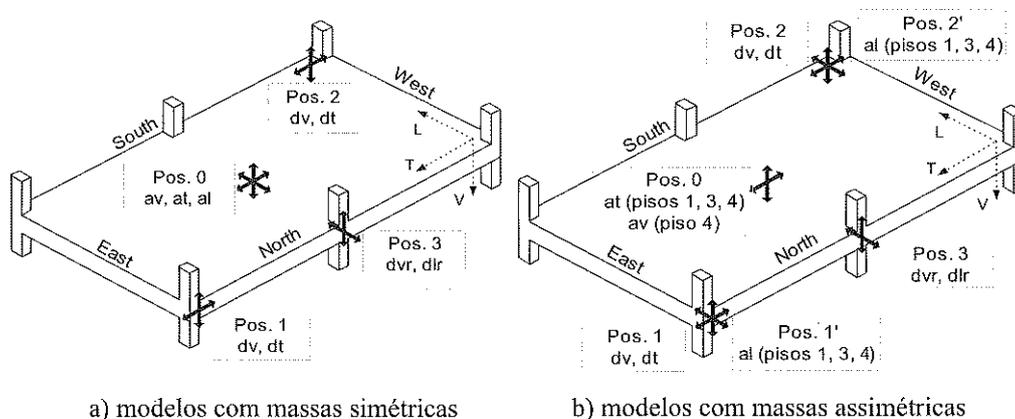
Ensaio	Descrição	Excitação nominal
1 – B0	Solicitação plana (X); excitação crescente até 0,3g	Colfiorito E-W (X)
2 – B1/A	Solicitação plana (X e Y); excitação crescente 1) segundo X até 0,9g; 2) segundo Y até 0,9g	Colfiorito E-W (X,Y) Nocera E-W (X,Y)
3 – B1/B	Solicitação plana (X); excitação crescente até 0,9g	Colfiorito E-W (X)
4 – B2/B	Solicitação bidimensional (X+Y); excitação crescente até 0,8g	Colfiorito E-W (X) Colfiorito N-S (Y)
5 – B2/A	Solicitação bidimensional (X+Y); excitação crescente até 0,9g	Colfiorito E-W (X) Colfiorito N-S (Y)
6 – B2	Solicitação bidimensional (X+Y); excitação crescente até 0,35g	Colfiorito E-W (X) Colfiorito N-S (Y)
7 – B1/BR	Solicitação plana (X); excitação crescente até 1,0g	Colfiorito E-W (X)
8 – B1	Solicitação plana (X); excitação crescente até 0,25g	Colfiorito E-W (X)

O conjunto de ensaios foi definido de forma a confrontar a resposta dos modelos contraventados com a dos modelos de referência, tanto em condições de solicitação plana, como em situações de comportamento tridimensional com influência da resposta em torção dos modelos.

O programa experimental está resumido nas tabelas 2 e 3, onde se apresentam respectivamente, as características dos modelos ensaiados, e a sequência de ensaios realizados. Em cada ensaio realizou-se uma sequência de testes de excitação crescente, definida com base no acelerograma nominal, intercalados com testes de caracterização com um sinal de baixa amplitude com características aproximadas de um “ruído branco” em velocidade, para identificação das propriedades dinâmicas dos modelos, permitindo a avaliação experimental da evolução da danificação estrutural com a intensidade da excitação [1, 5].

### 3.3 Instrumentação dos modelos

A resposta experimental dos modelos não contraventados foi obtida com base na aquisição simultânea dos sinais registados em acelerómetros, transdutores indutivos de deslocamento e sensores ópticos de deslocamento (41 canais a frequências de 100 ou 200 Hz). Nos modelos contraventados usaram-se ainda extensómetros eléctricos de resistência e potenciómetros de deslocamento, e foi efectuada a aquisição simultânea de 65 canais. A fim de avaliar o movimento global das estruturas, mediram-se as acelerações e os deslocamentos ao nível dos pisos e à superfície da plataforma sísmica [1]. A instrumentação colocada nos pisos está esquematizada na figura 6, onde se indicam as posições dos aparelhos de medição nas lajes dos modelos.



a) modelos com massas simétricas

b) modelos com massas assimétricas

Figura 6: Posição da instrumentação das lajes nos pisos dos modelos

Foram colocados nas lajes de todos os pisos, em posição adequada (posições 1 e 2 da figura 6), dois sensores ópticos destinados a medir em cada ponto duas componentes de deslocamento, e dois transdutores indutivos de deslocamento segundo o plano médio longitudinal (posição 3) com o fim de medir duas componentes de deslocamento relativo entre pisos. Foram ainda medidas as três componentes de aceleração no centro dos pisos dos modelos com massas simétricas através de cubos de montagem triaxial de acelerómetros (posição 0 da figura 6-a), tendo sido colocados nas lajes dos modelos assimétricos (posições 0, 1' e 2' da figura 6-b) cubos de acelerómetros, destinados a medir em cada ponto uma ou duas componentes de aceleração. Na plataforma colocaram-se cubos de acelerómetros e dois transdutores indutivos de deslocamento para medição das componentes de aceleração e duas componentes horizontais de deslocamento. Nos modelos contraventados utilizaram-se ainda potenciómetros de desloca-

mento e extensômetros eléctricos de resistência montados em ponte completa, a fim de medir respectivamente os deslocamentos relativos diagonais dos elementos metálicos e as suas extensões médias. Com base numa calibração prévia dos diferentes contraventamentos, foram obtidos durante os ensaios diagramas esforço axial-deslocamento para todos os contraventamentos.

#### 4. RESULTADOS DOS ENSAIOS

Apresentam-se nas figuras 7 e 8 as histórias de deslocamentos transversais no topo (componente segundo X no centro de gravidade do 4º piso) obtidos nos últimos testes das sequências de ensaio dos modelos contraventados com massas simétricas (B1/A, B1/B e B1/BR) e assimétricas (B2/A e B2/B), confrontados com os deslocamentos dos modelos sem contraventamento (B1 e B2), e ainda do modelo inicial de referência (B0). A evolução da frequência própria aparente na direcção transversal (X) dos oito modelos ensaiados, identificada ao longo dos testes com excitação crescente considerados em cada ensaio está representada na figura 9.

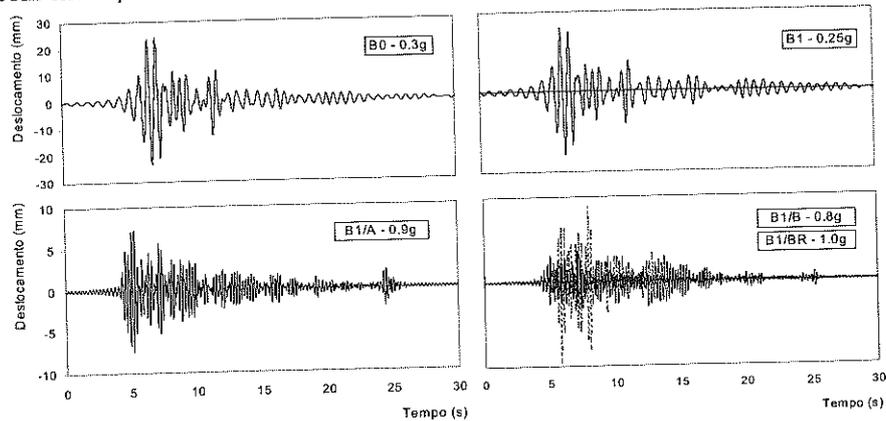


Figura 7: Histórias de deslocamentos relativos transversais no topo dos modelos B0, B1, B1/A, B1/B e B1/BR para excitação segundo X nas últimas fases de ensaio

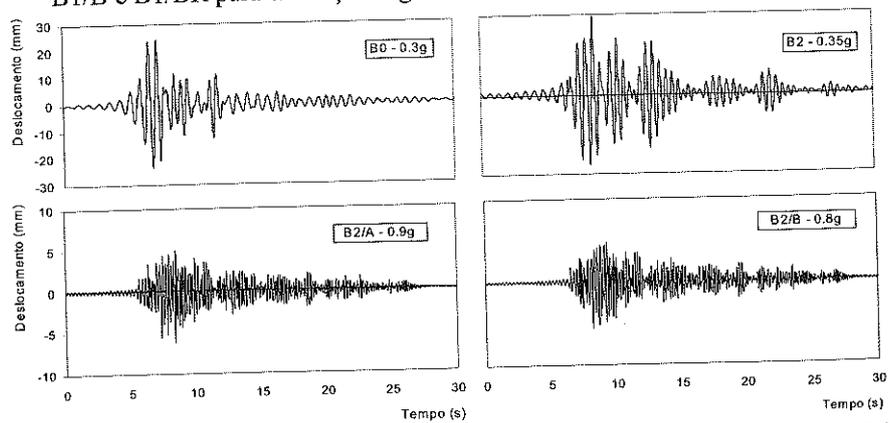


Figura 8: Histórias de deslocamentos relativos transversais no topo dos modelos B0, B2, B2/A e B2/B para excitação segundo X (B0) ou X + Y, nas últimas fases de ensaio

O efeito do reforço está evidenciado nestas figuras, sendo clara a importante rigidificação conferida pela existência de contraventamentos, traduzida pelos deslocamentos reduzidos para excitações de severidade considerável e pelo significativo aumento da frequência própria. De facto, enquanto o modelo inicial de referência (B0) apresenta deslocamentos no topo de cerca de 2.5 cm para uma excitação segundo X com aceleração de pico na ordem de 0.3g, o deslocamento dos modelos contraventados não excede 1 cm para uma aceleração máxima da ordem de 1g, apresentando valores máximos de cerca de 6 ou 7 mm para cerca de 0.8 ou 0.9g.

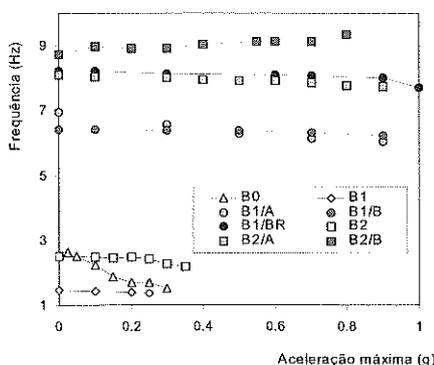


Figura 9: Evolução da frequência própria (X) dos oito modelos com a aceleração de ensaio.

Como se verificou durante os ensaios, o modelo B0 apresentou alguma danificação, sobretudo nas zonas de ligação aos pilares das vigas do primeiro piso, quando solicitado com excitações crescentes até 0.3g, tendo o valor da frequência própria transversal apresentado uma redução de cerca de 40% (valores inicial e final respectivamente 2.6Hz e 1.5 Hz). Os modelos B1 e B2 apresentam valores da frequência inicial de 1.45 Hz e 2.5 Hz, da ordem de grandeza da frequência final do modelo B0 (nota-se que o modelo B2 tem apenas cerca de 70% da massa do modelo B0), evidenciando assim um estado de danificação próximo deste modelo no final do ensaio. Este aspecto parece notável atendendo ao facto das estruturas dos modelos terem sido anteriormente submetidas a acelerações de cerca de 1g e dado que os danos nos elementos de betão dos modelos contraventados se traduziram essencialmente por algumas fissuras em zonas próximas da ligação dos elementos de contraventamento. Conforme está ilustrado, a frequência própria dos modelos contraventados apresentou valores entre cerca de 6.5 e 9.0 Hz, correspondendo assim em média a uma rigidez cerca de 10 vezes superior à da estrutura não contraventada inicial. Nestes modelos, como referido, a dissipação de energia é assegurada por dissipadores em aço ou em liga níquel-titânio.

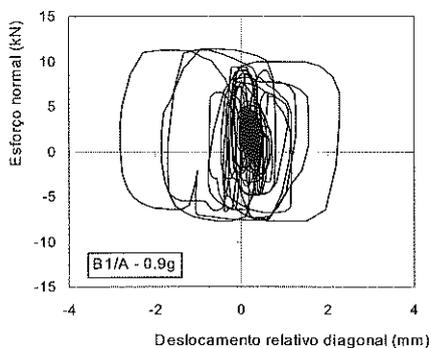


Figura 10: Diagrama N- $\delta$  num elemento de contraventamento do modelo B1/A (dissipadores de aço).

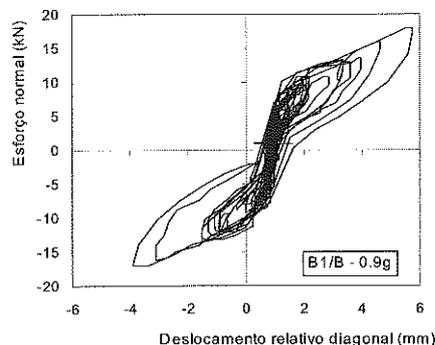


Figura 11: Diagrama N- $\delta$  num elemento de contraventamento do modelo B1/B (dissipadores SMA de liga níquel-titânio)

O comportamento dos dissipadores está ilustrado nas figuras 10 e 11 que representam o esforço normal de um elemento de contraventamento (3º piso, direcção X) em função do deslocamento diagonal relativo, numa das últimas fases de ensaio dos respectivos modelos. Da observação destas figuras salienta-se, por um lado, a grande capacidade de dissipação de energia por deformação plástica do aço, sem perda de rigidez nem resistência significativa do elemento de contraventamento. Por outro lado os dissipadores SMA mostraram uma capacidade dissipativa considerável, sendo notável a recuperação das características “elásticas” deste material. De facto, após um grande número de ciclos com dissipação significativa, os elementos de contraventamento praticamente não apresentaram deslocamentos permanentes, recuperando no início de cada novo ciclo as características de rigidez e resistência “elásticas” iniciais.

## 5. CONCLUSÕES

O programa experimental que se apresenta realizou-se na plataforma sísmica do LNEC, em colaboração com a Universidade de Basilicata, no âmbito do projecto Europeu ECOEST II, tendo os ensaios sido realizados durante o ano de 1999. Trata-se de um programa de interesse e dimensão apreciáveis, nomeadamente se se tiver em conta, por um lado, o carácter inovador das intervenções de reabilitação consideradas, em particular os sistemas baseados na utilização de materiais com memória de forma e, por outro lado, a especificidade da instrumentação utilizada e o número de variáveis medidas. Salienta-se ainda o facto de terem sido considerados modelos espaciais representativos de edifícios em pórtico de betão armado com 4 pisos, nalguns casos com assimetria de massa, sujeitos a excitações planas e bidimensionais, tendo sido possível avaliar os aspectos ligados à assimetria da resposta dinâmica daquelas estruturas.

A análise dos resultados experimentais evidenciou algumas das vantagens das técnicas baseadas em sistemas de contraventamento metálico com dissipadores aplicadas a estruturas existentes de betão armado sem dimensionamento sísmico específico, nomeadamente: a significativa redução dos danos estruturais em presença de acções sísmicas de severidade considerável; a redução das exigências de ductilidade nos elementos estruturais; o controlo das forças impostas pelos contraventamentos à estrutura de betão armado; e a apreciável redução dos deslocamentos entre pisos e assim a diminuição de danos em elementos não estruturais.

## 6. REFERÊNCIAS

- [1] Coelho *et al*, “Shaking Table Tests on 3D Braced and Unbraced Reinforced Concrete Frames with Energy Dissipating Systems”, proj. ECOEST-II, relatório LNEC, 2000 (under preparation).
- [2] Braga *et al*, “Comportamento Sperimentale di Strutture in Calcestruzzo Armato Rafforzate con Controventi Dissipativi”, *Convegno Nazionale “L’ingegneria Sismica in Italia”*, Turim, 1999.
- [3] Dolce, M. *et al*, “Il Comportamento Sperimentale di Dispositivi Basati su Leghe a Memoria di Forma”, *Convegno Nazionale “L’ingegneria Sismica in Italia”*, Turim, 1999.
- [4] Dolce, M.; Marnetto, R., “Dispositivi per il Controllo Passivo Basati sulle Leghe a Memoria di Forma”, *Convegno Nazionale “L’ingegneria Sismica in Italia”*, Turim, 1999.
- [5] Coelho *et al*, “Assessment of Experimental Seismic Response through Damage Evaluation”, 12<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, 2000.