

# **DIMENSIONAMENTO DE CONTRAVENTAMENTOS METÁLICOS PARA REFORÇO SÍSMICO DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO**

**Romain Sousa**

Investigador  
EUCENTRE  
Pavia - Itália

**José Miguel Castro**

Professor Auxiliar  
FEUP  
Porto - Portugal

## **SUMÁRIO**

A entrada em vigor da nova regulamentação europeia para o dimensionamento sísmico fará com que um grande número de estruturas de betão armado existentes não apresente resistência sísmica adequada, conduzindo por isso à necessidade do seu reforço. Nesse sentido, apesar do contraventamento de estruturas de betão armado com elementos metálicos surgir como uma boa solução de reforço, o seu uso é limitado devido à falta de regulamentação aplicável neste domínio. O principal objectivo deste trabalho consiste no desenvolvimento de um método de dimensionamento simples e expedito que possa promover o reforço de estruturas porticadas betão armado com contraventamentos metálicos. Nos últimos anos, a comunidade científica tem demonstrado que o dimensionamento sísmico com base em deslocamentos é mais adequado e rigoroso que os métodos tradicionais baseados em forças. Com vista à obtenção de parâmetros fundamentais para a aplicação deste novo método, foram realizadas análises não lineares estáticas e dinâmicas em estruturas porticadas de betão armado reforçadas com contraventamentos metálicos concêntricos. Os resultados fornecidos pelas análises permitiram determinar uma variedade parâmetros tais como o perfil de deslocamentos laterais, o deslocamento de cedência, o deslocamento alvo, entre outros. Com base nos resultados obtidos propõe-se um método de dimensionamento baseado em deslocamentos que permite, de uma forma simples e expedita, dimensionar o sistema de reforço de modo a que a estrutura híbrida apresente um comportamento sísmico adequado.

## **INTRODUÇÃO**

Os eventos sísmicos recentes causaram grandes danos em edifícios de betão armado com pouca ductilidade, demonstrando assim que muitas estruturas localizadas em regiões sísmicas não possuem resistência adequada para suportar sismos de moderada e alta intensidade, contribuindo desta forma para um elevado número de vítimas. Nesse sentido a torna-se de extrema importância o desenvolvimento de novas e modernas metodologias de avaliação e reforço que permitam avaliar e melhorar o comportamento sísmico do parque edificado. Assim, o uso de contraventamentos metálicos para reforço de pórticos de betão armado apresenta-se como uma boa solução de reforço.

Ao longo dos anos, vários trabalhos teóricos científicos e aplicações práticas demonstraram a eficácia desta solução quando comparada com outras soluções de reforço mais comuns. No entanto, assiste-se ainda a uma ausência de metodologias de dimensionamento simples e eficazes que possam potenciar o uso desta técnica. É neste contexto que o trabalho de investigação apresentado neste artigo foi desenvolvido.

## **1. REFORÇO SÍSMICO DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO**

O reforço sísmico de estruturas de betão armado pode dividir-se em duas grandes áreas de intervenção: i) adição de elementos estruturais como paredes resistentes ou contraventamentos metálicos, e ii) reforço de elementos estruturais através de encamisamento com fibras ou mantas de carbono ou vidro, betão armado ou perfis metálicos. Nos últimos anos têm vindo também a ser utilizados dispositivos dissipativos de energia como forma

de melhorar o desempenho das estruturas. Sugano [1] resumiu as técnicas de reforço mais comuns agrupando-as com base nos objectivos da reabilitação: i) aumento da resistência, ii) aumento da ductilidade e iii) aumento da resistência e da ductilidade. De entre as várias técnicas de reforço é comum distinguir-se entre intervenções locais (reforço de um ou mais elementos) e globais (introdução de novos elementos ou sistemas estruturais). Conforme se pode visualizar na Figura 1, a adição de novos elementos contribui para o aumento da rigidez inicial da estrutura assim como para o aumento da resistência lateral. Este tipo de intervenção apresenta-se como uma forma eficaz de controlar as deformações laterais permitindo desta forma garantir que as deformações máximas durante o sismo são compatíveis com os valores limite associados ao colapso parcial ou global dos elementos estruturais e não estruturais. Apesar das vantagens associadas a este tipo de intervenção, é importante referir que tal opção está geralmente associada a modificações substanciais da estrutura original.

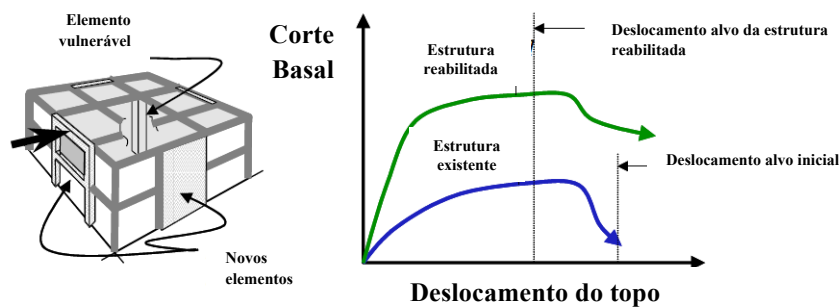


Figura 1: Efeito de uma intervenção global no comportamento estrutural [2]

No que diz respeito à reabilitação através da alteração de elementos estruturais, o comportamento da estrutura é bastante diferente do observado do caso da intervenção global. Neste caso, a intervenção é efectuada com o objectivo de aumentar localmente a capacidade de deformação dos elementos mais vulneráveis, não havendo por isso uma alteração substancial da resistência e/ou da rigidez da estrutura inicial (Figura 2).

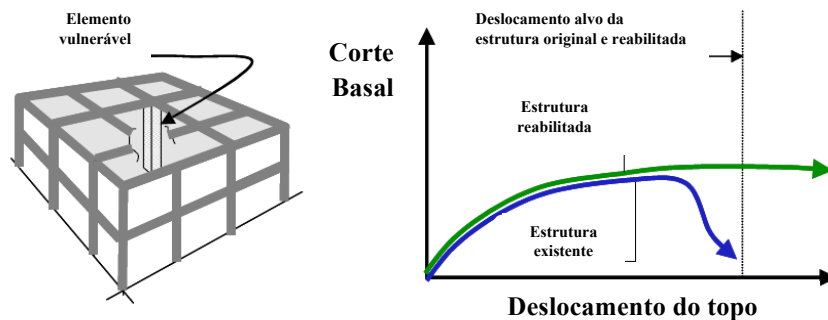


Figura 2: Efeito de uma intervenção local no comportamento estrutural [2]

Nas últimas décadas, vários estudos [3, 4] indicaram que o reforço global de estruturas com recurso a contraventamentos metálicos é uma técnica de reforço eficaz e que pode revelar algumas vantagens comparativamente a outras soluções mais correntes. De uma forma genérica, o reforço consiste na aplicação de elementos metálicos no interior dos vãos dos edifícios, podendo a sua organização espacial ou tipologia dos elementos metálicos variar (Figuras 3 e 4).

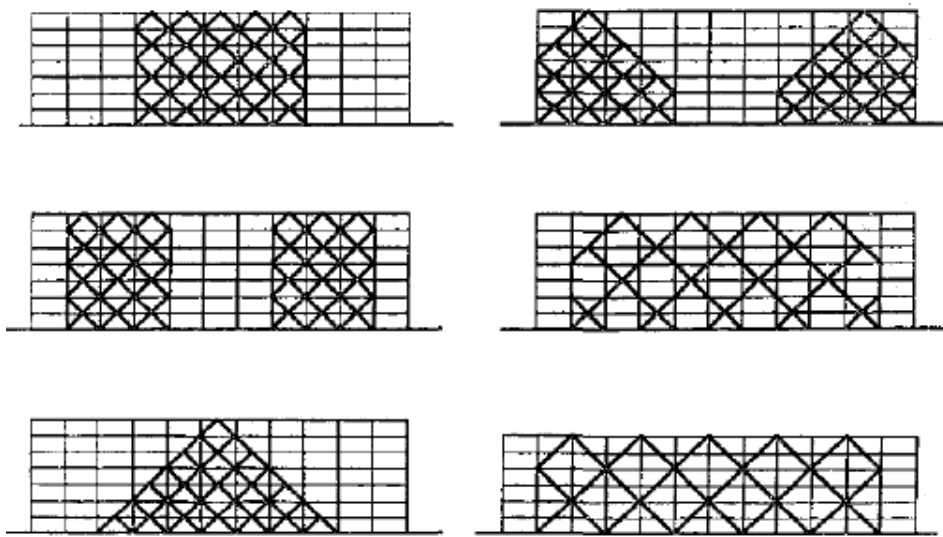


Figura 3: Diferentes configurações de contraventamentos [4]

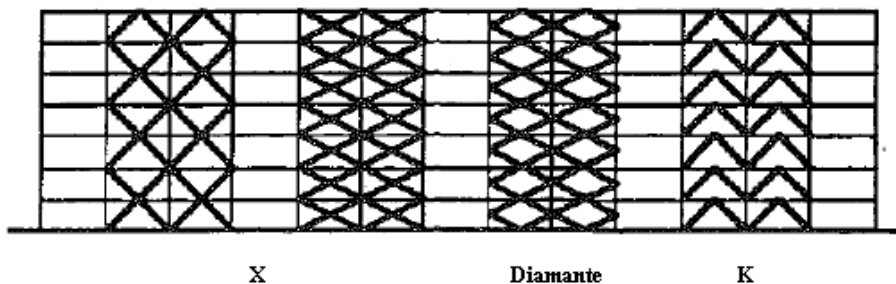


Figura 4: Tipos de contraventamentos mais comuns [4]

No que concerne às ligações do reforço com a estrutura original, estas podem dividir-se em ligações indirectas e directas. Nas ligações indirectas, um pórtico metálico contraventado é posicionado no interior do pórtico de betão armado original. Nestes casos, a aplicação do reforço pode tornar-se numa solução pouco económica, devido às dificuldades em realizar uma boa ligação do pórtico metálico com o pórtico de betão armado. Outro ponto negativo da ligação indirecta resulta da possibilidade dos pórticos reforçados sofrerem efeitos dinâmicos resultantes da interacção entre os dois sistemas. Para ultrapassar as dificuldades enumeradas anteriormente, Maheri e Sahebi [5] propuseram o método de ligação directa entre os contraventamentos metálicos e os pórticos de betão armado com recurso a parafusos ou chumbadouros, conforme se pode observar na Figura 5. Ensaio experimentais realizados pelos mesmos autores demonstraram um bom comportamento das ligações directas.

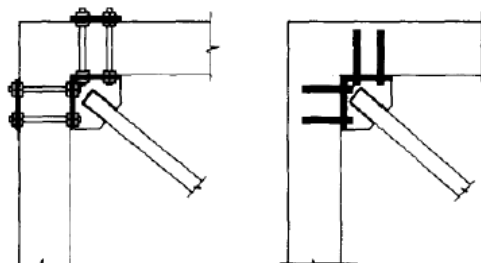


Figura 5: Exemplo de possíveis ligações directas entre os elementos metálicos e a estrutura original [5]

## 2. COMPORTAMENTO E DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS HÍBRIDAS

### 2.1. Comportamento estrutural

Os estudos conduzidos por Badoux *et al.* [4] e por Di Sarno *et al.* [6] demonstraram que o comportamento de um sistema híbrido pórtico de betão armado e sistema de contraventamentos metálicos de um andar sujeito a acções laterais resulta, em grande medida, da sobreposição da actuação isolada dos sistemas. A rigidez lateral e a resistência da estrutura global podem por isso ser obtidas adicionando-se as contribuições de cada um dos sistemas. Desta forma, apesar do sistema de contraventamento contribuir para a rigidificação da estrutura, o modo de rotura do sistema original não é geralmente alterado. Na Figura 6 encontra-se representado o comportamento lateral de uma estrutura de betão armado de um andar contraventada com elementos metálicos, sujeita a uma acção horizontal [7]. Na mesma figura é possível também visualizar o comportamento dos dois sistemas estruturais (pórtico de betão armado e sistema de contraventamento). As curvas de comportamento indicam claramente que a resposta da estrutura reforçada resulta da sobreposição dos comportamentos dos dois sistemas estruturais.

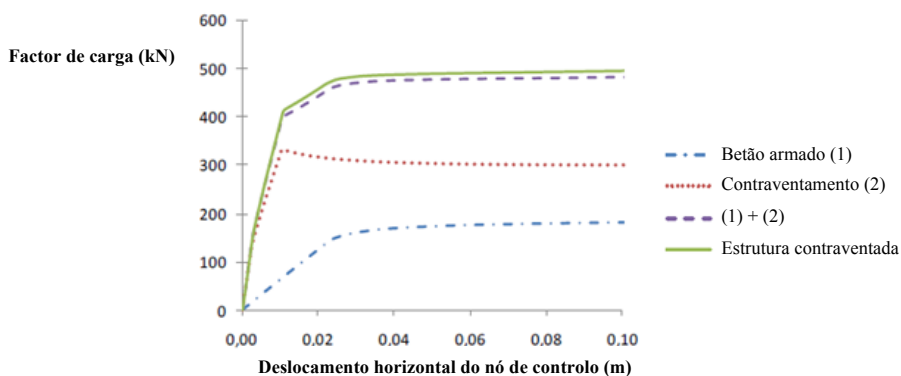


Figura 6: Resposta lateral de um pórtico de betão armado contraventado com elementos metálicos [7]

Quando se pretende analisar o comportamento sísmico de estruturas, especialmente à luz dos novos conceitos de dimensionamento e reforço baseados em critérios de desempenho, é essencial o conhecimento detalhado do comportamento dos vários elementos estruturais. Recorrendo à Figura 7, na qual se encontra representada a novamente a resposta de uma estrutura de betão armado reforçada com contraventamentos, verifica-se a ocorrência de uma redução de rigidez para níveis de carga lateral relativamente reduzidos. Este efeito deve-se exclusivamente à encurvadura dos elementos metálicos sujeitos a compressão que ocorre para níveis relativamente baixos de esforço axial dada a esbelteza dos referidos elementos. Verifica-se também que a capacidade resistente da estrutura é atingida para um nível de carregamento próximo do correspondente à plastificação do contraventamento metálico sujeito a tracção.

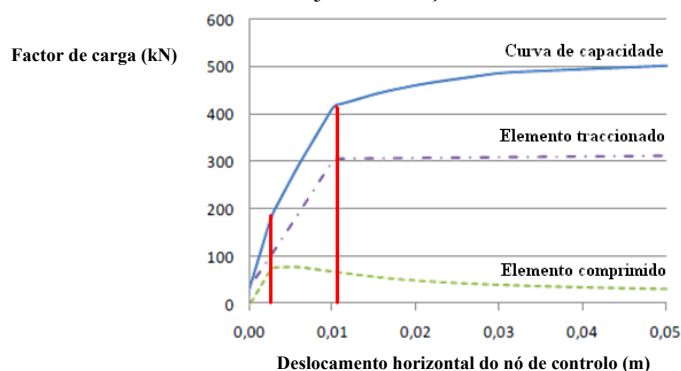


Figura 7: Influência dos contraventamentos metálicos no comportamento global da estrutura [7]

Outra característica comportamental das estruturas contraventadas com elementos metálicos prende-se com o facto das cargas suportadas pelos contraventamentos serem transferidas para as fundações através da estrutura original de betão armado, o que vai implicar uma variação dos esforços axiais nos pilares. Este facto revela-se de extrema importância devido ao facto de a capacidade de deformação lateral dos elementos verticais estar relacionada com o nível de esforço axial instalado. Desta forma, torna-se de extrema importância o conhecimento dos níveis de esforço axial instalados nos pilares nas diferentes fases de carregamento lateral de forma a poder estimar-se de forma precisa a capacidade de deformação da estrutura híbrida associada à rotura.

## **2.2. Dimensionamento sísmico**

Apesar de nos últimos anos se ter assistido a um grande desenvolvimento de metodologias de dimensionamento sísmico que têm como objectivo fundamental controlar o nível de dano estrutural durante a ocorrência de um sismo, os códigos actualmente em vigor ainda seguem uma filosofia baseada em critérios de resistência, tendo como principal objectivo a prevenção do colapso estrutural. À luz dos regulamentos actuais, o dimensionamento sísmico é efectuado através da aplicação de forças laterais à estrutura. Estas forças são calculadas com base nas características dinâmicas iniciais da estrutura, num espectro de resposta elástico e num coeficiente de comportamento ( $q$ ) ou ( $R$ ) que tem em conta, de forma simplificada, a ductilidade da estrutura.

Estudos realizados anteriormente por Queirós *et al.* [7] e Maheri *et al.* [8] tiveram como principal objectivo investigar a aplicabilidade da metodologia de dimensionamento baseada na utilização de coeficientes de comportamento que pudessem ser adoptados para estruturas de betão armado reforçadas com contraventamentos metálicos. No entanto, os valores obtidos apresentam uma dispersão elevada, indicando que a aplicação deste tipo de metodologia não é indicada para o dimensionamento de estruturas contraventadas. Os referidos estudos demonstraram ainda que o comportamento de estruturas híbridas aço-betão é fortemente influenciado pela capacidade resistente dos contraventamentos metálicos e pela interacção entre estes e os elementos de betão armado.

## **3. PROPOSTA DE UM MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO SÍSMICO BASEADO EM DESLOCAMENTOS**

### **3.1. Bases do método**

Nesta secção será proposta uma metodologia de dimensionamento de contraventamentos metálicos para reforço de estruturas porticadas de betão armado. O principal objectivo do método consiste na obtenção de uma solução de reforço óptima que garanta que a deformação imposta na estrutura durante o sismo não conduza à rotura dos elementos críticos de betão armado.

Devido à modificação do comportamento da estrutura original provocada pela introdução de contraventamentos metálicos, nomeadamente ao nível da resistência lateral e da capacidade de deformação da estrutura, é importante que o processo de dimensionamento tenha em consideração os efeitos dos contraventamentos na alteração da capacidade de deformação dos elementos de betão armado. Para o efeito, a metodologia aqui proposta foca-se essencialmente no controlo de deslocamentos e utiliza alguns dos procedimentos existentes no “Capacity Spectrum Method” (CSM) [9] para o cálculo do deslocamento máximo da estrutura durante o sismo de projecto (Figura 8).

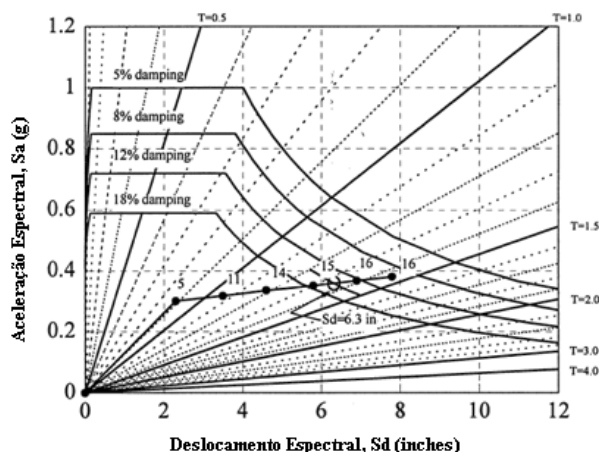


Figura 8: Exemplo de aplicação do Capacity Spectrum Method (adaptado de Freeman [9])

A aplicação da nova metodologia requer a definição de um conjunto de parâmetros tais como: i) o deslocamento de cedência, ii) o deslocamento último e a iii) resistência lateral da estrutura. De forma semelhante ao CSM, os deslocamentos de cedência ( $S_{dy}$ ) e último ( $S_{du}$ ) referem-se a um sistema equivalente de um grau de liberdade. Após o cálculo destes parâmetros é possível estimar a ductilidade e o amortecimento viscoso equivalente do sistema de um grau de liberdade. Com base nesta informação define-se o espectro de resposta de deslocamentos e acelerações, e finalmente sobrepõem-se este à curva de comportamento. Se o ponto representativo da capacidade última da estrutura, definido pelo par de valores ( $S_{du}$ ,  $S_{au}$ ), se localizar na área exterior ao espectro, conforme se ilustra na Figura 9, é possível afirmar que, independentemente do nível de ductilidade presente na estrutura para o determinado cenário sísmico, a estrutura tem capacidade para resistir ao sismo de projecto. Por outro lado, se o ponto de desempenho se localizar no interior do espectro, tal situação indica que os contraventamentos adoptados não são eficazes para garantir um comportamento sísmico adequado da estrutura reabilitada havendo por isso a necessidade de se efectuar um novo dimensionamento dos contraventamentos.

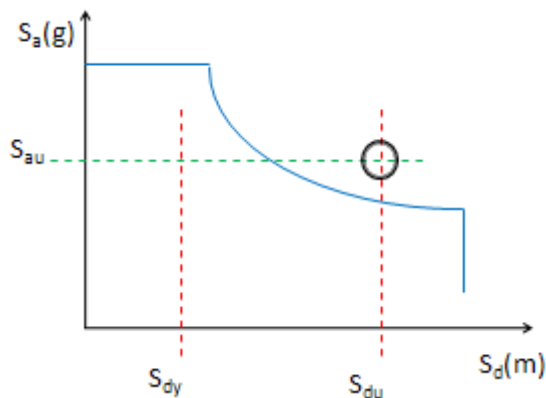


Figura 9: Exemplo de aplicação do método de dimensionamento proposto

### 3.2. Perfil de deslocamentos laterais de estruturas híbridas

Um dos requisitos necessários para a aplicação de metodologias de avaliação e/ou dimensionamento baseadas em deslocamentos é a definição do perfil de deslocamentos laterais da estrutura. Esta informação é essencial para a transformação da curva de capacidade da estrutura original na curva de um sistema equivalente com apenas um grau de liberdade.

Devido ao facto de não haver, até ao momento, expressões para definição dos perfis de deslocamentos de estruturas híbridas aço-betão do tipo considerado neste trabalho, realizou-se um estudo com o objectivo de caracterizar dos perfis de deslocamentos laterais de estruturas de betão armado contraventadas com contraventamentos metálicos.

O estudo consistiu na realização de análises dinâmicas não lineares, com recurso ao software OpenSEES [10], numa estrutura de betão armado com pouca ductilidade, representativa de um dimensionamento apenas para cargas gravíticas. À estrutura estudada, com 1 vão e 3 pisos, foram aplicados dois contraventamentos diferentes com valores de esbelteza adimensional ( $\bar{\lambda}$ ) igual a 2 e a 3, respectivamente. Finalmente, para cada estrutura, foram seleccionados 8 registos sísmicos assegurando consistência em termos do conteúdo de frequência. Os 8 sinais foram escalados de forma a que o deslocamento relativo máximo entre pisos da estrutura conduzisse aos seguintes estados limite: i) formação da primeira rótula plástica no sistema e ii) colapso eminente da estrutura.

Na Figura 10 apresentam-se os perfis de deslocamentos médios para os diferentes pisos ( $d_i$ ) em relação ao deslocamento do primeiro piso ( $d_1$ ) para as duas estruturas e para os dois estados limite considerados. Os resultados indicam que a deformação lateral das estruturas não é muito sensível à intensidade dos sinais e ao tipo de contraventamento aplicado e, deste modo, apesar da amostragem de estruturas ser pequena, a média dos resultados proporciona alguma confiança na utilização dos resultados obtidos.

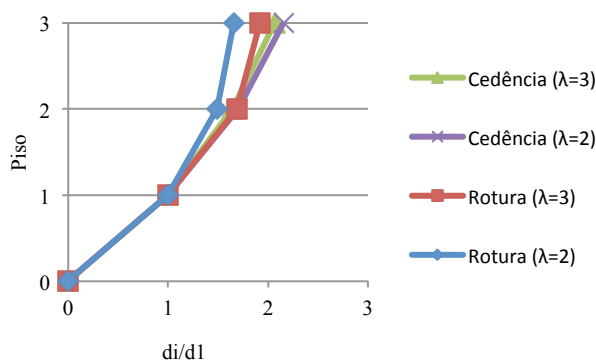


Figura 10: Perfis de deslocamentos médios das estruturas de betão armado contraventadas

Os perfis de deslocamentos obtidos foram comparados com algumas expressões recomendadas na literatura para estruturas de betão armado [11]. Conforme se pode verificar na Figura 11, o perfil de deslocamentos laterais das estruturas mistas é substancialmente diferente do perfil proposto para pórticos de betão armado, mesmo quando comparado com as expressões disponíveis para estruturas de betão armado com mais de 4 andares.

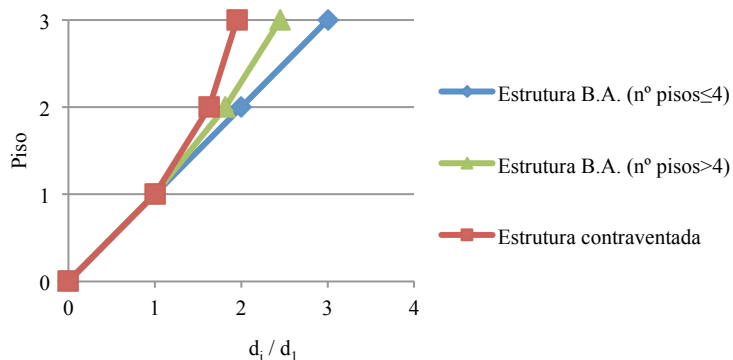


Figura 11: Comparação dos perfis de deslocamento de estruturas de betão e de estruturas híbridas

De seguida apresenta-se uma proposta de uma expressão para uma definição mais rigorosa o perfil de deslocamentos de estruturas de betão armado contraventadas:

$$\delta_i = \frac{4}{3} \times \left( \frac{H_i}{H_n} \right) \times \left( 1 - \frac{H_i}{2.25 \times H_n} \right) \quad (1)$$

Onde  $H_i$  e  $H_n$  referem-se à altura do piso  $i$  e à altura total da estrutura, respectivamente.

### 3.3. Definição de parâmetros necessários à aplicação do método

De forma a aplicar os princípios do CSM é ainda necessário definir alguns parâmetros fundamentais como o deslocamento de cedência, deslocamento último, a resistência lateral e o amortecimento viscoso.

#### 3.3.1. Deslocamento de cedência

Conforme foi discutido anteriormente, a redução significativa de rigidez lateral da estrutura ocorre quando o elemento do contraventamento metálico sujeito a tracção e localizado entre a base da estrutura e o primeiro piso atinge a plastificação. Assim, conhecendo-se a geometria do pórtico e com base na expressão proposta para o perfil de deslocamentos, pode-se estimar o deslocamento lateral de cedência da estrutura recorrendo a simples relações geométricas. No entanto, é necessário ter em conta que a deformação lateral do pórtico é acompanhada também de uma rotação associada à deformação axial dos pilares, conforme se ilustra na Figura 12. É importante notar que esta rotação tem um efeito nos contraventamentos contrário ao resultante dos deslocamentos laterais dos pisos da estrutura.

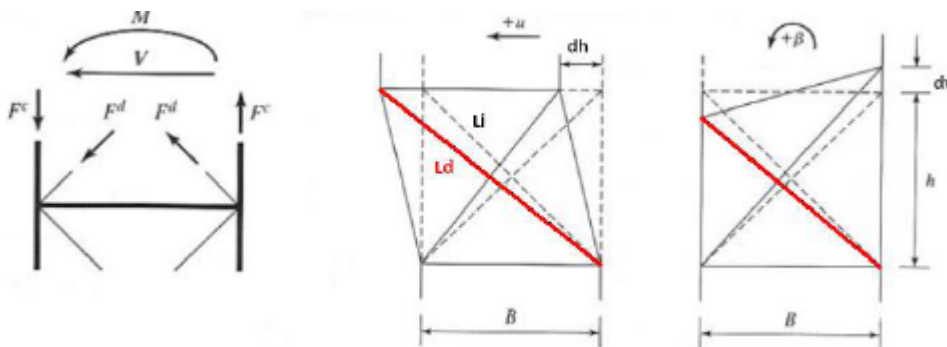


Figura 12: Modelo da deformada lateral e vertical de um pórtico contraventado (adaptado de Moon *et al.* [12])

Com o objectivo de investigar a influência da rotação do pórtico na variação de comprimento do elemento traccionado, realizou-se um estudo analítico no qual se calculou a deformação axial de um elemento de contraventamento resultante da translação lateral dos nós da estrutura e a mesma deformação tendo em conta também a componente de rotação referida anteriormente. Os resultados obtidos, apresentados na Figura 13 mostram claramente que a componente de rotação tem um efeito insignificante no comportamento global do elemento metálico, indicando que o cálculo do deslocamento lateral correspondente à cedência do contraventamento pode ser estimado de forma rigorosa considerando apenas o deslocamento relativo entre pisos.

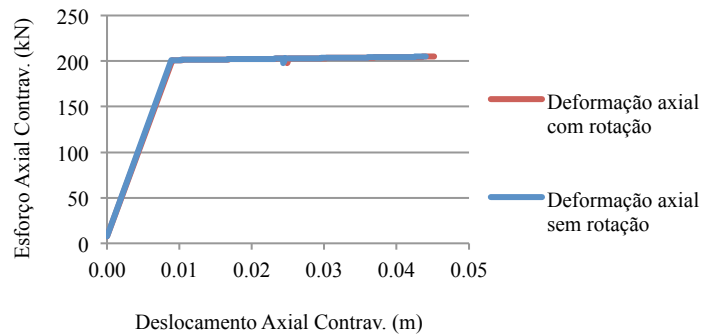


Figura 13: Influência da rotação do pórtico no esforço axial instalado nos contraventamentos

### 3.3.2. Deslocamento último

Dado que a estrutura original de betão armado é responsável por resistir às forças gravíticas e, pelo facto de os contraventamentos metálicos atingirem a seu pico de capacidade antes do pórtico de betão, parece razoável assumir-se que a rotura da estrutura híbrida irá ocorrer para um deslocamento relativo entre pisos correspondente à rotura do pilar de betão armado mais crítico.

No entanto, conforme referido anteriormente, a capacidade de deformação dum pilar de betão armado depende directamente do nível de esforço axial instalado no elemento. Desta forma, o esforço axial total presente nos pilares pode ser estimado tendo em consideração a componente vertical dos esforços axiais instalados nos contraventamentos e considerando também a componente de esforço axial da estrutura original quando carregada lateralmente (Figura 14). De modo a que o processo se desenrole de uma forma simples, a componente transmitida pelos contraventamentos pode ser estimada, de forma conservadora, assumindo que todos os contraventamentos se encontram num estado de tensão associado ao pico da sua capacidade resistente.

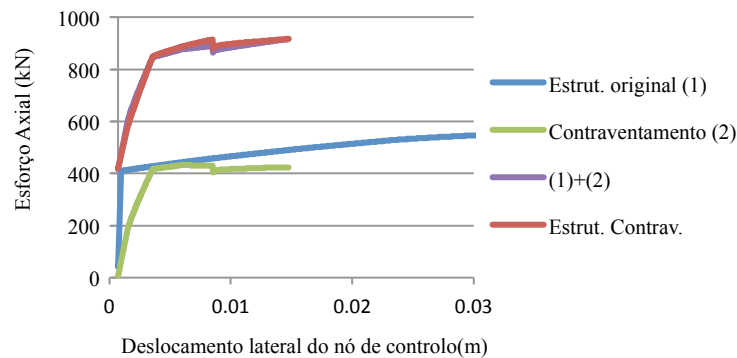


Figura 14: Variação do esforço axial nos pilares de betão armado

Um outro ponto importante que é necessário ter em conta na determinação da capacidade última dos pilares é a localização do ponto de inflexão nos pilares. Visto que não é possível estimar a sua localização exacta, entendeu-se que seria uma boa aproximação definir o ponto de inflexão a meia altura do pilar. Esta aproximação é conservadora e conduz por isso a deslocamentos últimos do lado da segurança.

### 3.3.3. Resistência lateral

Da mesma forma que a carga axial nos pilares foi estimada, a resistência lateral da estrutura pode ser também estimada pela soma das componentes dos dois sistemas (pórtico de betão armado e sistema de

contraventamento). Assim, a componente dos contraventamentos é estimada pela soma das componentes horizontais dos elementos em tracção e compressão localizados na base da estrutura. Por sua vez, a componente da estrutura original é estimada pela capacidade lateral resistente para o deslocamento último calculado anteriormente.

### 3.3.4. Amortecimento viscoso

Um dos aspectos fundamentais do processo de determinação do ponto de desempenho no método CSM está relacionado com a definição do amortecimento viscoso equivalente ( $\xi_{eq}$ ). Este parâmetro é usualmente obtido com base no nível de ductilidade esperado e no tipo de comportamento hysterético. Existem na literatura várias expressões para estruturas metálicas e de betão armado mas não existem ainda expressões disponíveis para sistemas híbridos aço-betão. Em face desta situação, adoptou-se neste trabalho a expressão para estruturas de betão armado proposta por Priestley *et al.* [13]:

$$\xi_{eq} = 0.05 + 0.565 \times \left( \frac{\mu - 1}{\mu \times \pi} \right) \quad (2)$$

## 4. VALIDAÇÃO DO MÉTODO

Neste capítulo serão apresentados os principais resultados obtidos pela aplicação do método proposto para o reforço sísmico de um pórtico de betão armado com 3 pisos e 5 vãos. Para a avaliação sísmica do edifício considerou-se a acção sísmica Tipo 1 prevista no Eurocódigo 8 para um solo tipo B e uma aceleração máxima de referência de  $1.5\text{m/s}^2$  [14]. O pórtico foi dimensionado apenas para cargas gravíticas e, deste modo, não possui resistência sísmica adequada. Para o reforço foram estudadas as 3 soluções de contraventamentos apresentadas na Figura 15, e para cada solução foram aplicados 5 tipos de contraventamentos metálicos.

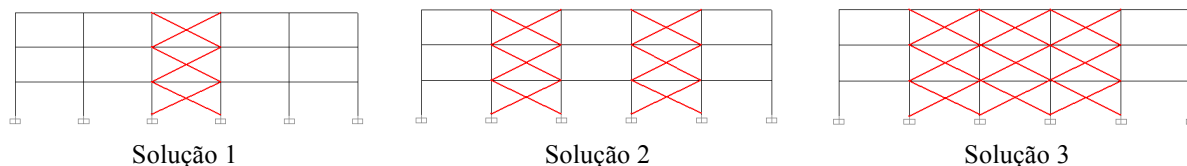


Figura 15: soluções estudadas na validação do método

Com base nos pressupostos definidos anteriormente, foi possível calcular os principais parâmetros para a aplicação do método, como a definição do corte basal ou a carga axial que permite posteriormente estimar o deslocamento último dos pilares de betão armado. Os principais valores calculados estão resumidos na Tabela 1 para as 3 diferentes soluções, bem como para os 5 tipos de contraventamentos metálicos adoptados.

Tabela 1 – Resumo dos principais resultados para o reforço da estrutura

Contrav. ID	Diam. Ext.	Espessura	Área	Cap. compressão	Cap.tracção	Comp. horizontal e vertical dos contrav.		Deslocamento equivalente			
								Sol.1	Sol. 2	Sol. 3	
	D (mm)	T (mm)	A ( $\text{cm}^2$ )	Nb,Rd (kN)	Ppl,Rd (kN)	Corte base (kN)	Força axial (kN)	S <sub>dy</sub> (m)	S <sub>au</sub> (m/s <sup>2</sup> )	S <sub>au</sub> (m/s <sup>2</sup> )	S <sub>au</sub> (m/s <sup>2</sup> )
Contr. 1	76.1	3.2	7.3	21.4	201.6	199.6	288.9	0.017	1.13	1.56	2.01
Contr. 2	88.9	3.6	9.7	38.6	265.4	272.0	389.6	0.017	1.23	1.83	2.44
Contr. 3	114.3	3.2	11.2	75.4	308.0	343.2	479.6	0.017	1.36	2.10	2.88
Contr. 4	139.7	3.2	13.7	140.4	376.8	462.8	629.6	0.017	1.57	2.60	3.64
Contr. 5	139.7	5.0	21.2	211.0	583.0	710.6	968.7	0.017	2.07	3.66	5.25

Finalmente, com base nos deslocamentos de cedência e deslocamentos últimos da estrutura para as diferentes soluções, é possível calcular o amortecimento viscoso equivalente e, conseqüentemente, definir o espectro de resposta inelástico. Na Figura 16 é ilustrado o resultado de 2 tipos de contraventamento para as 3 diferentes soluções adoptadas.

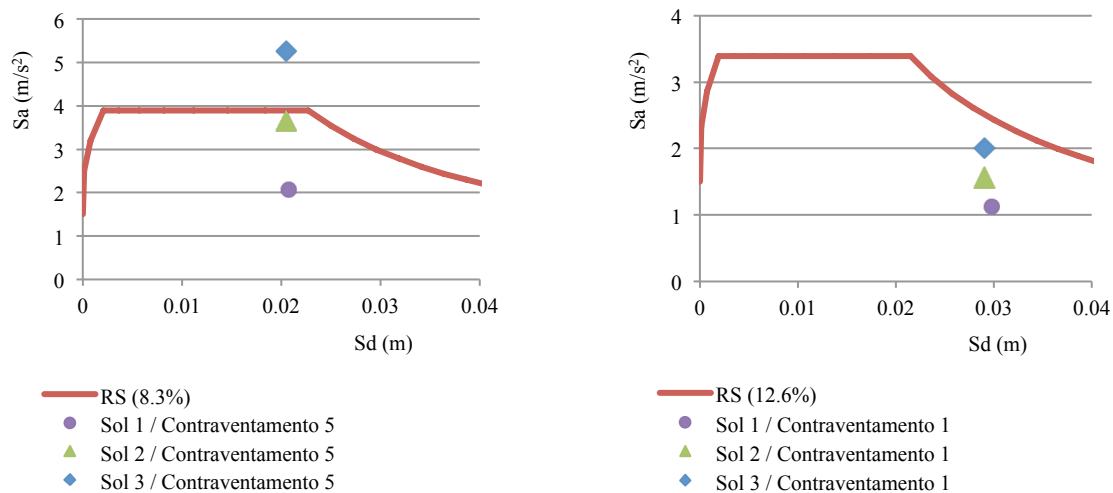


Figura 16: Representação gráfica dos resultados obtidos com os contraventamentos 1 e 5 para as 3 diferentes soluções

Pela análise da figura anterior, é possível verificar que apenas a aplicação da solução 3 combinada com os contraventamentos do tipo 5 (ponto azul na figura da esquerda) resulta numa boa estratégia de reforço.

## 5. CONCLUSÕES

Neste artigo discutiu-se a aplicação de contraventamentos metálicos como estratégia de reforço sísmico de estruturas de betão armado. Foi ainda proposta uma metodologia de dimensionamento dos elementos metálicos baseada em deslocamentos e que permite controlar de forma directa a interacção entre os elementos metálicos e os elementos de betão armado. Os resultados desta investigação permitem extrair as seguintes conclusões:

- A aplicação de contraventamentos metálicos pode ser uma forma efectiva de melhorar a resistência e rigidez de pórticos de betão armado.
- O deslocamento de cedência e a resistência lateral de estruturas de betão armado contraventadas são controlados pelas propriedades dos contraventamentos.
- A capacidade de deformação da estrutura é definida pela capacidade do elemento de betão armado crítico. Uma estimativa fidedigna do nível de esforço axial no elemento crítico é essencial para uma definição correcta da capacidade de deformação. O esforço axial é fortemente dependente das propriedades dos contraventamentos.
- O método de dimensionamento proposto neste artigo, que é simples e fácil de aplicar, tem em consideração os aspectos fundamentais do comportamento das estruturas contraventadas.
- A validação do método foi confirmada com a aplicação numa estrutura com insuficiente resistência sísmica.

## REFERÊNCIAS

- [1] Sugano, S. (1996) State-of-the-Art in Techniques for Rehabilitation of Buildings. *11 WCEE*, Acapulco, Mexico, Paper no. 2179, Elsevier.
- [2] Moehle, J. P., (2000) State of Research on Seismic Retrofit of Concrete Building Structures in the US. *US-Japan Symposium and Workshop on Seismic Retrofit of Concrete structures-State of Research and Practice*.
- [3] Maheri, M. R., Sahebi, A. (1997) Use of steel bracing in reinforced concrete frames. *Engineering Structures*, Vol. 19, No. 12, pp. 1018-1024.
- [4] Badoux, M., Jirsa, J. O. (1990) Steel Bracing of RC Frames for Seismic Retrofitting. *Journal of Structural Engineering*, Vol.116, No. 1.
- [5] Maheri, M. R., Sahebi, A. (1997) Use of steel bracing in reinforced concrete frames. *Engineering Structures*, Vol. 19, No. 12, pp. 1018-1024.
- [6] Di Sarno, L., Manfredi, G. (2009) Experimental tests on full scale RC frames retrofitted with buckling restrained braces. *STESSA*.
- [7] Queirós N. (2009) Análise e Dimensionamento Sísmico de Estruturas Híbridas Aço-Betão. *Tese de Mestrado em Engenharia Civil*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- [8] Maheri, M. R., Akbari, R. (2003) Seismic behaviour factor, R, for steel X-braced and knee-braced RC buildings. *Engineering Structures* 25 (2003) 1505-1513.
- [9] Freeman, S.A. (1998) The Capacity Spectrum Method as a Tool for Seismic Design. *11th European Conference on Earthquake Engineering*, Paris, A.A.Balkema, Rotterdam.
- [10] PEER (2006) OpenSees: Open System for Earthquake Engineering Simulation. *Pacific Earthquake Engineering Research Center*, University of California, Berkeley, CA.
- [11] Pettinga, J. D., Priestley, M. J. N. (2005) Dynamic Behaviour of Reinforced Concrete Frames Design with Direct Displacement-Based Design. *ROSE Research Report No. 2005/02*, IUSS Press, Pavia, 154pp.
- [12] Moon, K., Connor, J., Fernandez, J. (2007) Diagrid Structural Systems for Tall Buildings: Characteristics and Methodology for Preliminary Design. *Structural Design Tall Spec. Build.* 16, 205–230.
- [13] Priestley, M. J. N., Calvi, G. M., Kowalsky, M. J. (2007) Displacement-Based Seismic Design of Structures. *IUSS Press*, Pavia, Italy.
- [14] CEN (2005) EN 1998-1, Eurocode 8: Design provisions for earthquake resistance of structures Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings.