

## **Metodologias de Avaliação do Desempenho Sísmico de Obras de Arte Correntes**

**Eng. Carlos Luís de Oliveira Serra**

Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa

**Professor Luís Manuel Coelho Guerreiro**

Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa

### **RESUMO**

Nas duas últimas décadas as metodologias de avaliação dos efeitos da acção sísmica têm evoluído com o aparecimento de propostas voltadas para a avaliação do comportamento tomando como base os deslocamentos em detrimento das forças que se desenvolvem na estrutura. Os níveis de desempenho, em concordância com os níveis de acção sísmica, definem o comportamento predefinido com grandes preocupações de controlo de dano, incorporando os custos de manutenção e reparação nas equações de dimensionamento.

A metodologia focada neste trabalho corresponde à análise estática não linear onde a estrutura é levada a percorrer vários níveis de deformação pela imposição de uma carga horizontal crescente. Ao introduzir o comportamento fisicamente não linear no modelo de cálculo é possível observar o desenvolvimento da plasticidade na estrutura e avaliar a capacidade de deformação disponível.

Os exemplos utilizados abrangem alguns casos correntes de obras de pequena a média dimensão em betão armado e permitiram o estudo do comportamento de algumas características particulares, como o viés, a irregularidade estrutural e o tipo de ligação do tabuleiro aos pilares. Por seu lado, a utilização das características médias das propriedades dos materiais possibilitou o desenvolvimento de algumas questões relacionadas com a avaliação do desempenho destes casos reais e a extrapolação para o panorama geral, no que diz respeito a Obras de Arte correntes, em Portugal.

### **PALAVRAS CHAVE**

Desempenho sísmico, pontes, metodologias de análise, análise estática não linear

### **1. INTRODUÇÃO**

Com o desenvolvimento tecnológico dos últimos anos e as crescentes necessidades sociais, económicas e estéticas, surgiram novos desafios de Engenharia que levaram à exploração mais rigorosa do comportamento não linear e das capacidades de deformação da estrutura. Associado a este facto, a avaliação formal do desempenho das estruturas ganha terreno nos novos regulamentos e no próprio processo de dimensionamento.

No caso deste trabalho, houve a preocupação de concentrar as atenções nas Obras de Arte correntes espalhadas ao longo das grandes vias de comunicação. As Obras de Arte correntes apesar de, por vezes, a sua dimensão ser pequena apresentam-se como elementos chave na operacionalidade do sistema viário.

Assim, os objectivos deste trabalho dividem-se em duas vertentes. A primeira diz respeito à apresentação do método de análise e na sua relação com as novas exigências e mudanças de mentalidade referidas. O segundo objectivo compromete-se com aplicação desse método de análise a diversos casos reais, possibilitando algumas conclusões sobre o desempenho deste tipo de estruturas.

## 2. MÉTODO DO ESPECTRO DE CAPACIDADE - CSM

O procedimento designado por Método de Espectro de Capacidade ou *Capacity Spectrum Method* corresponde a uma das metodologias mais utilizadas e sobre a qual incidem maior número de estudos e variantes. Os seus fundamentos encontram-se descritos no ATC-40 *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings* [1], no Capítulo 8 sobre procedimentos de análises estáticas não lineares.

O método divide-se em duas partes, uma das quais diz respeito à construção da curva de capacidade e a sua transformação para um sistema SDOF.

A curva de capacidade, expressa em termos de força basal e deslocamento, obtém-se através da aplicação de uma distribuição crescente de forças na estrutura e registo contínuo dos deslocamentos num ponto da estrutura e reflecte a evolução da plasticidade na estrutura. Os princípios de conversão de um sistema MDOF para um sistema SDOF e, por conseguinte, da curva de capacidade (F-d) para a curva que relaciona aceleração espectral e deslocamento espectral do sistema SDOF (Sa-Sd), coincidem com os do método N2 [2], no entanto, a formalização descrita no ATC-40 é distinta [1].

$$S_{ai} = \frac{V_i}{W \alpha_1} \quad (1)$$

$$S_{di} = \frac{\Delta_{roof}}{PF_1 \times \Phi_{1,roof}} \quad (2)$$

$$\alpha_1 = \frac{\sum_{j=1}^N (w_j \Phi_{j1}) / g}{\sum_{j=1}^N w_j / g \times \sum_{j=1}^N (w_j \Phi_{j1}^2) / g} \quad (3)$$

$$PF_1 = \frac{\sum_{j=1}^N (w_j \Phi_{j1}) / g}{\sum_{j=1}^N (w_j \Phi_{j1}^2) / g} \quad (4)$$

$S_{ai}$  – aceleração espectral no ponto i ( $m/s^2$ );  
 $V_i$  – força basal no ponto i da curva de capacidade (kN);  
 $W$  – peso da estrutura para a combinação de acções em questão (kN);  
 $N$  – nível N;  
 $S_{di}$  – deslocamento espectral no ponto i (m);  
 $\Delta_{roof}$  – deslocamento no topo da estrutura (m);  
 $w_j$  – peso associado ao nível i (kN);  
 $g$  – aceleração da gravidade ( $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ );  
 $\Phi_{j1}$  – amplitude do modo 1 no nível j;

A segunda parte da metodologia diz respeito à forma como, a partir da curva Sa-Sd definido para o SDOF, se obtém a resposta da estrutura para uma determinada acção

sísmica. De forma a obter uma rotina expedita para a resolução do problema, o ATC-40 propõe a bilinearização da curva Sa-Sd. O ponto de desempenho representa a intersecção da curva Sa-Sd eventualmente reduzida com o espectro de resposta referente à acção sísmica em análise para o mesmo nível de energia dissipada, isto é, para o mesmo nível de amortecimento.

### 3. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO SÍSMICO DE OBRAS DE ARTE CORRENTES EM PORTUGAL

#### 3.1. Caracterização das obras

As obras utilizadas neste estudo [2] correspondem a passagens superiores, passagens inferiores e viadutos já executados e em serviço há alguns anos. A escolha destas obras deveu-se maioritariamente à disponibilidade de consulta dos projectos e à sua localização na zona sísmica A, segundo o Regulamento em vigor, o RSA [3].

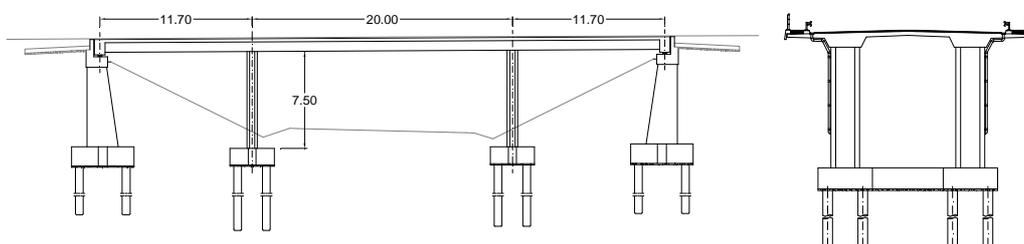


Figura 1. Corte longitudinal e transversal de PI12B1

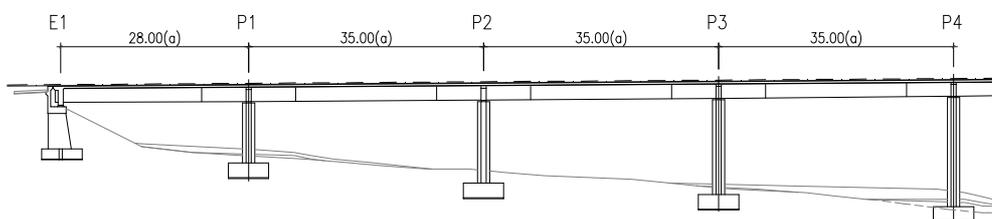


Figura 2. Corte longitudinal do Viaduto de Messejana (1)

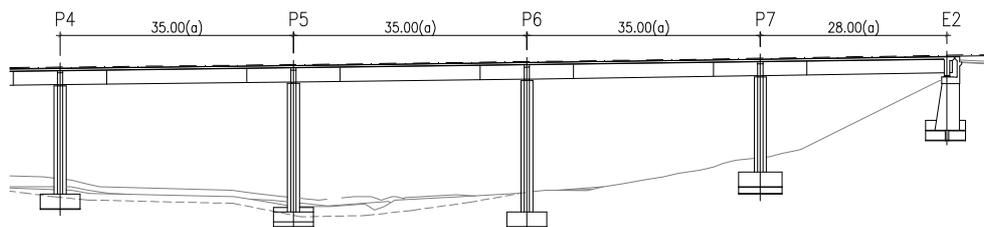


Figura 3. Corte longitudinal do Viaduto de Messejana (2)

#### 3.2. Caracterização da Acção Sísmica

Como o objectivo desta fase do estudo não era a verificação da segurança da estrutura mas somente a comparação dos resultados obtidos com uma análise dinâmica e com a análise estática não linear, optou-se por considerar só um acelerograma. Para que a comparação fosse possível na análise *pushover* foi utilizado o espectro de resposta correspondente ao acelerograma usado na análise dinâmica não linear. Esta opção permite a validação dos resultados da análise *pushover* através da análise ao longo do tempo, dado que ambas utilizam a mesma acção sísmica, em representações distintas.

Por outro lado, o cuidado de escolher um acelerograma representativo da acção sísmica regulamentada em [4] possibilita a obtenção de algumas conclusões sobre a validade do ponto de desempenho obtido e sobre o desempenho destas estruturas para a “nova” acção sísmica.

### 3.3. Resultados da Análise Estática Não Linear

De seguida, apresentam-se de uma forma sucinta os resultados obtidos na análise *pushover*, na determinação do ponto de desempenho através do Método do Espectro de Capacidade (CSM). No que diz respeito à análise estática não linear, os resultados centram-se na representação gráfica da curva Sa-Sd e na definição do ponto de desempenho para análise longitudinal e transversal, para duas configurações de carga distintas, configuração uniforme e configuração proporcional ao primeiro modo da direcção em questão, e tomando como ponto de controlo o ponto a meio do tabuleiro.

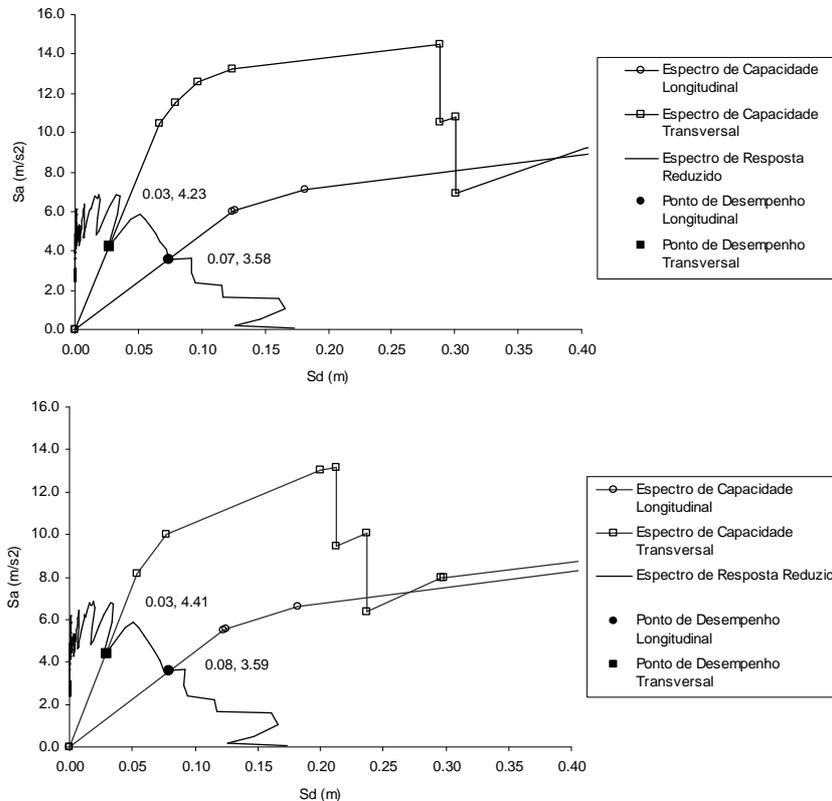


Figura 4. PI12B1 – Representação gráfica da determinação do ponto de desempenho: Long./Trans. – 13C – Uniforme (em cima) e 1º Modo (em baixo).

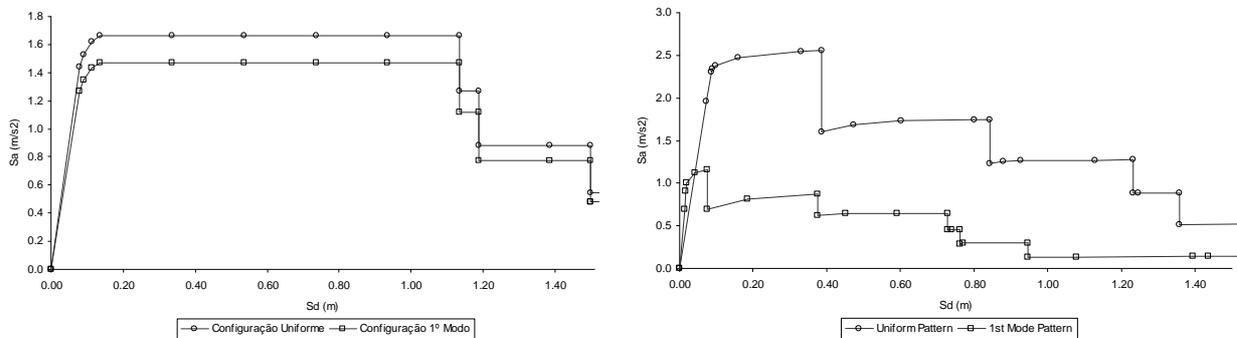


Figura 5. Messejana – Análise *Pushover* longitudinal e transversal de MESSEJANA – Sistema SDOF

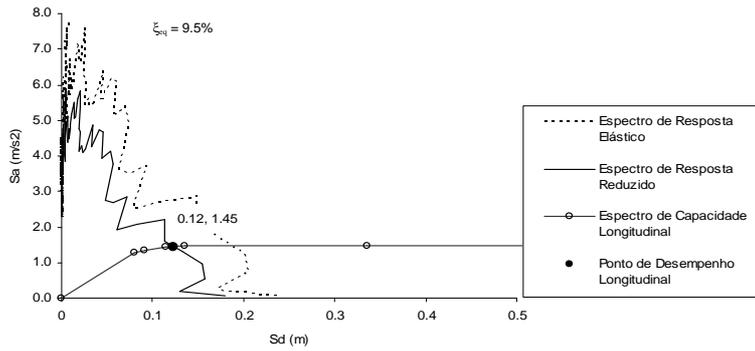


Figura 6. Messejana – Representação gráfica da determinação do ponto de desempenho: Longitudinal – 12B – Uniforme

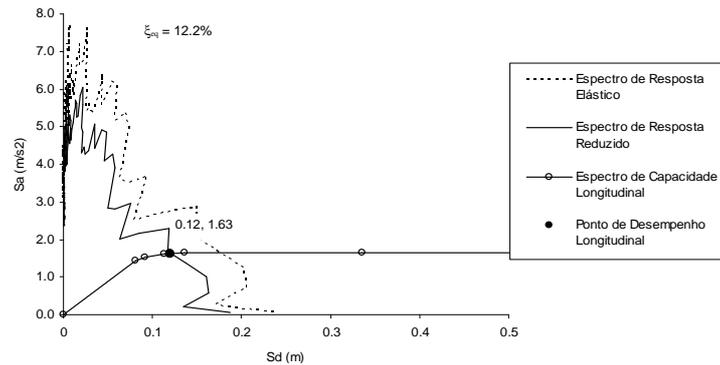


Figura 7. Messejana – Representação gráfica da determinação do ponto de desempenho: Longitudinal – 12B – 1ºModo

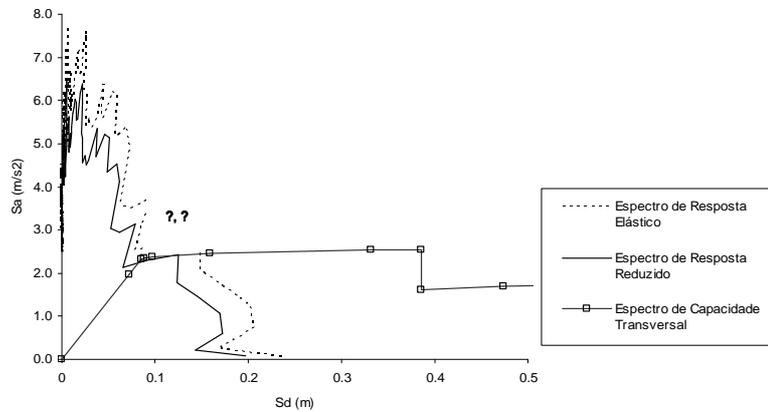


Figura 8. Messejana – Representação gráfica da determinação do ponto de desempenho: Transversal – 12B – Uniforme

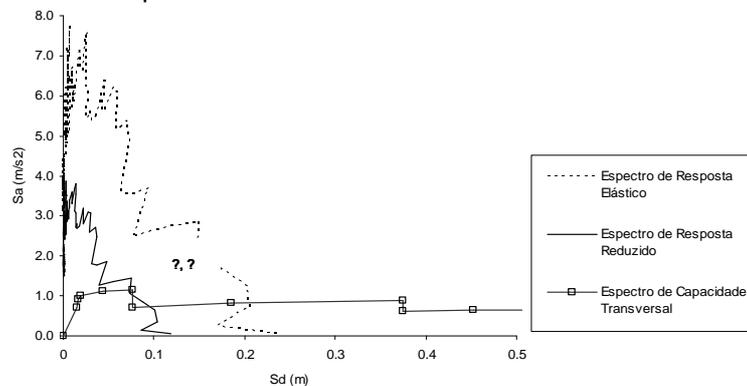


Figura 9. Messejana – Representação gráfica da determinação do ponto de desempenho: Transversal – 12B – 1ºModo

É importante referir que a análise *pushover* perde significado prático aquando da ocorrência da primeira rotura de um dos elementos, isto é, que a estrutura fica de tal forma debilitada que é contra a segurança ter em conta a resistência remanescente. Em edifícios verifica-se que existe capacidade de redistribuição dos esforços pela restante estrutura, no entanto, em pontes, com um número limitado de elementos resistentes, não é razoável esta hipótese.

Se longitudinalmente os problemas de interpretação não se põem com gravidade, transversalmente o comportamento encontra-se muito dependente das hipóteses que se colocam à partida.

No caso das obras referidas anteriormente foram utilizados modelos de cálculo onde apenas o comportamento não linear de flexão dos pilares se encontrava definido. Este facto leva a uma limitação à análise do comportamento da estrutura como um todo. Apesar disso, é possível avaliar algumas situações particulares em paralelo com a análise das curvas de capacidade.

### 3.3.1. Conclusões

Em [5] encontram-se enumeradas de forma bastante clara as principais vantagens e desvantagens dos métodos de análise baseados nas análises estáticas não lineares. O trabalho desenvolvido neste estudo veio ao encontro dessas conclusões, das quais e destacam as seguintes:

- A possibilidade de introduzir o comportamento não linear, em especial o fisicamente não linear, e da rápida interpretação dos resultados desse comportamento, torna as metodologias atractivas e dispensa a utilização dos coeficientes de comportamento;
- A análise da sequência de formação das rótulas plásticas e da redistribuição de esforços em cada passo permite tirar dúvidas sobre eventuais mecanismos de rotura parcial;
- Em geral, para estruturas com algum tipo de irregularidade, as hipóteses associadas à configuração de cargas em conjunto com a escolha do ponto de controlo tornam a interpretação dos resultados uma tarefa complexa, dada a dispersão observada no comportamento global. Se, por um lado, cada resultado pode ser explicado e fundamentado pelas hipóteses introduzidas, ficam questões sobre a adaptação das hipóteses ao desempenho real da estrutura.

Nos exemplos apresentados, para se poder efectuar uma avaliação preliminar do desempenho sísmico, as características mecânicas dos materiais utilizadas aproximam-se das que efectivamente se poderão encontrar em obra (valores médios das propriedades mecânicas). Este facto resultou em curvas de capacidade com grandes capacidades de deformação e níveis de resistência elevados, quando comparados com situações de projecto onde as hipóteses de verificação de segurança entram na equação.

Em termos práticos, a degradação de um elemento é considerada como a entrada em rotura de uma secção, seja por ter-se atingido a extensão de rotura do betão ou do aço. Dado o número limitado de elementos resistentes a cargas horizontais e a fraca capacidade de redistribuição (evidenciada pelas grandes perdas de rigidez), considera-se inadequada a consideração do comportamento após a primeira grande degradação de rigidez correspondente à diminuição significativa da perda de capacidade resistente (Figs. 8 e 9).

### 3.4. Resultados da análise dinâmica não linear

Um exemplo dos resultados obtidos para a análise dinâmica não linear (integração directa) é apresentado na Fig. 10, onde se pode comparar directamente com a análise *pushover*.

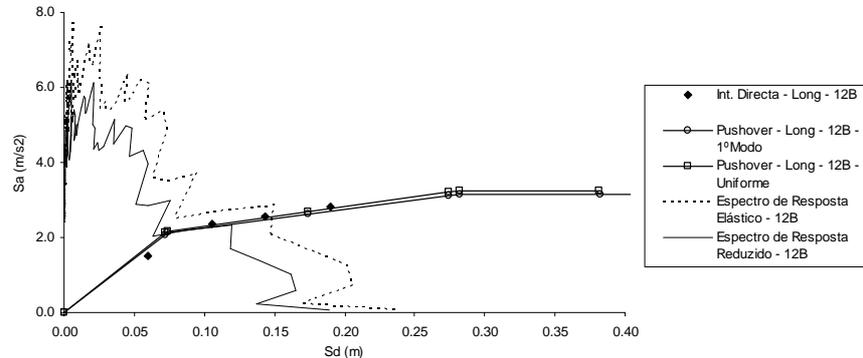


Figura 10. PI14 Esq – Comparação entre os resultados da Análise *Pushover* Longitudinal e a Análise Dinâmica Não Linear Longitudinal

Em geral, os resultados da análise dinâmica mostraram-se próximos da análise *pushover* recorrendo à configuração uniforme de cargas, devido em parte à diminuição da importância da torção após a cedência de alguns elementos.

## 4. CONCLUSÕES

As exigências das novas regulamentações e novos desafios de engenharia estão a levar à utilização de novas metodologias que têm em consideração a não linearidade associada aos materiais e à geometria da estrutura, embora ainda subsistam questões quanto à sua aplicação no caso de estruturas irregulares.

As novas metodologias referidas neste trabalho dizem respeito aos avanços feitos no campo das análises estáticas não lineares, onde a investigação tem vindo a solucionar vários problemas que ainda lhes estão associados. O objectivo deste trabalho foi, em parte, apresentar as bases de uma das metodologias e tirar conclusões sobre a sua aplicabilidade a pontes.

O recurso a análises dinâmicas não lineares continua a ser a forma de validação dos resultados obtidos nas análises estáticas não lineares e nas várias metodologias de determinação do ponto de desempenho. Neste trabalho as análises ao longo do tempo permitiram concluir que a configuração uniforme de cargas do *pushover* se aproximava melhor ao comportamento do sismo para intensidades sísmicas crescentes. Ao longo da evolução da cedência das várias secções transversais os efeitos de torção diminuem de importância e a distribuição de deslocamentos tende para uma distribuição uniforme ao longo do tabuleiro.

O par de valores Sa-Sd (acelerações-deslocamentos espectrais), definido como o ponto de desempenho corresponde à resposta da estrutura para o nível de acção sísmica imposta. No entanto, é de referir que de uma forma geral os modelos de cálculo não têm em consideração o comportamento não linear de determinados elementos estruturais e não estruturais que podem comprometer a posição do ponto de desempenho. Exemplos de aspectos que normalmente não se encontram contemplados nos modelos de cálculo são o comportamento não linear das fundações, a falta repentina de apoio do tabuleiro, a

rotura total ou parcial do tabuleiro ou roturas frágeis por esforço transversal, uma vez que a sua simulação é de difícil aplicação.

No que diz respeito ao segundo objectivo proposto para este trabalho, podem-se retirar conclusões elucidativas sobre o actual processo de dimensionamento e a sua relação com o comportamento real das estruturas.

Conclui-se, para os exemplos apresentados, que existe um desfasamento entre as necessidades de ductilidade e de resistência impostas pela acção sísmica e os níveis de ductilidade disponíveis e, em grande parte dos casos, a resistência efectiva da estrutura. Em termos de resistência este desfasamento deve-se em grande medida à filosofia de verificação de segurança através da minoração das propriedades dos materiais e majoração das acções permitindo a manutenção de um nível muito reduzido da probabilidade de rotura. Quanto aos níveis de ductilidade, nos casos correntes de projecto recorrem-se apenas a mecanismos indirectos para o controlo deste parâmetro. Uma avaliação mais cuidada da ductilidade na fase de projecto permitiria tirar melhor partido das potencialidades de cada obra, adequando os níveis disponíveis aos exigidos.

Para além disso, é importante referir que, nos casos apresentados, o dimensionamento foi efectuado recorrendo à regulamentação em vigor [3] e [6], sendo que o módulo de elasticidade tomado é igual a 1.25 vezes superior ao módulo de elasticidade aos 28 dias e a inércia dos elementos corresponde à inércia não fendilhada, originando um aumento de esforços e uma diminuição dos deslocamentos. Actualmente o EC8 refere o recurso à rigidez fendilhada para a análise sísmica e toma como valor base metade da rigidez não fendilhada.

De forma a aproximar o processo de dimensionamento corrente à situação real e a tirar partido das características efectivas dos materiais, sem descurar na filosofia de verificação de segurança, chama-se a atenção para as vantagens decorrentes do aproveitamento do efeito de confinamento efectivo e do aumento da extensão de rotura do aço para valores mais próximos do real.

## REFERÊNCIAS

[1] Applied Technology Council, California Seismic Safety Commission – Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, Volume 1. Califórnia. 1996. (ATC-40)

[2] SERRA, C. – Metodologias de Avaliação do Desempenho Sísmico de Obras de Arte Correntes. Lisboa: Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2008. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil.

[3] Decreto-Lei n.º 235/83, de 31 de Maio: Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes.

[4] European Committee for Standardization – Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. Ref. N.º prEN 1998-1:2003 E. Brussels. 2003.

[5] FALCÃO, S. S. – Performance Based Seismic Design. Lisboa: Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2002. Tese de Mestrado em Engenharia de Estruturas.

[6] Decreto-Lei n.º 349-C/83, de 30 de Julho: Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado.