

ANÁLISE ESTÁTICA NÃO LINEAR DE UM EDIFÍCIO NA TURQUIA – REGULAMENTOS AMERICANOS VS. EUROCÓDIGO 8

CARLOS BHATT

Aluno de
Doutoramento
Instituto Superior
Técnico
Lisboa - Portugal

RITA BENTO

Professora
Associada
Instituto Superior
Técnico
Lisboa - Portugal

RUI PINHO

Professor Auxiliar
Universidade de
Pavia
Pavia – Itália

SUMÁRIO

A avaliação sísmica de edifícios irregulares em planta com recurso a análises estáticas não lineares tem-se verificado num número muito limitado de casos. A ausência de resultados científicos que possam comprovar o bom desempenho destes procedimentos em estruturas não regulares, faz com que estes métodos não sejam utilizados por engenheiros projectistas para a avaliação sísmica de edifícios existentes, a maioria dos quais apresentam assimetrias em planta. Neste estudo são avaliados os procedimentos estáticos não lineares propostos no ATC40, no FEMA440, no Eurocódigo 8 e o método do espectro de capacidade adaptativo (ACSM). O caso de estudo analisado é um edifício Turco de 5 pisos em betão armado. A análise sísmica do edifício é feita para uma vasta gama de intensidades de forma a avaliar o desempenho das metodologias em estudo para diferentes fases de inelasticidade estrutural. Os resultados são comparados com análises dinâmicas não lineares incrementais através da utilização de acelerogramas semi-artificiais. Os resultados obtidos permitem encarar com optimismo a utilização de procedimentos estáticos não lineares na avaliação sísmica de edifícios irregulares em planta. Contudo, os métodos actualmente propostos em regulamentos sísmicos necessitam de melhorias nomeadamente na forma como contabilizam os efeitos torsionais neste tipo de estruturas.

1. INTRODUÇÃO

A extensão do uso de procedimentos estáticos não lineares para o caso de estruturas irregulares em planta tem sido objecto de um número relativamente reduzido de estudos [1, 2, 3]. Este facto leva a que a sua utilização na avaliação sísmica de edifícios reais, na sua maioria assimétricos em planta, seja limitada.

Os poucos trabalhos publicados sobre esta matéria concentram-se na avaliação de apenas um procedimento estático não linear, não fornecendo elementos de comparação relativamente ao desempenho de diferentes métodos existentes. Deste modo, comparam-se neste estudo diferentes metodologias propostas em regulamentos americanos e europeu.

Os procedimentos estáticos não lineares analisados neste artigo são os seguintes: método do espectro de capacidade (CSM) inicialmente introduzido por Freeman e seus colaboradores [4, 5] com as características presentes no ATC40 [6] e no FEMA440 [7]; o método N2 desenvolvido por Fajfar [8, 9] e incorporado no Eurocódigo8 [10]; e o método do espectro de capacidade adaptativo (ACSM) [11] inicialmente desenvolvido para pontes e mais tarde adaptado a edifícios [3].

Os três primeiros métodos consideram uma distribuição de forças proporcional ao modo de vibração e/ou uniforme para a obtenção da curva de capacidade. A principal diferença das metodologias propostas no ATC40 e no FEMA440 reside na forma como o espectro é reduzido para posterior intersecção com a curva de capacidade e cálculo do deslocamento objectivo. O método do espectro de capacidade adaptativo (ACSM) utiliza um *pushover* adaptativo baseado em deslocamentos (DAP) [12], incluindo a contribuição de modos superiores. Considera igualmente a progressão do dano na estrutura e uma definição alternativa do nó de referência que se revela bastante oportuna em análises tridimensionais (análises 3D).

Os resultados são avaliados tendo por base análises dinâmicas não lineares incrementais através do uso de acelerogramas semi-artificiais. O caso de estudo é um edifício Turco de 5 pisos de betão armado. A análise sísmica foi realizada para diferentes níveis de intensidade para poder avaliar o desempenho de cada método ao longo da propagação da inelasticidade da estrutura.

O principal problema quando se realizam análises sísmicas em estruturas irregulares em planta é a contabilização dos efeitos torsionais. Os resultados obtidos neste estudo permitem concluir que os procedimentos estáticos não lineares actualmente propostos em regulamentos sísmicos necessitam de melhorias no que respeita à contabilização destes efeitos. É possível no entanto encarar com optimismo a aplicação destas metodologias para a análise sísmica de edifícios irregulares em planta.

2. CASO DE ESTUDO – EDIFÍCIO TURCO DE 5 PISOS

O caso de estudo analisado é um edifício Turco de betão armado com 5 pisos. Sofreu a acção do sismo de Golcuk em 1999 não registando danos significativos.

O edifício é assimétrico segundo a direcção X e simétrico em Y, sendo que todos os pisos têm o mesmo pé direito, ver figura 1. O edifício tem pilares e paredes como elementos estruturais verticais e apresenta vigas apoiadas em vigas originando possíveis pontos de ligação fracos.

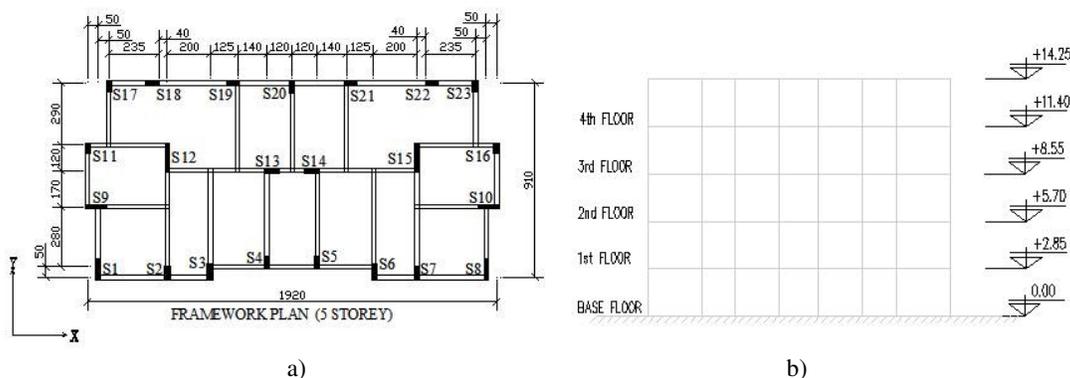


Figura 1 – Edifício Turco de 5 pisos a) planta (cm); b) alçado (m)

Os pilares mantêm as suas características geométricas e de reforço ao longo da altura. As secções das vigas são na maioria dos casos $0,20 \times 0,50 \text{ m}^2$ exceptuando as duas localizadas no centro do edifício que são $0,20 \times 0,60 \text{ m}^2$. Os estribos têm 20cm de espaçamento quer para as vigas quer para os pilares. O centro de massa da estrutura (CM) localiza-se entre o pilar S13 e o pilar S14 no nó de intersecção com a viga que descarrega no pilar S20 (figura 1). Para mais detalhes sobre as características do edifício ver [13].

Relativamente às características dinâmicas o edifício apresenta um primeiro modo de vibração de 0,62 segundo caracterizado por translação segundo X, um modo de translação segundo a direcção Y de 0,59 segundo e um modo de torção de 0,51 segundo.

Pelas suas características, o edifício em estudo tem que ser analisado com um modelo numérico 3D.

3. MODELO NUMÉRICO

O modelo 3D do edifício em estudo foi desenvolvido utilizando o programa SeismoStruct [14]. É um programa de elementos finitos baseado em elementos de fibra, permitindo assim modelar adequadamente a inelasticidade dos diferentes componentes da estrutura. Cada fibra foi caracterizada pela respectiva relação constitutiva do material.

O amortecimento hysterético foi incluído implicitamente na formulação do modelo de fibras não linear dos elementos. Outros tipos de amortecimento foram considerados utilizando um amortecimento proporcional à rigidez tangente com um valor de 5%. O efeito de diafragma rígido foi modelado através da aplicação de funções de penalidade 10^7 .

O betão foi representado através de um modelo uniaxial que segue a relação constitutiva proposta por Mander et al. [15] e as regras cíclicas propostas por Martinez-Rueda e Elnashai [16]. Os efeitos de confinamento criados pelo reforço transversal foram tidos em conta através das regras propostas por Mander et al. [15] tendo sido assumida uma pressão de confinamento constante ao longo de toda a relação tensão-deformação. A resistência à compressão foi considerada como sendo de 16,7MPa. O modelo constitutivo usado para o aço foi o proposto por Menegotto e Pinto [17] associado com as regras de endurecimento isotrópico propostas por Filippou et al. [18]. A resistência média de cedência considerada foi de 371Mpa.

4. ANÁLISE SÍSMICA – ESTUDO PARAMÉTRICO

Nesta secção são apresentadas as características das análises sísmicas consideradas e dos estudos paramétricos efectuados.

4.1. Acção sísmica

Para a realização das análises dinâmicas não lineares foram utilizados três pares de acelerogramas semi-artificiais, tabela 1. Os registos reais foram retirados da base de dados do PEER [19] e foram compatibilizados com o espectro de resposta elástico do Eurocódigo8 com as características do código Turco - sismo tipo 1, solo A), utilizando o *software* RSPMatch2005 [20].

Cada par de acelerogramas foi aplicado duas vezes modificando a direcção de cada componente, resultando em 6 análises dinâmicas não lineares (*timehistory*) para cada nível de intensidade.

Tabela 1 – Acelerogramas considerados

Sismo	Ano	Magnitude
Tabas, Iran	1978	7,35
Whittier Narrows-01	1987	5,99
Northridge-01	1994	6,69

Os acelerogramas foram escalados para diferentes níveis de intensidade de modo a avaliar a sensibilidade dos procedimentos estáticos não lineares em estudo a diferentes níveis de acção sísmica. Foram deste modo escalados para acelerações de pico de 0,1, 0,2, 0,4, 0,6 e 0,8g.

Para cada acelerograma foi calculado o respectivo espectro de resposta compatível. A mediana dos espectros foi utilizada para calcular os deslocamentos objectivos nas análises estáticas não lineares. Na figura 2 estão representados o espectro mediano e o espectro de referência do Eurocódigo8, ambos para uma intensidade de 0,4g.

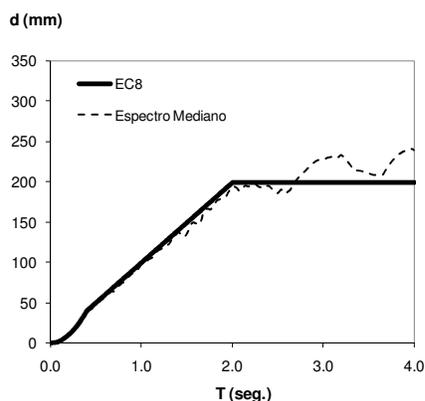


Figura 2- Espectro de resposta de deslocamentos

4.2. Análises estruturais efectuadas

Dois tipos de análise *pushover* foram utilizados: *pushover* convencional e *pushover* adaptativo com aplicação de deslocamentos (DAP). No primeiro foram aplicadas forças laterais com um padrão proporcional ao modo de vibração e à massa e um padrão proporcional à massa. No DAP, os deslocamentos foram aplicados em todos os nós viga-pilar e viga-viga. Neste procedimento foi considerado o escalamento espectral para ter em conta a contribuição de todos os modos de vibração. Em ambos os casos, as forças/deslocamentos foram aplicadas independentemente nas duas direcções X e Y nos sentidos positivo e negativo. Para cada uma das 8 análises

resultantes foi calculado o deslocamento objectivo, tendo sido escolhido para cada direcção o maior valor. Os resultados foram combinados nas duas direcções utilizando a combinação quadrática simples (SRSS).

Para as análises dinâmicas não lineares, os três pares de acelerogramas semi-artificiais foram aplicados duas vezes na estrutura variando a direcção das componentes.

As comparações dos métodos em estudo são feitas para todos os níveis de intensidade analisados na forma de deslocamentos de topo, perfis de deslocamentos laterais, deslocamentos interpisos, rotações de corda e deslocamentos de topo normalizados.

5. RESULTADOS DOS ESTUDOS PARAMÉTRICOS

Os resultados dos estudos paramétricos efectuados são aqui apresentados e interpretados, tendo como principal objectivo a avaliação dos métodos em análise através da comparação com as análises dinâmicas não lineares (análises *timehistory*). Nos gráficos referentes aos rácios de deslocamentos de topo, as diferentes metodologias são representadas do seguinte modo:

× CSM ATC40 ■ CSM FEMA440 □ N2 △ ACSM - - TH

Nos gráficos referentes aos perfis de deslocamentos laterais, aos deslocamentos interpisos, às rotações de corda e aos deslocamentos de topo normalizados as diferentes metodologias são representadas do seguinte modo:

—× CSM ATC40 —■ CSM FEMA440 —□ N2 —△ ACSM —● TH

5.1. Deslocamentos de topo

De forma a avaliar o desempenho das análises estáticas não lineares (AENL), são calculados rácios entre os valores obtidos a partir destas análises para diferentes parâmetros e os correspondentes valores medianos das análises *timehistory* (1). Numa situação perfeita, estes rácios tomariam o valor unitário.

$$\text{Rácio de deslocamentos de topo} = \frac{\text{AENL deslocamento de topo}}{\text{Deslocamento de topo mediano timehistory}} \quad (1)$$

A figura 3 ilustra os rácios relativos aos deslocamentos de topo no CM nas duas direcções X e Y.

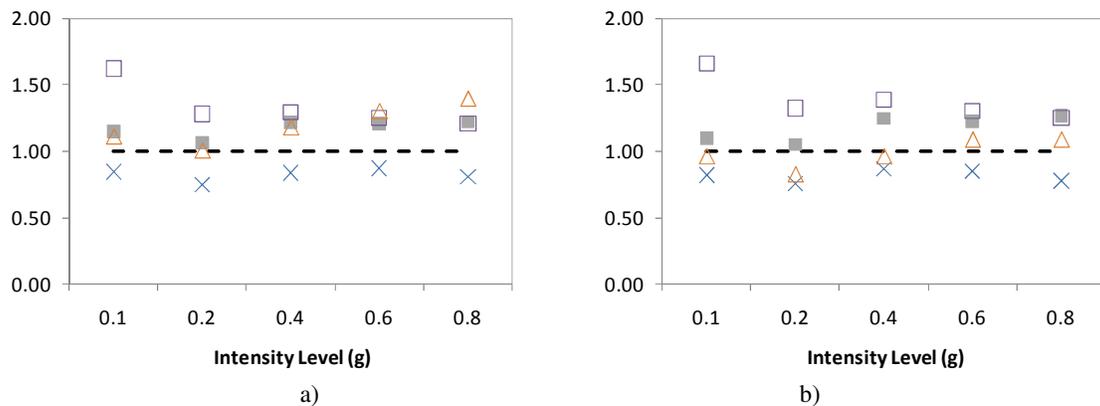


Figura 3 – Deslocamentos de topo no CM a) direcção X; b) direcção Y

A partir da figura 3 é possível verificar que para ambas as direcções e para os diferentes níveis de intensidade analisados o CSM-ATC40 conduz a deslocamentos objectivos sempre não conservativos. Para níveis de inelasticidade baixos, o CSM-FEMA440 produz resultados coincidentes com as análises dinâmicas não lineares em ambas as direcções. O ACSM para baixos níveis de inelasticidade conduz aos mesmos valores obtidos pela *timehistory* na direcção X e a valores ligeiramente não conservativos na direcção Y. Para níveis de inelasticidade mais altos, o CSM-FEMA440 e o método N2 produzem resultados semelhantes e conservativos nas duas direcções. Para níveis de inelasticidade baixos o método N2 conduz a deslocamentos objectivos conservativos

enquanto que o ACSM conduz a valores muito próximos dos obtidos através das análises dinâmicas não lineares para níveis de intensidade mais elevados.

5.2. Perfil de deslocamentos laterais

Na figura 4 apresentam-se os perfis de deslocamentos laterais dos pilares S1 e S23 nas direcções em estudo, para diferentes níveis de intensidade.

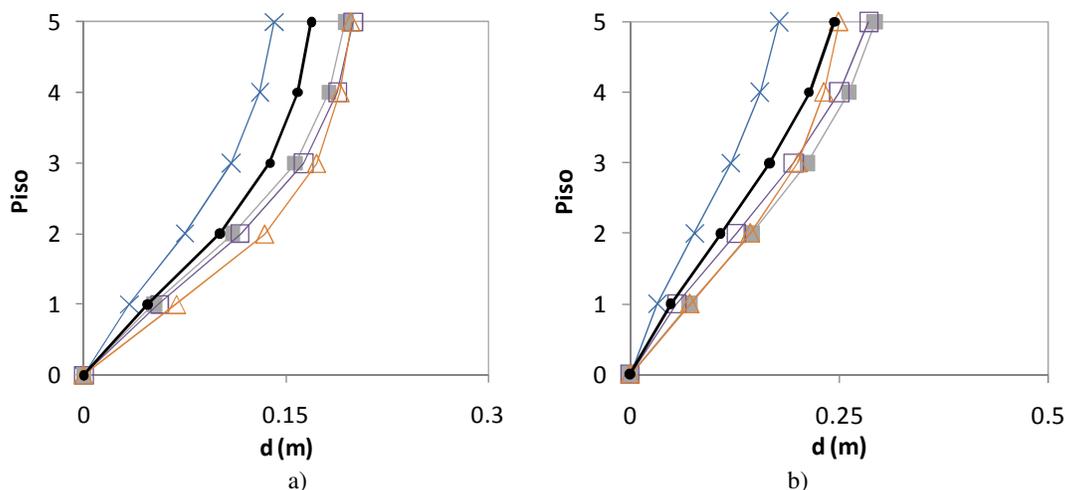


Figura 4 – Perfil de deslocamentos laterais a) pilar S1, 0,6g, direcção X; b) pilar S23, 0,8g, direcção Y

A partir da figura 4 é possível concluir que o CSM-ATC40 conduz a resultados não conservativos em ambas as direcções X e Y para os diferentes níveis de intensidade analisados. Segundo as direcções X e Y o CSM-FEMA440, o método N2 e o ACSM conduzem a perfis de deslocamentos muito semelhantes e conservativos. Contudo, o ACSM conduz a deslocamentos muito próximos dos obtidos a partir da timehistory nos últimos dois pisos na direcção Y para uma intensidade de 0,8g.

5.3. Deslocamentos interpisos

Na figura 5 ilustram-se os deslocamentos interpisos dos pilares S13 e S23 (ver figura 1) para diferentes níveis de intensidade sísmica.

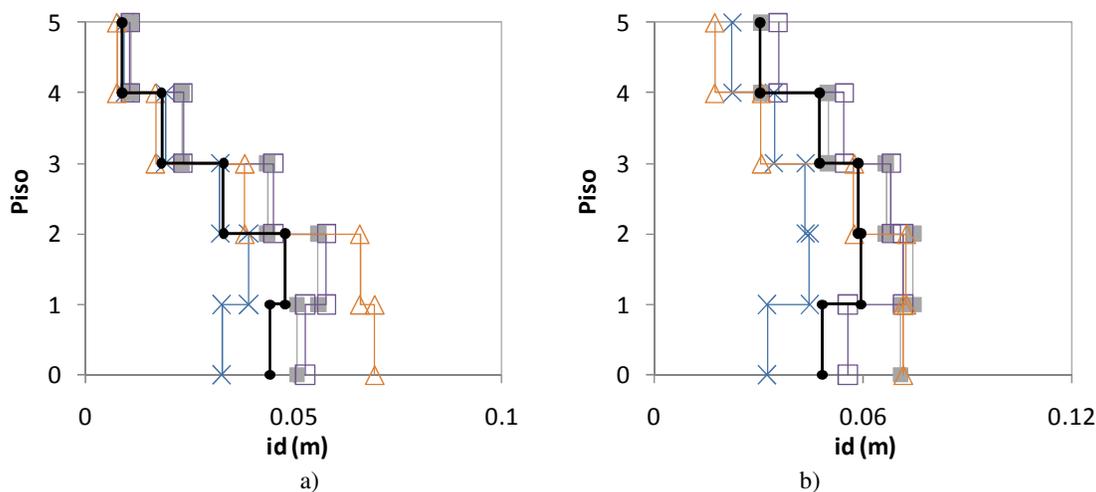


Figura 5 – Deslocamentos interpisos a) pilar S13, 0,6g, direcção X; b) pilar S23, 0,8g, direcção Y

A figura 5b) mostra-nos que o CSM-ATC40 conduz a deslocamentos interpisos não conservativos segundo a direcção Y. Na direcção X, figura 5a) este método produz resultados não conservativos nos pisos 1 e 2 sendo que nos restantes os deslocamentos interpisos coincidem com a *timehistory*. O método N2 e o CSM-FEMA440 conduzem a resultados semelhantes e conservativos nas duas direcções. O CSM-FEMA440 reproduz perfeitamente os deslocamentos interpisos no último piso nas duas direcções X e Y e o método N2 reproduz também perfeitamente a resposta do último piso mas apenas na direcção X. O ACSM conduz a resultados conservativos na direcção X para os três primeiros pisos, reproduzindo muito bem a resposta nos pisos 4 e 5. Na direcção Y o ACSM conduz a resultados conservativos nos pisos 1 e 2, reproduz exactamente os deslocamentos interpisos no piso 3 e apresenta resultados não conservativos nos dois últimos pisos.

5.4. Rotações de corda

A figura 6 mostra as rotações de corda dos pilares S14 e S1 para diferentes níveis de intensidade.

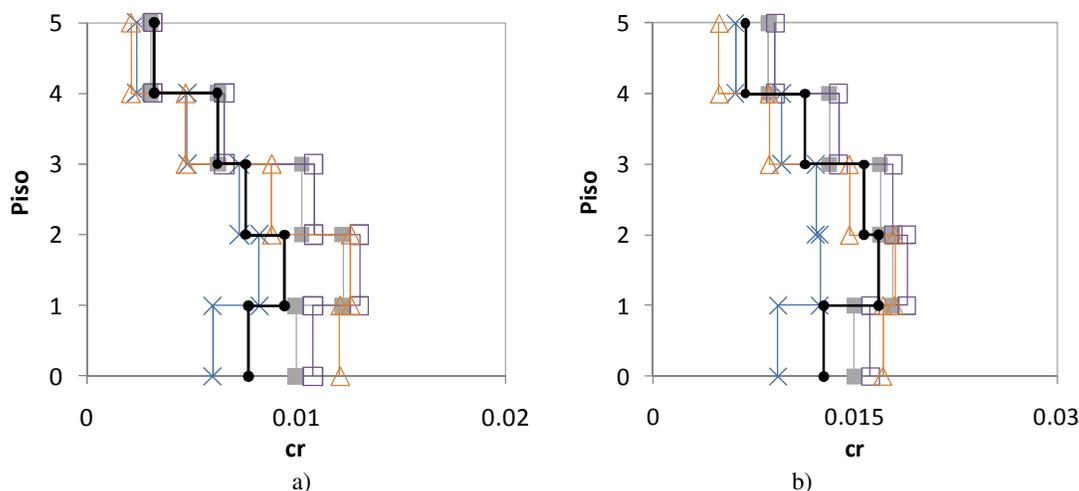


Figura 6 – Rotações de corda a) pilar S14, 0,4g, direcção X; b) pilar S1, 0,6g, direcção Y

A partir da figura 6 é possível verificar que o CSM-ATC40 conduz a rotações de corda não conservativas na direcção Y e nos dois primeiros pisos da direcção X. Nos restantes pisos na direcção X os resultados deste método coincidem com os obtidos a partir da *timehistory*. O método N2 e o CSM-FEMA440 conduzem a resultados semelhantes sendo conservativos em ambas as direcções. Na direcção X estes métodos levam a resultados perfeitos nos dois últimos pisos. O ACSM apresenta na direcção X rotações de corda conservativas nos três primeiros pisos e não conservativas nos dois últimos pisos. Na direcção Y o método conduz a resultados conservativos nos dois primeiros pisos e a não conservativos nos três pisos superiores.

5.5. Avaliação do comportamento torsional do edifício

Para avaliar a resposta torsional do edifício, os resultados são apresentados em termos de deslocamentos de topo normalizados em relação ao centro de massa. Esta grandeza é obtida normalizando os deslocamentos nas extremidades do edifício relativamente ao deslocamento no centro de massa. Na figura 7 apresentam-se estes resultados para a direcção X – direcção onde a estrutura apresenta assimetria em planta – para diferentes níveis de intensidade sísmica. Na figura 7 é possível verificar que para uma intensidade de 0,2g todos os métodos em análise conduzem aos mesmos resultados. Os deslocamentos normalizados em relação ao centro de massa são não conservativos no pilar S1 e conservativos no pilar S23. Para 0,6g, o CSM-ATC40, o CSM-FEMA440 e o método N2 apresentam resultados semelhantes sendo que se aproximam bastante dos obtidos a partir das análises dinâmicas não lineares no pilar S23 e são não conservativos no pilar S1. O ACSM apresenta resultados não conservativos no pilar S1 e conservativos no pilar S23. É possível concluir que em geral os métodos em análise não são capazes de reproduzir com exactidão o comportamento torsional do edifício.

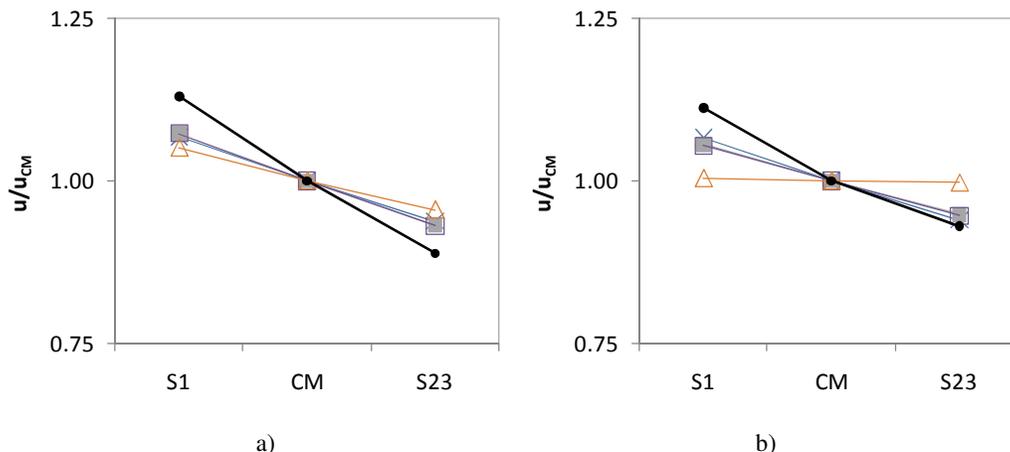


Figura 7 – Deslocamentos de topo normalizados em relação ao centro de massa, direcção X a) 0,2g; b) 0,6g

6. CONCLUSÕES

Existe um número reduzido de publicações sobre a aplicação de procedimentos estáticos não lineares a edifícios irregulares em planta. Os que existem restringem-se à avaliação de um único método, não permitindo deste modo a avaliação simultânea de vários procedimentos. Neste estudo compararam-se os desempenhos de quatro procedimentos estáticos não lineares usualmente utilizados, três dos quais pertencentes a regulamentos: o método N2 proposto no Eurocódigo8, o CSM com as características presentes no ATC40, o CSM com as características desenvolvidas no relatório FEMA440 e o ACSM. O caso de estudo é um edifício turco de betão armado com 5 pisos. Os resultados das análises *pushover* foram comparados com análises dinâmicas não lineares através do uso de acelerogramas semi-artificiais. As análises sísmicas foram desenvolvidas para diferentes níveis de intensidade de modo a avaliar o desempenho de cada método para diferentes estádios de inelasticidade estrutural. Os resultados obtidos neste estudo permitem concluir que todos os procedimentos estáticos não lineares conduzem a resultados conservativos. A excepção é o CSM-ATC40 que produz em geral resultados não conservativos. No que respeita a deslocamentos de topo, perfis de deslocamentos, deslocamentos interpisos e rotações de corda na direcção X (assimétrica):

- Para níveis de inelasticidade baixos:
 - CSM-FEMA440 e o ACSM produzem resultados muito próximos dos obtidos a partir das análises dinâmicas não lineares;
 - Método N2 conduz a resultados conservativos;
- Para níveis de inelasticidade mais elevados:
 - CSM-FEMA440, ACSM e o método N2 produzem resultados semelhantes e conservativos;

No que respeita a deslocamentos de topo, perfis de deslocamentos, deslocamentos interpisos e rotações de corda na direcção Y (simétrica):

- Para níveis de inelasticidade baixos:
 - CSM-FEMA440 e o ACSM produzem resultados muito próximos dos obtidos a partir da *timehistory*;
 - Método N2 conduz a resultados conservativos
- Para níveis de inelasticidade mais elevados:
 - Os resultados obtidos com o ACSM são muito próximos das análises *timehistory*;
 - CSM-FEMA440 e o método N2 produzem resultados semelhantes e conservativos;

Nenhum dos métodos analisados conseguiu descrever perfeitamente a resposta torsional do edifício em termos de deslocamentos de topo normalizados em relação ao centro de massa. Os resultados obtidos neste estudo, bem como em outros trabalhos desenvolvidos pelos autores [3, 21] permitem encarar com optimismo a aplicação de procedimentos estáticos não lineares em edifícios irregulares em planta, nomeadamente os propostos no código americano, no Eurocódigo8 e o ACSM. Contudo, é necessário que estas metodologias sofram uma evolução no sentido de melhorarem o seu desempenho na descrição da resposta torsional deste tipo de edifícios. Vários esforços têm sido feitos neste sentido, principalmente por Fajfar e sua equipa [2] no desenvolvimento da extensão do método N2 para edifícios irregulares em planta a ser incluído na próxima versão do Eurocódigo8.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o financiamento da Fundação Portuguesa para a Ciência e Tecnologia (Ministério da Ciência e Tecnologia da República Portuguesa) através do projecto PTDC/ECM/100299/2008 e da bolsa de Doutoramento SFRH/BD/28447/2006 atribuída a Carlos Bhatt.

8. REFERÊNCIAS

- [1] Chopra A.K., Goel R.K., 2004. A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for unsymmetric-plan buildings, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 33, 903-927.
- [2] Fajfar P., Marusic D., Perus I. Torsional effects in the pushover-based seismic analysis of buildings. *Journal of Earthquake Engineering* 2005 9:6, 831-854.
- [3] Bento R., Bhatt C., Pinho R. Using Nonlinear Static Procedures for Seismic Assessment of the 3D Irregular SPEAR Building. *Earthquakes and Structures* 2010, 1:2, 177-195.
- [4] Freeman S.A., Nicoletti J.P., Tyrell J.V., 1975. Evaluation of existing buildings for seismic risk – A case study of Puget Sound Naval Shipyard, Bremerton, Washington, *Proceedings of U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Berkley, USA., pp. 113-122.
- [5] Freeman S.A., 1998. Development and use of capacity spectrum method, *Proceedings of the Sixth U.S. National Conf. Earthquake Engineering*, Seattle, Oakland, USA.
- [6] Applied Technology Council (ATC), 1996. *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*, vol. 1 and 2, Report No. ATC-40, Redwood City, CA.
- [7] Applied Technology Council (ATC), 2005. *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*, FEMA 440 Report, Redwood City, CA.
- [8] Fajfar P., Fischinger M. N2 – A method for non-linear seismic analysis of regular buildings. *Proceedings of the Ninth World Conference in Earthquake Engineering*, Tokyo-Kyoto, Japan, 1988, Vol. 5, 111-116.
- [9] Fajfar P., 2000. A nonlinear analysis method for performance-based seismic design, *Earthquake Spectra* 16 (3), 573-592.
- [10] CEN, 2004. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings, EN 1998-1:2004 Comité Européen de Normalisation, Brussels, Belgium.
- [11] Casarotti C., Pinho R., 2007. An Adaptive Capacity Spectrum Method for assessment of bridges subjected to earthquake action, *Bulletin of Earthquake Engineering* 5 (3), 377-390.
- [12] Antoniou S., Pinho R., 2004. Development and verification of a displacement-based adaptive pushover procedure, *Journal of Earthquake Engineering* 8 (5), 643-661.
- [13] Vuran, E., Bal, Y. E., Crowley, H. and Pinho, R., 2008. Determination of equivalent SDOF characteristics of 3D dual structures, *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, paper no: S15-031.
- [14] SeismoSoft. SeismoStruct - A computer program for static and dynamic nonlinear analysis of framed structures. Available online from URL: www.seismosoft.com, 2006.
- [15] Mander J.B., Priestley M.J.N., Park R. Theoretical stress-strain model for confined concrete. *ASCE Journal of Structural Engineering* 1988 114:8, 1804-1826.
- [16] Martinez-Rueda, J.E.; Elnashai, A. S. Confined concrete model under cyclic load. *Materials and Structures* 1997 30:197, 139-147.
- [17] Menegotto M., Pinto P.E. Method of analysis for cyclically loaded RC plane frames including changes in geometry and non-elastic behaviour of elements under combined normal force and bending. *Symposium on the Resistance and Ultimate Deformability of Structures anted on by well defined loads*, International Association for Bridge and Structural Engineering, Zurich, Switzerland, 1973; 15-22.
- [18] Filippou F.C., Popov E.P., Bertero V.V. Modelling of R/C joints under cyclic excitations. *Journal of Structural Engineering* 1983 109:11, 2666-2684.
- [19] PEER, 2009. *Strong Ground Motion Database*, <http://peer.berkeley.edu/nga/>
- [20] Hancock J, Watson-Lamprey J, Abrahamson NA, Bommer JJ, Markatis A, McCoy E, Mendis R., 2006. An improved method of matching response spectra of recorded earthquake ground motion using wavelets, *Journal of Earthquake Engineering* 10(S1), 67–89.
- [21] Bhatt, C., Bento, R., Pinho, R. Verification of nonlinear static procedures for a 3D plan-irregular building in Turkey, *Proceedings of the 14th European Conference on Earthquake Engineering*, Ohrid, Macedonia, 2010. *Aceite para publicação*.