

## AValiação Sísmica de um Edifício Irregular em Planta – Extensão do Método N2 vs. N2 Original

**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

O método N2, desenvolvido por Fajfar e proposto no Eurocódigo 8 para a realização de análises estáticas não lineares, tem sido largamente testado e os seus resultados apresentados em vários estudos. O seu bom desempenho é confirmado quando este é aplicado a pontes e a edifícios regulares, em particular os modelados através de pórticos planos. Quando se analisam edifícios irregulares em planta, o efeito da torção representa um papel importante no desempenho sísmico estrutural e tem que ser considerado na modelação. O método N2, tal como é apresentado no Eurocódigo 8, não parece ter capacidade para reproduzir com precisão o comportamento torsional deste tipo de estruturas. Uma vez que a maior parte dos edifícios reais são irregulares em planta, é de vital importância desenvolver metodologias de análises *pushover* capazes de reproduzir com um elevado grau de precisão o verdadeiro comportamento estrutural destes edifícios. A extensão do método N2 para edifícios irregulares em planta, também proposto por Fajfar, é aqui apresentado e os seus resultados são comparados com os do método N2 original. Ambas as metodologias estáticas não lineares são avaliadas tendo por base os resultados de análises dinâmicas não lineares desenvolvidas utilizando acelerogramas semi-artificiais. O caso de estudo é o edifício SPEAR, de betão armado, com três pisos e irregular em planta que foi testado à escala real no laboratório ELSA em Ispra no âmbito do projecto Europeu SPEAR. As comparações são realizadas para diferentes graus de intensidade sísmica de modo a aferir o desempenho de cada método para diferentes estádios de inelasticidade da estrutura. Os bons resultados obtidos permitem encarar com optimismo a inclusão da extensão do método N2 na próxima versão do Eurocódigo 8.

### 1. INTRODUÇÃO

As análises *pushover* são actualmente uma alternativa expedita para efectuar análises não lineares de estruturas. Apesar das análises dinâmicas não lineares conduzirem a resultados mais precisos, continuam a exigir um forte esforço computacional e um grande consumo de tempo. Esta limitação é tão mais importante quando se tratam de gabinetes de projecto onde os prazos de entrega são uma realidade.

A literatura existente apresenta um vasto leque de resultados que comprovam o bom desempenho dos procedimentos estáticos não lineares aplicados a pontes e a pórticos planos [1, 2, 3].

Um exemplo de metodologia *pushover* é o método N2 desenvolvido por Fajfar [2] e proposto no Eurocódigo 8 [4]. Os procedimentos estáticos não lineares actualmente recomendados em diferentes códigos e normativas apresentam fortes limitações na análise de edifícios irregulares em planta. De facto, estes métodos não são capazes de reproduzir de forma fiel os movimentos torsionais destas estruturas quando sujeitos à acção sísmica.

As estruturas assimétricas em planta são as mais comuns na realidade, logo é fundamental desenvolver metodologias estáticas não lineares capazes de reproduzir de forma correcta a resposta estrutural destes edifícios. Estudos recentes têm abordado este problema [5, 6, 7], tentando desenvolver uma nova geração de procedimentos estáticos não lineares capazes de serem utilizadas com confiança pelos diferentes agentes envolvidos no dimensionamento e análise sísmica de estruturas.

Fajfar e a sua equipa desenvolveram uma extensão do método N2 para edifícios irregulares em planta [6]. Este procedimento baseia-se no método N2 proposto no Eurocódigo 8, cujos resultados são multiplicados por um factor de correcção para ter em conta o efeito da torção. Este factor depende de uma análise estática não linear e de uma análise dinâmica linear por espectro de resposta.

Neste artigo, a extensão do método N2 é aplicada ao edifício SPEAR e os seus resultados são comparados com os obtidos utilizando o original N2 e com análises dinâmicas não lineares. Estas últimas foram desenvolvidas utilizando acelerogramas semi-artificiais.

As análises foram efectuadas para diferentes níveis de intensidade sísmica de forma a poder avaliar o desempenho das metodologias em estudo nas diferentes etapas de inelasticidade estrutural.

Os resultados aqui apresentados corroboram a ideia de que a extensão do método N2 apresenta fortes potencialidades na análise não linear de edifícios torsionalmente sensíveis, sugerindo-se mesmo que seja integrada na próxima versão do Eurocódigo 8.

## 2. EXTENSÃO DO MÉTODO N2

A grande dificuldade que a maior parte dos procedimentos estáticos não lineares apresenta é a descrição correcta dos efeitos torsionais que o sismo provoca em estruturas assimétricas em planta.

De forma a ultrapassar este problema, Fajfar e os seus colaboradores [6] propuseram uma extensão do método N2. A partir dos seus estudos concluíram que na maioria dos edifícios analisados era possível obter um majorante das amplificações torsionais através de uma análise dinâmica linear por espectro de resposta. Esta conclusão observa-se igualmente em regime inelástico. Esta extensão do método N2 entra em conta com uma análise estática não linear e com uma análise dinâmica linear por espectro de resposta. A desamplificação da resposta estrutural devido à torção não é considerada. O procedimento pode ser descrito nos passos seguintes:

- 1) Desenvolver análises *pushover* no sentido positivo e negativo das direcções X e Y do modelo numérico 3D. Calcular o deslocamento objectivo utilizando o método N2 proposto no Eurocódigo 8 – no centro de massa do último piso – em cada direcção, como sendo o máximo valor das análises estáticas não lineares de sinal + e -.
- 2) Efectuar uma análise dinâmica linear por espectro de resposta nas direcções X e Y combinando os resultados utilizando a regra da raiz quadrada da soma dos quadrados.
- 3) Determinar os factores de correcção para a torção. Este factor é calculado fazendo o rácio entre os deslocamentos de topo normalizados obtidos da análise dinâmica linear por espectro de resposta e da análise *pushover*. O deslocamento de topo normalizado é obtido normalizando o deslocamento num determinado ponto em relação ao deslocamento do centro de massa. Se o deslocamento de topo normalizado em algum ponto obtido a partir da análise dinâmica linear for menor do que 1,0, deve ser considerado o valor 1,0 de modo a não contabilizar nenhum efeito favorável devido à torção (redução dos deslocamentos) dado pela análise linear.
- 4) Multiplicar a grandeza em estudo numa determinada localização do edifício pelo factor de correcção calculado para essa localização.

## 3. CASO DE ESTUDO – EDIFÍCIO SPEAR

O caso de estudo analisado é o edifício SPEAR, uma estrutura de três pisos em betão armado que representa a construção tradicional na zona mediterrânica. Foi dimensionada apenas para cargas gravíticas utilizando os códigos em vigor na Grécia entre 1954 e 1995, com as práticas construtivas e materiais do início da década de 70. Um protótipo deste edifício foi testado à escala real no laboratório ELSA em Ispra no âmbito do projecto Europeu SPEAR. Mais informações sobre as características da estrutura e do teste podem ser encontradas em [8, 9].

O edifício SPEAR é irregular em planta segundo as duas direcções X e Y, mas apresenta regularidade em altura. Na figura 1 apresentam-se a planta e um alçado do edifício.

O pilar C2 caracteriza-se como sendo a extremidade flexível do edifício enquanto que o pilar C8 corresponde à extremidade rígida. O centro de massa localiza-se muito próximo do pilar C3.

O primeiro modo de vibração do edifício -  $T_1 = 0,62\text{seg}$  - é caracterizado por translação segundo X acoplada com torção. O segundo modo -  $T_2 = 0,53\text{seg}$  - é predominantemente torsional. O terceiro -  $T_3 = 0,44\text{seg}$  - apresenta translação segundo Y também acoplada com torção. Por ser torsionalmente sensível, o edifício SPEAR tem de ser analisado utilizando um modelo numérico tridimensional.

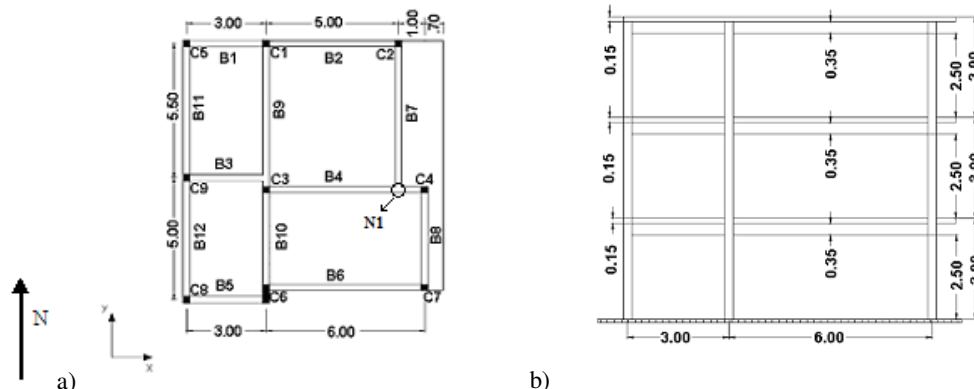


Figura 1- Edifício SPEAR: a) planta; b) fachada (unidades em metros)

#### 4. ANÁLISE SÍSMICA – ESTUDO PARAMÉTRICO

Nesta secção são apresentadas as características das análises sísmicas consideradas e dos estudos paramétricos desenvolvidos. O modelo numérico 3D e as suas propriedades são também aqui descritos.

##### 4.1. Acção sísmica

Para a realização das análises dinâmicas não lineares foram utilizados sete acelerogramas semi-artificiais do projecto SPEAR, tabela 1. Estes registos foram compatibilizados com o espectro de resposta elástico do Eurocódigo 8 (sismo tipo 1, solo C).

Tabela 1 – Acelerogramas considerados

| Sismo                | Estação               |
|----------------------|-----------------------|
| Imperial Valley 1979 | Bonds Corner          |
| Loma Prieta 1989     | Capitola              |
| Kalamata 1986        | Kalamata – Prefecture |
| Montenegro 1979      | Herceg Novi           |
| Friuli 1976          | Tolmezzo              |
| Montenegro 1979      | Ulcinj2               |
| Imperial Valley 1940 | El Centro Array #9    |

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 0,05, 0,1, 0,2 e 0,3g.

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 os espectros medianos em cada direcção bem como o espectro de referência do Eurocódigo 8, para uma intensidade de 0,2g.

##### 4.2. Modelo numérico

O modelo 3D do edifício em estudo foi desenvolvido utilizando o programa SeismoStruct [10]. É um programa de elementos finitos baseado em elementos de fibra. A inelasticidade dos diferentes componentes da estrutura foi modelada utilizando elementos de fibra. 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. Foi utilizado um valor de 2%, valor este baseado nos resultados experimentais do laboratório ELSA. O efeito de diafragma rígido foi modelado através da aplicação de multiplicadores de Lagrange.

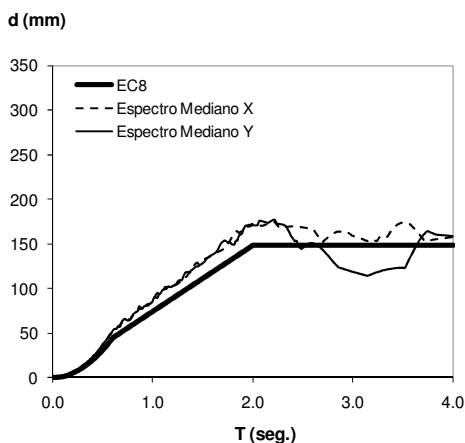


Figura 2- Espectros de resposta de deslocamentos

O betão foi representado através de um modelo uniaxial que segue a relação constitutiva proposta por Mander et al. [11] e as regras cíclicas propostas por Martinez-Rueda e Elnashai [12]. Os efeitos de confinamento criados pelo reforço transversal foram tidos em conta através das regras propostas por Mander et al. [11] 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 25MPa.

O modelo constitutivo usado para o aço foi o proposto por Menegotto e Pinto [13] associado com as regras de endurecimento isotrópico propostas por Filippou et al. [14]. A resistência média de cedência considerada foi de 360Mpa.

A comparação do modelo analítico com os resultados experimentais obtidos com o protótipo de ISPRA pode ser consultada em [7].

#### 4.3. Análises estruturais efectuadas

Na análise *pushover* foram aplicadas forças laterais com padrão proporcional ao modo de vibração e padrão uniforme. As forças foram aplicadas independentemente nas duas direcções com sentido positivo e negativo, resultando em 8 análises. Para cada uma, foi calculado o respectivo deslocamento objectivo, sendo escolhido para cada direcção o maior valor. Os resultados foram combinados nas duas direcções utilizando a combinação SRSS.

Nas análises dinâmicas não lineares os referidos sete pares de acelerogramas semi-artificiais foram aplicados em quatro diferentes combinações: X+Y+, X+Y-, X-Y-, X-Y+, resultando em 28 análises para cada nível de intensidade.

As comparações dos métodos em estudo são feitas para todos os níveis de intensidade para ambas análises estática e dinâmica não lineares na forma de perfis de deslocamentos laterais, deslocamentos interpisos, rotações de corda, deslocamentos de topo 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 da extensão do método N2 através da comparação com o N2 original e com as análises dinâmicas não lineares *timehistory*. Nos gráficos referentes aos rácios de deslocamentos de topo, as diferentes metodologias são representadas do seguinte modo:

◆ Extensão N2    □ N2 Original    - - 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:

◆ Extensão N2    □ N2 Original    ● TH

### 5.1. Deslocamentos de topo

De modo a poder avaliar de uma forma prática 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 dinâmicas não lineares *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 calculados no topo do pilar C2 nas duas direcções X e Y.

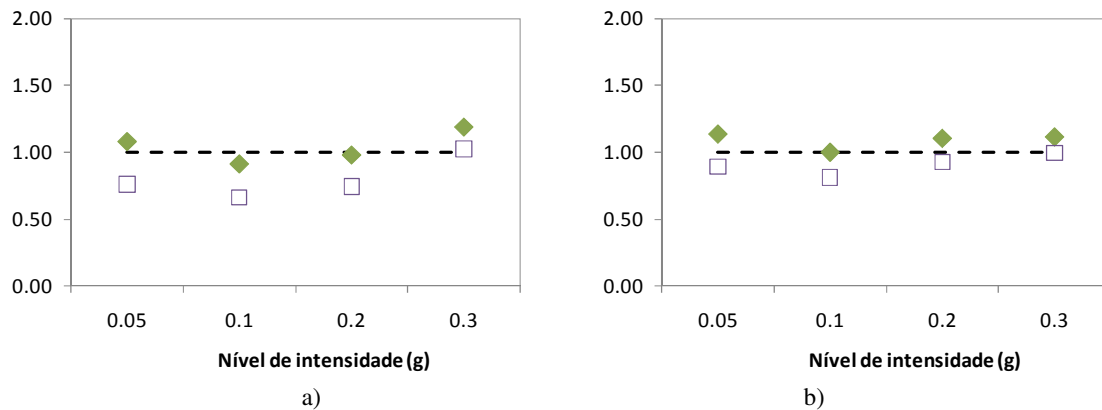


Figura 3 – Deslocamentos de topo do pilar C2 a) direcção X, b) direcção Y

A partir dos resultados apresentados na figura 3 é possível verificar que em ambas as direcções a extensão do método N2 leva a valores muito próximos da unidade para as intensidades 0,05, 0,1 e 0,2g, enquanto que o N2 original produz resultados não conservativos. Para 0,3g nas duas direcções, o método N2 original apresenta resultados muito próximos da unidade, enquanto que a extensão do método produz resultados conservativos.

### 5.2. Perfil de deslocamentos laterais

Na figura 4 apresentam-se os perfis de deslocamentos laterais do pilar C2 nas direcções em estudo.

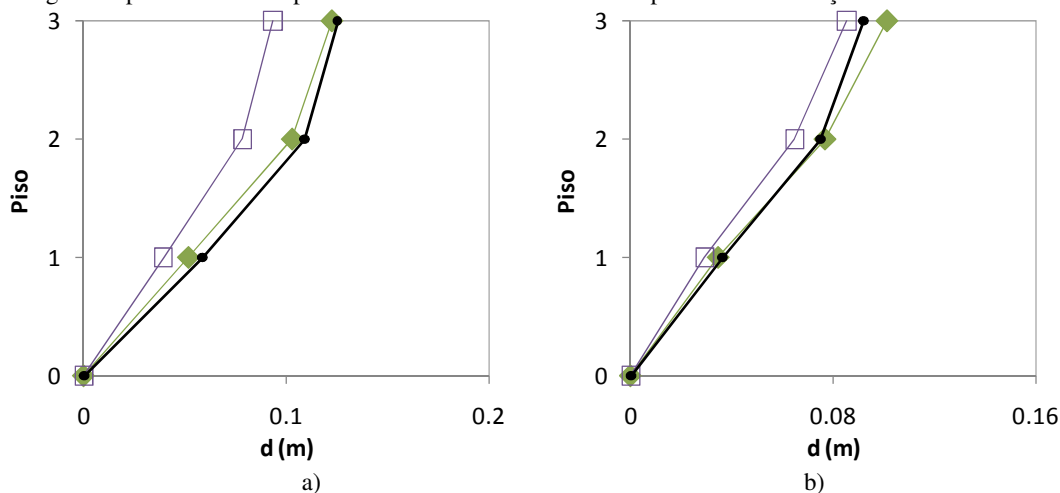


Figura 4 – Perfil de deslocamentos laterais do pilar C2 para 0,2g a) direcção X, b) direcção Y

Como é possível verificar na figura 4, os deslocamentos laterais calculados utilizando a extensão do método N2 aproximam-se dos resultados das análises dinâmicas não lineares para uma intensidade sísmica de 0,2g para

ambas as direcções X e Y. O método N2 apresenta em geral resultados não conservativos. De facto, a extensão do método N2 descreve de uma forma mais realista o comportamento estrutural do edifício.

### 5.3. Deslocamentos interpisos

Na figura 5 ilustram-se os deslocamentos interpisos do pilar C2 para diferentes níveis de intensidade sísmica.

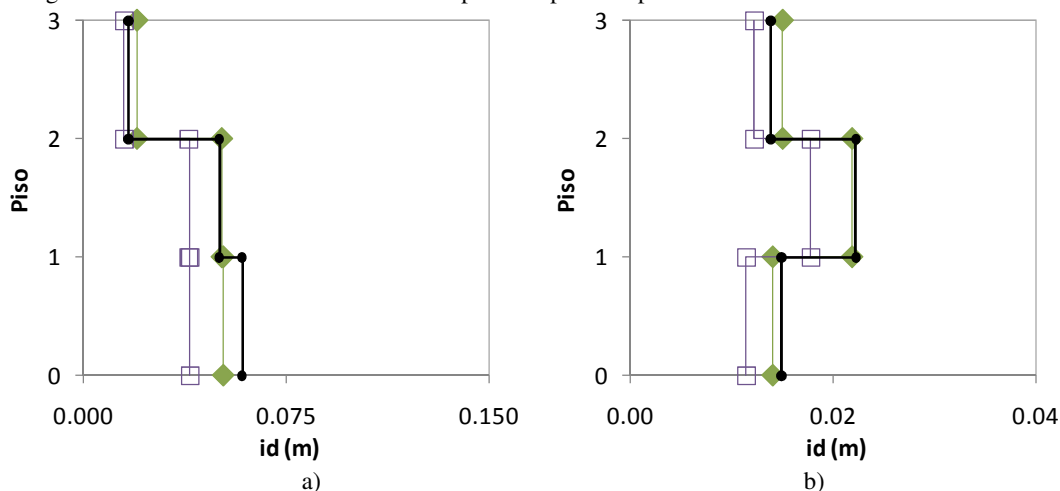


Figura 5 – Deslocamentos interpisos do pilar C2 a) direcção X 0,2g, b) direcção Y 0,1g

Da figura 5 é possível concluir que, uma vez mais, a extensão do método N2 descreve de uma forma mais adequada o comportamento do edifício do que o método original cujos resultados são em geral não conservativos. De facto, a metodologia desenvolvida apresenta resultados que coincidem praticamente com as análises *timehistory*, excepto nos deslocamentos do piso inferior da extremidade flexível do edifício - coluna C2 - cuja resposta é ligeiramente não conservativa quer para a direcção X para uma intensidade de 0,2g, quer para a direcção Y para uma intensidade de 0,1g.

### 5.4. Rotações de corda

A figura 6 mostra as rotações de corda do pilar C2 para as direcções X e Y para uma intensidade de 0,2g.

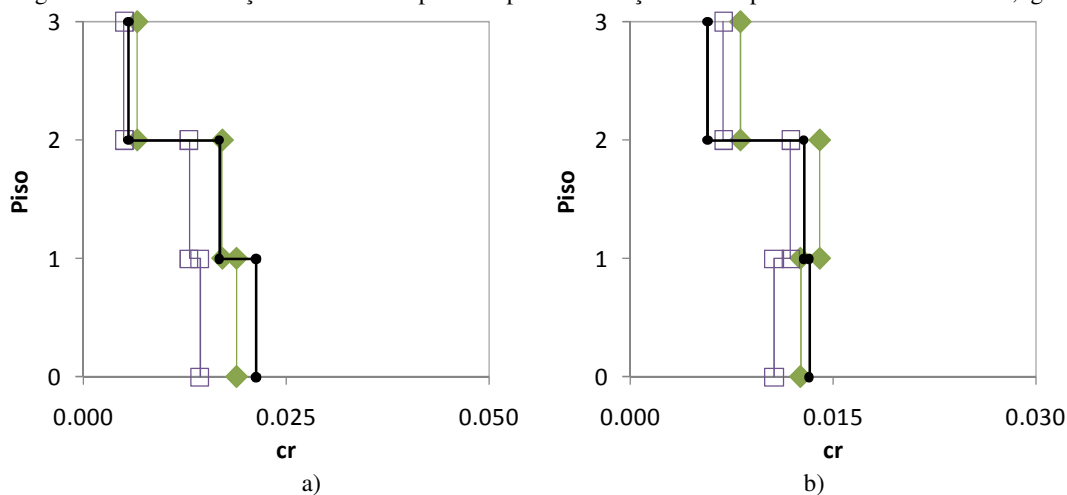


Figura 6 – Rotações de corda no pilar C2 para 0,2g a) direcção X, b) direcção Y

Relativamente às rotações de corda, figura 6, é possível observar que a extensão do método N2 apresenta resultados bastante próximos das análises dinâmicas não lineares, excepto no piso 1 da coluna C2 para 0,2g nas

duas direcções X e Y onde os valores obtidos com este método são ligeiramente não conservativos. Pelo contrário, as rotações de corda nos pisos superiores da coluna C2 na direcção Y para 0,2g são superiores aos obtidos a partir da *timehistory*. O método N2 original apresenta em geral resultados não conservativos excepto no último piso da coluna C2 – extremidade flexível do edifício - para 0,2g. Neste caso, na direcção X os valores obtidos com este método aproximam-se dos resultados de referência (correspondentes às análises dinâmicas não lineares), enquanto que na direcção Y as rotações de corda assim obtidas são conservativas.

### 5.5. Avaliação do comportamento torsional do edifício

De forma a avaliar a resposta torsional do edifício, os resultados são apresentados em termos de deslocamentos de topo normalizados. 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 nas direcções X e Y para diferentes níveis de intensidade sísmica.

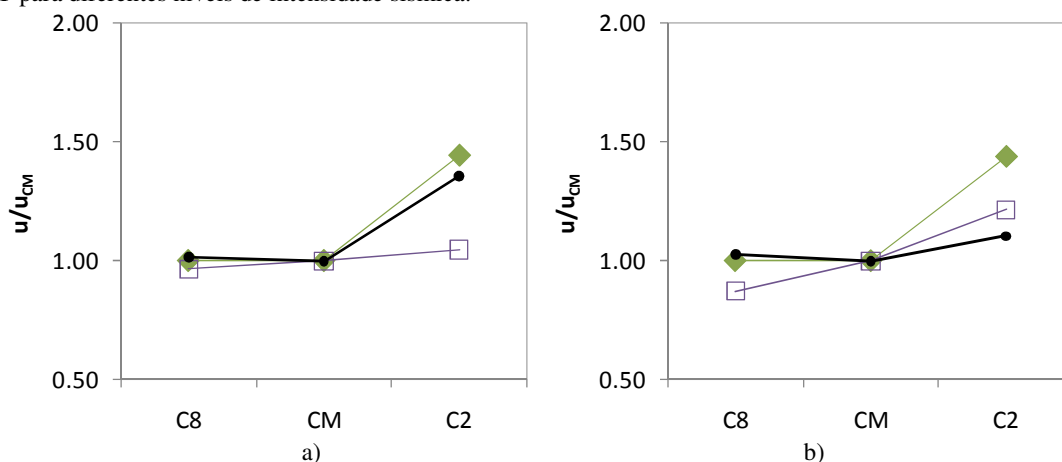


Figura 7 – Deslocamentos de topo normalizados em relação ao centro de massa a) direcção X 0,1g, b) direcção Y 0,2g

A partir da análise dos deslocamentos de topo normalizados representados na figura 7 é possível concluir que a extensão do método N2 é capaz de reproduzir com uma maior precisão do que a metodologia original a resposta torsional do edifício. De facto é possível verificar que na direcção X para 0,1g tanto o método N2 original como a sua extensão reproduzem correctamente o deslocamento normalizado de topo da coluna C8 – extremidade rígida do edifício. Para a coluna C2 – extremidade flexível - o método original apresenta resultados muito inferiores aos reais, enquanto que a extensão do N2 reproduz na perfeição a amplificação torsional neste lado do edifício. Na direcção Y para 0,2g, o método N2 original apresenta resultados não conservativos para a coluna C8, enquanto que a sua extensão apresenta resultados coincidentes com as análises *timehistory*. No que diz respeito à coluna C2, ambos os métodos apresentam resultados conservativos.

## 6. CONCLUSÕES

A maior parte dos procedimentos estáticos não lineares actualmente existentes não são capazes de reproduzir fielmente a resposta torsional induzida pelo sismo em edifícios assimétricos em planta. No sentido de ultrapassar este problema, Fajfar e a sua equipa desenvolveram a extensão do método N2. Este método é apresentado neste artigo e os seus resultados são comparados com o N2 original proposto no Eurocódigo 8 e com análises dinâmicas não lineares *timehistory* através do uso de acelerogramas semi-artificiais. Esta nova versão consiste na aplicação de factores de correcção aos resultados obtidos utilizando o método N2 original. Estes factores de correcção são calculados com base numa análise linear por espectro de resposta e numa análise *pushover*, sendo que não é considerado nenhum efeito favorável devido à torção. O caso de estudo analisado foi o edifício SPEAR, cuja planta apresenta assimetrias que lhe conferem uma considerável sensibilidade torsional. Os resultados foram comparados em termos de perfis de deslocamentos laterais, deslocamentos de topo, deslocamentos interpisos, rotações de corda e deslocamentos de topo normalizados. As análises foram realizadas para diferentes níveis de intensidade sísmica de modo a aferir o desempenho dos métodos em estudo para

diferentes estádios de inelasticidade da estrutura. Os resultados obtidos permitem concluir que a extensão do método N2 descreve de uma forma muito mais realista os efeitos torsionais e a resposta estrutural global do edifício em estudo. De facto, o método N2 apresenta fortes limitações no que respeita à reprodução fiel da torção induzida pelos sismos em estruturas irregulares em planta. A aplicação da extensão do método N2 a outros edifícios reais [15, 16] conduziram às mesmas conclusões retiradas a partir deste estudo, o que leva a crer que este procedimento poderá ser incluído na próxima versão do Eurocódigo 8. Esta metodologia tem um enorme potencial para se constituir como um procedimento estático não linear regulamentar capaz de estimar a amplificação torsional em edifícios assimétricos em planta.

## 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] 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.
- [2] Freeman S.A. Development and use of capacity spectrum method. Proceedings of the Sixth U.S. National Conf. Earthquake Engineering, Seattle, Oakland, USA, 1998.
- [3] Freeman S.A., Nicoletti J.P., Tyrell J.V. 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., 1975, pp. 113-122.
- [4] CEN. 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, 2004.
- [5] Chopra A.K., Goel R.K. A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for unsymmetric-plan buildings. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 2004 33, 903-927.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Fardis M.N. Design of an Irregular Building for the SPEAR Project - Description of the 3-Storey Structure. Research Report, University of Patras, Greece, 2002.
- [9] Fardis M.N., Negro P. SPEAR – Seismic performance assessment and rehabilitation of existing buildings. Proceedings of the International Workshop on the SPEAR Project, Ispra, Italy, 2006.
- [10] SeismoSoft. SeismoStruct - A computer program for static and dynamic nonlinear analysis of framed structures. Available online from URL: [www.seismosoft.com](http://www.seismosoft.com), 2006.
- [11] 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.
- [12] Martinez-Rueda, J.E.; Elnashai, A. S. Confined concrete model under cyclic load. Materials and Structures 1997 30:197, 139-147.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Bhatt, C., Bento, R., Pinho, R. Assessing a Real 3D Turkish RC Building Using Nonlinear Static Procedures, Proceedings of the 9<sup>th</sup> US National and 10<sup>th</sup> Canadian Conference on Earthquake Engineering: *Reaching beyond borders*, Toronto, Canadá, 2010. *A ser publicado*.
- [16] 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*.