

MODELO NUMÉRICO NÃO-LINEAR PARA PAINÉIS DE ALVENARIA DE ENCHIMENTO EM PÓRTICOS DE BETÃO ARMADO

Hugo Rodrigues¹, Humberto Varum² e Aníbal Costa¹

1: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Rua Dr. Roberto Frias - 4200-465 Porto
e-mails: hugomelvin@sapo.pt, agc@fe.up.pt

2: Departamento de Engenharia Civil
Universidade Aveiro
Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro
e-mail: hvarum@civil.ua.pt

Palavras-chave: Análise não-linear dinâmica, Alvenaria, Comportamento histerético

Resumo. *É comum considerar que as paredes de alvenaria de enchimento em de edifícios têm uma contribuição favorável para as acções horizontais, e assim o seu efeito é desprezado no cálculo estrutural. Sismos recentes mostraram inúmeros casos de danos severos e colapsos de edifícios devido a alterações no comportamento das estruturas induzidas pela alvenaria. Foi proposto um modelo global de comportamento não-linear para os painéis de alvenaria, inspirado no modelo de biela equivalente. Este modelo foi implementado num programa de análise não-linear de estruturas porticadas, VISUALANL. Neste artigo é apresentado o modelo e resultados da sua calibração com um ensaio experimental.*

1. INTRODUÇÃO

Os objectivos principais deste trabalho foram o desenvolvimento de um modelo numérico global, e a sua implementação num programa de análise não-linear dinâmica de estruturas porticadas, VISUALANL [1, 2], que tenha em conta a participação dos painéis de alvenaria não estrutural em edifícios de betão armado, quando sujeitos a cargas cíclicas, como os sismos.

A presença das paredes de alvenaria de enchimento nos edifícios de betão armado é muito frequente e, por esta razão, muitos estudos numéricos e experimentais tem sido desenvolvidos nos últimos anos. No entanto, as paredes de alvenaria são consideradas como elementos não estruturais e por essa razão a sua influência é vulgarmente desprezada no dimensionamento e verificação da segurança de edifícios.

A resposta global dos edifícios face a acções verticais não é afectada significativamente com a consideração ou não dos painéis de alvenaria. No entanto, o mesmo não é verdade quando se trata de acções horizontais cíclicas, como as induzidas por sismos. Para cargas horizontais, os painéis de alvenaria podem modificar drasticamente a resposta das estruturas, atraindo forças para elementos estruturais que não foram dimensionados para lhes resistir [3].

2. INFLUÊNCIA DOS PAINÉIS DE ALVENARIA NO COMPORTAMENTO SÍSMICO DE EDIFÍCIOS

É incorrecto assumir que os painéis de alvenaria são sempre benéficos para a resposta global das estruturas de edifícios. A contribuição dos painéis na resposta sísmica dos edifícios pode ser positiva ou negativa, dependendo de um elevado número de parâmetros, como, por exemplo, a rigidez e resistência relativa entre os pilares e o painel de alvenaria [4].

Muitos exemplos de danos severos e colapsos de edifícios podem ser atribuídos à modificação da resposta estrutural induzida pelo efeito dos painéis de alvenaria não estrutural, tal como tem sido observado em sismos recentes (por exemplo: Izmit, Turquia, 1999). Mesmo a alvenaria de relativa fraca resistência pode modificar significativamente a resposta global dos edifícios (Figura 1).



Figura 1 – Danos em edifícios associados à participação dos painéis de alvenaria [5]

3. MODELO PROPOSTO PARA SIMULAÇÃO DE PAINÉIS DE ALVENARIA

Os modelos para simular o comportamento dos painéis de alvenaria podem ser classificados como micro e macro-modelos. A utilização de micro-modelos implica a definição detalhada dos vários elementos constituintes dos painéis de alvenaria, como: tijolo, junta e interface tijolo-junta. Com a utilização deste tipo de modelos obtém-se representações mais reais e detalhadas do comportamento do painel. No entanto, o esforço de cálculo associado e o elevado número de parâmetros para a sua caracterização tornam este género de modelos difíceis de serem utilizados na análise da segurança de edifícios. Estes micro-modelos podem ser bastante úteis em análises locais ou como ferramenta de calibração de modelos globais, mas não práticos para análises complexas, como de edifícios completos.

Os macro-modelos são mais simplificados e permitem uma representação global do comportamento do painel de alvenaria e da sua influência na resposta estrutural dos edifícios [12]. De todos os macro-modelos desenvolvidos o mais conhecido é o modelo da dupla biela diagonal equivalente. Existem muitos outros macro-modelos, de entre os quais destacam-se: *i)* consideração das secções homogeneizadas [6]; *ii)* teoria da plasticidade [7]; *iii)* coeficientes de comportamento [8], entre outros.

O modelo proposto neste artigo é baseado no modelo da dupla biela diagonal equivalente, mas com significativas melhorias relativamente ao modelo clássico. Uma das grandes vantagens do modelo proposto relativamente ao modelo tradicional da dupla biela equivalente reside na consideração da interacção do comportamento do painel nas duas direcções.

Para representar cada painel de alvenaria são consideradas: quatro bielas rígidas com comportamento linear de suporte de um quinto elemento central em que é concentrado todo o comportamento não-linear histerético do painel (Figura 2-a).

O comportamento não-linear é caracterizado por uma curva multi-linear envolvente, representada na Figura 2-b, definida por nove parâmetros em cada direcção (representado: fendilhação, resistência de pico, decaimento da rigidez pós-pico e resistência residual), o que torna possível a definição de curvas não-simétricas. O comportamento histerético dos painéis de alvenaria é caracterizado, para além da curva de comportamento não-linear, por três parâmetros adicionais: α – degradação de rigidez; β – efeito de ‘pinching’; e, γ – degradação de resistência.

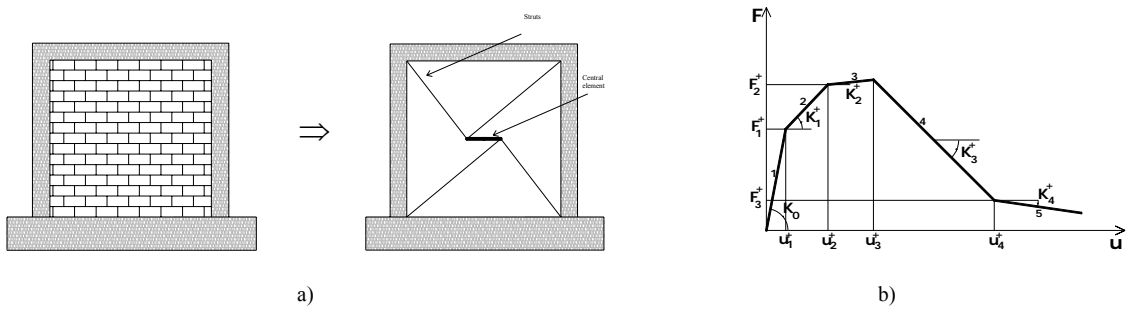


Figura 2 – Modelo global da alvenaria: a) macro-modelo; b) curva de comportamento monotônico

4. COMPORTAMENTO HISTERÉTICO DOS PAINÉIS DE ALVENARIA

O comportamento não-linear do elemento central é caracterizado por regras universais, baseadas no modelo de Takeda [9, 10], refletindo a resposta à história de carga e dependente da lei de comportamento material considerada. As regras de histerese são apresentadas de seguida e exemplificadas na Figura 3.

Regras de recarga: A rigidez de recarga depende da força e deslocamento máximos obtidos no ciclo anterior (F_{max} e D_{max}). A recarga inicia-se no ponto correspondente à força nula (D_r), e a sua rigidez é definida pela expressão 1:

$$K_r = \frac{F_{max}}{D_{max} - D_r} \quad (1)$$

Regras de descarga: Uma descarga ocorre quando existe uma inversão da força. A rigidez de descarga (K_d) depende do deslocamento máximo ocorrido nesse sentido. Antes de ser atingido o ponto de cedência, a rigidez de descarga será igual à rigidez inicial (K_0). Se o deslocamento máximo atingido for maior que o correspondente à cedência, mas inferior a D_{cr} (deslocamento de pico), então a rigidez de descarga (K_d) será dependente do parâmetro α , e do máximo deslocamento atingido nesse ciclo, definido por:

$$K_d = \frac{F_{cr} - \alpha \cdot F_y}{K_0 \cdot D_{cr} + \alpha \cdot F_y} \cdot K_0 \quad (2)$$

Se o deslocamento máximo atingido for superior ao D_{cr} , a rigidez de descarga (K_d) será sempre constante e dependente apenas do parâmetro α . A rigidez de descarga é dada pela equação 3:

$$K_d = \frac{F_{cr} - \alpha \cdot F_y}{D_{cr} \cdot K_0 - \frac{\alpha \cdot F_y}{K_0}} \cdot K_0 \quad (3)$$

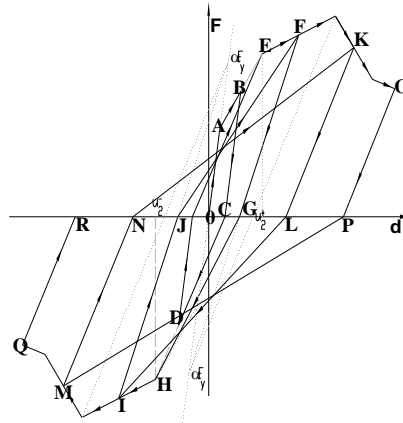


Figura 3 – Regras de histerese do modelo implementado

Efeito de ‘pinching’: Este efeito simula o refechação das fendas nos painéis de alvenaria nos ramos de descarga-recarga. O efeito de pinching é obtido dividindo o caminho da recarga em dois ramos de diferente rigidez, Figura 4. O efeito de pinching é controlado através do parâmetro β , dependendo também do deslocamento máximo atingido anteriormente (expressão 4).

$$K = \frac{F_{\max}}{D_{\max} - D_r} \cdot \left(\frac{D_y}{D_{\max}} \right)^\beta \quad (4)$$

em que: D_r é o deslocamento correspondente à força nula no ciclo anterior; e, D_y é o deslocamento de cedência.

Degradação de rigidez: A degradação de rigidez, é controlada através do parâmetro α , na expressão 2.

Degradação de resistência: Este efeito representa a degradação de resistência para diferentes níveis de deslocamentos cíclicos. No modelo implementado foi introduzida uma melhoria, em relação a outros modelos, na consideração da degradação de rigidez, considerando a influência do nível de degradação de uma direcção sobre a outra. A degradação de resistência é dada pelas seguintes expressões (ver também Figura 5):

$$\gamma = c \cdot \sum_{i=1}^N \frac{D_i}{D_f} \quad (5)$$

$$D_f = D_y \cdot \mu \quad (6)$$

$$PD_i = \frac{e^{n\gamma} - 1}{e^n - 1} \cdot \left(1 - \frac{PD_2}{\zeta} \right) \quad (7)$$

em que: PD_i é o factor de degradação na direcção i ; D_i é o deslocamento máximo atingido no ciclo i ; D_y é o deslocamento de cedência; μ , c , n e ζ são parâmetros constantes calibrados através de resultados experimentais.

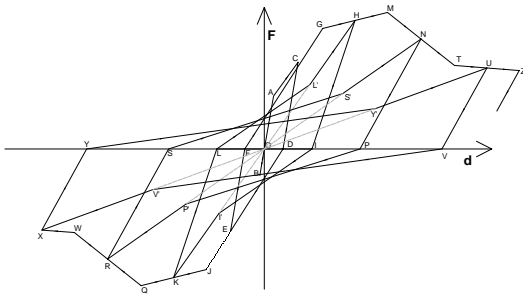


Figura 4 – Efeito de ‘pinching’

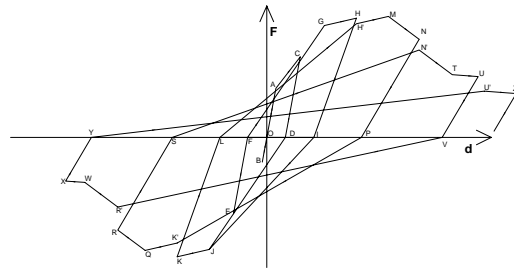


Figura 5 – Degradação de resistência

Ciclos internos: Quando ocorre uma inversão do sentido de carregamento antes de ser atingida a força e o deslocamento máximo atingido no ciclo anterior, o modelo proposto reproduz os chamados ciclos internos, com todos os efeitos descritos anteriormente.

5. CALIBRAÇÃO DO MODELO PROPOSTO

O macro-modelo implementado para a simulação dos painéis de alvenaria foi calibrado com resultados de ensaios experimentais cíclicos realizados por Pires [11]. O modelo ensaiado é um pórtico com um piso e um único vão, construído à escala 2:3. Foram aplicadas cargas verticais nos pilares, para simular as cargas estáticas, e foi imposta uma lei de deslocamentos cíclicos horizontais (ver Figura 6).

As propriedades dos materiais utilizadas no modelo (elementos de betão armado e painel de alvenaria) foram calibradas com os resultados experimentais de ensaios sobre os materiais utilizados. Uma descrição detalhada dos materiais, geometria, cargas aplicadas e esquema do ensaio pode ser encontrada em [11].

Os elementos de betão armado (pilares e vigas) foram simulados com um modelo global de secção, gerado a partir de um modelo de fibras ao nível da secção, por Varum [3]. O painel de alvenaria foi simulado com o modelo proposto.

Os resultados obtidos com este modelo numérico representam com boa aproximação a resposta experimental, tal como pode ser observado na Figura 7.

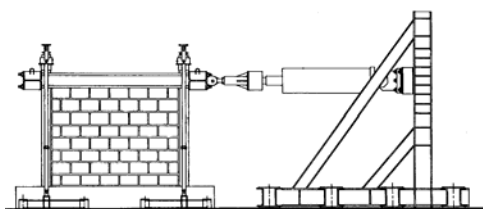


Figura 6 – Esquema geral do ensaio [11]

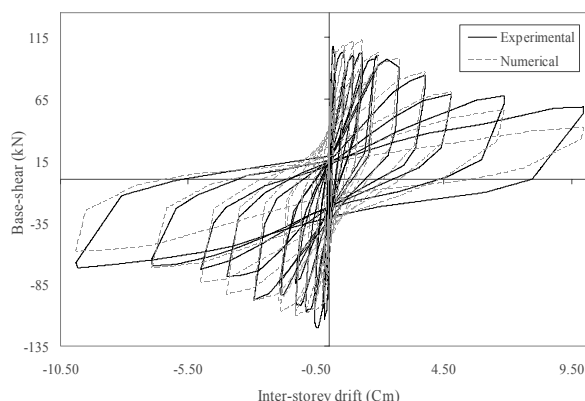


Figura 7 – Corte basal versus drift

6. CONCLUSÕES

- A alvenaria é um material compósito. A sua resposta a solicitações horizontais é muito complexa e dependente de inúmeros factores, tais como: propriedades dos materiais (tijolo, reboco, juntas), qualidade de mão-de-obra, geometria, ligação entre o painel e o pórtico envolvente, entre outras. O desenvolvimento de modelos numéricos não-lineares globais e o aumento das capacidades computacionais torna viável a consideração da influência dos painéis de alvenaria no dimensionamento e verificação de segurança de estruturas de edifícios.
- A influência dos painéis de alvenaria na resposta de estruturas sujeitas a cargas horizontais, como os sismos, pode ser simulada com recurso a macro-modelos simples, como o apresentado. A calibração do modelo, feita com os resultados do ensaio experimental, demonstrou a capacidade deste modelo global.
- Uma campanha de ensaios mais exaustiva ajudaria a compreender melhor o efeito dos painéis de alvenaria em estruturas de edifícios de betão armado, bem como na calibração de modelos globais, como o modelo proposto, para aplicação prática no dimensionamento e verificação de segurança das estruturas.

REFERÊNCIAS

- [1] H. Rodrigues, H. Varum, A.G. Costa e X. Romão, *Interface Gráfico para Análise Não-Linear de Pórticos Planos Sujeitos a Cargas Dinâmicas e/ou Estáticas*, Congresso de Métodos Computacionais em Engenharia, CMCE 2004, LNEC, Lisboa, (2004).
- [2] H. Varum, *Modelo Numérico para a Análise de Pórticos Planos de Betão Armado*,

- Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, FEUP, (1996).
- [3] T. Paulay e M. Priestley, *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings* John Wiley & Sons, INC. ISBN: 0-471-54915-0, (1992).
- [4] L. Decanini, F. Mollaioli, A. Mura e R. Saragoni, *Seismic Performance of Masonry Infilled R/C Frames*, Proc 13th World Conference on Earthquake Engineering, Canada, (2004).
- [5] H. Varum, *Seismic Assessment, Strengthening and Repair of Existing Buildings*, Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, (2003).
- [6] T.C. Liaw and S.W. Lee, *On the Behaviour and the Analysis of Multi-Storey Infilled Frames Subject to Lateral Loading*, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Vol. 63, Part 2, (1977).
- [7] R.H. Wood, *Plasticity, Composite Action and Collapse Design of Unreinforced Shear Wall Panels in Frames*, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part 2, Vol. 65, pp. 381-411, (1978).
- [8] R.T. Duarte e A. Campos-Costa, *Earthquake Behaviour of Reinforced Concrete Frames Structures Infilled with Masonry Panels*, Report, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal, (1988).
- [9] T. Takeda, M.A. Sozen e N.N. Nielsen, *Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes*, Journal Structural Division, ASCE, Vol. 36, No. ST12, (1970).
- [10] A.G. Costa, *Análise Sísmica de Estruturas Irregulares*, Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil, FEUP, (1989).
- [11] F. Pires, *Influência das Paredes de Alvenaria no comportamento de Estruturas Reticuladas de Betão Armado Sujeitas a Acções Horizontais*, LNEC, Lisboa, (1990).
- [12] D. C. Oliveira, *Comportamento de Pórticos de Betão Armado Preenchidos com Paredes de Alvenaria*, Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, FEUP, (1995).