

# Análise de estruturas de alvenaria

## Os modelos numéricos de blocos discretos

Os modelos numéricos (ou modelos matemáticos), que resultam da implementação computacional de um dado modelo conceptual, são instrumentos poderosos de análise estrutural, uma vez validados face ao conhecimento experimental.

Os problemas da conservação e reabilitação do património edificado têm motivado o desenvolvimento de estudos de investigação em diversos domínios, dado o seu carácter claramente multi-disciplinar. Entre as atribuições da engenharia de estruturas destaca-se a avaliação da segurança, que, no caso de construções antigas de alvenaria, constitui um problema complexo e difícil. De um modo geral, há pouca informação sobre as antigas técnicas de construção e as alterações posteriores das estruturas, e sobre o comportamento dos materiais e o seu estado presente. A própria estrutura pode assumir um valor histórico, como é o caso dos edifícios pombalinos, sendo de interesse preservar a sua integridade. A selecção das opções mais convenientes para uma intervenção exige a correcta compreensão do funcionamento estrutural, que deve ser baseada num modelo conceptual apoiado em estudos de caracterização e monitorização.

Os modelos conceptuais e os métodos de análise aplicados habitualmente no projecto de estruturas modernas de betão ou aço não são adequados para construções antigas de cantaria ou alvenaria de pedra. No essencial, estas estruturas são formadas por componentes de materiais de baixa resistên-

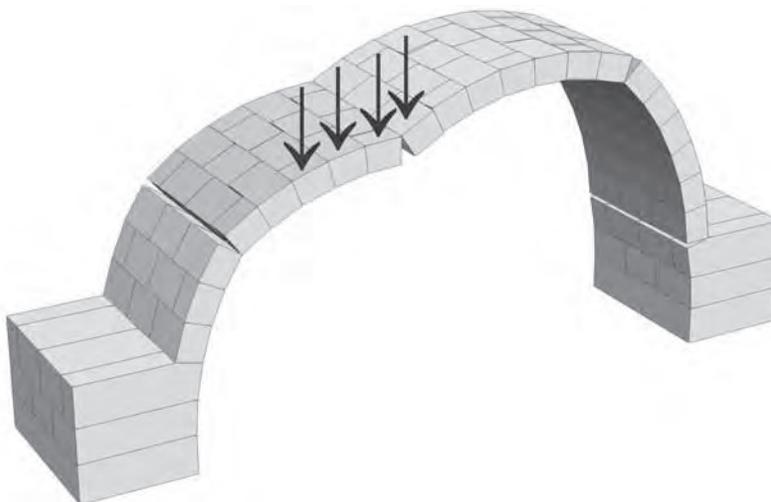


Fig. 1 – Modelo numérico de blocos discretos: ruptura de um arco circular

cia à tracção, que pode ser muito baixa ou nula nas juntas entre blocos, o que lhes confere um comportamento mecânico que se afasta das hipóteses usuais de continuidade e linearidade a partir de cargas relativamente baixas, e as torna manifestamente vulneráveis a acções sísmicas.

Os modelos numéricos (ou modelos matemáticos), que resultam da implementação computacional de um dado modelo conceptual, são instrumentos poderosos de análise estrutural, uma vez validados face ao conhecimento experimental. Permitem, nomeadamente, testar hipóteses sobre o funcio-

namento de uma estrutura concreta, estimar a influência dos vários factores na sua segurança e comparar o desempenho de estratégias alternativas de intervenção, por exemplo, para o caso de um sismo.

### MODELOS NUMÉRICOS DE ELEMENTOS DISCRETOS

Os denominados modelos de elementos discretos (ou de blocos discretos), que se enquadram na família dos modelos numéricos de elementos finitos, foram desenvolvidos para a análise de estruturas constituídas por blocos ou partículas, em que os processos de

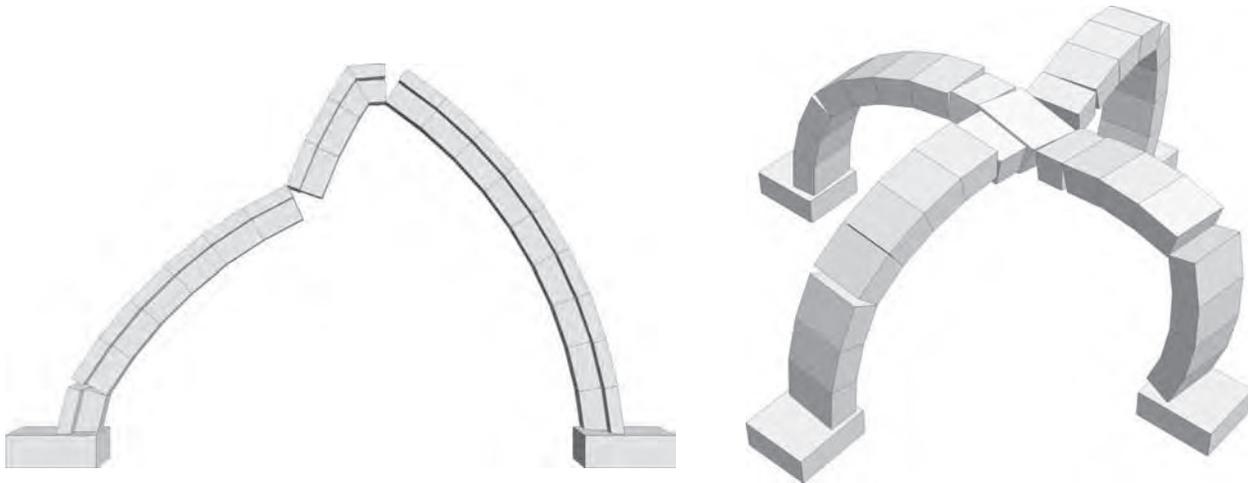


Fig. 2 – Mecanismos de colapso de arcos

ruptura se caracterizam predominantemente pela separação progressiva das várias componentes. É este facto que torna esta abordagem apropriada para o estudo de estruturas de alvenaria de pedra. Na realidade, existem muitas estruturas históricas formadas por blocos de resistência apreciável, pelo que a sua deformação e colapso se caracterizam pela abertura ou deslizamento nas juntas. Casos típicos são os arcos de blocos de pedra: os modelos de elementos discretos permitem reproduzir o conhecido mecanismo de quatro rótulas de um arco circular (Fig. 1) e modos de colapso mais complexos (Fig. 2). As paredes envolventes dos arcos poderiam igualmente ser incluídas, sendo hoje em dia viável analisar sistemas de centenas de blo-

cos em tempos de cálculo razoáveis. Os blocos podem ser admitidos como rígidos ou com deformabilidade interna, no caso de materiais menos resistentes. O aspecto essencial é a correcta representação do contacto entre blocos, para as várias situações de juntas secas e argamassadas. A resposta da estrutura a um sismo é obtida por uma análise dinâmica passo a passo no domínio do tempo, em que se considera a alteração da geometria no decurso da deformação e colapso.

#### APLICAÇÃO EM ANÁLISES SÍSMICAS

A aplicação de modelos numéricos em engenharia requer estudos prévios de

teste e validação, que se baseiam no confronto com resultados de ensaios em laboratório e com a resposta observada nas próprias obras. O desempenho dos modelos de elementos discretos foi avaliado no quadro de um projecto de investigação sobre o comportamento sísmico de monumentos clássicos que envolveu a Universidade de Atenas e o LNEC. Este projecto incidiu sobre estruturas do tipo coluna-arquitraive, em particular, o caso do Parthenon, tendo sido ensaiado na mesa sísmica de Atenas um modelo à escala 1:3 de uma coluna de tambores de mármore (Fig. 5). Os modelos numéricos de elementos discretos demonstraram a capacidade de representar os tipos de resposta dinâmica de grande complexidade observados nos ensaios. A figura mostra a modelação do colapso de uma coluna, com expressiva rotação dos tambores.

Os modelos numéricos possibilitaram um conjunto de simulações de difícil realização experimental, em especial o estudo da segurança sísmica de uma proposta de restauro de três colunas do Pronaos do Parthenon, por detrás das colunas exteriores da fachada nascente. O modelo numérico simplificado permitiu a análise da resposta dinâmica para vários níveis de acção sísmica, até ao colapso que ocorre para acelerações elevadas (Fig. 3). Um dos objectivos era a avaliação do papel dos elementos metálicos existentes na estrutura original, ligando as arquitraves entre si e ao ábaco das colunas, e

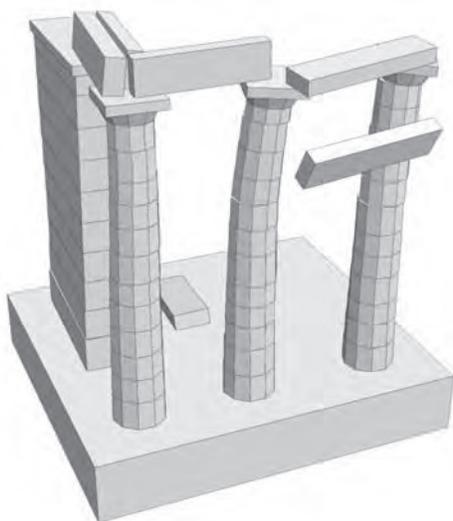


Fig. 3 – Análise do Pronaos do Parthenon sob acção sísmica muito intensa



Fig. 4 – Modelo numérico da Torre do Relógio, Horta

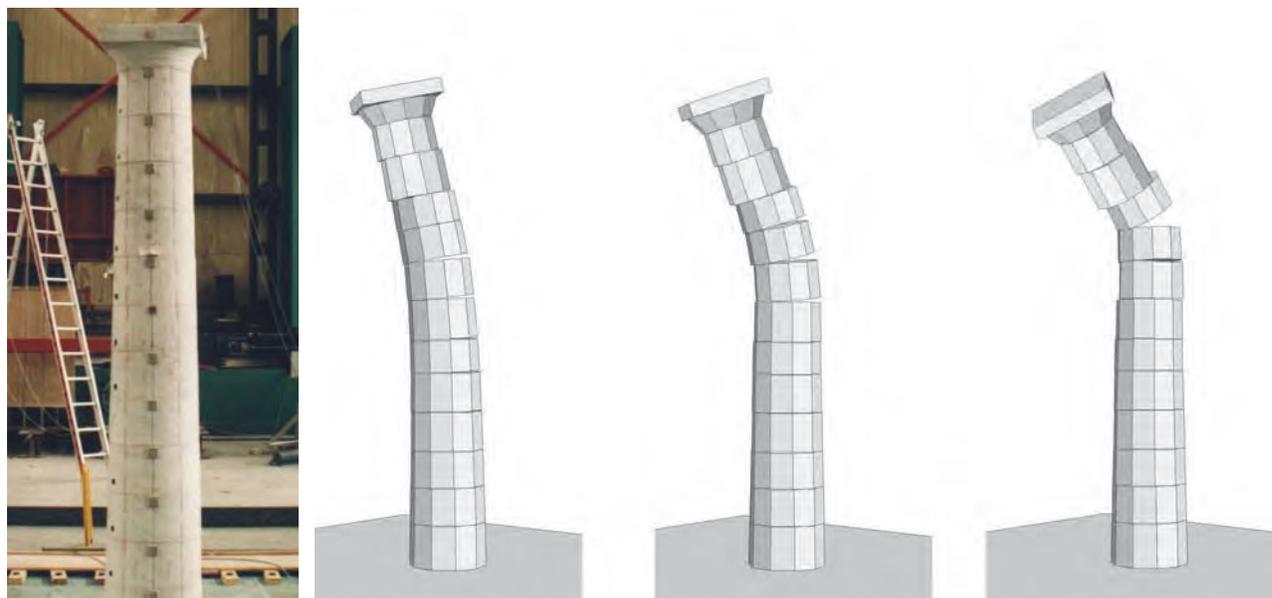


Fig. 5 - Modelo físico de coluna de tambores e simulação numérica do colapso sob ação sísmica

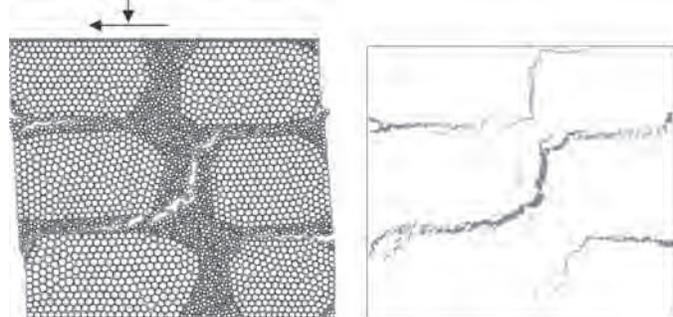


Fig. 6 - Modelo de partículas: análise da ruptura de um segmento de parede de alvenaria

que desapareceram com o tempo. O projecto de restauro prevê a inserção de novos elementos de titânio nas cavidades originais, tendo os cálculos permitido confirmar o seu contributo essencial para a estabilidade das arquivadas.

Os modelos de blocos também se aplicam a estruturas de natureza mais complexa. No âmbito da colaboração entre o LNEC e o IST, foram analisadas construções danificadas pelo sismo dos Açores de 1998, como a Torre do Relógio, na Horta (Fig. 4). A modelação destas estruturas de maior dimensão e complexidade exige um nível mais elevado de idealização e simplificação. Já não é possível reproduzir cada um dos blocos reais, como no caso do Partenon, devendo os modelos numéricos concentrar-se nos aspectos essenciais que regem o comportamento, suprimindo muitos pormenores.

#### PERSPECTIVAS DE DESENVOLVIMENTO

Os modelos de blocos discretos ultrapassaram já o âmbito restrito da investigação para começarem a ser aplicados na prática. Existe um outro tipo de modelos de elementos discretos, os modelos de partículas, com um grande potencial para a investigação de alvenarias irregulares. Nestes modelos, já aplicados à mecânica da fractura de rocha e betão, o material é representado por um agregado de partículas circulares, geradas aleatoriamente num dado domínio. As partículas têm ligações entre si com resistência à tracção e ao corte, cuja ruptura progressiva permite simular o processo de fissuração e desagregação do material. A Fig. 6 mostra um modelo de um pequeno segmento de uma parede de alvenaria, sob a acção de cargas verticais e horizontais. As pedras são re-

presentadas por conjuntos de partículas circulares e a argamassa por partículas mais pequenas, comportando-se as ligações de acordo com as propriedades de cada material e interface. Como se vê na figura, a progressão das fissuras segue preferencialmente os caminhos de menor resistência. Trata-se ainda de uma ferramenta de investigação da fenomenologia fundamental, com bastante interesse para apoiar a interpretação de ensaios em laboratório.

Existe hoje um conjunto de métodos de análise estrutural especialmente vocacionados para o estudo de alvenarias. Os modelos de blocos e partículas discretos são mais uma ferramenta disponível, com novas potencialidades e domínios de emprego específicos. A aplicação criteriosa destes métodos, sempre em confronto com o conhecimento facultado pela experiência, vai permitir o seu progressivo aperfeiçoamento, com vista a uma melhor representação do comportamento real das estruturas históricas.

J. VIEIRA DE LEMOS,  
Engenheiro Civil,  
Investigador-Coordenador do LNEC