

Os modelos de elementos discretos em geomecânica – evolução e perspectivas futuras

Discrete element models in geomechanics – Evolution and future trends

J. Vieira de Lemos*

RESUMO – O desenvolvimento dos modelos de elementos discretos, baseados em idealizações de meio descontínuo, tem permitido a abordagem de um conjunto alargado de problemas geomecânicos. Neste artigo, apresenta-se uma visão global do estado actual e das potencialidades destas técnicas de modelação numérica. Discutem-se, sumariamente, alguns dos principais tópicos de formulação e implementação que as caracterizam. Referem-se um conjunto de trabalhos recentes no âmbito da mecânica dos solos e da mecânica das rochas, incluindo problemas de fractura, que ilustram as capacidades presentes dos elementos discretos. Finalmente, analisam-se algumas linhas de evolução futura, quer numa perspectiva de investigação, quer no sentido da sua aplicação a problemas geotécnicos.

SYNOPSIS – The development of discrete element models, based on discontinuum idealisations, has allowed the treatment of a wide class of geomechanical problems. In the paper, the state-of-the-art of these numerical modelling techniques is presented. The main formulation and implementation topics are briefly discussed, and recent works in soil and rock mechanics, including fracture analysis, are presented to illustrate the current capabilities of discrete elements. Finally, future trends are discussed, both from a research point of view, and in terms of their application to geotechnical problems.

* Investigador-
Coordenador, LNEC, Lisboa,
E-mail: vlemos@lnec.pt

Palavras-chave – Modelos numéricos; elementos discretos; ruptura; fractura.

1 - INTRODUÇÃO

A análise dos estados de tensão e deformação em meios geológicos baseou-se inicialmente nos conceitos da mecânica dos meios contínuos, em particular na teoria da elasticidade e, numa fase posterior, na teoria das plasticidade. Efectivamente, a idealização dos maciços como meios contínuos é uma aproximação perfeitamente satisfatória na maioria dos problemas de mecânica dos solos e em muitos problemas de mecânica das rochas. Um caso típico em que tal idealização não se justifica é a estabilidade de taludes em maciços rochosos diaclasados, onde a experiência demonstrou que, em regra, são as descontinuidades que condicionam os modos de ruptura, e que a deformação interna dos blocos pouco influencia o comportamento. Esta constatação levou à aplicação dos métodos de equilíbrio limite a este tipo de problema, os quais se enquadram numa visão conceptual do maciço rochoso como um conjunto de corpos independentes em interacção mecânica.

Este modelo conceptual de meio descontínuo foi explorado por diversos autores, sendo de destacar a contribuição de Trollope (1968), por ele designada como "clastic mechanics". Os métodos baseados em soluções analíticas têm, contudo, limitações evidentes, pois apenas permitem o estudo de casos elementares, e obrigam a hipóteses simplificativas sempre discutíveis. Do ponto de vista qualitativo, no entanto, a consideração da natureza descontínua dos geo-materiais possibilita a apreensão dos fenómenos essenciais que regem o comportamento de solos e rochas, de que é exemplo o trabalho de Nascimento e Teixeira (1972) sobre os mecanismos elementares de atrito.

O desenvolvimento do método dos elementos finitos tornou possível a análise de problemas geomecânicos complexos, tendo inicialmente mantido o paradigma de meio contínuo. A introdução do elemento de junta por Goodman et al. (1968) deu resposta à necessidade de representar superfícies de descontinuidade e interfaces entre materiais, bem como os comportamentos não elásticos que normalmente as caracterizam. Estes modelos numéricos de meio descontínuo retiveram os pressupostos do método dos elementos finitos habituais nessa época, nomeadamente a inalterabilidade da conectividade dos elementos componentes do sistema, a hipótese de pequenos deslocamentos, e a solução matricial iterativa para problemas não lineares.

A proposta inovadora de Cundall (1971) de um método de análise de sistemas de blocos rígidos, que mais tarde seria designado por método dos elementos discretos (ou distintos), permitiu integrar os modelos conceptuais clássicos da mecânica das rochas e as novas técnicas de simulação numérica. O recurso a um algoritmo de integração das equações

do movimento dos blocos possibilitou a abordagem de problemas muito mais complexos do que era então permitido pelos métodos de equilíbrio limite. Criou também a possibilidade de ter em conta alterações progressivas da geometria do sistema e fenómenos de separação total de blocos no decurso das simulações, como é exemplificado pelo caso de rotura por derrube ("toppling") de um talude rochoso (Figura 1), já tratado nesse trabalho de 1971.

Da mecânica das rochas, os modelos de elementos discretos evoluíram para outras aplicações, tais como a análise micro-mecânica de meios granulares, a fractura de geo-materiais e muitos outros problemas de sistemas descontínuos. Neste artigo, discutem-se, em primeiro lugar, alguns aspectos fundamentais destes modelos, que sustentam o seu potencial de aplicação e condicionam o seu desempenho. Em seguida, referem-se alguns trabalhos recentes que exemplificam as suas possibilidades actuais, e apontam-se perspectivas de desenvolvimento futuro.

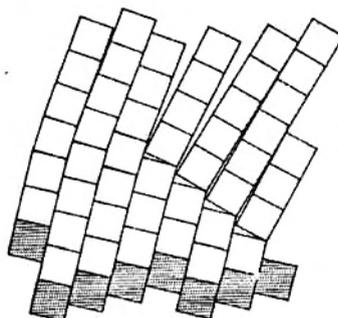


Fig. 1 – Modelo original de blocos rígidos de Cundall (1971).

2 - FUNDAMENTOS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS

A família de modelos numéricos hoje designados por elementos discretos (ou distintos) teve como ponto de partida o modelo de blocos rígidos proposto por Cundall em 1971. O objectivo principal desse trabalho pioneiro foi criar uma ferramenta de análise com potencialidades que, à data, não existiam no método dos elementos finitos ou nos métodos de equilíbrio limite. Em primeiro lugar, o novo modelo destinava-se expressamente ao estudo de cenários de ruptura, à avaliação da capacidade última de sistemas geomecânicos. Os modos de ruptura a considerar deveriam incluir o deslizamento e abertura de descontinuidades, permitindo simular a separação total dos blocos, e entrando inclusivamente no regime de grandes deslocamentos. A Figura 2 ilustra a complexidade dos sistemas que é possível analisar actualmente com estes métodos.

Para atingir os objectivos referidos, Cundall abandonou os métodos de solução matricial, comuns nos programas de elementos finitos, optando por um algoritmo de integração no tempo das equações do movimento de cada bloco por diferenças finitas. Para a maioria dos problemas, a escala de tempos é uma escala fictícia, uma vez que se pretende apenas a simulação sequencial das diversas fases do mecanismo de ruptura e não uma análise dinâmica real, embora esta também seja possível.

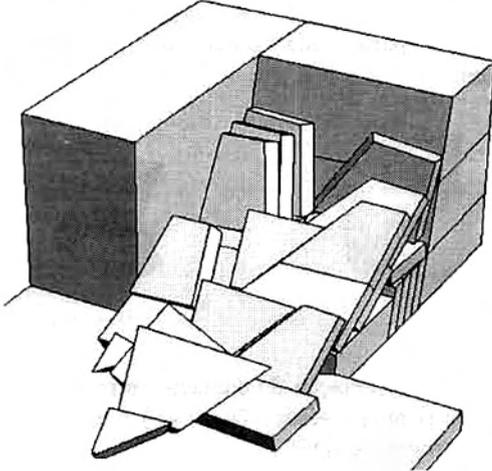


Fig. 2 - Exemplo de modelação do colapso progressivo de um sistema de blocos.

O desenvolvimento dos modelos de elementos discretos tem sido levado a cabo por grupos de investigação com objectivos e campos de actividade muito diversos, pelo que não existe uma formulação única. Nos pontos seguintes, são analisados alguns dos aspectos fundamentais partilhados por esta família de métodos, nomeadamente algumas das questões de representação numérica que os distinguem dos elementos finitos. Uma discussão mais detalhada, incluindo a formulação matemática, encontra-se, por exemplo, em Lemos (1999a).

2.1 - Representação dos blocos e partículas

O modelo de Cundall de 1971 era baseado na hipótese de representação dos blocos como corpos rígidos. Estando o modelo vocacionado para o estudo de mecanismos de ruptura definidos por descontinuidades, em situações de tensões relativamente baixas, esta simplificação é perfeitamente aceitável, e elimina a necessidade de análise de tensões no interior de cada bloco. Posteriormente, o programa UDEC (Itasca, 1996), iniciado por Cundall em 1980, introduziu os blocos deformáveis, disponibilizando duas formulações possíveis: uma representação simplificada, em que se admite um estado de tensão uniforme no interior de cada bloco, e uma formulação geral, em que cada

bloco é discretizado numa malha interna de elementos finitos (Figura 3).

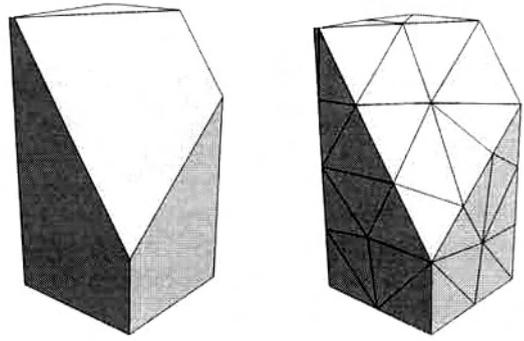


Fig. 3 - Bloco rígido de faces poligonais e bloco deformável com malha interna de tetraedros e faces triangulares.

A experiência mostrou que a formulação simplificada não traz grandes vantagens em relação à hipótese de bloco rígido, uma vez que apenas permite modos de deformação elementares, e a sua prática não se generalizou. A divisão de um bloco em elementos finitos é a opção mais utilizada hoje em dia. Verifica-se que a análise estática de um modelo de blocos deformáveis com uma malha larga não é, em termos computacionais, muito mais pesada do que uma análise de blocos rígidos, pelo que aquela é habitualmente preferida. No entanto, na análise dinâmica, em especial de problemas tridimensionais, os tempos de cálculo ainda podem ser excessivos, sendo os modelos de blocos rígidos uma opção indispensável em certas situações.

A utilização de blocos discretizados em elementos finitos corresponde a uma aproximação entre os dois métodos, que se tem acentuado, esbatendo a oposição inicial. Na maioria dos programas de elementos discretos é dada preferência a elementos simples, triângulos em 2D e tetraedros em 3D, com funções de interpolação lineares, o que facilita as tarefas de detecção e actualização dos contactos, uma vez que a fronteira dos blocos permanece definida por segmentos rectos (em 2D) ou facetas planas (em 3D). No entanto, existem aplicações, por exemplo, as fundações de barragens abóbada, referidas adiante, em que elementos mais complexos são uma melhor alternativa.

O artigo de Cundall e Strack (1979) avança com uma variante do método dos elementos discretos que veio a alcançar uma grande expansão: os modelos de partículas circulares (Figura 4). Posteriormente, foram também desenvolvidos modelos em 3D, com partículas esféricas. Os modelos de partículas baseiam-se na hipótese de que estas são rígidas, devendo-se toda a deformação do sistema aos movimentos relativos entre partículas. O principal campo de aplicação dos modelos originais era a análise micro-mecânica de meios granulares.

Actualmente, recorre-se a este tipo de modelos para a representação de outros geo-materiais, tais como a rocha ou o betão, como será referido na secção de aplicações.

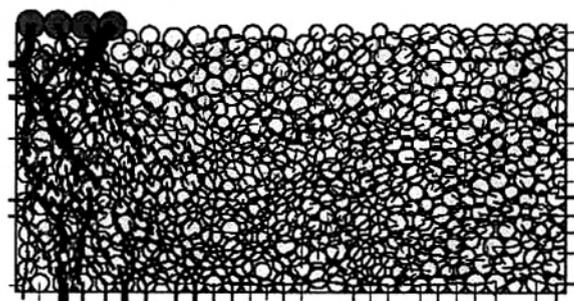


Fig. 4 - Modelo de partículas circulares. Distribuição de forças de contacto induzidas por carga aplicada à superfície.

2.2 - Representação do contacto

A mecânica do contacto tem suscitado uma atenção crescente em diversos domínios de engenharia que lidam com o comportamento de interfaces e da interacção entre componentes ou materiais. Formulações matemáticas rigorosas do problema têm sido propostas e implementadas em diversos tipos de algoritmos computacionais (e.g., Martins e Klarbring, 1999). Este tipo de abordagem rigorosa só é possível normalmente para hipóteses constitutivas simples, tais como as de contacto unilateral e atrito de Coulomb. Nos modelos de elementos discretos opta-se por uma representação simplificada do contacto, em regra baseada na hipótese de contacto pontual, mas admitem-se modelos constitutivos mais complexos, tais como os modelos empíricos desenvolvidos para as diaclases rochosas.

A hipótese de contacto pontual, adoptada pela maioria dos modelos de elementos discretos, corresponde à representação da interacção entre dois blocos por um conjunto de pontos de contacto através dos quais se transmitem as forças de interacção. Nesta hipótese, admite-se que a força de interacção depende apenas do movimento relativo entre os blocos nesse ponto, sendo a relação entre forças (ou tensões) e deslocamentos relativos definida por um dado modelo constitutivo de contacto.

Os pontos de contacto podem corresponder a locais geométricos específicos, por exemplo, pontos de interacção entre um vértice e uma face ou entre duas arestas (Figura 5). Com base nestes contactos elementares, é possível simular as variadas situações de interacção que se observam na Figura 2. No caso de blocos deformáveis, haverá ainda contactos correspondentes aos pontos nodais da malha existentes nas faces (ver Figura 3).

Na versão original do programa 3DEC (Cundall, 1988; Hart et al., 1988), os contactos entre blocos rígidos e entre blocos deformáveis eram tratados de modo diverso, mas actualmente foi possível unificar as duas abordagens. Para tal as faces poligonais dos blocos rígidos são divididas em triângulos, tal como as faces dos blocos deformáveis, que têm uma malha interna de tetraedros. A diferença entre os dois tipos de deslocamentos no modo como são obtidos os deslocamentos no ponto de contacto, e, conversamente, na forma de aplicação das forças de contacto aos blocos. Os cálculos específicos efectuados para cada ponto de contacto são idênticos.

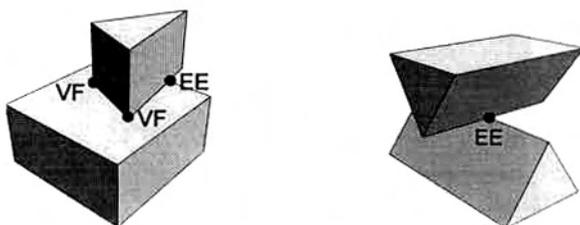


Fig. 5 - Representação do contacto entre blocos por contactos pontuais vértice-face (VF) e aresta-aresta (EE) no programa 3DEC.

Na Figura 6, ilustra-se a diferença entre a utilização de um elemento finito de junta e a representação da interacção mecânica por contactos pontuais, para o caso plano. O elemento de junta conduz, em regra, a uma melhor aproximação da distribuição de tensões, para um mesmo número de pontos na superfície de contacto. A hipótese de contactos pontuais é mais geral, facilitando a incorporação de grandes deslocamentos e de outros tipos de interacção (tais como vértice-lado), bem como a transição gradual entre eles. Tem ainda a vantagem de permitir malhas independentes nos dois blocos.

O cálculo dos parâmetros geométricos que governam a interacção entre blocos poligonais ou poliédricos, embora baseado em operações elementares, pode obrigar a tempos de cálculo significativos, caso seja necessária a sua repetição frequente. Em contrapartida, nos modelos de partículas estes cálculos são extremamente rápidos: dados os centros das duas partículas circulares ou esféricas, está imediatamente definida a direcção da normal ao contacto, sendo o deslocamento relativo obtido a partir da variação das distâncias entre os centros. Em consequência, é possível realizar simulações com número muito maior de partículas do que de blocos, pelo que aqueles modelos tendem a ter utilização mais generalizada. A facilidade de resolver o contacto entre arcos de círculo, e as vantagens de ter uma direcção normal definida univocamente e que varia gradualmente à medida que os blocos se movem, levou Cundall a introduzir

no programa UDEC a hipótese de vértices aproximados por arcos de círculo tangentes aos lados do polígono. O “pin-ball method” de Belytschko e Yeh (1993) igualmente tira partido da assimilação de uma face a um conjunto de esferas, no âmbito da modelação de problemas de impacto por elementos finitos.

É de referir que o problema da representação do contacto entre corpos tem merecido a atenção de investigadores em outras áreas. Por exemplo, a dinâmica de corpos múltiplos (e.g. Ambrósio *et al.*, 2002), no domínio da engenharia mecânica, tem muitos aspectos em comum com a metodologia dos elementos discretos, sendo as técnicas numéricas desenvolvidas susceptíveis de aplicação nos dois campos.

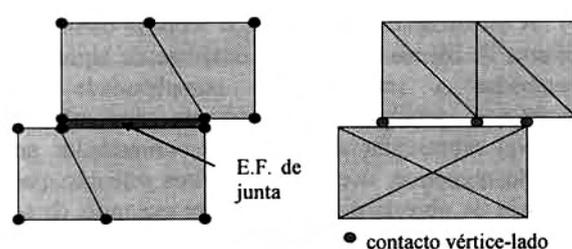


Fig. 6 – Representação do contacto por elementos finitos de junta e por contactos pontuais.

2.3 - Detecção e actualização do contacto

Para sistemas com alguma complexidade, ou com elevado número de corpos em interacção, a questão da detecção automática do contacto assume grande importância. Do ponto de vista formal, o problema consiste em operações geométricas elementares, essencialmente de determinação de distâncias entre objectos. No entanto, a dificuldade em programar um algoritmo computacional eficiente é significativa, uma vez que não é possível efectuar exaustivamente a verificação do eventual contacto para todos os pares de objectos, em especial em problemas de grandes deslocamentos, em que tal operação deve ser repetida ao longo de uma simulação. Existe já uma literatura considerável para este problema, que de um modo geral assenta no emprego de estruturas de dados adequadas à topologia do sistema, eliminando verificações desnecessárias e permitindo o acesso rápido à informação geométrica, na linha dos métodos desenvolvidos por Cundall (1988) para o programa 3DEC.

2.4 - Algoritmo de solução

Uma das características que distinguiu a abordagem numérica de Cundall para a análise de sistemas de blocos foi a adopção de um algoritmo explícito de solução. Neste aspecto, seguiu a prática

de muitos programas que resolviam problemas elásticos pelo método das diferenças finitas com recurso a técnicas iterativas para a solução dos sistemas de equações, por exemplo, o método de relaxação dinâmica (e.g. Otter *et al.*, 1966). O desenvolvimento dos computadores digitais na década de 60 levou à generalização dos métodos matriciais para a solução dos sistemas de equações, que foram adoptados pela maioria dos programas de elementos finitos, em prejuízo dos métodos iterativos. No caso de sistemas elásticos, os métodos matriciais são bastante eficientes, pelo menos até uma dada dimensão dos sistemas. No caso de cálculos não lineares, torna-se naturalmente necessário recorrer a processos iterativos ou incrementais, ou à sua combinação, pelo que não há superioridade clara sobre as técnicas de relaxação.

A opção pelo algoritmo de relaxação dinâmica, que se justifica em especial para cálculos não lineares, evita a formação de uma matriz de rigidez, sendo a solução obtida pela integração passo a passo das equações do movimento dos blocos rígidos, ou dos pontos nodais de blocos deformáveis. Este algoritmo permite obter soluções estáticas através da introdução de um amortecimento artificialmente elevado, que elimina o movimento vibratório e conduz à convergência para a solução estática, ou para um mecanismo de colapso no caso de o sistema entrar em ruptura. A escala de tempos em que decorre o processo passo a passo é uma escala sem significado físico. Naturalmente que se forem adoptados os valores reais de amortecimento, o mesmo algoritmo permite realizar cálculos dinâmicos, numa escala de tempos real. O esquema de operações realizadas em cada passo de cálculo está esquematizado na Figura 7.

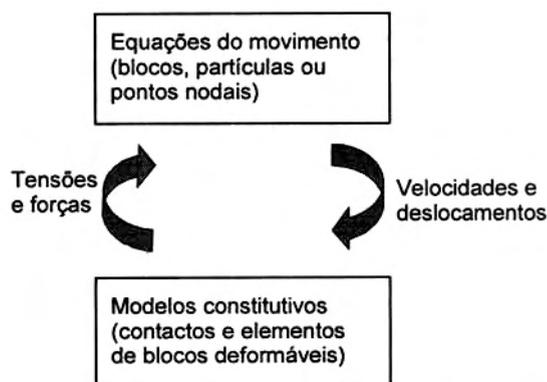


Fig. 7 – Ciclo de cálculo de um algoritmo explícito.

A maioria dos modelos de elementos discretos emprega um algoritmo de integração explícito, o método das diferenças centrais. Tem a vantagem de evitar resolver sistemas de equações em cada passo, mas é apenas condicionalmente estável, pelo que o passo de cálculo deve ser limitado para garantir a estabilidade numérica. Este passo de cálculo

depende essencialmente da rigidez dos elementos e das descontinuidades. Em análise dinâmica esta limitação pode ser severa, mas no caso de cálculos estáticos, uma vez que não se pretende a resposta dinâmica do sistema, estão disponíveis técnicas para melhorar a eficiência por alteração das massas inerciais (e.g. Underwood, 1983).

No caso de comportamento não linear acentuado, o algoritmo explícito de relaxação dinâmica tem grandes vantagens. Permite facilmente a inclusão de grandes deslocamentos, com actualização da geometria e da estrutura de contactos dos sistema. Permite também considerar o caso de blocos totalmente separados e outras situações em que uma matriz de rigidez não é bem definida.

3 - MODELOS DE BLOCOS

3.1 - Domínios de aplicação

Os modelos de blocos, baseados em elementos discretos poligonais ou poliédricos, tem sido predominantemente aplicados no domínio da mecânica das rochas. Por exemplo, trabalhos recentes têm incidido sobre representações elaboradas de explorações mineiras (e.g. Lorig e Calderón, 2002), estudos de fracturação progressiva de encostas rochosas naturais (e.g. Eberhardt *et al.*, 2003), problemas hidromecânicos e termo-hidromecânicos (e.g. Damjanac *et al.*, 1999), o bras subterrâneas, ou na análise de fundações de barragens (referidos adiante).

As estruturas de alvenaria de pedra constituem também um campo privilegiado para os modelos de blocos, de que é exemplo a análise de modos de deformação e ruptura de muros de suporte de alvenaria efectuada por Powrie *et al.* (2002) com o programa UDEC. Refira-se que, já fora do campo geotécnico, os modelos de blocos rígidos são uma excelente ferramenta para o estudo do comportamento sísmico da estruturas históricas de alvenaria, como o caso do arco ogival da Figura 8 (e.g. Lemos, 1998; Psycharis *et al.*, 2003).

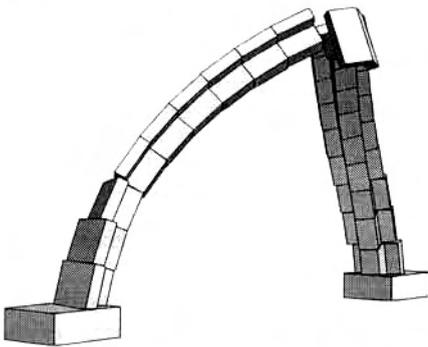


Fig. 8 – Modelo de arco de alvenaria de blocos de pedra. Colapso sob acção dinâmica.

É de salientar ainda o interesse destes modelos no âmbito da fractura de geo-materiais, tema abordado de forma integrada na secção respeitante aos modelos de particulas.

3.2 - Representação de maciços rochosos e geração de modelos numéricos

Existem domínios de aplicação dos modelos de elementos discretos poliédricos em que a definição da geometria do sistema de blocos não apresenta dificuldade, sendo possível estabelecer uma correspondência directa entre o bloco físico e a sua representação numérica, como é o caso das estruturas de alvenaria de blocos de pedra, já referidas. Em problemas geotécnicos, o problema de geração do modelo numérico exige uma reflexão mais elaborada.

A idealização de um maciço rochoso como um sistema de blocos implica um conjunto de hipóteses destinadas a simplificar a complexidade das formações geológicas. Obviamente que não é possível representar todas as descontinuidades no modelo numérico, o que implica uma selecção que depende do objectivo da análise, por exemplo, de se pretender calcular cargas de colapso, estimativas de deformação, padrões de escoamento da água nas fissuras, etc. Existem muitos problemas em que um modelo de contínuo equivalente continua a ser uma boa opção, e, quando se prefere um modelo de blocos, há vários níveis possíveis de pormenorização da compartimentação. Em muitos casos, é preferível utilizar vários modelos de uma dada obra, para obter tipos diversos de resultados, do que tentar gerar um modelo muito complexo que represente todas as facetas do problema. A metodologia de geração de modelos numéricos é um tema de investigação que continua a justificar atenção, com vista a uma aplicação mais correcta e eficaz das técnicas de modelação numérica a obras geotécnicas (Lemos, 1999a)

3.3 Estudo de fundações de barragens de betão

No âmbito dos estudos de segurança de barragens de betão, tem-se recorrido principalmente aos modelos de blocos no estudo de cenários de rotura envolvendo a fundação. No caso das barragens abóbada, há a necessidade de representar correctamente o comportamento à flexão da casca de betão, para o que foram desenvolvidos modelos híbridos, combinando elementos discretos e elementos finitos (Lemos, 1999b). Os blocos deformáveis, utilizados na representação do maciço, têm geralmente forma poliédrica e são discretizados internamente numa malha de tetraedros. No caso de estes elementos simples serem também aplicados na abóbada, seria necessário uma malha bastante fina para se obter uma boa aproximação das tensões de

flexão. A alternativa consiste em utilizar elementos de ordem superior na abóbada, por exemplo, elementos paralelepípedicos de 20 pontos nodais, enquanto que o maciço de fundação é representado pelos blocos poliédricos habituais. Há naturalmente que ter o cuidado de aproximar a superfície de fundação por facetas planas, de modo a que as duas geometrias sejam consistentes.

Um modelo híbrido deste tipo foi utilizado por Resende (2003), com base no programa 3DEC, num estudo da barragem de Alqueva em que se pretendeu entrar em consideração com a presença de uma falha geológica importante no maciço (Figura 9). Neste modelo, os blocos da barragens são discretizados em elementos finitos de 20 nós, incluindo-se também as juntas verticais de contracção da abóbada. Por seu lado, na fundação apenas se considerou uma superfície de descontinuidade correspondente à falha.

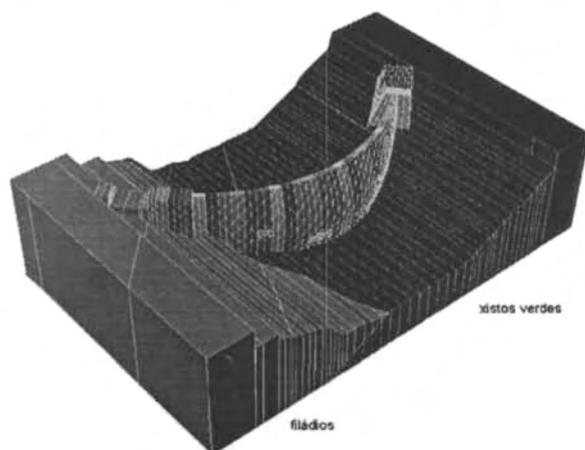


Fig. 9 – Modelo de elementos discretos da barragem de Alqueva (Resende, 2003).

Outro modelo da mesma obra foi desenvolvido por Gomes et al. (2003), com vista à análise de ensaios em modelo físico geomecânico em curso no LNEC (Figura 10). No modelo numérico, criado pelo mesmo programa de cálculo, foi adoptada uma representação mais detalhada da compartimentação do maciço, como um sistema de blocos definidos pelas principais famílias de descontinuidades.

Estes dois exemplos de modelação de uma obra através de idealizações diferentes evidenciam a necessidade prática de introduzir em cada modelo apenas os aspectos essenciais do cenário em estudo, evitando-se uma complexidade excessiva.

4 - MODELOS DE PARTÍCULAS

4.1 - Representação de solos e outros meios granulares

O impulso principal para a divulgação dos modelos de partículas circulares ocorreu na

sequência do artigo de Cundall e Strack (1979), em que um modelo deste tipo (em 2D) foi proposto para a representação micro-mecânica de solos, tendo por objectivo principal a investigação dos fenómenos fundamentais que regem o seu comportamento mecânico.

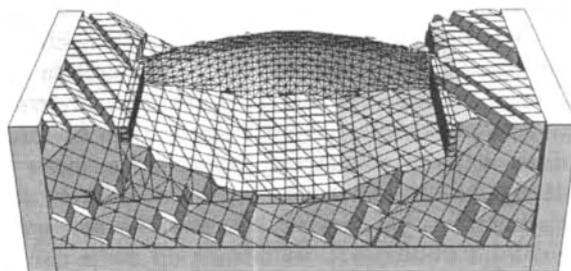


Fig. 10 – Representação numérica de um modelo físico da barragem de Alqueva (Gomes et al. 2003).

Os modelos de partículas circulares foram generalizados para 3D, com base em sistemas de esferas. Alguns autores propuseram a utilização de partículas elípticas, e Yao e Anandarajah (2003) desenvolveram um modelo 3D formado por placas rectangulares para o estudo de argilas (Figura 11). No entanto, o modo mais geral de representar formas mais elaboradas é a criação de macro-partículas, agregando rigidamente um conjunto de partículas circulares ou esféricas (e.g. Thomas e Bray, 1999). Esta opção é também muito eficiente do ponto de vista computacional, dadas as vantagens já referidas do contacto entre aquele tipo de superfícies.

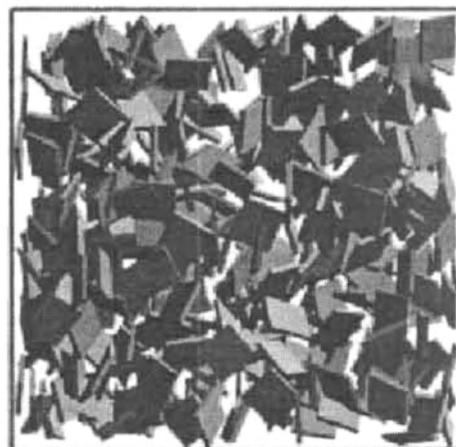


Fig. 11 – Modelo micro-mecânico de argila (Yao e Anandarajah, 2003).

O acréscimo da velocidade dos computadores tem viabilizado modelos com maior número de partículas, por exemplo, a análise de problemas de fundações superficiais (e.g. Marques et al., 2002) ou estacas (e.g. Morchen e Walz, 2002). Outras aplicações deste tipo de modelos são o escoamento de sólidos, por exemplo, em explorações mineiras

subterrâneas (e.g. Peirce *et al.*, 2003), onde a utilização de macro-partículas formadas por elementos esféricos tem grandes vantagens sobre os modelos de blocos poliédricos, muito mais pesados do ponto de vista computacional.

4.2 - Análise da fractura

A análise da propagação da fractura em sólidos por métodos computacionais tem sido abordada de diversas formas. Por um lado, existem diversos modelos de elementos finitos que partem de uma malha de meio contínuo e permitem a geração e propagação de fracturas, as quais podem ser representadas por fendas discretas ou por uma fendilhação distribuída no interior do elemento. A abordagem por elementos discretos é inversa: parte de um modelo de meio descontínuo, um sistema de blocos ou partículas ligados entre si por contactos com as propriedades resistentes do material contínuo. Ao ser atingida a ruptura destas ligações, as fracturas desenvolvem-se, separando os componentes. Na realidade, os possíveis caminhos para a propagação da fractura estão pré-definidos pela configuração inicial do sistema. No entanto, se o número de componentes for elevado, existem inúmeros modos de ruptura possíveis, pelo que tal não condiciona excessivamente a resposta global. Comparações de resultados obtidos com realizações várias de uma dada distribuição estatística de partículas têm confirmado esta asserção.

Existem ainda modelos híbridos, onde se parte de um malha contínua que se separa em elementos discretos, à medida que avança o processo de fracturação, por exemplo, o caso da encosta rochosa da Figura 12 (Eberhardt *et al.*, 2003). Este último trabalho utiliza blocos poligonais, tal como o estudo da fractura do betão por Vonk (1993).

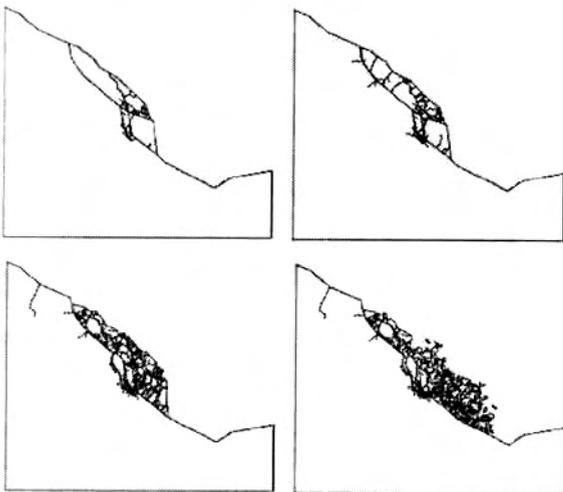


Fig. 12 – Fracturação progressiva de encosta rochosa (Eberhardt *et al.*, 2003).

No entanto, são os modelos de partículas circulares (ou esféricas) que se têm revelado a alternativa mais poderosa em simulações de fractura (Figura 13), quer da rocha (e.g. Potyondi *et al.*, 1996), quer do betão (e.g. Bazant *et al.*, 1990), e mesmo de outros materiais, tais como o gelo (Jirasek e Bazant, 1995). Dada a eficiência computacional já discutida, estes modelos permitem sistemas muito maiores, e facilitam ainda a geração aleatória de partículas. Com a inclusão de macro-partículas, elimina-se a restrição a formas circulares como, por exemplo, no caso da Figura 14 (Azevedo e Lemos, 2004), que mostra um modelo para o estudo da fractura de um provete de betão em que o agregado é representado pela associação de partículas circulares.

Para o estudo de grandes estruturas, em que se antevê uma fracturação localizada, há a vantagem em utilizar modelos híbridos, colocando apenas partículas na zona de interesse para a fractura, sendo a parte restante simulada por um modelo contínuo de elementos finitos (e.g. Azevedo e Lemos, 2003).



Fig. 13 – Modelo de partículas da ruptura de um provete de rocha em compressão, com representação de discontinuidades pré-existent (Cundall, 2003).

5 - PERSPECTIVAS DE DESENVOLVIMENTO FUTURO

A diversidade de aplicações dos modelos de elementos discretos, mesmo dentro do campo geotécnico, tem favorecido o desenvolvimento independente de formulações matemáticas e implementações numéricas. Apesar de diferenças significativas em alguns aspectos, há muitos pontos comuns, e seria benéfico para os investigadores neste domínio caminhar no sentido de uma unificação dos conceitos fundamentais, identificando as opções

possíveis. Deste modo, em vez de se confrontarem globalmente programas de cálculo, seria mais produtivo discutir as opções feitas em cada um relativas aos vários aspectos do modelo e sua implementação: geração do modelo; representação do material dos blocos; representação numérica do contacto; modelos constitutivos do contacto; detecção do contacto; algoritmos de solução. Uma discussão aprofundada de cada um destes tópicos permitiria evidenciar as vantagens e desvantagens de cada opção, e combiná-las de forma mais adequada para uma dada classe de problemas.

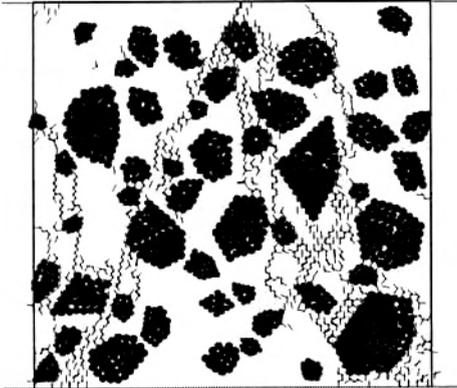


Fig. 14 – Modelo de ensaio de compressão de um provete de betão, com representação do agregado por macro-partículas. (O material envolvente é também discretizado em pequenas partículas.) (Azevedo e Lemos, 2004).

A ausência de uma teoria global que enquadre aspectos tais como a representação numérica do contacto e a sua actualização tem como consequência que algumas das hipóteses utilizadas nos programas de cálculo não são suficientemente explicitadas. Por vezes, estas hipóteses influenciam o comportamento físico, o que nem sempre é totalmente claro para o utilizador. Daí a necessidade de uma reflexão crítica sobre os fundamentos do método, clarificando as consequências das hipóteses assumidas. E a importância de encontrar um corpo de conceitos e uma linguagem comum aos vários ramos da família dos modelos de elementos discretos.

Nesta perspectiva, a questão essencial da validação de um modelo face aos dados experimentais não se deve colocar globalmente, uma vez que é impossível “validar” um programa de cálculo, mas apenas verificar o seu correcto funcionamento algorítmico. O esforço de validação deve incidir sobre a análise crítica das hipóteses subjacentes, face à experiência obtida para uma dada classe de problemas. O incremento da conjugação dos modelos de elementos discretos com ensaios laboratoriais e com a observação das obras deverá conduzir a um acréscimo progressivo da confiança

depositada nestes modelos para a previsão do comportamento, bem como à definição do campo de aplicação mais adequado para cada tipo de idealização.

Como já referido anteriormente, o problema da geração de modelos tem assumido uma importância cada vez maior. Por um lado, a análise de sistemas mais complexos requer uma maior automatização das tarefas de elaboração dos dados de entrada nos programas. Em particular nas aplicações dos modelos de partículas, os sistemas devem ser gerados aleatoriamente, com base num dado conjunto de parâmetros, sendo conveniente criar várias concretizações de cada caso, para se ajuizar da representatividade dos resultados. Os métodos de geração de sistemas de partículas, nomeadamente quando se pretende agregação em macro-partículas, são uma área de investigação que, sem dúvida, assumirá maior relevo no futuro.

No caso dos maciços rochosos, a passagem de uma descrição estatística da compartimentação, decorrente da caracterização geotécnica, para a geração de um modelo de blocos ainda é difícil e normalmente regida por critérios subjectivos, que deverão ser analisados criticamente. O problema fundamental reside na necessidade de simplificação da realidade física para uma idealização viável, mas que represente os aspectos essenciais aos objectivos da análise. Para a generalização do uso de modelos de meio descontínuo, a questão da geração dos blocos é essencial para todos os problemas tridimensionais, sendo ainda útil que as rotinas de geração sejam pensadas no quadro de interfaces gráficas de utilização.

Os modelos de partículas visavam inicialmente estudar o comportamento micro-mecânico de solos (e.g. Cundall e Strack, 1979). De certo modo subjacente a esta perspectiva estava a ideia de utilizar os modelos de partículas como um “laboratório numérico”, tendo em vista compreender os fenómenos essenciais para depois desenvolver relações constitutivas macroscópicas a serem utilizadas em modelos contínuos. Contudo, esta generalização do modelo de pormenor para a idealização contínua tem-se revelado de difícil concretização. Actualmente, a visão de alguns investigadores aponta para a possibilidade de, a prazo, com os avanços da potência dos computadores ser possível utilizar directamente os modelos de partículas na análise de problemas reais (Cundall, 2001). Deste modo, evitar-se-ia a necessidade de desenvolver modelos constitutivos muito complexos e com grande número de parâmetros de difícil determinação, sendo o meio representado com base em modos de comportamento elementares, definidos essencialmente pelas relações de contactos entre partículas.

Embora esta visão seja naturalmente controversa, existem áreas onde os modelos de

partículas circulares ou esféricas têm vindo a assumir maior relevo. A modelação da fractura de rocha e de betão constitui um desses domínios, sendo de prever o incremento da sua utilização. Com efeito, no que respeita aos processos de fractura da matriz rochosa, são claras as vantagens face aos modelos que partem de um meio contínuo inicial e aos modelos de blocos. Quando se pretende examinar a fractura a uma escala maior, em maciços diaclasados, torna-se necessário representar as descontinuidades pré-existentes que condicionam a propagação das fracturas. Neste caso, a representação de superfícies de descontinuidade, essencialmente planas, por modelos de partículas ainda requer mais trabalho de investigação, de modo a ser possível simular correctamente as condições de atrito e dilatação entre blocos formados por partículas.

Os problemas dinâmicos de contacto/impacto constituem também uma área de investigação em franca evolução. A sua análise por elementos discretos requer ainda vários desenvolvimentos, principalmente em duas frentes. Por um lado, a proposta e validação de relações constitutivas de contacto elementar, que permitam, nomeadamente, simular os mecanismos de dissipação. Por outro lado, os aspectos computacionais, uma vez que em problemas dinâmicos os algoritmos explícitos são pouco eficientes quando no sistema estão presentes componentes com grande disparidade de rigidez.

A principal solução para reduzir drasticamente os tempos de cálculo de grandes sistemas é a computação paralela. Os algoritmos explícitos são os mais adequados à paralelização, que também pode ser aplicada facilmente às tarefas de detecção de contacto, havendo experiências promissoras (e.g. Owen et al., 2002). No entanto, em termos de utilização prática, a computação paralela não tem tido a rapidez de evolução que se antevia há alguns anos.

As tentativas de adequar as ferramentas de cálculo a cada tipo de problema têm levado à proposta de modelos híbridos, combinando técnicas diversas num dado modelo. Assim, existem combinações de elementos finitos com blocos ou com partículas, associações de componentes elementares em macro-partículas, etc. que tiram partido das potencialidades específicas de cada técnica. É de prever que o uso dos modelos híbridos se incremente e o seu campo de utilização se alargue. Numa perspectiva global, e dados os desenvolvimentos das formulações de contacto com base em elementos finitos, poderá deixar de fazer sentido a distinção entre os dois métodos, caminhando-se para uma unificação conceptual no âmbito das técnicas numéricas de modelação de meios descontínuos.

6 - CONCLUSÃO

Ao longo das últimas três décadas, os modelos de elementos discretos desenvolveram-se para responder a problemas em que a hipótese de meio contínuo não era considerada satisfatória. O seu campo de aplicação foi-se progressivamente alargando, abrangendo hoje um conjunto de situações, desde o caso de meios contínuos cortados por interfaces ou superfícies de descontinuidades, até aos sistemas de corpos múltiplos.

Na evolução destes modelos, podem observar-se duas tendências de certo modo contraditórias, mas que expandiram o seu potencial. Por um lado, no sentido de modelos mais complexos, incorporando aspectos de outros métodos, como os elementos finitos. Por outro lado, no sentido de modelos constituídos por componentes mais elementares, tais como os modelos de partículas, em que as relações constitutivas regem apenas o contacto entre esferas, sendo a complexidade decorrente da estrutura e dos modos de associação de sistemas de grande número de componentes.

Todos estes tipos de idealização se desenvolveram em resposta aos requisitos de aplicações específicas, algumas delas em domínios muito para além da engenharia geotécnica. Tendo em conta a sobreposição crescente entre elementos finitos e elementos discretos, e a utilização mais frequente de modelos híbridos, julga-se do maior interesse discutir os conceitos essenciais de todos estes métodos de forma integrada no âmbito da modelação numérica de meios descontínuos e meios articulados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ambrósio, J. A. C.; Oderson, S. L. e Hansen, J. M. (2002) *Roller-sprocket contact models in the dynamics of roller-chain drives*, 8as. Jornadas Portuguesas de Tribologia (Eds. J. Grácio et al.), Universidade de Aveiro, pp. 195-202.
- Azevedo, N. M. e Lemos, J. V. (2003) *Hybrid discrete element/finite element method for the fracture analysis of concrete structures*, Informação Técnica ITB 27, LNEC, Lisboa.
- Azevedo, N.M. e Lemos, J.V. (2004) *Influência da geometria da partícula na fractura do betão com um modelo de elementos discretos*, 9º Congresso Nacional de Geotecnia, Aveiro.
- Bazant, Z.P.; Tabbara, M.R.; Kazemi, M.T. e Pijaudier-Cabot, G. (1990) *Random particle model for fracture of aggregate or fiber composites*, J. Eng. Mech. ASCE, vol. 116, no. 8, pp. 1686-1705.
- Belytschko, T. e Yeh, I. S. (1993) *The splitting pinball method for contact-impact problems*, Comp. Meth. Applied Mech. Eng., vol. 105, pp. 375-393.

- Cundall, P. A. (1971) *A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems*, Proc. Symp. Rock Fracture (ISRM), Nancy, vol. 1, paper II-8.
- Cundall, P. A. e Strack, O. D. L. (1979) *A discrete numerical model for granular assemblies*, Géotechnique, vol. 29, no. 1, pp. 47-65.
- Cundall, P. A. (1988) *Formulation of a three-dimensional distinct element model - Part I: A scheme to detect and represent contacts in a system composed of many polyhedral blocks*, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., vol. 25, pp. 107-116.
- Cundall, P. A. (2001) *A discontinuous future for numerical modelling in geomechanics?*, Proc. Inst. Civil Engineers, Geotechnical Engineering, vol. 149, no. 1, pp. 41-47.
- Damjanac, B.; Fairhurst, C. e Brandshaug, T. (1999) *Numerical Simulation of the Effects of Heating on the Permeability of a Jointed Rock Mass*, in Proc. 9th ISRM Congress on Rock Mechanics, Paris, Vol. 2, pp. 881-885, Balkema.
- Eberhardt, E.; Stead, D.; Coggan, J. S. e Willenberg, H. (2003) *Hybrid finite-/discrete-element modelling of progressive failure in massive rock slopes*, in ISRM 2003 – Technology roadmap for rock mechanics, South African Institute of Mining and Metallurgy, pp. 276-279.
- Gomes J. P.; Lemos, J. V. e Pina, C. B. (2002). *Modelação numérica e experimental da rotura pela fundação da barragem de Alqueva*, in Métodos Numéricos En Ingeniería V, (Eds. J.M. Goicolea, C. Mota Soares, M. Pastor y G. Bugada), SEMNI.
- Goodman, R. E.; Taylor, R. L. e Brekke, T. L. (1968) *A model for the mechanics of jointed rock*, J. Soil Mech. Found. Div. ASCE, vol. 94, SM3, pp. 637-659.
- Hart, R. D.; Cundall, P. A. e Lemos, J. V. (1988) *Formulation of a three-dimensional distinct element model - Part II: Mechanical calculations*, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., vol. 25, pp. 117-125.
- Itasca (1996) *UDEC - Universal Distinct Element Code, Version 3.0*, Itasca Consulting Group, Minneapolis, USA.
- Jirasek, M. e Bazant, Z. P. (1995) *Particle model for quasibrittle fracture and application to sea ice*, J. Eng. Mech. ASCE, vol. 120, no. 7, pp. 1521-1542.
- Lemos, J. V. (1998) *Numerical models for seismic analysis of monuments*, Monument 98 – Workshop on Seismic Performance of Monuments, LNEC, Lisboa, pp. K19-K36.
- Lemos, J.V. (1999a) *Modelling and failure analysis in rock engineering*, Programa de Investigação, LNEC.
- Lemos, J. V. (1999b) *Discrete element analysis of dam foundations*, in Distinct Element Modelling in Geomechanics (eds. Sharma, Saxena & Woods), Balkema, pp. 89-115.
- Lorig, L. e Calderón Rojo, A. (2002) *Modeling time-dependent slope deformation at Chuquicamata mine*, in Eurock 2002 (Eds. C.D. Gama e L.R. Sousa), Madeira, pp. 137-143.
- Marques, J. C.; Ribas, J.; Martins, F.; Martins, J. e Petrinic, N. (2002) *Modelação de solos granulares com elementos discretos*, 8º Congresso Nacional de Geotecnia, Lisboa, vol. 2, pp. 873-884.
- Martins, J. A. C. e Klarbring, A. (Eds.) (1999) *Computational modeling of contact and friction*, Comp. Meth. Applied Mech. Eng., Special Issue, vol. 177, Nos. 3-4.
- Morchen, N. e Walz, B. (2003) *Model generation and calibration for a pile loading in the particle flow method*, in Numerical Modeling in Micromechanics via Particle Methods (Ed. H. Konietzky), Balkema, pp. 189-195.
- Nascimento, U. e Teixeira, H. (1972) *Mecanismos de atrito interno de solos e rochas*, Geotecnia, nº 4, pp. 19-34.
- Otter, J.R.H.; Cassell, A.C. e Hobbs, R.E. (1966) *Dynamic relaxation*, Proc. Inst. Civil Engineers, vol. 35, pp. 633-665.
- Owen, D.R.J.; Feng, Y.T.; Souza Neto, E.A.; Cottrell, M.; Wang, F.; Andrade Pires, F.M. e Yu, J. (2002) *The modelling of multi-fracturing solids and particulate media*, in WCCM V – Fifth World Congress on Computational Mechanics (Eds. Mang et al.), Vienna.
- Pearce, M.E.; Cundall, P.A.; van Hout, G.J. e Lorig, L. (2003) *PFC-3D modeling of caved rock under draw*, in Numerical Modeling in Micromechanics via Particle Methods (Ed. H. Konietzky), Balkema, pp. 211-217.
- Potyondy, D.O.; Cundall, P.A. e Lee, C. (1996) *Modelling rock using bonded assemblies of circular particles*, Proc. 2nd North American Rock Mechanics Symposium (Eds. Aubertin et al.), Montreal, pp. 1937-1944.
- Powrie, W.; Harkness, R. M.; Zhang, X. e Bush, D. I. (2002) *Deformation and failure modes of drystone retaining walls*, Géotechnique, vol. 52, no. 6, pp. 435-446.
- Psycharis, I.N.; Lemos, J.V.; Papastamatiou, D.Y.; Zambas, C. e Papantonopoulos, C. (2003) *Numerical study of the seismic behaviour of a part of the Parthenon Pronaos*, Earthquake Engng Struct. Dyn., vol. 32, pp. 2063-2084.
- Resende, R. (2003) *Um Modelo para o Estudo de Cenários de Rotura de Fundações Rochosas de Barragens*, Dissertação de Mestrado, IST, 2003.
- Thomas, P. A. e Bray, J. D. (1999) *Capturing nonspherical shape of granular media with disk clusters*, J. Geotech. and Geoenvironmental Eng., ASCE, vol. 125, no. 3, pp. 169-178.

- Trollope, D.H. (1968) *The mechanics of discontinua or elastic mechanics in rock problems*, in *Rock Mechanics in Engineering Practice* (Eds. K.G. Stagg e O.C. Zienkiewicz), John Wiley, London, pp. 275-320.
- Underwood, P. (1983) *Dynamic Relaxation*, in *Computational Methods for Transient Analysis* (Eds. T. Belytschko e T.J.R. Hughes), North Holland, pp. 245-265.
- Vonk, R.A. (1993) *A micromechanical investigation of softening of concrete loaded in compression*, *Heron*, vol. 38, no. 3, pp. 1-94.
- Yao, M. e Anandarajah, A. (2003) *Three-dimensional discrete element method of analysis of clays*, *J. Eng. Mechanics ASCE*, vol. 129, no. 6, pp. 585-596.