



Faculdade de Ciências e Tecnologia

Departamento de Engenharia Civil

DISCIPLINA DE FUNDAMENTOS DE GEOTECNIA

CAPITULO 2 - INTRODUÇÃO

Prof. Carlos Nunes da Costa

2006/2007

ÍNDICE

1. ÂMBITO.....	2
2. A GEOTECNIA COMO RAMO INDEPENDENTE DA ENGENHARIA	4
3. MARCOS HISTÓRICOS DA GEOTECNIA.....	5
4. RAZÕES PARA O RÁPIDO DESENVOLVIMENTO DA GEOTECNIA	6
5. APRENDER COM OS ERROS	9
5.1 Introdução.....	9
5.2. Grandes acidentes geotécnicos	10
5.3 O engenheiro perante a ética e o ambiente	16
6. NOVOS CAMPOS DE APLICAÇÃO DA GEOTECNIA	19
FONTES DE INFORMAÇÃO E MAIS LEITURAS EM:	23

CAPITULO 2 - INTRODUÇÃO À GEOTECNIA

SUMÁRIO

Nesta lição será primeiramente abordado o âmbito e inter-relações das disciplinas constituintes da Geotecnia, a saber: a Geologia de Engenharia, a Mecânica dos Solos e a Mecânica das Rochas. Em seguida será feita a apresentação da Geotecnia como disciplina independente da Engenharia, ilustrada com alguns marcos históricos, quer a nível mundial, quer nacional. Serão evidenciadas algumas razões para o rápido desenvolvimento da Geotecnia. Na sequência, na perspectiva da aprendizagem com o erro, serão dados exemplos de grandes acidentes geotécnicos (barragem de *Malpasset*, barragem de *Vajont*, escorregamento de *Aberfan*, barragem de *Teton*, barragem de *Aznalcollar*, ponte de Entre-os-Rios) e abordadas as relações da engenharia com a ética e o ambiente. Finalmente serão apresentados os novos campos de aplicação da Geotecnia, nomeadamente no domínio da Engenharia Geoambiental.

1. ÂMBITO

A **Geotecnia** é o ramo da Engenharia que agrupa as disciplinas científicas que se ocupam da caracterização e comportamento dos terrenos¹: a Geologia de Engenharia, a Mecânica dos Solos e a Mecânica das Rochas.

Neste contexto, e procurando diferenciar o âmbito de actuação de cada uma delas, competirá, segundo Oliveira (1986):

- à Geologia de Engenharia explicar a génese dos terrenos, fazer a sua descrição qualitativa e a sua caracterização quantitativa (tanto quanto possível), tendo em conta os problemas de engenharia a resolver e os impactes ambientais por eles criados.
- à Mecânica dos Solos e à Mecânica das Rochas as tarefas de análise da estabilidade dos terrenos (respectivamente, terrosos para a primeira e rochosos para a segunda) e o projecto de estruturas que impeçam a sua instabilização ou garantam a sua estabilidade face às solicitações previsíveis.

¹ Designação genérica dada na engenharia aos materiais naturais que englobam os solos e as rochas, conforme “Vocabulário de Estradas e Aeródromos”, LNEC, 1962.

Não existem fronteiras claras entre estas disciplinas. Por exemplo, entre a Mecânica dos Solos e a Mecânica das Rochas é difícil traçar uma linha de separação, como se pode deduzir destes dois exemplos inter-relacionados (Rocha, 1981):

- São frequentes as situações de obra onde estão simultaneamente envolvidas rochas e solos.
- Existem formações geológicas cujo comportamento é intermediário entre rochas e solos (também designadas por “rochas de baixa resistência”).

Contudo é possível definir o âmbito de cada uma destas disciplinas com alguma aproximação:

A **Geologia de Engenharia**, na sua visão mais tradicional, ocupa-se da investigação da adequabilidade e características dos sítios, na medida em que eles afectem o projecto e construção dos trabalhos de engenharia civil e a segurança das construções vizinhas (Mc Lean & Gribble, 1992). Como oportunamente sublinha Goodman (1993) o projecto e construção em engenharia civil desenvolve-se por fases, à medida que a informação técnica e científica é obtida, e a geologia de engenharia vai adquirindo diferentes responsabilidades em cada uma dessas fases. Segundo o *British Standard Code of Practice for site investigations* (BS 5930: 1981) este trabalho envolve os seguintes procedimentos:

- Investigação preliminar (análise dos dados disponíveis)
- Reconhecimento geológico detalhado de superfície, incluindo estudo fotogeológico
- Prospecção geofísica (obtenção de *soft data* do subsolo)
- Prospecção mecânica, incluindo sondagens (obtenção de *hard data* do subsolo)
- Ensaios de campo e laboratório para determinação das propriedades mecânicas dos solos e rochas (esta última fase em colaboração com a Mecânica dos Solos e a Mecânica das Rochas).

A **Mecânica das Rochas** debruça-se sobre o conhecimento dos maciços rochosos (Rocha, 1981) em termos de:

- Deformabilidade, isto é, das relações entre forças (ou tensões) e deformações;
- Resistência, isto é das condições que determinam a sua rotura;
- Estado de tensão inicial a que se encontra submetido;
- Dos estados de tensão que se desenvolvem em virtude das tensões aplicadas, incluindo as devidas à percolação da água subterrânea.

Por sua vez a **Mecânica dos Solos** trata dos problemas (Mineiro, 1981):

- de equilíbrio dos maciços terrosos sob a acção de solicitações exteriores (como seja a capacidade de carga de fundações superficiais e profundas),
- de resistência ao corte dos solos submetidos a esforços tangenciais;
- de escoamento em meios porosos, da consolidação e compressibilidade dos solos;
- de impulsos de terras sobre suportes (rígidos ou flexíveis, como sejam as cortinas ancoradas ou revestimentos de túneis)
- do cálculo de estabilidade de taludes naturais e de aterro;
- do comportamento dos solos sob solicitações dinâmicas (sísmicas)
- do melhoramento de terrenos através de numerosas técnicas (injecção, pré-carga, compactação dinâmica, vibroflutuação, etc...).

2. A GEOTECNIA COMO RAMO INDEPENDENTE DA ENGENHARIA

Nascimento (1990) considera o início da publicação da revista “Geotechnique” em Londres, em 1948, como o reconhecimento formal da autonomia deste ramo face à Engenharia Civil.

Contudo, as causas dessa autonomia estavam “lá” desde o início, e são inerentes à natureza da grande maioria das construções, compostas por duas partes distintas – a estrutura e o terreno de fundação. Como se sabe, as ciências da engenharia progrediram muito mais depressa relativamente à primeira (estrutura) quando comparada com a segunda (terreno de fundação). As razões desse progresso diferenciado residem no facto de:

- As estruturas terem formas geométricas simples e bem definidas e serem construídas com materiais “artificiais” (feitos pelo Homem) e com características fáceis de determinar, em condições propícias ao desenvolvimento das aplicações da física, especialmente da mecânica, e à previsão do seu comportamento – este é o âmbito das disciplinas de Resistência dos Materiais e Teoria das Estruturas, por exemplo.
- Os terrenos de fundação são constituídos por formações geológicas – solos e rochas – de características mecânicas mal definidas, que variam de ponto para ponto; frequentemente apresentam descontinuidades e fracturas que lhes conferem heterogeneidade e anisotropia.

As insuficiências da Engenharia Civil para lidar com os problemas geotécnicos foram evidenciadas com o aparecimento de cada vez maiores e mais variadas construções, principalmente a partir do fim do século XIX, e com a ocorrência de acidentes que

mostravam até que ponto estavam erradas as bases empíricas dos métodos até então adoptados.

3. MARCOS HISTÓRICOS DA GEOTECNIA

Em termos formais podem ser apresentados os seguintes acontecimentos marcantes para o surgimento das disciplinas da Geotecnia:

- 1º Congresso da SIMSEF (Sociedade Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações): 1936 em *Harvard* (USA)
- 1º Congresso da SIMR (Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas): 1966 em Lisboa (Portugal)
- 1º Congresso da AIGE (Associação Internacional de Geologia de Engenharia): 1970 em Paris (França)

Contudo merecem ser mencionados alguns antecedentes que impulsionaram decisivamente o nascimento desta área do conhecimento científico, designadamente:

- os trabalhos de Coulomb (1773) – conceitos fundamentais sobre a resistência ao corte dos solos enquanto soma de duas parcelas: uma devida ao atrito, proporcional à pressão normal à superfície de corte mas independente da área; outra devida à coesão, proporcional à área mas independente da pressão.
- a Lei de Darcy (1856) – do escoamento da água em meios porosos, segundo a qual existe uma relação constante entre a velocidade desse escoamento e o gradiente hidráulico que o produz, traduzido pelo coeficiente de permeabilidade, característica de cada meio poroso.
- a Teoria da consolidação de Terzaghi (1925) – com a consideração de duas fases constituintes dum solo saturado – a fase sólida e a fase líquida - e a divisão em duas parcelas da pressão total que nele actua – a pressão efectiva, na fase sólida e a pressão neutra, na fase líquida.

MARCOS DA GEOTECNIA EM PORTUGAL

Portugal não esteve alheio a esta grande revolução nas ciências da engenharia. Bem pelo contrário, participou activamente na sua consolidação e de diversas formas:

- a) Na área da investigação – com a criação do LNEC (1946)

- através de um Núcleo inicial de Mecânica dos Solos, dividido em Fundações (liderado por José Folque) e Estradas e Aeródromos (liderado por Úlpio Nascimento), integrado num serviço (englobando também estruturas, barragens, materiais de construção...) dirigido por Manuel Rocha.
 - com a integração de geólogos nos anos 50 e a criação da divisão de Prospecção, que se veio a juntar ao núcleo inicial, formando o Serviço de Geotecnia.
 - com a criação, nos anos 50, de uma equipa de Mecânica das Rochas no Serviço de Barragens (Manuel Rocha, Laginha Serafim, António da Silveira), especialmente dedicada a estudos da deformabilidade das fundações de barragens de betão.
 - finalmente, com o reconhecimento internacional do desenvolvimento dos métodos de determinação da resistência, da deformabilidade e do estado de tensão dos maciços rochosos no LNEC, patente na realização em Lisboa do 1º Congresso Internacional de Mecânica das Rochas (1966).
- b) Na área empresarial (anos 50 e 60) – com a criação de empresas de sondagens e fundações (Teixeira Duarte, Ródio, Sopecate, Construções Técnicas, etc...) e de empresas de projecto e consultoria (Hidrotécnica, COBA, Profabril, Hidroprojecto), todas elas integrando quadros geotécnicos.
- c) No ensino (anos 70) – introdução da disciplina de Mecânica dos Solos nas licenciaturas de Engenharia Civil da FEUP e do IST. Criação dos cursos de pós-graduação em Geotecnia (1976) na FCT/UNL.

4. RAZÕES PARA O RÁPIDO DESENVOLVIMENTO DA GEOTECNIA

A rápida expansão da Geotecnia é consequência da crescente complexidade das realizações humanas e dos importantes problemas postos por diversos ramos da engenharia e da tecnologia, especialmente a partir da segunda metade do século XX.

Com o desenvolvimento das grandes concentrações urbanas os **edifícios** tornaram-se cada vez mais altos e, simultaneamente, os locais mais apropriados cada vez mais escassos. Mas nem por isso as construções deixaram de ser feitas. É o caso da torre Latino-Americana, construída nos anos 50 na cidade do México, com 182 m de altura, assente em 361 estacas de 35 cm de diâmetro cada, fundadas a 33 m de profundidade (Mineiro, 1981): apesar das condições geotécnicas desfavoráveis resistiu aos grandes sismos de 1957 e 1985, sem danos. Outro interessante exemplo de construção anti-sísmica é o Banco de América, em Manágua, o edifício mais alto da Nicarágua que foi um dos raros resistentes ao terramoto de 23 de Dezembro de 1972.

As **barragens**, muitas vezes fundadas em formações geológicas com características precárias, são das estruturas que mais contribuíram para o avanço da Geotecnia. *Hoover Dam*, construída em 1935, permaneceu durante muito tempo como a maior barragem do mundo. Hoje as barragens alcançaram os 335 m de altura (Rogun, Tajiquistão), ao passo que, em termos de volume, é *Syncrude Tailings Dam* (Canada) que detêm o recorde, com 540 milhões de m³. Presentemente, as comportas da Barragem das Três Gargantas são fechadas e o Rio Yangtze, na China, começa a encher o reservatório, que terá uma capacidade de geração de 18,2 gigawatts até 2009.



Figura 1 – Hoover Dam
<http://donews.do.usbr.gov>



Figura 2 – Túnel de S. Gotardo (em constr.)
<http://www.infrastructures.com>

A construção de **túneis** é também um poderoso motor de desenvolvimento da Geotecnia. O túnel do Monte Branco, entrado ao serviço em 1965, com 11.611 m de comprimento, há muito que não é o maior túnel rodoviário do mundo (marca detida pelo túnel de *Laerdal*, na Noruega, desde 2000, com 24.510 m de comprimento) embora ainda seja o mais profundo, com um recobrimento que atinge cerca de 2.500 m. A essa profundidade desenvolvem-se tensões elevadíssimas que levavam à “explosão” da rocha, apesar da sua elevada resistência (cerca de 100 MPa), quando da sua construção (Rocha, 1981). À mesma profundidade está agora a ser aberto o que será o maior túnel ferroviário do mundo² em 2014, o túnel de S. Gotardo, com duas galerias de 9 metros de diâmetro e 57.072 m de comprimento).

Mas não é apenas a Engenharia Civil que coloca à Geotecnia novas e mais complexas questões para resolver. Na Engenharia de Minas, hoje em dia, é corrente a exploração subterrânea fazer-se a profundidades superiores a 1.000 m. Em 1977 a *Western Deep*

² Posição actualmente detida pelo túnel *Seikan* (Japão), com 53.850 m, desde 1998, após ter pertencido ao Eurotúnel (túnel da Mancha) desde 1994, com 50.450 m de comprimento.

Levels Mine, uma mina de ouro na África do Sul, atingiu a profundidade de 3.581 m. Em 2003 a *East Rand Mine*, na mesma região, alcançou os 3.585 m. A essa profundidade a temperatura ronda os 60°C e a pressão das rochas sobrejacentes é de 9.500 ton/m² isto é, quase 1.000 vezes a pressão atmosférica normal. Quando a rocha é removida a pressão aumenta drasticamente no maciço rochoso envolvente. Este efeito, associado ao calor, provoca as famosas explosões de rocha responsáveis por muitas das 250 mortes por ano nas minas da África do Sul.

Por sua vez, a mina “a céu aberto” de *Bingham, Utah (USA)* é mais larga que 35 campos de futebol juntos e mais profunda do que 2 vezes a altura do *Empire State Building (896 m)*. Nas explorações a céu aberto os maiores problemas estão associados à estabilidade de taludes.



Figura 3 – Mina de Bingham

(<http://ghostdepot.com/rg/mainline/utah/bingham.htm>)

Em termos de perfuração, a Engenharia do Petróleo já ultrapassou os 8.000 m de profundidade ao passo que, para efeitos de investigação, já se atingiu os 15 km de profundidade. O conhecimento de níveis cada vez mais profundos da crosta terrestre é ditado por perspectivas de utilização do subsolo, não só em termos de extracção de georrecursos, mas também para armazenamento de fluidos e mesmo de resíduos, incluindo os radioactivos.

5. APRENDER COM OS ERROS

5.1 Introdução

Como ciência eminentemente aplicada que é, um dos grandes motores de desenvolvimento da Geotecnia tem sido a ocorrência de acidentes que, em grande medida, se podem atribuir ao insuficiente conhecimento ou à deficiente aplicação do conhecimento geotécnico.

O exemplo mais conhecido de luta prolongada para a correcção de um erro geotécnico talvez seja o da Torre inclinada de Pisa (Jamiolkowski, 1997, 2004).

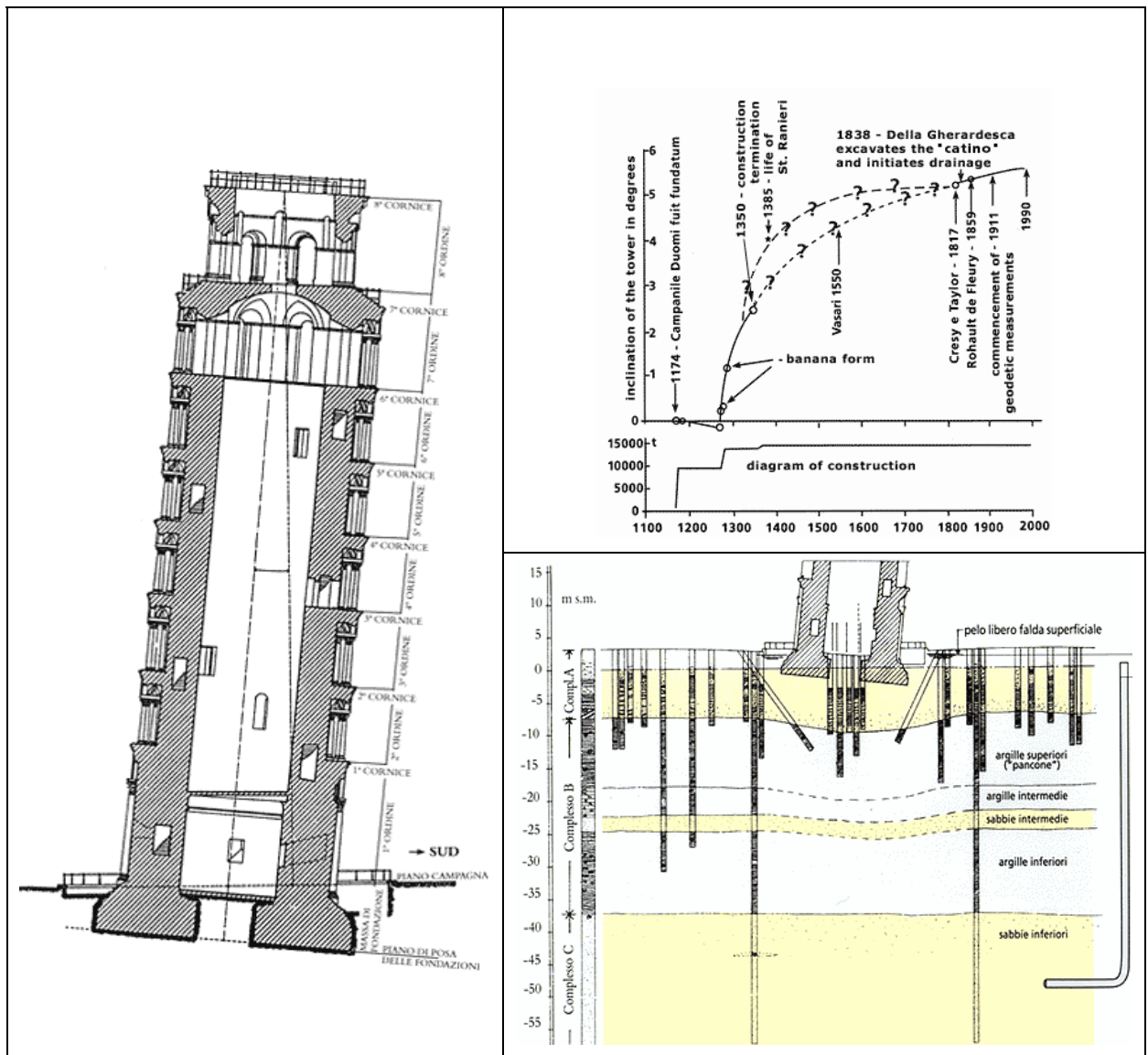


Figura 4 – Torre de Pisa. Evolução da inclinação. Fundações.

<http://www.rod.beavon.clara.net/pisa.htm>

A torre começou a ser construída em 1173, em solo arenoso muito solto, sendo interrompida em 1178, no 3º andar, com 10,6 m, quando a inclinação (*tilting*) era já evidente. Por duas vezes foi recomeçada e novamente interrompida (em 1185 e 1284). Foi terminada em 1350 com 85,9 m e oito andares. Várias tentativas para a estabilizar foram feitas (nomeadamente em 1934 com a injeção de cimento na base), mas o efeito foi frequentemente o oposto do que era pretendido. Os rebaixamentos exagerados do nível freático, ocorridos nos anos 70 devido à intensidade da exploração de água subterrânea em captações locais, parecem ter contribuído para agravar ainda mais a instabilidade. Entretanto, até 1989, 700.000 visitantes subiram ao seu topo. Foi encerrada em 1990 para correcção da inclinação, então de 5°30'. Várias soluções foram ensaiadas incluindo a colocação de 800 t de chumbo no lado norte da torre. Finalmente a mais simples acabou por resultar: escavar no lado oposto ao do sentido da inclinação para “equilibrar” o assentamento da torre. Quarenta furos foram feitos para remover 38 m³ de areia enquanto a torre (14.000 t de mármore) estava a ser suportada por cabos ancorados ao chão.

Em 15 de Dezembro de 2001 foi finalmente reaberta ao público, que pode fazer visitas guiadas em grupos de 30 (máximo). Desde então não deu mais sinais de instabilidade. Actualmente apresenta a inclinação (cerca de 4°30') que possuía em 1700 (figura 5).

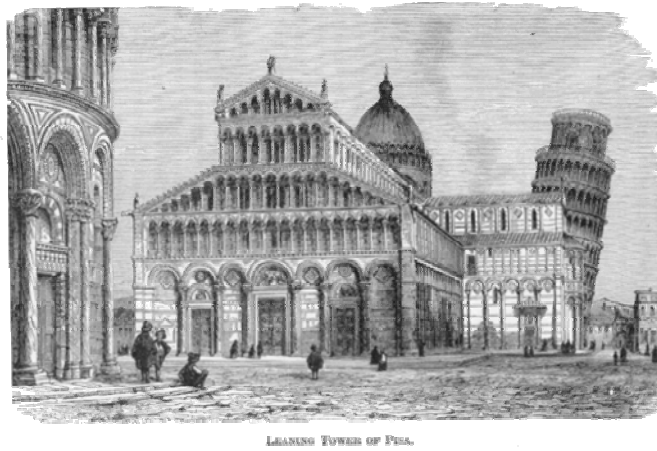


Figura 5 – Enquadramento da Torre de Pisa no conjunto monumental da cidade (gravura de cerca de 1700, exibindo inclinação próxima da actual)

5.2. Grandes acidentes geotécnicos

Mas se o “erro geotécnico” que originou a inclinação da Torre de Pisa parece ter tido um final feliz, o mesmo não se poderá dizer de outros acidentes geotécnicos:

ROTURA DA BARRAGEM DE MALPASSET (FRANÇA) – 2 DE DEZEMBRO DE 1959

Trata-se de uma barragem de betão em arco de dupla curvatura com 60 m de altura e 223 m de comprimento, localizada perto da cidade de *Frejús*, nos Alpes franceses.

Os estudos geológicos e hidrológicos consideraram o local adequado embora com a oposição de alguns consultores. A fundação rochosa parecia ser impermeável. O encontro direito (olhando para jusante) era rocha; no encontro esquerdo foi necessário construir uma parede de betão para melhor interação com o arco da barragem.

Fissuras foram observadas na base da barragem, a jusante, mas não foram investigadas. Duas semanas depois da sua identificação a barragem ruiu matando 500 pessoas. A rotura foi rápida e catastrófica, libertando toda a água da albufeira. Pouco restou da estrutura.

Nenhuma barragem deste tipo tinha ruído anteriormente, o que levou à realização de numerosos estudos. A investigação concluiu que:

- Uma falha tectónica foi identificada a jusante da barragem que não tinha sido reconhecida na fase de projecto devido à sua distância à fundação na superfície do terreno (Figura 6).

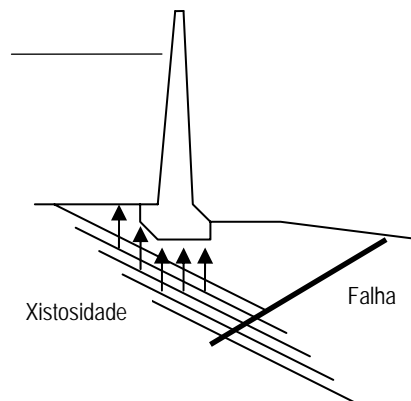


Figura 6 – Esquematização das condicionantes geológico-geotécnicas que presidiram à rotura da barragem de *Malpasset*

- Chuva intensa fez subir quase instantaneamente o nível das águas da albufeira mais de 5 m, o que contribuiu também para aumentar a pressão da água sob a barragem
- O mecanismo de rotura foi desencadeado pela combinação desta falha com as superfícies de baixa resistência proporcionadas pela xistosidade, levando ao escorregamento de uma cunha do maciço de fundação, eventualmente conjugada com a subida das subpressões na fundação da barragem e o estado de alteração da rocha no encontro direito.

GALGAMENTO DA BARRAGEM DE VAJONT (ITÁLIA) – 9 DE OUTUBRO DE 1963

A Barragem de *Vajont* está localizada na região dos Dolomitos (Alpes Italianos), a cerca de 100 km a norte de Veneza. Tem um comprimento no coroamento de 1850 m e uma altura de 260 m (quando do acidente era a mais alta do mundo) e o seu reservatório uma capacidade de 115 milhões de m³ (Figura 7).

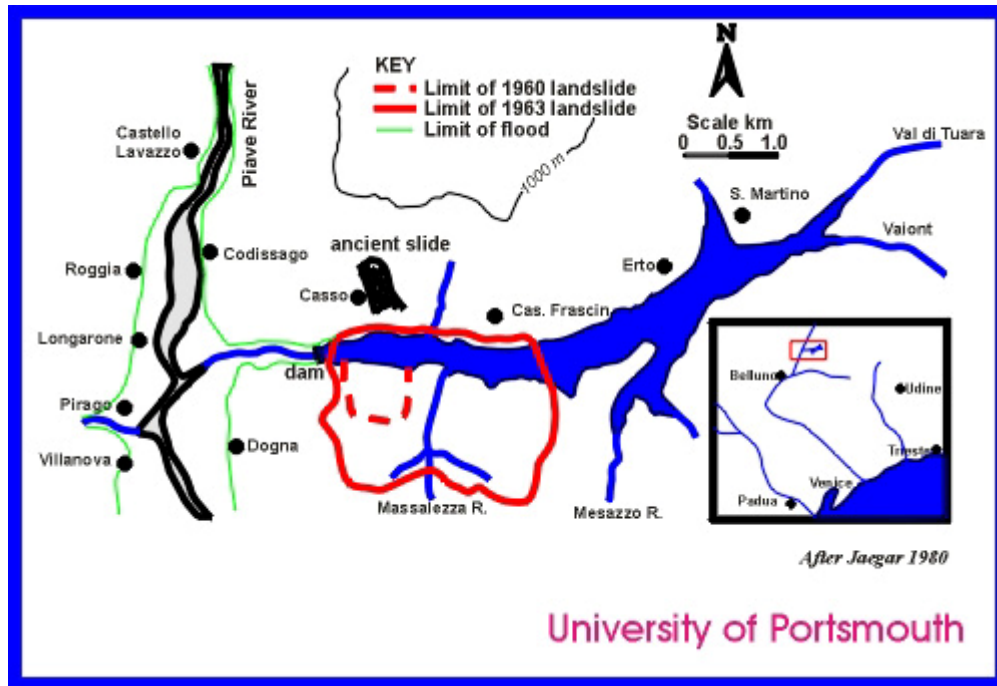


Figura 7 – Localização da barragem de *Vajont*, numa garganta apertada
(<http://www.land-man.net/vajont/vajont.html>)

É um exemplo clássico da incapacidade de engenheiros e geólogos entenderem a natureza do problema. Durante o enchimento da albufeira uma massa gigantesca de terreno com cerca de 270 milhões de m³ destacou-se de uma das vertentes e escorregou para a albufeira a uma velocidade de 30 m/s, formando uma onda que galgou a barragem em mais de 250 m de altura e varreu todo o vale a jusante matando cerca de 2.500 pessoas. Notavelmente, a barragem resistiu ao choque sem ruir.

Antes da conclusão da barragem o director de obra estava preocupado com a estabilidade do encontro esquerdo. Reconhecimentos efectuados em 1958 e 1959 identificaram cicatrizes de escorregamentos antigos no encontro direito. O primeiro enchimento, ainda antes do fecho da barragem (concluída em Setembro de 1960) foi iniciado em Fevereiro de 1960. Em Março os projectistas reconheceram que uma grande massa de terrenos se apresentava instável na margem esquerda. Foi decidido jogar com o nível de enchimento da albufeira ao mesmo tempo que se executavam galerias drenantes na encosta instabilizada. O problema parecia estar a ser resolvido.

Entre Abril e Maio de 1963 o nível da albufeira subiu rapidamente. Foi então decidido realizar um esvaziamento. Em Outubro a encosta deslizou para dentro do lago.

ESCORREGAMENTO DE ABERFAN (PAÍS DE GALES) – 21 DE OUTUBRO DE 1966

Do escorregamento, encosta abaixo, da pilha de resíduos de uma mina de carvão de Gales do Sul, situada no topo de uma montanha, resultou a destruição da aldeia mineira de Aberfan, situada na base da encosta e 144 mortes (figura 8). A situação mais dramática ocorreu com o soterramento de uma escola primária de que resultou a morte de 116 crianças e 5 professores.



Figura 8 – Vista panorâmica do escorregamento de Aberfan
(<http://www.nuff.ox.ac.uk/politics/aberfan/home.htm>)

O fenómeno foi interpretado como se devendo ao aumento da pressão da água existente sob a fundação do depósito de rejeitados, que acabou por brotar à superfície, arrastar os resíduos e formar uma torrente de lama que evoluiu até à povoação.

O tribunal concluiu que a maior parte da culpa pertencia ao Conselho Nacional do Carvão por não definir uma política adequada mas minas para os depósitos de rejeitados nem existir uma adequada legislação sobre segurança nesses trabalhos.

Este acidente teve uma grande repercussão na prática mineira no Reino Unido e em geral, levando a que as escombreyras passassem a ser vistas em igualdade de condições com quaisquer outras estruturas de engenharia, sujeitas às normas correntes de projecto e execução.

ROTURA DA BARRAGEM DE *TETON* (USA) – 5 DE JUNHO DE 1976

A barragem de aterro (ou de terra) de *Teton* foi construída pelo *United States Bureau of Reclamation* que foi considerado culpado pelo colapso. Tinha cerca de 100 m de altura e custou a vida a 11 pessoas e cerca de 1 bilhão de US\$ de prejuízo.

A barragem estava localizada numa depressão tectónica no topo de um tufo de cinzas reolítico, que por sua vez assentava sobre rocha sedimentar. Toda a área era muito permeável mas não foi observada percolação no corpo da barragem antes do colapso, embora várias nascentes tivessem exsurgido a jusante poucos dias antes do acidente.

Na manhã de 5 de Junho uma fuga apareceu no talude jusante da barragem junto ao encontro direito. O alarme foi dado. Dois *bulldozers* que procuravam colmatar a brecha foram apanhados pela erosão interna crescente no corpo da barragem. Perto do meio-dia a barragem ruiu. À noite toda a albufeira se encontra esvaziada. As cidades de *Idaho Falls* e de *American Falls Dam* sofreram perdas apreciáveis.



Figura 9 – Sequência de imagens da ruptura da barragem de Teton

<http://www.geol.ucsb.edu/faculty/sylvester/Teton%20Dam/Teton%20Dam.html>

A partir deste acidente o *Bureau of Reclamation* passou a cumprir um programa rigoroso de segurança de barragens. Cada estrutura passou a ser inspeccionada periodicamente no que respeita à estabilidade sísmica, falhas internas e deterioração física.

ROTURA DA BARRAGEM DE *ASNALCOLLAR* – 25 DE ABRIL DE 1998

Como resultado da rotura da barragem de contenção da bacia de decantação da mina de pirite (FeS_2) em *Aznalcóllar* (Sevilha) ocorreu um importante derrame de água ácida e de lodos muito tóxicos, contendo altas concentrações de metais pesados, com gravíssimas consequências para a região, nomeadamente em termos ecológicos.

A barragem foi construída sobre margas expansivas. A percolação nestes materiais levou a fenómenos de expansão-retracção (figura 8). A propagação das deformações, combinada com eventual deterioração do conteúdo carbonatado das margas por ataque químico das águas ácidas dos sulfuretos aí depositados e com as vibrações provocadas pelos rebentamentos pode ter provocado o acidente.

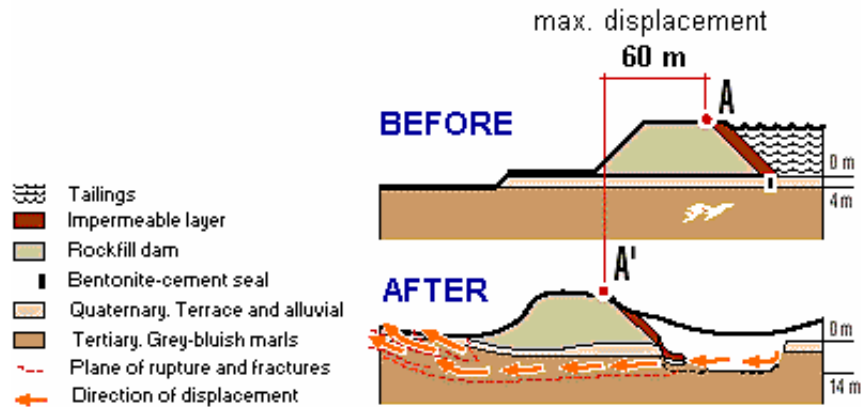


Figura 10 – Esquema da geologia, da estrutura da barragem e do deslocamento.
(<http://www.antenna.nl/wise/uranium/mdafff.html#EP98A20>)

O derrame foi de cerca de 4,5 Hm³ (3,6 de água e 0,9 de lodos) e transbordou para os rios *Agrio* e *Guadimar* ao longo de 40 km para os lodos e de 50 km para as águas, com uma largura média de 400 metros. A superfície afectada foi de 4.402 hectares.

Os lodos não chegaram a alcançar o Parque Nacional de *Doñana*, ficando retidos dentro do pré-parque, mas águas invadiram a região externa do Parque e desembocaram no Guadalquivir na área do Coto de *Doñana*, alcançando finalmente, já pouco contaminadas, o Oceano Atlântico, em *Sanlucar de Barrameda*.

Devido à extrema acidez as águas levavam dissolvidos numerosos metais pesados em quantidades consideráveis. Por seu lado os lodos estão constituídos por uma concentração de estéreis da exploração, contendo grande quantidade de metais. À superfície os solos ficaram cobertos por uma espessura de lodos variável, até 1,5 metros. Os derrames tóxicos de *Aznalcóllar* arrasaram colheitas, fauna, flora e solos. As perdas agrícolas forma estimadas na ordem dos 1.800 milhões de pesetas.

QUEDA DA PONTE DE ENTRE-OS-RIOS - 14 DE MARÇO DE 2001

A queda da ponte Hintze Ribeiro, em estado de grande degradação após 116 anos de serviço, mergulhou o país em estado de choque e constituiu um ponto de viragem na forma

como as autoridades fazem a abordagem das tarefas de manutenção neste tipo de estruturas.

TRANSCRIÇÃO DO RELATÓRIO DA "COMISSÃO DE INQUÉRITO ÀS CAUSAS DO ACIDENTE"

13 – CONCLUSÕES (...)

13.4 – O mecanismo provável de colapso da ponte consistiu na queda do pilar P4, por perda de sustentação do terreno sob a base do caixão de fundação, e no subsequente colapso da estrutura do tabuleiro.

13.5 – A causa directa do sinistro foi a descida do leito do rio na zona do pilar P4 até um nível de tal modo baixo que foi originada, por erosão ou por redução da resistência ao carregamento, a perda de sustentação do terreno situado sob o caixão de fundação.

13.6 – Nas últimas três décadas o perfil longitudinal do leito do rio ao longo do que é agora a albufeira da barragem de Crestuma sofreu um forte e generalizado abaixamento, que nalguns pontos chega a atingir valores da ordem de 28 m.

*13.7 – Tal evolução deve-se, certamente, à concorrência de dois factores principais: as **actividades de extracção de inertes** do leito do rio (cuja importância é indiciada pela existência de numerosos "fundões") e a redução da alimentação de caudal sólido provocada pela **retenção de sedimentos nas albufeiras** existentes no rio Douro e afluentes.*

5.3 O engenheiro perante a ética e o ambiente³

A prática do engenheiro e a constatação dos erros que conduzem aos acidentes tem levado a uma interiorização progressiva dos problemas éticos e ambientais na busca de soluções técnicas para os problemas de engenharia, através de uma consciência cada vez mais profunda da incidência da sua actividade na qualidade de vida das populações e no ambiente.

SERAFIM (1984) referia, a propósito da segurança de barragens que "em princípio, as barragens não dever romper, mesmo durante as condições mais críticas, principalmente porque representam um risco não desejado e não aceite para os que vivem a jusante".

³ Baseado em COSTA (1992).

Esta preocupação justifica a atribuição de elevados factores de segurança na concepção e cálculo de uma barragem, ainda que tal se venha a reflectir nos custos, como refere MINEIRO (1990): “A finalidade dos critérios de segurança é reduzir a probabilidade de colapso e as suas consequências. As medidas de segurança e as acções preventivas procuram otimizar os benefícios usando para isso boas e actualizadas práticas de engenharia, protegendo-se assim os valores económico-sociais, no que respeita à perda de vidas e bens e à preservação do ambiente”.

Os aspectos atrás referidos revelam que as motivações subjacentes ao acto de projectar em engenharia são mais profundas que os critérios económico-utilitaristas que vulgarmente baseiam as decisões relativas ao acto de construir. Elas estão intrinsecamente ligadas a noções de ética e regras de conduta que orientam a escolha das soluções mais adequadas, independentemente das chamadas questões técnico-económicas.

Dessas motivações se faz eco FERRY-BORGES (1985) ao referir que “a rápida evolução da técnica e o enorme impacto na vida das sociedades modernas impõe a consideração de aspectos éticos para além dos aspectos de índole sobretudo profissional”. E acrescenta que “problemas tais como a preservação do ambiente, a conservação dos recursos naturais, a distribuição equitativa dos custos, benefícios e riscos (...) assumem tal importância que a sua solução não se pode limitar aos foros da técnica, economia, sociologia e política, devendo ser tratados também como problemas de ética”.

A maior parte das decisões políticas apoiam-se em critérios economicistas, que possam ser traduzidos em valores monetários. Mas como quantificar os benefícios da conservação dos recursos? Se os índices de erosão de uma dada bacia hidrográfica, ou o valor de uso de uma dada área recuperada podem ser calculados com maior ou menos dificuldade, como quantificar os valores de uso estéticos, simbólicos ou éticos de uma paisagem? Como traduzir em termos monetários a preservação de uma espécie em perigo de extinção num habitat prestes a ser destruído por um empreendimento?

Ao abordar esta problemática FERRY-BORGES (1985) refere que “as decisões relativas ao acto de construir baseiam-se correntemente em considerações económicas, dentre as quais resulta a formulação dos custos/benefícios. Assim, definido um problema e identificadas as respectivas soluções alternativas, estimam-se os custos e os benefícios que lhe correspondem e elege-se como solução aquela alternativa para a qual a diferença (ou a relação) entre benefícios e custos toma valores máximos”. E assinala justamente que uma das mais importantes dificuldades de aplicação dos critérios anteriores resulta do facto de ser difícil estimar todas as consequências de uma dada decisão e ponderá-las em termos de

custo e benefício. Aspectos correntemente designados como intangíveis contrapõem-se à simples formulação em termos económicos”.

Definindo como "intangíveis" os "aspectos de fruição dos bens básicos da vida que o acto de construir pode alterar", aquele autor faz notar que "não existe uma fronteira nítida entre tangíveis, expressos em valores monetários correntes e intangíveis". Sugere então que "um dos modos de solucionar o problema da não consideração dos intangíveis numa análise custo/benefício consiste exactamente em atribuir-lhes valor monetário". Mas, uma vez que "esta solução é contrariada pelos casos em que as consequências da decisão têm aspectos puramente éticos, os quais não podem ser medidos pela atribuição de valores económicos" fica-se "perante um dilema: ou alargar o âmbito de aplicação dos esquemas económicos, ou efectuar análises separadas dos aspectos económicos e éticos. Qualquer destas soluções é preferível à omissão da consideração dos intangíveis" (FERRY-BORGES, 1985).

EXEMPLO DE APLICAÇÃO

As considerações anteriores podem ser ilustradas através de um exemplo referido por FERNANDEZ (1989):

Considere-se por hipótese os custos de construção de uma estrada entre 2 localidades separadas de 10 km. Aqueles só poderão ser avaliados com base em informação detalhada da topografia, geologia, hidrologia, tráfego, materiais de construção, etc. Considerando apenas, para efeitos de demonstração, as condições topográficas, ter-se-ia:

- 1 - No caso de as 2 localidades se encontrarem num terreno plano, o traçado em linha recta custará x ;
- 2 - Se entre as 2 localidades existir uma elevação, o traçado poderá ter de rodeá-la ou de a atravessar em túnel, podem fazer subir os custos para $2x$, por hipótese;
- 3 - Se entre as 2 localidades existir um rio profundo poderá ser necessário projectar uma grande ponte: os custos poderão então ser de $5x$.

Ou seja, o projectista sabe perfeitamente que a topografia representa uma clara condicionante para o cálculo dos custos de uma obra. A ninguém surpreende que uma estrada em relevo acidentado seja mais cara que numa zona plana; ou que os desmontes em rocha sejam mais caros que escavações em solos brandos, etc..

Mas se entre as 2 localidades existir uma área de elevado interesse ecológico – uma zona húmida a preservar, por exemplo – o custo da estrada pode ter de ser multiplicado por 2, por 5 ou mesmo por 10, dependendo das características do ecossistema em causa. Tal circunstância não deveria surpreender ninguém, pois é evidente que o factor ecológico tem de ser considerado com a mesma seriedade que os demais.

“Nem tudo o que é tecnicamente possível é ecologicamente aceitável”, assim sublinha LANGER (1986) a posição de princípio da IAEG (associação internacional dos geólogos de engenharia) segundo a qual é essencial ter em conta, não só os factores que afectam a fiabilidade e a eficiência das construções, mas também, em medida não inferior, os problemas de protecção ambiental e do uso racional do ambiente.

6. NOVOS CAMPOS DE APLICAÇÃO DA GEOTECNIA

As exigências de protecção ambiental estimularam, principalmente a partir da década de 80, novos desenvolvimentos no campo da Geotecnia. FOLQUE (1990) define Geotecnia Ambiental como a disciplina vocacionada para o estudo de novas áreas do conhecimento, como sejam a utilização dos resíduos, a remoção de terrenos e disposição de materiais à superfície, a extracção de fluidos do subsolo, a criação de lagos artificiais e o armazenamento subterrâneo. Em cada um destes domínios, a Geotecnia Ambiental, deveria, segundo este autor, intervir no sentido de minimizar os impactes negativos no ambiente dos diversos empreendimentos.

Por exemplo, no que respeita a **aterros sanitários** (figura 11), os últimos 20 anos assistiram a modificações radicais no que se refere às tecnologias de construção e exploração dessas infra-estruturas. Essas modificações incluem o desenvolvimento de sofisticados sistemas de monitorização das águas subterrâneas, implementação de sistemas de colectores de lixiviados e biogás, instalação de geosintéticos de impermeabilização e drenagem da fundação e da cobertura e equipamentos de compactação pesada.

Mas para que esses investimentos se possam fazer os aterros têm de apresentar uma dimensão bem maior que os antigos vazadouros. Nos Estados Unidos tiveram, em média, de triplicar a sua dimensão: desde 1989, o número de aterros municipais desceu de 7.379 para 2.216 em 1999, ao mesmo tempo que a quantidade de lixo recebida por aterro subia de 92 t/dia para 300 t/dia. Em Portugal de mais de 300 locais de deposição não controlada de resíduos existentes em finais da década de 90 passou-se para pouco mais de três dezenas de aterros de RSU geridos em sistemas multimunicipais.



Figura 11 – Ilustração de um aterro de resíduos sólidos urbanos

Por outro lado, a problemática da **descontaminação de terrenos** afectados por poluição proveniente das mais diversas fontes (industriais, agrícolas e de aglomerados urbanos) e a necessidade de recuperar o uso dos territórios degradados (“brownfields”) obrigou a novos desenvolvimentos metodológicos de avaliação (figura 12), análise de risco e remediação de solos e águas subterrâneas, incluindo a integração de modelos matemáticos de caracterização dos processos de dispersão de poluentes no meio geológico (Brito *et al.*, 2006).

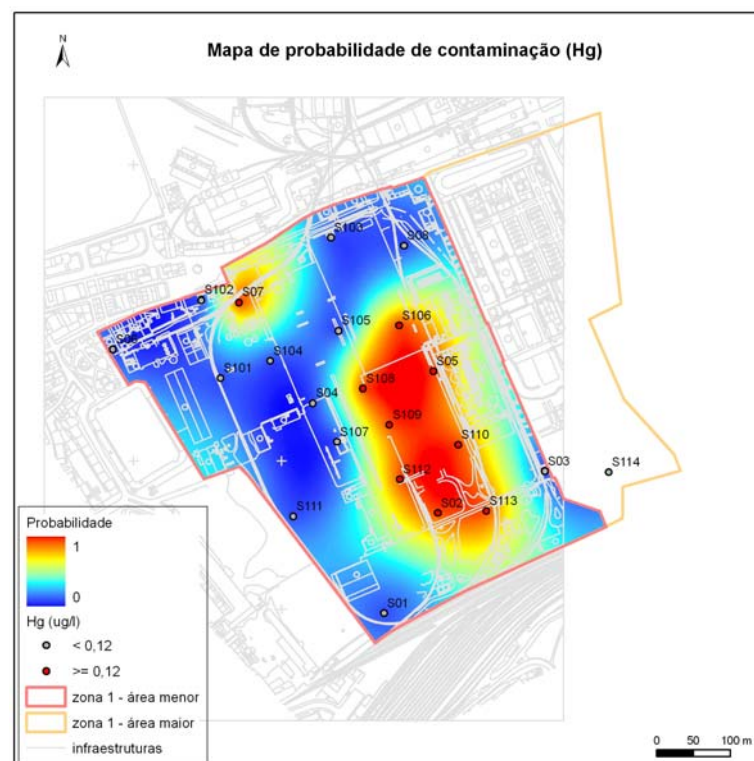


Figura 12 – Mapa de probabilidade de contaminação por mercúrio

Por sua vez, a **reciclagem de resíduos** de demolição e a valorização de resíduos de pedra para a fabricação de agregados para a construção, substituindo parcialmente

matérias-primas cuja exploração constitui actividade com impacte ambiental muito elevado (no ordenamento do território, na afectação dos recursos hídricos, etc...) estabelece novos desafios à investigação geotécnica, face às limitações do seu uso para as aplicações mais exigentes, ditadas por características físicas e mecânicas menos boas à imposição das normas europeias harmonizadas através da Marcação CE para agregados (Águas *et al.*, 2006).

Mas é no domínio dos **riscos naturais e tecnológicos** que a aplicação do conhecimento geotécnico tem registado maior evolução nos últimos anos. O número de desastres “naturais” ligados aos riscos geológicos tem aumentado nas últimas décadas. Trata-se de uma tendência observada não só em termos de frequência mas também na magnitude da destruição. Em consequência, o número de vítimas e os impactes sociais, económicos e nas infra-estruturas são causa da maior preocupação da sociedade civil e dos governos.

Os riscos geológicos mais conhecidos são destruidores, rápidos e afectam muita gente, bens e ecossistemas. Nos últimos 20 anos do século XX foram responsáveis pela morte de 3 milhões de pessoas, tendo afectado severamente outros 800.000 milhões (Oliveira, 2000). Mortes relacionadas com riscos geológicos são maioritariamente atribuídas a inundações e sismos. Escorregamentos de terras são também outra causa importante. O custo total associado a estes fenómenos aumentou 10 vezes nos últimos 40 anos (Ligtenberg, 2003). Mas existem outros riscos geológicos que não proporcionam desastre imediato mas podem provocar prejuízos substanciais à sociedade como sejam a contaminação de solos e águas, a erosão costeira ou a escassez de recursos não renováveis - estima-se que os países industrializados consumam cerca de 20 t/ano de recursos geológicos sólidos por pessoa (Oliveira, 2000).

Por outro lado a vulnerabilidade das populações aos desastres “naturais” está a aumentar, especialmente nas áreas urbanas. Estas parecem atrair o risco geológico. De facto o mesmo risco geológico terá muito mais impacte nas cidades, onde vive muito mais gente, do que nas áreas rurais. Actualmente mais de 50% da população mundial vive em cidades, 25 das quais com mais de 10 milhões de habitantes. A expansão urbana inapropriada tende frequentemente para áreas de risco como planícies de inundações, colinas instáveis ou terrenos recém-desmatados, com desprezo pelas condicionantes geológicas e geotécnicas, amontoando populações vulneráveis.

Reconhecendo os factos aqui expostos a Geotecnia tem vindo a dedicar cada vez mais atenção à predição das catástrofes, à avaliação das zonas de risco, à prevenção dos danos, ao projecto de remediação, à gestão e protecção da água, do solo e das matérias-primas, à selecção cuidada dos locais para a construção... em poucas palavras, poupar dinheiro e

recursos para a sociedade e as futuras gerações. De facto, muitos dos riscos geológicos podem ser prevenidos, minorados ou mesmo evitados se engenheiros e urbanistas estiverem conscientes do interesse em integrar geotécnicos nas equipas de planeamento urbano (McCall *et alia*, 1996).

EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Na sequência da queda de um bloco de 95 toneladas do Monte da Lua (um caos de blocos situado em frente da vila de Sintra) em 29 de Janeiro de 2002 foi feito um estudo detalhado dos parâmetros geotécnicos de cerca de 200 blocos tendo em vista a execução de um mapa de risco geológico referente à susceptibilidade de queda de blocos. O objectivo pretendido foi obtido com a aplicação de análise estatística multivariada com vista à discriminação dos blocos em termos de mobilidade potencial (estática e dinâmica) dando uma classificação de perigosidade potencial para cada bloco, combinado com a simulação de trajetórias prováveis em função do modelo digital de terreno (Almeida et al. 2006)

A figura 13 mostra a simulação das trajetórias em direcção à área urbana de Sintra para os blocos mais perigosos.

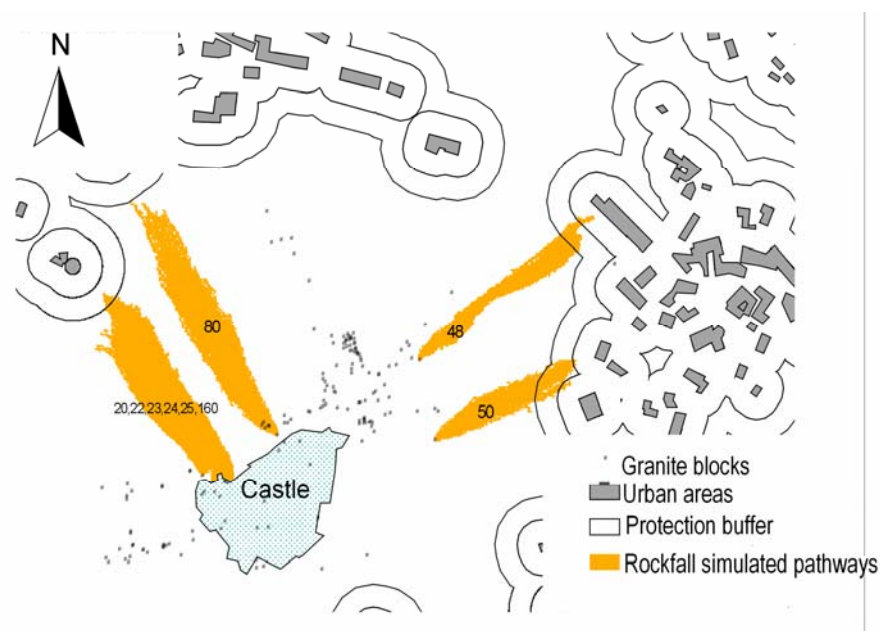


Figura 13 - Simulação das trajetórias em direcção à área urbana de Sintra

FONTES DE INFORMAÇÃO E MAIS LEITURAS EM:

Almeida, J. A.; Costa, C.; Kullberg, J.C.; Vargas, H. E Águas, C. (2006) Análise de perigosidade e risco da queda de blocos na serra de Sintra. *Actas X Congresso Nacional de Geotecnia*, Vol. 1, pp. 39-48, Lisboa.

Brito, G., Costa, C. E Vendas, D. Modelação geoestatística e SIG na investigação in situ e remediação de áreas industriais contaminadas com metais pesados. *Actas X Congresso Nacional de Geotecnia*, Vol. 3, pp. 823-832, Lisboa.

Costa, C. N. (1992) – “As pedreiras do anticlinal de Estremoz. A geologia de engenharia na exploração e recuperação de pedreiras”. Dissertação doutoramento, 470 p., Lisboa, UNL.

Águas, C.; Costa, C.; Curto, P. E Presumido, M. Reciclagem de resíduos de construção e demolição. Alguns exemplos portugueses. *Actas X Congresso Nacional de Geotecnia*, Vol. 3, pp. 691-700, Lisboa.

Fernandez, H. Santiago (1989) – “The study of the environmental impact”. *Revista Col. Ingenieros*, Barcelona (11), pp. 18-27.

Ferry-Borges, J. (1985) – “Garantia de qualidade na construção”. I Lição Manuel Rocha. *Geotecnia* (44), pp. 9-53.

Folque, J. (1990) – “Engenharia geotécnica e os problemas do ambiente”. *Vértice* (22), Lisboa.

Goodman, Richard E. (1993) – “Engineering Geology: Rock in Engineering Construction”. John Wiley & Sons, London, 432 p.

Jamiolkowski, M. (2004) – “Tower of Pisa. Geology’s role in the great works of engineering for conservation of the monument”. 32nd International Geological Congress, Florence, Italy, August 20-28, 2004

Jamiolkowski, M. (1997) – “Leaning Tower of Pisa. A summary of the present situation”. International IAEG Symposium, Athens, June 1997, 15 p.

Ligtenberg, J. H. (2003) – “Advice Document to the European Commission on Civil Protection and Natural Hazards”. European Federation of Geologists.

LNEC (1962) – “Vocabulário de Estradas e Aeródromos “.

McCall, G.J.H., Mulder, E.F.J. de & Marker, B.R. (1996) – “Urban Geoscience”. 273 pp. Balkema, Rotterdam. ISBN 9054106433.

McLean, Adam C.; Gribble, Colin D. (1992) – “Geology for Civil Engineers, Second Edition”. E & FN Spon, London, 314 p.

Mineiro, A. (1981) – “Mecânica dos Solos e Fundações”. Vol. 1 Introdução. 99 p. FCT/UNL.

Mineiro, A. (1990) – “Dimensionamento de barragens de aterro: Novos critérios de segurança”. VII Lição Manuel Rocha. AGAA, FCT/UNL.

Mulder, Ed de (1998) – “Geoproblems in urban centres in EU countries and Norway” – *Proceedings “Geologia e Geotecnia no Planeamento e Gestão Urbana”* FCT/UNL, Monte de Caparica, April 1998.

Nascimento, U. (1990) – “Contribuição para a história da Geotecnia em Portugal”. *Geotecnia* nº 58, pp. 3-16.

Oliveira, R. (1986) – “Geologia de Engenharia e Mecânica das Rochas. Conceitos fundamentais. Metodologia de estudo dos maciços rochosos”. II Simpósio Sul-americano de Mecânica das Rochas, pp. 203-214. Porto Alegre, Brasil.

Oliveira, R. (2000) – “Geotechnics, development and environment”. Livro Homenaje Jiménez Salas, Madrid, Janeiro.

Rocha, M. (1981) – “Mecânica das Rochas”, 446 p. LNEC, Lisboa.

Serafim, J. Lajinha (1984) – Preface. Proc. INT. Conf. Osafety of Dams. Coimbra, p. 3-14.