

Caracterização Geotécnica da Colina do Castelo Abordagem preliminar para a estimativa do Risco Sísmico

I. Moitinho de Almeida ¹, I. F. Lopes ², F. Almeida ³ e P. Teves Costa ⁴

SUMÁRIO

A estrutura geológica existente na colina do castelo de São Jorge, modelada em formações miocénicas, corresponde a um suave monoclinal para SSE. Os afloramentos são escassos tornando necessário recorrer à interpretação de dados de sondagens. O topo da colina é morfológicamente condicionado por um nível de calcários e arenitos, onde assentam as muralhas do castelo. Sob este nível encontra-se uma sequência de níveis arenosos, com intercalações de bancadas areníticas, alternando com níveis silto-argilosas, com intercalações calcárias. Na zona de Alfama, um conjunto de acidentes tectónicos dá origem a uma estrutura complexa, com levantamento da sequência a sul.

Apesar de cada unidade apresentar fácies dominantes, o comportamento é condicionado pelas características das diversas litologias que incluem bancadas calcárias muito resistentes, níveis silto-argilosos fortemente sobreconsolidados e bancadas de areias compactas, localmente pouco resistentes. Assim, tendo em vista a avaliação das diferenças de comportamento, procura-se, através da determinação de parâmetros físicos expeditos, caracterizar as principais litologias.

1 - Prof. Auxiliar, Centro de Geologia e Departamento de Geologia F.C., Universidade de Lisboa

2 - Bolseira de Investigação, Programa PRAXIS XXI

3 - Prof. Auxiliar, Departamento de Geociências, Universidade de Aveiro

4 - Prof. Auxiliar, Centro de Geofísica e Departamento de Física F.C., Universidade de Lisboa

INTRODUÇÃO

Portugal, e em particular a cidade de Lisboa, tem sido afectado, ao longo da história, por sismos de intensidade moderada a forte. O sismo de 1 de Novembro de 1755 foi o mais gravoso de todos, e destruiu quase completamente a cidade de Lisboa. Contudo, a descrição dos danos observados pressupõe a ocorrência de diferentes níveis de movimento do solo que devem estar associados com as diferentes propriedades geotécnicas das formações mais superficiais e com a irregular topografia da cidade.

Desde o início da década de 80 que vários investigadores se têm preocupado em estudar a resposta sísmica dos solos da cidade de Lisboa (SNPC, 1983; Teves-Costa, 1989). Contudo, devido à escassez de dados experimentais, os trabalhos têm-se desenvolvido, sobretudo, no domínio teórico (Teves-Costa, 1989; Teves-Costa *et al.*, 1992; ; Teves-Costa *et al.*, 1995). O trabalho aqui apresentado, enquadra-se no âmbito de um projecto de investigação que inclui o estudo de pormenor da Colina do Castelo, com vista à caracterização do risco sísmico, não só do ponto de vista físico como também da sua componente social, e pretende contribuir para melhorar o conhecimento das propriedades físicas das camadas superficiais existentes nesta área.

ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO E GEOMORFOLÓGICO

A colina do Castelo de São Jorge constitui um relevo assimetricamente circunscrito, limitado a Norte e a Este por linhas de água que correspondem a arruamentos de grande declive, enquanto que a Sul e Oeste os limites são mais encaixados, correspondendo às margens dos vales do Tejo e do Esteiro da Baixa - Ribeira de Arroios.

O relevo foi talhado em formações sedimentares da Série Miocénica de Lisboa, constituídas por alternâncias de níveis arenosos, argilosos e calcários, inclinando suavemente para Sudeste. A atitude geral das camadas condicionou a assimetria do relevo e a presença de bancadas mais resistentes, que constituem o topo da colina, permitiu a sua preservação.

As unidades da Série Miocénica de Lisboa que se encontram representadas na Colina do Castelo incluem, do topo para a base:

M_{Va} - Areias com *Placuna miocenica* e “Calcários do Casal Vistoso”

M_{IVb} - “Areias da Quinta do Bacalhau”

M_{IVa} - “Argilas do forno do Tijolo”

M_{III} - “Calcários de Entre-Campos”

M_{II} - “Areolas da Estefânia”

M_I - “Argilas e Calcários dos Prazeres”

No vale do Tejo e do Esteiro da Baixa as formações miocénicas foram escavadas e cobertas por aluviões quaternárias. As formações miocénicas e as aluviões estão, em geral, cobertas por depósitos superficiais, que incluem aterros e depósitos de vertente.

No conjunto da Série Miocénica, que correspondeu à sedimentação no estuário do “Tejo”, encontram-se registados diferentes ciclos sedimentares, incluindo ambientes com maior ou menor influência marinha, acompanhados de grandes variações verticais e laterais de fácies. Neste contexto, as unidades adoptadas para a sequência da série, embora

predominantemente constituídas por determinada fácies litológica, incluem diferentes litologias.

Como quase toda a área da colina do Castelo tem intensa ocupação urbana, os afloramentos acessíveis limitam-se a alguns retalhos dos calcários e arenitos (M_{Va}) que servem de fundação à muralha. No estudo das condições geológicas e geotécnicas torna-se, assim, necessário recorrer aos estudos que incluem sondagens. O conjunto de relatórios analisados permitiu elaborar alguns perfis interpretativos e definir a estrutura geológica local. Na figura 1 apresenta-se um perfil, aproximadamente N-S.

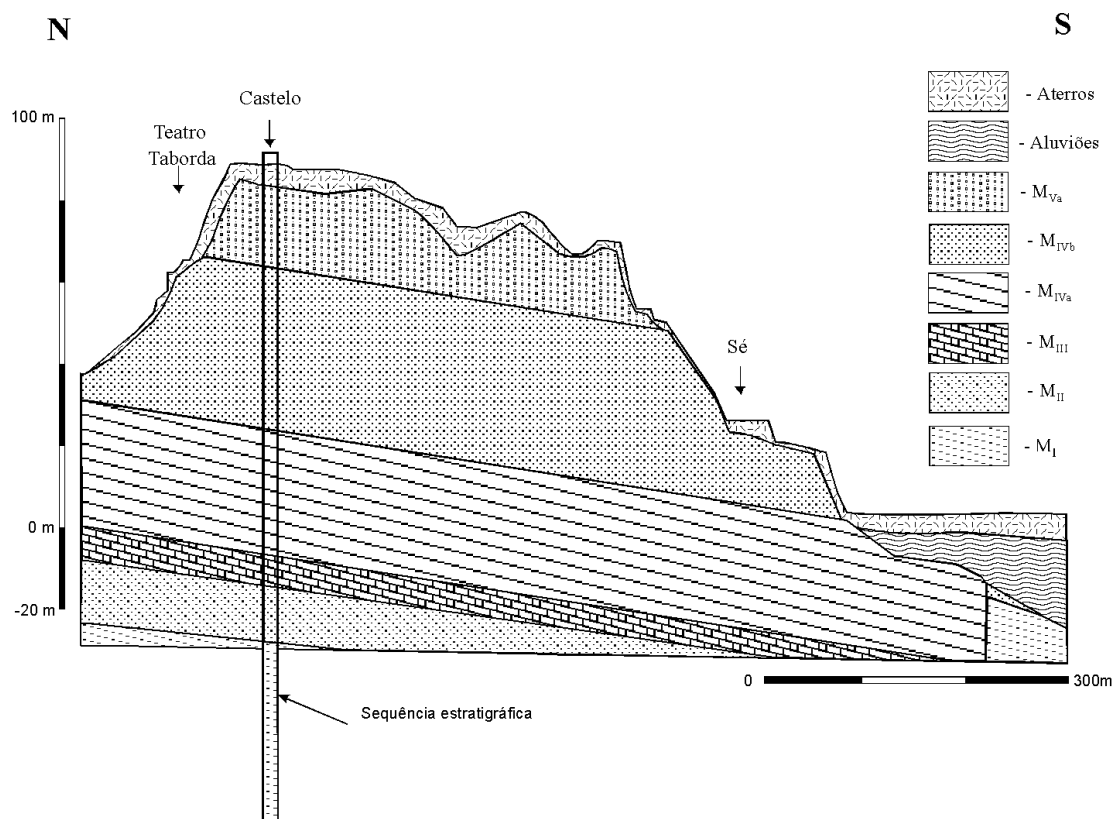


Figura 1 - Colina do Castelo - perfil geológico interpretativo.

Na definição da sequência estratigráfica considerada na modelação (figura 1) as espessuras das diferentes unidades (Tabela 1) foram determinadas tendo em conta as sondagens mais próximas. Os valores encontram-se dentro dos intervalos indicados na carta geológica (Almeida, 1986).

Tabela 1 - Colina do Castelo - espessura das unidades litostratigráficas

	Aterro	Miocénico					
	at	M_{Va}	M_{IVb}	M_{IVa}	M_{III}	M_{II}	M_I
espessura	5m	22m	40m	30m	10m	18m	50m

CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

As unidades miocénicas presentes na Colina do Castelo, apesar de globalmente poderem ser referidas pelas fácies litológicas dominantes, são caracterizadas por elevada variação vertical e lateral. Deste modo, o comportamento das diferentes unidades será sempre condicionado pelas características das litologias presentes.

No conjunto de dados analisados, incluindo amostras recolhidas nas diferentes unidades e compilação de informação existente, considerando trabalhos de síntese (Almeida, 1991, Oliveira, 1997) e relatórios de estudos geotécnicos, é possível definir e caracterizar os principais tipos litológicos.

Para efeitos de sistematização, as principais fácies litológicas existentes nos terrenos miocénicos podem ser agrupadas, do ponto de vista geotécnico, em 4 litologias, caracterizadas por alguns parâmetros médios:

Areias - São solos incoerentes, em que mais de 70% das partículas têm dimensões superiores a 0.06mm. Na maior parte dos casos são solos que apresentam uma granulometria pouco extensa onde as classes dimensionais dominantes são as areias finas (0.2 a 0.06mm), seguidas das areias médias (0.2 a 0.6mm). A matriz, não plástica, é quase exclusivamente constituída por siltes (0.002 a 0.06mm).

Areolas - São solos com alguma coerência, não plásticos, predominantemente constituídos por siltes. A fracção grosseira (>0.06mm) é, normalmente, inferior a 40% e em grande parte constituída por areias finas. Nos siltes a distribuição pelas classes dimensionais é mais uniforme, incluindo siltes grosseiros (0.02 a 0.06mm), siltes médios (0.006 a 0.02mm) e siltes finos (0.002 a 0.006mm). As argilas (>0.002mm) podem atingir os 10%.

Argilas - São solos coerentes, plásticos. A fracção grosseira é, em regra, inferior a 20%. A fracção fina é predominantemente constituída por siltes médios a finos e argilas.

Calcários - São rochas predominantemente carbonatadas (%CO₃>40%). A fracção detrítica inclui bioclastos de dimensões muito variadas e areias. A fracção pelítica é normalmente minoritária. Neste conjunto estão agrupados materiais com diferentes géneses e evolução, incluindo entre os principais tipos arenitos de cimento calcário, calcários bioacumulados e calcários bioedificados. Na maior parte dos casos correspondem a rochas brandas mas nalguns casos podem atingir resistências mais elevadas.

A partir da análise de dados bibliográficos e de sondagens é possível atribuir valores médios à composição, em termos de grupos litológicos, a cada uma das unidades da série miocénica (Tabela 2). No entanto, apesar de ser relativamente fácil, a partir da composição textural, individualizar 3 grupos de solos (areias, areolas e argilas), as diferentes descrições encontradas permitem apenas separar os solos argilosos dos solos arenosos. As areolas deverão estar, em princípio, englobadas no grupo das areias.

Para além da tentativa de definir uma imagem que traduza com o maior rigor possível a sequência a considerar na modelação do comportamento sísmico local, tem-se vindo a estudar as principais características das diferentes unidades. Os dados obtidos, tendo em conta a variação lateral e vertical de fácies, permitem confirmar que dentro da série miocénica as características geotécnicas estão associadas à litologia e, uma vez que se tratam de solos fortemente sobreconsolidados que sofreram numa primeira fase uma história geológica semelhante, as variações de propriedades dependem da história geológica mais recente,

incluindo a formação da morfologia actual, dando origem a solos superficialmente descomprimidos.

Tabela 2 - Composição das unidades litostratigráficas

	Aterro	Miocénico					
	at	M _{Va}	M _{IVb}	M _{IVa}	M _{III}	M _{II}	M _I
“areias”	100%	50%	60%	10%	35%	60%	5%
“argilas”	-	30%	30%	85%	15%	30%	80%
“rochas”	-	20%	10%	5%	50%	10%	15%

As principais características são apresentadas em termos de valores máximos e mínimos determinados (Tabela 3). Considerou-se que para este caso os parâmetros mais relevantes são o teor de carbonatos (%CO₃), a densidade natural (ρ), a densidade das partículas (Gs), o índice de vazios (e) e o teor de água natural (ω). No caso dos solos argilosos é também importante ter em conta os limites de consistência; limite de liquidez (ω_L) e limite de plasticidade (ω_P).

Tabela 3 - Características dos solos e rochas miocénicos

	%CO ₃		ρ		Gs		e		ω (%)		ω_L (%)		ω_P (%)	
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
areias	-	28	1.51	2.04	2.43	2.64	0.28	0.77	1	20	-	-	-	-
areolas	-	12	1.96	2.22	2.56	2.72	0.30	0.46	3	20	-	-	-	-
argilas	-	30	1.69	2.34	2.53	2.88	0.33	0.76	10	37	45	72	13	49
calcários	40	70	2.11	2.50	2.66	2.70	0.10	0.34	0	6	-	-	-	-

Embora dependentes das condições locais, podem considerar-se estes valores como prováveis, e, em termos de estimativa, aplicáveis a estes materiais. A localização e variação do nível freático é um dos factores importante na determinação do comportamento destes terrenos, no entanto, na maior parte dos casos, os dados existentes são insuficientes para essa avaliação.

CARACTERIZAÇÃO GEOFÍSICA

Ensaio de sismica de refração

Com o objectivo de se estimar as velocidades de propagação das ondas sísmicas nas formações mais superficiais existentes na Colina do Castelo, decidiu-se realizar perfis de refração sísmica de modo a permitir a determinação *in situ* das velocidades das ondas P e S.

Devido às condicionantes da execução de um perfil sísmico em meio urbano, apenas foi possível a realização de 2 perfis, um de 66 m de comprimento (na encosta Norte) e outro de 6 m (na encosta Oeste). Ambos os perfis assentaram sobre a formação miocénica M_{IVb} - “Areias da Quinta do Bacalhau”. A adicionar à dificuldade técnica de execução do perfil, juntou-se a

dificuldade na interpretação, complicada pela referida variação vertical e lateral de fácies, típica da série miocénica, e existência de uma camada superficial heterogénea e muito descomprimida.

Numa primeira análise suspeitou-se da existência de ondas P e S convertidas na primeira interface de discontinuidade, perturbando de um modo muito importante a nitidez do registo e dificultando, obviamente, a interpretação. Para contornar esta dificuldade, desprezou-se a primeira camada (de cerca de 60 cm de espessura) e sujeitaram-se os dados a um tratamento estatístico, obtendo-se, deste modo, uma primeira aproximação dos resultados.

De modo a confirmar estes primeiros resultados efectuaram-se mais 2 perfis em afloramentos da mesma formação, localizados no Areiro. Os valores obtidos estão sintetizados no quadro seguinte:

Tabela 4 - Velocidades de ondas P e S nas “Areias da Quinta do Bacalhau” (M_{IVb})

Local	V_P (m/s)	V_S (m/s)
Encosta Norte	1360	830
Encosta Oeste	1018	625
Areiro	1015	565

Modelação matemática

Nesta primeira fase do trabalho, optou-se por testar um modelo unidimensional de uma coluna de solo com as propriedades físicas das formações existentes na colina do castelo. Na realidade, para simular o movimento sísmico na colina do Castelo seria necessário construir um modelo bi-dimensional pormenorizado, com a definição das propriedades das diferentes unidades geológicas (espessuras, densidades, velocidades de propagação e amortecimento). Contudo, muitas destas propriedades ainda são desconhecidas, pelo que se deixa a modelação bi-dimensional para uma segunda fase.

A coluna de solo seleccionada encontra-se assinalada na figura 1. Efectuaram-se três modelos: o primeiro corresponde às grandes unidades apresentadas na figura 1, e cujas propriedades foram estimadas de acordo com os dados de sondagens (para as espessuras), os dados laboratoriais (para as densidades) e os dados recolhidos em bibliografia especializada (para as velocidades e o amortecimento). Os dois outros modelos, efectuados de acordo com a litologia existente em cada unidade, são modelos compostos por 15 camadas, menos espessas que as anteriores, e cujas propriedades foram estimadas de modo idêntico. Atendendo ao facto de se terem determinado valores máximos e mínimos para a densidade de cada litologia, estes dois últimos modelos diferem apenas no valor atribuído para a densidade de cada camada.

A figura 2 sintetiza os resultados obtidos na modelação. Considerou-se a incidência vertical de uma onda P e de uma onda SV na base da coluna de solo, de amplitudes unitárias. Os resultados vêm expressos em termos das funções de transferência que nos indicam a amplitude do movimento vertical e do movimento horizontal, para as frequências de 0 a 12.5Hz. Pode observar-se que as diferenças entre os três modelos não são muito significativas: a divisão das grandes unidades geológicas em camadas litológicas, produz um ligeiro aumento na amplitude da resposta, e um desvio do pico de amplitude para as altas frequências.

Estas funções de transferência só podem ser consideradas uma aproximação muito grosseira do comportamento sísmico da colina, em virtude de não se estar a considerar o carácter bidimensional da estrutura. São um indicador do efeito da sucessão de camadas mais brandas a alternar com camadas rochosas, na amplitude do movimento sísmico.

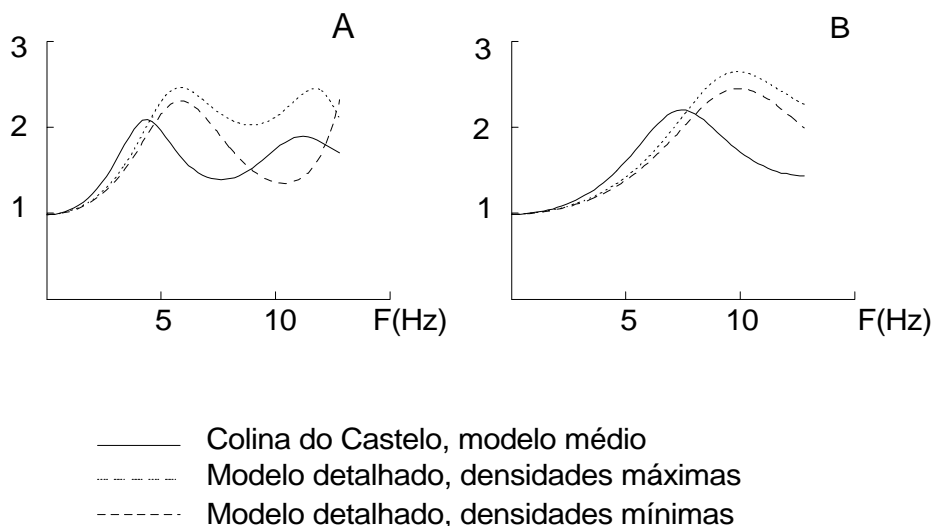


Figura 2 - Funções de transferência teóricas calculadas para a coluna de solo seleccionada:
 A - Movimento horizontal produzido pela incidência vertical de uma onda S;
 B - Movimento vertical produzido pela incidência vertical de uma onda P.

CONCLUSÕES

Na definição das principais características geotécnicas das formações miocénicas que constituem a colina do Castelo é necessário ter em conta as variações verticais e laterais de fácies. Procurou-se neste trabalho sintetizar a informação existente agrupando os materiais em 4 fácies litológicas; “areias”, “areolas”, “argilas” e “calcários”.

Os valores das velocidades obtidos experimentalmente, por meio da execução de perfis de refração sísmica, são considerados preliminares em virtude da técnica e do equipamento utilizados poderem não ser os mais adequados para as condições de campo. O ideal seria poder utilizar uma fonte explosiva e enterrar convenientemente os geofones; contudo, um procedimento destes é muito difícil de efectuar em meio urbano. Pensa-se confirmar estes resultados, recorrendo a outra técnica de execução experimental e utilizando outro tipo de equipamento. Convém, no entanto, realçar que os valores das velocidades determinados estão dentro da gama dos valores referidos por outros autores.

A modelação matemática ensaiada (unidimensional) mostra que a alternância de camadas mais ou menos rijas, superficialmente descomprimidas, provoca uma ligeira amplificação do movimento introduzido na base. No entanto, pensa-se que a resposta sísmica da colina é fundamentalmente bidimensional e que só após o ensaio de um modelo bidimensional será possível tirar mais algumas conclusões. Nessa altura, será possível

correlacionar os danos observados em sismos passados (nomeadamente no sismo de 1755) com a topografia da colina.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela JNICT, através do Projecto PRAXIS n°2/2.1/CTA/118/94.

Os autores agradecem a colaboração das empresas que facilitaram a consulta de dados geológicos e geotécnicos.

REFERÊNCIAS

Almeida, F. M. (1986) - Carta Geológica do Concelho de Lisboa. Escala 1:10.000. *Serviços Geológicos de Portugal*.

Almeida, I. M. (1991) - Características Geotécnicas dos Solos de Lisboa. *Dissertação apresentada à Universidade de Lisboa*.

Oliveira, R. (1997) - Estudos geológicos e geotécnicos para o projecto da Ponte Vasco da Gama, em Lisboa. *6º Cong. Nac. Geotecnia, IST, Conferência Especial (Versão provisória)*.

SNPC (1983) - Programa de acções para minimização do risco sísmico – Fase I. *Primeiro relatório final. Serviço Nac. de Protecção Civil, Lisboa*.

Teves-Costa, P. (1898)- Radiação Elástica de Uma Fonte Sísmica em Meio Estratificado - Aplicação à Microzonagem de Lisboa. *Dissertação apresentada à Universidade de Lisboa*.

Teves-Costa, P. and L.A. Mendes-Victor (1992) - Site Effects Modelling Experiment. *Proc. 10ª Conf. Mundial de Engenharia Sísmica, Madrid, 19-24 Julho, p.1081-1084, Balkema, Rotterdam*.

Teves-Costa, P., J.A. Costa Nunes, M.L. Senos, C.S. Oliveira and D. Ramalhete (1995) - Predominant frequencies of soil formations in the town of Lisbon using microtremor measurements. *Proc. 5ª Conf. Intern. Zonagem Sísmica, Nice, 17-19 Outubro, p. 1683-1690*.