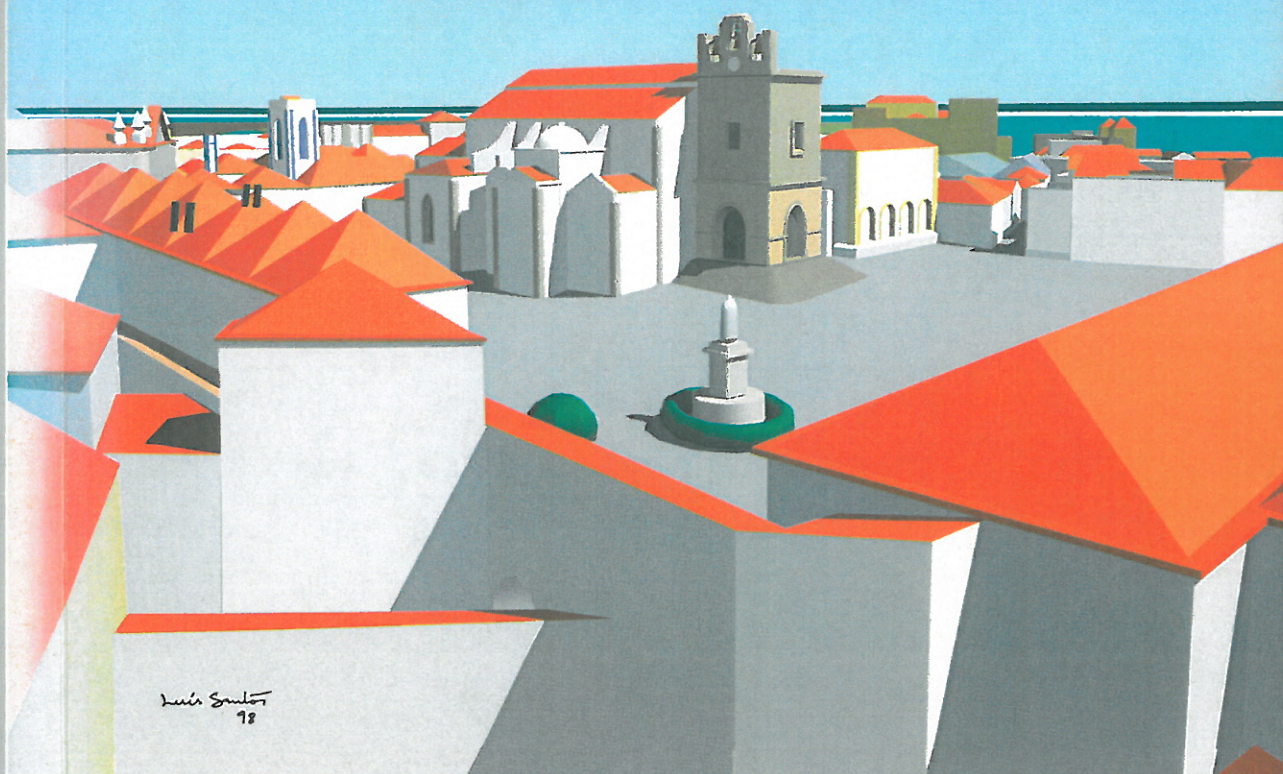


4.º ENCONTRO NACIONAL
sobre
SISMOLOGIA e ENGENHARIA SÍSMICA

SÍSMICA 99

2.^{ème} RENCONTRE en GÉNIE PARASISMIQUE
des
PAYS MÉDITERRANÉENS



FARO, 28 - 30 de OUTUBRO de 1999

ORGANIZADO POR:



Editor:

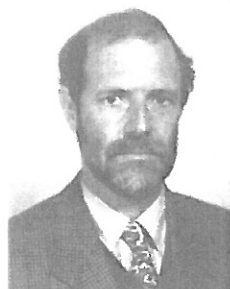
Comissão Organizadora
Carlos A. P. Martins



Ana M. Malheiro
Geóloga
LREC
Ponta Delgada



C. A. Fraga
Eng^o Civil
Director, LREC
Ponta Delgada



C. S. Oliveira
Prof. Catedrático
DECivil – IST
Lisboa

Escorregamentos e danos nas vias de comunicação causados pelo sismo de 9 de Julho de 1998 no Faial – Pico – São Jorge

Resumo

O sismo de 9 de Julho de 1998 (magnitude $m_d=5,8$ e epicentro a NE do Faial), causou importantes danos nas estruturas geológicas das ilhas do Faial e São Jorge e esporádicos no Pico. Neste trabalho descrevem-se e cartografam-se os danos típicos ocorridos: escorregamentos superficiais e outros envolvendo maiores volumes de material, compactações, queda de muros de suporte de terras e movimentos de massa. Finalmente, estabelecem-se algumas correlações com os movimentos sísmicos.

Abstract

The July 9, 1998 earthquake (magnitude $m_d=5.8$ and epicentre to the NE of Faial), caused important damage to geotechnical structures in Faial and São Jorge islands, Azores. This paper describes the typical failures and presents some discussion on the causes for those failures.

INTRODUÇÃO. BREVE CARACTERIZAÇÃO DO SISMO

O sismo de 9 de Julho de 1998 nas ilhas do Faial, São Jorge e Pico causou inúmeros danos quer ao nível de construções quer ao nível das estruturas geológicas e geotécnicas.

O presente trabalho, expandindo largamente as descrições apresentadas em [1], analisa os extensos danos ocorridos nas estruturas geológicas e geotécnicas e tenta relacionar as suas causas com diversos parâmetros relativos quer à geometria e caracterização mecânica dos solos constituintes dessas estruturas, quer às características do movimento sísmico verificado, movimento este influenciado pela presença de falhas geológicas.

Não se analisa a influência da geologia superficial no movimento intenso do solo. Este tópico importante será objecto de tratamento próprio.

Procedeu-se a um levantamento no campo das principais ocorrências no que respeita a danos em vias de comunicação (estragos no pavimento, em obras de arte e em taludes de aterro e de escavação) e a movimentos de massa. Estas ocorrências, devidamente cartografadas, foram agrupadas em diversas categorias conforme as suas características, tendo-se feito uma breve descrição de alguns dos casos mais interessantes.

Às 5:19 h de 9 de Julho de 1998 ocorreu um sismo de magnitude $m_d=5,8$ e epicentro localizado na parte norte do canal que separa as ilhas do Pico e Faial, Figura 1 [2]. De acordo com Madeira [3] o sismo terá sido provocado por uma rotura no cruzamento de dois sistemas de falhas com deslocamento levógiro numa falha com direcção NNW-SSE e alguma componente na vertical. Esta rotura, que poderá ter-se propagado alguns km para SSE, produziu um conjunto de ondas sísmicas com forte componente no sentido SE, e componente vertical de alguma importância pelo menos nas zonas mais próximas do epicentro. O sismo foi registado num acelerógrafo analógico antigo colocado no Observatório Príncipe de Mónaco na Cidade da Horta a cerca de 15 km do epicentro [4]. O registo indica acelerações máximas horizontais de cerca de 400 cm/s^2 e verticais de 330 cm/s^2 , uma duração de 22 seg e um espectro de resposta das componentes horizontais com maior conteúdo na banda de 1 a 2 Hz. Foi sentido fortemente em toda a ilha do Faial onde atingiu intensidades Mercalli Modificada máximas de VIII/IX na região mais próxima do epicentro. As acelerações estimadas para estes locais são por vezes superiores a 0.5 g, conforme foi possível verificar através da análise do comportamento dinâmico do Farol da Ribeirinha [5], que ficou seriamente danificado. O comportamento de diversas estruturas simples, como floreiras nos cemitérios, estatuetas, chaminés e até o comportamento das partes das casas mais danificadas, indicia um forte movimento do solo na direcção NNW-SSE, acompanhado de uma componente vertical também de grande importância.

O abalo principal foi seguido por um enorme conjunto de réplicas, algumas de magnitude elevada, que provavelmente agravaram o grau de danos de muitas estruturas.

Para informação mais detalhada ver [2].

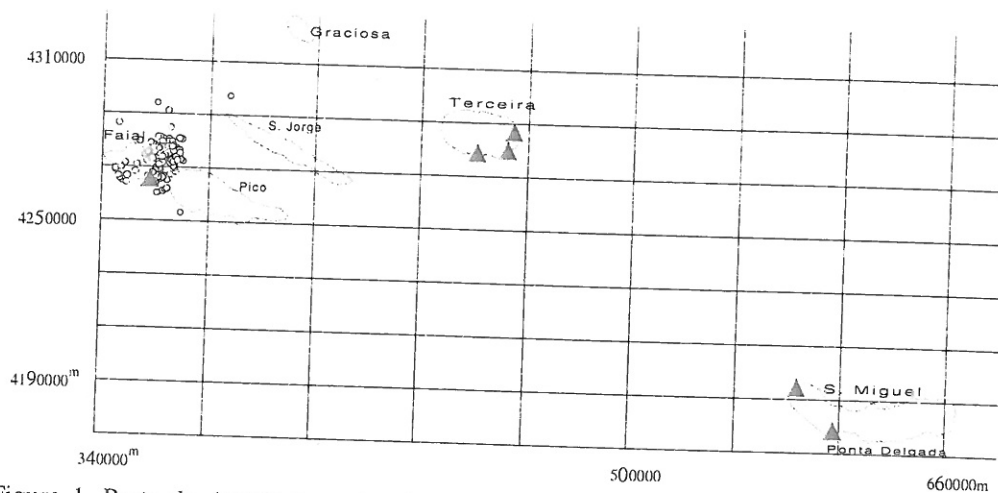


Figura 1. Parte do Arquipélago dos Açores com localização do epicentro de 9 de Julho de 1998 (★), estações onde se registaram os movimentos fortes (▲) e algumas das principais réplicas

DANOS NAS VIAS DE COMUNICAÇÃO

Ao longo das estradas da ilha do Faial, e também do Pico, o sismo deixou algumas marcas mais ou menos intensas, concentradas em maior número e gravidade nas zonas onde a intensidade do sismo foi maior, devido à proximidade, quer relativamente ao epicentro, quer relativamente à localização de falhas geológicas existentes.

Essas marcas evidenciam-se nos danos observados, que abrangem, de um modo geral, todas as zonas da estrada e que vão desde a existência de fissuras no pavimento até ao colapso de muros de suporte e de obras de arte (nomeadamente pontes) passando pelos deslizamentos de solos e/ou desmoronamentos de blocos de rocha nos taludes de escavação e de aterro.

Para efeitos de sistematização deste trabalho consideraram-se os danos ocorridos, em função da sua tipologia, agrupados do seguinte modo: (i) escorregamentos em taludes de escavação (+); (ii) danos em taludes de aterro (*); (iii) danos em muros de suporte (Δ); (iv) danos em obras de arte () (pontes e aquedutos); e (v) danos nos pavimentos e muros de guarda (o).

Na carta apresentada na Figura 2 localizam-se os diversos danos observados identificados pelo símbolo correspondente ao agrupamento a que respeitam. Efectuando a sobreposição com as falhas geológicas identificadas na ilha do Faial, quer por J. Madeira [6], quer por V. H. Forjaz [7], verifica-se que há uma concentração de danos nas imediações das principais falhas, o que reflecte a função que estas desempenharam na propagação das ondas sísmicas.



Fig. 2: Implantação das principais ocorrências em estruturas geológicas e geotécnicas – ilha do Faial

Com

(i) E

Os d
local
relev
desli:
basic
que s
São o
talud
acçãc
De q
falha.

(ii) I

Os d
apare
super
Os de
sobre
As fis
ao eix
o pav
sismo
fazend
e o ter
É im
plataf
pelo
acompl

(iii) l

Mais
cedên
Horta
são m

(i) Escorregamentos em taludes de escavação

Os deslizamentos ocorridos em taludes de escavação, com excepção de duas ou três situações localizadas nas escarpas de falha da Ribeirinha e da Lomba Grande, não causaram danos de relevo nem impediram a circulação nas estradas. Na verdade, trata-se na sua maioria de deslizamentos superficiais envolvendo um reduzido volume de material constituído basicamente pelo coberto vegetal e pela própria vegetação, incluindo por vezes alguns blocos, que supostamente já se encontrariam em situação pouco estável.

São deslizamentos que se enquadram num processo de estabilização natural dos respectivos taludes, em áreas muito localizadas, que já estariam numa situação limite de estabilidade. A acção do sismo apenas provocou a aceleração do processo.

De qualquer modo, é de referir que estes escorregamentos localizam-se nas imediações de falhas geológicas, sendo a maior parte nas próprias escarpas de falha.

(ii) Danos em taludes de aterro

Os danos observados em taludes de aterro das estradas referem-se essencialmente ao aparecimento de fissuração no topo do talude, indicando o início da materialização de superfícies de escorregamento.

Os dois deslizamentos que efectivamente se verificaram em taludes de aterro situam-se ambos sobre escarpas de falha, um na da Lomba Grande e o outro na da Espalamaca.

As fissuras observadas na plataforma do topo dos taludes apresentam uma direcção paralela ao eixo da estrada e, em muitos casos localizam-se precisamente na interface entre a valeta ou o pavimento e a berma. Esta constatação leva-nos a interpretar que a acção das vibrações do sismo provocou uma sobrecompactação dos aterros (na sua maioria de natureza pomítica), fazendo surgir as fendas visíveis à superfície, as quais correspondem à interface entre o aterro e o terreno natural.

É importante salientar que todas estas situações foram observadas em estradas cujas plataformas assentam numa secção transversal de perfil misto. Esta interpretação é reforçada pelo conhecimento que se tem do facto de que a construção destes aterros não foi acompanhada de uma compactação adequada.

(iii) Danos em muros de suporte

Mais uma vez nas proximidades das falhas geológicas existentes verificaram-se diversas cedências de muros de suporte ao longo do trecho da Estrada Regional (E.R.) 1-1ª, entre a Horta (Espalamaca) e a Ribeira Funda (Cedros). Refira-se que os muros de suporte afectados são muros de gravidade, constituídos por alvenaria de pedra seca.

Em alguns casos ocorreu o colapso dos muros, noutros apenas se verificou a existência de deformações em planta e em perfil, acompanhadas muitas vezes da existência de fendas e/ou assentamentos no terraplino ocupado pela berma ou já pela valeta e pavimento da estrada. Nestes casos, as fendas são semelhantes às observadas nos taludes de aterro, isto é, dispõem-se na direcção longitudinal da estrada, paralelas ao alinhamento do muro e abrangendo em alguns casos o pavimento da estrada, que acompanha os assentamentos da plataforma.

Estas evidências pressupõem a ocorrência de uma compactação dos solos de aterro sob efeito da acção sísmica, evidenciada pela existência dos assentamentos superficiais associados à ausência de deformações horizontais nos paramentos dos muros. Esta sobrecompactação dos solos de aterro (habitualmente depositados sem qualquer controle, de encontro ao tardo dos muros de suporte), terá conduzido ao aumento do impulso activo sobre os muros, para o qual alguns deles não estavam preparados.

Na ilha do Pico, onde existem muitos muros de suporte de grande altura, possuindo uma boa construção, em alvenaria de pedra aparelhada e apresentando uma inclinação passiva no paramento exterior, nas zonas de maior incidência dos efeitos do sismo (Almagreira), verificou-se a existência de uma fenda longitudinal junto ao muro, sem que se notassem quaisquer deformações horizontais no muro. Interpreta-se assim que aqui o muro terá resistido ao aumento de impulsos causados pela sobrecompactação do aterro, evidenciado pela fenda observada.

Refira-se também que, contariamente ao que acontece na ilha do Faial, na ilha do Pico estes aterros deverão ser constituídos na sua maioria por materiais pétreos, os quais suportarão melhor os efeitos do seu adensamento sem agravar grandemente o impulso sobre os muros.

(iv) Danos nas obras de arte

As obras de arte existentes, novamente ao longo das Estradas Regionais, são basicamente pontes ou pontões de pequeno vão e aquedutos, constituídos em alvenaria de pedra seca e/ou aparelhada. As pontes e aquedutos são, de um modo geral, estruturas em arco com encontros suportados por muros de suporte dispostos de ambos os lados da estrada.

As anomalias constatadas nestas obras de arte referem-se a cedências ou colapso dos muros de suporte dos encontros, associadas à existência de acentuados assentamentos da superfície do pavimento na zona dos encontros. Estes assentamentos resultam nitidamente da compactação dos aterros sob o efeito da acção sísmica.

De um modo geral, os muros de guarda que resultam do prolongamento dos muros de suporte, quer nas pontes, quer nos aquedutos, sofreram grandes deformações horizontais e verticais, registando-se casos onde se nota claramente em alguns elementos deformações resultantes do efeito de torção.

Houve ainda duas pontes cujos danos as tornaram intransitáveis, mas mesmo nestes casos, o

processo
qualqu
mantev

Ao lon
estrada
orienta
muros
alvena
A esta
compo

(v) D

Para a
talude
fendas
coinci
assent
Situac
da Cru
Ribeir
estrad
há in
falhas

MOV

A aç
muitc
favore
locali
Calde
(pequ
Estes
não t
fregu
possi
solos

processo de colapso teve por base os desmoronamentos dos muros de suporte e não por qualquer falta de resistência do arco. Em todos os casos observados a estrutura dos arcos manteve-se sem danos.

Ao longo do trecho da E.R. 1-1ª, entre a Espalamaca e a Ribeirinha, onde a directriz da estrada é sensivelmente perpendicular à direcção da família de falhas tectónicas com orientação WNW-ESE, verificou-se o desmoronamento de algumas extensões significativas de muros de guarda, com 0,50 m de largura e com altura da ordem dos 0,60 m, construídos em alvenaria de pedra seca.

A estas situações aqui descritas não será certamente alheio o valor relativamente elevado da componente vertical da aceleração sísmica observada nos registos disponíveis.

(v) Danos nos pavimentos e muros de guarda

Para além das fissuras e assentamentos já referidos, relacionados com os danos ocorridos em taludes de aterro, muros de suporte e obras de arte, detectaram-se ainda, em locais específicos, fendas nos pavimentos com orientação WNW-ESE ou NNW-SSE, direcções estas que coincidem com as principais falhas tectónicas da zona. Estas fissuras estão associadas a assentamentos que correspondem a abatimentos das escarpas de falha.

Situações destas foram observadas na E.R. 2-2ª, onde esta cruza as falhas da Lomba Grande, da Cruz do Bravo e outras de menor relevância, como é o caso da estrada de acesso ao farol da Ribeirinha, onde o abatimento na escarpa de falha chega a ser superior a 0,50 m; mesmo nas estradas municipais, onde o pavimento térreo não permite detectar claramente estas situações, há indícios de pequenos assentamentos em alguns locais de intersecção com as principais falhas.

MOVIMENTOS DE MASSA

A acção do sismo, associada ao tipo de morfologia (zonas pouco estáveis e com inclinações muito grandes) e à constituição geológica (materiais vulcânicos) existente na ilha do Faial, favoreceu a ocorrência de um elevado número de escorregamentos que, na sua maioria, se localizaram: (i) nas arribas costeiras; (ii) nas escarpas de falha; (iii) nas paredes internas da Caldeira Central; (iv) na vertente NW do Vulcão Central; e (iv) em zonas de clinker (pequenos escorregamentos).

Estes fenómenos de movimentações de massa, que se verificaram um pouco por toda a ilha, não foram no entanto registados na zona dos Flamengos, apesar desta ter sido uma das freguesias mais afectadas pelo sismo. A acção sísmica intensa que aqui se fez sentir foi possivelmente originada pela amplificação dinâmica das ondas sísmicas ao atravessar os seus solos brandos.

(i) Escorregamentos nas zonas costeiras

Nas arribas litorais, onde naturalmente se verifica um processo de erosão ao longo do tempo, constatou-se que o mesmo foi acelerado pela acção sísmica, levando à ocorrência de inúmeros movimentos de massa.

Este tipo de escorregamentos / deslizamentos caracteriza-se genericamente pelo relativamente pequeno volume de material que envolve (bem patente nos depósitos de material resultantes, na base da arriba), e consiste na queda de solo e de fragmentos rochosos. Verificaram-se um pouco por toda a ilha do Faial e de São Jorge, assumindo maiores proporções no Faial: nas arribas entre a foz da Ribeira Seca e a Ponta da Espalamaca (na costa Este); entre a Ponta do Salão e a praia da Fajã (na costa Norte); e junto ao morro de Castelo Branco (na costa Sul).

Em São Jorge, observaram-se escorregamentos costeiros principalmente nas costas da metade ocidental da ilha.

(ii) Escorregamentos nas escarpas de falha

Muitos dos locais onde se observou a ocorrência de deslizamentos correspondem a escarpas de falha, tendo estes movimentos de massa envolvido a queda de fragmentos rochosos e algum solo. Alguns destes escorregamentos assumiram grandes proporções, como é o caso do ocorrido na escarpa de falha da Lomba Grande (Pedro Miguel).

Este escorregamento, Figura 3, com cerca de 150 metros de largura, fluiu na zona frontal, tendo alcançado uma distância máxima, a partir da base do talude, da ordem dos 150 metros.

O material mobilizado, consiste na sua maioria em piroclastos geralmente aparentando alteração, e alguns blocos de natureza basáltica também alterados. A altura máxima do desprendimento deste material foi da ordem dos 90 metros, sendo a inclinação deste talude da ordem dos 84°.

A costa da Espalamaca e a costa junto ao farol da Ribeirinha constituem outras zonas costeiras junto a escarpas de falha onde se verificaram muitos desprendimentos de material. Nesta última zona ocorreram ainda outros movimentos de massa na escarpa de falha como o que impediu o acesso ao farol da Ribeirinha.

No morro de Castelo Branco, na costa Sul, verificaram-se também algumas derrocadas provavelmente relacionadas com a falha radial que passa naquela zona.

(iii) Escorregamentos nas paredes internas da Caldeira

O interior da ilha do Faial é ocupado por uma caldeira do Vulcão Central daquela ilha. No interior desta Caldeira, principalmente nas paredes Norte e Oeste, e em torno do relevo do Altar, observaram-se inúmeros escorregamentos. No entanto, todos eles envolveram pequenos volumes de material (na sua maioria solos), correspondendo a escorregamentos superficiais.

(iv) Es

Muitos
particul
bordo e
à povoa
(cinzas
consolid
os 200
metros
substan
vertente
a existê
área afé
177.000

(v) Es

Este tip
pequeno
Faial e
Na ilha
na regi
importa
Do por
escoada
naturez
sismo,
suporte

OBSE

O sism
como a
importa
sísmica
intensic
agravar
compor
No pre

(iv) Escorregamentos na vertente NW do Vulcão Central

Muitos foram os deslizamentos ocorridos nesta vertente do Vulcão Central, assumindo particular importância, pela sua dimensão e volume de material envolvido, o ocorrido no bordo exterior da cratera e que se estendeu ao longo do vale da Ribeira do Risco, em direcção à povoação de Ribeira Funda. Este escorregamento consistiu numa avalanche de detritos (cinzas areias, pedra pomes e blocos), particularmente de depósitos pirocásticos não consolidados resultantes de uma erupção pliniana. A cabeceira deste escorregamento atingiu os 200 a 250 metros de largura, tendo o material removido alcançado uma distância de 1400 metros ao longo do vale da Ribeira acima referida. Tal avanço poderia ter sido substancialmente maior, dada a natureza do material envolvido e o declive médio das vertentes (cerca de 15°), caso os materiais envolvidos estivessem saturados de água e não fosse a existência de inúmeras criptomérias nas imediações e que terão travado aquele avanço. A área afectada e o volume de material mobilizado neste movimento de massa foi estimada em 177.000 m² e 500.000 m³, respectivamente [3].

(v) Escorregamentos em zonas de clinker

Este tipo de escorregamentos, geralmente de dimensões pouco apreciáveis e envolvendo pequenos volumes de material, ocorreram na ilha do Pico, não se tendo verificado nas ilhas do Faial e São Jorge, pelo menos de forma significativa.

Na ilha do Pico, foi particularmente notória a ocorrência deste tipo de movimentos de massa na região da Almagreira, na costa Sul. Esta zona caracteriza-se pela presença de declives importantes, suavizados com a construção de sualcos com muros de suporte de pedra solta. Do ponto de vista da geologia, pode-se considerar que a zona consiste basicamente em escoadas do tipo *aa*, com importantes níveis de clinker. Este material (clinker), dada a sua natureza desagregada, pode facilmente desprender-se, particularmente sob a acção de um sismo, favorecendo o desmoronamento de alguns taludes, o colapso de alguns dos muros de suporte acima referidos e ainda a movimentação dos terrenos.

OBSERVAÇÕES FINAIS

O sismo de 9 de Julho de 1998 veio mostrar como determinado tipo de formações vulcânicas como as existentes no Faial sofrem fenómenos de instabilidade originando escorregamentos importantes. Estes fenómenos estão directamente relacionados com a intensidade da acção sísmica actuante (acelerações superiores a 0,5 g - estimativa feita a partir dos valores de intensidade e de danos infligidos a outras estruturas das vizinhanças), sendo de notar o agravamento dos danos na proximidade de falhas geológicas e a sua dependência da componente vertical.

No presente trabalho descreveram-se as principais tipologias dos danos observados em

estruturas geotécnicas, essencialmente os escorregamentos, e procedeu-se à tipificação dos casos mais frequentes. De futuro importa procurar respostas para muitas questões levantadas, nomeadamente interessa correlacionar as ocorrências verificadas com diversos parâmetros, tais como: (i) altura do desprendimento, (ii) distância atingida, (iii) tipo de formações e (iv) declive da encosta. Outros parâmetros como o teor em água, a presença de vegetação, o grau de sobrecompactação, etc., são também importantes para a caracterização de escorregamentos que possam vir a ocorrer em eventuais sismos. O problema da amplificação devido a solos brandos deverá ser outra área de intervenção próxima.

A informação anterior é fundamental em qualquer estudo de uso do solo para que se possa proceder com segurança à definição de áreas críticas provenientes de escorregamentos, não apenas na zona de desprendimento mas também na zona atingida pelo movimento de massa.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se ao CPR - Horta e às Delegações da SRHE do Faial, Pico e São Jorge, toda a colaboração prestada na recolha de elementos. O terceiro autor participou neste trabalho no âmbito do PPERCAS, Projecto PRAXIS para o Estudo do Risco/Casualidade Sísmica do Grupo Central do Arquipélago dos Açores, Ciência e Tecnologia, nº 3/3.1/CEG/2531/95.

REFERÊNCIAS

- [1] Oliveira, C. S.; Malheiro, A. M. ; "The Faial, Pico, São Jorge Azores Earthquake of July 9, 1998"; Proc 2nd Int. Conf. Earthq. Geotech. Eng. Lisbon , A. A. Balkema, 1999.
- [2] SIVISA ; "Carta de Epicentros de 09/Julho/1998 – 31/Dezembro/1998"; Documento não publicado, Instituto de Meteorologia/ Universidade dos Açores, 1999.
- [3] Madeira, J. ; Brum da Silveira, A.; Serralheiro, A.; "Relatório sobre os Escorregamentos Provocados pelo sismo do Faial de 9 de Julho de 1998"; 1998.
- [4] Oliveira, C. S., Sousa, L. N., Guedes, J. H. C., Martins, A., Campos-Costa, A. ; "A Crise Sísmica do Faial/Pico/São Jorge Iniciada com o Sismo de 9 de Julho de 1998 vista na Rede Acelerográfica dos Açores"; Proceedings, 1^o Simpósio de Meteorologia e Geofísica da APMG, Lagos, Novembro, 1998.
- [5] Sincaian, G., Oliveira, C. S., Lemos, J. V. ; "Seismic Behaviour of an old Light-House under Strong Ground Shaking", Proceedings, 1st Spanish Assembly of Earthquake Engineering, Murcia, Spain, April 1999.
- [6] Madeira, J. ; "Estudos de Neotectónica nas ilhas do Faial, Pico e São Jorge: uma Contribuição para o Conhecimento Geodinâmico da Junção Tripla dos Açores" ; Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 1998.
- [7] Forjáz, V. H., Serralheiro, A., Nunes, J. C. ; "Carta Vulcanológica dos Açores, Centro de Vulcanologia"; Universidade dos Açores, 1990.