

## **CAPÍTULO 1. Fatores que influenciam o equilíbrio de taludes e encostas**

Na maioria dos casos existem várias causas ou fatores que contribuem para a ocorrência de um movimento de vertente. Embora um evento possa ser muitas vezes atribuído à ação de um qualquer fator que desencadeou a rotura do terreno, as instabilidades não se verificam se não existir uma série de fatores de pré-disposição que favoreçam o fenómeno. O conhecimento de todos estes fatores permite uma correta análise do talude, a avaliação do respetivo estado de estabilidade e, caso necessário, o dimensionamento de medidas para evitar ou estabilizar os movimentos.

Portanto, para diagnosticar o estado de uma encosta ou de um talude, deve-se começar por estudar os fatores que condicionam o seu estado de equilíbrio e as condições que, a qualquer momento, podem desencadear a respetiva instabilidade geomorfológica.

### **1.1. Fatores condicionantes**

Os fatores condicionantes são intrínsecos aos materiais, sendo necessário identificá-los e avaliá-los, para caracterizar as condições do ambiente geológico em que se encontra um talude ou encosta.

Nos maciços terrosos, a litologia, a estratigrafia e as condições hidrogeológicas determinam as propriedades e comportamentos do talude. No caso dos maciços rochosos, o principal fator condicionante é a estrutura geológica, ou seja, a disposição e frequência das descontinuidades e a intensidade da fraturação.

A presença e combinação destes fatores pode resultar em roturas ou movimentos dos taludes ou encostas, condicionando ainda mais os seus mecanismos de rotura (Capítulo 2). Dentro dos fatores condicionantes, as propriedades físicas e de resistência dos materiais, intimamente relacionadas com a litologia, e as características morfológicas e geométricas do talude ou encosta são fundamentais para a predisposição à instabilidade. O Quadro 1.1 resume os fatores de condicionamento e os seus efeitos na estabilidade.

Quadro 1.1. Influência de fatores condicionantes nas condições dos materiais e na estabilidade das encostas e taludes.

Fatores condicionantes		Efeitos
a) Fatores geomorfológicos	Topografia e relevo	Afeta as condições de equilíbrio
	Processos de erosão e erosão diferencial	Provoca perda de resistência e alteração do estado de tensão
b) Fatores Geológicos	Litologia	Condiciona o comportamento mecânico e hidrogeológico
	Estratigrafia	Comportamento descontínuo e heterogéneo
	Estrutura geológica	Resistência, deformabilidade Comportamento descontínuo e anisotrópico Planos de fraqueza
	Descontinuidades	Comportamento anisotrópico Planos de rotura preferencial Condicionam a direção do movimento e o tamanho dos blocos
	Processos de meteorização e alteração geoquímica	Redução das propriedades resistentes
	Propriedades geomecânicas dos materiais	Diminuição da resistência à rotura
c) Fatores hidrogeológicos e climáticos	Hidrogeologia	Provoca pressões intersticiais e erosão interna
	Meteorologia e clima	Altera o teor em água do terreno e as propriedades e resistência dos materiais

### a) Fatores geomorfológicos

#### Topografia e relevo

O relevo desempenha um papel importante, uma vez que é necessária uma determinada inclinação para que ocorram os movimentos gravitacionais em massa. A inclinação determina as condições de equilíbrio nas encostas e taludes tendo em conta os seguintes aspetos:

- a relação espacial entre a inclinação e os planos de descontinuidade das massas

planos e define a possibilidade, ou não, de que ocorram processos de instabilidade geomorfológica; estes podem ser gerados sempre que os planos de descontinuidade "aflorem" na encosta ou na face do talude, ou seja, sempre que pendam em direção ao talude, mas com menor inclinação;

- a par com a litologia e/ou estrutura geológica, a inclinação determina o tipo de movimentos; por exemplo, as escoadas podem ser geradas em solos argilosos com inclinações muito baixas, por vezes não mais do que 10°-11°; porém, as avalanches rochosas são geradas em materiais rochosos com inclinações abruptas;
- juntamente com os planos de descontinuidade, a inclinação define o volume e o peso dos blocos que se podem desprender e deslizar; e
- determina os processos de escoamento e erosão da superfície.



Figura 1.1. Nos arquipélagos da Macaronésia podem observar-se, com frequência, taludes com inclinações subverticais (Ilha da Madeira).

As quedas de blocos rochosos são mais frequentes e extensas em zonas montanhosas e escarpadas, vales encaixados com paredes verticais, das quais podem desprender-se

blocos, previamente isolados por descontinuidades, ou por ação da erosão diferencial nos materiais mais brandos.

As ilhas da Macaronésia, devido ao seu relevo abrupto e às características vulcânicas dos materiais que as formam, com escoadas fraturadas e depósitos de piroclastos que resultam em encostas muito escarpadas, são propensas à ocorrência de queda de blocos rochosos que afetam, sobretudo, as vias de comunicação.

### Processos de erosão e erosão diferencial

A erosão ou a escavação no pé das encostas, escarpas e arribas, por erosão fluvial, costeira ou outra causa, resulta na perda de resistência e na alteração do estado de tensão o que, juntamente com a falta de sustentação do material sobrejacente, pode levar à instabilidade e desencadear deslizamentos ou queda de blocos.

As arribas costeiras sujeitas à agitação marítima estão geralmente suscetíveis à instabilidade, com particular incidência nos processos de erosão e instabilização que dão origem ao recuo das mesmas (mostrado na Figura 1.6). O processo está relacionado com tempestades marítimas, especialmente se coincidirem com marés vivas.

A erosão diferencial ocorre quando há camadas compostas por materiais com diferente resistência à erosão, em que cada material é afetado a um ritmo temporal diferente (Figura 1.2).

A erosão também pode ser interna, devido a diferentes fatores, com os mesmos efeitos na estabilidade do talude. Os processos de formação e abatimento de cavidades subterrâneas associadas à presença de certos tipos de materiais podem desencadear instabilidades, especialmente se existirem materiais brandos e alteráveis.



Figura 1.2. Formação de cornijas em escoadas basálticas "aa" por erosão diferencial dos níveis de escória, em comparação com os compactos basálticos mais resistentes (Ilha de El Hierro, Canárias).

## b) Fatores geológicos

### Litologia e estratigrafia

A litologia, ou seja, o tipo de material que forma um talude, está relacionada com o tipo de instabilidade que pode ocorrer, apresentando as diferentes litologias distintos graus de suscetibilidade à potencial ocorrência de deslizamentos ou roturas (Capítulo 3). As propriedades físicas resistentes de cada tipo de material, juntamente com a presença de água, determinam o seu comportamento mecânico. Aspectos como a alternância de diferentes materiais, competência e o grau de alteração, ou a presença de camadas de materiais brandos, controlam os tipos e disposição das superfícies de rotura, que tendem a orientar-se pelos planos superiores de rocha alterada, ou por zonas de solos mais ou menos homogêneos. Nos maciços rochosos, a existência de camadas ou estratos de diferente competência também implica um grau diferente de fraturação nos materiais, o que complica a caracterização e o comportamento do talude.



Figura 1.3. Alternância de materiais de diferente competência e erosão diferencial (Ilha da Madeira).

### Estrutura geológica

A estrutura geológica desempenha um papel fundamental nas condições de estabilidade dos taludes rochosos. A combinação de elementos estruturais com os parâmetros geométricos do talude, altura e inclinação, e com a sua orientação, define os problemas de estabilidade que podem surgir.

A estrutura do maciço rochoso é definida pela distribuição espacial das suas famílias de descontinuidades, que individualizam blocos da matriz rochosa que se mantêm juntos pelas características e propriedades resistentes das descontinuidades.

A estrutura geológica, a estratigrafia e a litologia, determinam o potencial dos movimentos nos diferentes tipos de materiais rochosos e solos, e a existência de planos de descontinuidade que podem funcionar como superfícies de rotura. Nos maciços rochosos com estrutura geológica complexa (com presença de falhas, fraturas e diaclases), com zonas de alteração, etc., estes elementos predominam sobre a litologia.

### Descontinuidades: falhas, discordâncias e diaclases

A presença de descontinuidades ou "planos de fraqueza" em maciços rochosos, tais como as superfícies de estratificação, as diaclases, as falhas, etc., que se inclinam em direção à face do talude, pressupõe a existência de potenciais planos de rotura e

deslizamento, e a sua orientação e arranjo condicionam os tipos, modelos e mecanismos de instabilidade.

Um maciço fraturado ou com descontinuidades apresenta um comportamento anisotrópico e planos preferenciais de rotura. Por exemplo, um determinado sistema de fraturas condicionará tanto a direção de movimento como o tamanho dos blocos a deslizar, ou a presença de uma falha inclinada em direção ao talude limitará a área instável e condicionará o mecanismo de rotura. As alterações e singularidades estruturais, como as zonas tectonizadas ou de corte, mudanças bruscas no declive dos estratos, etc., implicam uma heterogeneidade estrutural que pode condicionar as zonas de rotura.



Figura 1.4. Maciço rochoso basáltico com disjunção colunar que facilita a queda de blocos (Ilha da Madeira).

Outro aspeto importante é a relação entre as dimensões da frente do talude e a rede de descontinuidades; em função desta relação, o comportamento do talude será definido por uma, ou algumas, macro descontinuidades (referidas à escala do talude) ou por vários sistemas de juntas e outros planos de fraqueza com uma estrutura densa, condicionando o tipo e o volume das instabilidades.

## Processos de meteorização e alteração geoquímica

Em certos tipos de solos ou maciços rochosos brandos, os processos de meteorização desempenham um papel importante na redução das suas propriedades resistentes, resultando numa intensa alteração e degradação, se estes materiais estiverem expostos às condições ambientais, como consequência, por exemplo, de uma escavação. Esta perda de resistência pode resultar na queda de material superficial e, se afetar zonas críticas do talude, como a sua base, pode levar a roturas globais, especialmente em condições com presença de água.

A meteorização, ou seja, a desintegração e/ou decomposição dos materiais geológicos na superfície, por alterações de natureza física ou química, modifica as características físicas e mecânicas e as propriedades dos materiais. Os materiais rochosos meteorizados podem, num sentido lato, ser definidos como aqueles que se encontram na transição entre rocha e solo, apresentando uma ampla gama de propriedades geotécnicas e características mistas de solos e rochas, consoante o grau de meteorização.

Este processo é condicionado pelas condições climáticas, temperatura e humidade, bem como pelos regimes de precipitação e vento, que determinam o tipo e intensidade das transformações físicas e químicas que afetam os materiais rochosos à superfície. Em função das características climáticas de uma zona, prevalecem umas ou outras ações: em climas frios, ou de alta montanha, com precipitações médias, predomina a meteorização física, basicamente controlada pelo gelo, enquanto em climas tropicais quentes, com precipitações abundantes, são predominantes as ações químicas.

A meteorização química dá lugar à decomposição das rochas e às alterações mineralógicas enquanto a meteorização física quebra e desintegra a rocha, enfraquecendo a estrutura rochosa, fragmentando os minerais e os contactos entre partículas, aumentando a superfície exposta à atmosfera e permitindo a entrada de água. As ações e os efeitos da meteorização são diferentes, dependendo do tipo de rocha, e estão diretamente relacionados com a sua composição mineralógica.



Figura 1.5. Meteorização físico-mecânica em disjunção esferoidal (Cabo Verde).

### Propriedades geomecânicas de materiais.

As propriedades físicas e resistentes dos materiais, como a coesão e o ângulo de atrito interno, e a geometria das potenciais superfícies de rotura determinam a capacidade resistente do maciço.

Os solos em geral, devido ao seu carácter isotrópico, apresentam menor complexidade no estudo da sua resistência e comportamento, enquanto nos maciços rochosos, que podem apresentar um grau de fraturação e de distribuição de descontinuidades de muito diferentes, intervêm tanto as propriedades da matriz rochosa bem como as propriedades relativas às descontinuidades. Geralmente, em rochas brandas, como as rochas argilosas, margas, gessos, etc., as propriedades resistentes da matriz rochosa desempenham um papel muito importante, enquanto no caso dos maciços rochosos formados por rochas duras e resistentes as propriedades das descontinuidades são aquelas que prevalecem e controlam a estabilidade do talude. O facto de a rotura ocorrer pelos blocos de rocha ou pelos planos de descontinuidade depende, por sua vez, das respetivas propriedades e relações geométricas.

### c) Fatores hidrogeológicos

A água, quando presente no terreno, desempenha um papel fundamental na estabilidade das encostas e taludes, uma vez que altera as propriedades físicas e químicas dos solos e rochas através de processos de erosão e de meteorização físico-química dos materiais. Os efeitos mais importantes da água nas propriedades do terreno são:

- redução da resistência ao corte dos planos e descontinuidades, diminuindo a pressão efetiva;
- aumento das forças que tendem ao deslizamento em fendas de tração, particularmente importante em taludes;
- erosão interna por fluxo sub-superficial ou subterrâneo;
- meteorização e alterações na composição mineralógica dos materiais; e
- abertura de descontinuidades pela ação do gelo-degelo, particularmente em cotas elevadas.

O controlo da água subterrânea é uma forma eficaz para estabilizar deslizamentos profundos de grande magnitude, cujo desencadeamento não está relacionado com fenómenos meteorológicos sazonais e deve-se às condições meteorológicas a longo prazo, pelo facto de que os regimes de precipitação e as condições de humidade são capazes de modificar substancialmente os níveis freáticos e o teor em água no solo. O principal mecanismo que contribui para a instabilidade é a elevação do nível freático por infiltração de água, onde o aumento do peso volúmico do terreno desempenha um papel secundário. As pressões intersticiais que atuam no interior de um talude podem ser conhecidas com recurso a piezómetros.

A infiltração das águas pluviais produz fluxos sub-superficiais e subterrâneos nas encostas, aumenta o teor em água da zona não saturada, acima do nível freático, e eleva o mesmo, recarregando a zona saturada.

A quantidade de água que se infiltra no terreno depende de vários fatores, para além da intensidade e duração das chuvas, tais como o tamanho da bacia hidrográfica, o teor em água inicial do terreno, a sua permeabilidade e transmissividade. A combinação destes fatores pode levar à instabilidade das encostas.

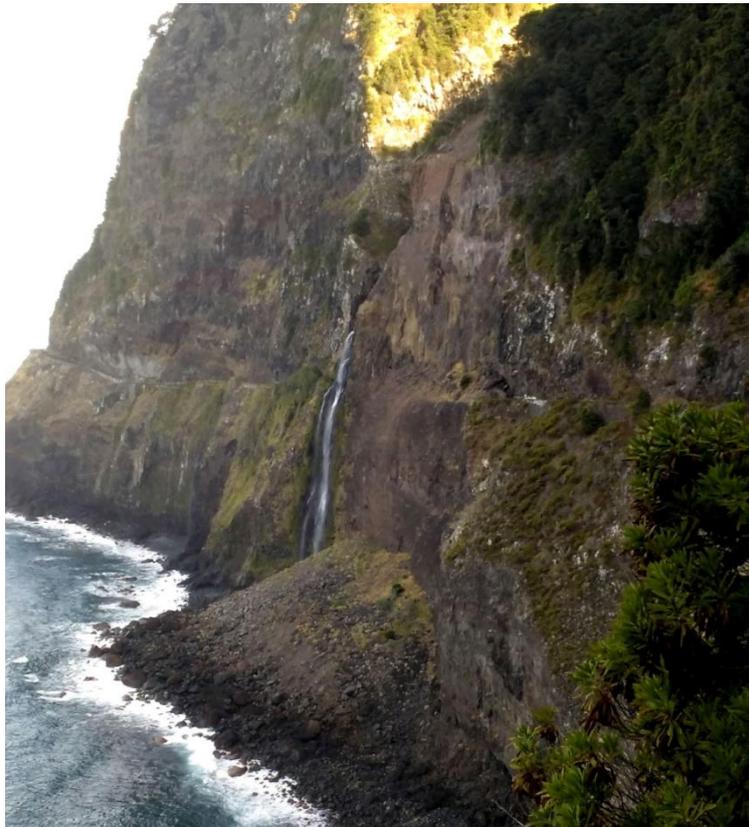


Figura 1.6. Efeitos do fator hidrogeológico numa falésia (Ilha da Madeira).

## 1.2. Fatores desencadeantes

Os fatores desencadeantes são fatores externos que modificam as propriedades ou condições iniciais dos materiais das encostas e taludes, de forma a gerar um aumento dos esforços de corte ou uma redução da capacidade resistente em determinadas zonas ou nos potenciais planos de rotura, através de ações como:

- aplicação de sobrecargas estáticas;
- aplicação de cargas dinâmicas;
- alterações das condições hidrogeológicas; e
- alteração da geometria, causando a perda de equilíbrio entre as forças que atuam nas encostas ou taludes.

Os fatores desencadeantes mais comuns e importantes são os indicados no Quadro 1.2.

Quadro 1.2. Influência dos diferentes fatores desencadeantes nas condições do material e na estabilidade das encostas e taludes.

Fatores desencadeantes		Efeitos
a) Fenómenos meteorológicos	Precipitação intensa	Modificação das condições hidrogeológicas e aumento das pressões intersticiais
	Tempestades marítimas e eólicas	Erosão, alterações nos níveis das águas e fendilhação das cabeceiras dos taludes
b) Sismicidade	Sismicidade tectónica	Alterações na distribuição de carga e do estado de tensão
	Sismicidade vulcânica	
c) Ações bio antrópicas	Escavações e aterros	Variação dos perfis de equilíbrio Alteração das condições hidrogeológicas Alterações na distribuição de cargas e estado de esforços
	Vibrações	Alterações na distribuição de carga e do estado de tensão
	Obras na rede de drenagem	Alteração das condições hidrológicas

### a) Fenómenos meteorológicos

A ocorrência de deslizamentos de terra ou queda de rochas em taludes, é amplificado na presença de eventos meteorológicos adversos, como tempestades e temporais marítimos, que trazem consigo elevados níveis de precipitação, ondulação e ventos fortes no litoral, que podem alterar o equilíbrio de forças que atuam nas encostas e taludes causando a sua rotura.

No entanto, podemos considerar que a chuva é o fator que mais influencia exerce na perda de equilíbrio de taludes nas ilhas da Macaronésia uma vez que a maioria destes eventos ocorre após chuvas intensas ou durante períodos de chuva prolongada.

A precipitação, assim como o regime climático, influenciam a estabilidade do terreno através da alteração do seu teor em água, pelo que deve considerar-se a resposta do mesmo perante:

- precipitação intensa durante horas ou dias (tempestades e temporais);
- variações sazonais (passagem de estações secas a chuvosas ao longo do ano); e
- ciclos plurianuais (alternância de períodos prolongados de seca e ciclos húmidos).

Em geral, quanto menos permeáveis forem os materiais, menor será a influência das precipitações curtas e maior será a do regime climático e as condições plurianuais, anuais ou sazonais.

Outro tipo de ações relacionadas com o clima são processos de gelo-degelo que causam a perda de resistência dos solos e podem levar a instabilidades superficiais (solifluxões) em encostas constituídas por solos localizados em zonas frias, e a queda de blocos em maciços rochosos, onde o gelo causa fraturação e meteorização do material. Nas ilhas da Macaronésia estes processos estão condicionados pela sua altitude.

### Precipitações intensas

O escoamento superficial, resultante da precipitação pode causar problemas de estabilidade significativos, ao gerarem-se fortes pressões nas discontinuidades e fissuras pelas quais a água se introduz. Além disso, na zona mais superficial do terreno, a água pode causar o desprendimento e arraste de materiais da superfície da encosta ou talude.

As chuvas intensas durante horas ou dias, alteram as condições hidrogeológicas e os níveis de água, e podem desencadear movimentos superficiais, como deslizamentos de terra e escoadas de lama ou detritos, que afetam materiais e solos alterados, e provocam deslizamentos e a queda de blocos previamente destacados do maciço, sendo também frequentes as reativações de antigos deslizamentos de terra.

A rápida infiltração da água da chuva, ao saturar o terreno superficial e ao aumentar as pressões intersticiais, explica a ocorrência dos movimentos. A falta de vegetação nas encostas, a presença de materiais soltos ou pouco consolidados e a prévia existência de roturas e instabilidades desempenham um papel fundamental devido ao aumento da capacidade de infiltração e mobilização dos materiais. O risco devido a estes processos está principalmente associado à sua ocorrência repentina e à intensidade de precipitação horária ou diária. No caso de queda de rochas ou deslizamentos de solos superficiais é um fator importante no desencadear das instabilidades.

No arquipélago dos Açores, Marques et al. (2015) realizaram um estudo estatístico dos casos de movimentos de vertentes entre os anos 1900 e 2008 na ilha de São Miguel, associando-os aos respetivos mecanismos de ativação. Nesse trabalho, os autores

concluíram que os acontecimentos desencadeados pela precipitação foram consideravelmente superiores aos demais fatores desencadeantes (Figura 1.8). Desde a década de 1980, tem-se constatado um aumento do número de eventos, o que pode ser explicado, em parte, por uma maior atenção dada a esta questão pelos meios de comunicação social, mas também pela grande instabilidade meteorológica verificada em 1986, 1996 e 1997, que causou importantes deslizamentos e escoadas detríticas.



Figura 1.7. Desprendimento/Queda de blocos na ilha de São Miguel (Açores) após um episódio de precipitação.

No âmbito do projeto MACASTAB, foram realizados três estudos específicos que relacionam os acontecimentos de instabilidade ocorridos aos níveis de precipitação com os quais se relacionam. Um foi realizado na ilha de São Miguel, nos Açores, onde as instabilidades se desenvolvem predominantemente sob a forma de deslizamentos de solos e outros dois na ilha de Tenerife, nas Ilhas Canárias, e na ilha da Madeira, onde predominam a queda de blocos de rochas. Com base nestes estudos, é possível estimar um valor quantitativo do limiar de precipitação a partir do qual a probabilidade de ocorrência de fenómenos de instabilidade é relevante.

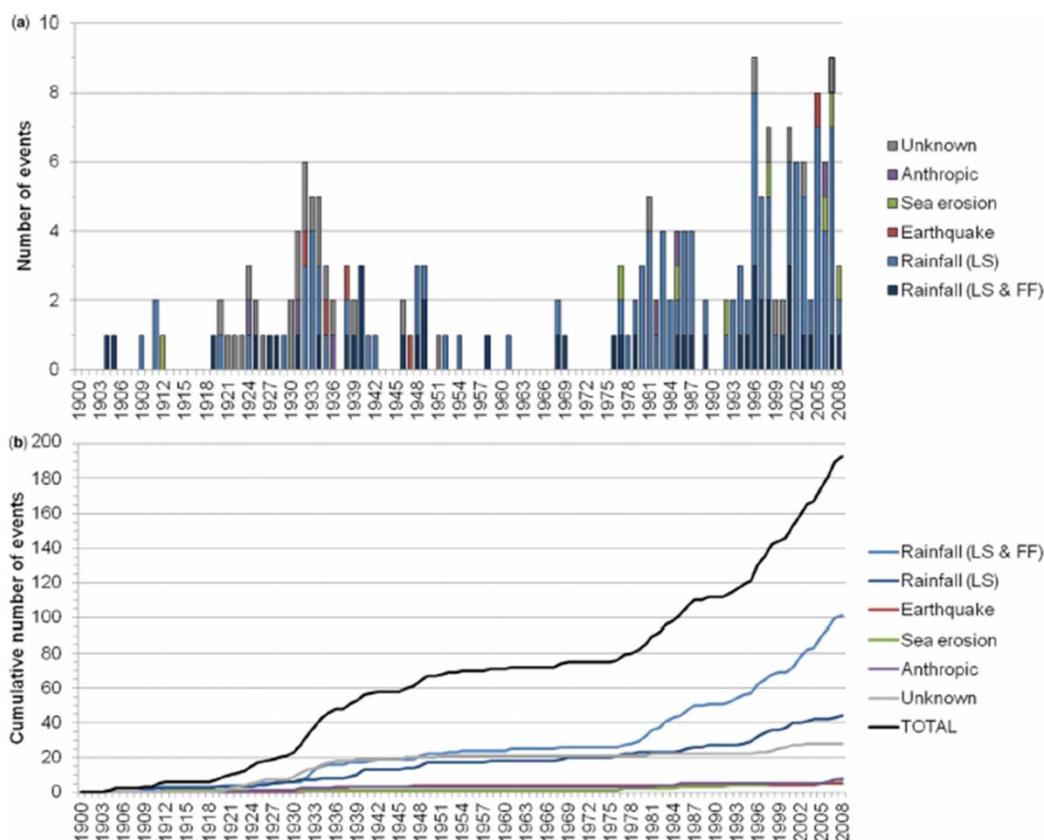


Figura 1.8. Distribuição temporal de movimentos destrutivos na ilha de São Miguel entre 1900 e 2008, tendo em conta o fator desencadeante: (a) frequência anual; (b) frequência cumulativa. LS, deslizamento; FF, escoada (Adaptado de Marques et al., 2015).

O gráfico seguinte (Figura 1.9) compara o número de eventos de instabilidade de taludes registados pelo Cabildo Insular de Tenerife na sua rede viária entre 1 de agosto de 2010 e 30 de maio de 2016, com os níveis mensais de precipitação durante esse período, podendo observar-se a estreita relação entre o nível de precipitação e o número de eventos registados.

Para o estudo dos Açores, foram utilizados dados de precipitação que foram fornecidos pela Direção Regional do Ambiente, utilizando dados de todas as estações instaladas na ilha de São Miguel entre 2012 e o final de 2018. Os registos de ocorrência foram obtidos pelo Serviço Regional de Proteção Civil e Bombeiros dos Açores (SRPCBA), relatórios internos do LREC - Açores e notícias dos jornais. Os dados utilizados são posteriores a 2012 porque a partir desse ano houve um aumento das estações meteorológicas com registo contínuo, permitindo relacionar melhor a data da

instabilidade com a precipitação que ocorreu durante o dia, e, portanto, determinar melhor a probabilidade de ocorrência.

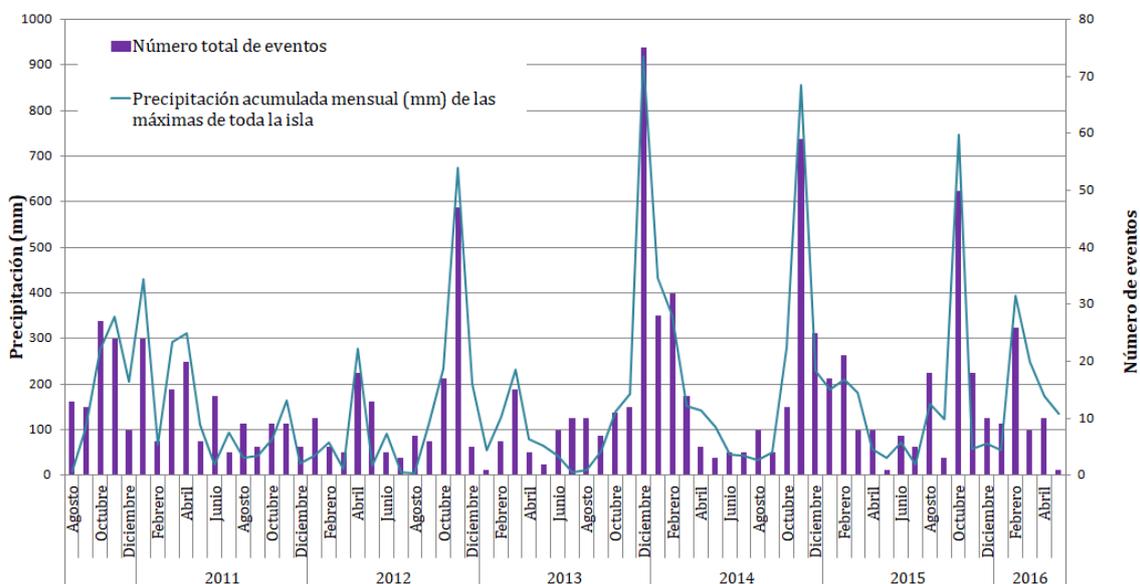


Figura 1.9. Influência da precipitação mensal com a quantidade de instabilidades produzidas. A linha azul representa a precipitação mensal acumulada e as barras o número de eventos produzidos nesse mês.

Os intervalos de precipitação considerados são os enumerados no Quadro 1.3. Isto mostra o número total de dias com precipitação nos intervalos de precipitação,  $p$ , o número de dias com eventos de instabilidade nesse intervalo, o número total de eventos, e a probabilidade do evento.

Quadro 1.3. Resumo dos dados tratados para o estudo realizado ao nível da ilha de São Miguel no período compreendido entre 2012 e 2018.

ESTUDO EFETUADO ENTRE OS ANOS DE 2012 E 2018											
INTERVALOS DE PRECIPITAÇÃO	Dias com precipitação no intervalo		Dias sem instabilidades (ñi)		Dias com instabilidades		INSTABILIDADES				
							Totais (i)		P evento		
									$\sum (i + \tilde{n}i) / \sum (i + \tilde{n}i)$		
= 0 mm	56	(2,19 %)	55	(98,21 %)	1	(1,79 %)	3	(0,24 %)	58	5,17 %	
0 < p ≤ 20	1964	(76,81 %)	1934	(98,47 %)	30	(1,53 %)	44	(3,52 %)	1978	2,22 %	
20 < p ≤ 40	336	(13,14 %)	321	(95,54 %)	15	(4,46 %)	40	(3,2 %)	361	11,08 %	
40 < p ≤ 75	143	(5,59 %)	114	(79,72 %)	29	(20,28 %)	212	(16,97 %)	326	65,03 %	
75 < p ≤ 125	42	(1,64 %)	7	(16,67 %)	35	(83,33 %)	432	(34,59 %)	439	98,41 %	
P > 125	16	(0,63 %)	0	(0 %)	16	(100 %)	518	(41,47 %)	518	100 %	
TOTAL	P = 0	56	(2,19 %)	55	(2,26 %)	1	(0,79 %)	3	(0,24 %)		
	P > 0	2501	(97,81 %)	2376	(97,74 %)	125	(99,21 %)	1246	(99,76 %)		
TOTAIS	p	2557		2431	(95,07 %)	126	(4,93 %)	1249			
	p máx (mm)	289,2									

Com base nesta recolha de informação, verificou-se que em 2557 dias analisados, apenas em 56 não houve registo de precipitação.

Como se pode ver no Quadro 1.3, nos dias em que não ocorreu precipitação, foram registados apenas três eventos de instabilidade, que podem ter, eventualmente, tido outro mecanismo de desencadeamento, representando 0,24% dos eventos ocorridos. Apesar de na gama de  $p=0$  mm ter havido 3 eventos, não há, no estudo, 4 dias sucessivos sem a existência de precipitação.

O tratamento dos dados permitiu elaborar o gráfico da Figura 1.10, no qual é possível estimar a probabilidade de ocorrência de uma instabilidade, em função da precipitação produzida no mesmo dia. Como se pode ver, a partir de 60 mm de precipitação diária, obtém-se uma probabilidade de cerca de 70% de que se produza uma instabilidade geomorfológica.

Marques et al. (2010) desenvolveram funções para expressar limiares de precipitação responsáveis por desencadear fenómenos de instabilidade. No estudo realizado por estes autores, a função  $BFI(D) = 65,34 * D^{-0.4813}$  corresponde ao ambiente de discriminação entre episódios de instabilidade geomorfológica e dias em que não houve instabilidade.

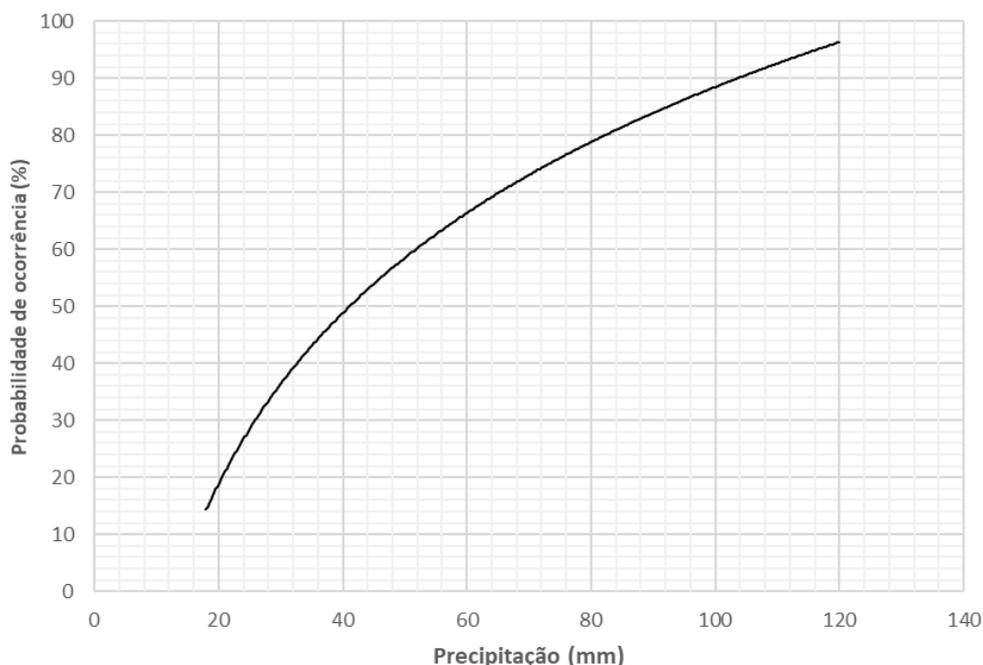


Figura 1.10. Gráfico de probabilidade de instabilidade no intervalo de precipitação no mesmo dia.

Por seu lado, o gráfico na Figura 1.11 mostra a probabilidade de um episódio de precipitação causar instabilidade no mesmo dia e até 4 dias após ocorrida a precipitação. Neste gráfico, o que se verifica é que, por exemplo, para uma precipitação de 60 mm, a probabilidade de ocorrer no mesmo dia, como já referido, é aproximadamente de 70%.

Se o evento não ocorrer nesse dia, a probabilidade desta precipitação influenciar os 4 dias seguintes, para que ocorra uma instabilidade é de aproximadamente 45%.

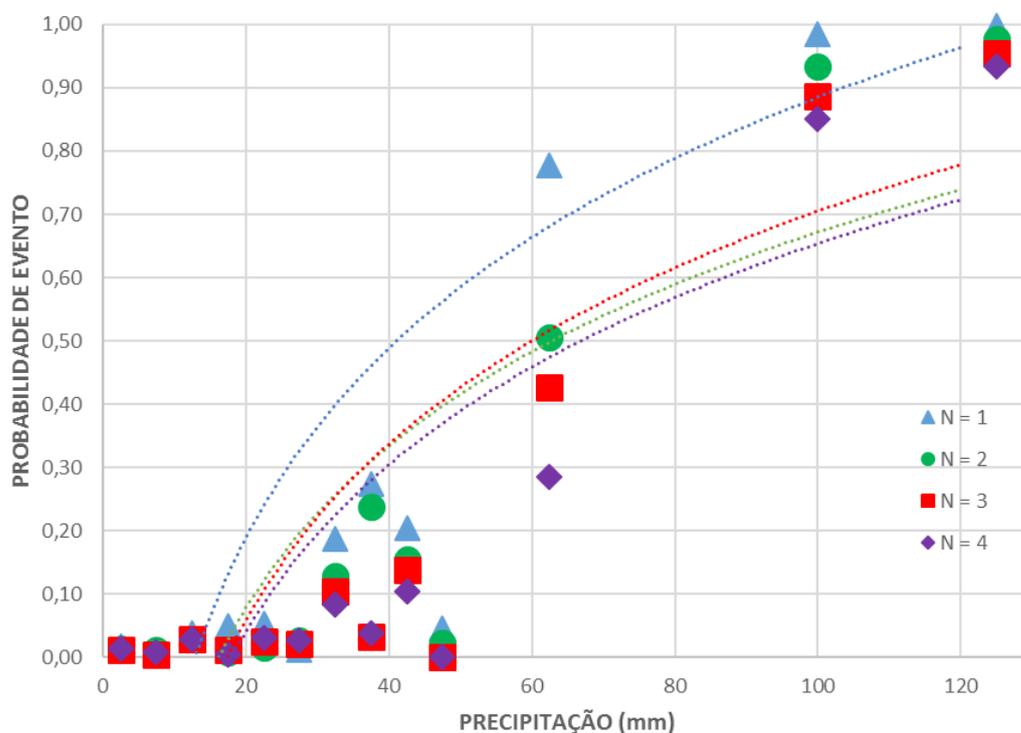


Figura 1.11. Probabilidade de ocorrência de instabilidade geomorfológica dependendo da precipitação.

Finalmente, o gráfico na Figura 1.12 representa a probabilidade de um determinado nível de precipitação diária ocorrer e que esse nível diário de precipitação cause um evento de instabilidade.

A conclusão do estudo reflete que, quando a precipitação é reduzida, a probabilidade de instabilidade na vertente também é reduzida. No entanto, quando ocorre precipitação elevada, especialmente a partir de 60 mm, a probabilidade aumenta consideravelmente.

Para a sua aplicação em territórios predominantemente rochosos, foi desenvolvido um estudo estatístico semelhante utilizando a base de dados do Cabildo Insular de Tenerife.

Seguindo um procedimento semelhante, foi possível estabelecer uma relação de causalidade entre o nível de precipitação que se pode concentrar em determinada área geográfica e a probabilidade de um evento desse tipo se desenvolver.

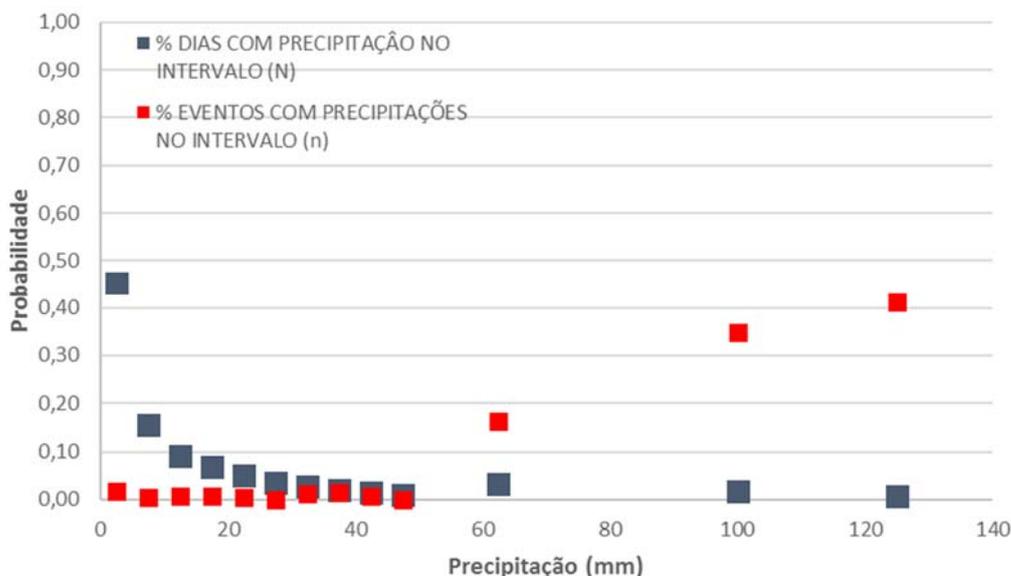


Figura 1.12. Relação entre a percentagem (%) de dias com precipitação no intervalo N e a % das instabilidades que ocorreram com a precipitação no intervalo N.

Verifica-se que aquela relação será afetada pelo tipo de orografia que caracteriza a área onde se pretende realizar a previsão. Dependendo de o relevo ser mais ou menos íngreme, no gráfico na Figura 1.13 são estabelecidas duas curvas de previsão, uma para um relevo acidentado que geralmente é observado nos arquipélagos da Macaronésia e outra com maiores probabilidades, a que corresponde um nível de risco mais elevado, representando territórios nestes arquipélagos que sofrem frequentemente por via de uma orografia particularmente abrupta.

Da mesma forma, na Madeira, o processamento de dados permitiu a construção do gráfico da Figura 1.14, através do qual também é possível estimar a probabilidade de ocorrência de instabilidades devido à precipitação produzida nas últimas 24 horas. Neste caso, uma precipitação diária de aproximadamente 80 mm corresponde a uma probabilidade de 70 % de ocorrência de fenómenos de instabilidade.

A aplicação destas curvas poderá ser muito útil no domínio da prevenção dos riscos, uma vez que podem facilitar a tomada de decisões para implementar medidas de proteção da população, limitando, por exemplo, a mobilidade em determinadas zonas

em resposta a um alerta de previsão de elevados níveis de precipitação a partir de um certo nível de probabilidade de ocorrência de instabilidade.

RELACIÓN ENTRE EL NIVEL DE PRECIPITACIÓN Y LA PROBABILIDAD DE SUCESO

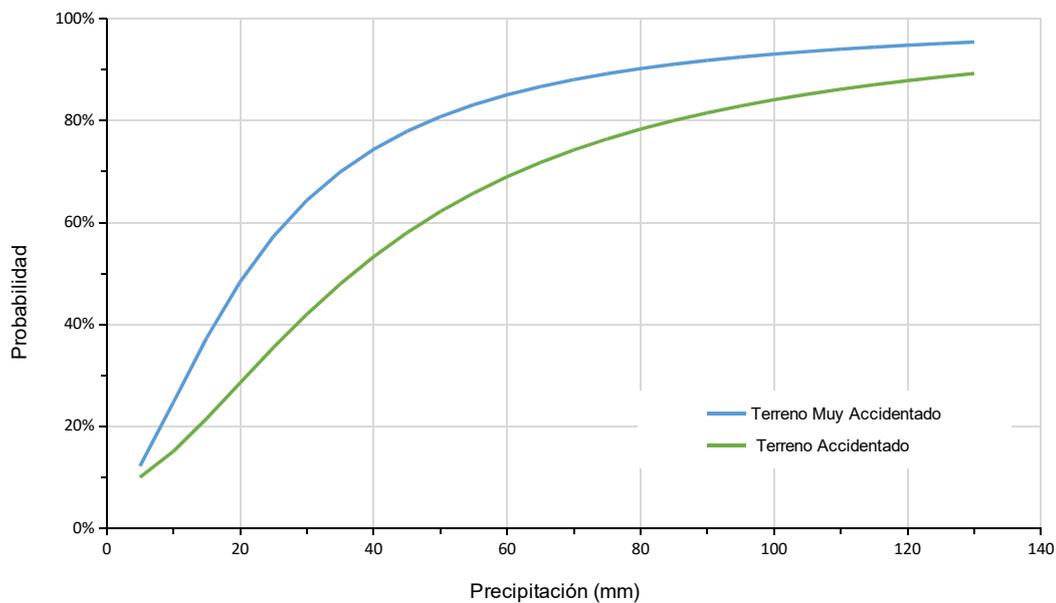


Figura 1.13. Gráfico que relaciona os níveis de precipitação e probabilidades de instabilidade para territórios de relevo acidentado e muito acidentado.

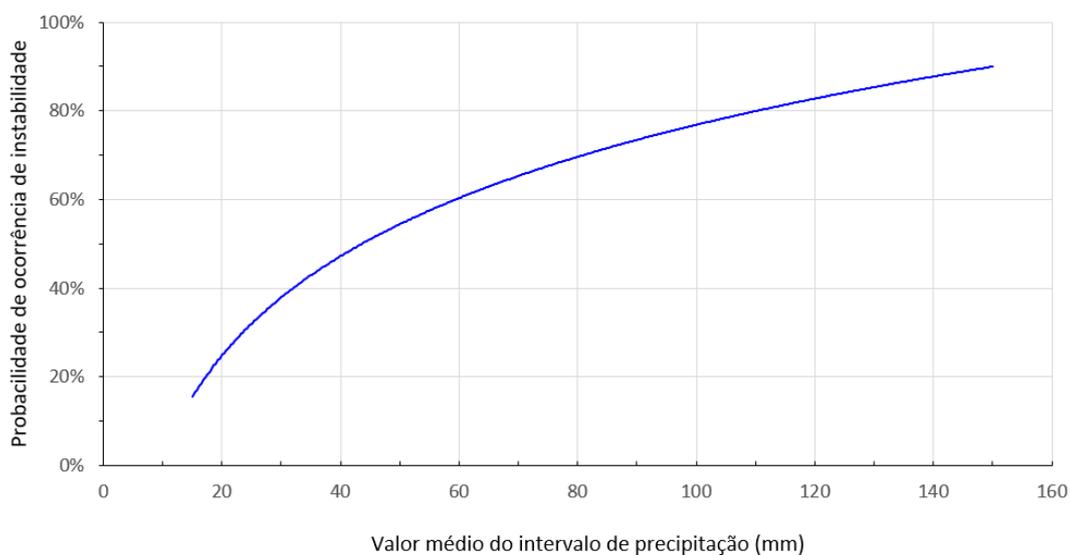


Figura 1.14. Probabilidade de instabilidade no intervalo de precipitação diária na Ilha da Madeira.

### Tempestades de vento e agitação marítima

As tempestades costeiras com forte ondulação e vento são também uma causa frequente de deslizamentos em encostas rochosas e taludes em zonas acantiladas. As principais ações de tais tempestades são:

- erosão e destruição das bases das arribas por ação ondas;
- erosão dos depósitos acumulados na base das arribas;
- inundações da base de encostas e taludes pela subida do nível do mar;
- fendas nas cristas dos taludes; e
- queda de blocos e deslizamentos em arribas com presença de rochas brandas e em maciços rochosos fraturados.



Figura 1.15. Falésia com erosão diferencial pela ação da ondulação de marés (Ilha de la Gomera, Canárias).

As tempestades atlânticas são acompanhadas por fortes ventos ciclónicos que por vezes podem atingir os 150 km/h, influenciando, juntamente com a chuva, a estabilidade das encostas e taludes que se encontram em condições precárias de estabilidade. No entanto, não são necessários ventos tão fortes para desencadear instabilidades. De acordo com a escala de Beaufort e dados observados nas Ilhas Canárias, ventos

superiores a 60 km/h são suficientes para provocar instabilidades de taludes em zonas costeiras, e a partir de 70 km/h em zonas do interior.

## b) Sismicidade

Os sismos podem causar movimentos de todos os tipos em encostas e taludes, dependendo das características e propriedades dos materiais e da magnitude do sismo e da distância ao epicentro. Ocasionalmente, os danos causados pelos movimentos de encosta superam os danos diretamente gerados pelo sismo, embora os planos de ordenamento do território e as normas de construção sismo-resistentes não mencionem especificamente os problemas de estabilidade de encostas e taludes.

As quedas de blocos são os movimentos mais frequentes causados pelos sismos, afetando blocos rochosos soltos ou rochas fraturadas e em condições limite de estabilidade.

A Figura 1.16 apresenta um exemplo das relações entre a magnitude e a distância epicentral para diferentes tipos de movimentos. No entanto, em cada caso, deve considerar-se a influência dos efeitos de sítio, ou seja, as condições relacionadas principalmente com a topografia e relevo da zona, com as propriedades mecânicas dos materiais e com a presença de água; todas elas podem acentuar a aceleração das ondas sísmicas.

Em geral, pode considerar-se que o valor mínimo da magnitude de um sismo para que possa induzir a queda de blocos soltos seja  $M_L=4.0$ . De acordo com Keefer (1984), considerando os eventos que ocorreram nos EUA num período de 20 anos, pode estimar-se a seguinte relação entre a magnitude mínima e os tipos de movimentos:

- $M_L \cong 4.0$ : queda de blocos e deslizamentos rochosos e de porções de solo;
- $M_L \cong 4.5$ : deslizamentos massivos de solos e de porções de solo;
- $M_L \cong 5.0$ : deslizamentos rochosos massivos, deslizamentos de blocos rochosos, escoadas de terra lentas e rápidas e deslizamentos subaquáticos;
- $M_L \cong 6.0$ : avalanches rochosas; e
- $M_L \cong 6.5$ : avalanches de solos.

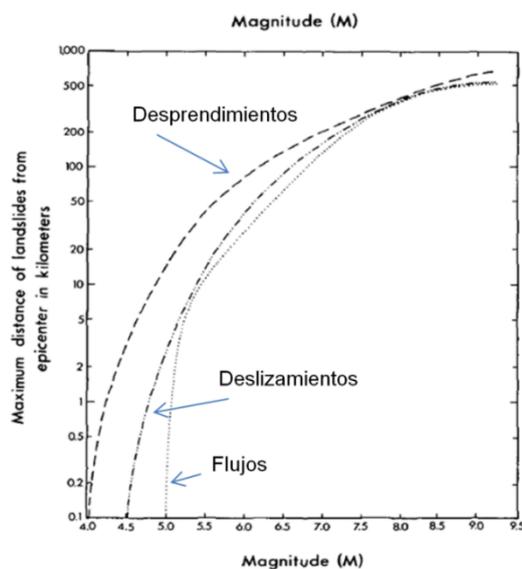


Figura 1.16. Relação entre a magnitude do sismo e a distância epicentral para o desencadeamento de diferentes tipos de movimentos (adaptado de Keefer, 1984).

### c) Ações bio antrópicas

As ações humanas modificam as condições e forças que atuam nas vertentes gerando novos estados de tensão. As escavações, a construção de edifícios, estruturas, aterros nas vertentes e utilização de explosivos em áreas próximas, entre outras, provocam a variação dos estados de tensão no terreno, das condições hidrogeológicas e das suas propriedades geotécnicas, desencadeando as consequentes instabilidades.

#### Escavações e aterros

As escavações superficiais para a construção de vias de comunicação, emboquilhamento de túneis, pedreiras e outras obras alteram os perfis de equilíbrio das encostas e podem desencadear, reativar ou acelerar movimentos, dependendo de outros fatores condicionantes, tais como a estrutura geológica, a resistência ou teor em água do terreno. Neste sentido, as escavações mais desfavoráveis são aquelas que são realizadas na base das encostas por ser esta a zona com maior contribuição para a estabilidade global da encosta.

As escavações também influenciam a percolação e os sistemas de drenagem superficial, assim como o comportamento hidrogeológico da encosta, ao variar os níveis freáticos ou dando lugar à acumulação de água em determinadas zonas.

Os aterros, terraplanagens, escombreiras, etc., quando realizados em encostas ou na cabeceira de encostas ou taludes, transmitem cargas ao terreno que podem induzir instabilidades ao modificar a distribuição das cargas e o estado de tensão.

### Vibrações

As vibrações induzidas no terreno por detonação, movimentação de máquinas e veículos pesados, etc., produzem sobrecargas dinâmicas. Estas sobrecargas modificam o estado de forças ou esforços que atuam numa encosta ou talude e podem gerar instabilidades e roturas.

### Obras na rede de drenagem

Nas encostas de áreas urbanas, as infiltrações e perdas de água dos reservatórios e das redes de abastecimento e saneamento podem induzir instabilidades geomorfológicas. A irrigação de jardins e a construção de infraestruturas para armazenamento de água, sem as medidas adequadas para impedir a sua infiltração no interior da encosta, também são causas de deslizamentos. O controlo dos sistemas de drenagem é muito importante em áreas urbanizadas. Outra causa frequente de instabilidade são as infiltrações devido a roturas nas canalizações, canais, valetas, etc..

Para além dos fatores desencadeantes de instabilidade, anteriormente descritos, o crescimento de raízes entre as rochas em zonas húmidas e o pastoreio, entre outros, são também fatores que contribuem para a instabilidade das encostas e taludes.



Figura 1.17. Exemplo de crescimento de raiz que entra nas fendas das rochas.