

### **CAPÍTULO 3. Diagnóstico prévio**

Neste capítulo apresentam-se duas ferramentas que permitem uma rápida avaliação inicial das condições de estabilidade de encostas e taludes, suscetíveis de desenvolver instabilidades. A primeira é o Índice de Suscetibilidade de Instabilidade dos Taludes em Terrenos Vulcânicos (ISTV), que tem aplicação nos arquipélagos predominantemente rochosos como os das Ilhas Canárias, Madeira e Cabo Verde, onde o fenómeno mais comum são as quedas de blocos. A segunda é a Ficha de Campo para Avaliação de Estabilidade dos Solos que tem maior relevância nos Açores onde há uma maior frequência de deslizamentos.

Quer a instabilidade já tenha ocorrido, quer se trate de um talude cujo estado se queira conhecer, deve realizar-se um reconhecimento do local e emitir um diagnóstico prévio em que se avaliem, de forma preliminar, as condições de segurança do talude ou vertente e o seu ambiente envolvente.

#### **3.1. Recolha de dados sobre um evento que já ocorreu**

No caso de a instabilidade já ter ocorrido, as consequências do acontecimento devem ser tidas em conta e devem ser recolhidas as informações necessárias para a sua avaliação. Será feita uma visita técnica para recolher, pelo menos, as seguintes informações:

- circunstâncias em que se verificou a instabilidade.
- danos: infraestruturas, edifícios, etc. que tenham sido afetados ou que possam ser afetados se ocorrer um novo evento.
- condições meteorológicas em que ocorreu a instabilidade.
- ações antrópicas que possam ter causado a instabilidade, como explosões, escavações., etc.
- outras observações relativas ao volume de materiais desprendidos, possíveis áreas fonte e proveniência, bem como a natureza litológica dos materiais e dados básicos da geometria do talude (altura, inclinação, perfil aproximado. etc.).

### 3.2. Índice de Suscetibilidade ISTV

O Índice de Suscetibilidade da Instabilidade de Taludes em Terrenos Vulcânicos (ISTV) é uma ferramenta que permite realizar uma avaliação preliminar dos taludes de forma a classificá-los de acordo com a sua suscetibilidade para gerar desprendimentos e, conseqüentemente, priorizar o estudo daqueles que apresentem um maior grau de suscetibilidade. Aplica-se a rochas vulcânicas excluindo materiais altamente meteorizados ou alterados e depósitos de solos, depósitos de vertente ou coluvionares.

A suscetibilidade não indica uma probabilidade de ocorrência, mas procura descrever a possibilidade de instabilidade sob a influência de certas condições que não são consideradas na análise. Ou seja, embora um talude possa ter menos suscetibilidade do que outro, pode apresentar maior probabilidade de gerar instabilidade se as suas condições fronteira forem mais propícias ao seu desenvolvimento.

A partir da aplicação deste índice são obtidos dois valores: o ISTV básico, e o ISTV corrigido, que multiplica o ISTV básico por um fator que é determinado pelo número de indicadores identificados no terreno ou infraestruturas e construções que podem ser afetadas pela rotura do talude.

Em primeiro lugar, o ISTV define três tipos de maciços nos quais considera, para cada caso, as características específicas que determinam o comportamento dos taludes vulcânicos face à instabilidade:

- Maciços tipo A: incluem as encostas formadas apenas por rochas duras (> 50 MPa), como as formadas pelo arrefecimento de escoadas basálticas e sálicas e de depósitos piroclásticos compactos, como tufos ou ignimbritos soldados.
- Maciços tipo B: Incluem os taludes formados por materiais piroclásticos de queda, de natureza basáltica e sálica, em que as suas partículas estão pouco ou nada soldadas e têm características de rocha branda ou solo duro; e
- Maciços tipo C: São aqueles em que existe uma alternância de materiais de diferentes competências (dura, branda) ou erosão diferencial entre camadas de materiais similares.



Figura 3.1. Exemplo de maciço do tipo A formado por uma escoada fonolítica (Ilha de Tenerife, Canárias).



Figura 3.2. Exemplo de maciço do tipo B formado por piroclastos basálticos (Ilha de São Miguel, Açores).



Figura 3.3. Exemplo de Maciço do tipo C constituído por alternâncias de escoadas e escórias basálticas, onde se pode ver a erosão diferencial entre os dois tipos de material (Ilha de Tenerife, Canárias).

Para cada tipo de maciço são indicados os fatores específicos relacionados com a sua estabilidade que devem ser analisados em cada caso: nos maciços do tipo A estuda-se o grau de fraturação e a posição dos blocos; nos do tipo B o grau de ligação e nos do tipo C o grau de erosão diferencial.

O indicador básico do ISTV é calculado incorporando mais dois fatores que são comuns para qualquer tipo de talude: a inclinação e a proximidade ao mar.

Por último, caso seja observada a presença de qualquer um dos indicadores estabelecidos no ponto 3.3 do Anexo II, para efetuar o cálculo ISTV corrigido, o ISTV básico deve ser multiplicado pelo *índice i* obtido a partir do número de indicadores presentes.

O resultado do ISTV, seja básico ou corrigido, varia entre 0 e 100 pontos, permitindo classificar os taludes de acordo com a suscetibilidade à instabilidade em: baixa, moderada, alta ou muito alta, como indicado no quadro seguinte:

Quadro 3.1. Valores ISTV.

Grau	Pontuação ISTV	Suscetibilidade
1	< 35	Baixa
2	[35; 60[	Moderada
3	[60; 80[	Alta
4	≥ 80	Muito alta

O resultado obtido pelo cálculo do índice de suscetibilidade de um talude permite uma avaliação prévia do seu estado e fornece informações sobre a vantagem de realizar outros estudos complementares mais aprofundados e detalhados. Permite igualmente estabelecer uma relação ordenada de uma série de taludes que se encontrem dentro de um âmbito de ação administrativa ou geográfica, a partir da qual se pode priorizar a realização de posteriores estudos detalhados aos taludes considerados mais urgentes.

Portanto, um resultado de suscetibilidade muito alta não implica necessariamente que o talude esteja em situação de instabilidade eminente, recomendando, no entanto, a

realização urgente de um estudo mais detalhado, por técnicos especializados, que avaliem a sua importância e abrangência, no sentido de serem estabelecidas as correspondentes medidas de estabilização e controlo.

Por outro lado, o resultado obtido para um talude ou encosta também não deve ser considerado definitivo, uma vez que são elementos dinâmicos que estão em constante mudança, devendo a classificação obtida ser atualizada periodicamente.

### **3.3. Avaliação rápida das condições de estabilidade em solos**

Os deslizamentos são movimentos de massas de solo, terra ou rocha que deslizam sobre uma, ou mais, superfícies de rotura quando a resistência ao corte é excedida. Um dos primeiros sinais visíveis no terreno é a presença de fendas transversais na parte superior do talude ou encosta. A massa deslocada durante o movimento possui graus de deformação muito variáveis, dependendo do tipo de deslizamento, comportando-se como um todo no seu deslocamento. A velocidade pode ser muito variável, mas geralmente são processos rápidos e atingem grandes proporções (vários milhões de metros cúbicos).

Este tipo de movimento está sujeito a critérios de classificação como, por exemplo, o tipo de rotura tangencial, entre outros. Desta forma, os deslizamentos são divididos em rotacionais e translacionais com fraturas compostas e planas. Os deslizamentos translacionais são geralmente mais rápidos do que os deslizamentos rotacionais, dadas as características cinemáticas dos seus mecanismos de rutura.

Os deslizamentos mais frequentes são geralmente os translacionais superficiais com uma rotura plana. Ocorrem geralmente em vertentes com inclinações superiores a 35°, normalmente constituídas por depósitos piroclásticos pomíticos, com diferentes dimensões granulométricas e evolução pedo genética. Normalmente, a profundidade dos planos de rotura é inferior a 2 m (Figura 3.4), indicando, claramente, que a tensão de corte efetiva é baixa e que os parâmetros de resistência ao corte são essencialmente controlados pela componente de atrito dos materiais.



Figura 3.4. Deslizamentos translacionais superficiais em taludes de depósitos de piroclastos pomíticos.

Por vezes, quando o material deslizado não atinge o equilíbrio na base da vertente (devido à sua perda de resistência, teor em água ou devido ao declive existente), a massa pode continuar a mover-se por centenas de metros e atingir velocidades muito altas, dando origem a uma escoada, podendo também causar avalanches rochosas.

As escoadas são o mecanismo de movimentação em vertentes com maior potencial destrutivo. Caracterizam-se por um movimento espacialmente contínuo onde o material se desintegra e se comporta como um fluido, sofrendo deformação contínua e onde as superfícies de tensão tangencial são efémeras e mal preservadas. Em materiais pouco coesivos, a água é o principal agente desencadeante, devido à redução da resistência.

Estão, portanto, intimamente relacionados com períodos de chuva intensa. Em condições hidrológicas e topográficas específicas, evoluem de forma devastadora, como as que ocorreram nos Açores, na localidade da Ribeira Quente, onde 29 pessoas perderam a vida, e na freguesia do Faial da Terra, onde ocorreram 3 vítimas mortais (Figura 3.5).



Figura 3.5. À esquerda as escoadas detriticas ocorridas na Ribeira Quente e à direita no Faial da Terra, Ilha de S. Miguel, Açores.

Para minimizar os riscos resultantes da instabilidade geomorfológica, é essencial analisar a estabilidade das vertentes e/ou taludes de aterros a longo prazo para prevenir futuros acidentes e mitigar os efeitos negativos associados a este tipo de fenómeno.

Os métodos de equilíbrio limite são utilizados em engenharia para avaliar a estabilidade das encostas naturais, escavações e aterros através da divisão da potencial superfície de rotura em fatias. Alguns dos métodos das fatias satisfazem algumas ou todas as condições de equilíbrio (forças e momentos).

Como abordagem global para obter uma indicação da estabilidade de uma vertente avalia-se o potencial de desenvolver uma superfície de rotura, determinada pelo fator de segurança mínimo, que corresponde à superfície de deslizamento crítico. Para a análise da estabilidade utilizando métodos de equilíbrio limite, é necessário conhecer a geometria do terreno, as características geológicas (estratigrafia) e os parâmetros físicos e mecânicos, bem como as condições da água existente.

Este tipo de instabilidade é particularmente relevante devido à magnitude dos graves danos que pode causar, não só às infraestruturas e propriedades, mas também por poder resultar na perda de vidas humanas.

Uma vez que se inicia um processo de instabilidade que pode afetar infraestruturas, edifícios ou zonas urbanas, é necessária a intervenção de técnicos para avaliar a estabilidade do elemento em causa.

Do ponto de vista mecânico, os movimentos de vertente ocorrem como resultado de um desequilíbrio entre as forças que induzem a instabilidade e as que favorecem a sua

estabilidade. Esta interação entre forças pode ser representada por um parâmetro chamado Fator de Segurança (FS) que é definido pela relação entre a resistência ao corte (forças estabilizadoras) e a tensão tangencial (forças que promovem a instabilidade), ao longo de uma superfície de rotura real ou potencial.

$$FS = \frac{\textit{Tensão Resistente ao Corte}}{\textit{Tensão Tangencial Aplicada}} \quad (3.1)$$

Desta forma, uma encosta ou um talude podem ser considerados instáveis se obtivermos um  $FS < 1$ , devido a uma redução da resistência ao corte ou a um aumento da tensão tangencial. Se o fator de segurança estiver entre 1,0 e 1,5, a vertente é considerada marginalmente estável e se  $FS \geq 1,5$  considera-se estável (Abramson et al., 2002).

Em situações de emergência, a análise é realizada qualitativamente, com base na experiência dos técnicos envolvidos, uma vez que a duração dos estudos detalhados da caracterização geotécnica, com os seus ensaios laboratoriais correspondentes, são incompatíveis com o curto período de tempo disponível para a avaliação da estabilidade da vertente ou talude. Portanto, não é possível aplicar métodos de equilíbrio limite ou técnicas de análise de tensão - deformação. Neste sentido, um dos objetivos do projeto MACASTAB foi o desenvolvimento de um método rápido que permita avaliar, no terreno, a estabilidade de uma encosta ou talude, compostos por solos, identificando áreas que possam ser afetadas pela propagação e recuo do material de forma simples e rápida.

### **3.4. Folha de campo para uma análise rápida da estabilidade em solo**

Este formulário de campo fornece uma ferramenta expedita de avaliação para os profissionais encarregados de analisar os processos de instabilidade diagnosticarem as condições das encostas ou taludes compostos por depósitos piroclásticos pomíticos com dimensões granulométricas que podem ir desde os siltes até ao cascalho.

O Anexo III deste documento explica mais pormenorizadamente o procedimento a seguir e define o formato de uma ficha de campo, fácil de preencher, utilizando apenas dados de observação direta, com os quais é possível estimar, de forma inicial e rápida, se uma vertente apresenta instabilidade iminente.



Para a preparação do formulário, foram realizadas numerosas análises de estabilidade tendo em conta diferentes cenários morfológicos, geotécnicos e hidrológicos, utilizando o método das fatias de Morgenstern-Price para obter as superfícies de rotura mais críticas, que correspondem ao valor mínimo do fator de segurança. As equações matemáticas envolvidas no processo de cálculo podem ser encontradas, por exemplo, em Abranson et al. (2002). Devido ao grande número de possíveis superfícies de rotura, utilizou-se o *software Slide* (versão 6) para calcular a superfície de deslizamento crítica, em cada cenário recomendado.

O Fator de Segurança é obtido inserindo os dados obtidos no campo numa matriz, que permite estimá-lo com base numa bateria de análises de estabilidade para diferentes cenários de condições morfológicas (altura e declive), parâmetros de resistência ao corte e condições de água do solo. Foram realizadas aproximadamente 2.500 análises de estabilidade para encontrar as superfícies críticas de rotura a partir das quais foram preparados os respetivos ábacos. Para a conceção destes ábacos, tiveram-se em conta os seguintes pressupostos:

- não considerar os valores de coesão, devido à natureza granular da maioria dos materiais vulcânicos no arquipélago dos Açores. No entanto, para efeitos de cálculo, e para não induzir superfícies de rotura pouco profundas, foi atribuída uma coesão residual de 1 kPa;
- as encostas ou taludes considerados são compostos exclusivamente por solos granulares;
- o peso volúmico é constante, com um valor de projeto de 16 kN/m<sup>3</sup>, correspondente ao valor médio dos pesos volúnicos saturados para depósitos pomíticos (Amaral, 2010); e
- a análise é realizada em termos de tensões efetivas para avaliar o fator de segurança a longo prazo uma vez que, dada a moderada a elevada permeabilidade dos depósitos pomíticos, a rotura ocorre em condições drenadas.

A Figura 3.6 apresenta exemplos dos abacos obtidos, onde se observa a variação do FS em função das várias combinações de parâmetros relacionados com a inclinação, altura e ângulos de atrito interno.

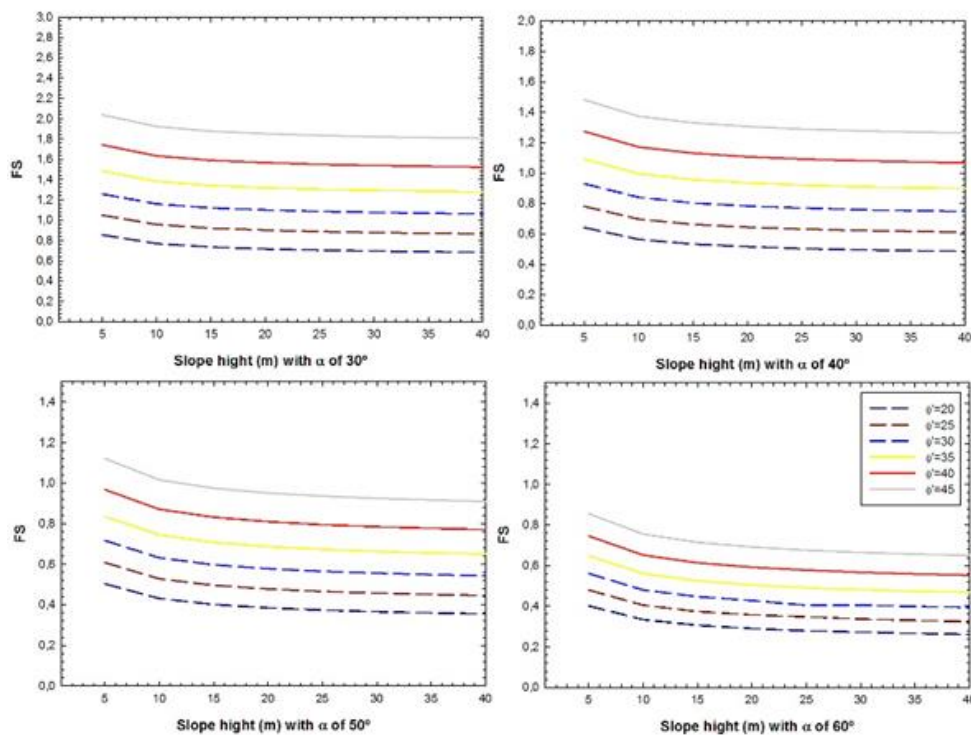


Figura 3.6. Exemplo dos abacos obtidos. Variação do FS em relação a diferentes cenários geomorfológicos.

Para obter o FS de forma mais intuitiva e rápida, foram estabelecidos 5 possíveis níveis freáticos no interior do talude, e para cada um deles foi desenvolvida uma matriz de estimativa do índice de FS (Figura 3.7) com base nas suas características geométricas e mecânicas.

Para utilizar as fichas é necessário conhecer os parâmetros de resistência ao corte do material. Estes parâmetros devem ser determinados por ensaios de campo e/ou laboratoriais (ensaios triaxiais, ensaios de corte direto, etc.) ou por estimativa empírica. A secção seguinte estabelece um procedimento para a estimativa empírica.

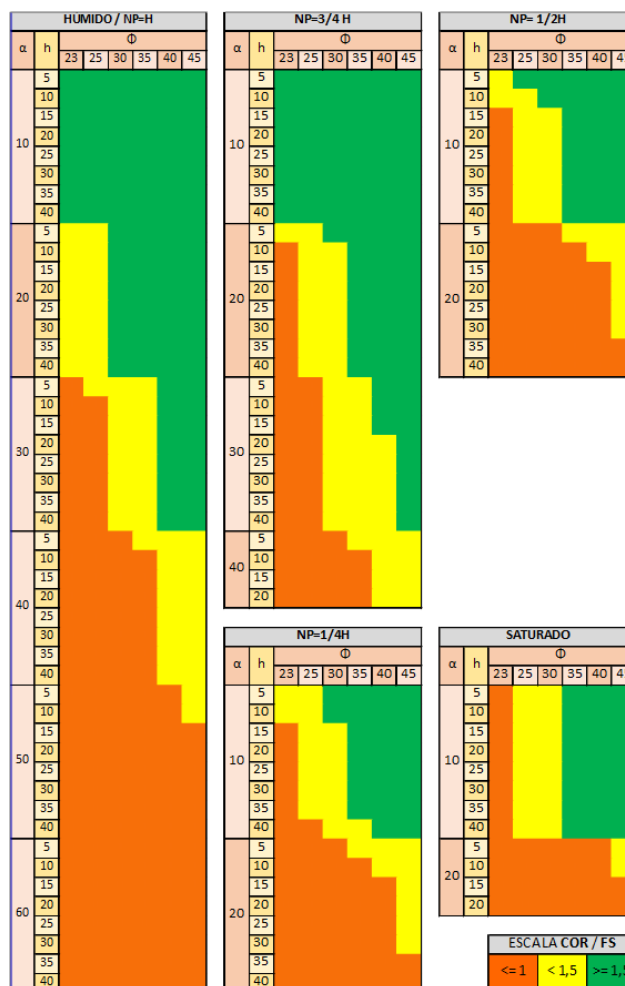


Figura 3.7. Tabelas de estimativa do FS de acordo com as características físicas da vertente ou talude.

### 3.5. Valores característicos da coesão e atrito interno em solos vulcânicos

Os solos vulcânicos têm um comportamento geotécnico particular. Nas amostras ensaiadas a densidade das partículas sólidas varia entre 2,26 e 2,90, e o peso volúmico seco varia de 5 a 13 kN/m<sup>3</sup>. A porosidade varia entre 50 e 80%, e o índice de vazios varia entre 1,02 e 3,87 (Amaral, 2010). A componente fina geralmente não apresenta plasticidade ou é pouco plástica e a maioria dos depósitos tem um baixo teor de argila (<12%).

Amaral (2010) realizou vários ensaios de corte direto do tipo consolidado e drenado. Os resultados obtidos mostraram duas famílias de condições de envolventes de rotura, com

ângulos de atrito interno efetivos ( $\phi'$ ) entre 30°-35°, para solos silto-arenosos e 35°-43°, para solos arenosos. A coesão efetiva ( $c'$ ) varia de 0 kPa a 9 kPa.

Como parte deste projeto, os valores de resistência ao corte foram obtidos a partir de ensaios de compressão triaxial para depósitos piroclásticos pomíticos e ignimbritos não soldados. Os valores dos ângulos de atrito interno variaram entre 33° e 42° e os valores de coesão efetiva variaram entre 0 e 24 kPa. Os valores mais elevados encontrados para os parâmetros de resistência ao corte dizem respeito a provetes de ignimbrito soldados muito alterados.

O Quadro 3.2 apresenta a gama de valores de parâmetros de resistência ao corte para diferentes produtos vulcânicos encontrados no arquipélago dos Açores.

Quadro 3.2. Valores de  $c'$  e  $\phi'$  para diferentes materiais vulcânicos dos Açores. CP - cinzas pomíticas; Lap/PP - areia e cascalhos pomíticos; DV - Depósitos; INS - ignimbritos não-soldados.

Litologia	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)
CP	0 - 6	30 - 37
Lap/PP	0 - 2	36 - 43
DV	0 - 9	25 39
INS	16 - 24	35 37

Na literatura técnico-científica (p.ex. Lupini et al., 1981) existe um grande número de correlações entre a resistência ao corte e as propriedades do solo (granulometria, limites de Atterberg), densidade, tensão de confinamento, SPT e CPT.

Tendo em conta as caracterizações físicas e mecânicas obtidas por Amaral (2010) e as obtidas neste projeto através de ensaios de compressão triaxial, foram estabelecidas correlações entre diferentes parâmetros básicos do solo (por exemplo, a distribuição granulométrica).

A Figura 3.8 mostra a correlação obtida entre o ângulo efetivo de atrito interno e a soma da percentagem de areia e cascalho, que se obtém pela expressão (3.2), com um coeficiente de correlação de 71%.

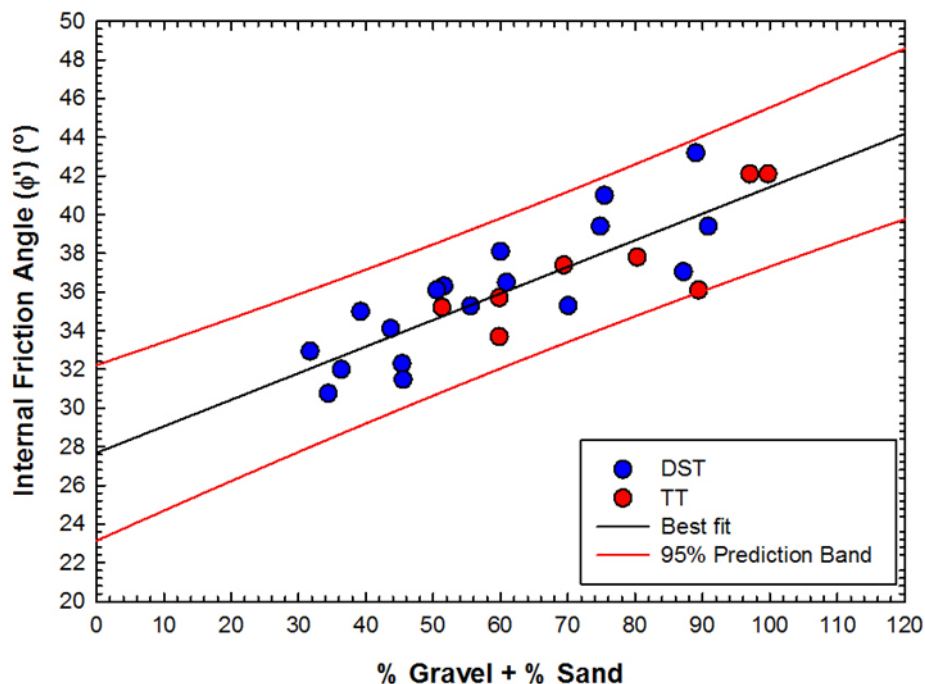


Figura 3.8. Variação do ângulo de atrito com a soma das percentagens de cascalho e areia. DST (teste de corte direto) - TT (teste triaxial). (adaptado de Amaral, 2010)

A expressão (3.2) permite estimar o ângulo de atrito interno a partir de uma simples análise granulométrica, que pode ser facilmente realizada em laboratório ou mesmo no campo. Portanto, os resultados obtidos podem ser usados para analisar a estabilidade de um talude de forma simples e rápida.

$$\phi' = 0,138 (\% \text{ cascalho} + \% \text{ areia}) + 27,7 \quad (3.2)$$

onde  $\phi'$  é o ângulo de atrito interno.

### 3.6. Faixas de risco e de proteção no topo e na base do talude

A ocorrência de fenómenos de instabilidade geomorfológica em encostas, taludes ou arribas, promove a movimentação de materiais, pelo efeito da gravidade, em direção à sua base. Dependendo da posição da zona de iniciação e da sua evolução retrogressiva para montante pode resultar num recuo de área para o interior.



Figura 3.9. Exemplo de um deslizamento. À esquerda, a vertente instável, no centro a remoção do material da crista e à direita a propagação, para a base, dos materiais mobilizados.

Para este trabalho, procedeu-se a um levantamento de várias ocorrências de instabilidades e ao seu tratamento estatístico, no qual foi possível obter informações sobre o recuo verificado no topo do talude e a distância horizontal percorrida pelos materiais após o deslizamento. A informação obtida e a comparação com as características morfométricas dos taludes permitiram verificar a existência de relações entre a altura e as distâncias de recuo e de propagação da instabilidade.

A delimitação das zonas de risco, determinadas através do conhecimento das características morfológicas dos taludes pode servir de base para a definição de faixas, cuja delimitação pode ser extremamente importante na gestão de riscos e planeamento territorial, nomeadamente numa região como os Açores.

Portanto, a faixa de risco no topo representa a zona de rotura provável, ou seja, a distância de recuo potencial do topo do talude em caso de instabilidade. A faixa de risco na base do talude representa a zona de potencial propagação dos materiais, depois de ter ocorrido a instabilidade.

#### a) Faixas de risco e proteção do topo (FRT e FPT)

Após um processo de recolha e análise dos efeitos causados na crista de uma série de taludes, concluiu-se existir uma relação entre a altura do elemento e o recuo observado. No gráfico da Figura 3.10 pode observar-se os dados estudados com os quais foi estabelecida uma linha de tendência, a vermelho no gráfico, definida pela expressão que define a faixa de risco de FRT (2), dada pela expressão (3.3):

$$FRT = 0,65 * h \quad (3.3)$$

Para determinar a faixa de proteção FPT, foi garantido um intervalo de confiança de 95%, obtendo-se a linha de tendência verde no gráfico e definida pela expressão (3.4):

$$FPT = 1,30 \cdot h \quad (3.4)$$

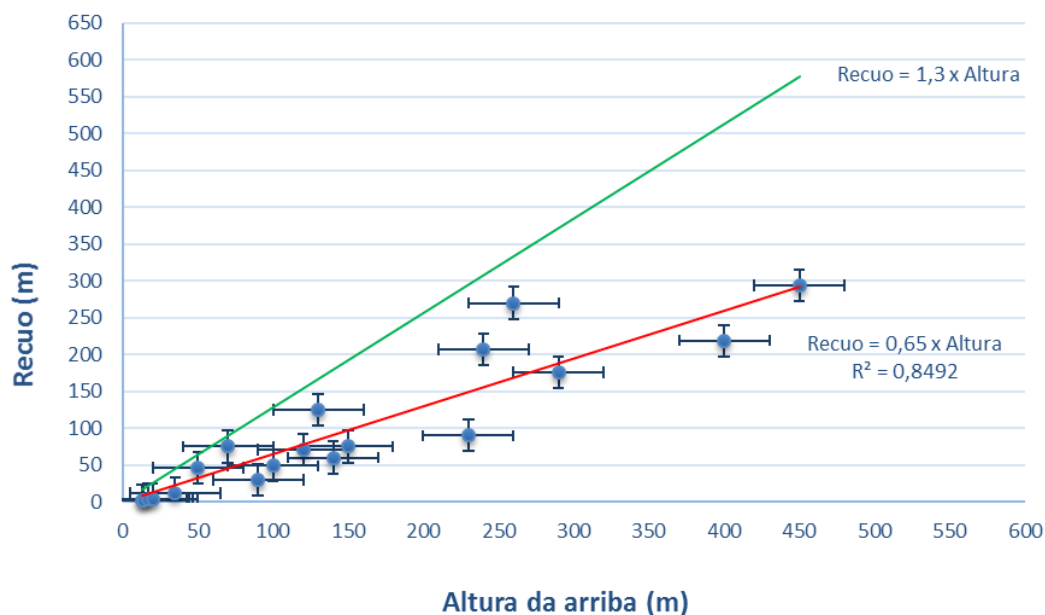


Figura 3.10. Gráfico da relação entre a altura da inclinação e a distância do recuo da crista.

#### b) Faixas de risco e proteção na base (FRB e FPB)

Da mesma forma, o mesmo processo foi realizado para as faixas de risco e de proteção na base dos taludes e encostas estudados. Observou-se que também é possível estabelecer uma relação entre a altura do talude e a distância horizontal percorrida pelos materiais mobilizados, tanto por processos de deslizamento como para escoadas.

No entanto, observaram-se diferenças significativas entre as distâncias percorridas para taludes, dependendo se a sua altura era superior ou inferior a 100 m de altura, resultando num efeito de escala motivado pela tipologia da instabilidade. Tanto quanto foi observado, verifica-se a existência de um ressalto a partir dos 100 m, na transição de deslizamentos para escoadas detriticos.

No gráfico da Figura 3.11 pode ver-se que, até uma altura de 100 m, a relação entre a altura e a distância horizontal percorrida é aproximadamente 1:1, atingindo aproximadamente 1: 1,5 para além desta altura.

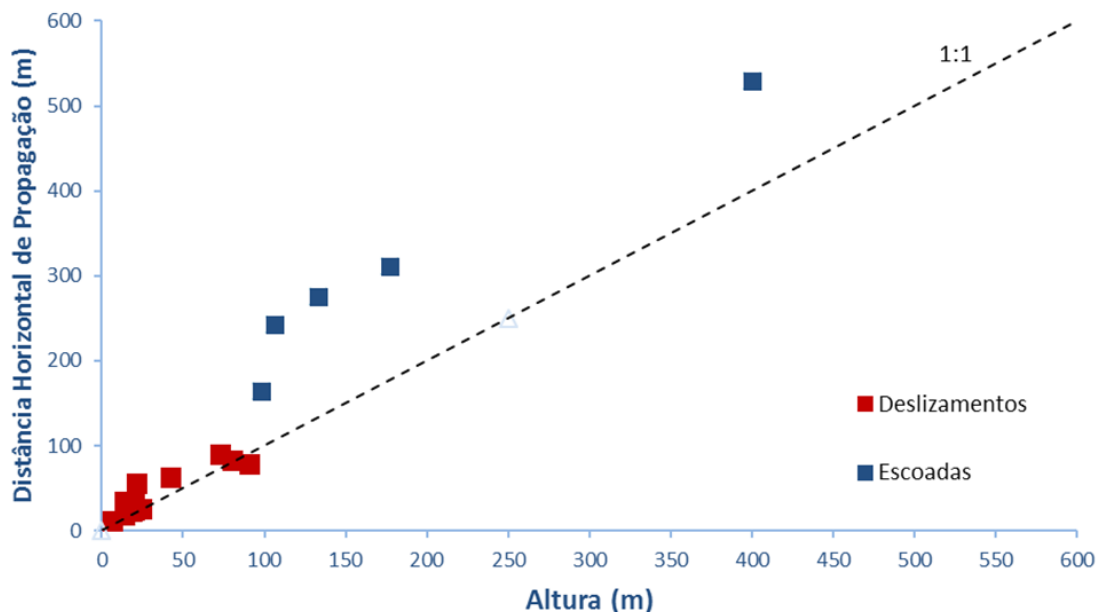


Figura 3.11. Relação entre a altura e a distância de propagação horizontal na base, com diferenciação de deslizamentos e escoadas detriticas. A linha tracejada define uma relação de 1:1.

Neste sentido, foi decidido definir duas faixas de risco e de proteção na base, FRB e FPB, dependendo se a altura da vertente excede ou não os 100 m. Estas faixas de risco e de proteção foram obtidas da mesma forma que para as de topo.

Na Figura 3.12 pode ver-se as linhas obtidas para cada faixa e as expressões (3.5) e (3.6) definem, respetivamente, as faixas de risco e de proteção da base de um talude com uma altura inferior a 100 m.

$$FRB = 1,0 \cdot h \text{ (Para taludes ou vertentes com } h < 100 \text{ m)} \quad (3.5)$$

$$FPB = 2,0 \cdot h \text{ (Para taludes ou vertentes com } h < 100 \text{ m)} \quad (3.6)$$



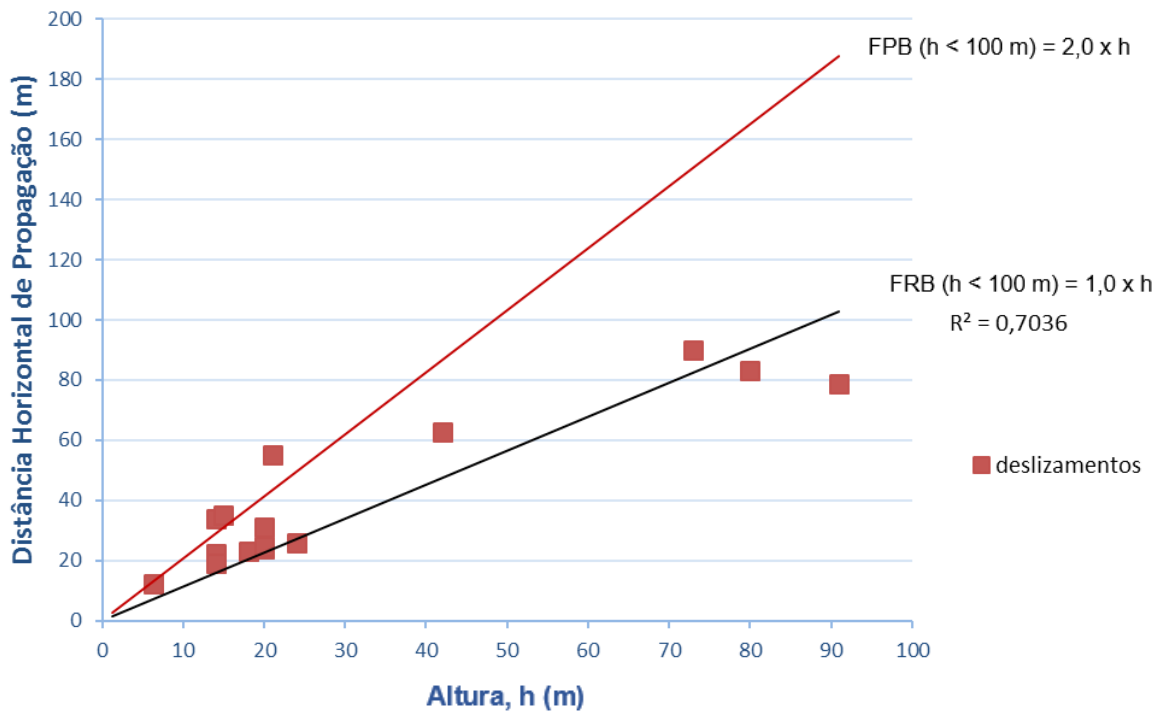


Figura 3.12. Gráfico da relação entre a altura inferior a 100 m e a distância horizontal percorrida.

Na Figura 3.13 podem ver-se as linhas obtidas para vertentes com uma altura superior a 100 m e as expressões (3.7) e (3.8) definem as respetivas faixas de risco e de proteção para a base.

$$FRB = 1,5 \cdot h \text{ (Para taludes ou vertentes com } h > 100 \text{ m)} \quad (3.7)$$

$$FPB = 2,5 \cdot h \text{ (Para taludes ou vertentes com } h > 100 \text{ m)} \quad (3.8)$$

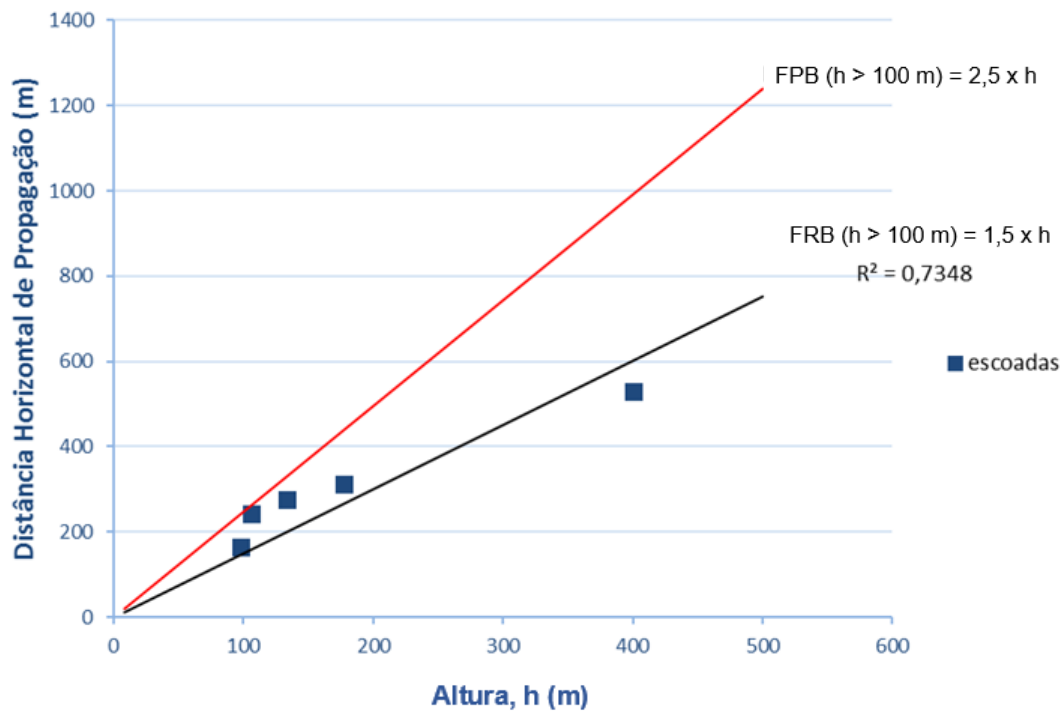


Figura 3.13. Gráfico da relação entre vertentes de altura superior a 100 m e a propagação horizontal percorrida.