

ANÁLISE PARAMÉTRICA NO ESTUDO DA QUEDA DE BLOCOS EM ENCOSTAS ROCHOSAS

LUÍS MANUEL MAIA SILVÉRIO DE CASTRO TAVARES

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM GEOTECNIA

Orientador: Professor Doutor António Campos e Matos

Coorientador: Engenheiro Sérgio Cunha

JUNHO DE 2015

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2014/2015

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2014/2015 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais

O conhecimento fala, mas a sabedoria escuta.

Jimi Hendrix

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço à minha mãe por me ter apoiado durante todo o meu trajeto e proporcionado a oportunidade de tirar o curso que escolhi. À minha irmã e a toda a família que demonstrou interesse e preocupação ao longo dos meus anos de formação.

Agradeço ao meu orientador, professor Campos e Matos, pelo aconselhamento e ajuda no desenvolvimento deste trabalho. Um especial agradecimento também para o meu coorientador, engenheiro Sérgio Cunha, nas diretrizes principais que me aconselhou a seguir no início da tese. Finalmente, agradeço à engenheira Carmina Costa, também do Gabinete de Estruturas e Geotecnia, pelo fornecimento do material topográfico que, sem ele, este trabalho não poderia ser realizado.

Agradeço aos meus colegas de curso e de faculdade que me acompanharam neste trajeto e, em especial, aos meus amigos de (já) longa data pelos momentos de apoio e diversão ao longo deste período que seguramente continuarão a ser muitos ao longo dos anos.

RESUMO

A redução do risco de queda de blocos e de massas rochosas, em encostas de elevada extensão, determina o uso criterioso de soluções e técnicas construtivas que se podem implementar em conjugação ou individualmente, conforme se considere mais adequado.

Neste sentido, uma série de soluções são apresentadas para este tipo de instabilidade em conjunto com o estudo de um caso de um desprendimento de uma massa rochosa de elevada magnitude, sobre a Linha Férrea do Douro, mais propriamente no troço Pocinho-Barca D'Alva.

Encontrando-se este um troço encerrado há cerca de 27 anos, e onde se depositam uma série de blocos provenientes de vários desprendimentos, é um local importante para que seja adquirida informação na tentativa de um melhor entendimento deste tipo de instabilidade e possíveis soluções a introduzir.

Para isso, e com a modelação do problema usando o *software Rocfall 5.0* que apresenta novas funcionalidades em relação à versão passada, é feita uma análise de sensibilidade paramétrica com o objetivo de se perceber de que forma é que os parâmetros introduzidos influenciam o comportamento da queda dos blocos.

Numa fase introdutória da dissertação, são apresentadas as principais instabilidades de taludes com especial foque no desprendimento de blocos, suas causas e medidas de estabilização, tanto ativas como passivas.

De seguida, é abordada a temática dos coeficientes de restituição, sendo este um parâmetro crítico na modelação da queda de blocos. De que forma é que são obtidos os seus valores, em que modelos de impacto é que se baseiam e alguns dos seus valores presentes na literatura são apresentados.

No capítulo 5 introduz-se o *software* a utilizar e no capítulo 6 inicia-se a análise paramétrica.

No último capítulo é dimensionada uma solução para o problema em causa tirando partido das novas funcionalidades do programa informático.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilização, desprendimento de blocos, linhas férreas, *Rocfall*, coeficientes de restituição.

ABSTRACT

Reducing the risk of falling blocks and rock masses in high extent slopes, determines a judicious use of technical and constructive solutions that can be implemented in combination or individually, as deemed more appropriate.

In that sense, a number of solutions are presented for this type of instability joined together with a case study of a high magnitude rock mass detachment on the Douro railway line, more specifically in Pocinho-Barca D'Alva's section.

Being closed for about 27 years, and where are deposited a series of blocks from various detachments, this railway section is an important location for information to be acquired in an attempt to better understand this type of instability and possible stabilization solutions to be introduced.

For this purpose, and modelling the problem using the Rocfall 5.0 software which introduces new features over the previous version, is made a parametric sensitivity analysis in order to understand how the input parameters influence the falling blocks behaviour in a rockfall simulation.

In an introductory phase of the thesis, the main slope instabilities are presented with special focus on rockfalls, its causes and stabilization measures, both active and passive.

Then the issue of coefficients of restitution is discussed, which is a critical parameter in modelling rockfalls. How their values are obtained, in what impact models are they based and some of its values stated in literature are presented.

Chapter 5 introduces the used software and in chapter 6 begins the parametric analysis.

In the last chapter a solution to the problem in question is designed taking advantage of the new features of the software.

KEYWORDS: Stabilization, rockfalls, railways, Rocfall, coefficients of restitution.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ÂMBITO E OBJETIVOS	1
1.2. ESTRUTURA DA TESE	2
2. CAMINHOS-DE-FERRO	3
2.1. EM PORTUGAL	3
2.2. LINHA DO DOURO	4
3. TIPOS DE INSTABILIDADES EM TALUDES	7
3.1. INTRODUÇÃO	7
3.2. ANÁLISE CINEMÁTICA	8
3.3. TIPOS DE ROTURA	10
3.3.1. ROTURA PLANAR	10
3.3.2. ROTURA EM CUNHA	11
3.3.3. ROTURA POR “TOPPLING”	11
3.3.4. ROTURA CIRCULAR	12
3.3.5. ROTURA POR ENCURVADURA	13
3.4. QUEDA DE BLOCOS	14
3.4.1. INTRODUÇÃO	14
3.4.2. CAUSAS	16
3.4.3. MEDIDAS DE ESTABILIZAÇÃO	17
3.4.3.1. Medidas Ativas	18
3.4.3.2. Medidas Passivas	22

4. COEFICIENTES DE RESTITUIÇÃO	27
4.1. INTRODUÇÃO	27
4.1.1. ANÁLISE DO TERRENO POSTERIOR A EVENTOS DE QUEDA DE BLOCOS.....	28
4.1.2. EXECUÇÃO DE TESTES <i>IN SITU</i>	28
4.1.3. EXECUÇÃO DE TESTES LABORATORIAIS.....	30
4.2. MODELOS DE IMPACTO	31
4.2.1. MODELO DE VELOCIDADE.....	32
4.2.2. MODELO DE ENERGIA.....	33
4.2.3. MODELO DE IMPULSOS.....	33
4.3. VALORES PRESENTES NA LITERATURA	35
4.4. INFLUÊNCIA DE OUTROS PARÂMETROS NOS VALORES DO CR	36
5. SOFTWARE – ROCFALL 5.0	43
5.1. INTRODUÇÃO	43
5.2. EVOLUÇÃO DO SOFTWARE EM RELAÇÃO À VERSÃO ANTERIOR	44
5.2.1. ANÁLISE PELO MÉTODO DE CORPO RÍGIDO.....	44
5.2.2. MODOS DE PROJETO E RESULTADOS.....	46
5.2.3. RESULTADOS REFERENTES À TRAJETÓRIA DA QUEDA DE BLOCOS.....	47
5.2.4. CAPACIDADE DE GERAÇÃO DE RESULTADOS MELHORADA.....	48
5.3. VISÃO GLOBAL / ASPETOS GERAIS DO PROGRAMA	49
5.3.1. GEOMETRIA DA ENCOSTA.....	49
5.3.2. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS.....	50
5.3.2.1. Rugosidade da encosta.....	50
5.3.2.2. Ângulo de atrito.....	50
5.3.2.3. Coeficiente de atrito dinâmico e resistência ao rolamento.....	51
5.3.3. CONDIÇÃO INICIAL DOS BLOCOS.....	51
5.3.4. BARREIRAS.....	52
5.3.5. COLETOR DE DADOS.....	52
5.3.6. GRÁFICOS DE RESULTADOS.....	53

6. ENQUADRAMENTO DO LOCAL DE ESTUDO E ANÁLISE PARAMÉTRICA	55
6.1. INTRODUÇÃO	55
6.2. ENQUADRAMENTO DO LOCAL DE ESTUDO	55
6.2.1. GEOLÓGICO	55
6.2.2. REGISTO DE QUEDAS DE BLOCOS	57
6.2.3. LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO	60
6.3. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARAMÉTRICA	61
6.4. ANÁLISE PARAMÉTRICA DOS VALORES DE R_N E R_T	64
6.4.1. ENQUADRAMENTO DE VALORES	64
6.4.2. RESULTADOS – BLOCO DE 5KG	65
6.4.3. RESULTADOS – BLOCO DE 50KG	67
6.4.4. RESULTADOS – BLOCO DE 300KG	69
6.4.5. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES FINAIS	71
6.5. ANÁLISE PARAMÉTRICA DOS VALORES DO COEFICIENTE DINÂMICO DE ATRITO E DA RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO	73
6.5.1. ENQUADRAMENTO DOS VALORES UTILIZADOS	73
6.5.2. RESULTADOS – BLOCO DE 5KG	74
6.5.3. RESULTADOS – BLOCO DE 50KG	76
6.5.4. RESULTADOS – BLOCO DE 300KG	78
6.5.5. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES FINAIS	80
6.6. ANÁLISE PARAMÉTRICA DOS VALORES DA RUGOSIDADE	82
6.6.1. ENQUADRAMENTO DE VALORES	82
6.6.2. RESULTADOS – BLOCO DE 5KG	83
6.6.3. RESULTADOS – BLOCO DE 50KG	85
6.6.4. RESULTADOS – BLOCO DE 300KG	87
6.6.5. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES FINAIS	89

7. DIMENSIONAMENTO DE SOLUÇÃO – BARREIRA FLEXÍVEL	91
7.1. INTRODUÇÃO	91
7.2. MODELAÇÃO DO PROBLEMA	93
7.2.1. VALORES UTILIZADOS	93
7.2.2. RESULTADOS	94
7.2.2.1. Teste <i>SEL</i>	98
7.2.2.2. Teste <i>MEL</i>	101
7.2.3. SOLUÇÃO ALTERNATIVA	102
8. CONCLUSÃO	103
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
ANEXOS	107

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig 2.1 – Logótipo da Companhia Central dos Caminhos de Ferro de Portugal (Wikipedia, 2015).....	3
Fig 2.2 – Percurso e estações da Linha do Douro (douroultratrail.com, 2015)	4
Fig 2.3 – Estação Ferroviária da Régua (skyscrapercity.com, 2015)	5
Fig 2.4 – Estação Ferroviária de Barca d’Alva (olhares.sapo.pt, 2015).....	6
Fig 3.1 – Rotura em cunha formada pela intersecção de dois planos (Wyllie e Mah, 2004).....	8
Fig 3.2 – Análise cinemática de blocos rochosos em talude: descontinuidades (Wyllie e Mah, 2004)...	9
Fig 3.3 - Análise cinemática de blocos rochosos em talude: representação de envoltórias em projeção hemisférica (Wyllie e Mah, 2004)	9
Fig 3.4 – Rotura planar (Wyllie e Mah, 2004)	10
Fig 3.5 – Rotura em cunha (Wyllie e Mah, 2004).....	11
Fig 3.6 – Rotura por “toppling” (Wyllie e Mah, 2004)	11
Fig 3.7 – Rotura circular (Wyllie e Mah, 2004).....	12
Fig 3.8 – Rotura por encurvadura (González de Vallejo, 2002).....	13
Fig 3.9 – Queda de blocos leva a encerramento de estrada em França (2alpesnet.com, 2015)	14
Fig 3.10 – Tipos de movimento durante um desprendimento de blocos (Basson, 2012).....	15
Fig 3.11 – Correlação do número de queda de blocos com a temperatura e precipitação em linhas férreas em Fraser Canyon, Colômbia Britânica (Peckover, 1975)	16
Fig 3.12 – Sistema de redes de cabos: a) alçado e b) alçado em pormenor (GEG, 2015).....	18
Fig 3.13 –a) Detalhe das redes em cabos e b) enquadramento paisagístico (GEG, 2015).....	18
Fig 3.14 –a) Sistema de redes e pregagens associadas a cabos de aço e b) Perspetiva do sistema de redes pregadas (GEG, 2015).....	19
Fig 3.15 – Linha da Beira Baixa – Redes pregadas (GEG, 2015).....	19
Fig 3.16 – a) Recalçamento em pedra arrumada e argamassada manualmente e b) Vigas de betão armado revestidas com pedra (GEG, 2015)	20
Fig 3.17 – Corte tipo do muro na base do escorregamento (GEG, 2015).....	21
Fig 3.18 – a) Esquema de rede suspensa (Sistema contra a queda de rochas, Necessidade e Soluções - Maccaferri, 2015) e b) enquadramento paisagístico (projectlink.com.au, 2015)	22
Fig 3.19 – Barreira dinâmica: a) Corte tipo e b) Alçado tipo (GEG, 2015)	23
Fig 3.20 – Barreira dinâmica: enquadramento paisagístico: a) (agg-net.com, 2009) e b) (maccaferribalkans.com, 2015)	23
Fig 3.21 – Barreira rígida: a) Alçado e b) Perfil (Oliveira, 2010).....	24
Fig 3.22 – Barreira metálica rígida na Linha da Beira Baixa (Teixeira, 2009)	25
Fig 4.1 – Coordenadas do impacto do bloco com a encosta e vegetação (Vijayakumar et al., 2012) ..	28

Fig 4.2 – Reconstrução das posições do bloco em diferentes intervalos de tempo tiradas a partir de gravação de câmara de vídeo (Giani et al., 2004)	29
Fig 4.3 – Teste laboratorial de Chau et al. (2002).....	30
Fig 4.4 - Instante de impacto e respetivas componentes das velocidades (Asteriou et al., 2012)	31
Fig 4.5 – a) Variação da força F durante o impacto (Wyllie, 2013) e b) Esquema das forças atuantes no bloco no momento de impacto (Heidenreich, 2004)	34
Fig 4.6 – Relação entre impulso normal e velocidades normal e tangencial, e variação da energia, durante o impacto (Wyllie, 2013).....	35
Fig 4.7 – Variabilidade de valores dos CR normal e tangencial de acordo com diferentes materiais: a) (Fornaro et al., 1990) e b) (Chau et al., 2002)	36
Fig 4.8 – Parâmetros para interpretação das figuras 4.9 e 4.10 (Vijayakumar et al., 2011)	38
Fig 4.9 – Distância de impacto média vs altura de queda de blocos e declive do talude de captação – coeficiente de atrito $\mu=0$ (Vijayakumar et al., 2011).....	39
Fig 4.10 – Distância de impacto média vs altura de queda de blocos e declive do talude de captação – coeficiente de atrito $\mu=1.0$ (Vijayakumar et al., 2011).....	40
Fig 4.11 – Distância de impacto média em relação a diferentes tamanhos de blocos – coeficiente de atrito $\mu=0$ (Vijayakumar et al., 2011)	41
Fig 4.12 – Análise de queda de blocos para diferentes tamanhos – coeficiente de atrito $\mu=0$, $V_x=1$, desvio padrão=0.1, $R_n=0.4$ (Vijayakumar et al., 2011).....	41
Fig 4.13 – Queda de blocos com diferentes tamanhos (Basson, 2012)	42
Fig 4.14 – Queda de blocos com diferentes formas (Basson, 2012).....	42
Fig 5.1 – Rocfall 5.0 (rocscience.com, 2015).....	44
Fig 5.2 – Definições de análise do problema pelo método de corpo rígido (<i>rigid body</i>) ou massa concentrada (<i>lump mass</i>).....	45
Fig 5.3 – Definições das propriedades dos blocos rochosos usando o método de corpo rígido	46
Fig 5.4 – Modo de projeto (<i>design</i>) e resultados (<i>results</i>)	46
Fig 5.5 – Animação de uma trajetória de queda de um bloco rochoso	47
Fig 5.6 – Relatório de barreiras e sua verificação.....	48
Fig 5.7 – Visualização de informação sobre a análise do problema e rodapé personalizável em modo de impressão	48
Fig 5.8 – Exemplo de geometria de encosta e diferentes tipos de materiais identificados por diferença de cor.....	49
Fig 5.9 – Definição do ângulo de atrito para o método de massa concentrada	50
Fig 5.10 – Propriedades do semeador	51
Fig 5.11 – Lista de barreiras comerciais disponibilizadas bem como as suas propriedades	52
Fig 5.12 – Esquema da localização de um coletor de dados	53
Fig 5.13 – Histograma de localização dos blocos.....	54

Fig 5.14 – Altura de salto dos blocos para uma dada localização.....	54
Fig 6.1 – Unidade geotécnica envolvente do troço Pocinho-Barca d’Alva (lh6.googleusercontent.com, 2015)	56
Fig 6.2 – Carta geológica do concelho de Vila Nova de Foz Côa (projectos.fozcoa.net, 2015)	56
Fig 6.3 – Representação do troço em estudo (maps.google.pt, 2015).....	57
Fig 6.4 – Número de blocos do lado esquerdo da linha	58
Fig 6.5 – Número de blocos do lado direito da linha.....	58
Fig 6.6 – Número de blocos situados entre carris.....	59
Fig 6.7 – Número de blocos totais.....	59
Fig 6.8 – a) Ponto inicial A do troço e b) Blocos depositados na linha (GEG, 2015)	60
Fig 6.9 – Levantamento topográfico e perfis utilizados.....	60
Fig 6.10 – Formas dos blocos usadas na simulação: a) bloco esférico e b) bloco angular	61
Fig 6.11 – Perfil A: a) AutoCad e b) Rocfall	62
Fig 6.12 – Perfil B: a) AutoCad e b) Rocfall	63
Fig 6.13 – Perfil C: a) AutoCad e b) Rocfal	64
Fig 6.14 – Comparação do valor máximo da energia cinética para os diferentes blocos simulados (Perfil A – bloco 5kg).....	66
Fig 6.15 – Comparação do valor máximo da altura de salto para os diferentes blocos simulados (Perfil A – bloco 5kg).....	67
Fig 6.16 – Comparação do valor máximo da energia cinética para os diferentes blocos simulados (Perfil A – bloco 50kg).....	68
Fig 6.17 – Comparação do valor máximo da altura de salto para os diferentes blocos simulados (Perfil A – bloco 50kg).....	69
Fig 6.18 – Comparação do valor máximo da energia cinética para os diferentes blocos simulados (Perfil A – bloco 300kg).....	70
Fig 6.19 – Comparação do valor máximo da altura de salto para os diferentes blocos simulados (Perfil A – bloco 300kg).....	71
Fig 6.20 – Trajetória dos blocos angulares de 5kg: a) Situação A1 e b) Situação A2.....	71
Fig 6.21 – Trajetória dos blocos esféricos de 5kg: a) Situação A1 e b) Situação A2.....	72
Fig 6.22 – Comparação do valor máximo da energia cinética para os diferentes blocos simulados (Perfil B – bloco 5kg).....	75
Fig 6.23 – Comparação do valor máximo da altura de salto para os diferentes blocos simulados (Perfil B – bloco 5kg).....	75
Fig 6.24 – Comparação do valor máximo da energia cinética para os diferentes blocos simulados (Perfil B – bloco 50kg).....	77
Fig 6.25 – Comparação do valor máximo da altura de salto para os diferentes blocos simulados (Perfil B – bloco 50kg).....	77

Fig 6.26 – Comparação do valor máximo da energia cinética para os diferentes blocos simulados (Perfil B – bloco 300kg)	79
Fig 6.27 – Comparação do valor máximo da altura de salto para os diferentes blocos simulados (Perfil B – bloco 300kg)	79
Fig 6.28 – Trajetória dos blocos angulares de 50kg: a) Situação B1 e b) Situação B2.....	80
Fig 6.29 – Trajetória dos blocos esféricos de 50kg: a) Situação B1 e b) Situação B2	81
Fig 6.30 – Comparação do valor máximo da energia cinética para os diferentes blocos simulados (Perfil C – bloco 5kg).....	84
Fig 6.31 – Comparação do valor máximo da altura de salto para os diferentes blocos simulados (Perfil C – bloco 5kg).....	84
Fig 6.32 – Comparação do valor máximo da energia cinética para os diferentes blocos simulados (Perfil C – bloco 50kg).....	86
Fig 6.33 – Comparação do valor máximo da altura de salto para os diferentes blocos simulados (Perfil C – bloco 50kg).....	86
Fig 6.34 – Comparação do valor máximo da energia cinética para os diferentes blocos simulados (Perfil C – bloco 300kg).....	88
Fig 6.35 – Comparação do valor máximo da altura de salto para os diferentes blocos simulados (Perfil C – bloco 300kg).....	88
Fig 6.36 – Trajetória dos blocos angulares de 300kg: a) Situação C1 e b) Situação C2	89
Fig 6.37 – Trajetória dos blocos esféricos de 300kg: a) Situação C1 e b) Situação C2.....	90
Fig 7.1 – Perfil D: a) AutoCAD e b) Rocfall	91
Fig 7.2 – Rede perfurada por bloco (<i>Design Guide for Rockfall Fences</i> - Maccaferri, 2015).....	92
Fig 7.3 – Execução de teste de impacto numa barreira dinâmica (<i>Design Guide for Rockfall Fences</i> - Maccaferri, 2015)	93
Fig 7.4 – Distribuição da localização final dos blocos ao longo do perfil	95
Fig 7.5 a) Trajetórias dos blocos e b) Pormenor de uma das trajetórias e superfície da encosta	95
Fig 7.6 – Variação da energia cinética máxima ao longo do perfil	96
Fig 7.7 – Variação da altura máxima de salto ao longo do perfil	96
Fig 7.8 – a) Perfil com barreira instalada e b) Influência da barreira na trajetória dos blocos	97
Fig 7.9 – Relatório de dimensionamento inicial	98
Fig 7.10 – Estatísticas de impacto	99
Fig 7.11 – Características da barreira	99
Fig 7.12 – Verificação SEL (parte 1)	99
Fig 7.13 – Verificação SEL (parte 2)	100
Fig 7.14 – Verificação MEL (parte 1)	101
Fig 7.15 – Verificação MEL (parte 2)	102

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 – Fatores influenciadores da instabilidade de taludes	7
Quadro 4.1 – Parâmetros presumíveis que influenciam o fenómeno de ressalto	37
Quadro 6.1 – Caracterização dos blocos consoante o seu tamanho	58
Quadro 6.2 – Valores dos coeficientes de restituição normal e tangencial (Perfil A)	65
Quadro 6.3 – Resultados da análise para o bloco de 5kg – Energia cinética e altura de salto (Perfil A)	65
Quadro 6.4 – Resultados da análise para o bloco de 5kg – Localização final dos blocos (Perfil A)	66
Quadro 6.5 – Resultados da análise para o bloco de 50kg – Energia cinética e altura de salto (Perfil A)	67
Quadro 6.6 – Resultados da análise para o bloco de 50kg – Localização final dos blocos (Perfil A) ..	68
Quadro 6.7 – Resultados da análise para o bloco de 300kg – Energia cinética e altura de salto (Perfil A)	69
Quadro 6.8 – Resultados da análise para o bloco de 300kg – Localização final dos blocos (Perfil A)	70
Quadro 6.9 – Valores dos coeficientes de restituição normal e tangencial (Perfil B)	73
Quadro 6.10 – Valores dos parâmetros de atrito	73
Quadro 6.11 – Resultados da análise para o bloco de 5kg – Energia cinética e altura de salto (Perfil B)	74
Quadro 6.12 – Resultados da análise para o bloco de 5kg – Localização final dos blocos (Perfil B) ..	74
Quadro 6.13 – Resultados da análise para o bloco de 50kg – Energia cinética e altura de salto (Perfil B)	76
Quadro 6.14 – Resultados da análise para o bloco de 5kg – Localização final dos blocos (Perfil B) ..	76
Quadro 6.15 – Resultados da análise para o bloco de 300kg – Energia cinética e altura de salto (Perfil B)	78
Quadro 6.16 – Resultados da análise para o bloco de 300kg – Localização final dos blocos (Perfil B)	78
Quadro 6.17 – Valores dos coeficientes de restituição normal e tangencial (Perfil C)	82
Quadro 6.18 – Valores do parâmetro da rugosidade	82
Quadro 6.19 – Resultados da análise para o bloco de 5kg – Energia cinética e altura de salto (Perfil C)	83
Quadro 6.20 – Resultados da análise para o bloco de 5kg – Localização final dos blocos (Perfil C)	83
Quadro 6.21 – Resultados da análise para o bloco de 50kg – Energia cinética e altura de salto (Perfil C)	85

Quadro 6.22 – Resultados da análise para o bloco de 50kg – Localização final dos blocos (Perfil C)	85
Quadro 6.23 – Resultados da análise para o bloco de 300kg – Energia cinética e altura de salto (Perfil C)	87
Quadro 6.24 – Resultados da análise para o bloco de 50kg – Localização final dos blocos (Perfil C)	87
Quadro 7.1 – Valores dos parâmetros utilizados na simulação	94

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

α_i – ângulo de impacto

θ – inclinação da superfície

σ – desvio padrão

μ – coeficiente de atrito

μ_{rot} – resistência ao rolamento

ω – velocidade angular

ψ - pendor ou *mergulho* da linha de maior declive do talude

\emptyset – angulo de atrito

C – fator de plasticidade

E_{cin} – energia cinética

E_{tot} – energia cinética total

$E_{c,max}$ – energia cinética máxima

F_n – força normal

F_t – força tangencial

I – momento de inércia

I_n – impulso normal

I_t – impulso tangencial

m – massa

R – coeficiente de restituição

R_n – coeficiente de restituição normal

R_t – coeficiente de restituição tangencial

R_E – coeficiente de restituição (modelo de energia)

$R_{E,tot}$ - coeficiente de restituição total (modelo de energia)

R_I – coeficiente de restituição (modelo de impulsos)

v_i – velocidade inicial

v_r – velocidade de ressalto

v_{in} – velocidade normal inicial

v_{it} – velocidade tangencial inicial

v_{rn} – velocidade normal de ressalto

v_{rt} – velocidade tangencial de ressalto

CR – Coeficiente de restituição

De – Formação da Desejosa

ETAG – European Technical Approval Guideline

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

GEG - Gabinete de Estruturas e Geotecnia

ZCI – Zona Centro Ibérica

1

INTRODUÇÃO

1.1. ÂMBITO E OBJETIVOS

Este trabalho, inserido no âmbito do ramo de Geotecnia do Mestrado Integrado em Engenharia Civil da FEUP tem como tema a “Análise Paramétrica no Estudo da Queda de Blocos em Encostas Rochosas”. Dois principais objetivos são apontados como base no desenvolvimento da presente dissertação, apoiando-se estes num conceito principal: o desprendimento de blocos inseridos num contexto de linhas ferroviárias.

Nesse sentido, o primeiro objetivo passa pelo entendimento das diferentes soluções a utilizar neste tipo de instabilidade, de que forma é que atuam no problema, como se inserem no seu meio envolvente, o que as diferencia umas das outras. São abordadas aquelas que se consideram mais adequadas ao local de estudo, podendo estas ser introduzidas de forma individual no sentido de se querer atender a um problema mais específico, ou em conjugação com outras no intuito de abordar a mesma questão de uma perspetiva mais abrangente.

O segundo objetivo está relacionado com o já referido caso de estudo. Inserido na Linha Ferroviária do Douro, o troço Pocinho-Barca D’Alva é um troço desativado desde 1988 e onde ao longo dos anos se tem observado casos de instabilidades ligadas à queda de blocos. Sendo este fenómeno um de grande aleatoriedade e difícil previsão, envolvendo várias causas que o podem despoletar, e que em zonas de possível risco, caso ainda não se tenham tomado medidas preventivas, pode causar sérios estragos a infra-estruturas e não só, é de extrema importância que se adquira o melhor conhecimento possível dos diferentes parâmetros que o regem.

Assim, e tendo como base dados recolhidos de blocos ao longo do troço, pretende-se perceber numa análise de sensibilidade de que forma é que esses parâmetros (coeficientes de restituição, coeficiente de atrito, rugosidade, ...) influenciam as trajetórias dos blocos através da modelação do problema usando um programa informático específico para o estudo desta instabilidade, o *Rocfall 5.0*.

Este *software*, com a sua mais recente versão permite ao utilizador simular o desprendimento de blocos ao longo de um perfil usando métodos mais eficazes e oferecendo novas funcionalidades, que não estavam disponíveis na versão anterior, e que retratam as várias fases de queda de um bloco de forma mais realista, permitindo assim um melhor entendimento sobre o fenómeno.

1.2. ESTRUTURA DA TESE

O presente trabalho encontra-se estruturado em oito diferentes capítulos sendo o primeiro destes o capítulo introdutório à dissertação onde são expostos os objetivos que se propõe desenvolver.

O segundo capítulo, à imagem do primeiro, também é um capítulo introdutório mas relativo à história dos caminhos-de-ferro portugueses ao longo dos anos e, em especial, à história da Linha do Douro em que o caso de estudo se insere.

No terceiro, são apresentadas as principais instabilidades em taludes (planar, em cunha, *toppling*, circular e por encurvadura) dando especial atenção ao tipo de instabilidade já referida como base deste trabalho, a queda de blocos, suas causas principais e medidas de estabilização, tanto ativas como passivas.

No quarto capítulo são abordados os coeficientes de restituição, parâmetros fundamentais no entendimento da instabilidade e que abordagens são tomadas para uma recolha de valores deste parâmetro. Que modelos de impacto existem nos quais se apoiam diferentes designações de coeficientes de restituição e que valores provenientes desses mesmos modelos estão presentes na literatura. É também abordada a influência de outros parâmetros nos valores destes coeficientes.

O capítulo cinco é onde se introduz o programa informático a ser utilizado na análise paramétrica. Os aspetos gerais do *software* são abordados bem como a evolução desta nova versão em relação à versão passada.

No capítulo seis inicia-se a análise paramétrica com um enquadramento geológico do local em estudo, o registo de quedas de blocos anteriores e o levantamento topográfico utilizado. Na análise, cada um dos parâmetros é avaliado individualmente tendo em conta também diferentes formas e pesos dos blocos.

O capítulo sete vem no seguimento do anterior. Depois de se ter entendido o funcionamento do programa e tirando partido também da nova funcionalidade de dimensionamento e verificação de barreiras flexíveis, uma solução é dimensionada face ao local.

Finalmente o capítulo oito prende-se com as conclusões retiradas depois do trabalho desenvolvido.

2

CAMINHOS-DE-FERRO

2.1. EM PORTUGAL

A implementação da via ferroviária em Portugal faz parte de uma série de acontecimentos de grande importância presentes na história e evolução do nosso país. Com a sua introdução, o grande Portugal da segunda metade do século XIX ficou mais “pequeno”, aproximando populações na altura separadas por várias horas de viagens a meros minutos.

No reinado de D. Maria II, a 19 de Abril de 1845, surgiu pela mão do Ministro Costa Cabral o primeiro documento oficial sobre a construção de caminhos-de-ferro em Portugal que visava a ligação de Lisboa, ao longo da margem do Tejo, à fronteira de Espanha e que era entregue à “Companhia das Obras Públicas” — criada no ano anterior com o intuito de construir vias de comunicação e fomentar as comunicações em território nacional. Um elo de ligação ferroviário seria então construído entre Portugal e o resto da Europa, passando por Espanha.

Um ano passado, e devido às muitas críticas e elevado ceticismo gerados na altura com a construção de tão grande projeto, bem como a instabilidade social e política, os trabalhos foram suspensos. É só 6 anos depois em 1852 que a ideia voltou a ser repensada por parte do então Ministro das Obras Públicas, Fontes Pereira de Melo. A 6 de Maio do mesmo ano foi aberto a concurso a construção da obra, sendo esta mais tarde adjudicada à “Companhia Central e Peninsular dos Caminhos de Ferro de Portugal” presidida pelo britânico Hardy Hislop. Mais duas propostas foram recebidas, uma inglesa e outra espanhola, mas ambas não foram aceites por serem recebidas já depois da concessão provisória ter sido outorgada à “Central e Peninsular”, apesar de serem financeiramente mais lucrativas. Em Maio de 1853 o contrato entre o governo e Harly Hislop foi finalmente assinado.



Fig 2.1 – Logótipo da Companhia Central dos Caminhos de Ferro de Portugal (Wikipedia, 2015)

Já no reinado de D. Pedro V, passados 3 anos a 28 de Outubro de 1856, é que se dá a primeira viagem de comboio feita em Portugal num troço já terminado que ligava Lisboa ao Carregado. Numa extensão de 36 quilómetros a viagem demorava cerca de 40 minutos.

A construção dos caminhos-de-ferro em Portugal continuou, com alguns avanços e recuos, concentrando-se no século XIX entre os anos de 1854 e 1891 e atingindo valores na ordem dos 3250 quilómetros de extensão por volta de 1910. Com as duas grandes guerras a situação ferroviária no país piorou principalmente com a escassez de recursos e consequente aumento do preço dos combustíveis e, mais tarde, o surgimento do automóvel e dos transportes aéreos também abalou o seu desenvolvimento. É já a partir do final dos anos sessenta que se realiza o maior investimento realizado nos caminhos-de-ferro com valores acima de um milhão de contos, sendo que a próxima grande injeção de investimento seria à data da entrada de Portugal na União Europeia em 1986.

Portugal conta hoje com milhares de quilómetros de ferrovia que ao longo desta mais de centena e meia de anos ajudou o país a se desenvolver, populações e cidades a crescer e indústrias a emergir, sendo preponderante na história e desenvolvimento do país.

2.2. LINHA DO DOURO

Encontrando-se os principais centros comerciais e económicos na zona litoral do país, a ligação a zonas mais interiores do território por vias férreas era imprescindível. Com o objetivo de satisfazer o desejo à burguesia mercantilista do Porto do século XIX, que pretendia alargar os seus mercados às zonas do Alto Douro e Trás-os-Montes, produtores vinícolas das regiões apoiavam também a causa com o desejo de exportar os seus produtos e dá-los a conhecer através de meios mais acessíveis. Ao país vizinho espanhol, uma via de comunicação que ligasse o seu interior à maior cidade do norte de Portugal, e que poderia potenciar câmbios e relações comerciais, era também de grande interesse.

É com base nestes pressupostos que a construção da linha ferroviária do Douro é lançada. Aprovada pelo Decreto-Lei de 2 de julho de 1867, a construção das linhas ferroviárias do Minho e do Douro é idealizada, porém, só cinco anos mais tarde os trabalhos se iniciam. Enquanto que as duas linhas partilhariam o troço do Porto até Ermesinde, o caminho-de-ferro do Vale do Douro seguiria para Este, rumo a Espanha.

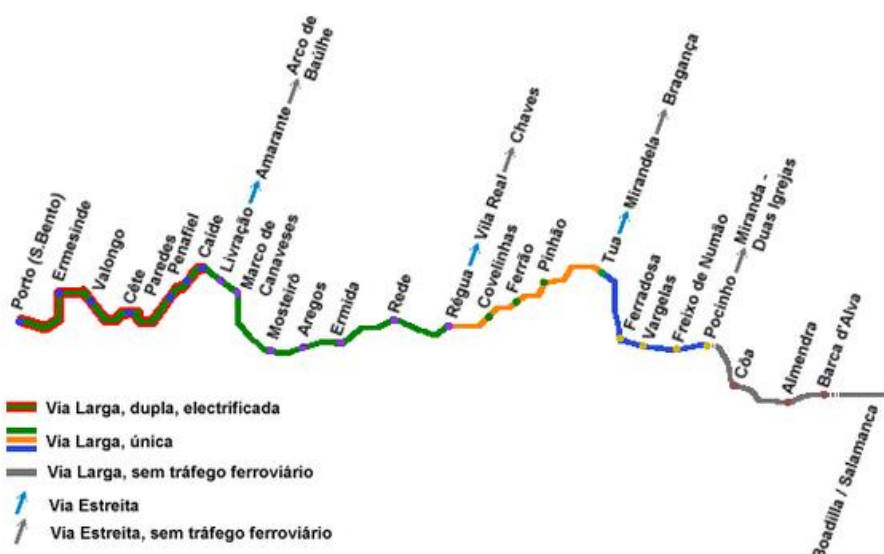


Fig 2.2 – Percurso e estações da Linha do Douro (douroultratrail.com, 2015)

A 8 de julho de 1873 são iniciadas as obras a leste de Ermesinde com destino previsto a Penafiel, não existindo grandes entraves construtivos devido à acessibilidade dos terrenos. No verão de 1875, o troço é inaugurado com uma extensão de aproximadamente 30km.

As dificuldades não sentidas até este ponto começam a fazer-se notar à medida que o troço prosseguia para o interior do país. Progredindo lentamente, foram surgindo as primeiras linhas divisórias de água entre o Sousa e o Tâmega sobre as quais se construíram pontes, os primeiros montes pelos quais se abriram túneis. Chegando à estação de Mosteirô, a linha segue junto ao rio até ao importante entreposto comercial da Régua, a meados do ano de 1879, e ao Pinhão, um ano depois.



Fig 2.3 – Estação Ferroviária da Régua (skyscrapercity.com, 2015)

Somente três anos passados em 1883 é que a linha deu seguimento ao seu percurso, estabelecendo a ligação entre as estações do Pinhão e do Tua. Do outro lado da fronteira, há época, também se prosseguiram os trabalhos com o objetivo de conectar as linhas existentes à fronteira com Portugal donde, a partir daí, facilmente se chegaria a Salamanca e Madrid.

O ponto em comum entre o troço português da linha e o espanhol era Barca d'Alva. Com um interregno de quatro anos após a inauguração do último troço construído, é só a 10 de janeiro de 1887 que a ligação entre a estação do Tua e Pocinho é aberta.

No mês de dezembro do mesmo ano a linha do Douro era concluída. Fazendo a ligação entre os dois lados da fronteira, e como cerimónia de inauguração, realizou-se um encontro de comboios simbólico sobre a ponte ferroviária que atravessa o Rio Águeda. Vindo uma de um lado da fronteira e outra do outro, as duas máquinas encontraram-se a meio da ponte, onde de seguida, atreladas, seguiram para a localidade de La Fregeneda em Espanha para a continuação das comemorações.

Concluído o projeto, a linha ferroviária do Vale do Douro trouxe novo fervor à região, dinamizando a economia e os laços comerciais entre os dois países. Mercadorias diversas, matérias-primas, produtos agrícolas faziam parte, entre outros, dos bens carregados pelos comboios da altura. Para além destes, serviços de transporte de passageiros também foram introduzidos, sendo que por volta já do século XX criou-se um serviço rápido direto do Porto a Medina del Campo, com correspondência neste ponto a Madrid.

No final dos anos vinte, apresentando a linha já algumas debilidades devido à introdução de novas locomotivas mais pesadas em relação às anteriores e que gradualmente iam danificando a sua estrutura, foram prometidos trabalhos de melhoramento dos caminhos-de-ferro, bem como reforço das obras de arte existentes, que nunca foram postos em prática justificados pela depressão económica do país.

Com o passar dos anos, a linha foi cada vez tendo menos uso, contribuindo para isso uma transferência dos tráfegos de mercadorias para a linha da Beira Alta. Em 1984 o governo espanhol decide encerrar a linha que ligava La Fuente de San Esteban a La Fregeneda, cujo troço fazia parte da linha internacional até Barca d'Alva, consumando-se a sua inatividade no ano seguinte. Finalmente, passados três anos, em 1988, o troço português de ligação desde o Pocinho até Barca d'Alva foi encerrado, estando desativado até aos dias de hoje.



Fig 2.4 – Estação Ferroviária de Barca d'Alva (olhares.sapo.pt, 2015)

3

TIPOS DE INSTABILIDADES EM TALUDES

3.1. INTRODUÇÃO

Os diferentes tipos de rotura em taludes rochosos estão associados às diferentes estruturas geológicas, sendo assim importante que se reconheça o potencial de instabilidade durante a fase inicial de um projeto. As diferentes situações de instabilidade podem ser identificadas através da análise dos diagramas representativos dos polos das descontinuidades e das respetivas curvas de isodensidades. (Hoek e Bray, 1999)

A estabilidade de um talude é determinada por fatores geométricos como a altura ou a sua inclinação, fatores hidrogeológicos (presença de água), fatores geológicos e fatores geotécnicos relacionados com o comportamento mecânico do terreno. Quando combinados, são estes os fatores que podem determinar a condição de rotura ao largo de uma ou várias superfícies, originando instabilidades.

Segundo González de Vallejo (2002) existem dois tipos de fatores que influenciam a instabilidade de taludes: fatores condicionantes e fatores desencadeadores. Os fatores hidrogeológicos, geológicos e geotécnicos estão inseridos nos primeiros e caracterizam-se por serem intrínsecos aos materiais naturais. Os fatores desencadeadores provocam a rotura assim que se cumpram uma série de condições. São fatores externos que atuam sobre os solos ou maciços rochosos, modificando as suas características e propriedades e as condições de equilíbrio do talude. No quadro seguinte estes fatores são expostos mais especificamente.

Quadro 3.1 – Fatores influenciadores da instabilidade de taludes

Fatores Condicionantes (Passivos)	Fatores Desencadeadores (Ativos)
Estratigrafia e litologia	Sobrecargas estáticas
Estrutura geológica	Cargas dinâmicas
Condições hidrogeológicas e comportamento hidrogeológico dos materiais	Mudanças das condições hidrogeológicas
Propriedades físicas, resistentes	Fatores climáticos
Tensões naturais e estado tensão-deformação	Variações da geometria
-	Redução de parâmetros resistentes

Os diferentes tipos de rotura são condicionados pelo grau de fracturação do maciço rochoso e pela orientação e distribuição das descontinuidades respeitantes ao talude, sendo a estabilidade definida pelos parâmetros resistentes das descontinuidades e da matriz rochosa. Em maciços rochosos duros ou resistentes, a situação dos planos de rotura é determinada pelas descontinuidades, enquanto que em maciços formados maioritariamente por rocha branda, a matriz rochosa também tem um papel determinante na geração destes planos e no mecanismo de rotura (González de Vallejo, 2002).

Os tipos de rotura mais frequentes são rotura planar, rotura em cunha e *toppling*, havendo ainda outros dois correspondendo à rotura circular e rotura por encurvadura. Todos serão abordados de forma individual de seguida.

3.2. ANÁLISE CINEMÁTICA

Depois do tipo de rotura ser identificado através da projeção hemisférica, o mesmo diagrama pode ser utilizado para examinar a direção segundo a qual o bloco irá deslizar e indicar as possíveis condições de estabilidade. Este processo é conhecido como análise cinemática.

A aplicação deste tipo de análise pode ser observada na figura 3.1, onde duas descontinuidades planas formaram um bloco em cunha que deslizou na direção do fotógrafo. Se a face do talude fosse menos inclinada que a linha de intersecção entre os dois planos das descontinuidades, apesar de estes formarem uma cunha, o deslizamento do bloco não seria possível. Esta relação entre a direção em que o bloco irá deslizar e a orientação da face do talude é rapidamente visível na projeção hemisférica. Contudo, enquanto que a análise desta projeção dá uma boa indicação das condições de estabilidade, não tem em consideração forças externas como a pressão de água ou reforços incluindo ancoragens tensionadas, que podem ter um grande efeito no que toca à estabilidade. O procedimento usual em projeto é o uso da análise cinemática para identificar potenciais blocos instáveis, seguido de uma análise numérica mais detalhada da estabilidade desses blocos.



Fig 3.1 – Rotura em cunha formada pela intersecção de dois planos (Wyllie e Mah, 2004)

Um exemplo deste tipo de análise está representado na figura 3.2 onde o talude rochoso contém três tipos de descontinuidades. A existência destas descontinuidades pode resultar em blocos instáveis que dependem do seu azimute e pendor em relação à face do talude; condições de estabilidade podem ser estudadas através da projeção hemisférica descritas em seguida (figura 3.3).

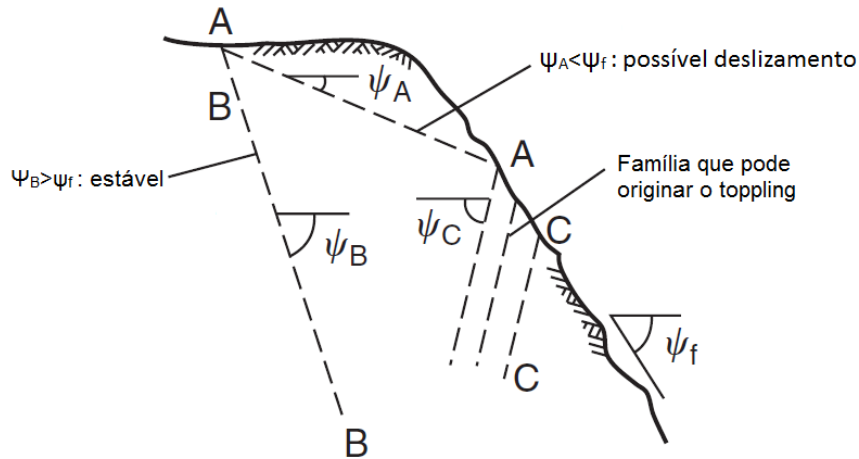


Fig 3.2 – Análise cinemática de blocos rochosos em talude: descontinuidades (Wyllie e Mah, 2004)

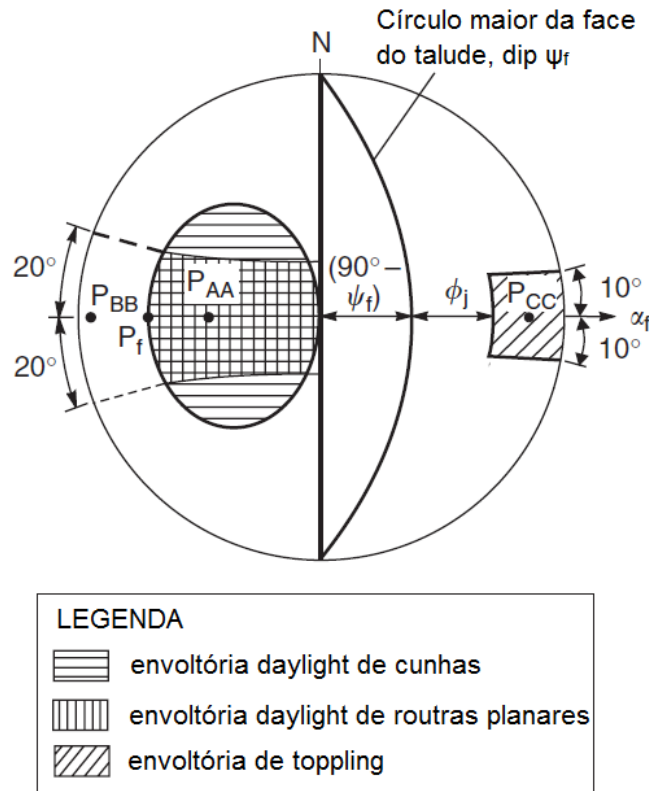


Fig 3.3 - Análise cinemática de blocos rochosos em talude: representação de envoltórias em projeção hemisférica (Wyllie e Mah, 2004)

3.3. TIPOS DE ROTURA

3.3.1. ROTURA PLANAR

Este tipo de instabilidade ocorre a favor de uma superfície pré-existente, que pode ser a estratificação do maciço, uma falha, etc. A condição básica é a presença de descontinuidades a mergulhar a favor do talude e com a sua mesma direção, cumprindo-se as seguintes condições:

- A inclinação das superfícies das descontinuidades é inferior à inclinação da face do talude;
- A inclinação das descontinuidades é maior que o seu ao ângulo de atrito interno.

Em taludes escavados paralelos à estratificação, podem ter lugar roturas planas por deslizamento dos estratos; este tipo de rotura é típica em maciços xistosos ou de ardósia, gerando-se os planos de rotura a favor da foliação. Os diferentes tipos de roturas planas dependem da distribuição e características das descontinuidades do talude, sendo as mais frequentes a rotura por um plano que emerge na face ou no pé do talude, com ou sem fissuras de tração, e a rotura por um plano paralelo à face do talude, por erosão ou diminuição da resistência do pé do talude.

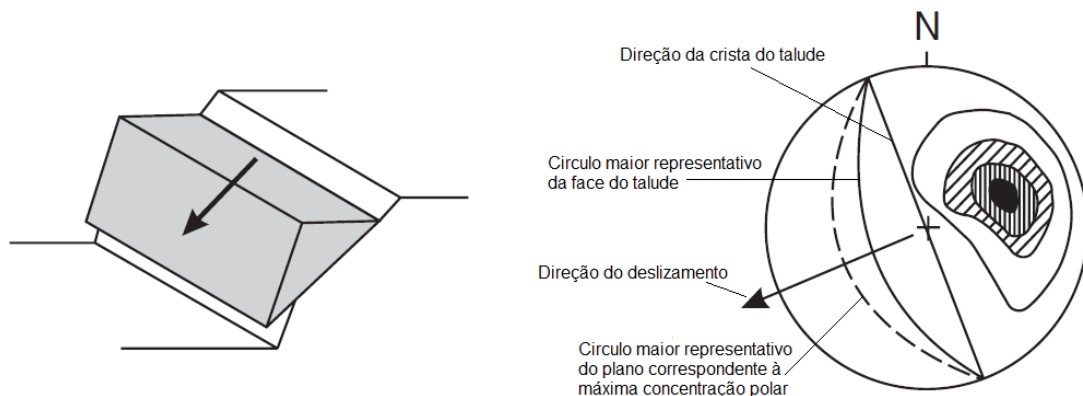


Fig 3.4 – Rotura planar (Wyllie e Mah, 2004)

Na figura 3.2, um bloco planar potencialmente instável é formado pelo plano AA, caracterizado por ter um pendor menor que a face ($\psi_A < \psi_f$) que emerge (“*daylight*”) no plano da face do talude. Contudo, o deslizamento não é possível no plano BB que tem por sua vez um pendor maior do que a face do talude ($\psi_B > \psi_f$), bem como o conjunto de descontinuidades CC que apresenta uma inclinação contrária à mesma face. Os polos da face do talude (P_f) e o conjunto de descontinuidades (P_{AA}, P_{BB}, P_{CC}) estão representados na projeção hemisférica da figura 3.3, sendo que a posição desses polos em relação à face do talude mostra que os polos de todos os planos potencialmente instáveis, estão inseridos no polo da face do talude, cuja área é denominada de envoltória “*daylight*”. Esta área pode assim ser usada para identificar de forma mais rápida blocos que apresentam alguma instabilidade.

É de referir ainda que o azimute da reta de maior declive do conjunto de descontinuidades irá influenciar a estabilidade. O deslizamento planar não é possível se o azimute da reta de maior declive da descontinuidade diferir da direção da reta de maior declive da face por um valor maior do que 20° .

3.3.2. ROTURA EM CUNHA

Esta rotura corresponde ao deslizamento de um bloco em forma de cunha, formado por dois planos de descontinuidade, a favor da sua linha de interceção. Para que este tipo de rotura aconteça, os dois planos devem emergir à superfície do talude e ambas as condições enunciadas anteriormente para a rotura planar têm de ser cumpridas. Na grande parte dos casos a rotura em forma de cunha costuma estar presente em maciços que apresentam vários tipos de famílias de descontinuidades, cuja orientação e continuidade, determina a forma e o volume da cunha.

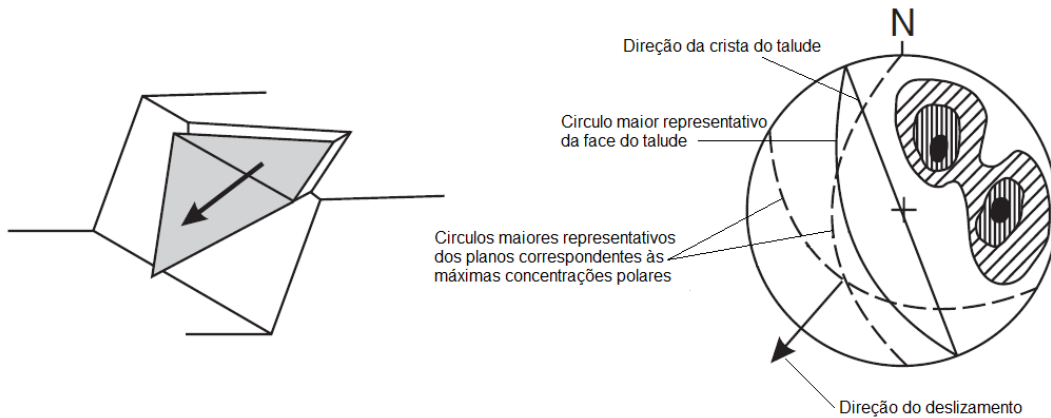


Fig 3.5 – Rotura em cunha (Wyllie e Mah, 2004)

A análise cinemática desta instabilidade pode ser vista de forma similar à da rotura planar, porém um pouco mais complexa, uma vez que existem dois planos possíveis para a análise da direção do deslizamento da cunha, podendo esse escorregamento processar-se apenas num desses planos ou nos dois ao mesmo tempo. É de ainda salientar, como mostra a figura 3.3, que a envoltória “*daylight*” da rotura de cunhas é maior que a da rotura planar.

3.3.3. ROTURA POR “TOPPLING”

O *toppling* tem origem em taludes de maciços rochosos onde os estratos apresentam um pendor contrário à inclinação da face do talude. Este tipo de rotura implica um movimento de rotação dos blocos fraturados, não estando condicionada a estabilidade dos mesmos unicamente pela sua resistência ao escorregamento.

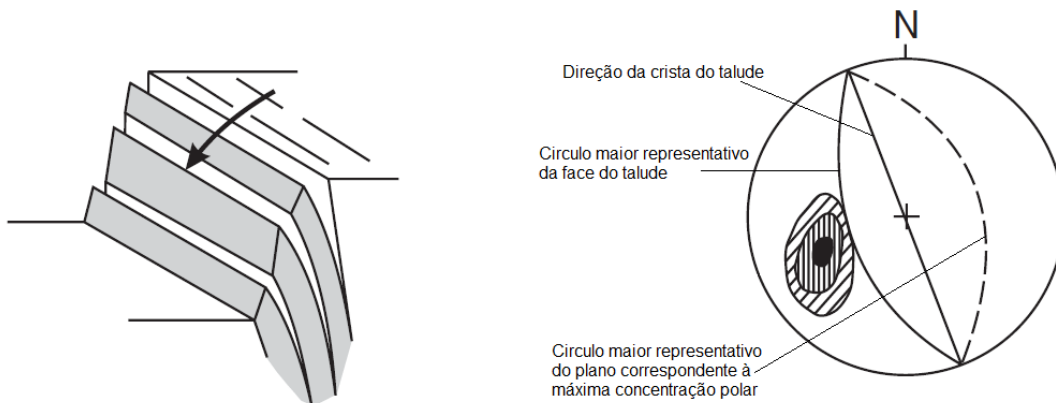


Fig 3.6 – Rotura por “*toppling*” (Wyllie e Mah, 2004)

Para que uma rotura por *toppling* possa ocorrer, o azimute da reta de maior declive das descontinuidades que mergulha no sentido oposto ao do pendor da face do talude não pode diferir mais que 10° do azimute da reta de maior declive da face do talude para que uma série de placas se possa formar paralelamente à face do mesmo. Outra condição é a de que o pendor dos planos das descontinuidades deve ser suficientemente elevado para que o deslizamento entre placas possa ocorrer. Se as faces das camadas tiverem um ângulo de atrito ϕ_j , então o escorregamento só se vai dar se a direção das tensões de compressão aplicadas fizer um ângulo superior a ϕ_j com a normal das descontinuidades. Sendo a direção da tensão principal máxima numa escavação paralela à face do corte (pendor ψ_f), então o deslizamento entre camadas e a rotura por *toppling* ocorrerá em planos de descontinuidades com pendor ψ_p quando a seguinte condição for verificada: $(90^\circ - \psi_f) + \phi_j < \psi_p$

Estas condições relacionadas com a orientação dos planos de descontinuidades que podem originar rotura por *toppling* estão representadas na figura 3.3. A envoltória que define a orientação destes planos encontra-se no lado oposto da projeção hemisférica das envoltórias em cunha e planar.

3.3.4. ROTURA CIRCULAR

A rotura circular pode ocorrer em maciços rochosos brandos pouco competentes e em maciços muito alterados ou com elevado nível de fracturação, que normalmente apresentam um comportamento isotrópico e onde os planos de descontinuidade não controlam o comportamento mecânico, comportando-se o maciço como um solo. É importante referir ainda que, apesar disso, a existência de grandes planos de descontinuidade neste tipo de maciços, pode condicionar modelos de rotura com outras tipologias.

A superfície de deslizamento é semelhante a um arco circular de grande raio determinando uma superfície de rotura pouco profunda. Quanto à análise de estabilidade deste tipo de rotura, esta pode ter em conta um método idêntico aos da estabilidade de solos, utilizando parâmetros de resistência adequados.

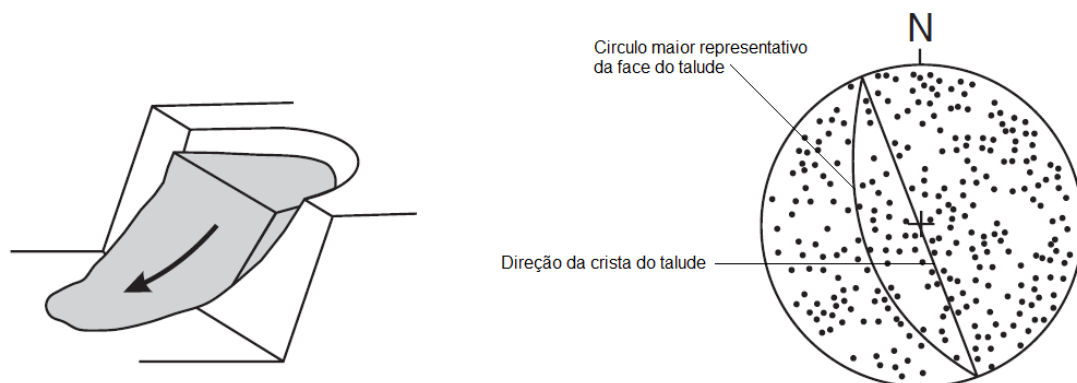


Fig 3.7 – Rotura circular (Wyllie e Mah, 2004)

3.3.5. ROTURA POR ENCURVADURA

Esta rotura ocorre quando os planos de descontinuidades são paralelos à face do talude e a sua inclinação é superior ao ângulo de atrito interno. Outra condição necessária é a que os estratos sejam suficientemente esbeltos, em relação à altura do talude, para assim poderem encurvar.

Normalmente costumam ter origem em taludes escavados paralelamente à estratificação, quando os planos de descontinuidades apresentam espaçamentos reduzidos.

Existem várias causas que podem originar este tipo de instabilidade, entre elas:

- Altura excessiva do talude;
- Geometria desfavorável dos estratos rochosos;
- Existência de forças externas aplicadas sobre os estratos;
- Concentração desfavorável de tensões;
- Existência de pressões de água sobre os estratos.

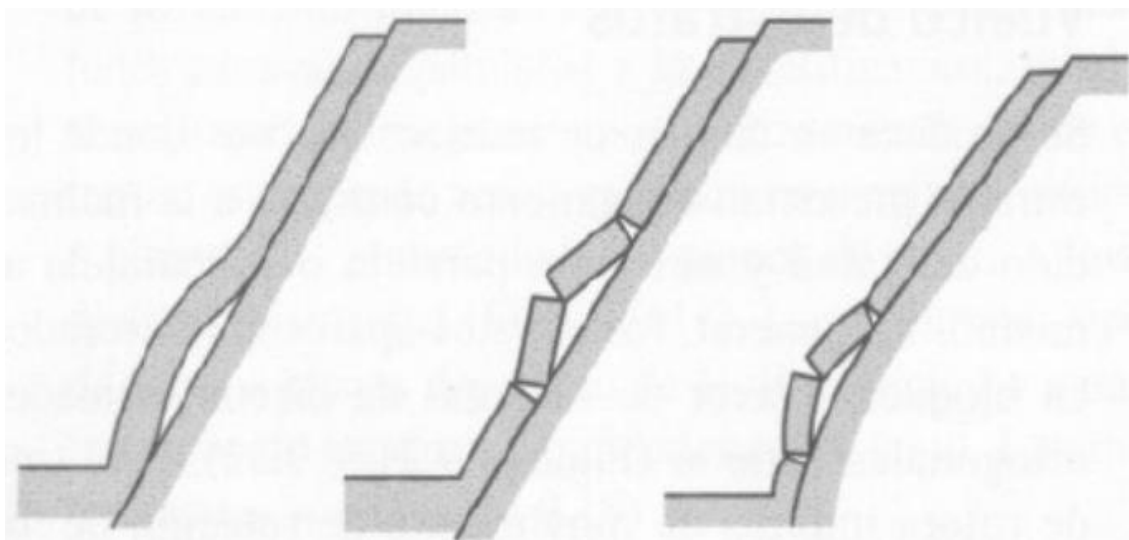


Fig 3.8 – Rotura por encurvadura (González de Vallejo, 2002)

3.4. QUEDA DE BLOCOS

3.4.1. INTRODUÇÃO

O fenómeno da queda e desprendimento de blocos ao longo de auto-estradas e vias férreas é, dado o seu elevado valor de aleatoriedade, um fenómeno de extrema difícil previsão. Não tendo o impacto económico que por vezes outros tipos de instabilidades poderão ter devido à sua grande escala, é um acontecimento que, no entanto, tem de ser tido em conta. Por exemplo, em vias automóveis rodeadas por taludes rochosos de altura considerável, até mesmo uma pequena queda de blocos pode causar sérios estragos a veículos, podendo ferir pessoas ou até mesmo causar fatalidades. Outro aspeto a considerar é o possível corte prolongado de tráfego que poderá ter consequências económicas diretas ou indiretas de certas regiões.



Fig 3.9 – Queda de blocos leva a encerramento de estrada em França (2alpesnet.com, 2015)

No que toca a linhas férreas, muitas vezes grande parte dessas infra-estruturas têm dezenas ou mesmo centenas de anos. Aquando da sua construção, possivelmente métodos explosivos foram utilizados que enfraqueceram e diminuíram a resistência do maciço rochoso e que, conjugados com outros fatores desenvolvidos adiante, causam uma instabilidade constante que tem de ser prevenida.

Num desprendimento de blocos, o fator mais importante que controla a sua trajetória de queda é a geometria do talude (Hoek, 2007). Em taludes compostos maioritariamente por diaclases graníticas, a inclinação dos seus estratos é importante porque transmite uma componente horizontal ao percurso do bloco depois de este saltar ou rolar na sua face.

Maciços rochosos muito regulares e de superfícies lisas são considerados mais perigosos uma vez que não retardam de forma significativa qualquer tipo de movimento na queda de blocos, enquanto que, aqueles que apresentam algum tipo de vegetação, ou até mesmo gravilha, têm o poder de diminuir a velocidade de queda absorvendo a sua energia. Este poder que um certo material tem de retardar o movimento é chamado de coeficiente de restituição.

Outros fatores que influenciam a trajetória dos blocos, ainda que de menor importância, são o seu tamanho e forma, o coeficiente de atrito da superfície do maciço rochoso e a possibilidade de fragmentação do bloco no momento de impacto com o talude. Ainda assim, havendo vários fatores que se têm de ter em consideração, é possível fazer-se uma previsão relativamente precisa do percurso que o desprendimento vai tomar com a ajuda de *software* específico.

Ao longo da sua trajetória de queda, um bloco rochoso pode apresentar quatro tipos distintos de movimento: queda livre, salto, rolamento e deslizamento. Num típico desprendimento, mais do que um destes movimentos pode ser observado, dependendo principalmente da geometria, inclinação da encosta. Segundo Ritchie (1963), o movimento de queda livre ocorre se a essa inclinação for superior a 76° , sendo que o seu valor pode ser generalizado para valores superiores a 70° . Ao longo do percurso de queda, caso o declive da encosta diminua, o corpo acaba por chocar com a superfície, dando origem ao movimento definido como salto. Durante este período, o bloco pode apresentar alguma fragmentação, diminuindo a sua energia a cada impacto. Para inclinações por volta dos 45° , este movimento dá lugar a outro, transformando-se agora num movimento de rolamento. Neste tipo de movimento, os blocos rochosos estão quase constantemente em contacto com o solo. O deslizamento é outro tipo de movimento existente, mas normalmente acontece apenas na fase inicial e final de uma queda de blocos. Se a inclinação da encosta aumenta, um bloco que desliza rapidamente começa a cair, saltar ou rolar. Se a inclinação se mantiver constante enquanto o bloco desliza, este acaba por se imobilizar devido à perda de energia através do efeito do atrito (Bozzolo e Pamini, 1986).

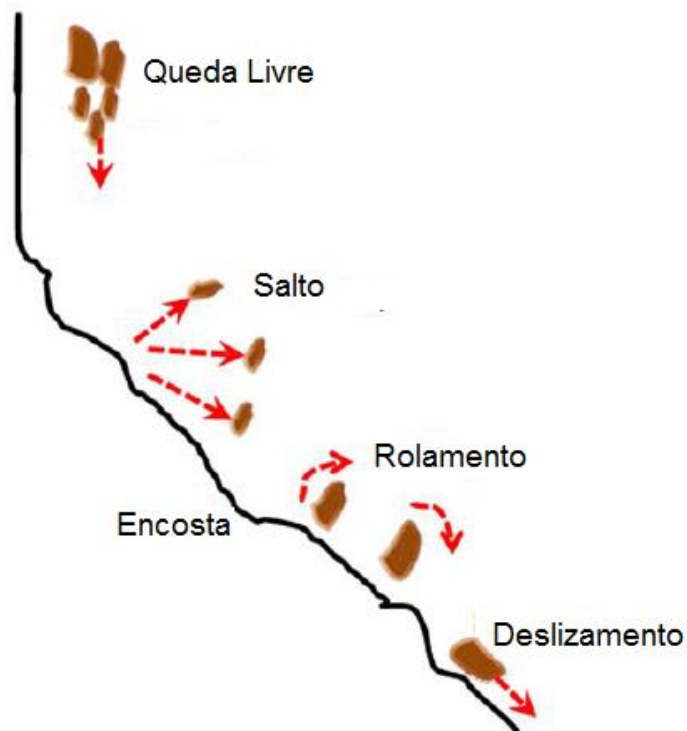


Fig 3.10 – Tipos de movimento durante um desprendimento de blocos (Basson, 2012)

3.4.2. CAUSAS

A queda de blocos normalmente é originada devido a alterações do maciço rochoso geradas por eventos biológicos ou climáticos. Eventos esses podem incluir um aumento de pressões neutras devido à infiltração de água no solo, erosão do material envolvente durante grandes períodos de precipitação, processo de gelo-degelo em locais de clima frio, degradação química ou desgaste do maciço e crescimento de raízes no solo (Hoek, 2007). O ambiente de construção perto do local pode ainda aumentar o risco em cerca de duas vezes da possibilidade de um desprendimento vir a acontecer.

Um estudo levado a cabo pelo Estado da Califórnia, Estados Unidos da América, foi feito com o intuito de procurar saber as causas mais prováveis para este tipo de instabilidade. Devido à variedade da sua topografia como do seu clima, os seus estudos proporcionam uma boa diretriz para se saber de facto que tipo de fatores pode influenciar este fenómeno (Wyllie e Mah, 2004).

Das 14 diferentes causas encontradas, seis estão diretamente ligadas à existência de água, nomeadamente chuva, derretimento de neve, escoamentos superficiais, infiltrações, entre outros. No que respeita a causas que não estejam diretamente ligadas a este tipo, ainda que com bastante menos frequência, podem apontar-se a passagem de tráfego pesado perto do local, existência de animais selvagens, decomposição do solo e crescimento de raízes entre fendas que podem abrir fraturas existentes e soltar blocos rochosos da face do talude. Cerca de 85% da queda de blocos realizados neste estudo estão relacionados com a existência de água e fatores geológicos demonstrando assim que os principais fatores que despoletam estes acontecimentos são desta natureza. É de notar ainda que este estudo foi desenvolvido ao longo de um período com fraca atividade sísmica, sendo também este um fator desencadeador de instabilidade e desprendimento de blocos (Wyllie e Mah, 2004).

Um outro estudo mais antigo conduzido por Peckover (1975) no Canadá ao longo de uma linha férrea demonstra claramente que este fenómeno dá-se predominantemente entre os meses de maior frio e precipitação na região, Outubro e Março.

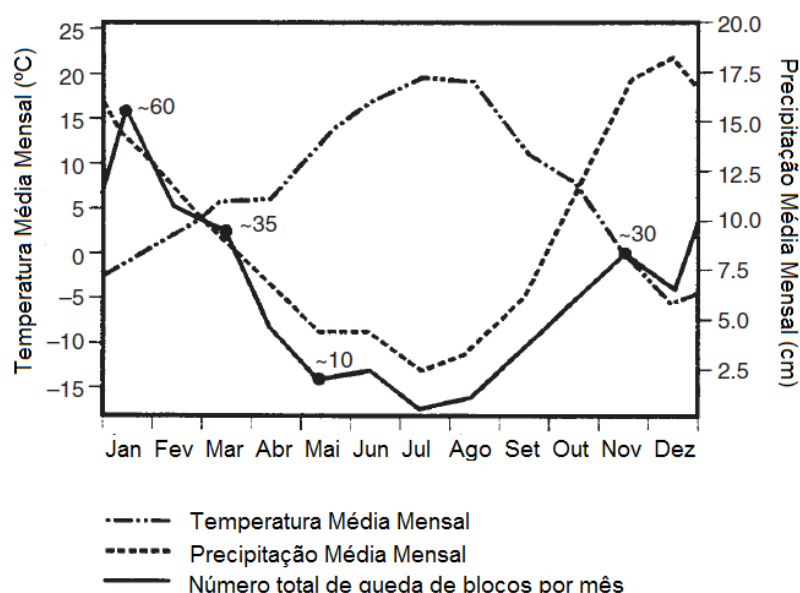


Fig 3.11 – Correlação do número de queda de blocos com a temperatura e precipitação em linhas férreas em Fraser Canyon, Colômbia Britânica (Peckover, 1975)

3.4.3. MEDIDAS DE ESTABILIZAÇÃO

Em terreno montanhoso, onde a instabilidade de certas encostas é conhecida e pode de algum modo constituir perigo para as suas imediações, a implementação de medidas estabilizadoras e protetoras localizadas é indispensável. Estas medidas, têm como objetivo principal prevenir as possíveis instabilidades e mitigar os danos devido, no âmbito de estudo desta dissertação, ao desprendimento de blocos.

Para que a escolha do(s) tipo(s) de medida(s) a implementar seja(m) a(s) mais adequada(s), várias considerações têm de ser tomadas em conta. O local tem de ser estudado de forma a que se conheçam as propriedades e características geotécnicas mais predominantes, bem como questões construtivas e de enquadramento ambiental dos trabalhos são de extrema importância.

A aplicação deste tipo de medidas depende principalmente da tipologia, magnitude e velocidade dos movimentos, podendo ser executadas antes, em encostas potencialmente instáveis, ou já depois do desprendimento ter ocorrido. Partindo deste ponto de vista, dois tipos de medidas podem ser aplicadas: ativas e passivas.

Compreende-se por medidas ativas medidas que serão tomadas com o intuito de estabilização dos elementos instáveis ou potencialmente instáveis, tentando extinguir as deformações existentes atuando diretamente na fonte das mesmas. A característica comum destas técnicas é a minimização da descompressão e desprendimento de massas rochosas que podem ocorrer, no caso de linhas ferroviárias, aquando da sua provável construção usando métodos explosivos que acabam por enfraquecer o maciço.

Medidas passivas são aquelas que minimizam o perigo da queda de blocos, permitindo que o desprendimento se dê, mas controlando as distâncias e direções dos seus blocos, evitando assim possíveis danos que possam vir a causar. Técnicas usadas com esta finalidade têm em comum a capacidade de absorver energia proveniente dos blocos em queda, onde estes serão imobilizados ao longo do seu percurso, ou então desviados da estrutura a proteger (Wyllie e Mah, 2004).

De seguida as principais medidas aplicáveis a este tipo de situações serão apresentadas, tanto ativas como passivas. É de notar, no entanto, que para além das soluções apresentadas, outras existem. Porém, por não se enquadrarem, por parte do autor, no projeto em causa a ser discutido mais adiante, não são mencionadas por falta de enquadramento paisagístico e facilidade de execução face ao local.

3.4.3.1. Medidas Ativas

- Redes de cabos

Em zonas de massas rochosas localizadas e sensivelmente mais fraturadas e/ou desconsolidadas do talude, a aplicação de redes de cabos de aço de alta resistência é uma das medidas mais utilizadas para aumentar a estabilidade da encosta.

Aglomerados rochosos de grandes dimensões em situação de elevada instabilidade e que apresentem indícios de queda iminente podem ser estabilizados através deste método, sendo particularmente interessante a sua aplicação em linhas ferroviárias.

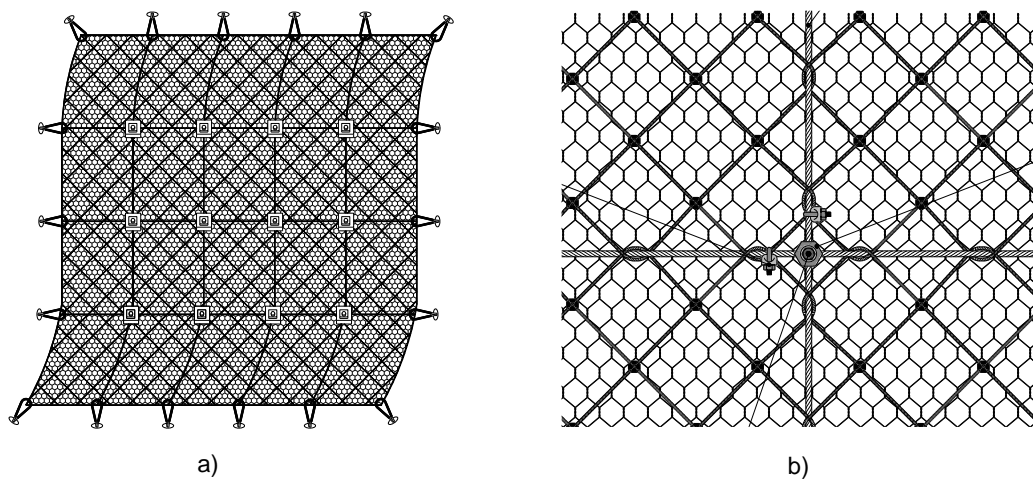


Fig 3.12 – Sistema de redes de cabos: a) alçado e b) alçado em pormenor (GEG, 2015)



Fig 3.13 –a) Detalhe das redes em cabos e b) enquadramento paisagístico (GEG, 2015)

Apesar de ser uma solução densa a nível visual, existindo sobreposição de cabos de aço e os demais dispositivos metálicos de amarração, fixação e aperto, é uma solução aceitável no que respeita o seu enquadramento paisagístico, facilmente observável na figura 3.13b.

- Redes pregadas associadas a cabos de aço

A aplicação de um sistema de redes pregadas e reforçadas com cabos de aço permite a estabilização das massas rochosas de modo a não permitir a sua queda para a área a proteger e a minimizar o seu movimento e descompressão do maciço.

É uma das soluções de maior aplicabilidade em ambiente ferroviário, pois conseguem cobrir uma maior variedade de situações de desprendimentos e fenómenos de destabilização (Domingues, 2009).

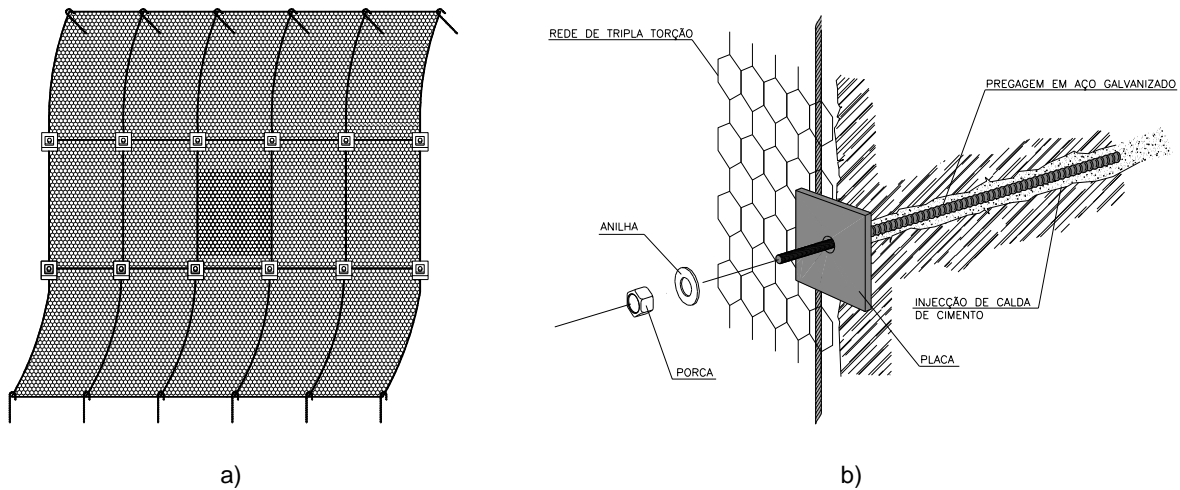


Fig 3.14 –a) Sistema de redes e pregagens associadas a cabos de aço e b) Perspetiva do sistema de redes pregadas (GEG, 2015)

O sistema de redes deverá ser ligeiramente tensionado de modo a minimizar folgas e a antecipar a sua atuação em termos de minimização da descompressão do maciço e fenómenos de desprendimentos, sendo que deverá ser sempre ponderada a necessidade de execução de pregagens adicionais de forma a garantir a correta modelação do talude ou a estabilização de blocos rochosos específicos.



Fig 3.15 – Linha da Beira Baixa – Redes pregadas (GEG, 2015)

Apesar de ser uma solução constituída integralmente por componentes de aço, é uma solução bastante integrável no meio envolvente principalmente com o passar dos anos, já que a própria vegetação existente no local se encarrega de lhe prover um disfarce natural.

- Maciço de recalçamento

Os maciços de recalçamento consistem numa medida ativa localizada cuja funcionalidade recai na estabilização de um bloco ou conjunto de blocos. Normalmente são colocados onde exista alguma instabilidade ao longo da linha férrea em locais de massas posicionadas em consola, cunhas ou cavidades e blocos desapoitados. Esta intervenção evita assim movimentos e descompressões do maciço rochoso, reduzindo o perigo para a linha e sua circulação.



a)



b)

Fig 3.16 – a) Recalçamento em pedra arrumada e argamassada manualmente e b) Vigas de betão armado revestidas com pedra (GEG, 2015)

Estes maciços de recalçamento têm vindo a ser aplicados desde há muito tempo, fazendo parte do grupo de soluções de estabilização e também de suporte utilizados ao longo das linhas ferroviárias portuguesas.

Quanto ao seu processo construtivo, os recalçamentos deverão ser executados em pedra arrumada e argamassada à mão, sendo por isso um processo mais moroso comparativamente a outros. Contudo, devido à sua aplicação ao longo de todo território nacional, é uma solução que deverá ser mantida e promovida.

Caso o seu processo de construção não seja possível, por falta de recursos ou outros, uma solução alternativa aos recalçamentos será a utilização de betão armado. No caso de serem vigas, estas deverão ser pregadas ao maciço, sendo que por questões de integração paisagística deverão apresentar um recobrimento com pedra local como acabamento final (figura 3.16b).

Uma ação adicional de extrema importância a ser implementada neste tipo de medidas é também a colocação de geodrenos em todos os recalçamentos, de forma a evitar o impulso hidrostático desfavorável à estabilidade dos blocos.

- Muro de contenção

Os muros de contenção ou de suporte acarretam normalmente escavações e são executados para conter um terreno que, por si só e sem a ação estabilizadora do muro, seria muito provavelmente instável. (Teixeira, 2009).

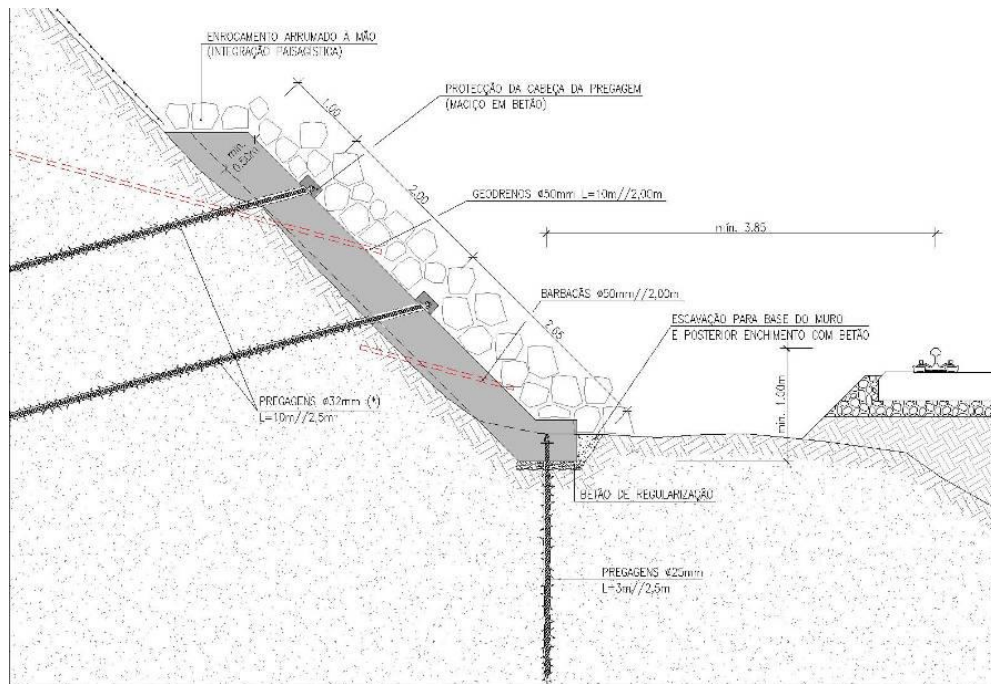


Fig 3.17 – Corte tipo do muro na base do escorregamento (GEG, 2015)

A construção deste tipo de muros no pé do talude funciona como elemento resistente, de contenção e estabilização e destaca-se por ser uma solução eficaz na retenção de solo instável.

Existem vários tipos de muros com esta finalidade, sendo alguns deles visíveis ao longo das linhas de caminho-de-ferro portuguesas. Muros mais antigos normalmente eram construídos em pedra de alvenaria, contudo, com o passar dos anos esse processo de construção tem caído um pouco em desuso.

A construção em betão armado, conjuntamente com dispositivos de amarração e fundação, como pregagens e ancoragens, e ainda a implementação de geodrenos para facilitar a drenagem do muro, são soluções mais atuais. É de salientar, no entanto, que o uso destes materiais é pouco integrável em ambientes naturais como o estudado. Assim sendo, sempre que este tipo de solução é posta em prática, é aconselhável que todo o muro seja coberto por enrocamento arrumado à mão, se possível disponível no local, para uma melhor integração paisagística.

3.4.3.2. Medidas Passivas

- Rede Suspensa

O sistema de redes suspensas funciona como um sistema de revestimento simples contra a queda de blocos rochosos e cuja aplicação se situa onde a superfície se possa desfragmentar com mais facilidade.

Segundo a empresa *Maccaferri*, que se dedica à comercialização desta e outras medidas de estabilização e proteção de taludes, o sistema de redes suspensa apresenta três funcionalidades:

- Controlar a queda de blocos permitindo a sua acumulação no pé do talude;
- Proteger obras de infra-estruturas e de construção civil situadas nas proximidades dos taludes;
- Conter o desprendimento de fragmentos de rochas em taludes sujeitos a processos de alteração e degradação dos maciços devido à ação da vegetação, dilatação térmica, ação sísmica, etc.

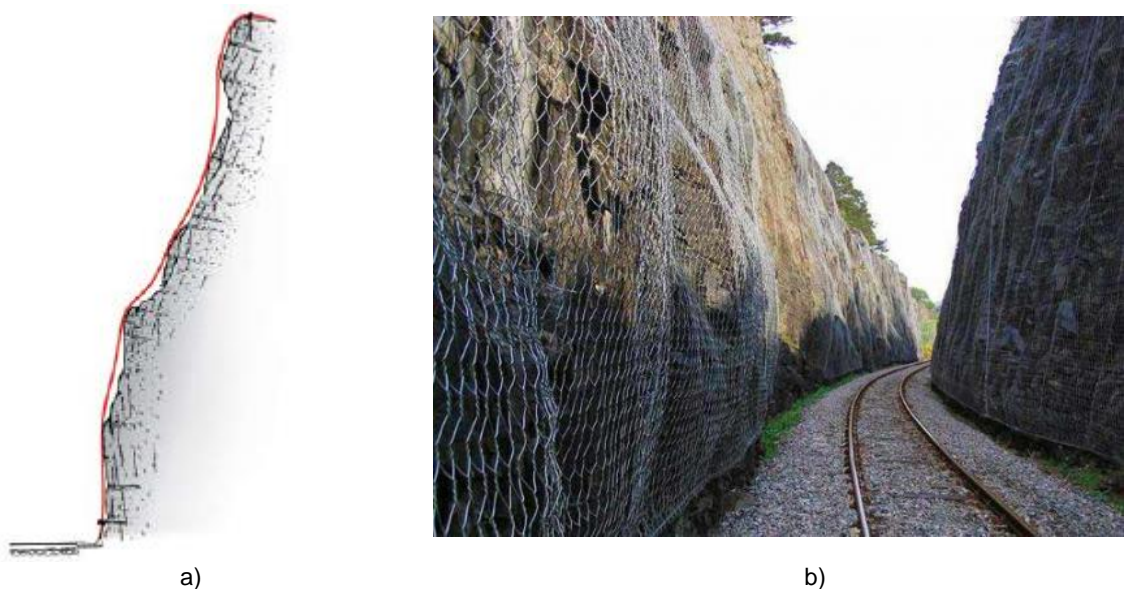


Fig 3.18 – a) Esquema de rede suspensa (Sistema contra a queda de rochas, Necessidade e Soluções - Maccaferri, 2015) e b) enquadramento paisagístico (projectlink.com.au, 2015)

Caso os taludes apresentem uma inclinação moderada ou onde a vegetação se possa desenvolver, a rede deve ser instalada o mais próximo da superfície possível. Se a inclinação for bastante acentuada, ou mesmo vertical, a rede deve ser ancorada na crista e pé do talude e mantida livre ao longo de toda a sua extensão, permitindo que caso haja queda de blocos, estes fiquem retidos entre a superfície da encosta e a rede.

A sua colocação em taludes irregulares ou com saliências morfológicas, tem que se recorrer a pregagens intermédias que são tanto mais numerosas quanto mais irregular for o talude. Este é um caso específico quando se trata de solução para vias ferroviárias, pois no caso de rodovias, existem mais folgas entre as vias e os taludes e dessa forma a necessidade desta modelação perde importância (Domingues, 2009).

▪ Barreiras Dinâmicas

As barreiras dinâmicas ou flexíveis são capazes de absorver a energia de impacto dos blocos rochosos mediante deformações elásticas e plásticas das malhas metálicas e outros elementos que a compõem (González de Vallejo, 2002).

São constituídas por vários dispositivos, a saber: redes reforçadas de aço de elevada resistência, postes rígidos com chapa de base, cabos de aço, cabos ancorados e tensionados, anéis ou elementos de travagem e de dissipação de energia, redes de aço de tripla torção, chumbadores, fixadores tipo braçadeiras, etc.

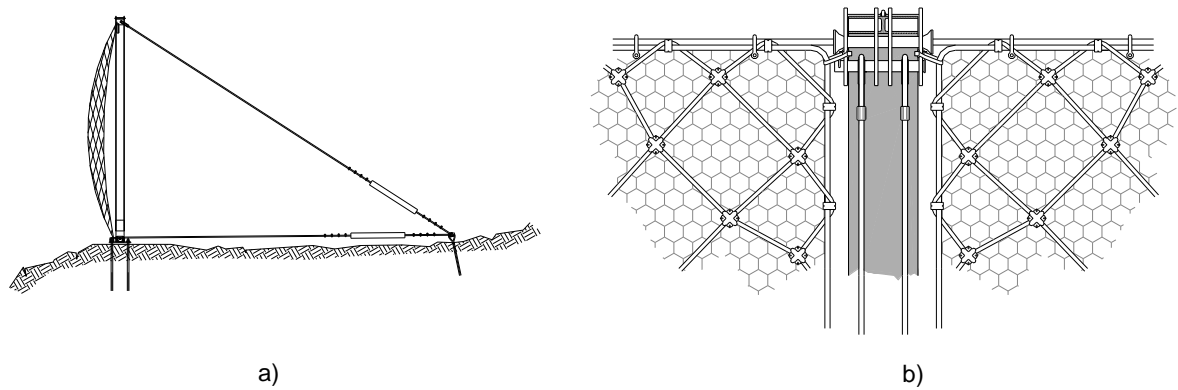


Fig 3.19 – Barreira dinâmica: a) Corte tipo e b) Alçado tipo (GEG, 2015)



Fig 3.20 – Barreira dinâmica: enquadramento paisagístico: a) (agg-net.com, 2009) e b) (maccaferribalkans.com, 2015)

Uma vantagem deste tipo de sistemas, para além de uma elevada capacidade de suporte e fácil aplicação, é a sua versatilidade, já que podem ser aplicados conjuntamente com outras soluções ao longo do mesmo talude. Por outro lado, do ponto de vista negativo, caso se suceda um desprendimento de grandes dimensões, a deformação das redes pode ser excessiva podendo levar a uma substituição das mesmas.

As barreiras flexíveis têm um valor estimado de capacidade de absorção de energia de 100kNm. Isto equivale a um bloco rochoso de 250kg que se movimenta a aproximadamente 20 metros por segundo. Barreiras mais robustas têm uma capacidade de energia de absorção de mais de 2500kNm, equivalendo-se a um bloco rochoso em movimento de cerca 6250kg a 20 metros por segundo (Hoek, 2007).

- Barreiras Rígidas

As barreiras metálicas rígidas são barreiras estáticas que se colocam na base do talude com o fim de interceptar e parar possíveis desprendimentos de blocos. Costumam ser formadas por perfis metálicos encastrados onde se fixam malhas metálicas resistentes (González de Vallejo, 2002).

Em comparação com as barreiras flexíveis, estas normalmente servem para acautelar pequenos e médios desprendimentos, já que apresentam capacidades de absorção de energia muito inferiores.

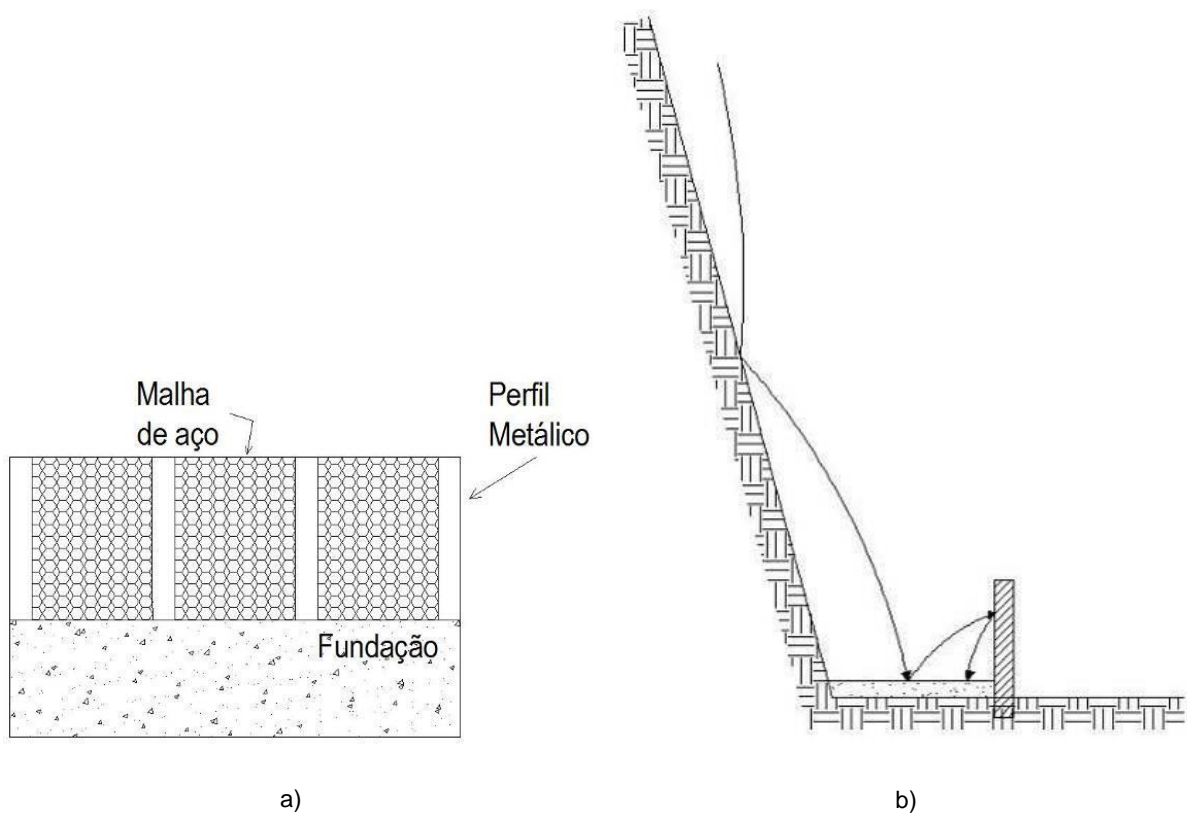


Fig 3.21 – Barreira rígida: a) Alçado e b) Perfil (Oliveira, 2010)

São implementadas perto da linha férrea com o intuito de travar quaisquer detritos que possam vir a atravessá-la e desestabilizar a sua circulação, sendo por isso quase um último recurso na imobilização de blocos. Por essa razão, e devido também à acima mencionada inferior capacidade de amortecimento, costumam ser aplicadas em conjunto com outras medidas que atuam a um nível mais próximo dos desprendimento que poderão existir.

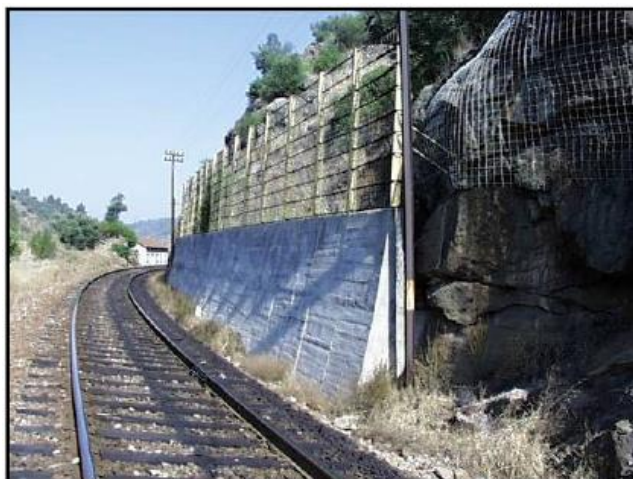


Fig 3.22 – Barreira metálica rígida na Linha da Beira Baixa (Teixeira, 2009)

Este tipo de barreiras tem vindo a perder influência face às barreiras dinâmicas por esses mesmos motivos, no sentido em que estas, por motivos de maior capacidade e versatilidade de posicionamento ao longo do talude, são colocadas também mais juntas das zonas de instabilidade, atuando e prevenindo possíveis estragos mais cedo.

4

COEFICIENTES DE RESTITUIÇÃO

4.1. INTRODUÇÃO

Como já referido anteriormente, o momento de salto ou impacto faz parte do movimento de um bloco rochoso desde o seu desprendimento até à sua completa imobilização. É neste período que se enquadra a noção de coeficiente de restituição. O coeficiente de restituição caracteriza a quantidade de energia perdida devido à deformação inelástica durante a colisão de dois objetos ou um objeto e uma superfície (Ashayer, 2007). Num contexto de queda de blocos este conceito é obviamente aplicado ao instante de contacto entre um bloco rochoso e a superfície da encosta.

Este instante de contacto ocorre na chamada superfície de colisão ou área de impacto. Por um período infinitesimal, as velocidades relativas dos dois objetos são negativas, indicando que naquele breve espaço de tempo, esses objetos estão em contacto um com o outro. As forças de contacto mobilizadas, causadas pela colisão, empurram os objetos de forma a que se separem um do outro, fazendo com que as velocidades relativas de contacto se tornem agora positivas. Qualquer modelo numérico que tente replicar a geração de impulsos no ponto de contacto e prever as velocidades finais com que o objeto é projetado é conhecido como modelo de impacto (Ashayer, 2007).

Os coeficientes de restituição são considerados parâmetros críticos na modelação de queda de blocos, mas várias definições existem e não há um consenso generalizado acerca do qual é mais apropriado. Como consequência, diferentes modelos de impacto também foram introduzidos ao longo dos anos, dependendo de qual definição para o coeficiente era usada. Neste sentido, sendo que a trajetória de queda está intimamente ligada a este parâmetro, a calibração destes modelos bem como a estimação adequada de valores deste coeficiente tem elevada importância na análise deste tipo de instabilidade.

Segundo Heidenreich (2004), a observação e análise precisa do fenómeno de impacto é essencial para a calibração dos parâmetros usados nos diferentes modelos de queda de blocos. Várias abordagens podem assim ser usadas para recolher este tipo de informação:

- Análise do terreno posterior a eventos de queda de blocos (retroanálise)
- Execução de testes *in situ*
- Execução de testes laboratoriais

De seguida, estes serão abordados de forma a compreender como se processam e em que contexto são aplicados. Serão referenciados também os diferentes modelos de impacto conhecidos e as respetivas definições de coeficientes de restituição (CR) que servem de base na sua aplicação. Por fim, serão apresentados valores de CR resultantes de várias experiências praticadas e presentes na literatura até hoje, bem como outros parâmetros que influenciam os valores deste coeficiente.

4.1.1. ANÁLISE DO TERRENO POSTERIOR A EVENTOS DE QUEDA DE BLOCOS

A análise de marcas deixadas no terreno ou em árvores depois de uma queda de blocos e a observação do local de imobilização dos mesmos, seja ao longo do percurso ou num local específico de forma aglomerada, pode ajudar a perceber o fenómeno e a recolher informação valiosa como a altura e distância do salto depois do impacto com o solo, a distância total percorrida pelo bloco, o seu tamanho, entre outros. Analisando de seguida toda essa informação, valores como a velocidade e energia dos blocos ao longo da queda, bem como a percentagem desses mesmos valores perdida durante o período de colisão podem ser avaliados. Desta maneira, observações deste tipo são interessantes no sentido de poderem ser utilizadas para se proceder à calibração de programas de computador, no que respeita a trajectórias e percursos destes desprendimentos em locais com características semelhantes às do local analisado.

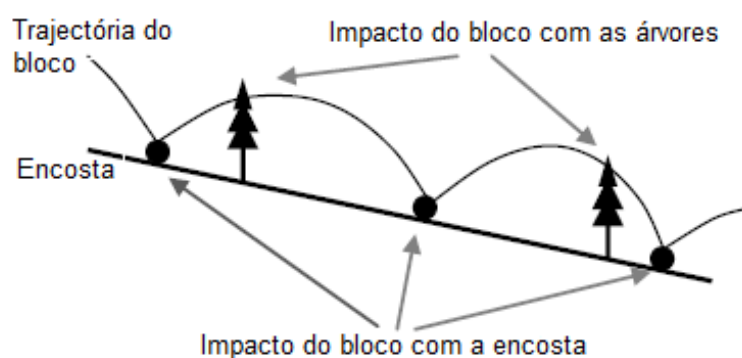


Fig 4.1 – Coordenadas do impacto do bloco com a encosta e vegetação (Vijayakumar et al., 2012)

Apesar de este ser um método importante no processo de melhoramento de *softwares* que lidam com este tipo de instabilidade, é um método que não permite que se obtenha uma grande base de dados num conceito de visualização generalizada do problema, já que no caso de poucas observações existirem, não se pode obter qualquer tipo de padrão de forma a se retirarem conclusões relevantes sobre o fenómeno do ponto de vista estatístico.

4.1.2. EXECUÇÃO DE TESTES *IN SITU*

Para além da observação de eventos naturais, a execução de testes *in situ* apresenta-se como uma válida e importante alternativa para a recolha de parâmetros relevantes num desprendimento de blocos e, conseqüentemente, também contribuir para uma melhor calibração de programas informáticos. Neste tipo de experiências, o método normalmente utilizado consiste numa deliberada e controlada libertação ou lançamento de blocos do topo de uma encosta devidamente estudada no que diz respeito à sua morfologia e características. As trajetórias de queda são depois gravadas através de câmaras de vídeo e analisadas posteriormente *frame a frame* para que as velocidades, alturas do salto após o impacto e distâncias percorridas pelos blocos sejam calculadas. Para cada contacto considerado relevante para o estudo entre o bloco e o solo, as velocidades linear e angular antes e depois da colisão e, conseqüentemente os coeficientes de restituição, são também avaliados.

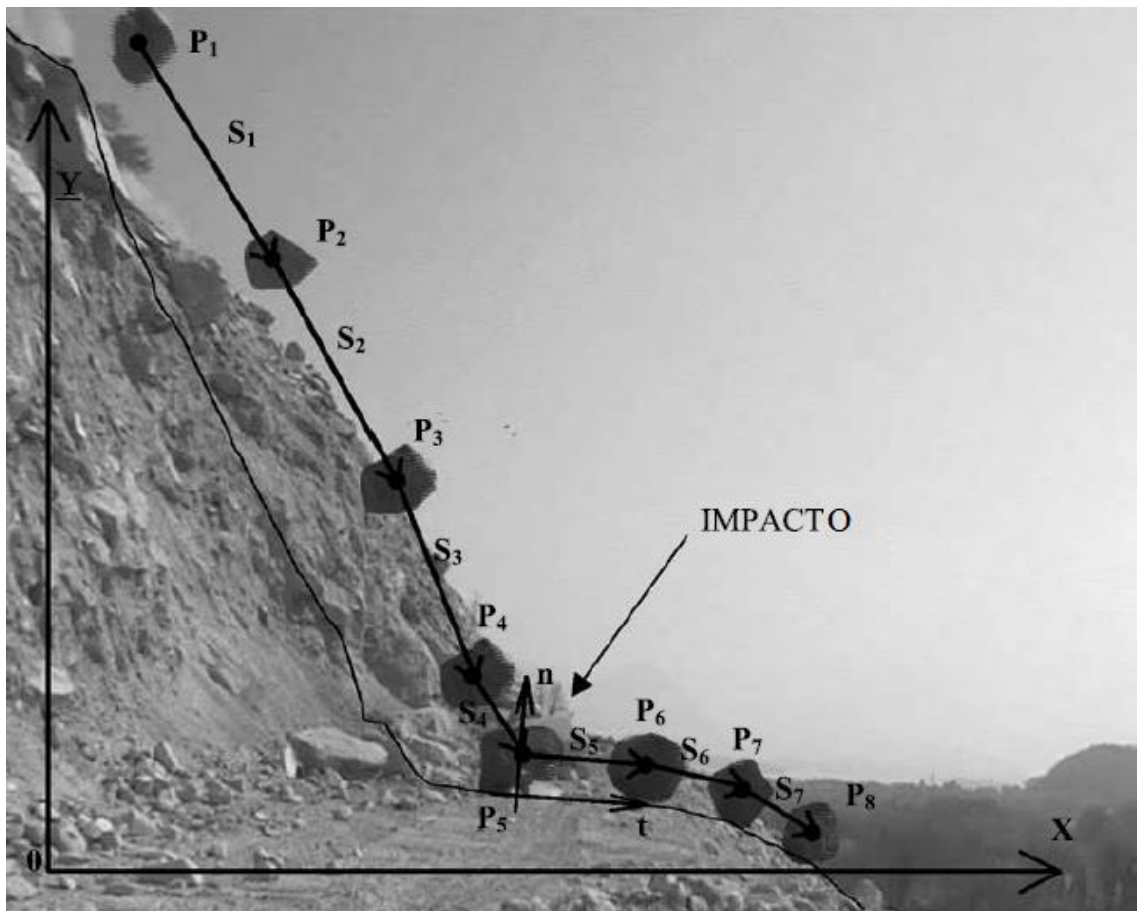


Fig 4.2 – Reconstrução das posições do bloco em diferentes intervalos de tempo tiradas a partir de gravação de câmara de vídeo (Giani et al., 2004)

Este tipo de testes são extremamente importantes no estudo desta instabilidade pois permitem uma visualização cuidadosa de todos os momentos de queda ao longo da encosta. Porém, testes *in situ* não são muito viáveis do ponto de vista financeiro já que são experiências bastante caras e, tratando-se este de um evento natural, não são muito adequados caso se pretenda efetuar uma análise estatística ou paramétrica. Assim, os testes laboratoriais representam um importante suplemento para uma investigação experimental mais exata (Heidenreich, 2004).

4.1.3. EXECUÇÃO DE TESTES LABORATORIAIS

Os testes laboratoriais executados no estudo da queda de blocos consistem principalmente em testes de pequena escala e com uso de materiais artificiais, podendo tanto ser estudados percursos na íntegra desde o momento inicial de queda até à paragem completa do objeto como apenas um simples impacto.

Apesar deste tipo de experiências ser bastante elucidativa no que toca ao entendimento dos mecanismos de queda desta instabilidade, a interpretação quantitativa de resultados é algo complexa no que respeita à semelhança de parâmetros envolvidos no processo dinâmico que têm de obedecer a certos requisitos, nomeadamente ao efeito de escala. Com base neste tipo de experiências de pequena escala, Campo nuovo (1977) afirmou que enquanto é possível determinar e fazer corresponder as características estáticas dos materiais no modelo como a deformabilidade, densidade, ângulo de atrito estático, etc, não é fácil fazer o mesmo com as características envolvidas nas dinâmicas de queda, sendo elas o coeficiente de restituição, força de impacto, ângulo dinâmico de atrito. Como exemplo, e de acordo com Camponuovo, um modelo à escala de um bloco que verifica as semelhanças mecânicas, quando testado o seu impacto numa superfície, possui uma energia de restituição muito inferior ao verificado nos testes à escala normal.

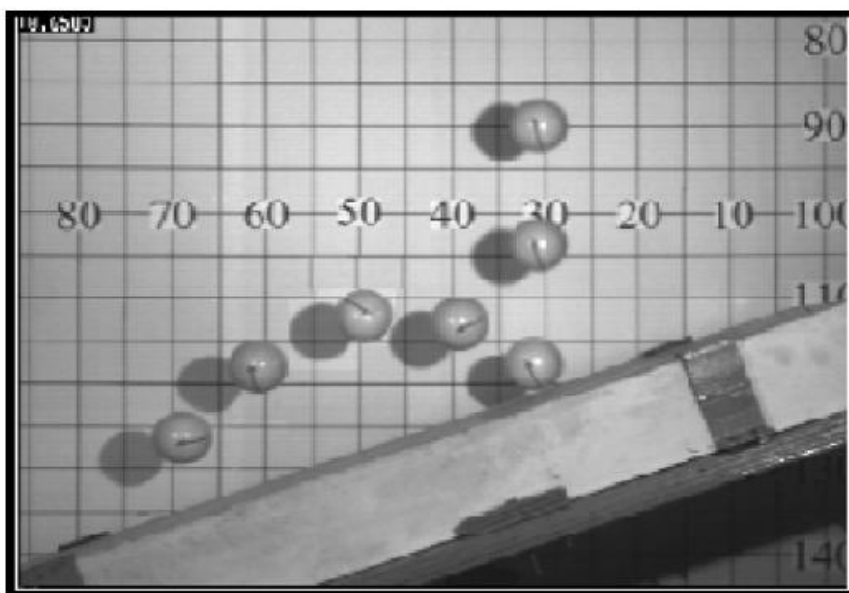


Fig 4.3 – Teste laboratorial de Chau et al. (2002)

Assim, sendo possível a execução de testes de grande escala em ambientes controlados de laboratório, as suas vantagens podem ser combinadas com os testes *in situ*: as condições de teste e os parâmetros são mais facilmente controlados e avaliados; os materiais usados em testes de grande escala podem ser escolhidos para corresponder aos parâmetros encontrados em pequenos eventos de desprendimentos de blocos naturais (Heidenreich, 2004).

4.2. MODELOS DE IMPACTO

Na procura de um melhor entendimento do fenómeno de queda de blocos e para que certas medidas preventivas e protetoras possam ser implementadas, uma estimação precisa de vários parâmetros bem como a compreensão de movimentos de impacto ao longo da trajetória de queda, distâncias percorridas, alturas de ressalto e valores de energia cinética dos blocos poderão ser essenciais na escolha e tipo de soluções a utilizar. O parâmetro mais crucial no controlo desta instabilidade é o coeficiente de restituição e , e por isso, a segurança na estimação do seu valor deve ser assegurada.

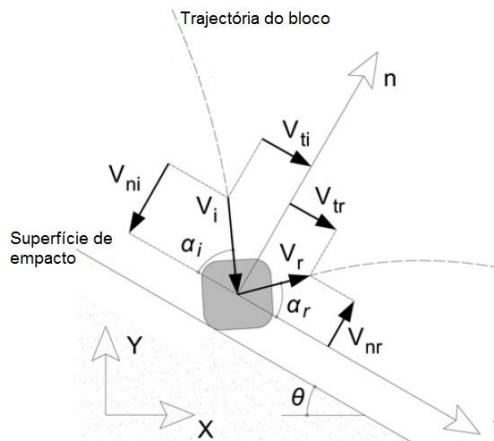


Fig 4.4 - Instante de impacto e respetivas componentes das velocidades (Asteriou et al., 2012)

Durante a fase de impacto, uma certa quantidade de energia é dissipada. A energia dissipada deve-se ao comportamento elasto-plástico do solo onde o bloco colide, à fragmentação do bloco e/ou solo e à resistência ao rolamento e deslizamento (Giani, 1992). Por norma, são diferenciadas dois tipos de energias dissipadas: a energia cinética dissipada normal à superfície da encosta é determinada pela plasticidade do material do solo, a energia dissipada paralelamente ao talude é devido à existência de atrito. A partir destes mecanismos de resistência ao movimento surgem definições distintas que caracterizam cada um deles, o coeficiente de atrito normal e tangencial. Ao longo dos anos foram vários os modelos de impacto propostos para descrever esse tipo de mecanismos mas não há consenso de qual será o mais apropriado na previsão da queda de blocos. Enquanto uns se escrevem em termos de velocidades, outros abordam uma relação de impulsos ou energias. Para uma melhor compreensão das diferenças de cada um de seguida uma abordagem individual será apresentada.

4.2.1. MODELO DE VELOCIDADE

Este modelo baseia-se na definição introduzida por Isaac Newton do que é o coeficiente de restituição. Este coeficiente descreve, segundo Newton, a quantidade de energia perdida durante o impacto de esferas semelhantes e é traduzida pela seguinte equação:

$$R = \frac{v_{r,2} - v_{r,1}}{v_{i,2} - v_{i,1}} \quad (4.1.)$$

onde v_i representa a velocidade inicial e v_r a velocidade depois da colisão (ressalto) das esferas 1 e 2. O valor do coeficiente de restituição pode variar de 0 a 1, sendo que quando $R = 0$ a colisão é definida como sendo perfeitamente plástica ou inelástica e $R = 1$ perfeitamente elástica. No caso de um bloco rochoso chocar com o solo, que não possui velocidade de impacto ou de ressalto, o coeficiente de restituição pode ser simplificado a partir da expressão:

$$R = \frac{v_r}{v_i} \quad (4.2.)$$

onde v_i e v_r são as respectivas velocidades iniciais e de ressalto.

A definição mais usual do coeficiente de restituição pode ainda ser dividida em duas componentes, projetando o seu vetor velocidade em duas direções perpendiculares, obtendo uma direção normal e outra tangencial à superfície de impacto. Os dois coeficientes resultantes podem ser definidos como:

$$R_n = \frac{v_{rn}}{v_{in}} ; R_t = \frac{v_{rt}}{v_{it}} \quad (4.3.)$$

sendo que v_{rn} e v_{rt} são as componentes da velocidade normal e tangencial de ressalto e v_{in} e v_{it} as velocidades normal e tangencial iniciais. Estes coeficientes indicam a quantidade de velocidade dissipada durante o período de impacto e variam de acordo com o material do solo. Este modelo é conhecido também como modelo de massa concentrada (*lumped mass*) e é o mais implementado no estudo da queda de blocos.

É de notar que esta definição do coeficiente de restituição não entra em consideração com outros fatores característicos do bloco, como a forma e massa. Ainda que outros estudos comprovem que estes influenciam a trajetória e a energia total do bloco, tais fatores bem como a rotação do bloco no instante de impacto são completamente negligenciados.

Várias foram as aplicações deste modelo, sendo que o modelo proposto por Pfeiffer e Bowen (1989), contendo já a noção de velocidade angular, lançou as bases para que Stevens (1998) criasse o programa de simulação de queda de blocos conhecido como *Rocfall*. Este modelo considera o bloco rochoso como infinitesimal, circular e com a massa concentrada no seu centro. Os autores consideraram que ao partir do princípio de que o objeto era circular, este pesava mais e tinha mais energia por área em comparação com outras geometrias, sendo que também era esperado que um objeto deste tipo percorresse maiores distâncias (Ashayer, 2007). Como consequência, uma importante falha que se continua a apontar a este modelo é que despreza a geometria do bloco.

4.2.2. MODELO DE ENERGIA

Este modelo representa o coeficiente de restituição como a relação da energia depois do impacto com a energia inicial. No âmbito da instabilidade estudada, a definição mais comum expressa o coeficiente a partir da energia cinética do bloco baseando-se na seguinte expressão:

$$R_E = \frac{E_{cin,r}}{E_{cin,i}} = \frac{1/2 \cdot m \cdot v_r^2}{1/2 \cdot m \cdot v_i^2} = \frac{v_r^2}{v_i^2} \quad (4.4.)$$

onde m é a massa do bloco e v_i e v_r são as velocidades iniciais e de ressalto do centro de massa do bloco. Esta equação não é válida no caso de haver alteração de massa, caso haja fragmentação do bloco durante a colisão, e não é consistente o suficiente já que não considera o efeito da componente angular da energia. Nesse sentido, outra definição mais robusta é introduzida:

$$R_{E,tot} = \frac{E_{tot,r}}{E_{tot,i}} = \frac{1/2 (m \cdot v_r^2 + I \cdot \omega_r^2)}{1/2 (m \cdot v_i^2 + I \cdot \omega_i^2)} \quad (4.5.)$$

onde I é o momento de inércia em relação ao centro do bloco e v e ω são as velocidades linear e angular do centro de massa, respectivamente. Contudo, mesmo que a rotação do bloco seja tida em conta, os valores destes coeficientes continuam a ser dependentes somente do material e independentes de outros parâmetros.

Alguns modelos de impacto baseados nesta definição de coeficiente de restituição foram apresentados. Azzoni et al. (1995) propôs um modelo matemático para o estudo de queda de blocos denominado CADMA. O modelo original foi introduzido por Bozzolo e Pamini (1986) e implementado nos programas de simulação SASS e MASSI. Azzoni introduziu novos algoritmos para resolver as equações de impacto e generalizou o rolamento de objetos circulares a objetos com outras geometrias, principalmente elipses. O modelo foca-se principalmente em três suposições: existe conservação do momento angular, não ocorre deslizamento no momento de impacto (rolamento puro no instante final de contacto), e as perdas de energia são determinadas pelos coeficientes de restituição (Ashayer, 2007).

4.2.3. MODELO DE IMPULSOS

Neste modelo o coeficiente de restituição é definido pela razão entre a componente normal do impulso durante a fase de compressão (i) e restituição (r), representadas graficamente na figura 4.5. O coeficiente é definido pela seguinte expressão:

$$R_I = \frac{I_{n,r}}{I_{n,i}} = \frac{\int_{t_c}^{t_f} F_n(t) dt}{\int_{t_i}^{t_c} F_n(t) dt} \leq \frac{C}{\sqrt{m} \cdot v_{n,i}} \quad (4.6.)$$

sendo F_n a componente normal da força actuante durante o instante de colisão entre o bloco e o solo e C um factor de plasticidade. O impulso é então definido pela integração ao longo do tempo da força de impacto, onde t_i é o instante inicial, t_c o instante de impulso máximo e t_f o instante final do choque.

No presente modelo, o coeficiente de restituição depende assim não só das características do solo, como também da massa m do bloco e da componente normal da velocidade inicial, $v_{n,i}$

O primeiro modelo de impacto baseado neste coeficiente foi proposto por Descoedres e Zimmermann em 1987 e é conhecido também como modelo de corpo rígido. Segundo os autores, dois tipos de impulsos estão associados à seguinte expressão:

$$I_{t,r} = \int_{t_c}^{t_f} F_t(t) dt \leq \int_{t_c}^{t_f} \mu \cdot F_n(t) dt = \mu \cdot I_{n,r} \quad (4.7.)$$

onde I_t é a componente tangencial do impulso, F_t a componente tangencial da força e μ o coeficiente de atrito. Caso a inequação seja cumprida, dá-se um movimento de rolamento, caso contrário, o impacto ocorre por deslizamento. Uma descrição mais específica de ambos será abordada mais adiante, quando integrados na implementação deste modelo no programa *Rocfall*.

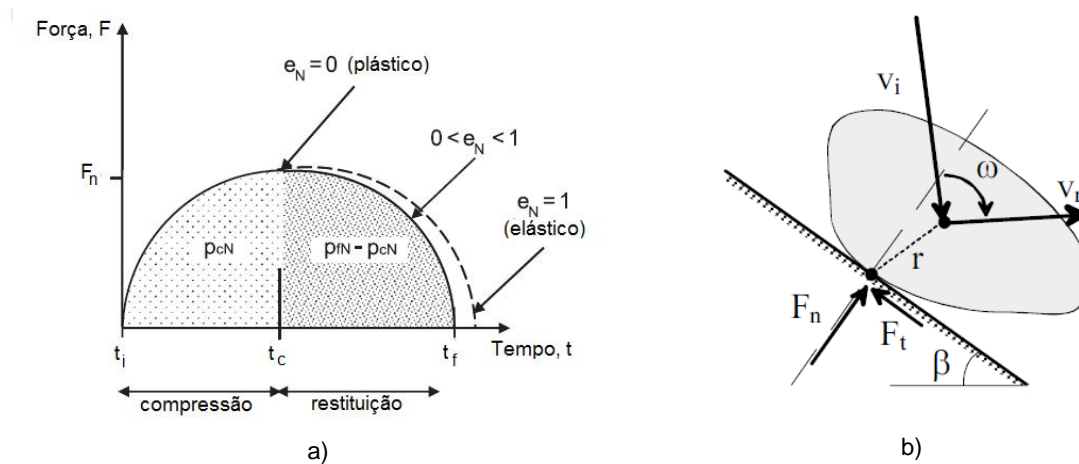


Fig 4.5 – a) Variação da força F durante o impacto (Wyllie, 2013) e b) Esquema das forças atuantes no bloco no momento de impacto (Heidenreich, 2004)

A figura 4.5a representa a força de contacto F em função do tempo. A área entre a curva $[t - F]$ até ao instante t_c representa a geração do impulso p_{cN} e a energia perdida durante o período de compressão, quando a energia cinética é convertida em energia interna de deformação. A área entre t_c e t_f representa o impulso gerado e energia recuperada durante o período de restituição. Quando o choque é elástico, as áreas antes e depois da máxima compressão são idênticas ($e_N = 1$), representadas pela linha a tracejado. Caso o choque seja plástico, não há recuperação de energia ($e_N = 0$).

Do ponto de vista das velocidades, este princípio de separação das fases de compressão e restituição pode também ser visualizado a partir da representação gráfica do impulso normal p_N em relação à velocidade relativa v . Na figura 4.6 a velocidade tangencial v_T decresce linearmente desde v_{iT} no instante inicial de impacto, até v_{fT} no ponto onde deixa de haver contacto entre o bloco e a superfície, devido à resistência ao movimento provocada pelo atrito e às irregularidades do solo. Quanto à velocidade normal v_N , o seu valor também varia, sendo inicialmente negativa ($-v_{iN}$) no instante inicial de impacto, nula no momento de compressão máxima e positiva (v_{fN}) no momento de separação dos corpos.

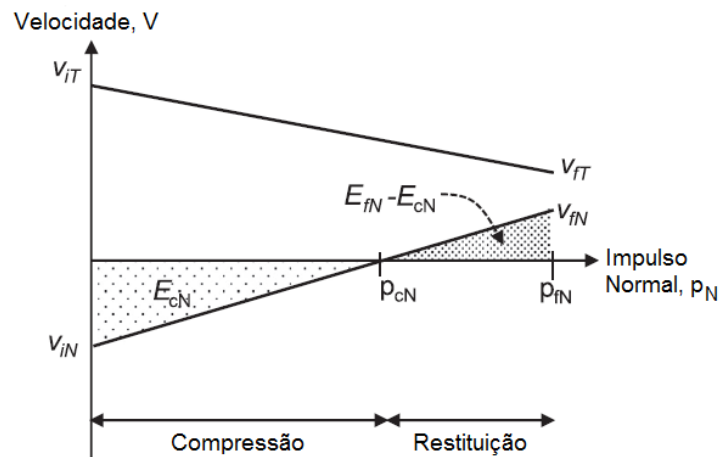


Fig 4.6 – Relação entre impulso normal e velocidades normal e tangencial, e variação da energia, durante o impacto (Wyllie, 2013)

4.3. VALORES PRESENTES NA LITERATURA

Foram já referidos anteriormente métodos de análise para determinação de valores de coeficientes de restituição, podendo estes ser avaliados através de estudos com base em testes *in situ* ou laboratoriais, e também por um estudo cuidado de locais naturais onde previamente tenham ocorrido fenómenos de queda de blocos. Nos primeiros, através da gravação de trajetórias de queda, tanto a velocidade linear como angular, antes e depois do impacto, podem ser avaliadas. Consequentemente, os valores dos coeficientes podem ser estimados. Caso se proceda ao último, a análise recai sobre um processo de tentativa e erro dos valores dos coeficientes de restituição, até se conseguir fazer corresponder as previsões numéricas às conclusões retiradas no local relativas a velocidades, distâncias percorridas, alturas de ressalto, etc.

Muitos foram os valores apresentados ao longo dos anos, onde a falta de consenso e a variabilidade de valores, mesmo tratando-se de materiais semelhantes, está presente. De modo a comprovar essa variabilidade, pode-se afirmar que os coeficientes de restituição dependem não só do material de impacto, mas também de outros parâmetros fundamentais como a forma do bloco rochoso, ângulo de impacto, massa, entre outros.

Sendo o valor da unidade maioritariamente definido como o limite superior do CR, outros estudos afirmam que isso pode não ser necessariamente verdade. Num estudo relativamente recente, após serem obtidos resultados de forma consistente, Buzzi et al. (2012) conclui que valores do CR normal até aproximadamente 2 são explicados como combinação de reduzidos ângulos de impacto ($< 20^\circ$), movimento de rotação do bloco no instante de colisão e uma forma do mesmo (não circular) capaz de obter momento angular. Ainda assim, parte dominante de valores dos CR presentes na literatura está inserida entre o intervalo de 0 e 1. Na tabela que compila muitos destes valores, elaborada por Heidenreich (2004) e apresentada nos anexos, esse facto é visível. Contudo, é de salientar que cada valor de CR apresentado está associado a diferentes modelos de impacto, já mencionados anteriormente, e também por isso a inconstância de valores é notória.

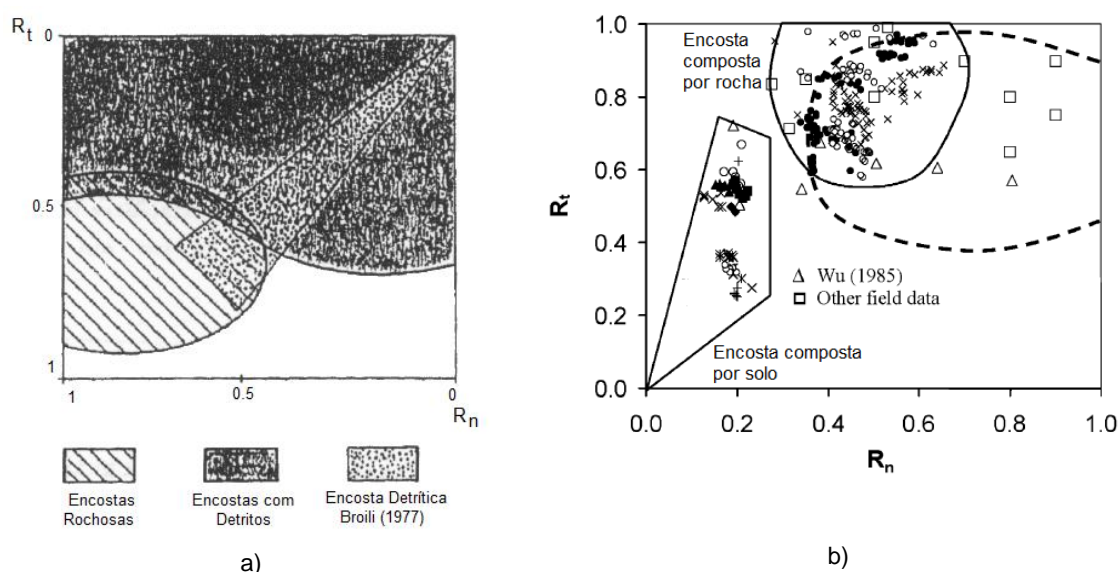


Fig 4.7 – Variabilidade de valores dos CR normal e tangencial de acordo com diferentes materiais: a) (Fornaro et al., 1990) e b) (Chau et al., 2002)

Apesar de outros parâmetros influenciarem valores dos CR, pode ser afirmado consensualmente que superfícies mais duras como superfícies rochosas apresentam valores mais elevados em comparação a superfícies compostas na sua maioria por terra ou vegetação. Tal afirmação pode ser cimentada após um estudo inicialmente elaborado por Fornaro et al. (1990) e mais tarde corroborado por outro complementar com autoria de Chau et al. (2002). Neste último, testes laboratoriais foram conduzidos usando moldes de gesso para simular os blocos e as superfícies de impacto, sendo facilmente visível que valores de CR associados a superfícies rochosas são consideravelmente superiores a superfícies mais brandas.

4.4. INFLUÊNCIA DE OUTROS PARÂMETROS NOS VALORES DO CR

Apesar da física inerente à queda de corpos e à sua colisão com outros ou com vários tipos de superfícies ser bem compreendida nos dias de hoje, o entendimento do fenómeno da queda de blocos inserido na temática de instabilidade de taludes/encostas naturais não é tão intuitivo como seria de esperar. O que distingue um de outro deve-se ao facto de principalmente existir uma grande variabilidade de parâmetros como os coeficientes de atrito, os diversos tamanhos e formas dos blocos, a rugosidade das superfícies de contacto e falta de homogeneidade dos materiais de que dela fazem parte.

É de fácil observação, na tabela apresentada nos anexos, que a grande parte dos estudos listados está associado um tipo de material. Essa dependência exclusiva leva a concluir que normalmente os CR existentes são apenas e só função do tipo de material da encosta, pondo de parte qualquer relação com outro tipo de parâmetros. Contudo, de acordo com diversos autores que observaram experiências naturais e/ou artificiais *in situ* de queda de blocos, a análise de impactos demonstra que o instante final no movimento de impacto do bloco depende não só das características da encosta, como também de outros valores associados ao bloco e à cinemática durante a colisão (Heidenreich, 2004).

Apresentada por Labiouse e Descoedres (1999) a tabela seguinte sumariza uma série de fatores que influenciam o fenômeno de ressalto de um bloco rochoso.

Quadro 4.1 – Parâmetros presumíveis que influenciam o fenômeno de ressalto

Características da encosta	Características do bloco	Cinemática
Resistência	Resistência	Velocidade (linear e angular)
Rigidez	Rigidez	Ângulo de impacto
Rugosidade comparada ao tamanho do bloco	Peso	Estado do bloco no instante de impacto
Inclinação	Tamanho	-
-	Forma	-

Grande parte dos estudos levados a cabo de forma a perceber como outros parâmetros podem influenciar o comportamento do bloco no instante de impacto e, por consequência, compreender como influenciam as suas trajetórias de queda, são realizados em laboratórios. Assim, um melhor controle dos parâmetros pode ser conseguido como também a repetição dos testes efetuada, requisitos esses que em meio natural são bastante difíceis de obter. Alguns desses estudos serão abordados de seguida, com especial foque na influência do tamanho e forma dos blocos neste tipo de instabilidade.

4.4.1. TAMANHO E FORMA

Chau et al. (1999) realizaram testes de colisão vertical em pequena escala com o intuito de estudar a influência da forma do bloco no instante de ressalto. Sendo a superfície de contacto composta por gesso, concluiu-se que o valor de R_n depende fortemente da forma do bloco, quando relacionado com certos valores do ângulo de impacto α_i (figura 4.4) em relação à inclinação da superfície θ ($\alpha_i + \theta = 90^\circ$). Para ângulos de inclinação da superfície entre 30° e 50° , valores de R_n não são consideravelmente afetados. No entanto, entre 60° a 75° , os seus valores aumentam consideravelmente com a inclinação, especialmente para blocos com formas cúbicas e hexagonais, mas não sendo significativamente alterados quando estudados com blocos esféricos e cilíndricos.

Em relação a R_t , nenhuma dependência significativa em relação à forma do bloco é de salientar, para qualquer valor de inclinação. Contudo, nota-se uma tendência no sentido em que R_t aumenta para blocos esféricos, mas diminui para blocos cúbicos.

Do ponto de vista do coeficiente de restituição R_E , tal como R_t , o seu valor é bastante independente da forma do bloco. Apesar disso, dentro das pequenas diferenças encontradas, ligeiros valores superiores são apontados a formas esféricas e valores inferiores a cúbicas.

Wong et al. (2000) levou a cabo um estudo similar com o mesmo objetivo, mas agora em solo granítico. Quanto a R_n , foi concluído que os seus valores diminuem face ao aumento da irregularidade do bloco, desmarcando-se assim das conclusões obtidas por Chau et al. no ano anterior. Quanto aos valores de R_t , a mesma conclusão foi retirada, já que os seus valores se mostraram bastante indiferentes quanto à forma dos blocos. No entanto, os valores de R_t são menores para blocos esféricos do que para blocos que apresentem alguma angularidade.

Em material granítico, a dissipação de energia é inferior para esferas e blocos polidos, com arestas pouco pronunciadas, do que para blocos angulares, com irregularidades marcadas. Isso significa que R_E é superior para esferas em comparação com outras formas. À mesma conclusão chegou Chau *et al.*, apesar do seu material de estudo ser mais flexível. A grande perda de energia em formas angulares deve-se provavelmente à fragmentação local das suas bordas aquando do instante de colisão (Heidenreich, 2004).

Abordando a temática de um ponto de vista um pouco diferente, Vijayakumar et al. (2011) analisaram o efeito que o tamanho dos blocos poderiam ter nas distâncias de impacto, tendo em conta diferentes alturas da encosta.

É de salientar que este estudo, ao contrário dos mencionados anteriormente, que se apoiam no modelo de massa concentrada, é baseado no modelo de corpo rígido e, por isso, a geometria dos blocos é considerada de uma forma mais eficaz. Por ser um modelo mais simplista, o modelo de massa concentrada é normalmente o mais utilizado em simulações de queda de blocos, permitindo uma redução do tempo de computação. Neste estudo, no entanto, e de acordo com os autores, novas inovações foram introduzidas com a finalidade de introduzir massas rochosas finitas com formas arbitrárias, mas mantendo os tempos rápidos de computação característicos do modelo de massa concentrada. Uma breve explicação da diferença dos dois modelos será apresentada mais à frente.

As primeiras duas análises estudam como o coeficiente de atrito influencia a distância de impacto para diferentes alturas de queda e diferentes tamanhos de blocos. A próxima figura é representativa do esquema utilizado para a observação dos resultados.

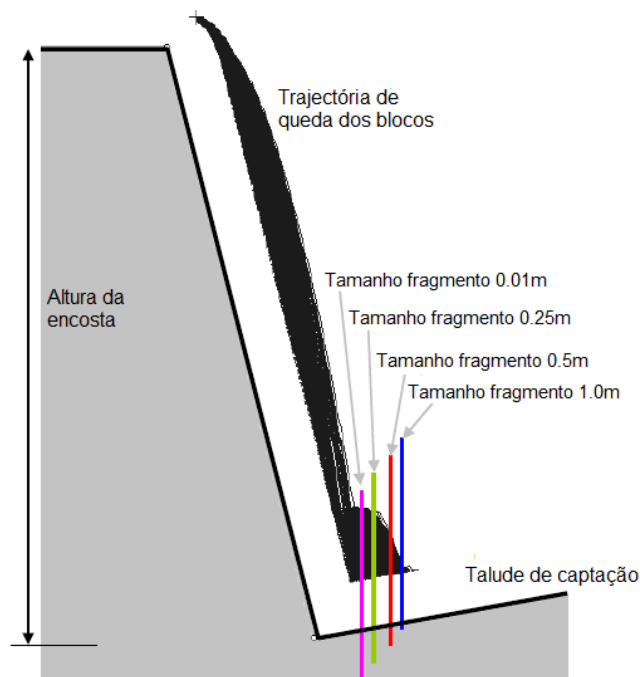


Fig 4.8 – Parâmetros para interpretação das figuras 4.9 e 4.10 (Vijayakumar et al., 2011)

Na primeira análise, onde o coeficiente de atrito é inexistente, é visível uma grande dependência da distância de impacto em relação à altura de queda e ao declive do talude de captação dos blocos. Por outro lado, o tamanho dos mesmos não parece ser significativo já que apresentam semelhantes localizações quando finalmente imobilizados após a queda.

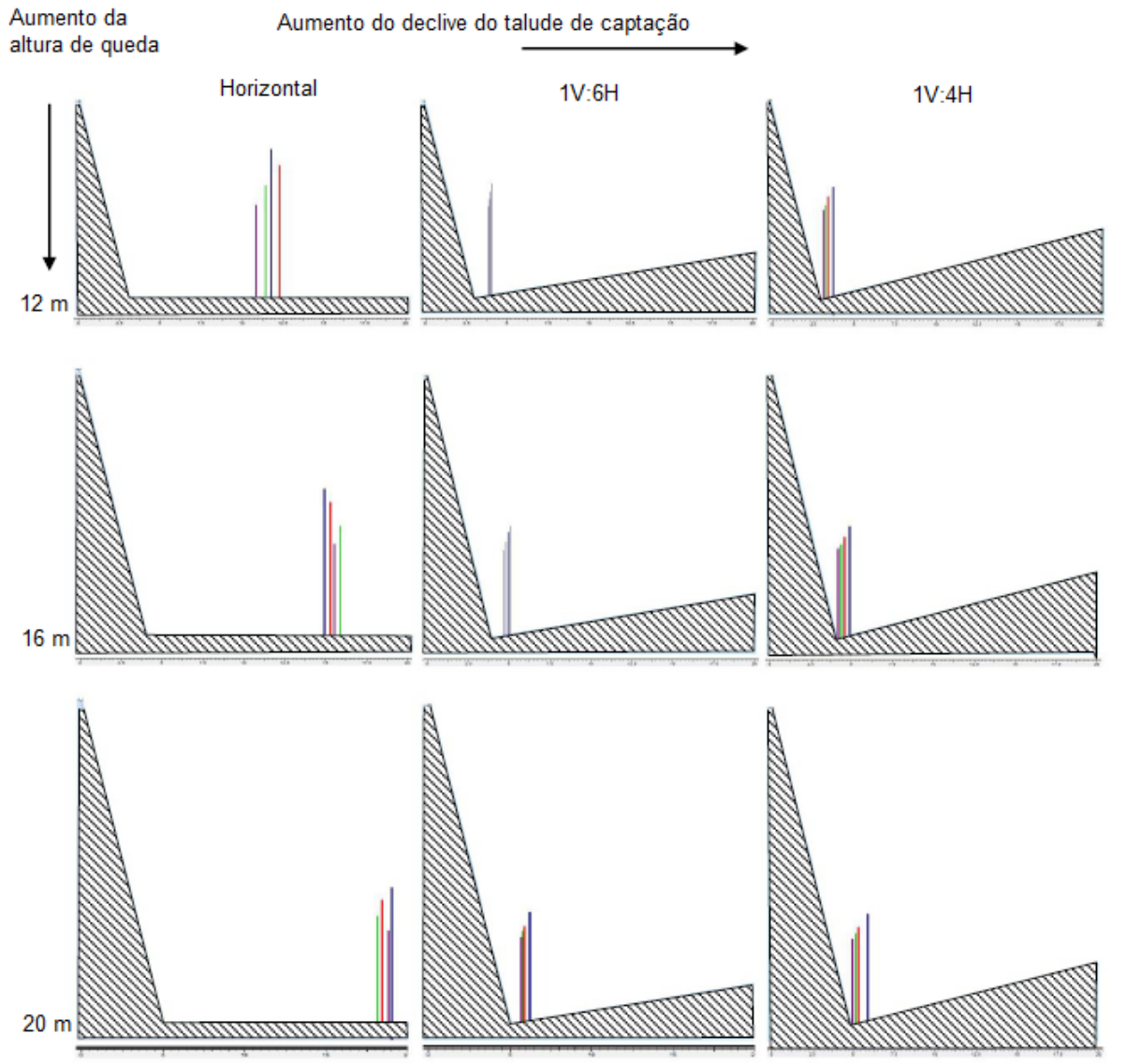


Fig 4.9 – Distância de impacto média vs altura de queda de blocos e declive do talude de captação – coeficiente de atrito $\mu=0$ (Vijayakumar et al., 2011)

Na segunda análise, existindo significativo atrito superficial, continua-se a observar uma dependência da distância de impacto quanto à altura de queda e ao declive do talude de captação, porém fraca dependência do tamanho dos blocos. É de notar, contudo, que o atrito e o efeito do tamanho não são independentes entre si e a sua influência não pode ser facilmente separada (Vijayakumar et al., 2011).

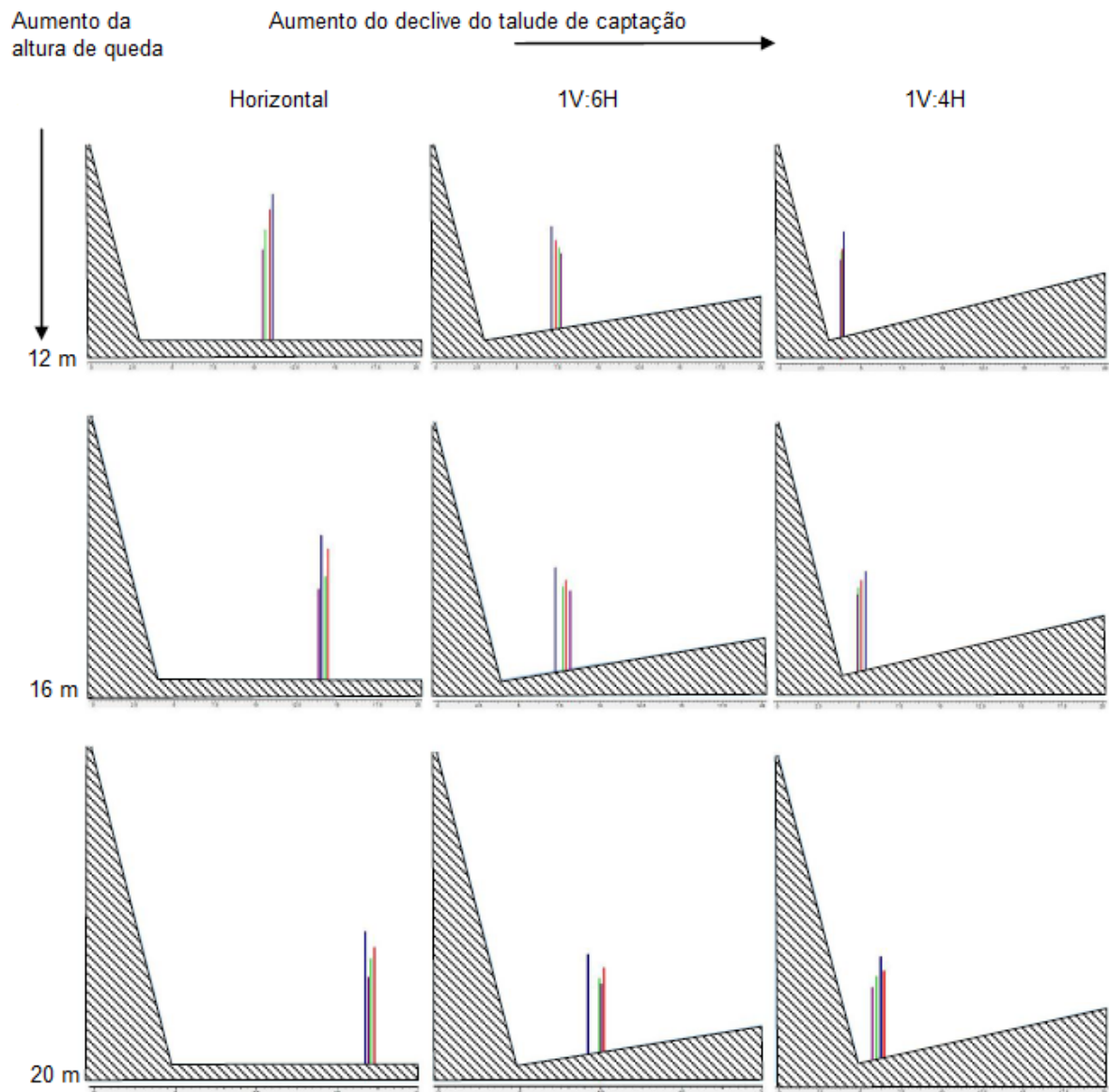


Fig 4.10 – Distância de impacto média vs altura de queda de blocos e declive do talude de captação – coeficiente de atrito $\mu=1.0$ (Vijayakumar et al., 2011)

Numa terceira fase do estudo, os mesmos conceitos foram analisados mas agora para uma encosta com geometria complexa. De acordo com as figuras 4.11 e 4.12, é visível uma forte influência do tamanho dos blocos na distância de impacto. Ao contrário das análises anteriores, onde a encosta era de geometria simples e o tamanho dos blocos era quase insignificante, neste contexto mais realista isso não acontece.

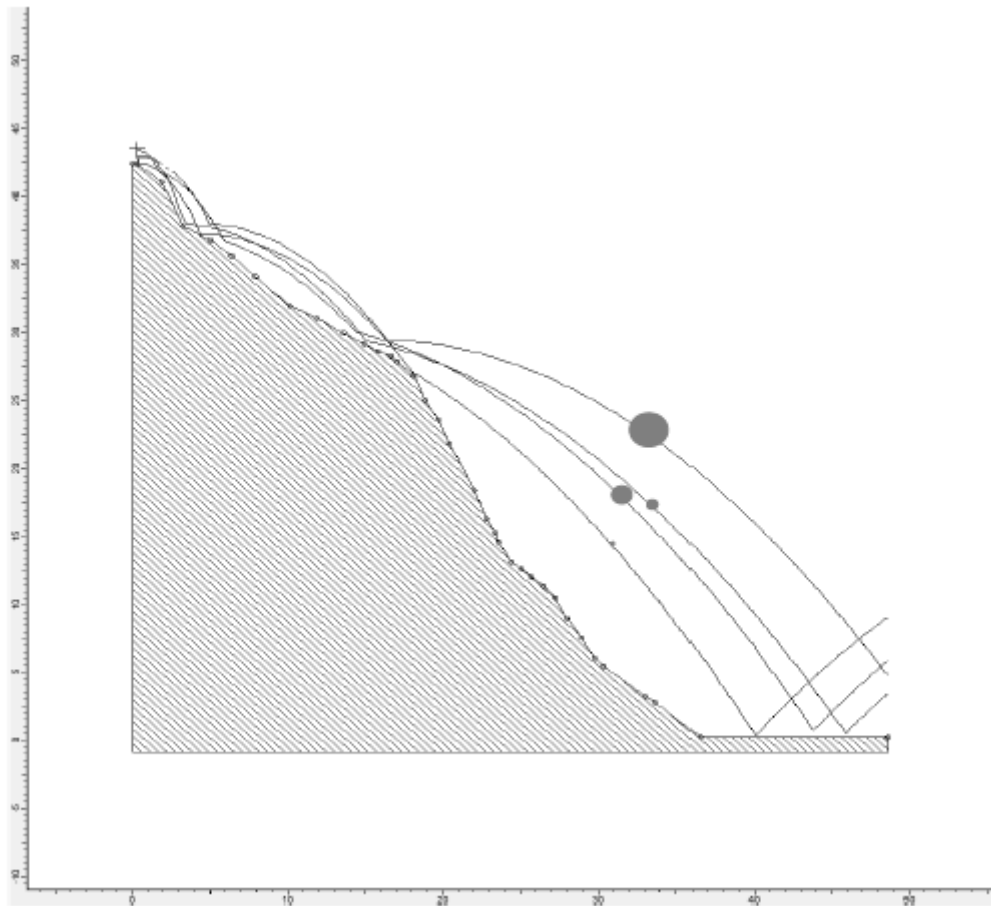


Fig 4.11 – Distância de impacto média em relação a diferentes tamanhos de blocos – coeficiente de atrito $\mu=0$ (Vijayakumar et al., 2011)



Fig 4.12 – Análise de queda de blocos para diferentes tamanhos – coeficiente de atrito $\mu=0$, $V_x=1$, desvio padrão=0.1, $R_n=0.4$ (Vijayakumar et al., 2011)

Finalmente, num artigo publicado por Basson (2012) com base no desenvolvimento de um *software* informático de simulação de queda de blocos, denominado Trajec3D, algumas conclusões também foram retiradas sobre a influência do seu tamanho e forma nas suas trajetórias. Quanto ao primeiro, a figura 4.13 mostra quatro blocos com massas diferentes. Como seria de esperar, os blocos de menor volume apresentam menores distâncias de queda, sendo a sua imobilização mais suscetível à existência de bermas. Por outro lado, os maiores são menos influenciados pela geometria da encosta e, conseqüentemente, apresentam maiores distâncias percorridas.

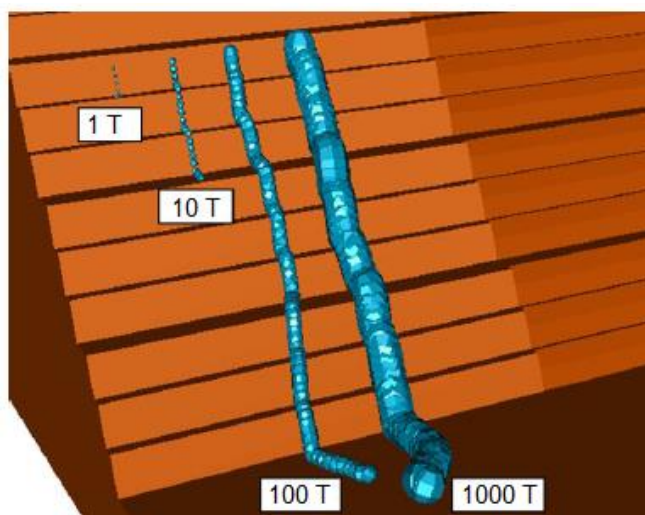


Fig 4.13 – Queda de blocos com diferentes tamanhos (Basson, 2012)

Relativamente à forma, a figura seguinte mostra diferentes trajetórias para blocos de massa equivalente mas de geometria diferente. A forma representada a vermelho, consiste numa esfera matematicamente perfeita, sendo as outras formas todas angulares. As formas mais redondas apresentam percursos mais longos, seguida da forma quadrada. Corpos achatados são tipicamente mais fáceis de serem apanhados por bermas já que tendem a deslizar e não rolar tão facilmente.

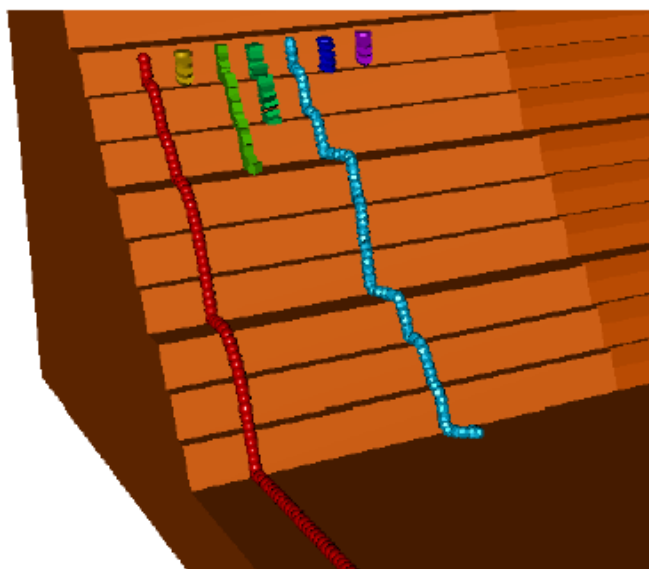


Fig 4.14 – Queda de blocos com diferentes formas (Basson, 2012)

5

SOFTWARE – ROCFALL 5.0

5.1. INTRODUÇÃO

A previsão exata da queda de blocos é praticamente impossível. Na tentativa de análise deste fenómeno várias dificuldades poderão ser encontradas: a geometria do talude é altamente variável; a localização inicial dos blocos é muitas vezes desconhecida; o material do talude pode variar ou as suas propriedades mais importantes não são conhecidas; os cálculos usados na simulação da queda de blocos são bastante sensíveis a pequenas variações destes parâmetros. Num todo, o conjunto destes fatores contribuem negativamente para uma previsão exata de um desprendimento deste tipo (Stevens, 1998).

Neste contexto, entra o *software Rocfall* da *Rocscience*. É um programa de simulação 2D que prevê o comportamento de quedas de blocos em taludes e que opera à base de estatísticas e probabilidades ajudando a uma melhor avaliação do seu risco. A alteração de parâmetros incluída na análise é baseada no processo de simulação do método de Monte Carlo, cuja técnica se assemelha a um lançar de dados para cada um desses parâmetros a ser considerado. Para além disso, o programa auxilia também na determinação de medidas corretivas e no estudo da sua eficácia.

Enquanto que o problema mais simples a ser estudado pode incluir apenas duas componentes, um talude e um bloco rochoso, simulações mais complexas podem ser levadas a cabo contendo barreiras e uma aleatoriedade na variação da massa, velocidade e posição do bloco, bem como uma variação dos parâmetros característicos do talude para diferentes segmentos.

Componentes como a velocidade, energia e altura do salto dos diferentes blocos podem ser analisados ao longo de todo o talude. No que diz respeito a barreiras protetoras, informação como a energia cinética e localização do impacto são parâmetros que podem ajudar a determinar a capacidade resistente, tamanho e sua localização ao longo do trajeto. O *software* disponibiliza ainda uma extensa lista de barreiras comerciais que o utilizador pode escolher, ou se preferir, definir as próprias características que entender.

Outra vantagem deste programa é a simplicidade em obter resultados. A interação com o *software Excel* do *Microsoft Office* é bastante eficaz permitindo uma importação de dados e gráficos diretamente para a sua interface.



Fig 5.1 – Rocfall 5.0 (rocscience.com, 2015)

5.2. EVOLUÇÃO DO SOFTWARE EM RELAÇÃO À VERSÃO ANTERIOR

A evolução de um *software* é um processo natural com o intuito de responder melhor, mais rápido, com mais eficácia à resolução de certos problemas e dotar o utilizador de uma capacidade acrescida de avaliação face às dificuldades apresentadas, ajudando-o a chegar a uma solução. Apontando neste sentido, a *Rocscience* decidiu lançar uma nova atualização do seu programa no ano de 2013 passando da versão 4 para a versão 5, continuando esta atualmente em vigor. Mantendo a base operativa do programa intacta, novas funções foram implementadas destacando-se as principais:

- Análise pelo método de corpo rígido;
- Modos de projeto e resultados;
- Resultados referentes à trajetória da queda de blocos;
- Gerador de relatório de barreiras;
- Capacidade de geração de resultados melhorada.

5.2.1. ANÁLISE PELO MÉTODO DE CORPO RÍGIDO

Enquanto que a versão anterior apenas permitia simular um desprendimento de blocos através do método de massa concentrada (*lumped mass*), esta nova versão permite também efetuar um novo tipo de simulação tendo por base o método de corpo rígido.

Na aplicação do método de massa concentrada, o modelo assume que a massa do bloco rochoso está concentrada no seu centro de gravidade e apenas o movimento de deslizamento é considerado. A desvantagem desta abordagem é a de que a energia cinética rotacional do bloco não é devidamente tida em conta e, como consequência, o rolamento não pode ser simulado de forma realista (Vijayakumar et al., 2011). A rotação é assim simulada atribuindo um ângulo de atrito igual a zero na interação entre o bloco rochoso e a superfície da encosta.

Neste modelo, os blocos rochosos são também tidos como círculos infinitesimais, não sendo o seu tamanho considerado mas apenas a sua massa. A incapacidade de considerar apenas alterações da velocidade no centro de massa do bloco, implica que a forma não possa ser considerada neste método, já que um corpo não circular com movimentos rotacionais apresenta diferentes velocidades no ponto de contacto e no seu centroide (Vijayakumar et al., 2012).

Por outro lado, a incorporação da mecânica de corpos rígidos nesta versão do *software* considera a colisão num ponto instantâneo e fornece ao utilizador uma vasta biblioteca de vários tipos de tamanho e forma para os blocos rochosos. Assim uma análise mais precisa dos desprendimentos em relação à versão passada é conseguida.

Neste modelo, é considerado o impulso do bloco durante o período instantâneo de contacto com o talude para determinar o comportamento do mesmo. Dois tipos de impulsos podem ser contemplados: *sticking* e *slipping/sliding*. *Sticking* ocorre quando a velocidade tangencial da parte do bloco em contacto com o solo é zero; pode ser descrito também como um movimento de rolamento puro. No caso da componente da velocidade tangencial do ponto de contacto ser diferente de zero, o impacto é denominado de *sliding* ou deslizamento. Neste caso, o movimento do bloco é uma combinação de deslizamento e rolamento (Heidenreich, 2004). O coeficiente de restituição normal é usado durante as duas fases do período de contacto para calcular o impulso final e, com esse valor, as velocidades pós contacto podem ser calculadas.

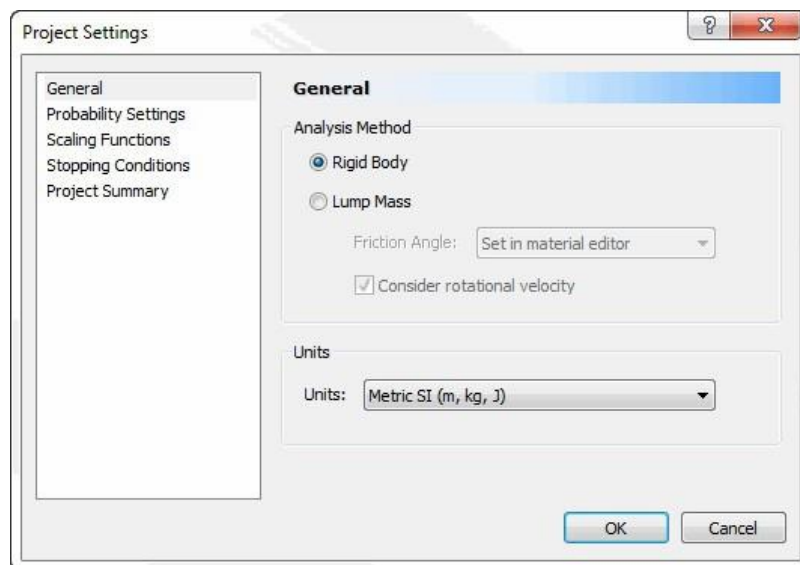


Fig 5.2 – Definições de análise do problema pelo método de corpo rígido (*rigid body*) ou massa concentrada (*lump mass*)

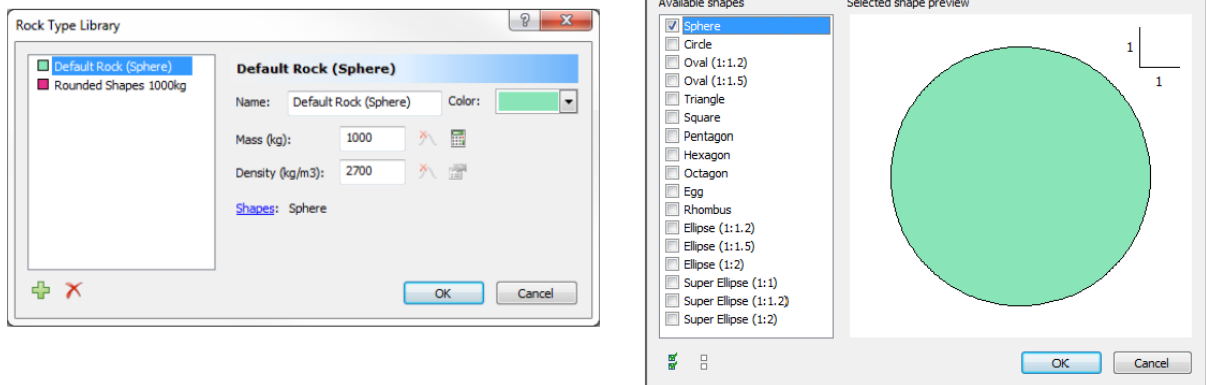


Fig 5.3 – Definições das propriedades dos blocos rochosos usando o método de corpo rígido

5.2.2. MODOS DE PROJETO E RESULTADOS

O *Rocfall 5.0* apresenta dois modos de apresentação, projeto (*design*) e resultados (*results*), que podem ser alternados com grande facilidade.

O utilizador prepara a sua análise no modo de projeto, desenhando o talude, especificando as propriedades do seu material e também a localização inicial e características dos blocos. A implementação de barreiras também é efetuada neste modo. No modo dos resultados, o utilizador pode interpretar os vários tipos de gráficos com as conclusões da sua análise, bem como adicionar coletores de dados caso pretenda obter resultados para uma determinada zona ao longo do talude. Estes coletores podem ser adicionados e os resultados visualizados instantaneamente sem ter de se recalculer todo o processo.

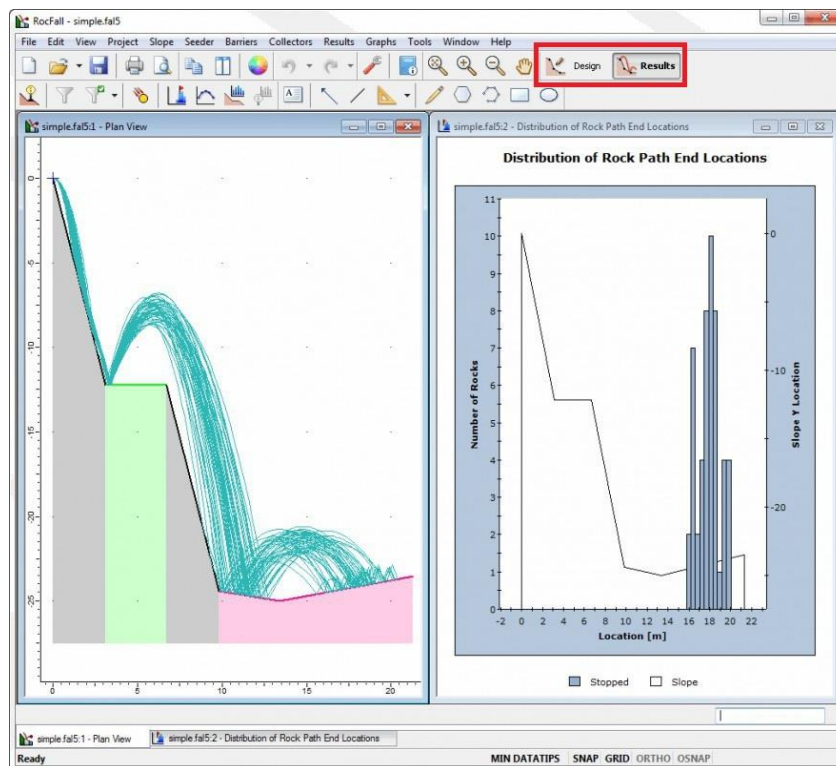


Fig 5.4 – Modo de projeto (*design*) e resultados (*results*)

5.2.3. RESULTADOS REFERENTES À TRAJETÓRIA DA QUEDA DE BLOCOS

Há várias opções para a análise de resultados no que respeita a trajetória da queda dos blocos. O seu percurso pode ser visto de forma animada, proporcionando ao utilizador uma ideia exata de como o bloco em causa se comporta ao longo do talude. Os diversos pontos de contacto podem ser exibidos e resultados da trajetória visualizados em tabelas que proporcionam uma melhor e mais fácil compreensão ao utilizador.

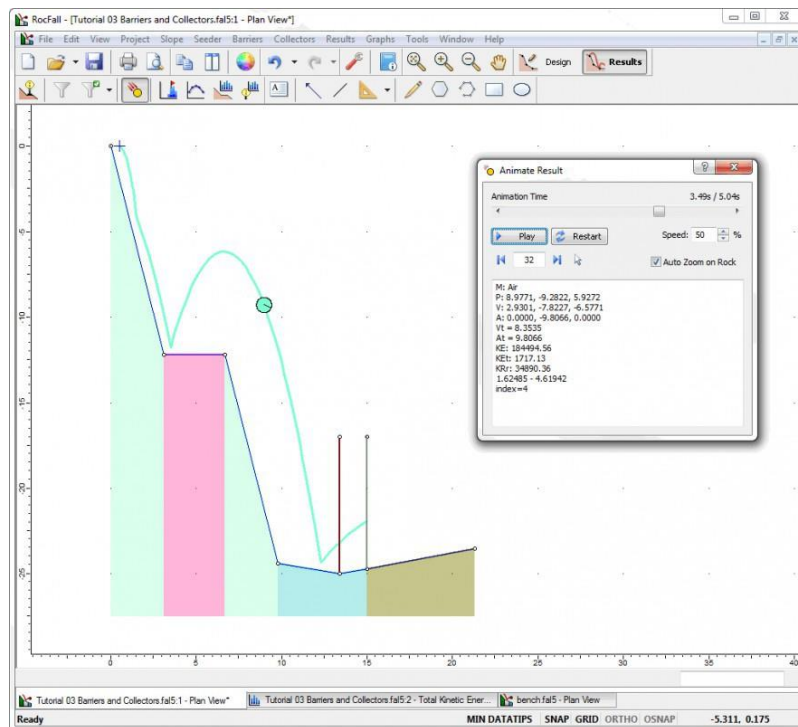


Fig 5.5 – Animação de uma trajetória de queda de um bloco rochoso

5.2.4. GERADOR DE RELATÓRIO DE BARREIRAS

O gerador de relatório de barreiras é outro dos grandes melhoramentos do programa em relação à versão anterior. No lado esquerdo da caixa de diálogo do relatório encontram-se as propriedades da barreira e do lado direito podem ser definidos pelo utilizador coeficientes de dimensionamento de acordo com o ETAG 027. A sigla ETAG corresponde a *European Technical Approval Guideline*, sendo o número 27, como indica o nome em inglês, um guia de apoio técnico europeu referente a medidas de proteção contra desprendimentos de blocos.

Este relatório sumariza as propriedades da barreira, fornece informação estatística sobre a altura de impacto dos blocos, velocidade linear e energia cinética, e mostra a localização da barreira. Para além disso, a verificação do dimensionamento da barreira é fornecido em relação à energia, altura e alongamento.

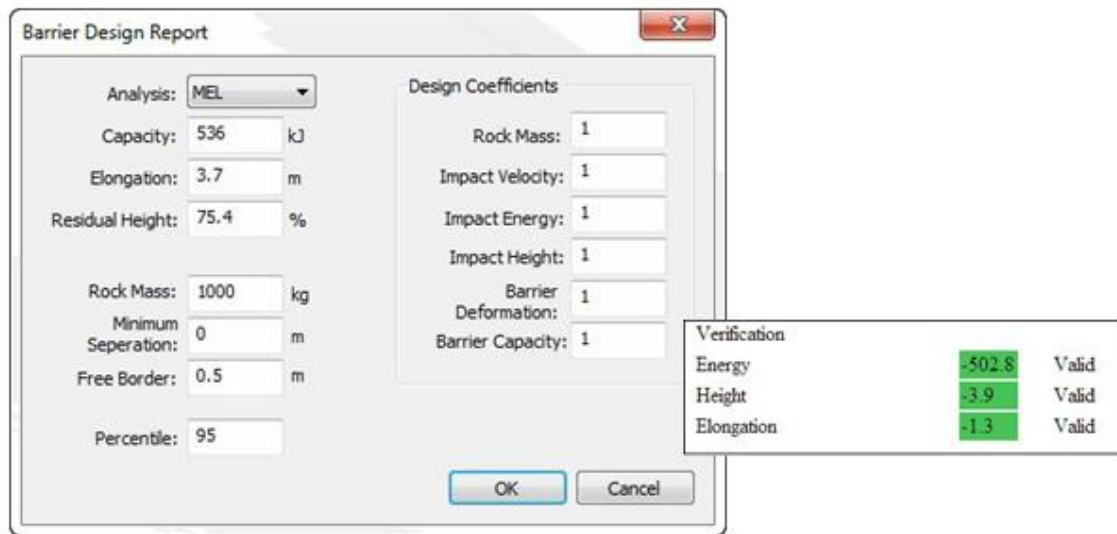


Fig 5.6 – Relatório de barreiras e sua verificação

5.2.4. CAPACIDADE DE GERAÇÃO DE RESULTADOS MELHORADA

O *Rocfall* 5.0 apresenta um número de características que realçam a capacidade de geração de relatórios do programa. Destacam-se entre eles uma melhorada apresentação de informação com personalização do tipo de resultados que interessam à sua análise. Aqui o utilizador pode preferir exibir informações como a geometria do talude, as propriedades dos materiais, os tipos de blocos rochosos e barreiras utilizados, um sumário do projeto, entre outros. Outra característica que se pode salientar é uma aperfeiçoada pré-visualização de impressão com customização de cabeçalhos e rodapés.

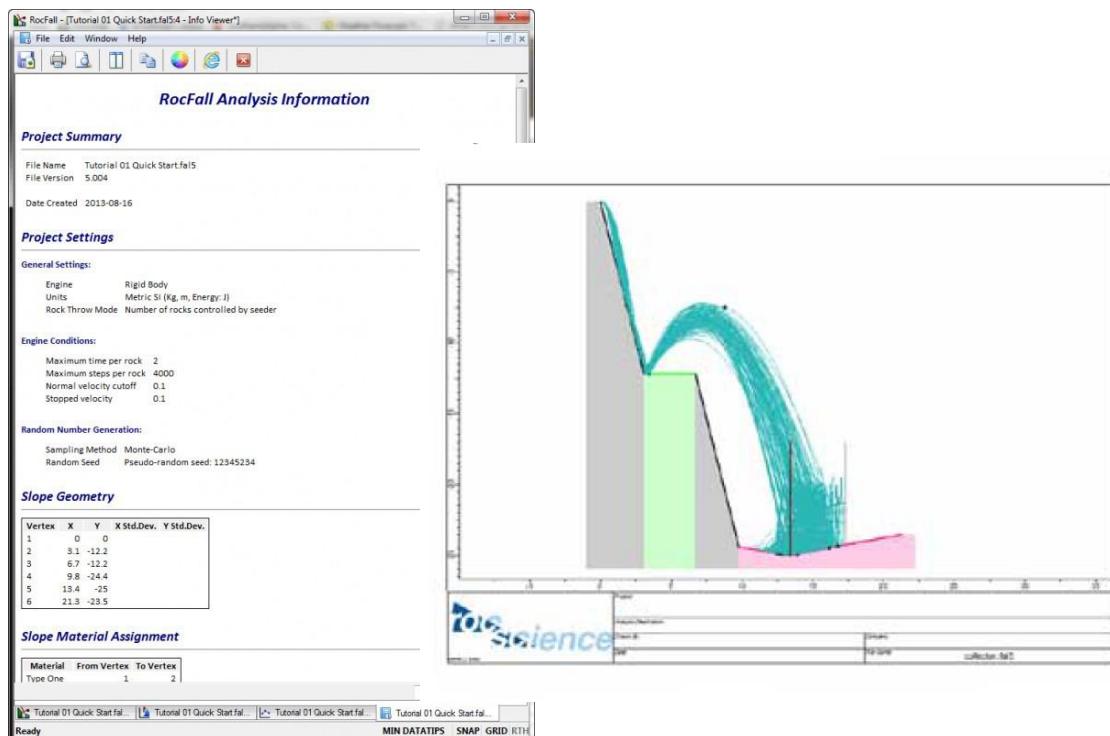


Fig 5.7 – Visualização de informação sobre a análise do problema e rodapé personalizável em modo de impressão

5.3. VISÃO GLOBAL / ASPETOS GERAIS DO PROGRAMA

5.3.1. GEOMETRIA DA ENCOSTA

A encosta é a principal componente no programa *Rocfall*. Qualquer tipo de geometria pode ser virtualmente modelada, podendo conter quantos segmentos o utilizador pretenda. Cada segmento tem de ter pelo menos 0.001 metros e não pode intersectar outros segmentos pertencentes à sua geometria. Várias saliências rochosas também podem ser modeladas em qualquer parte da encosta, à exceção do primeiro e último segmento.

O utilizador começa por definir as coordenadas dos pontos que formam a sua geometria através do editor de coordenadas do programa, tendo também a hipótese de importar esses dados através do *Excel* ou *AutoCAD* (através de um ficheiro do tipo DXF). Podendo a geometria da encosta diferir de secção em secção, o *software* apresenta ainda uma funcionalidade que simula a variação dos seus vértices a partir da atribuição de desvios padrão a esses pontos. Esta ferramenta pode tornar-se bastante útil caso haja alguma incerteza nas medições efetuadas.

Um outro parâmetro a ser considerado com especial atenção é o material ou materiais definidos para os diversos segmentos do talude. Dependendo do modelo a ser utilizado, massa concentrada ou corpo rígido, as propriedades dos materiais variam. No modelo de massa concentrada ou *lumped mass*, podem ser definidos o coeficiente de restituição normal e tangencial, ângulo de atrito e rugosidade da encosta. Quando o utilizador pretende fazer a sua análise usando o método de corpo rígido, em comparação com o modelo anterior, todos os parâmetros podem voltar a ser definidos excetuando o ângulo de atrito que é substituído pelo coeficiente de atrito dinâmico e pela resistência ao rolamento. É de salientar que para além do utilizador poder definir o seu próprio material para posteriormente atribuir a diferentes secções da encosta, o programa oferece ainda uma lista de materiais pré-definidos para facilitar a sua implementação.

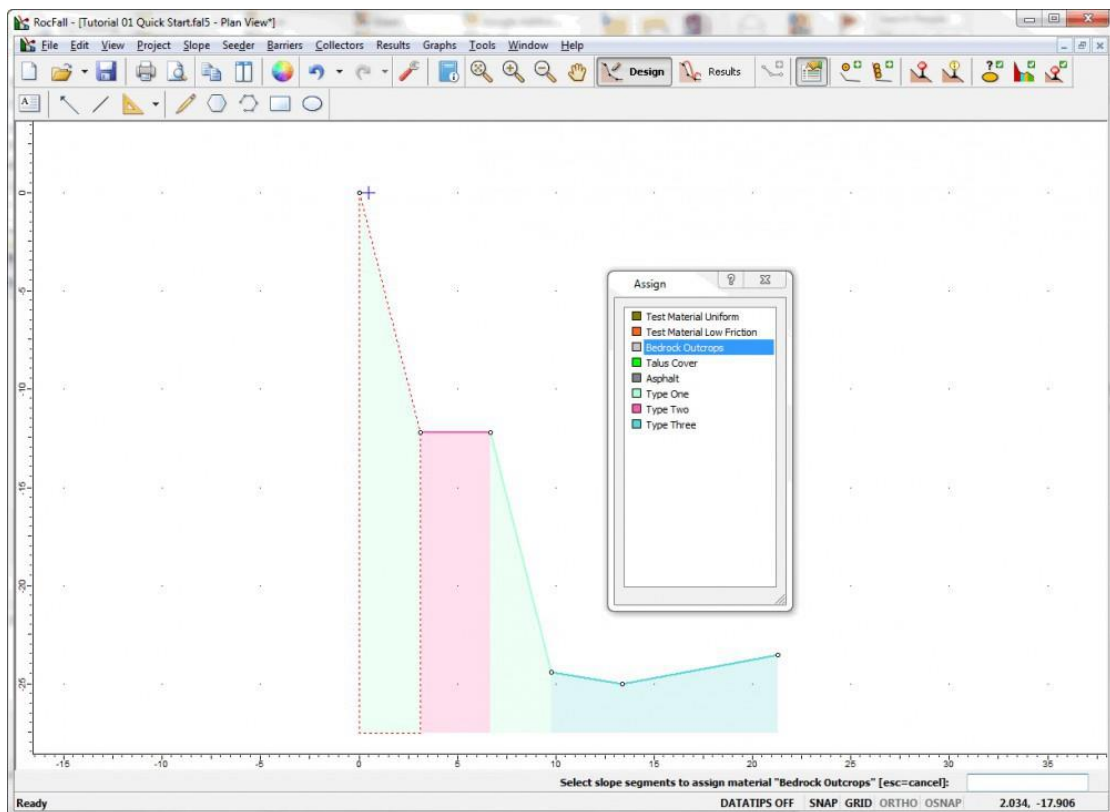


Fig 5.8 – Exemplo de geometria de encosta e diferentes tipos de materiais identificados por diferença de cor

5.3.2. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

Os materiais que constituem uma encosta podem variar consideravelmente do topo até ao pé do talude e de secção a secção. Mesmo quando o material é uniforme, as propriedades do material relevantes para a análise da queda de blocos podem mesmo não ser profundamente conhecidas (Stevens, 1998).

De seguida serão descritas as principais propriedades atribuíveis a uma encosta ou talude que possa ser estudado no programa de cálculo em causa. Para além dos enunciados, é de referir os coeficientes de restituição. Optou-se por não abordar o parâmetro já que estes estão descritos no anterior capítulo 4.

5.3.2.1. Rugosidade da encosta

Esta propriedade permite ao utilizador ter em conta uma variação no ângulo de superfície local dos segmentos do talude. O mesmo é dizer que este parâmetro é usado para modelar variações locais da geometria da encosta, permitindo dar textura ao longo dos vários segmentos de forma a simular o mais realisticamente possível as superfícies irregulares encontradas neste tipo de material rochoso. No modelo de massa concentrada, o seu valor não pode ser alterado sendo sempre igual ao ângulo do segmento do talude respetivo, apesar de ser possível usar distribuições estatísticas para simular uma variação do seu valor. No caso do modelo aplicado ser o de corpo rígido, a rugosidade da encosta é definida por dois parâmetros: espaçamento (m) e amplitude (m). O espaçamento é a distância entre amplitudes, a amplitude é a distância vertical até ao pico da onda de rugosidade, medida desde a superfície plana do talude. A ambos valores podem ser definidas distribuições estatísticas. É recomendado, ainda assim pela *Rocscience*, que o valor da amplitude seja considerado zero para permitir uma distribuição mais uniforme da rugosidade ao longo da extensão da base do talude.

5.3.2.2. Ângulo de atrito

Este parâmetro é tido em conta apenas na análise do método de massa concentrada. Neste caso, o programa *Rocfall* interpreta o seu valor como uma relação entre o ângulo de atrito da encosta e a inclinação dos seus segmentos. Caso o segmento tenha uma maior inclinação do que o seu ângulo de atrito, os blocos rochosos apresentam um movimento descendente ao longo do talude, caso a sua inclinação seja menor, os blocos perdem velocidade até se tornarem imóveis. Para além do utilizador poder definir o valor do ângulo de atrito que desejar existem ainda duas alternativas distintas:

- Calcular o seu valor em relação ao coeficiente de restituição tangencial a partir da equação:

$$\text{ângulo de atrito} = \arctan \left(\frac{1 - R_t}{R_t} \right) \quad (5.1.)$$

- Impor o seu valor igual a zero. Esta opção permite uma resistência ao movimento quase nula e por isso os blocos apresentarão movimentos de rolamento.

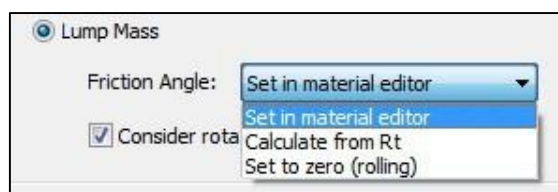


Fig 5.9 – Definição do ângulo de atrito para o método de massa concentrada

5.3.2.3. Coeficiente de atrito dinâmico e resistência ao rolamento

Ao contrário do ponto anterior, estes dois parâmetros apenas são possíveis definir na análise do método de corpo rígido. O coeficiente de atrito dinâmico depende diretamente do ângulo de atrito do material:

$$\text{coeficiente de atrito dinâmico} = \tan(\phi) \quad (5.2.)$$

O coeficiente de resistência ao rolamento representa a energia perdida a fatores não relacionados com o coeficiente de atrito dinâmico tais como a deformação plástica, histerese e deslizamento da superfície de contacto.

5.3.3. CONDIÇÃO INICIAL DOS BLOCOS

No *Rocfall* a condição inicial dos blocos é definida nas chamadas “propriedades do semeador” (*seeder properties*). Aqui o utilizador pode atribuir várias condições iniciais aos blocos como os diferentes tipos de velocidades e o número de blocos do desprendimento.

Existem dois tipos de desprendimento que podem ser considerados, o desprendimento numa só localização (*point seeder*), ou o desprendimento em vários locais (*line seeder*). Neste último, como o nome indica em inglês, o desprendimento dá-se ao longo de uma linha que pode conter vários segmentos. A localização inicial dos blocos é gerada por uma distribuição uniforme ao longo da sua extensão, permitindo assim que a probabilidade de um bloco se desprender em qualquer ponto seja igual.

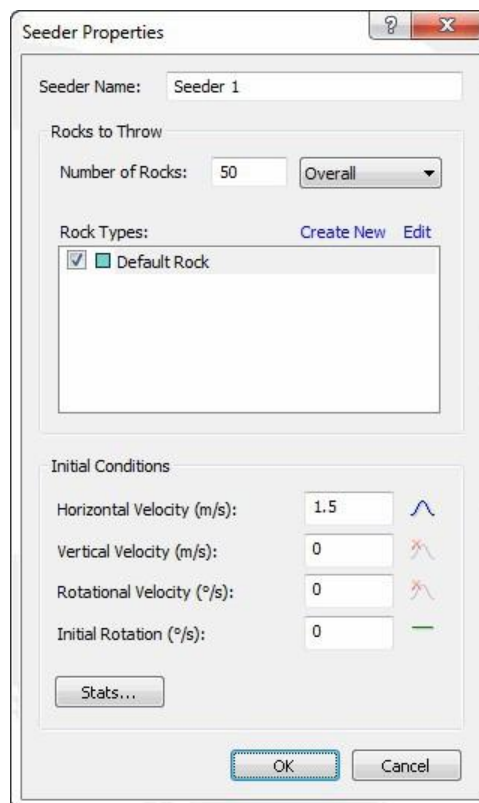


Fig 5.10 – Propriedades do semeador

5.3.4. BARREIRAS

Uma barreira é um segmento de reta, apoiado no perfil da encosta, que pode ser posicionado em qualquer localização ao longo de todo o desenvolvimento do talude em estudo. A sua principal função é a de deter os blocos ou absorver alguma da sua energia à medida que percorrem a sua trajetória de queda. O número de barreiras a ser posicionado não é restrito, apesar de não se poderem intercalar umas com as outras, ou intersectar com segmentos da geometria do perfil.

Como já referido anteriormente, o programa de cálculo, para além de poderem ser definidas barreiras conforme e com as características e propriedades que o utilizador desejar, oferece uma lista de barreiras comerciais que podem ser aplicadas. Entre estas, oito barreiras produzidas pela empresa *Maccaferri* podem ser escolhidas.

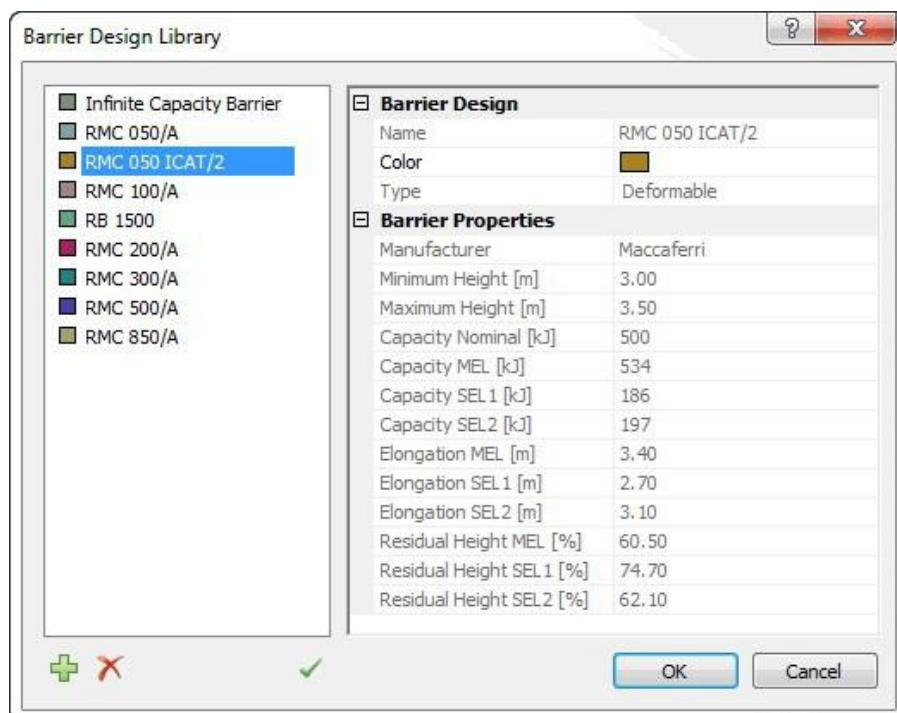


Fig 5.11 – Lista de barreiras comerciais disponibilizadas bem como as suas propriedades

5.3.5. COLETOR DE DADOS

Um coletor de dados é um segmento de linha reta, semelhante a uma barreira, mas que apresenta funcionalidades diferentes. Serve para recolher informação sobre os blocos rochosos que atravessam o segmento enquanto caem pelo talude. Entre essa informação, conseguem ler valores de velocidade, energia cinética e as localizações horizontal (eixo X) e vertical (eixo Y) no instante exato em que atravessam o coletor.

Este tipo de informação é bastante útil no dimensionamento de barreiras. A partir do momento em que a localização da barreira é decidida, o coletor de dados pode ser colocado no mesmo local e a simulação da queda corrida novamente. Como resultados, o coletor fornecerá os valores de energia cinética dos blocos que atravessaram o local, facilitando assim na decisão da capacidade requerida pela barreira para suportar tais impactos. Por outro lado, com os valores das alturas dos blocos, a altura da barreira também poderá ser dimensionada.

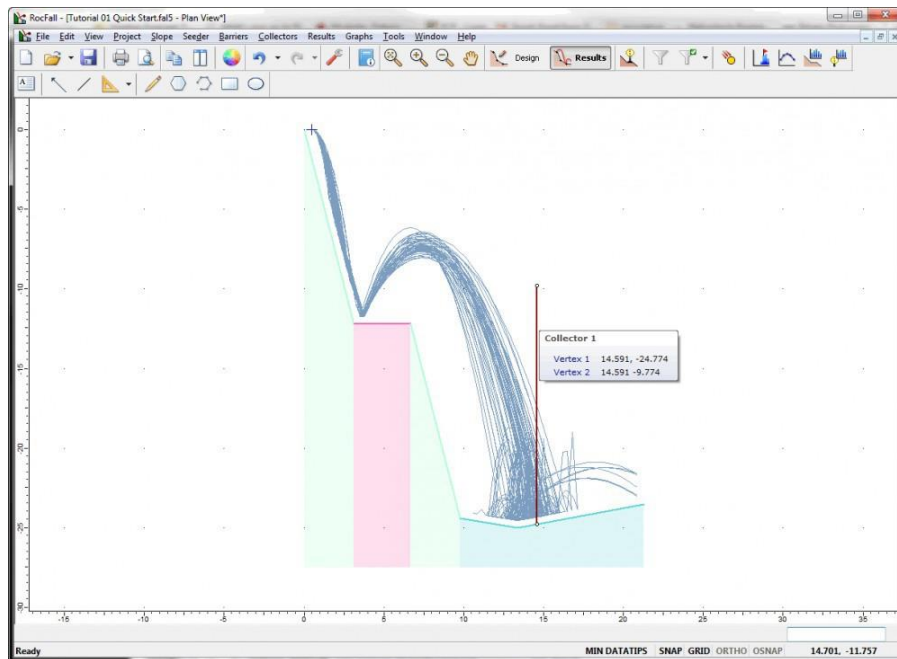


Fig 5.12 – Esquema da localização de um coletor de dados

5.3.6. GRÁFICOS DE RESULTADOS

O *Rocfall* 5.0 oferece uma variada escolha de gráficos para visualização dos resultados obtidos. Ao longo da superfície da encosta diferentes parâmetros podem ser tidos em conta como:

- Localização final dos blocos;
- Altura de salto;
- Energia cinética total;
- Energia cinética rotacional e translacional;
- Velocidade linear e angular.

O gráfico que representa a localização final dos blocos é apresentado por um histograma em que diferentes blocos são caracterizados por diferentes cores consoante as informações que o utilizador pretenda obter. Na figura 5.13, blocos imobilizados estão representados a vermelho, blocos que foram detidos pela barreira estão representados a verde e blocos que conseguiram ultrapassar esse mesmo obstáculo, a azul. A geometria da encosta é sempre apresentada em plano de fundo.

Os restantes parâmetros enunciados anteriormente tanto podem ser representados por gráficos de variação de valores ou por gráficos de distribuição. Nestes últimos, uma linha vertical no perfil da encosta assinala uma dada localização que o utilizador pretenda estudar e os dados serão prontamente visualizados para esse específico local.

Por fim, gráficos semelhantes também podem ser obtidos directamente sobre valores nas barreiras e coletores como localizações de impacto ao longo da sua altura, valores de energias cinéticas e de velocidades.

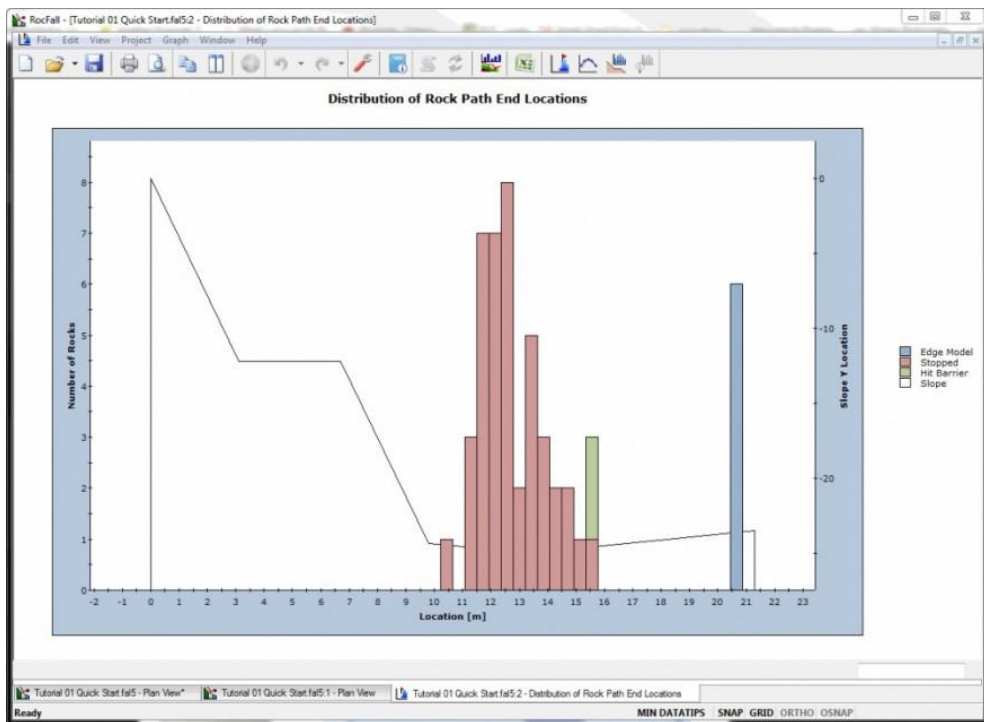


Fig 5.13 – Histograma de localização dos blocos

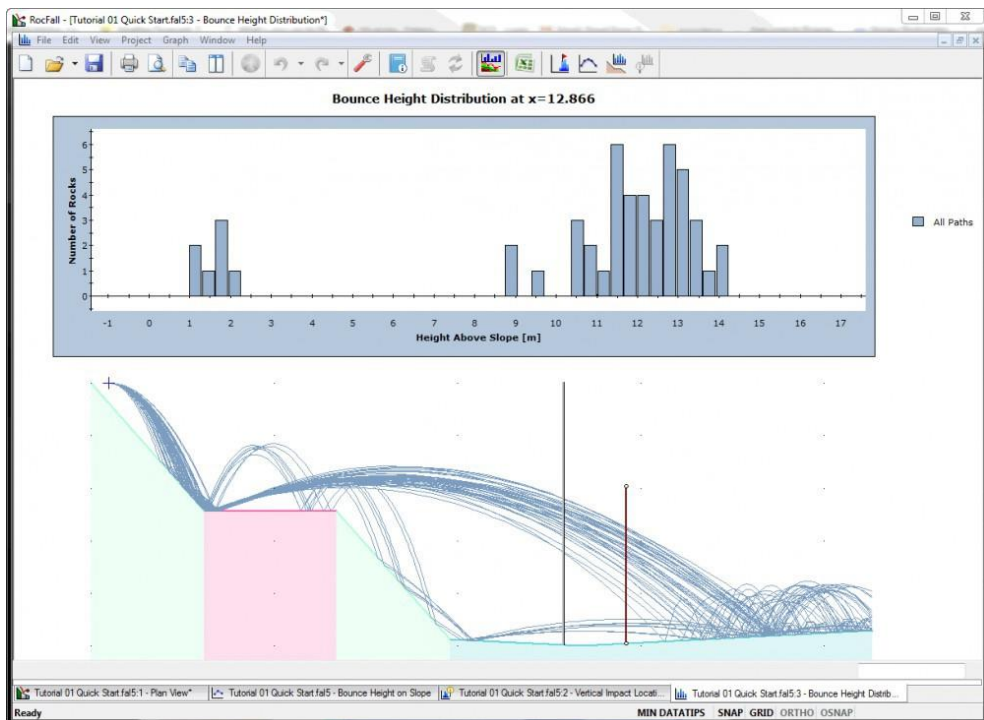


Fig 5.14 – Altura de salto dos blocos para uma dada localização

6

ENQUADRAMENTO DO LOCAL DE ESTUDO E ANÁLISE PARAMÉTRICA

6.1. INTRODUÇÃO

Para que o estudo sobre um local, inserido no contexto de análise de desprendimentos de blocos, possa ser levado a cabo, é preciso conhecer as suas características e o que o rodeia. Neste sentido, será apresentado neste capítulo um enquadramento geológico da região e do local de estudo bem como um historial de registo de quedas de blocos que terão ocorrido após o fecho deste troço da Linha do Douro.

Consequentemente, e como introdução à análise paramétrica a ser realizada, será apresentado também o levantamento topográfico utilizado e os perfis em estudo.

Quanto à análise referida, o principal objetivo desta é tentar perceber de que forma os parâmetros estudados influenciam as trajetórias de queda dos blocos, usando o método de corpo rígido na simulação do programa *Rocfall*.

6.2. ENQUADRAMENTO DO LOCAL DE ESTUDO

6.2.1. GEOLÓGICO

O troço em estudo pertencente ao troço desativado Pocinho-Barca d'Alva e inserido na linha ferroviária do Douro, situa-se perto do apeadeiro de Almendra, concelho de Vila Nova de Foz Côa, distrito da Guarda.

Do ponto de vista geológico, a região encontra-se na chamada Zona Centro Ibérica (ZCI). Incluída no maciço ibérico, a ZCI é a que apresenta maior extensão e pode ser considerada como o eixo de uma antiga cadeia montanhosa. Esta unidade aflora essencialmente na metade norte de Portugal, cujas características mais marcantes são a presença de rochas paleozoicas e grandes extensões de rochas do Pré-Câmbrico.

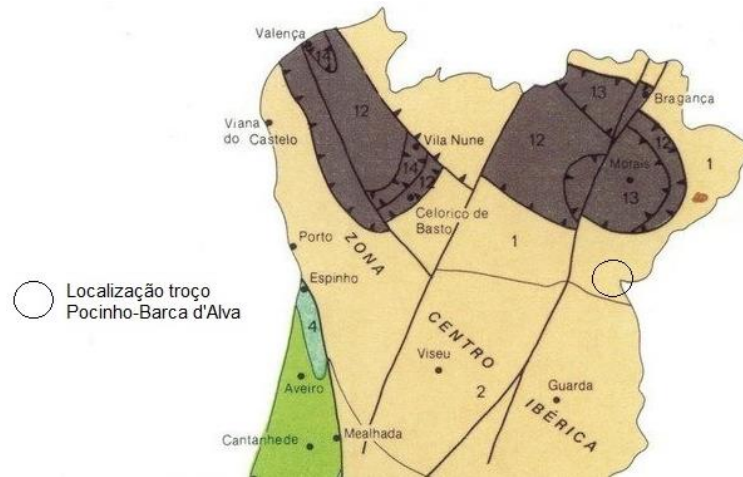


Fig 6.1 – Unidade geotécnica envolvente do troço Pocinho-Barca d'Alva (lh6.googleusercontent.com, 2015)

O troço em causa segue numa zona onde se depositou um espesso pacote de sedimentos que constitui o chamado Complexo Xisto Grauváquico do grupo do Douro, onde se inclui a formação da Desejosa.

Segundo Pita et al. (2009) o grupo do Douro forma um conjunto de unidades litológicas, que afloram ao longo do vale do Douro. É formado por uma espessa sequência de níveis litológicos que compreendem alternâncias de xistos grauvaques, quartzitos, conglomerados, rochas carbonatadas e calcossilicatadas, etc. Quanto à formação da Desejosa (De) tem espessura de cerca de 300m aumentando na região de Moncorvo. É caracterizada por alternâncias milimétricas de xistos cinzentos escuros e finos leitos, normalmente milimétricos, de siltitos claros, que conferem à formação o aspeto listrado.

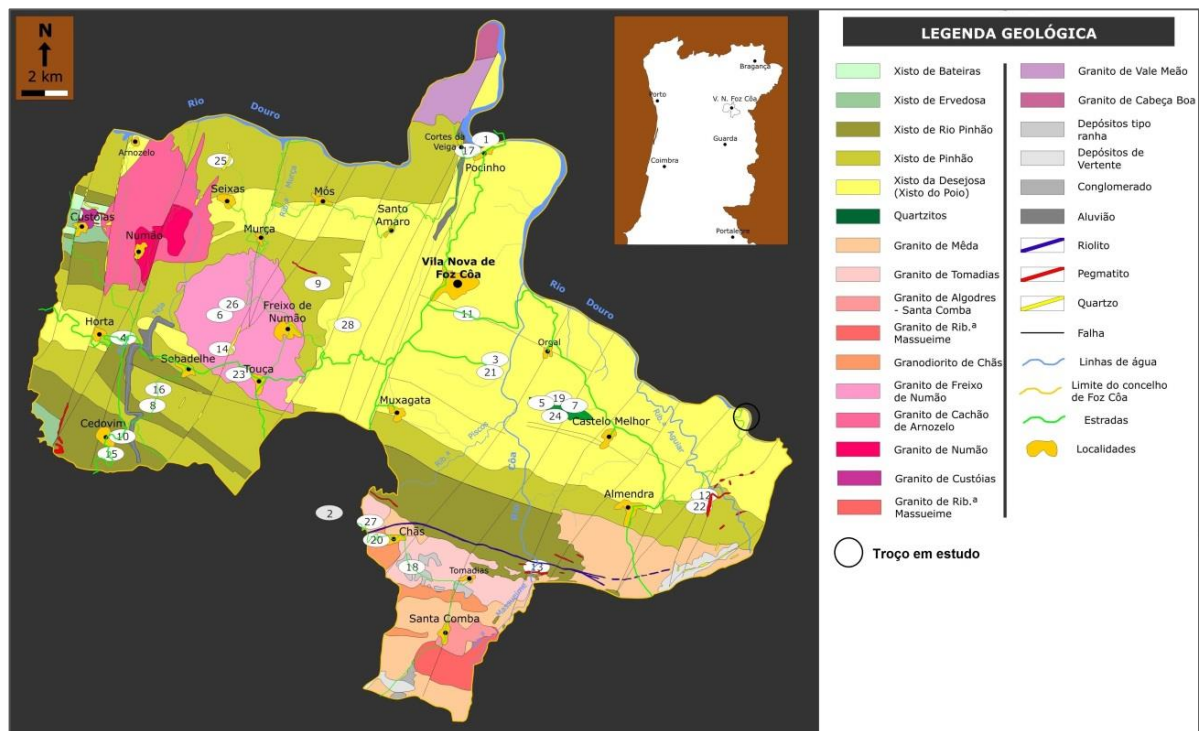


Fig 6.2 – Carta geológica do concelho de Vila Nova de Foz Côa (projectos.fozcoa.net, 2015)

Cerca de 25% da Linha do Douro é composta por rochas xistentas. Maciços em que predominam este tipo de rocha são globalmente pouco permeáveis e apresentam-se muitas vezes em situações de equilíbrio precário. Este estado pode facilmente ser alterado devido a infiltrações de água em planos de descontinuidades, levando a possíveis instabilidades. Assim, a resposta geral deste tipo de maciços no que respeita à sua estabilidade, sobre o efeito da pluviometria, é um importante aspeto que tem de ser tido em consideração caso se pretenda uma análise mais profunda sobre o seu comportamento.

6.2.2. REGISTO DE QUEDAS DE BLOCOS

Encerrado há cerca de vinte e sete anos, o troço Pocinho-Barca d'Alva é neste momento um troço completamente abandonado e sem qualquer tipo de atividade ferroviária. Vários foram os desprendimentos de blocos ao longo dos anos, não se conseguindo datar com precisão em que alturas poderão ter ocorrido.

De seguida, e reportando ao estudo levado a cabo por Domingues (2009), que na elaboração da sua dissertação também sobre o mesmo troço, identificou os processos mais frequentes de instabilidades da zona e conseguiu reunir dados estatísticos, ainda que algo rudimentares, sobre o número de blocos que se desprenderam, bem como o seu tamanho, serão apresentados os seus resultados de forma a enquadrar o local e permitir uma melhor compreensão da dimensão dos desprendimentos ocorridos.

É de salientar que este tipo de análise é de difícil realização e mesmo o seu rigor técnico é posto em causa pelo facto de que algumas trajetórias dos blocos não são as que se julga, podendo existir vários pontos de desprendimento e apenas um caminho de blocos (*rock path*). A contagem é muitas vezes também de difícil realização. Quando se tenta dividir em pequenos, médio e grandes blocos, nunca se pode colocar de parte o fenómeno da fragmentação, sendo este um fenómeno pouco abordado (Domingues, 2009).

O troço estudado, representado na figura seguinte, apresenta cerca de quatrocentos metros de extensão desde o ponto A inicial, até ao ponto B final. Refira-se que apesar da nomenclatura usada, no âmbito do estudo do problema, para definir o início do troço e o seu final, o sentido de tráfego da linha é de facto no sentido oposto, de Oeste (esquerda da figura) para Este (direita da figura), ligando a estação de Almendra à estação de Barca d'Alva.



Fig 6.3 – Representação do troço em estudo (maps.google.pt, 2015)

Do tratamento estatístico realizado por Domingues (2009) obtiveram-se os dados dos gráficos das figuras 6.4, 6.5 e 6.6 que correspondem a diferentes zonas da linha: lado esquerdo (lado do rio), lado direito (junto ao talude) e espaço entre os carris, respetivamente.

O quadro seguinte representa a diferenciação dos blocos relativamente ao seu tamanho, expresso em centímetros.

Quadro 6.1 – Caracterização dos blocos consoante o seu tamanho

Tamanho	Pequenos	Médios	Grandes
Medido na sua maior extensão	Menor que 15 cm	Entre 15 e 100 cm	Maior que 100 cm

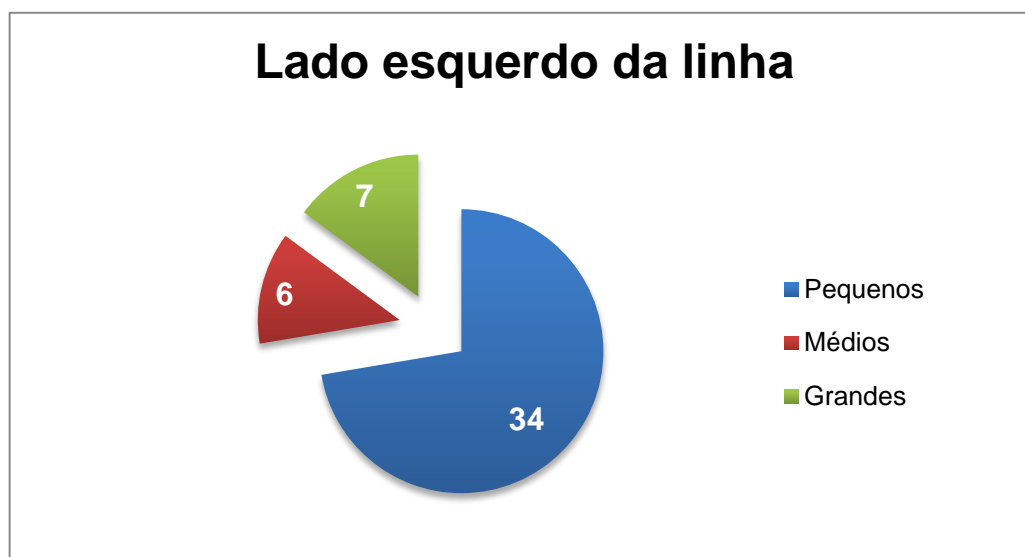


Fig 6.4 – Número de blocos do lado esquerdo da linha

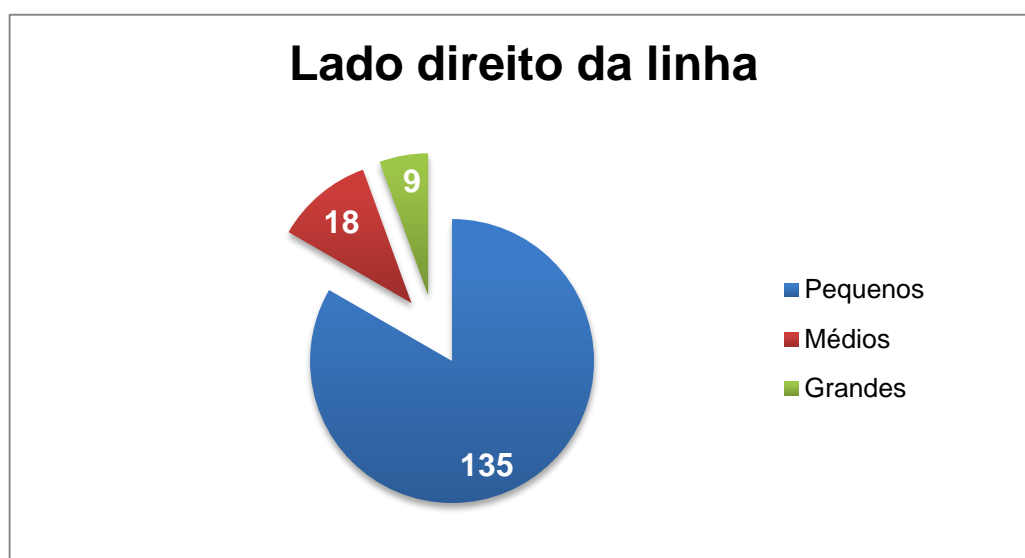


Fig 6.5 – Número de blocos do lado direito da linha

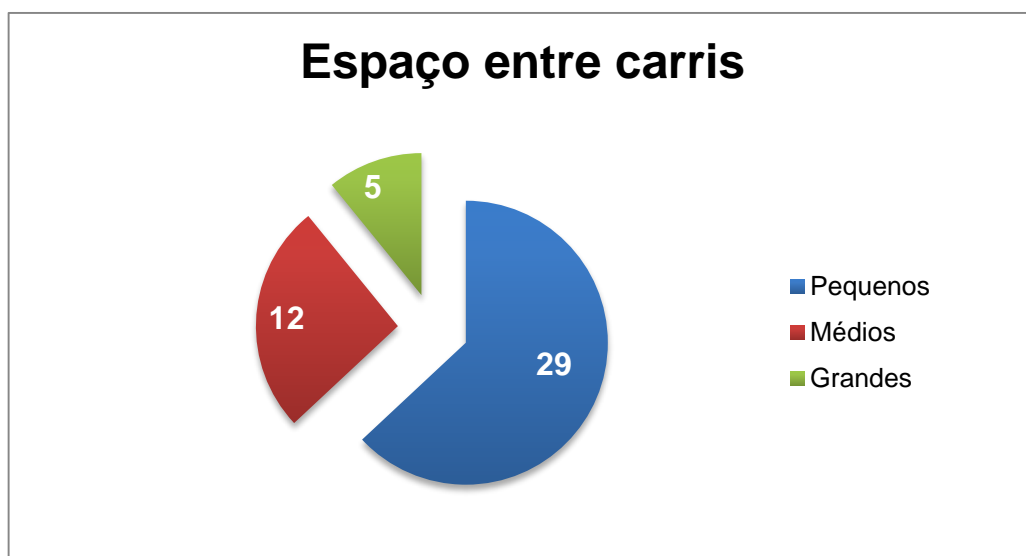


Fig 6.6 – Número de blocos situados entre carris

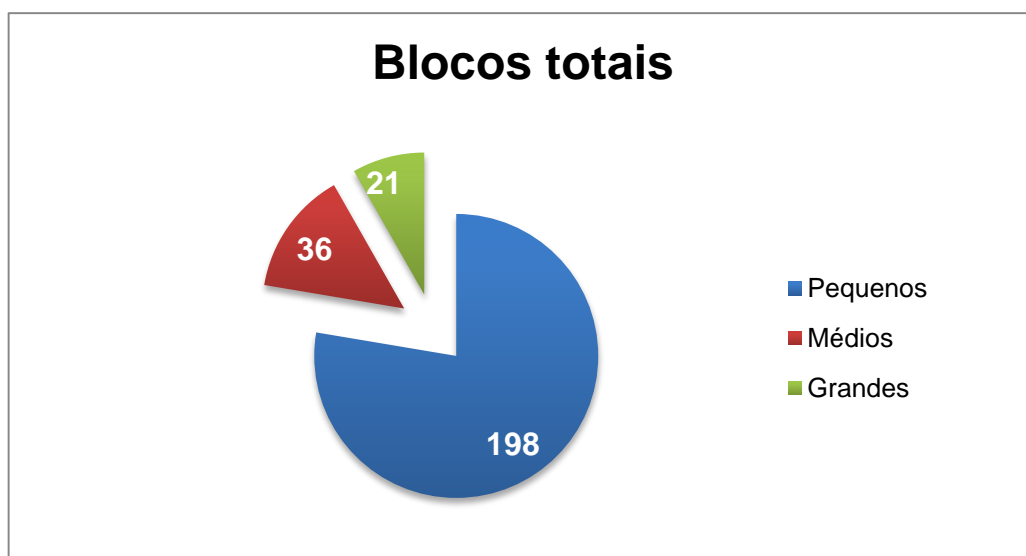


Fig 6.7 – Número de blocos totais

Desta primeira análise, 255 blocos foram analisados podendo-se facilmente concluir que grande parte dos mesmos apresenta dimensões inferiores a 15 cm, correspondendo a quase 80% da totalidade dos blocos. Parte deste número poderá ser justificada devido à possível fragmentação que ocorreu durante a queda de blocos maiores ou no impacto com a linha férrea.

Outra conclusão que pode ser retirada é a da localização dos fragmentos. A maioria dos blocos rochosos estudados situa-se entre a linha férrea e o talude o que, à partida, indica que a sua forma apresenta ângulos bastante acentuados e não formas redondas, evitando assim que grandes movimentos de rolamento tenham ocorrido. A figura 6.8b evidencia de forma clara este facto.

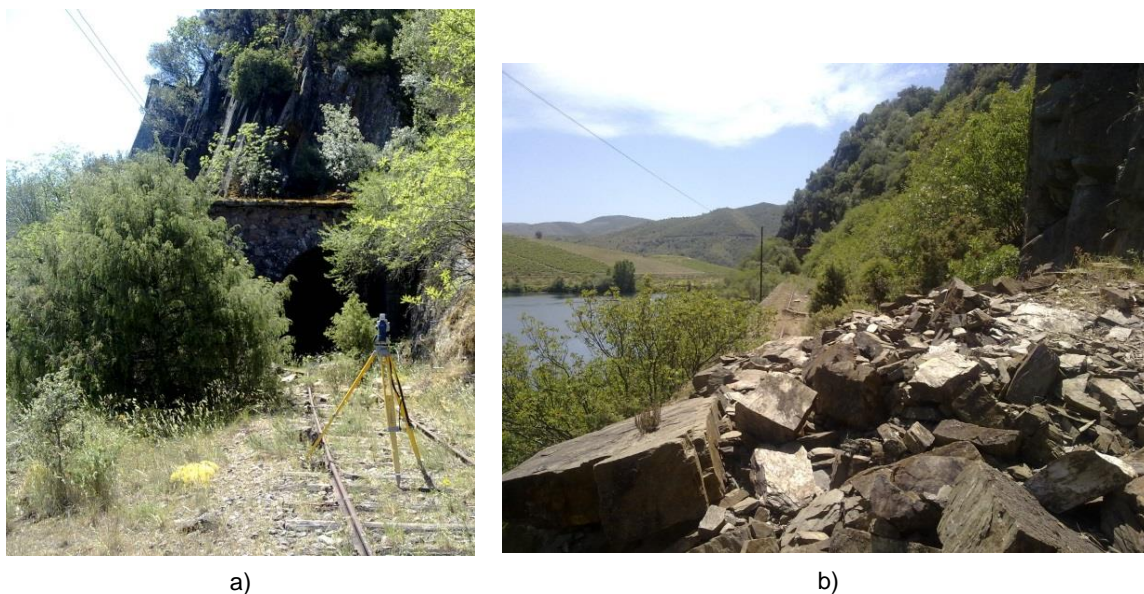


Fig 6.8 – a) Ponto inicial A do troço e b) Blocos depositados na linha (GEG, 2015)

6.2.3. LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO

O levantamento topográfico apresentado de seguida é referente ao troço do estudo em causa, mais precisamente do PK 183+000 da Linha Férrea do Douro. Concedido cordialmente pelo Gabinete de Estruturas e Geotecnia é um documento de *AutoCAD* de grande importância já que é a partir do mesmo que se poderão traçar os perfis transversais da encosta e posteriormente importar a sua geometria através do *Rocfall*, dando seguimento à análise paramétrica efetuada no ponto seguinte.

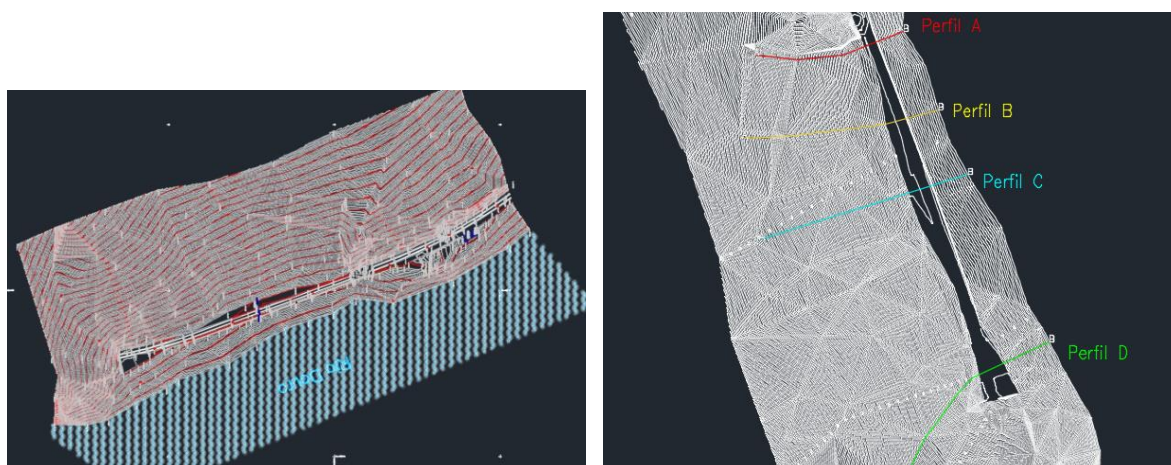


Fig 6.9 – Levantamento topográfico e perfis utilizados

6.3. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARAMÉTRICA

Como já referido anteriormente, esta nova versão do *software Rocfall* oferece a possibilidade de simular desprendimentos de blocos através do método de corpo rígido. Este método tem a capacidade, em relação ao único possível de utilização na versão anterior (massa concentrada), de traduzir as mecânicas de colisão de forma mais realista incorporando para isso várias geometrias de blocos.

Tirando proveito desta nova funcionalidade, achou-se por bem estudar a influência dos parâmetros de *input* do programa para dois tipos de formas distintas: blocos esféricos e blocos de faces mais angulares. Assim, poderá ser realizada uma análise semelhante para ambos mas tendo em consideração geometrias bastante díspares uma da outra.

Sendo esta análise baseada na já referida dissertação feita por Domingues (2009), que na altura teve a oportunidade de visitar o local e de recolher informação específica dos blocos encontrados ao longo do troço em estudo, optou-se também, para além das duas geometrias distintas estudadas, considerar três dimensões diferentes. Os blocos analisados no local variavam de 3kg a aproximadamente 400kg e, por isso, considerou-se neste estudo blocos de dimensões de 5kg, 50kg e 300kg de maneira a abranger de forma o mais representativa possível esse intervalo.

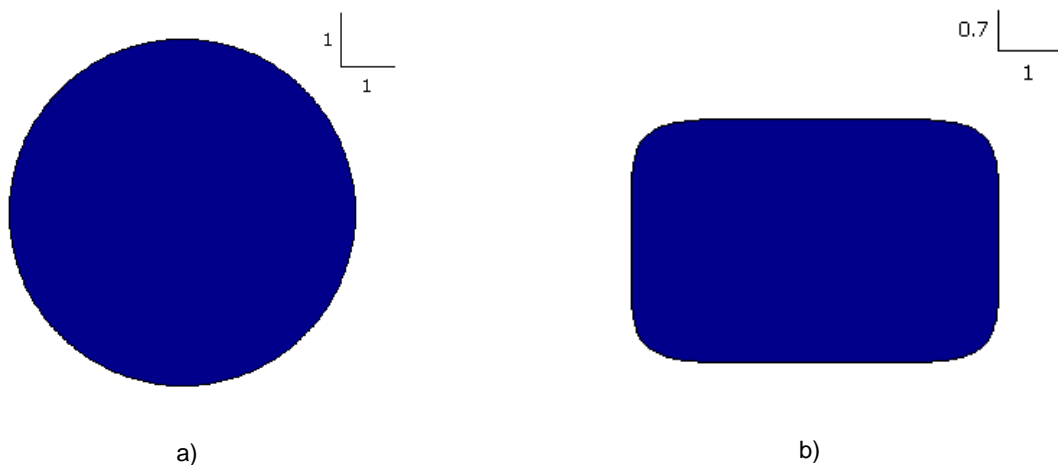


Fig 6.10 – Formas dos blocos usadas na simulação: a) bloco esférico e b) bloco angular

Relativamente aos parâmetros estudados esses foram aqueles que são característicos do modelo de corpo rígido: coeficientes de restituição normal e tangencial, coeficiente de atrito dinâmico, resistência ao rolamento e rugosidade da encosta. Usando três tipos de perfis, os parâmetros anteriores são agrupados em três grupos sendo que cada perfil foi traçado nas zonas em que Domingues (2009) enunciou como sendo as trajetórias mais evidentes de desprendimentos no local.

Para o perfil A serão analisados ambos coeficientes de restituição, para o perfil B o coeficiente dinâmico de atrito e a resistência ao rolamento e finalmente para o perfil C será estudada a rugosidade. É de salientar que foram agrupados tantos os coeficientes normal e tangencial num perfil e o coeficiente dinâmico de atrito e resistência ao rolamento noutra porque são parâmetros bastante semelhantes, afetando o movimento dos blocos de maneira similar, e também por questões de simplificação da análise.

Finalmente, para cada perfil foram analisadas duas situações. A primeira situação será usando os valores mínimos do intervalo de valores que se consideraram admissíveis, relativamente aos parâmetros específicos estudados, e a segunda o oposto, aplicando os valores máximos. Desta forma é possível ter uma percepção de como é que os resultados variam ao longo do intervalo.

No que toca à definição dos valores dos parâmetros usados para cada análise estes foram obtidos principalmente através da tabela elaborada por Heidenreich (2004) presente nos anexos e de tabelas disponibilizadas pelo *Rocfall*. Devido à grande variedade de valores, bem como à existência de valores bastante díspares mesmo para materiais semelhantes de acordo com diferentes autores, é difícil afirmar que os escolhidos sejam exatamente os presentes no local. No entanto, crê-se que os intervalos propostos abrangem grande parte desses valores e são bastante realistas.

Na definição dos coeficientes de restituição optou-se por considerar os propostos por Stevens (1998), autor da dissertação que deu origem ao programa em uso. No documento, este afirma que valores típicos do coeficiente de restituição normal, R_n , usados em análises de desprendimentos de blocos variam entre 0.3 e 0.5, enquanto que para o coeficiente de restituição tangencial, R_t , esse intervalo situa-se entre 0.8 e 0.95.

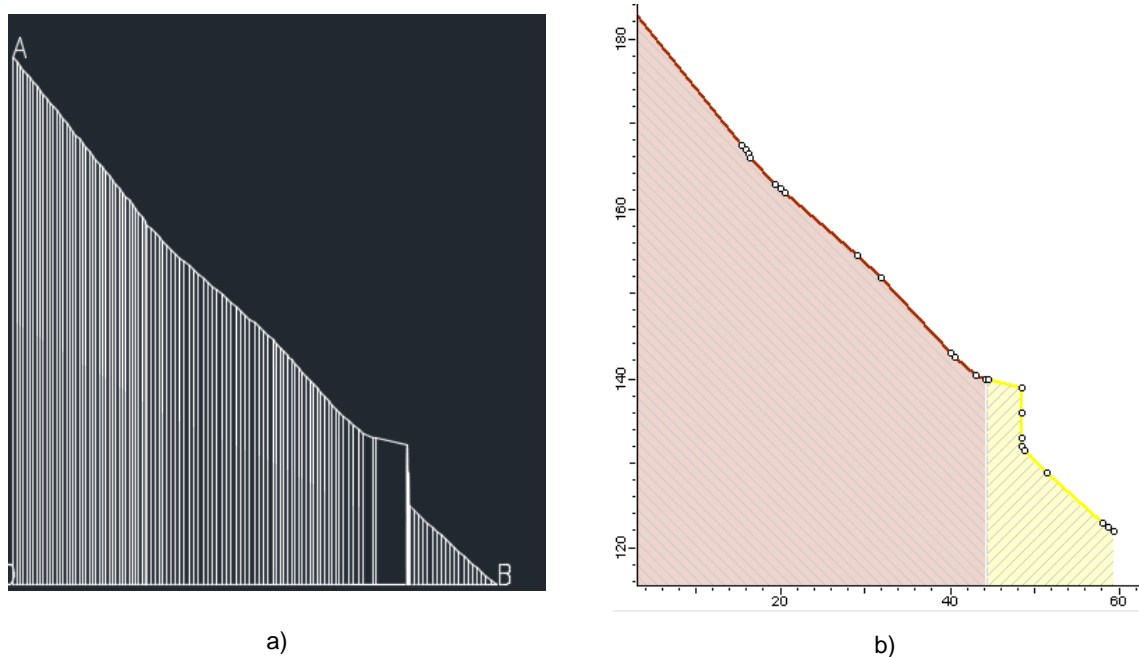


Fig 6.11 – Perfil A: a) AutoCad e b) Rocfall

Para valores dos coeficientes de atrito dinâmico, os valores do ângulo de atrito considerados variam de 25° a 35° . A partir da equação 5.2, este intervalo equivale a valores entre aproximadamente 0.45 e 0.7. Em relação à resistência ao rolamento, e com base em tabelas do *Rocfall*, os valores que se consideraram adequados para o local encontram-se entre o intervalo [0.3;0.5].

Na definição dos valores da rugosidade, adotou-se o intervalo de [0,1] metros no que toca ao espaçamento. Quanto à amplitude, esta foi considerada nula, como sugerido pelo material de apoio do *Rocfall*. Contudo, sempre que o seu valor é zero, é definido um valor de desvio padrão de 0.2 associado a uma distribuição normal. Refere-se, com o intuito de simplificação do problema, que os valores da rugosidade só foram considerados no estudo do seu perfil.

As zonas de desprendimento foram seleccionadas a partir de pontos onde o risco destes ocorrerem é mais elevado. Quanto às velocidades iniciais dos blocos foram consideradas nulas de modo a simular o momento inicial do desprendimento e não um lançar dos blocos pelo talude.

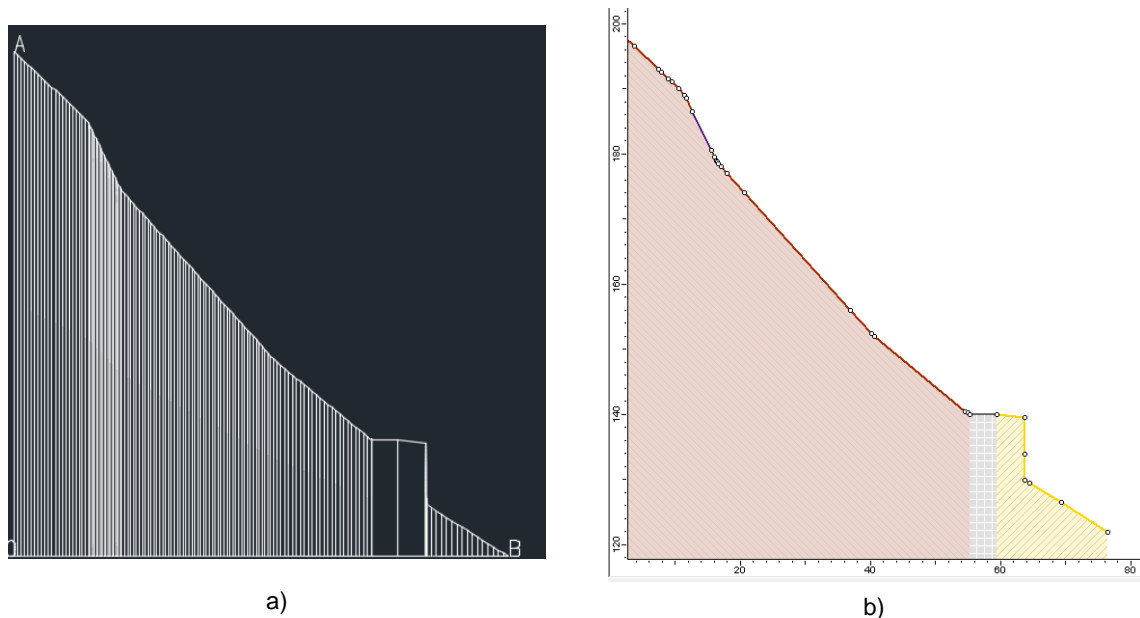
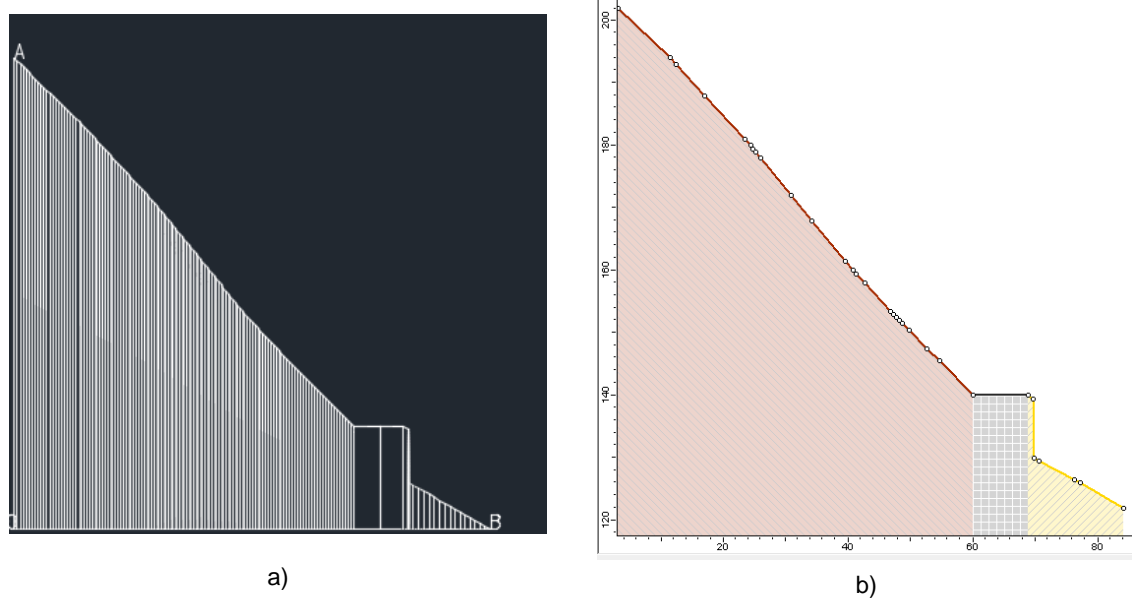


Fig 6.12 – Perfil B: a) *AutoCad* e b) *Rocfall*

Quanto aos resultados, o *Rocfall* permite obter gráficos referentes à posição final dos blocos, altura dos seus saltos, energia cinética total, energia cinética translacional e rotacional, velocidade linear e angular. É claro que para que os resultados sejam comparáveis estes têm de ser os mesmos para cada análise. Assim, optou-se pela visualização dos resultados que se considerou mais relevantes:

- Energia cinética total máxima ao longo de todo o percurso de queda;
- Altura máxima dos blocos ao longo de todo o percurso de queda;
- Localização final dos blocos ao longo de todo o percurso de queda.

Em cada análise, enquanto os parâmetros em estudo variam de valores os outros mantêm-se constantes. Isto é, pegando no exemplo dos coeficientes de restituição, tanto para a situação um como para a situação dois os seus valores tomam os extremos dos intervalos já abordados, mas os valores dos demais são sempre os mesmos, independentemente da situação. A rugosidade apenas é considerada no seu perfil já que o programa permite que esta não seja seleccionada, ao contrário do coeficiente de atrito dinâmico e da resistência ao rolamento em que sempre se têm de introduzir valores.

Fig 6.13 – Perfil C: a) *AutoCad* e b) *Rocfall*

Para cada simulação realizada foram lançados 500 blocos. Contudo, devido a uma incompatibilidade existente no programa entre a geometria da encosta e a forma dos blocos, especialmente a angular, em alguns casos nem sempre quinhentas trajetórias eram lançadas. A solução proposta pelo *Rocfall*, quando este problema ocorre, é a de simplificar a geometria da encosta de modo a minimizar essas incompatibilidades. Os vértices da superfície foram assim simplificados em cerca de 80%, valor máximo que se considerou aceitável. Caso esta simplificação fosse mais acentuada o risco de modificar a geometria real da encosta era elevado.

Há que referir, no entanto, que não se conseguiu extinguir o problema por completo, sendo que em certas simulações algumas dezenas de trajetórias de queda não foram consideradas. Para contornar esta questão, na apresentação dos resultados do local de imobilização, optou-se por não apresentar o número de blocos imobilizados mas sim a percentagem destes conforme a sua localização.

As figuras 6.11, 6.12 e 6.13 representam as geometrias dos perfis utilizados para cada parâmetro, em *AutoCAD* e no *Rocfall*. Neste último, para a simulação dos desprendimentos, foram definidas três zonas representadas a cores diferentes: zona da encosta, zona da linha férrea e zona posterior a esta. Cada zona apresenta características diferentes de acordo com a análise em causa.

6.4. ANÁLISE PARAMÉTRICA DOS VALORES DE R_N E R_T

6.4.1. ENQUADRAMENTO DE VALORES

Nesta primeira análise estudou-se a influência dos coeficientes de restituição normal e tangencial usando para isso o perfil A. Duas situações distintas são propostas: A1, em que os valores dos parâmetros em causa são os mínimos e A2, em que os mesmos parâmetros apresentam valores máximos. Relativamente ao coeficiente de atrito dinâmico e resistência ao rolamento optou-se por valores intermédios dos seus respetivos intervalos. A rugosidade não é considerada.

Os valores utilizados na simulação foram:

- Coeficiente de atrito dinâmico: $\mu = 0.55$ em toda a superfície da encosta;
- Resistência ao rolamento: $\mu_{rot} = 0.35$ em toda a superfície da encosta;
- Rugosidade: espaçamento e amplitude nulas;
- Velocidade inicial: $v_{horizontal} = 0\text{m/s}$; $v_{vertical} = 0\text{m/s}$; $v_{angular} = 0^\circ/\text{s}$;
- Rotação inicial: 0° ;
- Massa volúmica do bloco: 2500kg/m^3 .

Seria natural que os três primeiros parâmetros enunciados fossem variando ao longo da superfície já que esta é não é completamente homogênea, no entanto, estes foram mantidos constantes de modo a estudar apenas a influência dos coeficientes de restituição nos resultados apresentados.

Quadro 6.2 – Valores dos coeficientes de restituição normal e tangencial (Perfil A)

Zona	Situação			
	A1		A2	
	R_n	R_t	R_n	R_t
Encosta	0.3	0.8	0.5	0.95
Linha Férrea	0.3	0.8	0.5	0.95
Posterior à linha	0.3	0.8	0.5	0.95

6.4.2. RESULTADOS – BLOCO DE 5KG

O quadro 6.3 apresenta os resultados finais quanto à energia cinética máxima e altura máxima de salto dos blocos, bem como a distância em projeção horizontal em que estes ocorrem desde o local do desprendimento. O quadro 6.4 é referente à posição final dos blocos consoante as três diferentes zonas consideradas.

Quadro 6.3 – Resultados da análise para o bloco de 5kg – Energia cinética e altura de salto (Perfil A)

Situação	Resultados			
	Energia cinética máxima		Altura máxima de salto	
	$E_{c, max}$ (KJ)	Distância (m)	Altura (m)	Distância (m)
A1, _{esfera}	0.64	16.76	0.34	33.52
A2, _{esfera}	1.20	40.70	0.58	35.32
A1, _{angular}	1.34	43.10	9.35	43.10
A2, _{angular}	1.78	43.70	12.23	43.10

Quadro 6.4 – Resultados da análise para o bloco de 5kg – Localização final dos blocos (Perfil A)

Situação	Resultados		
	Localização final		
	Zona da encosta	Zona da linha férrea	Zona posterior à linha
A1 _{,esfera}	-	-	100%
A2 _{,esfera}	-	-	100%
A1 _{,angular}	-	10%	90%
A2 _{,angular}	-	-	100%

Observando os quadros anteriores, conclui-se que situação de estudo A2_{,angular} é aquela com maior valor de energia cinética rondando cerca de 1.8KJ. Este valor é atingido aos 43.70 metros de distância do local do desprendimento, muito próximo também do local onde o valor da energia é máxima na situação para valores de coeficientes de restituição menores (situação A1_{,angular}).

Quanto à altura máxima de salto é interessante observar que para o bloco esférico esta ocorre para distâncias muito próximas, mas para diferentes situações, e para o bloco com geometria mais angular, no exato mesmo local, a cerca de 43 metros do desprendimento.

Relativamente ao local final dos blocos, excetuando para a situação A1_{,angular}, todos eles acabam por ultrapassar a zona da linha férrea, imobilizando-se na zona posterior a esta.

As figuras 6.14 e 6.15 são referentes aos resultados enunciados anteriormente, expondo estes graficamente e comparando os valores obtidos para os dois tipos de blocos utilizados na simulação.

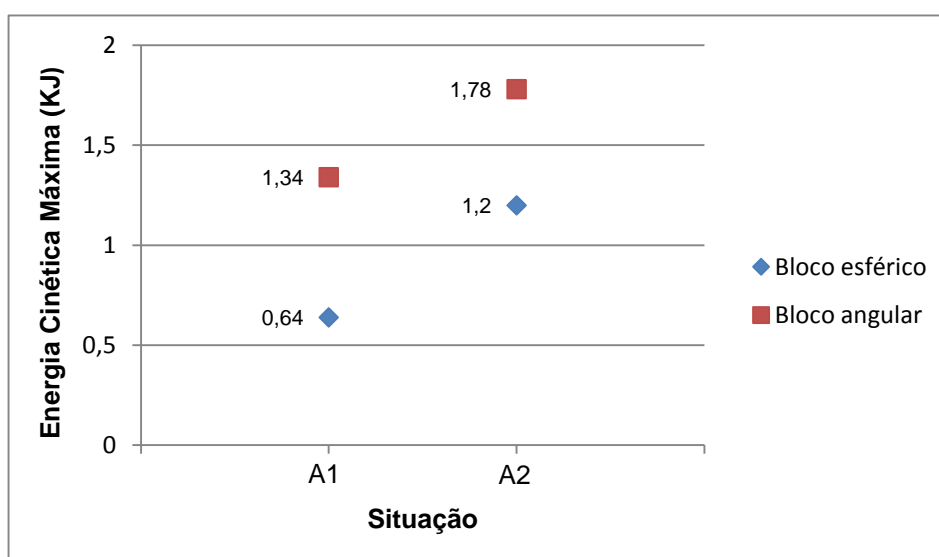


Fig 6.14 – Comparação do valor máximo da energia cinética para os diferentes blocos simulados (Perfil A – bloco 5kg)

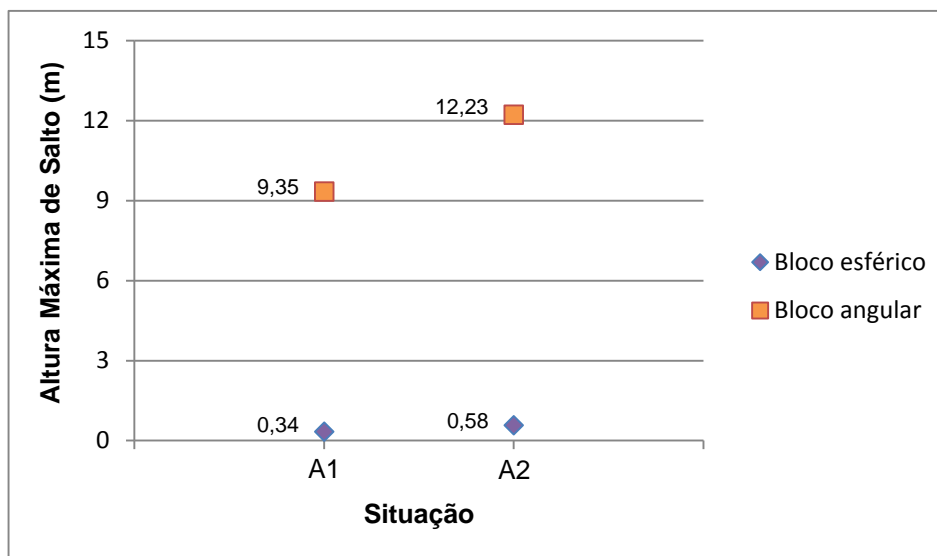


Fig 6.15 – Comparação do valor máximo da altura de salto para os diferentes blocos simulados (Perfil A – bloco 5kg)

Analisando a figura 6.14 é notório um valor superior da energia cinética máxima do bloco angular em relação ao bloco esférico dentro da mesma situação. Esta relação mantém-se quando se passa da situação A1 para a situação A2, aumentando os valores de ambos coeficientes de restituição.

No que toca à altura máxima de salto, independentemente dos valores dos coeficientes de restituição se encontrarem no limite inferior (A1) ou superior (A2) do intervalo considerado, esta é caracterizada por alturas bastante baixas para o bloco esférico (inferiores a 1 metro) e elevadas para o bloco angular.

6.4.3. RESULTADOS – BLOCO DE 50KG

Analogamente à situação anterior apresentam-se de seguida os resultados obtidos relativos à energia cinética máxima, altura máxima de salto dos blocos e localização final dos mesmos, mas para um bloco agora com cerca de 50kg.

Quadro 6.5 – Resultados da análise para o bloco de 50kg – Energia cinética e altura de salto (Perfil A)

Situação	Resultados			
	Energia cinética máxima		Altura máxima de salto	
	$E_{c, \max}$ (KJ)	Distância (m)	Altura (m)	Distância (m)
A1, <i>esfera</i>	6.40	16.76	0.45	33.52
A2, <i>esfera</i>	12.72	40.70	0.69	35.32
A1, <i>angular</i>	14.47	43.10	7.85	42.50
A2, <i>angular</i>	17.63	42.00	13.44	43.10

Quadro 6.6 – Resultados da análise para o bloco de 50kg – Localização final dos blocos (Perfil A)

Situação	Resultados		
	Localização final		
	Zona da encosta	Zona da linha férrea	Zona posterior à linha
A1, _{esfera}	-	-	100%
A2, _{esfera}	-	-	100%
A1, _{angular}	-	4%	96%
A2, _{angular}	-	-	100%

À semelhança dos resultados do bloco de 5kg, o valor da energia cinética máxima é superior a todos os outros na situação A2,_{angular}, mas numa localização ligeiramente anterior, aos 42 metros de distância do local do desprendimento. Outra conclusão interessante que se pode retirar é a de que os valores da energia cinética aumentam proporcionalmente com o peso dos blocos. Nesta análise em que o bloco pesa cerca de 10 vezes mais do que o anterior, os valores da energia também apresentam aproximadamente essa relação.

Observando os valores da altura máxima de salto dos blocos estas ocorrem para distâncias horizontais muito semelhantes aos da análise anterior para a situação A1 e A2, tanto no bloco esférico como no angular.

No local de imobilização dos blocos o mesmo volta a acontecer. Apenas na situação A1,_{angular} é que alguma percentagem dos blocos simulados para na linha férrea enquanto todos os outros continua em trajetória de queda, imobilizando-se mais à frente.

As figuras seguintes representam graficamente os resultados obtidos para a energia cinética e altura de salto dos blocos comparando as duas geometrias distintas.

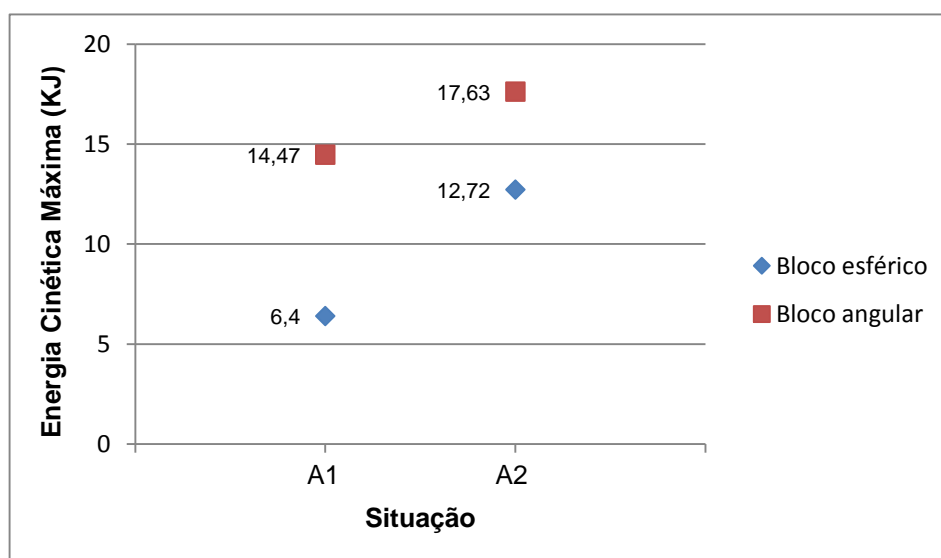


Fig 6.16 – Comparação do valor máximo da energia cinética para os diferentes blocos simulados (Perfil A – bloco 50kg)

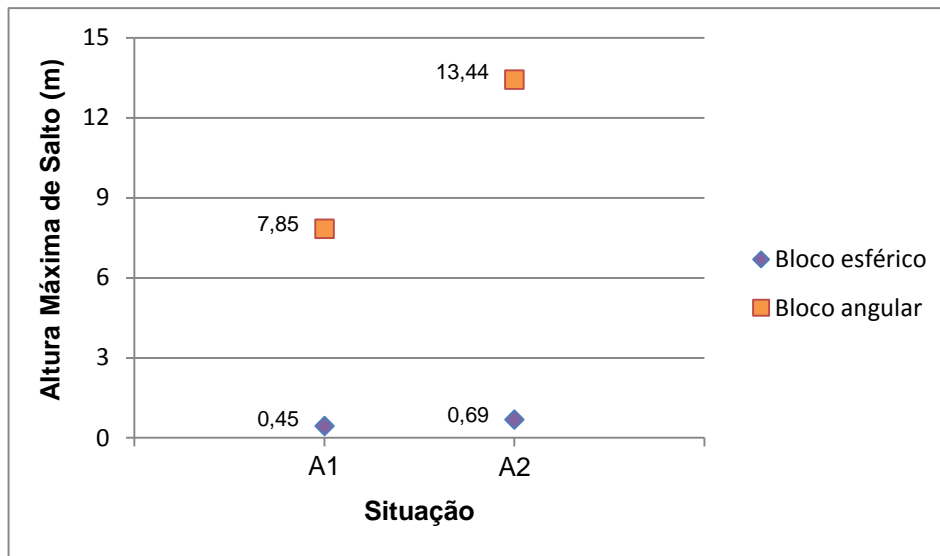


Fig 6.17 – Comparação do valor máximo da altura de salto para os diferentes blocos simulados (Perfil A – bloco 50kg)

A partir da figura 6.16 pode-se afirmar que os resultados obtidos são bastante semelhantes aos da análise anterior (figura 6.14). Enquanto que para menores valores dos coeficientes de restituição correspondem também menores valores da energia cinética, para valores maiores dos mesmo coeficientes correspondem energias acrescidas. O mesmo se verifica na altura máxima de salto.

Quanto à geometria dos blocos, tanto num resultado como no outro, os valores são superiores para os blocos angulares.

6.4.4. RESULTADOS – BLOCO DE 300KG

Tendo em consideração agora um bloco de 300kg, apresentam-se de seguida os resultados obtidos.

Quadro 6.7 – Resultados da análise para o bloco de 300kg – Energia cinética e altura de salto (Perfil A)

Situação	Resultados			
	Energia cinética máxima		Altura máxima de salto	
	$E_{c, \max}$ (KJ)	Distância (m)	Altura (m)	Distância (m)
A1, <i>esfera</i>	38.11	16.76	0.65	16.76
A2, <i>esfera</i>	73.84	40.70	0.85	35.32
A1, <i>angular</i>	83.47	42.50	7.97	40.10
A2, <i>angular</i>	109.08	43.70	14.13	41.30

Quadro 6.8 – Resultados da análise para o bloco de 300kg – Localização final dos blocos (Perfil A)

Situação	Resultados		
	Localização final		
	Zona da encosta	Zona da linha férrea	Zona posterior à linha
A1, <i>esfera</i>	-	-	100%
A2, <i>esfera</i>	-	-	100%
A1, <i>angular</i>	-	2%	98%
A2, <i>angular</i>	-	-	100%

É notório pela observação dos quadros acima expostos que os resultados obtidos são bastante semelhantes aos resultados tanto do bloco de 5 como de 50kg. Tanto a energia cinética máxima como a altura de salto são superiores no caso A2,*angular* e apenas na situação A1,*angular* é que alguns blocos ficam retidos na linha.

Tendo em conta as análises dos blocos de 5 e 50kg, a única diferença que é observável é a diferença do valor da distância a que ocorre a altura máxima de salto na situação A1 do bloco esférico. Enquanto nos dois primeiros a distância é igual (33.52m), neste caso é cerca de metade (16.76m). No entanto, ao consultar os dados das tabelas de valores desta leitura provenientes do *Rocfall*, o segundo valor mais alto acontece de facto na mesma posição dos 33.52m com um valor correspondente a 0.64m de altura. Conclui-se, portanto, que para os três diferentes blocos a posição em relação ao desprendimento no que respeita a altura máxima de salto é praticamente a mesma.

Os resultados de comparação gráfica são os seguintes:

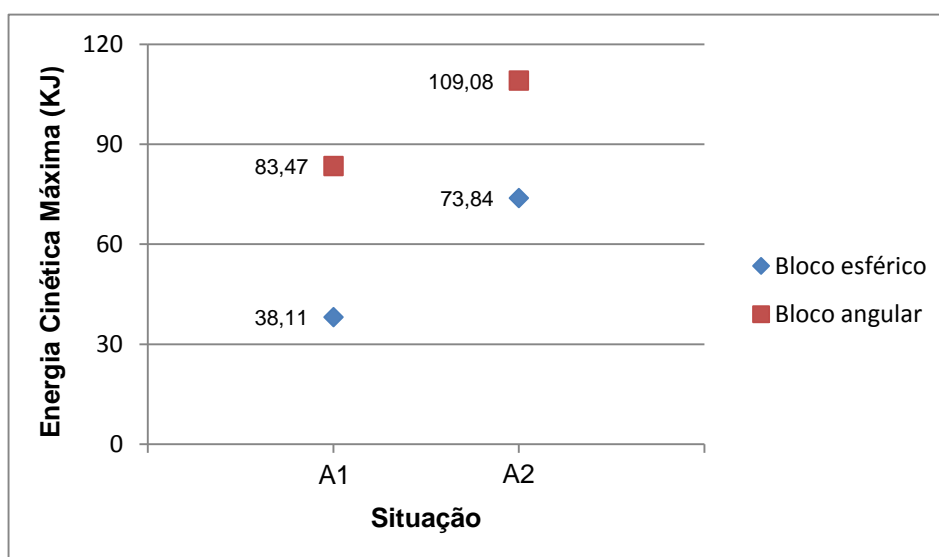


Fig 6.18 – Comparação do valor máximo da energia cinética para os diferentes blocos simulados (Perfil A – bloco 300kg)

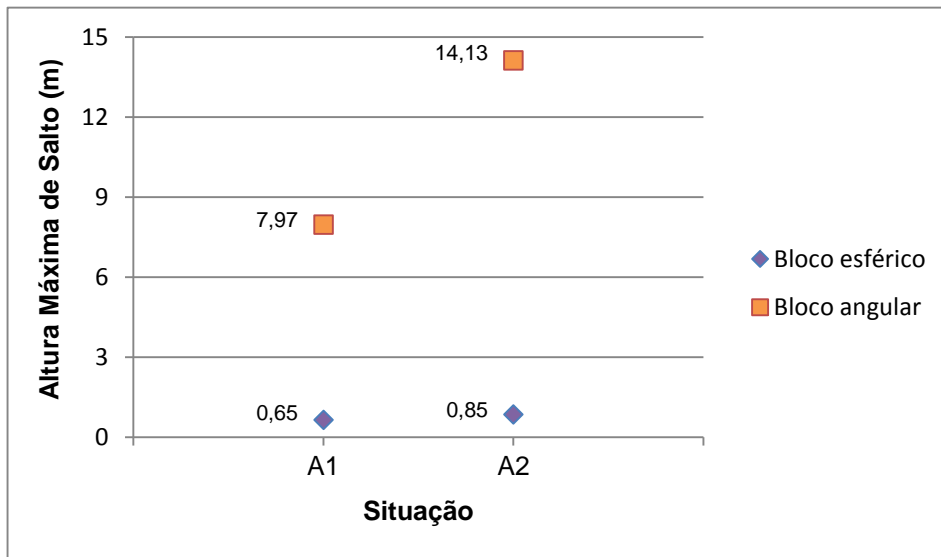


Fig 6.19 – Comparação do valor máximo da altura de salto para os diferentes blocos simulados (Perfil A – bloco 300kg)

Rapidamente se percebe que das figuras 6.18 e 6.19 se pode retirar conclusões bastante similares com as dos blocos de 5 e 50kg.

6.4.5. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES FINAIS

Com a análise concluída e tendo em conta tanto diferentes geometrias como diferentes massas de blocos, algumas conclusões interessantes podem ser retiradas. A primeira afirmação que se pode fazer é a que os coeficientes de restituição têm uma grande influência inseridos no contexto da queda de blocos e nas suas trajetórias.

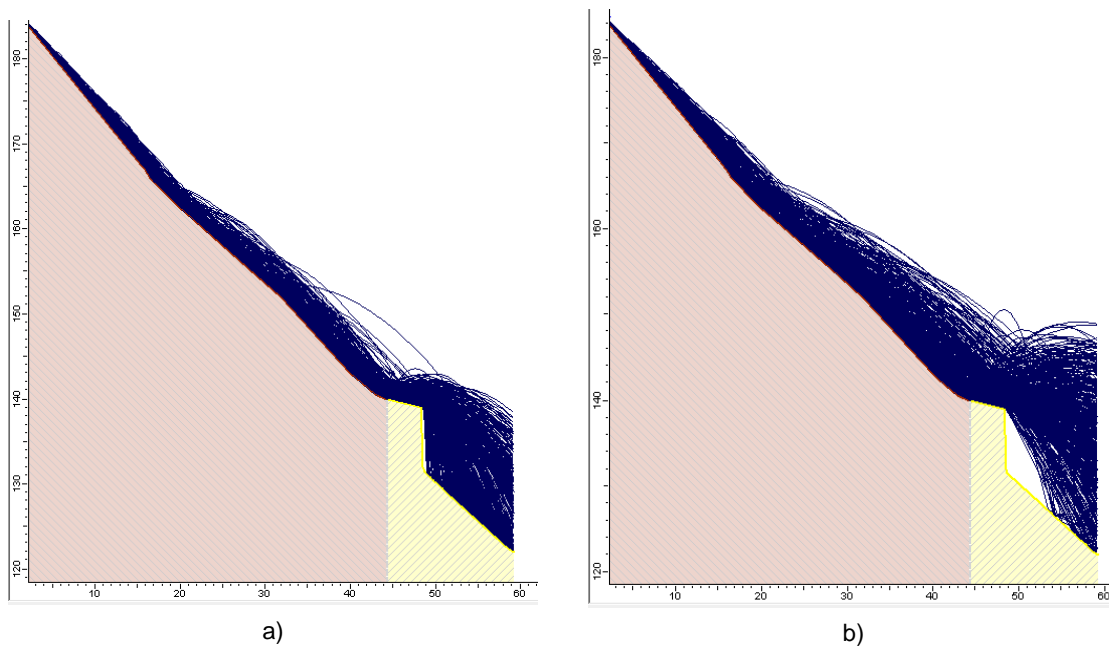


Fig 6.20 – Trajetória dos blocos angulares de 5kg: a) Situação A1 e b) Situação A2

Para valores da energia cinética, nota-se a tendência de esta aumentar conforme forem também maiores os coeficientes de restituição utilizados. O mesmo se aplica à massa dos blocos. De facto, como já foi referido anteriormente, a massa e energia cinética máxima mobilizada durante a trajetória de queda são diretamente proporcionais ($E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$). No que toca à geometria do bloco, conclui-se que os valores de energia cinética são bastante mais elevados para blocos mais angulares do que para blocos esféricos ou arredondados.

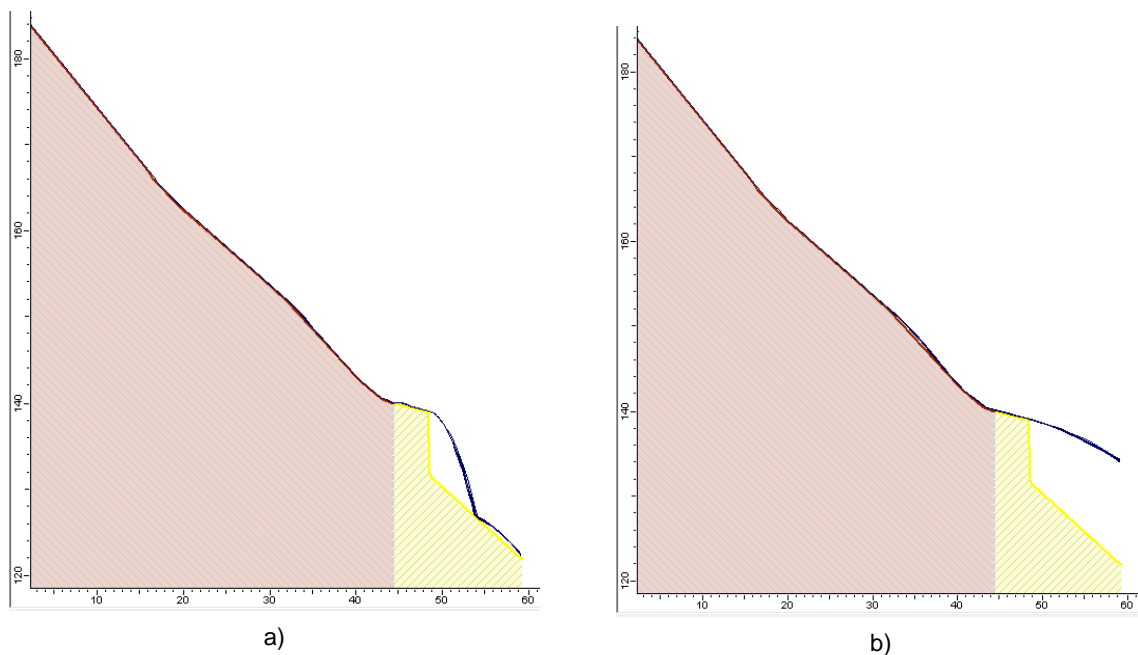


Fig 6.21 – Trajetória dos blocos esféricos de 5kg: a) Situação A1 e b) Situação A2

Quanto aos valores da altura máxima de salto, a influência que os coeficientes de restituição têm nestes valores é semelhante aquela presente no estudo da energia cinética. Quanto maiores forem esses coeficientes, maiores serão também as alturas atingidas pelos blocos ao longo do percurso de queda. No que toca à forma, especialmente para blocos esféricos, a alteração dos valores dos coeficientes é pouco determinante na altura máxima de salto que estes apresentam. Na realidade, da situação A1 para a situação A2, a variação máxima de altura para estes blocos não passa os 25cm. O mesmo não acontece para blocos angulares. Como estes têm geometrias mais vincadas que os anteriores, estão mais sujeitos a ressaltar ao longo do percurso, atingindo conseqüentemente também maiores alturas de salto.

Finalmente, no que toca ao local de imobilização final dos blocos, pode-se concluir que em pouco ou nada os coeficientes de restituição são determinantes nos resultados obtidos. Dos doze casos analisados, em nove deles a totalidade dos blocos simulados ultrapassa a linha férrea, sendo que nos restantes três a máxima percentagem de blocos retidas na linha é de apenas 10%.

6.5. ANÁLISE PARAMÉTRICA DOS VALORES DO COEFICIENTE DINÂMICO DE ATRITO E DA RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO

6.5.1. ENQUADRAMENTO DOS VALORES UTILIZADOS

Para o estudo dos parâmetros relacionados com o atrito escolheu-se o perfil B. Analogamente à análise anterior, no caso B1 serão utilizados os valores mínimos dos intervalos considerados relativamente a valores do coeficiente dinâmico de atrito e da resistência ao rolamento. No caso B2, o oposto. Quanto aos coeficientes de restituição normal e tangencial optou-se por usar valores que se acharam adequados conforme a zona em questão. Neste estudo a rugosidade não é considerada mais uma vez. Com isso são utilizados o mínimo de parâmetros possíveis permitindo assim uma mais fácil percepção da influência do atrito nas trajetórias dos blocos

Os valores utilizados na simulação foram:

- Rugosidade: espaçamento e amplitude nulas;
- Velocidade inicial: $v_{horizontal} = 0\text{m/s}$; $v_{vertical} = 0\text{m/s}$; $v_{angular} = 0^\circ/\text{s}$;
- Rotação inicial: 0° ;
- Massa volúmica do bloco: 2500kg/m^3 .

Quadro 6.9 – Valores dos coeficientes de restituição normal e tangencial (Perfil B)

Zona	Situação			
	B1		B2	
	R_n	R_t	R_n	R_t
Encosta	0.32	0.80	0.32	0.80
Linha Férrea	0.40	0.90	0.40	0.90
Posterior à linha	0.35	0.85	0.35	0.85

Quadro 6.10 – Valores dos parâmetros de atrito

Parâmetro	Situação	
	B1	B2
Coefficiente dinâmico de atrito (μ)	0.45	0.70
Resistência ao rolamento (μ_{rot})	0.30	0.50

6.5.2. RESULTADOS – BLOCO DE 5KG

O quadro 6.11 apresenta os resultados obtidos relativamente à energia cinética máxima e altura máxima de salto dos blocos ao longo da sua trajetória de queda no perfil B. O quadro 6.12 é relativo à localização de imobilização dos blocos.

Quadro 6.11 – Resultados da análise para o bloco de 5kg – Energia cinética e altura de salto (Perfil B)

Situação	Resultados			
	Energia cinética máxima		Altura máxima de salto	
	$E_{c, \max}$ (KJ)	Distância (m)	Altura (m)	Distância (m)
B1, <i>esfera</i>	0.68	36.29	0.16	16.99
B2, <i>esfera</i>	0.58	36.29	0.16	16.99
B1, <i>angular</i>	1.07	50.18	3.46	41.69
B2, <i>angular</i>	1.30	48.64	9.63	54.82

Quadro 6.12 – Resultados da análise para o bloco de 5kg – Localização final dos blocos (Perfil B)

Situação	Resultados		
	Localização final		
	Zona da encosta	Zona da linha férrea	Zona posterior à linha
B1, <i>esfera</i>	-	-	100%
B2, <i>esfera</i>	-	-	100%
B1, <i>angular</i>	-	35%	65%
B2, <i>angular</i>	-	11%	89%

No quadro 6.11, o valor máximo da energia cinética é de 1.30KJ e ocorre relativamente perto dos 48.50 metros desde o local do desprendimento. Enquanto que o valor mínimo da energia, para o bloco angular, dá-se num ponto ligeiramente mais atrás em relação ao seu valor máximo, para o bloco esférico esta é lida exatamente no mesmo ponto. O mesmo acontece na altura máxima de salto. Para os blocos esféricos esta altura ocorre a cerca de 17 metros em projeção horizontal desde o ponto de desprendimento, mas para os blocos angulares os pontos de altura máxima de salto são distintos.

Quanto à localização dos blocos, no caso de estes serem esféricos, todos eles passam a zona da linha férrea. Nos blocos angulares, em ambas as situações, existe uma percentagem dos blocos simulados que fica retida na linha.

As figuras gráficas seguintes ilustram os resultados obtidos comparando lado a lado as duas formas geométricas

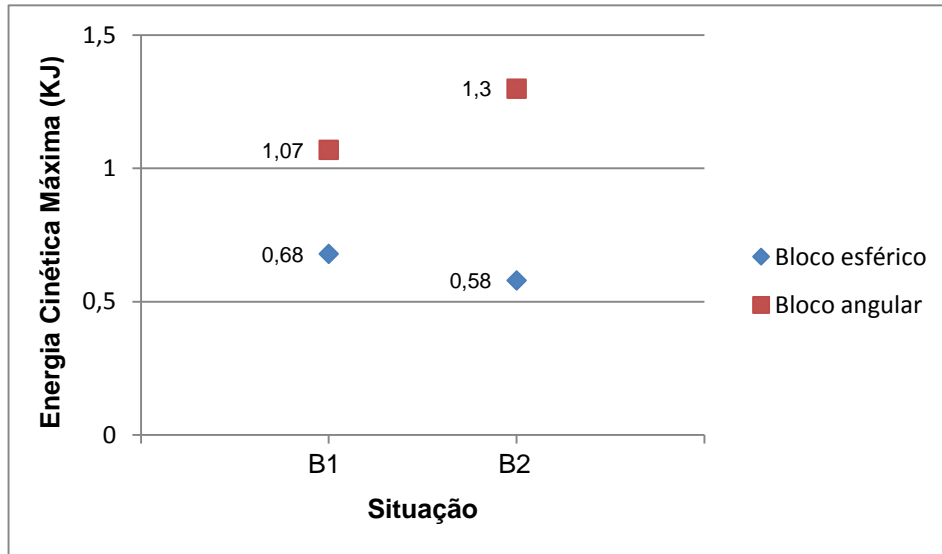


Fig 6.22 – Comparação do valor máximo da energia cinética para os diferentes blocos simulados (Perfil B – bloco 5kg)

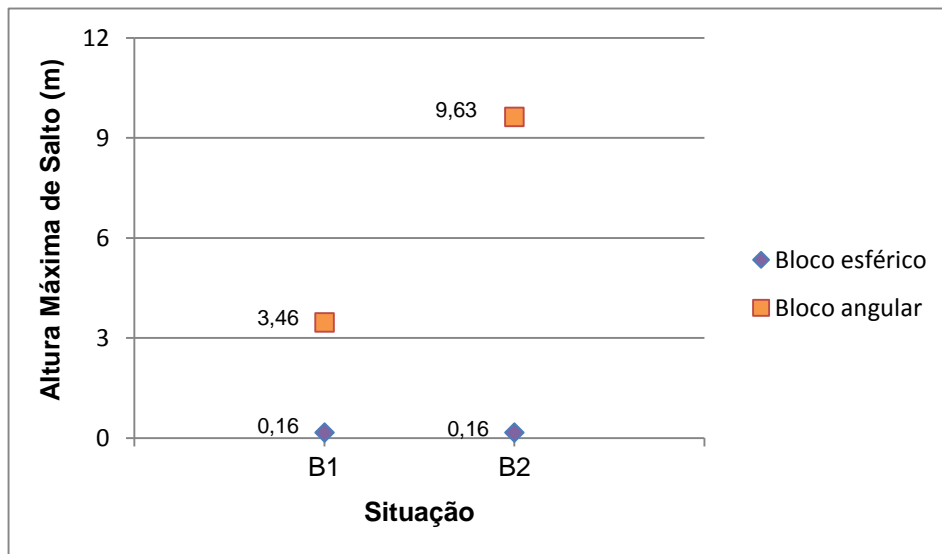


Fig 6.23 – Comparação do valor máximo da altura de salto para os diferentes blocos simulados (Perfil B – bloco 5kg)

Na figura 6.23 verifica-se que o valor máximo da energia cinética varia conforme a geometria do bloco simulado. Para blocos esféricos os seus valores diminuem consoante o aumento dos coeficientes de atrito. Nos blocos angulares, ocorre o oposto. Com o aumento tanto do coeficiente dinâmico de atrito como da resistência ao rolamento os valores máximos da energia cinética também sofrem um acréscimo de valor, passando de 1.03KJ para 1.70KJ.

Relativamente à altura máxima de salto, nos blocos esféricos, esta é igual independentemente da situação em causa (0.16m) e ocorre no mesmo exato local. Quanto a formas angulares de blocos, as alturas tendem a sofrer a mesma variação da energia cinética, ou seja, para valores de atrito superior as alturas também aumentam. Conclui-se, portanto, à semelhança da análise efetuada acerca dos coeficientes de restituição, que quanto maior é a energia cinética mobilizada durante a queda maior será também a altura de salto.

6.5.3. RESULTADOS – BLOCO DE 50KG

Nos próximos quadros apresentam-se os resultados referentes ao bloco de 50kg.

Quadro 6.13 – Resultados da análise para o bloco de 50kg – Energia cinética e altura de salto (Perfil B)

Situação	Resultados			
	Energia cinética máxima		Altura máxima de salto	
	$E_{c, \max}$ (KJ)	Distância (m)	Altura (m)	Distância (m)
B1, <i>esfera</i>	7.04	37.06	0.28	16.99
B2, <i>esfera</i>	6.03	37.06	0.28	16.99
B1, <i>angular</i>	11.01	49.41	4.32	40.15
B2, <i>angular</i>	13.44	50.18	7.86	54.82

Quadro 6.14 – Resultados da análise para o bloco de 5kg – Localização final dos blocos (Perfil B)

Situação	Resultados		
	Localização final		
	Zona da encosta	Zona da linha férrea	Zona posterior à linha
B1, <i>esfera</i>	-	-	100%
B2, <i>esfera</i>	-	-	100%
B1, <i>angular</i>	-	45%	55%
B2, <i>angular</i>	-	15%	85%

A representação gráfica dos resultados é a seguinte:

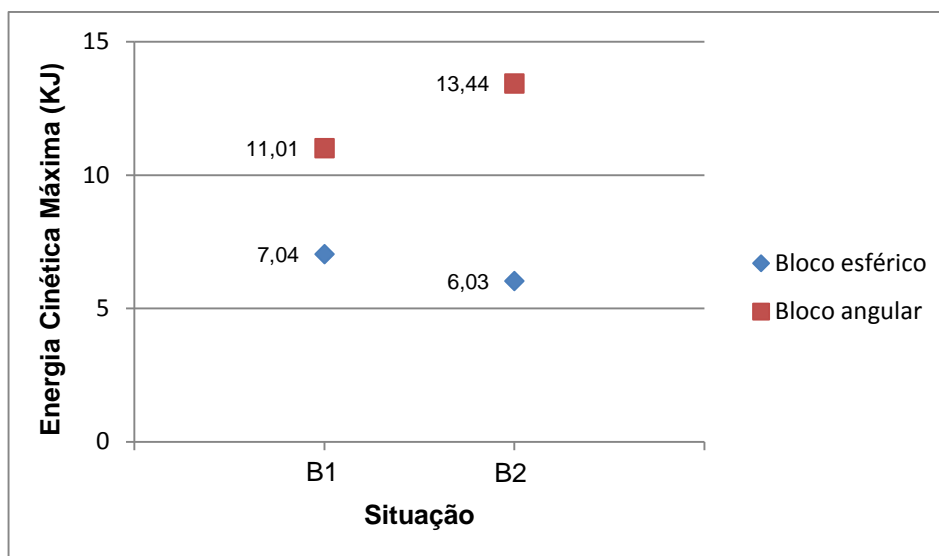


Fig 6.24 – Comparação do valor máximo da energia cinética para os diferentes blocos simulados (Perfil B – bloco 50kg)

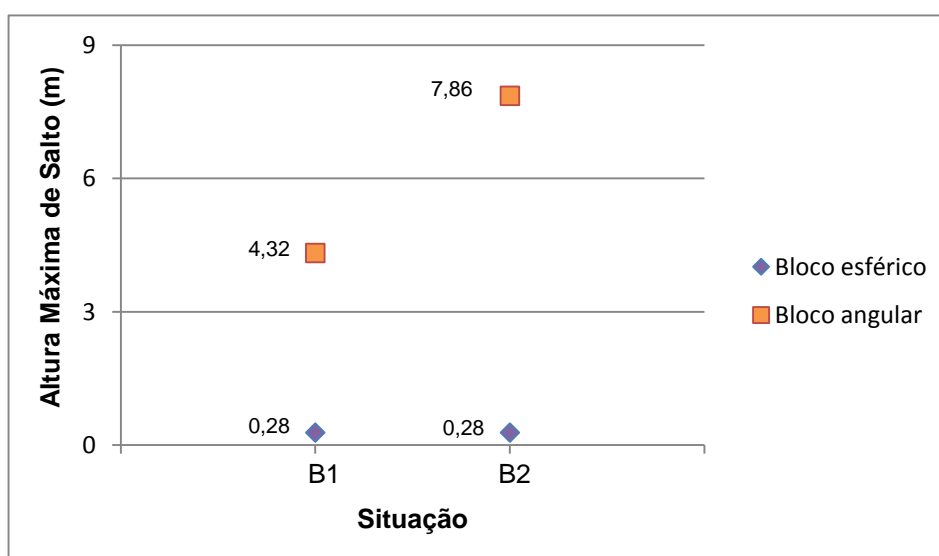


Fig 6.25 – Comparação do valor máximo da altura de salto para os diferentes blocos simulados (Perfil B – bloco 50kg)

Rapidamente se conclui que os resultados obtidos para este bloco são muito semelhantes aos da análise anterior, considerando obviamente que os valores em causa são superiores já que o bloco também apresenta uma massa dez vezes maior.

6.5.4. RESULTADOS – BLOCO DE 300KG

São apresentados novamente os resultados relativos aos valores da energia cinética máxima, altura máxima de salto e localização final dos blocos. O bloco simulado apresenta agora cerca de 300kg.

Quadro 6.15 – Resultados da análise para o bloco de 300kg – Energia cinética e altura de salto (Perfil B)

Situação	Resultados			
	Energia cinética máxima		Altura máxima de salto	
	$E_{c, \max}$ (KJ)	Distância (m)	Altura (m)	Distância (m)
B1, <i>esfera</i>	41.96	37.06	0.47	16.99
B2, <i>esfera</i>	35.99	37.06	0.47	16.99
B1, <i>angular</i>	68.94	50.96	4.95	54.82
B2, <i>angular</i>	82.85	54.82	8.28	54.82

Quadro 6.16 – Resultados da análise para o bloco de 300kg – Localização final dos blocos (Perfil B)

Situação	Resultados		
	Localização final		
	Zona da encosta	Zona da linha férrea	Zona posterior à linha
B1, <i>esfera</i>	-	-	100%
B2, <i>esfera</i>	-	-	100%
B1, <i>angular</i>	-	40%	60%
B2, <i>angular</i>	-	16%	84%

Comparando estes resultados com as análises dos blocos de 5 e 50kg conclui-se mais uma vez que estes são muito similares. É no entanto interessante observar, que independentemente da massa do bloco simulado, a distância na horizontal desde a zona de desprendimento é exatamente a mesma para as distintas situações B1 e B2 no que diz respeito ao bloco esférico.

Quanto ao quadro 6.16, os resultados apresentados também são semelhantes. Apenas para os blocos angulares é que a imobilização final de alguns deles se dá na zona da linha férrea. Para blocos esféricos todos acabam por ultrapassar esta zona.

À semelhança dos casos anteriores são apresentadas de seguida as figuras gráficas que comparam as duas formas geométricas dos blocos em relação à energia cinética máxima e altura máxima de salto.

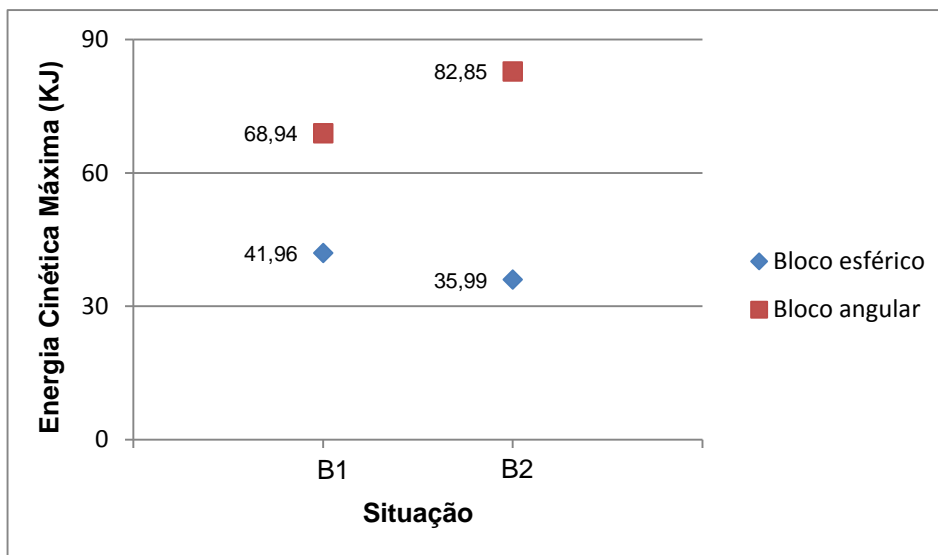


Fig 6.26 – Comparação do valor máximo da energia cinética para os diferentes blocos simulados (Perfil B – bloco 300kg)

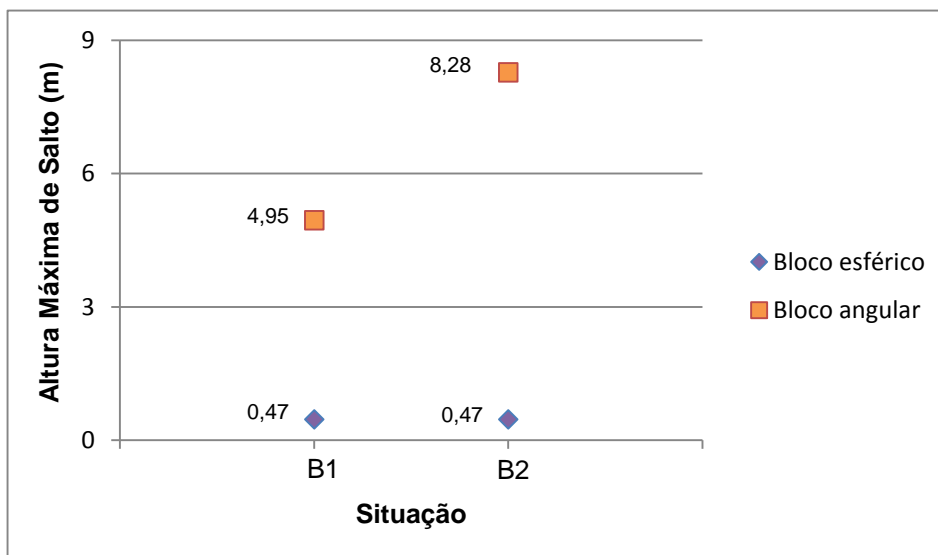


Fig 6.27 – Comparação do valor máximo da altura de salto para os diferentes blocos simulados (Perfil B – bloco 300kg)

6.5.5. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES FINAIS

Após o estudo concluído é possível afirmar que a existência de maiores ou menores coeficientes de atrito ao longo da encosta influencia de maneira diferente as trajetórias de queda dos blocos consoante a sua geometria.

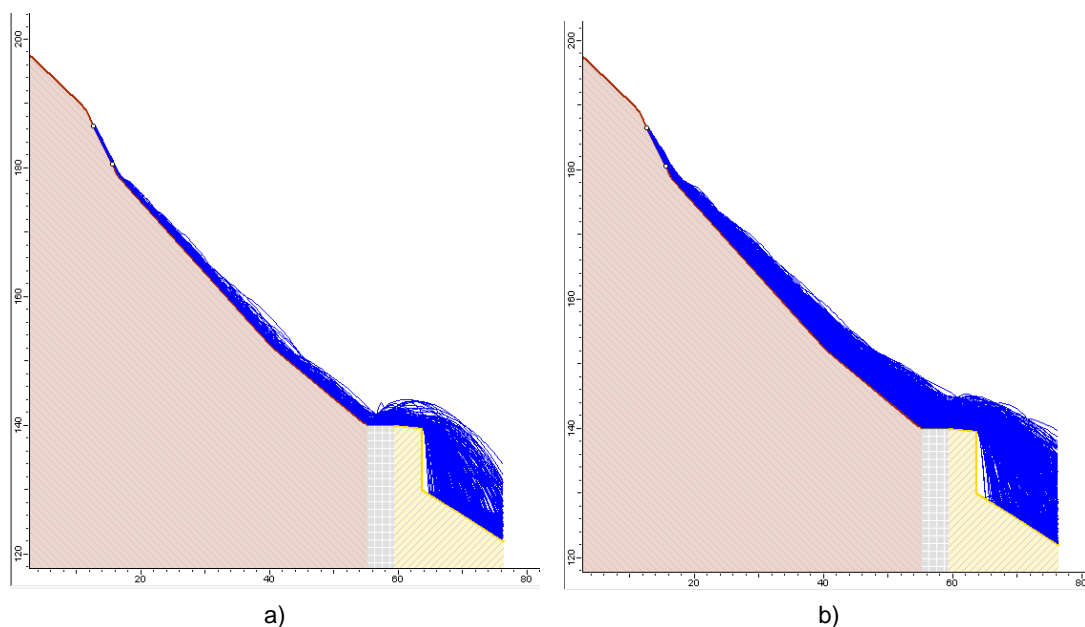


Fig 6.28 – Trajetória dos blocos angulares de 50kg: a) Situação B1 e b) Situação B2

Para a energia cinética máxima obtiveram-se dois tipos de resultados: enquanto que para blocos angulares, aumentando o coeficiente dinâmico de atrito e a resistência ao rolamento, o valor da energia máxima acompanha essa variação, para blocos esféricos, essa proporcionalidade é inversa. A valores superiores dos coeficientes de atrito correspondem menores valores da energia cinética máxima.

De facto, seria natural que isso acontecesse. Quanto maior é o atrito existente menor deveria ser a velocidade que os blocos ganham ao longo da sua trajetória de queda e consequentemente menores valores de energia cinética deveriam ser obtidos. A razão central nesta disparidade de resultados, no entanto, prende-se com a questão de como se caracteriza o movimento de rotação dos blocos.

Para blocos esféricos o seu movimento de rotação é pouco variável ao longo da encosta, ou seja, à medida que o bloco desce o talude não se verificam grandes ressaltos contra a superfície justificando também, por isso, as baixas alturas obtidas em qualquer uma das análises efetuadas. Como consequência, o atrito neste tipo de geometria de blocos tem muito mais influência já que estes estão muito mais tempo em contacto com o solo levando a que os valores de energia cinética máxima sejam maiores em B1 do que em B2.

Por outro lado, os movimentos de rotação para blocos mais angulares são caracterizados por serem muito mais variáveis ao longo da queda, já que a existência de faces bastante vincadas resulta em ressaltos muito mais pronunciados. É por isso também que este tipo de blocos atinge alturas muito mais elevadas do que os anteriores.

Os factos enunciados são ilustrados de forma bastante lúcida nas figuras 6.28 e 6.29. Para blocos angulares (figura 6.28), as trajetórias de queda dos blocos são bastante mais irregulares do que para blocos esféricos (figura 6.29), em que praticamente a superfície da encosta e as trajetórias de queda são representadas pela mesma linha antes de atingirem o troço horizontal do caminho-de-ferro.

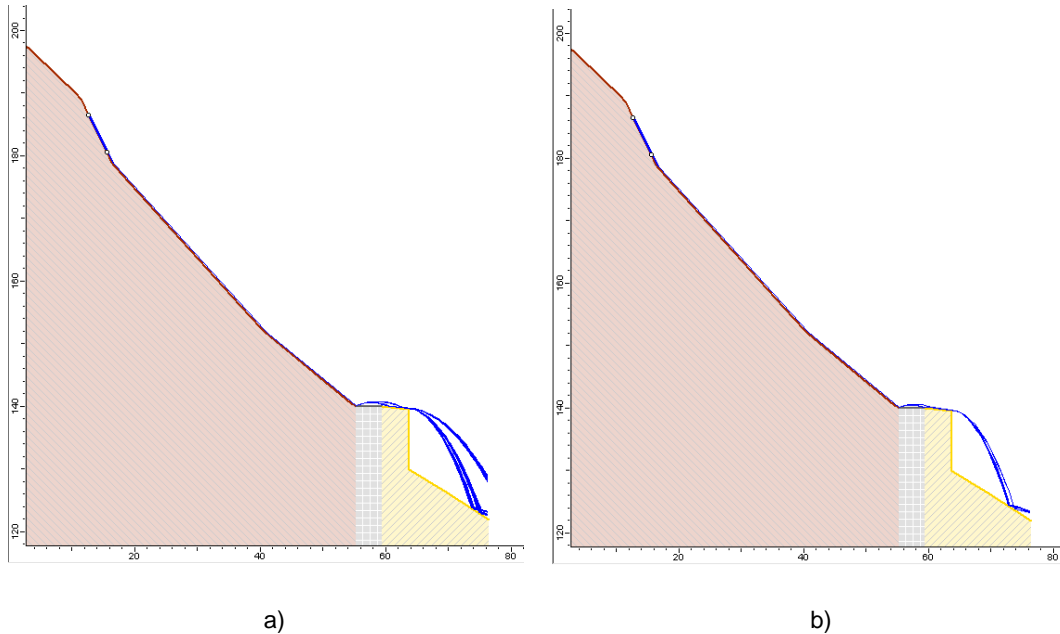


Fig 6.29 – Trajetória dos blocos esféricos de 50kg: a) Situação B1 e b) Situação B2

Outra questão que se coloca é o porquê de com o aumentar dos coeficientes de atrito para blocos angulares a energia cinética máxima também sofrer um aumento, levando conseqüentemente a maiores alturas de salto. A resposta está relacionada com a utilização do método de corpo rígido. Chai et al. (2013) afirma que quando um bloco rochoso que não possui velocidade angular inicial choca com uma superfície com atrito, o bloco perde parte da sua velocidade linear durante o instante de contacto com a encosta e ganha energia rotacional. Stronge (2004) descreve este comportamento como a transição *slip-stick* durante a compressão onde o bloco desliza (*slip*) durante a fase de compressão do impacto, provocando a sua rotação ao longo do talude.

Se a velocidade angular inicial for reduzida e o coeficiente de atrito suficientemente grande, o instante de deslize é interrompido durante a fase de compressão e os pontos de contacto penetram (*stick*) no solo durante o restante período de contacto, gerando movimentos de rotação nesse instante de impacto. Como os blocos do tipo angular apresentam arestas mais pronunciadas, ao contrário de blocos mais esféricos, o instante de *stick* é mais provável de ocorrer. Gera-se assim uma continuidade de efeitos: rotação dos blocos, aumento dos ressaltos no solo, aumento das alturas de salto, tempo de contacto com o solo reduzido e por isso menor influência de fatores de atrito em comparação com blocos esféricos.

Devido aos fatores enunciados as velocidades atingidas pelos blocos angulares também aumentam de B1 para B2, justificando uma menor percentagem de blocos retidos na zona da linha férrea.

6.6. ANÁLISE PARAMÉTRICA DOS VALORES DA RUGOSIDADE

6.6.1. ENQUADRAMENTO DE VALORES

Para o estudo final do parâmetro da rugosidade foi usado o perfil C. À semelhança dos pontos 6.4 e 6.5 definiram-se dois casos de estudo. O primeiro caso, C1, tanto os valores do espaçamento como da amplitude no que respeita a rugosidade são considerados zero. No caso C2, o espaçamento considerado é igual a um metro e a amplitude, apesar de continuar a ter valor nulo, apresenta um desvio padrão de 0.2. Relativamente ao coeficiente de atrito dinâmico e resistência ao rolamento optou-se por considerar novamente valores intermédios dos seus respetivos intervalos.

Os valores utilizados na simulação foram:

- Coeficiente de atrito dinâmico: $\mu = 0.55$ em toda a superfície da encosta;
- Resistência ao rolamento: $\mu_{rot} = 0.35$ em toda a superfície da encosta;
- Velocidade inicial: $v_{horizontal} = 0\text{m/s}$; $v_{vertical} = 0\text{m/s}$; $v_{angular} = 0^\circ/\text{s}$;
- Rotação inicial: 0° ;
- Massa volúmica do bloco: 2500kg/m^3 .

Quadro 6.17 – Valores dos coeficientes de restituição normal e tangencial (Perfil C)

Zona	Situação			
	A1		A2	
	R_n	R_t	R_n	R_t
Encosta	0.32	0.80	0.32	0.80
Linha Férrea	0.40	0.90	0.40	0.90
Posterior à linha	0.35	0.85	0.35	0.85

Quadro 6.18 – Valores do parâmetro da rugosidade

Parâmetro	Situação			
	C1		C2	
	Espaçamento (m)	Amplitude (m)	Espaçamento (m)	Amplitude (m)
Rugosidade	0	0	1	0 ($\sigma=\pm 0.2$)

6.6.2. RESULTADOS – BLOCO DE 5KG

De seguida são apresentados os resultados obtidos pela simulação do desprendimento de blocos de 5kg referentes à energia cinética máxima, altura máxima de salto dos blocos e também o local de imobilização dos mesmos conforme as três diferentes zonas consideradas.

Quadro 6.19 – Resultados da análise para o bloco de 5kg – Energia cinética e altura de salto (Perfil C)

Situação	Resultados			
	Energia cinética máxima		Altura máxima de salto	
	$E_{c, \max}$ (KJ)	Distância (m)	Altura (m)	Distância (m)
C1 _{,esfera}	0.62	39.05	0.17	12.74
C2 _{,esfera}	1.83	59.43	10.59	59.43
C1 _{,angular}	1.94	58.58	9.35	59.43
C2 _{,angular}	2.06	56.88	15.23	59.43

Quadro 6.20 – Resultados da análise para o bloco de 5kg – Localização final dos blocos (Perfil C)

Situação	Resultados		
	Localização final		
	Zona da encosta	Zona da linha férrea	Zona posterior à linha
C1 _{,esfera}	-	-	100%
C2 _{,esfera}	1%	6%	93%
C1 _{,angular}	-	36%	64%
C2 _{,angular}	11%	28%	61%

Pelo primeiro quadro percebe-se que o valor da energia cinética máxima ocorre na situação onde existe rugosidade com um valor de 2.06KJ. Tendo em consideração o local do desprendimento, é oportuno salientar que para os valores da energia apenas a análise C1_{,esfera} se desmarca do resto dos resultados, ocorrendo a uma distância deste por volta dos 40 metros. Nos restantes três o valor máximo da energia dá-se por volta dos 60 metros de distância.

O mesmo acontece para os valores da altura máxima de salto. As três últimas leituras apresentam valores relativamente próximos uns dos outros e ocorrem exatamente no mesmo local. Já para a análise C1_{,esfera} os valores obtidos são consideravelmente inferiores a estes.

Quanto ao quadro 6.20 de todas as análises feitas, mesmo tendo em conta o estudo dos outros parâmetros, é aquele que apresenta maior disparidade de valores. Apenas no caso C1_{esférico} é que os blocos percorrem o percurso todo e acabam só por se imobilizar já para além da linha férrea. Nota-se uma grande diferença na quantidade de blocos que ficam retidos tanto na zona da encosta como na zona da linha para a geometria angular em comparação com a geometria esférica. Para a primeira, em ambos os casos, mais de 60% chega à zona posterior do caminho-de-ferro. Em contraste, com os blocos esféricos esse valor é superior a 90%.

Os resultados gráficos relativos ao quadro 6.19 são os seguintes:

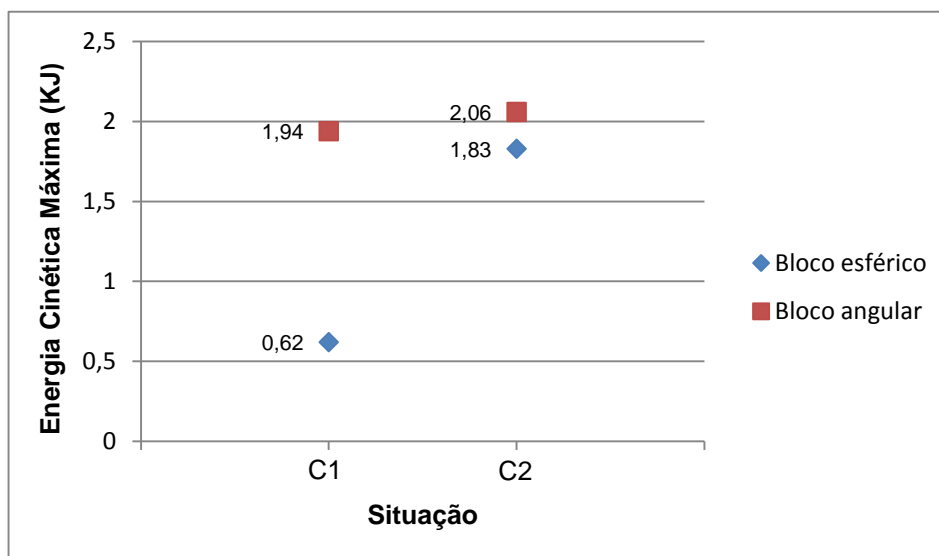


Fig 6.30 – Comparação do valor máximo da energia cinética para os diferentes blocos simulados (Perfil C – bloco 5kg)

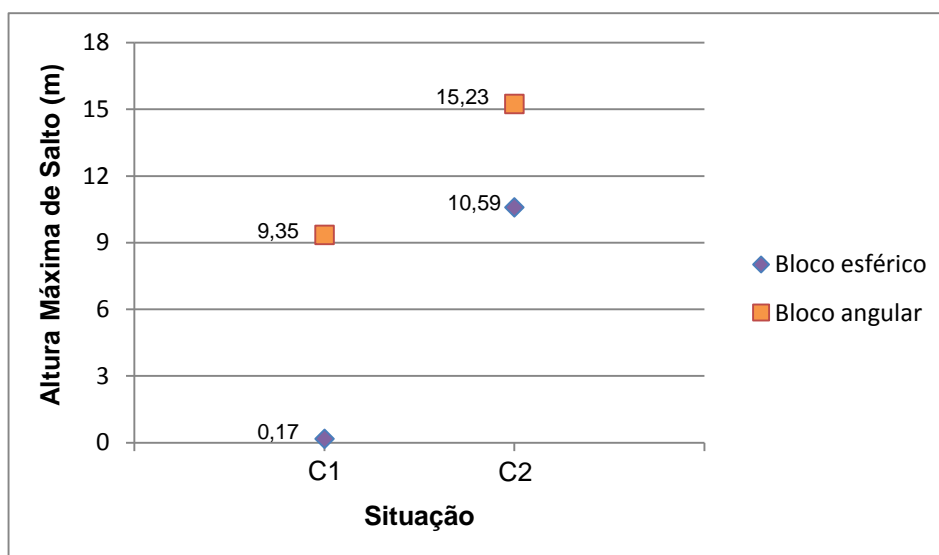


Fig 6.31 – Comparação do valor máximo da altura de salto para os diferentes blocos simulados (Perfil C – bloco 5kg)

6.6.3. RESULTADOS – BLOCO DE 50KG

Os resultados que se seguem são análogos aos anteriores mas agora relativos ao bloco de 50kg.

Quadro 6.21 – Resultados da análise para o bloco de 50kg – Energia cinética e altura de salto (Perfil C)

Situação	Resultados			
	Energia cinética máxima		Altura máxima de salto	
	$E_{c, \max}$ (KJ)	Distância (m)	Altura (m)	Distância (m)
C1, <i>esfera</i>	6.20	39.05	0.31	12.74
C2, <i>esfera</i>	17.80	57.73	10.62	53.49
C1, <i>angular</i>	19.69	56.89	9.50	59.43
C2, <i>angular</i>	19.29	56.43	16.40	52.64

Quadro 6.22 – Resultados da análise para o bloco de 50kg – Localização final dos blocos (Perfil C)

Situação	Resultados		
	Localização final		
	Zona da encosta	Zona da linha férrea	Zona posterior à linha
C1, <i>esfera</i>	-	-	100%
C2, <i>esfera</i>	1%	4%	95%
C1, <i>angular</i>	-	28%	72%
C2, <i>angular</i>	11%	25%	64%

Rapidamente se percebe que os resultados, tirando a óbvia grandeza dos mesmos, seguem as mesmas linhas dos enunciados no ponto 6.5.2.

Para o valor máximo da energia cinética e da altura de salto as análises C2,*esfera*, C1,*angular* e C2,*angular* apresentam valores muito semelhantes entre si, até mesmo na distância a que ocorrem.

Quanto à localização final mantem-se a mesma tendência. Novamente nas análises acabadas de referir é que existe alguma percentagem dos blocos que fica retida ao longo da encosta ou na linha, ao contrário da primeira, em que a totalidade dos blocos simulados ultrapassa este ponto.

As figuras seguintes ilustram os resultados obtidos quanto à energia cinética máxima e à altura máxima de salto.

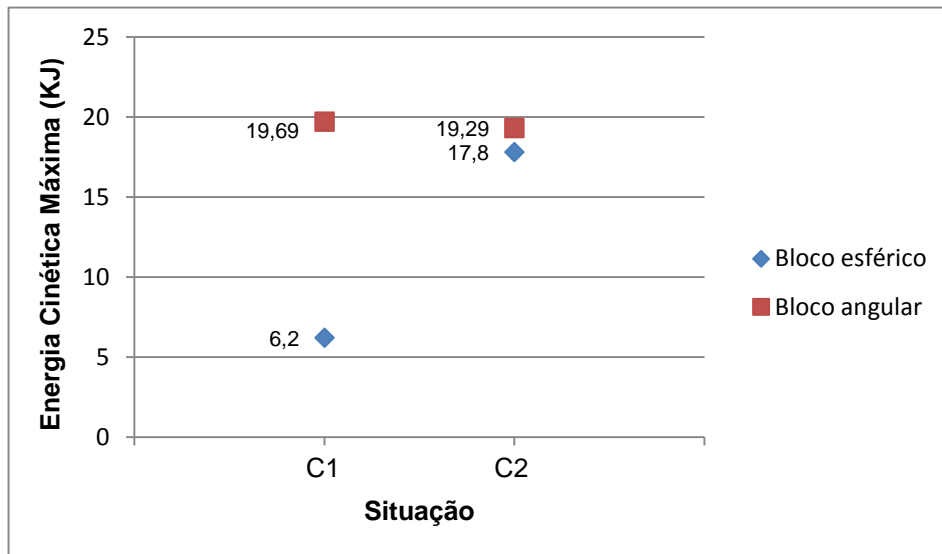


Fig 6.32 – Comparação do valor máximo da energia cinética para os diferentes blocos simulados (Perfil C – bloco 50kg)

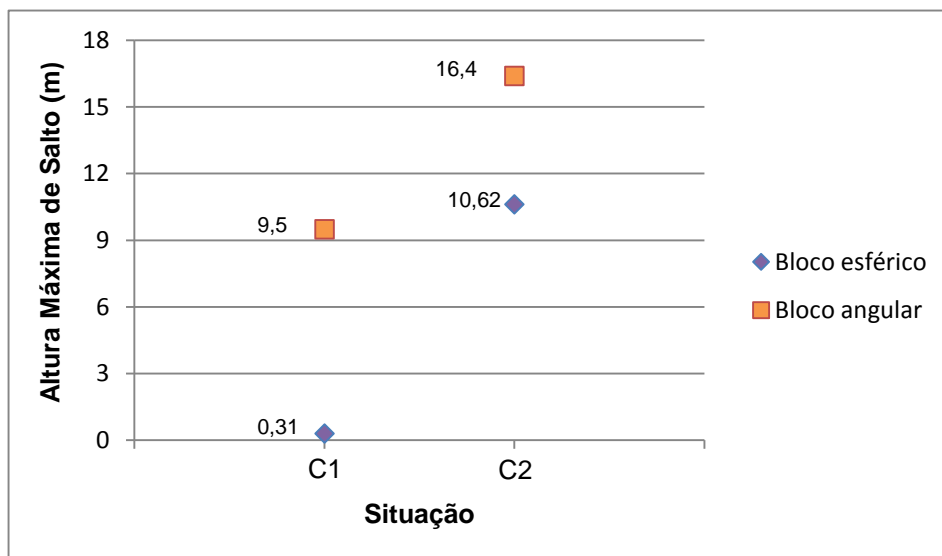


Fig 6.33 – Comparação do valor máximo da altura de salto para os diferentes blocos simulados (Perfil C – bloco 50kg)

6.6.4. RESULTADOS – BLOCO DE 300KG

Estes resultados apresentados têm agora em consideração os mesmos princípios enunciados inicialmente mas com a diferença da massa do bloco ser de 300kg.

Quadro 6.23 – Resultados da análise para o bloco de 300kg – Energia cinética e altura de salto (Perfil C)

Situação	Resultados			
	Energia cinética máxima		Altura máxima de salto	
	$E_{c, \max}$ (KJ)	Distância (m)	Altura (m)	Distância (m)
C1, <i>esfera</i>	36.90	39.05	0.52	12.74
C2, <i>esfera</i>	110.10	59.43	10.70	48.40
C1, <i>angular</i>	119.15	56.04	9.87	59.43
C2, <i>angular</i>	121.52	59.43	16.02	56.89

Quadro 6.24 – Resultados da análise para o bloco de 50kg – Localização final dos blocos (Perfil C)

Situação	Resultados		
	Localização final		
	Zona da encosta	Zona da linha férrea	Zona posterior à linha
C1, <i>esfera</i>	-	-	100%
C2, <i>esfera</i>	1%	5%	94%
C1, <i>angular</i>	-	25%	75%
C2, <i>angular</i>	8%	25%	67%

Os resultados gráficos do quadro 6.23 são os seguintes:

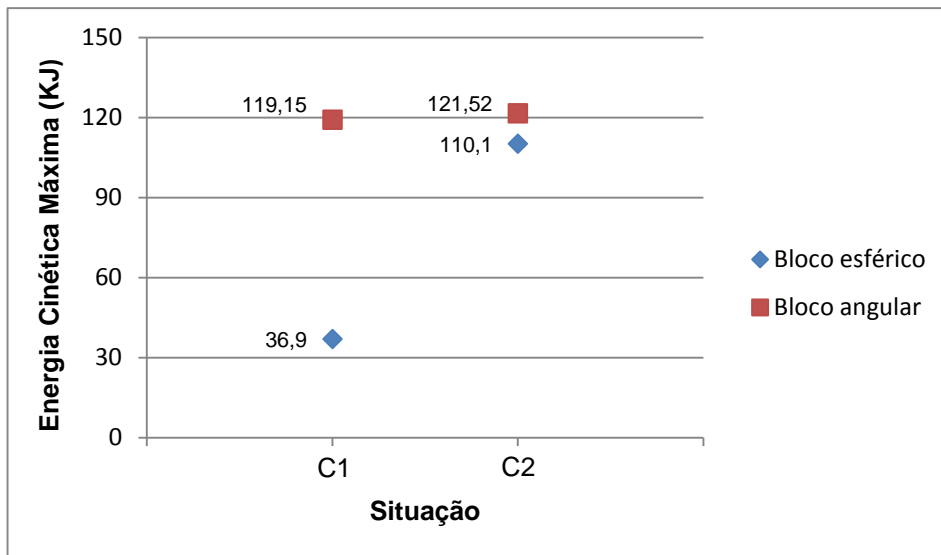


Fig 6.34 – Comparação do valor máximo da energia cinética para os diferentes blocos simulados (Perfil C – bloco 300kg)

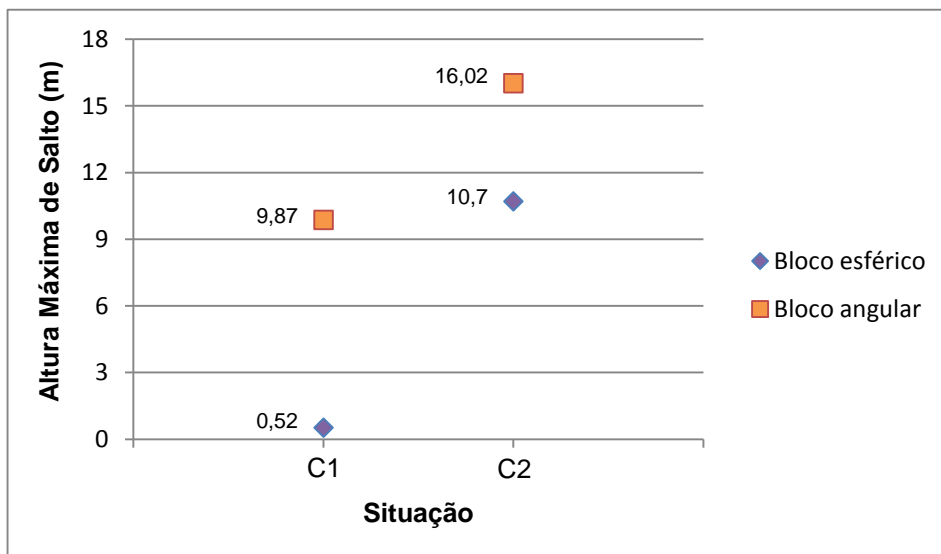


Fig 6.35 – Comparação do valor máximo da altura de salto para os diferentes blocos simulados (Perfil C – bloco 300kg)

6.6.5. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES FINAIS

Com a série de três análises concluída sobre a rugosidade pode-se afirmar que este é um parâmetro que influencia bastante as trajetórias dos blocos. A existência ou não da mesma ao longo da encosta proporciona resultados interessantes de serem apontados.

Abordando os valores obtidos quanto à energia cinética fica claro que a não consideração da rugosidade tem um efeito bastante fraco quando conjugado com os blocos esféricos. No entanto, o mesmo não é verdade para blocos angulares. Para a situação C1, o valor máximo da energia cinética para blocos esféricos aumenta mais de três vezes até atingir esse mesmo máximo para blocos angulares.

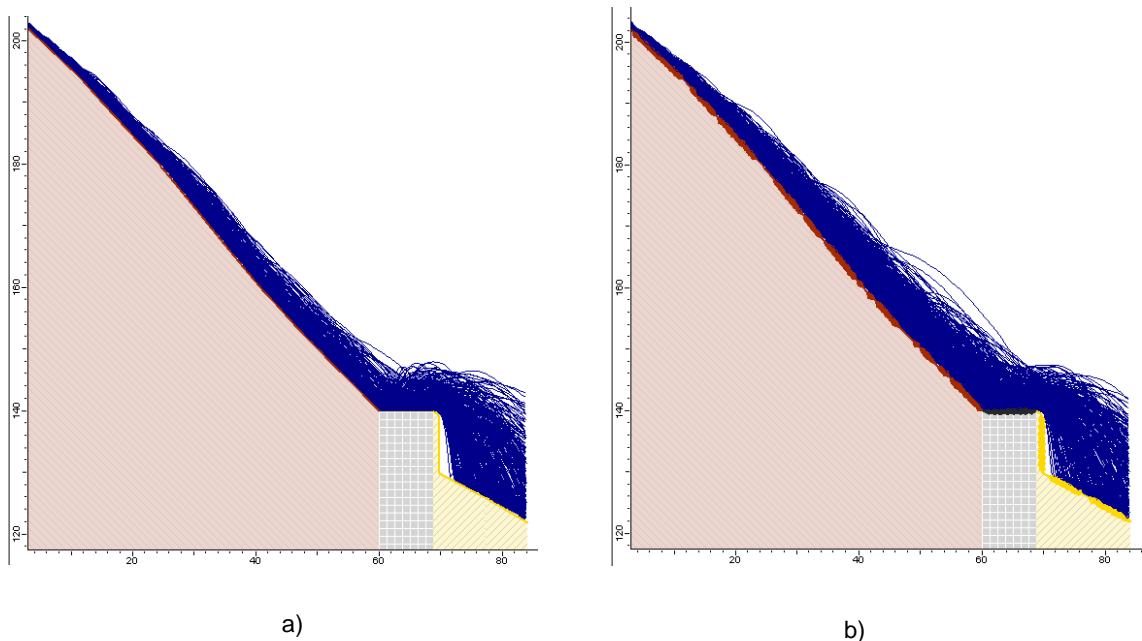


Fig 6.36 – Trajetória dos blocos angulares de 300kg: a) Situação C1 e b) Situação C2

Quando a rugosidade é considerada não se pode afirmar o mesmo. Na realidade, tanto para um bloco como para o outro, quando é tida em conta a rugosidade (caso C2), os valores máximos da energia cinética são relativamente semelhantes, sendo até o valor do bloco esférico quase comparável ao do bloco angular sem rugosidade. Pode-se concluir por isso que um bloco esférico numa situação em que a rugosidade seja considerada é equiparável a um bloco angular quando este parâmetro não é tido em conta.

A existência de rugosidade ao longo da encosta confere à superfície uma série de irregularidades no terreno que alteram significativamente a trajetória dos blocos esféricos. Neste meio, estes estão assim muito mais sujeitos a ressaltos equiparando-se a um bloco mais angular. Estes factos vêm justificar o porquê das análises $C_{2,esfera}$, $C_{1,angular}$ e $C_{2,angular}$ serem tão similares entre si.

Como consequência é agora também perceptível o porquê dos blocos esféricos apresentarem alturas de salto quase tão altas como um bloco angular. Repare-se que na figura 6.37, situação 2, os percursos apresentados pelos blocos são bastante parecidos aos da figura 6.36. Por outro lado, a figura 6.37, situação 1, equivale-se às figuras 6.19 e 6.29 em que os blocos também são esféricos e a rugosidade não foi inicialmente considerada.

Ao contrário da energia cinética a massa não tem grande influência nas alturas atingidas pelos blocos.

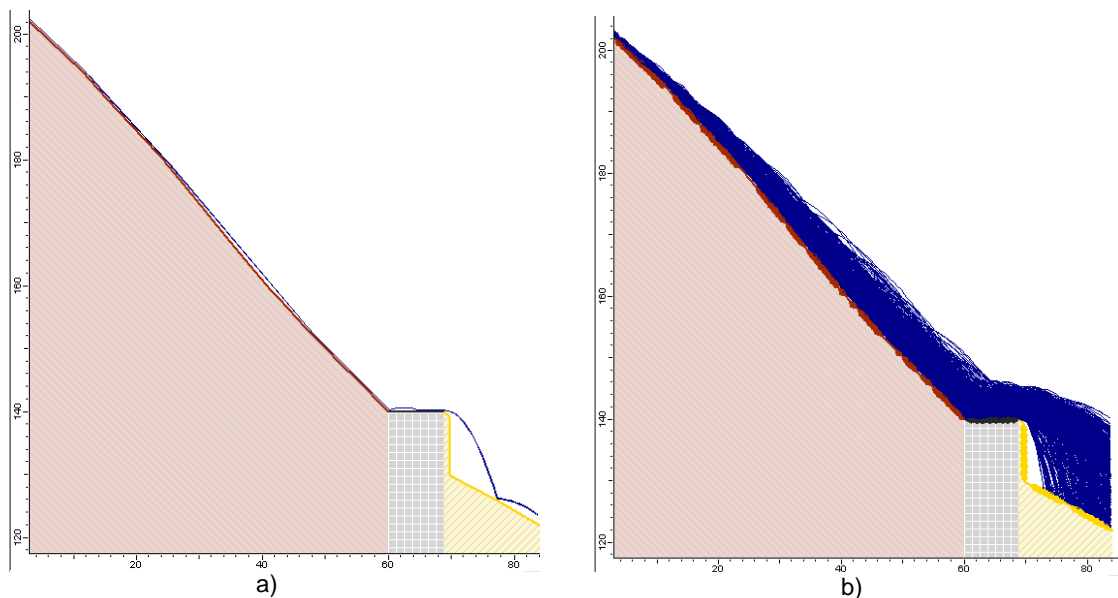


Fig 6.37 – Trajetória dos blocos esféricos de 300kg: a) Situação C1 e b) Situação C2

Finalmente, quanto ao local de imobilização dos blocos, há conclusões interessantes também a retirar. Como seria de esperar, em todos os casos $C_{1,esfera}$, em que não existe qualquer irregularidade no terreno (rugosidade nula), os blocos acabam todos por ultrapassar a linha férrea. Já no caso $C_{2,esfera}$, em que a rugosidade entra na simulação, alguns dos blocos ficam retidos pelo caminho.

Para a situação $C_{1,angular}$, quanto maior a massa do bloco e conseqüentemente maior energia cinética mobilizada (são diretamente proporcionais), maior é a percentagem de blocos que acaba por cessar o seu movimento na zona final da encosta. Alguns deles, no entanto, acabam por parar em cima da zona da linha férrea devido à sua geometria mais angular e mais sujeita, quando em contacto com superfícies planas, a não rolar tão facilmente.

A mesma lógica é aplicada ao caso $C_{2,angular}$. Maior massa dos blocos mobiliza uma maior energia cinética que por sua vez faz com que uma maior percentagem de blocos se imobilize na zona posterior à linha férrea. Como existe rugosidade, em relação a $C_{1,angular}$, são também mais os blocos a ficarem retidos ou na encosta ou na zona da linha.

7

**DIMENSIONAMENTO DE SOLUÇÃO
– BARREIRA FLEXÍVEL****7.1. INTRODUÇÃO**

No seguimento do capítulo anterior, e no âmbito da dissertação que tem por base, para além da compreensão dos fatores que influenciam a queda de blocos, o entendimento das soluções que podem ser aplicadas de forma isolada ou em conjugação com outras para a melhor escolha da estabilização do fenómeno referido, este capítulo tem como objetivo o dimensionamento de uma barreira flexível através das funcionalidades oferecidas pelo *Rocfall*.

Usando para esta simulação o perfil que não foi usado na análise paramétrica (perfil D), entendeu-se que este seria o mais apropriado a usar nesta fase já que é aquele que apresenta um declive mais acentuado e, por isso, mais propenso também à não acumulação de blocos.

Ao contrário do capítulo anterior em que o intuito passava só por perceber de que forma é que os parâmetros existentes num desprendimento de blocos usando o *Rocfall* afetavam as trajetórias dos mesmos, neste o objetivo passa por tentar modelar a encosta de forma o mais realista possível. Nesse sentido, todos os parâmetros utilizados para caracterizar as diferentes zonas da encosta apresentarão desvios padrão nos seus valores de modo a que a sua superfície não seja completamente uniforme, mas sim apresente algumas irregularidades e variações ao longo do seu perfil.

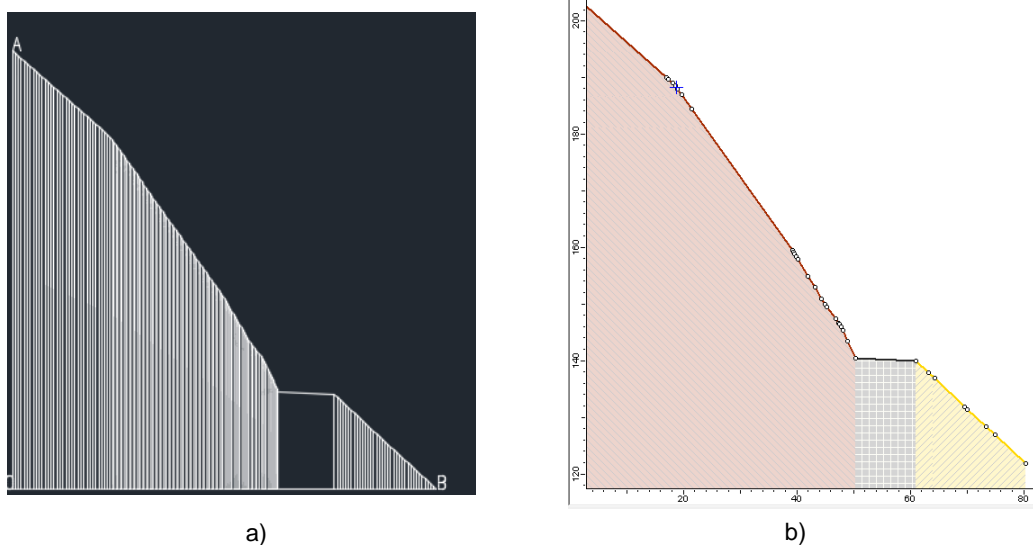


Fig 7.1 – Perfil D: a) AutoCAD e b) Rocfall

O dimensionamento de uma barreira no *Rocfall 5.0* pode ser executado para dois níveis de energia: nível de energia máximo (*Maximum Energy Level, MEL*) e nível de energia de serviço (*Service Energy Level, SEL*).

O primeiro corresponde ao estado limite último e equivale à energia cinética de um bloco rochoso que choca com a barreira a uma velocidade maior ou igual a 25m/s. A barreira tem de reter o bloco com o máximo nível de energia. O bloco retido não pode tocar no solo antes de a barreira atingir o seu máximo alongamento.

O *SEL* corresponde ao estado limite de utilização ou serviço e equivale à energia cinética de um bloco rochoso que choca com a barreira a uma velocidade maior ou igual a 25m/s, e igual a 1/3 do *MEL*. Consiste em dois consecutivos lançamentos de blocos. Após o primeiro, a altura residual tem de ser maior que 70% da altura nominal da barreira e terá de resistir ao choque sem romper. O segundo teste é executado sem se efetuar qualquer tipo de reparação na barreira sendo que esta apenas tem de aguentar o impacto.



Fig 7.2 – Rede perfurada por bloco
(*Design Guide for Rockfall Fences* - Maccaferri, 2015)

O programa oferece uma série de barreiras comerciais que podem ser escolhidas pelo utilizador. Caso nenhuma das barreiras seja entendida como a melhor solução também é possível criar barreiras customizadas com as características que se adequem à situação. As três principais características customizáveis são:

- Capacidade da barreira: corresponde à energia cinética do impacto que a barreira consegue absorver, enquanto satisfeitas as condições do alongamento e altura residual;
- Alongamento: deslocamento máximo da barreira, isto é, o comprimento máximo que a barreira consegue deformar quando sujeita ao impacto de blocos;
- Altura residual: distância mínima entre o cordão inferior e o superior medida ortogonalmente à superfície sem que seja removido o bloco impactado.

Depois de determinada o tipo de barreira a implementar qualquer um dos testes mencionados é possível de ser realizado. Como verificação aos impactos gera-se um relatório automático em que três parâmetros distintos são analisados que por sua vez têm de ser satisfeitos. Caso isso aconteça a barreira escolhida é aprovada e pode ser implementada no local inicialmente previsto. Caso não passe as verificações outras soluções têm de ser adotadas.

A geração do relatório de barreiras apenas está disponível para as barreiras comerciais existentes no programa. Para que este possa ser criado uma série de parâmetros pode ser inserido conforme se pretenda que a barreira responda e como é instalada. Na secção de blocos impactados pode ser definido o percentil de valores em que o dimensionamento se baseia, a massa dos blocos e sua massa volúmica. Na secção de instalação podem ser inseridos valores relativos à distância de separação (distância mínima entre a barreira e a infra-estrutura a proteger) e à altura livre (altura da barreira que não se pretenda que sofra impactos). Finalmente, uma série de coeficientes de segurança podem ser adotados conforme o teste de impacto que se deseja verificar (*MEL* ou *SEL*). Para isso o *Rocfall* oferece uma tabela de apoio que fornece informação relativa a esses mesmos coeficientes.



Fig 7.3 – Execução de teste de impacto numa barreira dinâmica
(*Design Guide for Rockfall Fences* - Maccaferri, 2015)

Concluída a definição dos parâmetros de dimensionamento o relatório é gerado. Neste, uma série de informação é disponibilizada como o nome comercial da barreira e seu fabricante, propriedades (capacidade, altura máxima, altura mínima), valores característicos dos testes *MEL* e *SEL*, entre outros. No final é apresentada a verificação da barreira. Para que esta possa ser instalada no local com todas as garantias asseguradas três condições têm de ser cumpridas: energia, altura e alongamento são comparados com os seus respectivos valores máximos. Caso nenhum desse máximo seja excedido, é indicado que o dimensionamento é válido; caso algum dos valores ultrapasse o seu máximo respetivo, o dimensionamento é inválido.

7.2. MODELAÇÃO DO PROBLEMA

7.2.1. VALORES UTILIZADOS

À semelhança do capítulo anterior o perfil em estudo vai ser dividido em três diferentes zonas: zona da encosta, zona da linha férrea e zona posterior à linha. Para cada uma das zonas valores dos coeficientes de restituição normal e tangencial, coeficiente dinâmico de atrito, resistência ao rolamento e rugosidade vão ser definidos, já que dessa forma a encosta apresentará características mais realistas.

Com o objetivo de correr uma simulação que poderá ocorrer de facto no local entrou-se mais uma vez com os dados recolhidos por (Domingues (2009)) aquando da sua visita ao troço em questão. Sendo que dos blocos de que foi recolhida informação estes apresentavam formas mais angulares e uma massa no máximo de cerca de 400kg, na modelação do problema optou-se por simular aproximadamente quinhentas trajetórias de blocos com uma massa um pouco superior (500kg). A forma do bloco corresponde novamente à da figura 6.10b no sentido em que as conclusões retiradas no capítulo 5 apontam para que no uso desta geometria os resultados sejam mais elevados. Optando assim por uma massa de um bloco superior à recolhida no local e também pela conjugação com a forma angular mais desfavorável, para além da definição de valores para todos os parâmetros *input* do programa, o dimensionamento encontrar-se-á do lado da segurança.

No quadro seguinte são apresentados os valores utilizados.

Quadro 7.1 – Valores dos parâmetros utilizados na simulação

Parâmetro	Zona da encosta		Zona da linha férrea		Zona posterior	
	Média	σ	Média	σ	Média	σ
Coef. Rest. Normal (R_n)	0.32	0.02	0.4	0.02	0.35	0.02
Coef. Rest. Tangencial (R_t)	0.80	0.02	0.9	0.02	0.85	0.02
Coef. Din. Atrito	0.55	0.04	0.55	0.04	0.55	0.04
Resist. Rolamento	0.3	0.04	0.35	0.04	0.3	0.04
Rugosidade	Espaçamento 1.5 m	0.2	Espaçamento 1.5 m	0.2	Espaçamento 1.5 m	0.2
	Amplitude 0 m	0.2	Amplitude 0 m	0.2	Amplitude 0 m	0.2

7.2.2. RESULTADOS

Num dimensionamento de uma barreira colocam-se duas principais questões: qual é o melhor posicionamento/localização da barreira? Qual é a distribuição da velocidade/energia cinética e altura de salto dos blocos para essa localização? Para atender a ambas as questões o *Rocfall* oferece gráficos de variação ao longo de toda a extensão da encosta que podem ser visualizados e consequentemente se possa decidir qual a melhor solução a implementar para responder a essas perguntas.

O primeiro passo, no entanto, é tentar perceber, a partir de uma simulação inicial do desprendimento, as trajetórias dos blocos e a sua localização final concluindo se na realidade são um risco real para a infra-estrutura a proteger (linha férrea).

Nesse sentido, um gráfico semelhante ao da análise paramétrica relativamente ao local de imobilização dos blocos é gerado. A figura seguinte é representativa do mesmo.

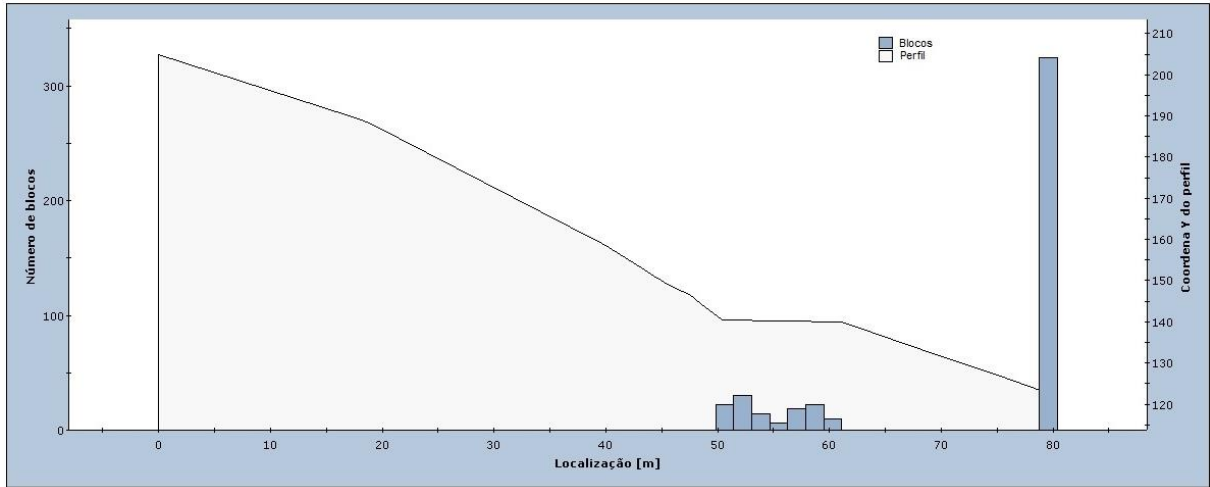


Fig 7.4 – Distribuição da localização final dos blocos ao longo do perfil

De facto, a partir da análise do gráfico pode-se concluir que o local final maioritário dos blocos acaba por ultrapassar a zona da linha férrea, mas alguns deles ficam retidos nesse lugar. Percebe-se contudo, pela figura 7.5a que grande parte deles, senão todos, atinge a zona em questão constituindo assim um risco elevado para a linha.

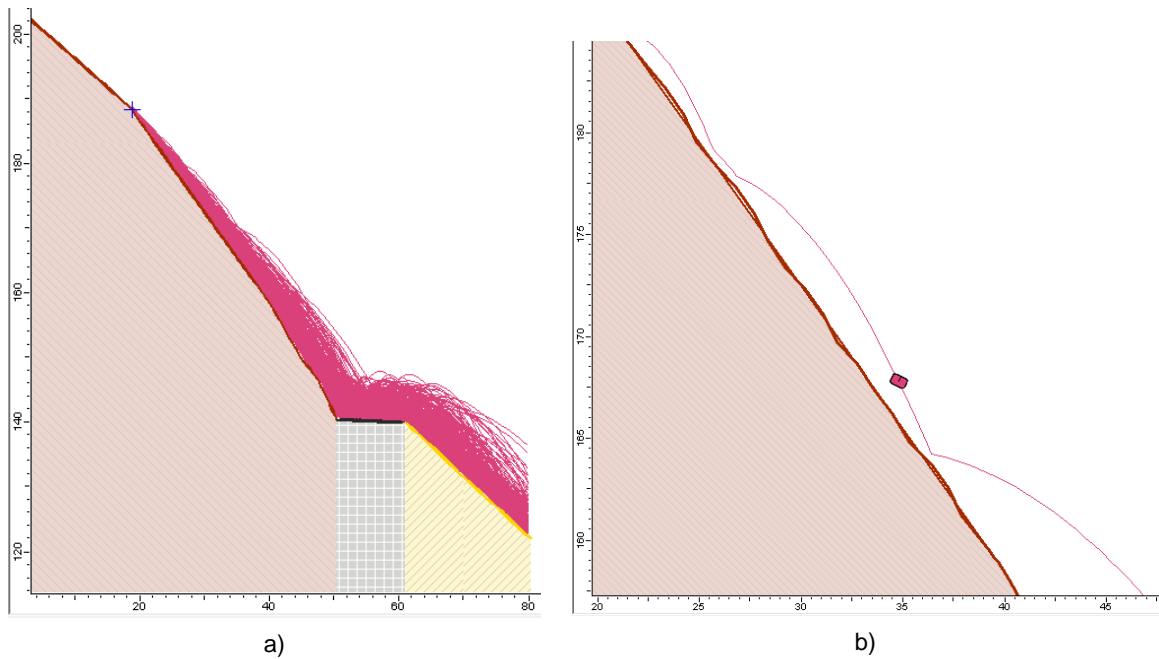


Fig 7.5 a) Trajetórias dos blocos e b) Pormenor de uma das trajetórias e superfície da encosta

Após compreendidas as trajetórias de queda dos blocos pode-se então dar seguimento às questões lançadas inicialmente. Para isso, gráficos de variação dos valores de energia cinética e altura de salto são analisados.

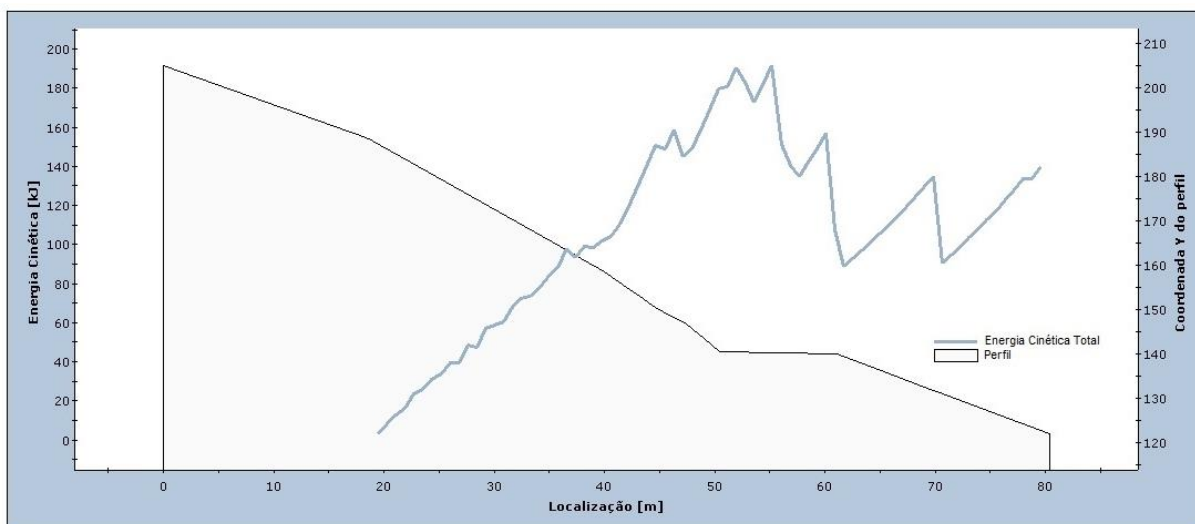


Fig 7.6 – Variação da energia cinética máxima ao longo do perfil

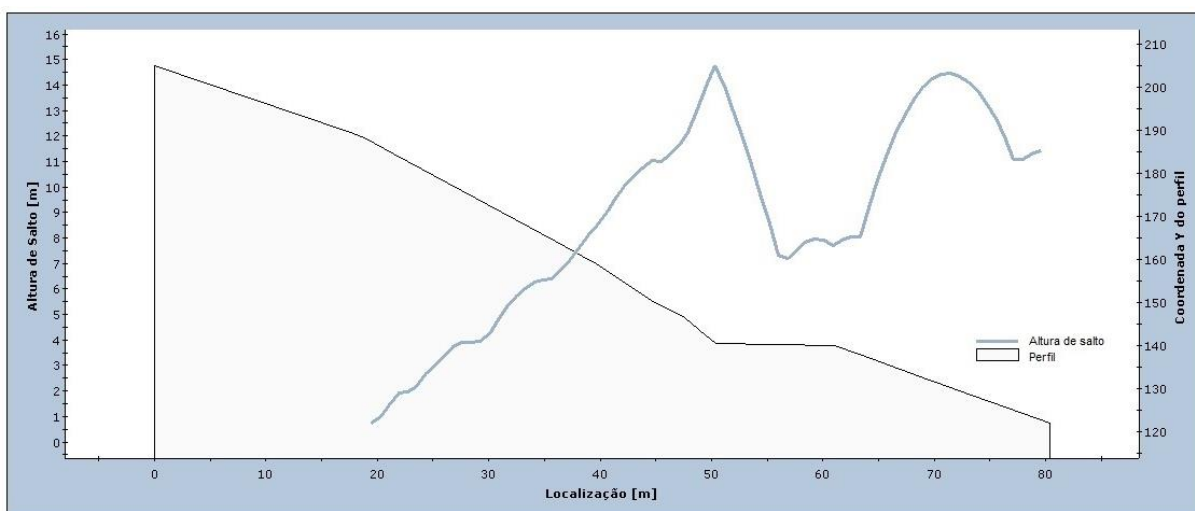


Fig 7.7 – Variação da altura máxima de salto ao longo do perfil

A figura 7.6 representativa da variação da energia cinética mostra que o valor máximo que esta atinge ronda os cerca de 200KJ, valor este bastante acessível para qualquer uma das barreiras existentes no programa em que a mais resistente é capaz de absorver cerca de 8500KJ. No entanto, o fator aqui mais condicionante prende-se com as alturas de salto. Como o perfil da encosta é bastante acentuado, poucos metros após os blocos se desprenderem, ganham uma grande altura em relação ao solo resultante dos ressaltos ocorridos. Note-se que a altura máxima relativa à barreira referida anteriormente, dos 8500KJ, chega aos 8 metros. Contudo, tendo-se em consideração também o enquadramento paisagístico não se pretende optar por uma altura de uma barreira tão elevada.

É necessário então encontrar um ponto em que permita que a implementação da barreira resulte numa altura não muito alta. Para além disso, quanto mais acima na encosta a barreira se encontrar mais acessível será também a sua instalação e manutenção devido à inclinação do perfil nessa zona não ser tão acentuada.

Na figura 7.7, por volta dos 30 metros na projeção horizontal do início do talude, existe um pequeno decréscimo da altura. Optou-se por isso mesmo por instalar a barreira nesse ponto tentando travar o maior número de blocos possíveis.

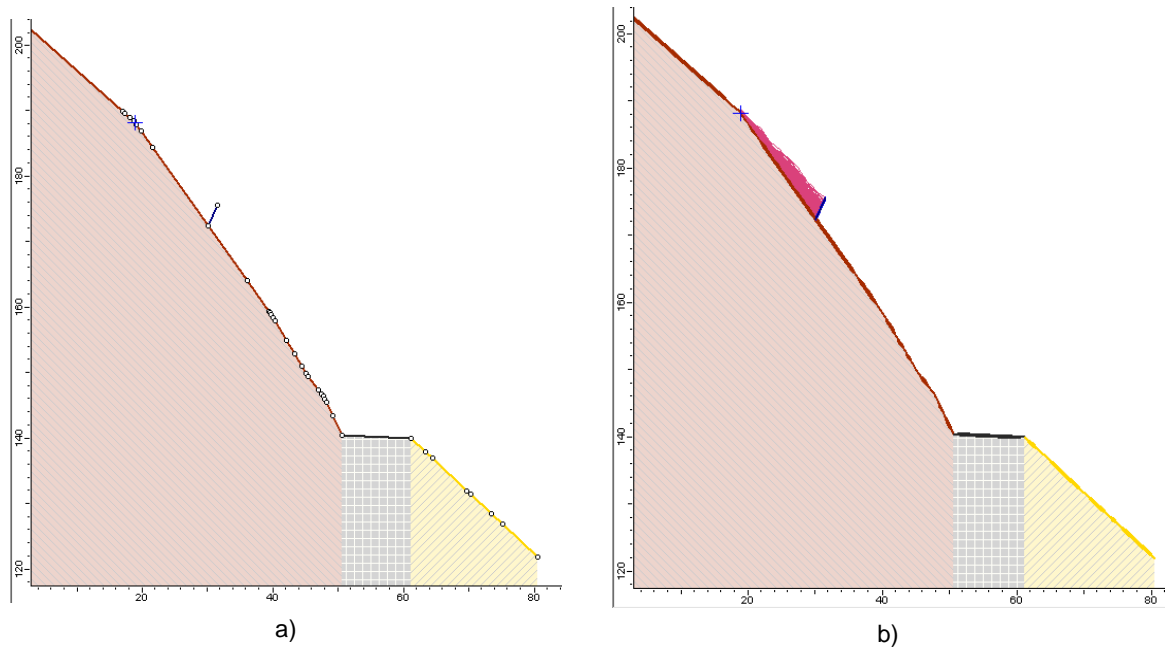
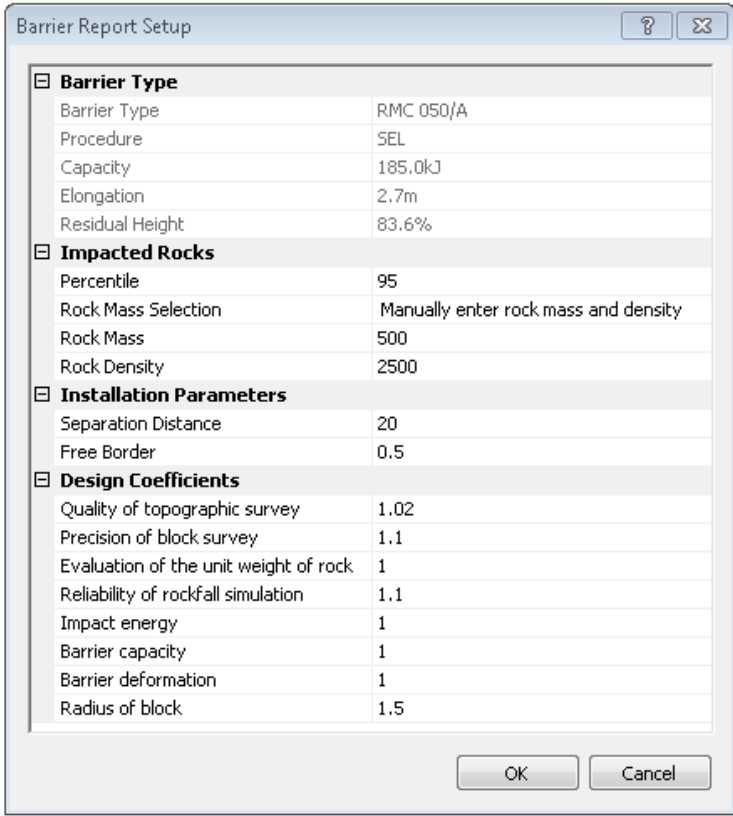


Fig 7.8 – a) Perfil com barreira instalada e b) Influência da barreira na trajetória dos blocos

Para esse mesmo ponto o valor da energia cinética ronda os 60KJ. Partindo desse valor optou-se por testar a barreira comercial com menos capacidade de absorção existente, rondando ainda assim os 500KJ. A altura mínima de construção é de 3.0m e máxima de 3.50m. A inclinação escolhida foi de 20° em relação à normal com o talude.

7.2.2.1. Teste *SEL*

Neste ponto será verificada a capacidade da barreira para o teste *SEL*. Utilizando os valores de parâmetros já enunciados no ponto 7.2.1 correu-se a simulação. Mais uma vez pelo lado da segurança optou-se por definir a altura máxima da barreira. Logo de seguida é gerado um relatório inicial em que é pedido que se introduza uma série de valores (figura 7.8).



Barrier Report Setup	
Barrier Type	
Barrier Type	RMC 050/A
Procedure	SEL
Capacity	185.0kJ
Elongation	2.7m
Residual Height	83.6%
Impacted Rocks	
Percentile	95
Rock Mass Selection	Manually enter rock mass and density
Rock Mass	500
Rock Density	2500
Installation Parameters	
Separation Distance	20
Free Border	0.5
Design Coefficients	
Quality of topographic survey	1.02
Precision of block survey	1.1
Evaluation of the unit weight of rock	1
Reliability of rockfall simulation	1.1
Impact energy	1
Barrier capacity	1
Barrier deformation	1
Radius of block	1.5

Fig 7.9 – Relatório de dimensionamento inicial

Como é hábito neste tipo de problemas foi decidido dimensionar a barreira tendo em conta 95% dos valores obtidos pelo *Rocfall*. Massa e massa volúmica foram introduzidas bem como a distância de separação e a altura livre da barreira. Tendo em conta que esta foi instalada inicialmente aos cerca de 30 metros do início do perfil e começando a zona da linha férrea aos aproximadamente 50, a distância que separa a barreira da infra-estrutura a proteger é de 20 metros. 50cm foi a altura optada que se pretende que não sofra impactos. Os coeficientes de segurança dos valores escolhidos correspondem aos valores característicos deste tipo de teste e foram retirados do material de apoio do programa.

Prosseguiu-se o dimensionamento e no final o relatório de verificação foi apresentado. As figuras seguintes representam os excertos com informação mais relevante do relatório.

	95% Percentile	Mean	Minimum	Maximum
Impact Height	1.92m	0.93m	0.30m	3.41m
Translational Velocity	13.82m/s	10.85m/s	7.01m/s	15.14m/s
Translation Energy	47.75kJ	30.05kJ	12.30kJ	57.27kJ

Fig 7.10 – Estatísticas de impacto

Name	RMC 050/A
Manufacturer	Maccaferri
Nominal Capacity	500.0kJ
Min Height	3.0m
Max Height	3.5m

Tested Values	Capacity	Elongation	Residual Height
MEL	536kJ	3.7m	75.4%
SEL	185kJ	2.7m	83.6%

Fig 7.11 – Características da barreira

Design Parameters				
Design Procedure		SEL		

Barrier Parameters				
Capacity	C	185.00	kJ	
Maximum Elongation		2.70	m	
Residual Height		84	%	

Input Parameters				
Rock Mass	M	500.00	kg	
Rock Density		2500.00	kg/m ³	
Rock Volume		0.675	m ³	
Rock Radius	R	0.544	m	
Separation Distance		20.00	m	
Free Border		0.50	m	

Model Output				
Impact Height	H _t	1.92	m	95 th percentile
Impact Velocity	V _t	13.82	m/s	95 th percentile

Fig 7.12 – Verificação SEL (parte 1)

Safety Coefficients				
Quality of topographic survey	Y_{dp}	1.02		
Precision of block survey	Y_{vol}	1.10		
Evaluation of the unit weight of rock	Y_{γ}	1.00		
Reliability of rockfall simulation	Y_{tr}	1.10		
Impact energy	Y_i	1.00		
Barrier capacity	Y_e	1.00		
Barrier deformation	Y_d	1.00		
Radius of block	Y_r	1.50		

Design Parameters				
Design Mass	M_d	550.00	kg	$M Y_{vol} Y_{\gamma}$
Design Velocity	V_d	15.51	m/s	$V_t Y_{tr} Y_{dp}$
Design Energy	E_d	66.13	kJ	$(0.5 M_d V_d^2) Y_i$
Design Impact Height	H_d	2.70	m	$H_t Y_{tr} Y_{dp} + R Y_r$
Design Barrier Deformation	D_d	2.70	m	$D Y_d$
Design Barrier Height		3.00	m	$H_{total} f_{min}$
Design Barrier Capacity		185.00	m	$E_{barrier} / Y_e$

Verification		
Energy	66.13 < 185.00	Valid
Height	2.70 < 3.00	Valid
Elongation	2.70 < 20.00	Valid

Residual Height				
Barrier Height		2.9	m	

Fig 7.13 – Verificação SEL (parte 2)

Todas as três condições são cumpridas, ou seja, é verificada a validade da barreira instalada. A energia cinética mobilizada na simulação é menor que a capacidade da barreira para o teste SEL, a altura de impacto prevista (2.70 metros) é menor que a altura dimensionada (3.50 metros de altura total menos 50cm de altura livre = 3.0 metros) e o alongamento é bastante inferior à distância que separa a barreira da linha.

7.2.2.2. Teste MEL

Para a realização deste teste todos os parâmetros foram mantidos à exceção dos coeficientes de segurança que inevitavelmente são diferentes. À semelhança do teste anterior de seguida são apresentadas as informações do relatório gerado tirando as estatísticas de impacto (figura 7.9) e as características da barreira (figura 7.10) que continuam as mesmas.

Design Parameters				
Design Procedure		MEL		

Barrier Parameters				
Capacity	C	536.00	kJ	
Maximum Elongation		3.70	m	
Residual Height		75	%	

Input Parameters				
Rock Mass	M	500.00	kg	
Rock Density		2500.00	kg/m ³	
Rock Volume		0.675	m ³	
Rock Radius	R	0.544	m	
Separation Distance		20.00	m	
Free Border		0.50	m	

Model Output				
Impact Height	H _t	1.92	m	95 th percentile
Impact Velocity	V _t	13.82	m/s	95 th percentile

Fig 7.14 – Verificação MEL (parte 1)

Safety Coefficients				
Quality of topographic survey	Y_{dp}	1.02		
Precision of block survey	Y_{vol}	1.10		
Evaluation of the unit weight of rock	Y_{γ}	1.00		
Reliability of rockfall simulation	Y_{tr}	1.10		
Impact energy	Y_i	1.00		
Barrier capacity	Y_e	1.20		
Barrier deformation	Y_d	1.30		
Radius of block	Y_r	1.50		

Design Parameters				
Design Mass	M_d	550.00	kg	$M Y_{vol} Y_{\gamma}$
Design Velocity	V_d	15.51	m/s	$V_t Y_{tr} Y_{dp}$
Design Energy	E_d	66.13	kJ	$(0.5 M_d V_d^2) Y_i$
Design Impact Height	H_d	2.70	m	$H_t Y_{tr} Y_{dp} + R Y_r$
Design Barrier Deformation	D_d	4.81	m	$D Y_d$
Design Barrier Height		3.00	m	$H_{total} f_{min}$
Design Barrier Capacity		446.67	m	$E_{barrier} / Y_e$

Verification		
Energy	66.13 < 446.67	Valid
Height	2.70 < 3.00	Valid
Elongation	4.81 < 20.00	Valid

Residual Height				
Barrier Height		2.6	m	

Fig 7.15 – Verificação MEL (parte 2)

A solução é novamente verificada.

7.2.3. SOLUÇÃO ALTERNATIVA

Partindo da informação recolhida nos dimensionamentos anteriores verifica-se que a solução pode ser ainda otimizada. Não havendo problemas em ambos os testes na altura dimensionada e no alongamento, a questão está relacionada mais com a capacidade de absorção da energia da barreira. Constata-se facilmente que a barreira selecionada apresenta uma capacidade de energia bastante superior ao que na realidade é necessário. Enquanto que a barreira no teste mais desfavorável apresenta uma capacidade energética de 185KJ (figura 7.12), a energia que de facto é prevista ser mobilizada em cerca de 95% dos casos é de apenas 66KJ. Como alternativa, pode-se optar por customizar uma barreira com as mesmas características da anterior mas que apresente uma capacidade de absorção energética menor, poupando no tipo e resistência do material utilizado e por isso mesmo, sendo uma opção mais viável economicamente.

8

CONCLUSÃO

Depois do trabalho desenvolvido importa referir e reforçar algumas das mais importantes conclusões retiradas, especialmente no que toca à análise paramétrica efetuada no capítulo 6.

Enquanto na versão anterior do programa *Rocfall* apenas era permitido simular um desprendimento de blocos tendo como base o modelo de massa concentrada e, conseqüentemente, a modelação dos blocos como pontos com uma certa massa mas sem qualquer tipo de forma associada, nesta nova versão diferentes geometrias podem ser consideradas. Tirando partido dessa nova funcionalidade, os parâmetros que fazem parte do modelo de corpo rígido foram estudados individualmente tanto para uma forma de um bloco mais esférica, e portanto mais regular no seu comportamento, e outra mais angular que apresenta mais irregularidades nos seus movimentos ao longo do seu trajeto de queda. Para além disso, três diferentes massas (5kg, 50kg e 300kg) associadas a cada bloco foram consideradas, tentando aproximar os seus valores aos encontrados no próprio local.

Na primeira análise efetuada, em que apenas se alteram os valores dos coeficientes de restituição enquanto todos os outros parâmetros se mantêm constantes, conclui-se que quanto maior forem os seus valores, a energia cinética mobilizada também o é. A mesma tendência mantém-se para a altura máxima de salto. Este facto é justificado pelos próprios valores dos coeficientes. Quanto maior o seu valor, mais o instante de impacto se assemelha a um choque elástico, havendo menor dissipação de energia. Se existe menor dissipação de energia, os valores da energia cinética são inevitavelmente superiores.

Quanto aos valores dos coeficientes de atrito, diferentes conclusões podem ser retiradas. Enquanto na análise anterior, tanto para blocos esféricos e angulares, a tendência é a dos valores aumentar conforme aumentam os coeficientes de restituição, aqui o mesmo não se verifica. Em blocos mais esféricos, com o aumento dos coeficientes de atrito, a energia e altura máxima de salto diminuem; para blocos angulares ocorre o contrário. Abordada de forma mais assertiva já no ponto 6.5.5, a justificação mais simplificada prende-se com o método de corpo rígido e os diferentes movimentos de rotação dos dois blocos. Os blocos esféricos encontram-se mais em contacto com o solo durante o período de queda e por isso são mais afetados por estes coeficientes.

Considerando a análise da rugosidade, a mesma tendência do aumento deste valor ter resultados também superiores tanto de energia como de altura volta-se a notar à semelhança da análise dos CR. No caso 2 desta análise, em que a rugosidade é tida em conta ao contrário do caso 1 em que é nula, os valores de energia cinética e altura máxima aumentam de um caso para o outro. Outra conclusão interessante a apontar é a de um bloco esférico numa superfície com rugosidade apresentar trajetórias de queda bastante similares a blocos angulares. Este facto deve-se às irregularidades que são modeladas no perfil quando a rugosidade é considerada e que fazem com que o bloco esférico ressalte muito mais na superfície.

Quanto à variação das massas de uma análise para outra nota-se sempre uma tendência. Em todas as três diferentes análises os valores de energia cinética aumentam proporcionalmente com a massa, indicando o facto de que ambas dependem uma da outra. Relativamente aos locais de imobilização dos blocos, conclui-se que as massas não têm grande influência nos seus resultados. No entanto, nota-se uma tendência para que os blocos mais esféricos atinjam a zona posterior à linha férrea em maior percentagem

Como nota final, é importante referir que todas as conclusões retiradas têm como base os valores dos parâmetros considerados, que foram obviamente aqueles que se supuseram ser os mais adequados para o problema, e os perfis utilizados. Isto não invalida, por exemplo, que executando uma análise semelhante à efetuada mas com outra geometria de perfis, alguns dos resultados e conclusões possam ser diferentes.

Com esse propósito, e como trabalho futuro, seria interessante desenvolver mais esta questão do desprendimento de blocos usando as novas funcionalidades do *Rocfall*, no sentido de se perceber se de facto estas conclusões se mantêm para outros locais e se consegue estabelecer algum padrão com a finalidade de se chegar a um melhor entendimento sobre esta instabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASHAYER, Parham (2007) - Application of rigid body impact mechanics and discrete element modeling to rockfall simulation. Ann Arbor: University of Toronto (Canada). 230 p. Ph.D.
- ASTERIOU, P. [et al.] (2012) - Geotechnical and kinematic parameters affecting the coefficients of restitution for rock fall analysis. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences [Em linha]. 54:0. 103-113. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1365160912001098>>. ISSN 1365-1609.
- AZZONI, A. [et al.] (1995) - Analysis and prediction of rockfalls using a mathematical model. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and [Em linha]. 32:7. 709-724. Disponível em WWW: <URL: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0029386287&partnerID=40&md5=6661be98a24c863dac364978abf1c781>>.
- BASSON, F. R. P. (2012) - Rigid body dynamics for rock fall trajectory simulation. 2012. Disponível em WWW: <URL: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84873110519&partnerID=40&md5=083700484fc3d1315f92bd107c92e4f5>>.
- BOZZOLO, D.; PAMINI, R. (1986) - SIMULATION OF ROCK FALLS DOWN A VALLEY SIDE. Acta Mechanica [Em linha]. 63:1-4. 113-130. Disponível em WWW: <URL: <Go to ISI>://WOS:A1986G088700008>. ISSN 0001-5970.
- BUZZI, Olivier [et al.] (2012) - Laboratory Investigation on High Values of Restitution Coefficients. Rock Mechanics and Rock Engineering [Em linha]. 45:1. 35-43. Disponível em WWW: <URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s00603-011-0183-0>>. ISSN 0723-2632.
- CAMPONUOVO, G (1977) - ISMES experience on the model of St. Martino. 1977.
- CHAI, S [et al.] (2013) - The Effect of Rigid Body Impact Mechanics on Tangential Coefficient of Restitution. [Em linha].
- CHAU, K. T. [et al.] (2002) - Coefficient of restitution and rotational motions of rockfall impacts. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences [Em linha]. 39:1. 69-77. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1365160902000163>>. ISSN 1365-1609.
- CHAU, KT [et al.] (1999) - Shape effects on the coefficient of restitution during rockfall impacts. 1999. International Society for Rock Mechanics.
- DOMINGUES, André Manuel da Silva (2009) - A caracterização do risco geotécnico em linhas férreas. Porto: [s. n.].
- FEUP (2015) - Apontamento de Geologia de Engenharia. [Em linha].
- FORNARO, M [et al.] (1990) - Block falls on rock slopes. Application of a numerical simulation program to some real cases. [Em linha].
- GIANI, G. P. [et al.] (2004) - Experimental and Theoretical Studies to Improve Rock Fall Analysis and Protection Work Design. Rock Mechanics and Rock Engineering [Em linha]. 37:5. 369-389. Disponível em WWW: <URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s00603-004-0027-2>>. ISSN 0723-2632.
- GIANI, Gian Paolo (1992) - Rock slope stability analysis. CRC Press. ISBN 9054101229.
- GONZÁLEZ DE VALLEJO, Luis I. (2002) - Ingeniería geológica. Madrid [etc.]: Prentice Hall. ISBN 84-205-3104-9.
- HEIDENREICH, Barbara (2004) - Small-and half-scale experimental studies of rockfall impacts on sandy slopes. Citeseer.
- HOEK, Evert (2007) - Practical Rock Engineering. [Em linha].
- HOEK, Evert; BRAY, John (1999) - Rock slope engineering. London New York: E & FN Spon. ISBN 0-419-16010-8.
- LABIOUSE, Vincent; DESCOEUDRES, François (1999) - Possibilities and difficulties in predicting rockfall trajectories. 1999.

- OLIVEIRA, Nicole Catherine Dias (2010) - Soluções para a estabilização de taludes em linhas férreas. Porto: [s. n.].
- PECKOVER, FL (1975) - Treatment of rock falls on railway lines. AREA BULLETIN [Em linha]. 76:76-653-2.
- PFEIFFER, Timothy J; BOWEN, Timothy D (1989) - Computer simulation of rockfalls. Bulletin of the Association of Engineering Geologists [Em linha]. 26:1. 135-146. ISSN 1078-7275.
- PITA, João [et al.] (2009) - Recursos Geológicos e Hidrogeológicos da Região Norte. [Em linha].
- RITCHIE, Arthur M (1963) - Evaluation of rockfall and its control. Highway research record [Em linha].17.
- STEVENS, Warren Douglas (1998) - RocFall: A tool for probabilistic analysis, design of remedial measures and prediction of rockfalls. Ann Arbor: University of Toronto (Canada). 104-104 p. p. M.A.Sc.
- STRONGE, William James (2004) - Impact mechanics. Cambridge university press. ISBN 0521602890.
- TEIXEIRA, Ivo José Ferreira (2009) - Influência da pluviometria em taludes de linhas férreas. Porto: [s. n.].
- VIJAYAKUMAR, S. [et al.] (2012) - Effect of rockfall shape on normal coefficient of restitution. 2012. Disponível em WWW: <URL: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84873138304&partnerID=40&md5=b165655ca224155400422d118622060e>>.
- VIJAYAKUMAR, Sinnathurai [et al.] (2011) - On the effect of rock size and shape in rockfall analyses. 2011.
- WONG, Robina Hoi-chu [et al.] (2000) - Shape and mechanical properties of slope material effects on the coefficient of restitution on rockfall study. 2000. American Rock Mechanics Association. ISBN 9058091554.
- WYLLIE, D.C.; MAH, C. (2004) - Rock Slope Engineering, Fourth Edition: Fourth edition. Taylor & Francis. ISBN 9780203499085.
- WYLLIE, Duncan C. (2013) - Calibration of rock fall modeling parameters. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences [Em linha]. 67:0. 170-180. Disponível em WWW: <URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1365160913001640>>. ISSN 1365-1609.

ANEXOS

A.1. TABELA DE COEFICIENTES DE RESTITUIÇÃO POR HEIDENREICH (2004)

Autor	Valor de R_n	Valor de R_t	Valor de R_E	Valor de $R_{E,tot}$	Valor de R_I	Observações
Habib (1977)	0.75-0.80	-	-	-	-	Baseado em experiência em Itália
	0.5-0.6	-	-	-	-	Baseado em experiência na Noruega
Piteau & Clayton (1977)	0.8-0.9	0.65-0.75	-	-	-	Rocha maciça
	0.5-0.8	0.45-0.65	-	-	-	Material detrítico misturado com grandes blocos rochosos
	0.4-0.5	0.35-0.45	-	-	-	Material detrítico compacto misturado com pequenos blocos rochosos
	0.2-0.4	0.2-0.3	-	-	-	Encosta coberta com relva
Wu (1985)	0.2-0.8	0.5-0.75	-	-	-	Rocha com rocha ou plataforma de madeira

Autor	Valor de R_n	Valor de R_t	Valor de R_E	Valor de $R_{E,tot}$	Valor de R_l	Observações
Heierli (1985)	0.95	-	0.9	-	-	Rocha
	0.55	-	0.3	-	-	Camada de cascalho (35 cm)
	0.45	-	0.2	-	-	Camada de cascalho (70 cm)
	0.45	-	0.2	-	-	Detritos
Bozzolo e Pamini (1986)	-	-	-	0.7	-	Rocha com encosta a 44° de inclinação
	-	-	-	0.55	-	Detritos com encosta a 57° de inclinação
Descoeudres e Zimmermann (1987)	-	-	-	-	0.4	Encosta com vinhas
Hoek (1987)	-	-	-	-	0.85	Encosta rochosa
	0.53	0.99	-	-	-	Leito rochoso puro
	0.4	0.9	-	-	-	Estrada de asfalto
	0.35	0.85	-	-	-	Afloramentos rochosos com superfície dura, grandes blocos
	0.32	0.82	-	-	-	Talude rochoso
	0.32	0.8	-	-	-	Talude rochoso com vegetação
Urciuoli (1988)	0.3	0.8	-	-	-	Solo brando, alguma vegetação
	0.05-0.35	0.5-1	0.02-1	-	-	Colisão de bloco rochoso com pedra calcária
	~0	0.24	-	-	-	Leque de detritos

Autor	Valor de R_n	Valor de R_t	Valor de R_E	Valor de $R_{E,tot}$	Valor de R_l	Observações
Giani (1992), Barbieri et al. (1988)	0.5	0.95	-	-	-	Leito rochoso
	0.35	0.85	-	-	-	Leito rochoso coberto com blocos rochosos
	0.3	0.7	-	-	-	Detritos formados por elementos distribuídos uniformemente
	0.25	0.55	-	-	-	Solo coberto por vegetação
Evans e Hungar (1993)	0.9	0.9	-	-	-	Pequenos blocos em rocha limpa
	0.7	20.8*	-	-	-	Grandes blocos em talude rochoso
Azzoni et al. (1995)	-	-	-	0.75-0.90	-	Rocha (pedra calcária)
	-	-	-	0.55-0.6	-	Detritos angulosos finos e terra (compacta)
	-	-	-	0.35-0.45	-	Detritos angulosos finos e terra (mole)
	-	-	-	0.45-0.50	-	Detritos médios angulosos com fragmentos rochosos angulares
	-	-	-	0.4-0.5	-	Detritos médios angulosos com árvores dispersas
	-	-	-	0.55-0.70	-	Detritos grossos angulosos com fragmentos rochosos angulares
	-	-	-	0.5-0.6	-	Terra com relva e alguma vegetação
	-	-	-	<0.20	-	Vala com lama
	-	-	-	0.5-0.65	-	Superfície plana de solo artificial compacto
-	-	-	0.75	-	Estrada	

Autor	Valor de R_n	Valor de R_t	Valor de R_E	Valor de $R_{E,tot}$	Valor de R_l	Observações
Gerber (1995)	0.17-0.43	0.45-0.88	-	-	-	Rocha (pedra calcária)
Kamijo (2000)	0.1-0.35	-	-	-	-	-
	0.1	-	-	-	-	-
Ushiro & al. (2000)	0.1-0.4	0.71	-	-	-	-
Jones et al. (2000)*** (valores recolhidos para calibração do programa CRSP 4.0)	0.6-1.0	0.9-1.0	-	-	-	Superfície dura lisa e pavimento
	0.15-0.30	0.75-0.95	-	-	-	Leito rochoso e pedreiras
	0.12-0.2	0.65-0.95	-	-	-	Talude rochoso e encostas de solo rijo
	0.1-0.2	0.5-0.8	-	-	-	Encosta de solo brando
Budetta e Santo (1994) avaliado por calibração de programa	0.2	0.53	-	-	-	Rocha

Notas:

* Valores superiores a 1 podem ser observados por retroanálise se a velocidade inicial for muito reduzida ou 0. O rácio que define R produz valores elevados que não expressam na realidade a restituição mas sim uma mudança abrupta de direção;

** Urciuoli (1988) afirma que R_n , R_t e R_E dependem da velocidade de impacto;

*** Pfeiffer & Bowen (1989) e Jones et al (2000) usam R_n e R_t como constantes do material mas têm em conta vários outros parâmetros usando fatores de escala.