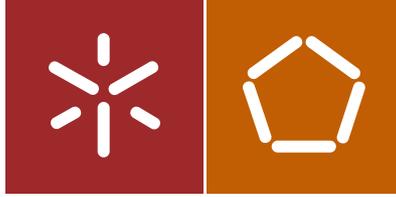




Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Siro André Esteves Soeiro da Silva

Programa com abordagem probabilística
do sistema de avaliação de qualidade de
taludes Slope Quality Index (SQI)



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Siro André Esteves Soeiro da Silva

Programa com abordagem probabilística
do sistema de avaliação de qualidade de
taludes Slope Quality Index (SQI)

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efectuado sob a orientação do
Professor Doutor Tiago Filipe da Silva Miranda

Agradecimentos

No decorrer do desenvolvimento desta dissertação foi essencial a contribuição e o apoio, tanto de forma direta como de forma indireta de inúmeras pessoas, para as quais dedico os meus mais sinceros agradecimentos.

Em primeiro lugar agradeço ao meu orientador Professor Tiago Filipe da Silva Miranda e à aluna de doutoramento Marisa Pinheiro, pelos seus ensinamentos, conselhos e disponibilidade que sempre demonstram ao longo da realização deste trabalho.

À minha família, pelo apoio que sempre mostraram ao longo de toda a minha vida e pelas oportunidades que me deram procurando sempre o melhor para mim.

Aos meus colegas e amigos que deram as suas ideias, sugestões e opiniões, a sua presença e constante apoio.

Muito obrigado a todos.

Resumo

Os principais problemas geotécnicos existentes nos taludes devem-se, principalmente, à instabilidade de massas, que desta forma resultam em escorregamentos, erosões e assentamento. Estes fenómenos poderão resultar em acidentes, tanto para o tráfego como para os utentes das infraestruturas rodoviárias. Desta forma, a estabilidade de taludes tem vindo a representar um assunto importante que requer uma análise cuidada.

Atualmente e por forma a prevenir danos não desejados, devem realizar-se processos de inspeção nas redes de taludes que resultam assim, em ações de conservação e manutenção, aumentando a segurança dos mesmos. No entanto, não existem muitas ferramentas facilmente acessíveis para uma avaliação geral do estado de redes extensas de taludes que possam ser aplicados de forma sistemática.

O sistema *Slope Quality Index (SQI)*, proposto por Pinheiro et al. (2015), vem representar uma ferramenta global de apoio à gestão de redes de taludes, pois permite avaliar a sua condição em fase de exploração considerando um conjunto muito alargado de informações sobre o mesmo.

De forma a melhorar e dinamizar a aplicação prática deste sistema desenvolvi um programa para aplicação automática no Matlab 2014b, que tem como principal objetivo considerar a incerteza na informação de entrada, pois o sistema original recorre a uma abordagem determinística considerando apenas um valor para cada parâmetro. Para além disso, foram realizados alguns ajustes adicionais que serão detalhadamente descritos ao longo desta dissertação.

Este novo modelo permite uma abordagem probabilística recorrendo à simulação do método de Monte Carlo, com uma maior versatilidade ao utilizador e com a possibilidade de armazenamento das avaliações realizadas. O programa desenvolvido foi ainda validado para um caso prático e demonstrada a aplicabilidade do mesmo para dois exemplos que consideram a incerteza.

Palavras-chave: Estabilidade de taludes, sistemas de classificação, *Slope Quality Index (SQI)*, Método de Monte Carlo, programa *SQI*.

Abstract

The main geotechnical issues existing in slopes are due, mainly, to the instability of the masses, which results in landslides, erosions and settlements. These phenomena may result in accidents, for traffic and for the users of road infrastructures. Thus, the slope stability has come to represent an important issue that requires a more careful analysis.

Currently, and in order to prevent an unwanted damage, inspections processes should be carried out in embankments networks. Therefore, these process results in conservation and maintenance actions in order to increase the slopes safety. However, the quantity of accessible tools for a general assessment of the slope state are very reduced and limited, also when applied systematically to an extensive slopes network.

The Slope Quality Index (*SQI*), proposed by Pinheiro et al. (2015), was developed as a global tool used to support and help the management of slopes networks, through the assessment of their condition in the exploration stage using a very wide range of information about the slope.

In order to improve and update the practical application of this system a program for automatic application in Matlab 2014b was developed. The main goal of this program is to reduce the uncertainty in the input information opposing the original system that uses a deterministic approach considering only one value for each parameter. In addition, all the performed changes and adjustments are described in detail throughout this dissertation.

Moreover, this new model provides a probabilistic approach using the Monte Carlo simulation method that provides a greater versatility to the user and allows the storage of the slope evaluation. The developed program has been tested and apply to a group of slopes in order to demonstrate the applicability of it.

Keywords: slope stability, classification systems, Slope Quality Index (*SQI*), Monte Carlo method, *SQI* program.

Índice

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Índice.....	ix
Índice de figuras	xi
1. Introdução, objectivos e Organização Do documento.....	1
1.1 Introdução.....	1
1.2 Objectivos	3
1.3 Organização do Documento	4
2. Revisão bibliográfica	5
2.1 Classificações Geomecânicas.....	5
2.2 Sistemas de classificação de estabilidade de taludes	8
2.2.1 <i>Rockfall Hazard Rating Systems (RHRS)</i>	9
2.2.2 <i>Rockfall Hazard Rating Ontario (RHROM)</i>	10
2.2.3 <i>Rock Risk Assessment for Quarries (ROFRAQ)</i>	11
2.2.4 <i>Missouri Rock Fall Hazard Rating System (MORFH RS)</i>	12
2.3 <i>Slope Quality Index (SQI)</i>	13
2.3.1 Definição dos Fatores e Parâmetros.....	15
2.3.2 Pesos dos fatores.....	16
2.3.3 Sistemas de classificação integrados no <i>SQI</i>	18
2.3.4 Aplicação e validação do <i>SQI</i>	22
2.4 Incerteza	24
2.4.1 Causas da incerteza.....	25
2.4.2 Reduzir a incerteza.....	26
2.5 Abordagem Probabilística.....	27
2.5.1 Simulação do método do Monte Carlo	30
3. Programa com melhorias ao <i>Slope Quality Index (SQI)</i>	33
3.1 Melhorias ao <i>Slope Quality Index (SQI)</i>	33
3.2 Funcionamento e arquitetura do programa	34
3.2.1 Interface.....	34
3.2.2 Menu principal	35

3.2.3 Armazenamento das avaliações	48
3.2.4 Ajudas do programa	52
4. Exemplos de aplicação e verificação dos resultados	55
4.1. Aplicação determinística e validação do programa	55
4.2. Exemplos de aplicação probabilísticos.....	60
5. Considerações finais e sugestões para trabalhos futuros	69
5.1 Considerações Finais.....	69
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	70
Bibliografia	71
Anexos.....	75

Índice de figuras

Figura 1 - Metodologia para obter o índice global do <i>SQI</i> .	14
Figura 2 - Distribuição dos pesos dos fatores de acordo com o grau de conhecimento dos inquiridos (Pinheiro et al., 2015).	17
Figura 3 - Análise comparativa entre os 3 cenários considerados: diferença de 20% e 30% nos pesos (Pinheiro et al., 2015).	17
Figura 4 – Diferenças absolutas entre a avaliação do <i>SQI</i> e do grupo de especialistas (Pinheiro et al., 2015).	23
Figura 5 – Resumo das causas da incerteza.	35
Figura 6 – Exemplo de uma distribuição probabilística.	28
Figura 7 – Exemplo de distribuições probabilísticas normais.	29
Figura 8 – Exemplo de uma distribuição probabilística triangular.	29
Figura 9 – Freqüências de 10 000 números gerados aleatoriamente de acordo com uma distribuição probabilística triangular.	31
Figura 10 – Possíveis elementos da <i>guide</i> do Matlab 2014b.	34
Figura 11 – Menu principal.	35
Figura 12 – Menu dos fatores.	36
Figura 13 – Selecionar os parâmetros conhecidos.	36
Figura 14 – Definir o peso dos parâmetros.	36
Figura 15 – Escolher os intervalos dos parâmetros.	39
Figura 16 – Definir o intervalo do parâmetro altura.	41
Figura 17 – Relação dos valores reais para cotações, do parâmetro altura.	43
Figura 18 – Valor único.	44
Figura 19 – Distribuição dos pesos dos fatores.	45
Figura 20 – Resultados finais.	47
Figura 21 – Histograma do resultado do índice geometria.	47
Figura 22 – Resultados do fator geometria.	48
Figura 23 – Opção para gravar a avaliação.	48
Figura 24 – Avaliações guardadas.	49
Figura 25 – Quadro resumo.	49
Figura 26 – Resumo do sistema de armazenamento das avaliações.	51
Figura 27 – Resumo do funcionamento do programa.	52

Figura 28 – Ajudas do programa.....	53
Figura 29 – Sequência para a aplicação determinística.....	59
Figura 30 – Resultados finais do talude em estudo.....	60
Figura 31 – Sequência para a aplicação do exemplo 1.....	62
Figura 32 – Resultados finais do exemplo de aplicação 1.....	64
Figura 33 – Histogramas dos resultados finais.....	65
Figura 34 – Histogramas finais dos fatores.....	65
Figura 35 – Resultados finais do exemplo de aplicação 2.....	66
Figura 36 – Histograma do índice final.....	67
Figura 37 – Histogramas finais dos fatores.....	67

Capítulo 1

INTRODUÇÃO, OBJECTIVOS E ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

1.1 Introdução

O crescimento contínuo da urbanização, o desflorestamento, a precipitação e as mudanças de clima, são alguns dos fatores que provocam o aumento das áreas sujeitas à instabilização de massas. Assim, este fenómeno tem vindo a requerer cada vez mais uma análise cuidada, para que sejam evitados deslizamentos, erosões e assentamentos não esperados.

Torna-se então essencial a análise de estabilidade de taludes, para que seja possível realizar projetos económicos e seguros. Os sistemas de avaliação de taludes são, atualmente, destinados a fases de projeto, no entanto quando pretendemos realizar essa avaliação em fase de exploração os sistemas e ferramentas existentes são bastante escassos. Assim, existe uma necessidade de análise com o objetivo de impedir possíveis danos, tanto para o tráfego, como para os utentes das infraestruturas rodoviárias, e também prever futuras intervenções.

Atualmente, por forma a prevenir acidentes e incidentes, são realizados processos de inspeção que resultam assim, em ações de conservação e manutenção a executar nos taludes e consequentemente aumentar a sua segurança. Desta forma, na realidade empresarial o objetivo não passa apenas pela gestão da qualidade e gestão do risco dos taludes, mas sim pela criação de sistemas de gestão destas operações de forma contínua.

O sistema de classificação *Slope Quality Index (SQI)*, proposto por (Pinheiro et al., 2015), surge como um sistema de avaliação de estabilidade de taludes em fase de exploração que pode ser integrada como uma ferramenta global de gestão sustentável de infraestruturas rodoviárias, pois a partir deste poderão ser gerados modelos de previsão de degradação do talude ao longo do tempo. Estes modelos de previsão

trarão inúmeros benéficos para gestão dos recursos e otimização dos custos durante a fase de exploração das infraestruturas.

Assim, o *SQI* resulta num índice global que varia numa escala de 1 (Muito bom) a 5 (Muito mau), permitindo desta forma entender qual o estado de condição do talude. Este índice é calculado tendo em conta a consideração de 9 fatores que afetam a estabilidade, cada um constituído por vários parâmetros.

Este sistema apesar de muito recente foi já aplicado a um conjunto restrito de taludes com considerável sucesso, no qual foi verificado que o mesmo traduz de forma realista o estado do talude. No entanto, se este sistema for executado com o recurso de um programa automático é possível otimizar a sua aplicação e ainda acrescentar algumas alterações e melhorias.

No que concerne ao *SQI*, este utiliza uma metodologia determinística, ou seja, para cada fator ou parâmetro avaliado é considerado um único valor. Contudo, às características geotécnicas dos taludes estão geralmente associadas incertezas causadas pela variabilidade espacial, heterogeneidade e ao conhecimento limitado do maciço rochoso, requerem uma abordagem probabilística. Esta abordagem permitirá minimizar o risco e auxiliar na tomada de decisão no contexto da incerteza.

O novo modelo do *SQI* aqui proposto será implementado digitalmente, através da criação de uma interface informática de registo automáticos de todos os parâmetros e fatores. Esta interface será criada com recurso ao Matlab 2014b.

Adicionalmente às melhorias a executar no modelo do *SQI* e ao desenvolvimento do programa automático, será ainda incluída uma base de dados com todas as avaliações efetuadas. Esta ação permitirá, futuramente, analisar o histórico das avaliações realizadas e determinar quais os taludes que se encontram em maior risco.

1.2 Objetivos

Esta dissertação tem por objetivo principal a criação de uma versão melhorada e atualizada do sistema de classificação *Slope Quality Index (SQI)*, proposto por Pinheiro et al. (2015). Assim, esta dissertação foi estruturada de acordo com os objetivos que se enumeram de seguida.

1. Inicialmente será realizada uma pesquisa bibliográfica sobre os sistemas de classificação de taludes já existentes e ainda um estudo aprofundado do desenvolvimento e conceção do sistema *SQI*. Esta pesquisa tem como objetivo a recolha e análise detalhada sobre o tema, de forma a aumentar o grau de conhecimento na área.
2. Posteriormente à fase inicial deve ser continuada a pesquisa, mas desta vez direcionada à abordagem probabilística, para que deste modo seja possível definir qual o melhor tipo de abordagem a aplicar para considerar as incertezas e assim melhorar o sistema *SQI*.
3. O programa em Matlab 2014b deverá ser desenvolvido inicialmente para o caso do sistema *SQI* já existente e em paralelo com as pesquisas mencionadas anteriormente e só depois deverão ser acrescentadas as melhorias ao longo do desenvolvimento do mesmo, para que após realizadas todas as melhorias seja possível utilizar o programa com o novo modelo do sistema *SQI*.

1.3 Organização do Documento

A presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos, onde serão abordadas todas etapas que constituem este trabalho de investigação.

Capítulo 1 – No primeiro capítulo é realizado um enquadramento ao tema da dissertação em questão, onde é referida a importância no estudo do tema, os objetivos e as metodologias que formaram a presente dissertação.

Capítulo 2 – Neste capítulo é apresentado o resultado da recolha bibliográfica, convenientemente analisada e selecionada. Este processo de recolha foi essencial para consolidar a informação presente nos restantes capítulos. Além da apresentação de sistemas de avaliação de taludes e do sistema *SQI*, são ainda apresentados conteúdos acerca da incerteza na geotecnia e abordagens probabilísticas.

Capítulo 3 – O terceiro capítulo aborda os aspetos relacionados com as modificações e melhorias realizadas ao sistema *SQI* original. Estas melhorias estão devidamente fundamentadas, assim como a alteração da abordagem do sistema *SQI*, de determinística para uma abordagem probabilística. Neste capítulo é apresentado também o programa automático desenvolvido, que inclui as melhorias incrementadas ao sistema *SQI* original, é explicado todo o seu funcionamento e arquitetura.

Capítulo 4 – No quarto apresenta-se a validação do programa automático, em comparação com um caso de um talude real, já analisado pelo sistema *SQI* original. A partir dos dados do talude real, é também utilizado o programa automático a dois exemplos, sendo que um deles considera uma incerteza maior dos dados, para assim obter algumas conclusões do novo sistema.

Capítulo 5 – No quinto capítulo é realizada uma conclusão final do estudo efetuado, sendo descritas quais as conclusões obtidas ao longo do desenvolvimento da dissertação, assim como as principais dificuldades e ainda apresentadas propostas para futuros trabalhos.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Classificações Geomecânicas

A definição das características dos maciços rochosos é realizada através da observação direta e da realização de ensaios *in-situ* e laboratoriais. Com base na informação recolhida e testada, são assim conhecidos os parâmetros geomecânicos dos maciços rochosos, para posteriormente ser possível avaliar o maciço rochoso através de um sistema de classificação geomecânica.

A conceção desses sistemas de classificação tem como base relatos e investigações geotécnicas realizadas ao longo do tempo. Assim, na utilização destes sistemas o maciço rochoso passa normalmente por uma divisão em classes de comportamento.

Um sistema de classificação bastante utilizado é o *Rock Mass Rating (RMR)*, que foi inicialmente concebido por Bieniawski (1974), com o propósito de determinar a relação entre o vão livre do túnel e o tempo de sustentação deste sem qualquer tipo de suporte. Todavia, posteriormente Bieniawski (1989) refinou o sistema, diminuindo os 8 parâmetros inicialmente previstos para apenas 6:

- Resistência à compressão uniaxial do material rochoso intacto;
- Grau de fracturação do maciço através do *Rock Quality Designation (RQD)*;
- Espaçamento das descontinuidades;
- Condições das descontinuidades;
- Condições hidrogeológicas (estimada nas piores condições possíveis);
- Orientação das descontinuidades em relação à orientação da escavação.

Cada um destes parâmetros é ponderado, ou seja, cada um recebe uma determinada cotação de acordo com as características do maciço rochoso (Anexo I.1), para que o somatório de todas as cotações resultem no índice designado por *RMR*. O seu resultado poderá variar numa escala de 0 a 100, que posteriormente é convertida numa divisão de cinco tipos de classes, para definir o maciço rochoso em estudo (Anexo I.1).

O *Slope Mass Rock (SMR)*, proposto por Romana (1985), é outro sistema de classificação geomecânica que permite avaliar empiricamente a estabilidade de um talude, durante a fase de escavação, e tem como base a classificação do sistema *RMR*. Ou seja, o *SMR* é obtido pela soma do índice *RMR* com alguns fatores de ajustes. Um desses fator resulta do produto de três subfactores relacionados com a orientação das descontinuidades (*F1*, *F2*, *F3*), enquanto o outro fator está relacionado com o tipo de escavação (*F4*). Assim a equação [1], proposta por Romana et. al (1985), permite o cálculo do índice *SMR*.

$$SMR = RMR + (F1 \times F2 \times F3) + F4 \quad [1]$$

Onde, *RMR* representa o valor do sistema *Rock Mass Rating*, *F1* representa o parâmetro que depende do ângulo relacionado com a direção do pendor das descontinuidades e do talude; *F2* representa o parâmetro que depende da inclinação das descontinuidades no plano de rotura; *F3* representa o parâmetro que reflete a relação entre os ângulos dos pendores das descontinuidades e do talude; *F4* representa um valor empiricamente estabelecido de acordo com o tipo de escavação.

Os fatores referidos anteriormente poderão ser definidos com auxílio de tabelas (Anexo I.2), para posteriormente, ser obtido o valor do índice *SMR* e, tal como o *RMR*, o seu resultado poderá variar entre 0 e 100. Da mesma forma, também poderá ser definida a classe do maciço, de acordo com a sua estabilidade, entre I e V (Anexo I.2) e ainda estimar as possíveis medidas de sustentação, que são agrupadas em 6 classes diferentes-

Outro sistema de classificação geomecânica para aplicar em escavações, é o designado sistema Q, proposto por Barton et al. (1974). A sua classificação assenta, essencialmente, na avaliação numérica da qualidade de maciços rochosos, utilizando os seguintes parâmetros:

- *Rock Quality Designation (RQD)*;
- J_n – valor relativo ao número de famílias de descontinuidades;
- J_r – valor relativo à rugosidade das descontinuidades;
- J_a – valor relativo ao grau de alteração das descontinuidades;
- J_w – valor redutivo relacionado com a água nas descontinuidades;
- *Stress Reduction Factor (SRF)*.

Os seis parâmetros anteriores poderão ser definidos de acordo com tabelas (Anexo I.3), e calculando o produto de três quocientes é obtido o resultado do índice Q , através da aplicação da equação [2]. O resultado final do índice Q poderá variar entre 10^{-3} e 10^3 , e de acordo com o resultado, o maciço rochoso poderá ser classificado qualitativamente através de 9 categorias (Anexo I.3).

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad [2]$$

Onde, $\frac{RQD}{J_n}$ representa a compartimentação do maciço rochoso, dando uma ideia genérica da dimensão dos blocos; $\frac{J_r}{J_a}$ representa características das descontinuidades como a rugosidade, atrito e resistência ao corte; $\frac{J_w}{SRF}$ representa o estado de tensão no maciço rochoso por um fator empírico denominado por “tensão ativa”.

Em suma, as classificações geomecânicas representam uma mais-valia para o mapeamento geotécnico, pois permitem obter uma caracterização do maciço rochoso de acordo com o seu nível de alteração, e entender quais são os elementos geotécnicos de maior interesse.

2.2 Sistemas de classificação de estabilidade de taludes

As melhorias das condições de mobilidade estão diretamente relacionadas com o crescimento da rede de infraestruturas rodoviárias. Estas são compostas por alguns componentes, tais como, estradas, obras de arte, equipamento eletrónicos, muros e taludes. De acordo com Maleku e Charlise (2003), a maior dificuldade da boa gestão das infraestruturas rodoviárias deve-se a um dos elementos, os taludes.

Devido ao grande número de acidentes ocorridos, a comunidade científica tem vindo a procurar novas metodologias, de forma a melhorar a previsão de risco associado aos taludes. O relatório de *Washington State Department of Transportation* (2010), relativo ao programa de gestão de taludes, descreve a instabilidade de taludes como um fenómeno considerado um perigo real, que ocorre devido à influencia humana e a fenómenos naturais.

No sentido de reduzir esta problemática, existem alguns sistemas de interesse que permitem avaliar a qualidade global e estabilidade dos taludes. Contudo, estes sistemas apenas avaliam a qualidade do talude em relação ao potencial de queda de blocos de rocha, e só contabilizam um reduzido número de fatores. Após uma pesquisa bibliográfica, destacam-se os seguintes sistemas de classificação, que serão posteriormente apresentados:

- *Rockfall Hazard Rating System (RHRS)*, proposto por Pierson et al. (1990);
- *Rockfall Hazard Ontario (RHOM)*, proposto por Franklin e Senior (1997);
- *Rockfall Risk Assessment for Quarries (ROFRAQ)*, proposto por Alejano et al. (2008);
- *Missouri Rockfall Hazard Rating System (MORFH RS)*, proposto por Youssef et al. (2003).

2.2.1 *Rockfall Hazard Rating Systems (RHRS)*

A função de uma concessionária de autoestradas passa não só por assegurar um sistema rodoviário seguro, mas também por garantir o total funcionamento do mesmo. Dessa forma, para melhorar o sistema rodoviário, o *Oregon Department of Transportation (ODOT)*, recorreu à aplicação do sistema *Rockfall Hazard Rating Systems (RHRS)*, proposto por Pierson et al. (1990). Este sistema permitiu que a concessionária assumisse uma posição mais pró-ativa na redução do risco de quedas de rochas, ao invés de se limitar a reagir após a ocorrência de acidentes.

Deste modo o *RHRS* não é apenas um sistema, mas sim um processo que permite às concessionárias gerir a sua rede de taludes, de uma forma racional, otimizada e informada. Nesse sentido, este sistema tem em conta uma avaliação preliminar com a finalidade de agrupar as secções de potencial e história de queda de rocha em três categorias (Anexo II.1). Esta avaliação faseada evita análises desnecessárias e prioriza as áreas mais críticas para uma avaliação mais detalhada.

Para a classificação detalhada do talude são envolvidos 12 parâmetros, que contribuem, significativamente, para a queda de blocos de rocha. Esta classificação é realizada de acordo com a Tabela do Anexo II.2, ou seja, cada categoria deverá ser classificada através das cotações de 3, 9, 27 ou 81 pontos, para que se identifique de forma mais rápida os taludes com maior risco, e assim evitar possíveis casos de risco de queda de rocha. A classificação do talude será, então, obtida através da soma de todas as cotações dos parâmetros.

2.2.2 *Rockfall Hazard Rating Ontario (RHROM)*

O *Ministry of Transportation of Ontario (OMP)* gere mais de 16 500 km de estradas. A construção massiva das mesmas resultou de algumas explosões que tornaram as rochas circundantes fraturadas e suscetíveis a acidentes. Como tal, a *OMP* recorreu ao sistema *Rockfall Hazard Rating Ontario (RHROM)*, proposto por Franklin e Senior (1997), para realizar uma avaliação preliminar e detalhada das encostas em toda a sua rede, e assim obter auxílio na atribuição de prioridades das intervenções.

Este sistema tem por base o sistema de classificação *RHRS*, referido anteriormente, com a adição de algumas melhorias que surgiram da necessidade de aperfeiçoar a sensibilidade do sistema *RHRS* original, aquando a avaliação de taludes de menor altura e com inclinações mais suaves.

Relativamente à aplicação do sistema, é efetuada primeiramente uma avaliação básica, calculando uma taxa de perigo e risco, através da equação [3]. Esta considera 4 fatores (*F1*, *F2*, *F3* e *F4*), que são calculados a partir de subfatores (Anexo II.3), e cotados numa escala de 0 a 9, onde 0 corresponde a um talude em bom estado e 9 a um talude em perigo eminente.

$$RHROM(\%) = \frac{F1 + F2 + F3 + F4}{4} \quad [3]$$

Onde, *F1* representa a magnitude (quantidade de material em risco de desprendimento); *F2* representa a instabilidade (probabilidade e frequência de ocorrência dos desprendimentos); *F3* representa o alcance (alcance do material desprendido e quais as hipóteses de o deslizamento atingir a autoestrada e provocar acidentes); *F4* representa a consequência (quais as possíveis consequências associadas ao desprendimento, quão grave será a consequência).

Com base neste cálculo inicial é possível identificar quais os locais de maior perigo de queda de rocha, e agrupá-los em classes, definidas por A, B e C (Anexo II.4), sendo que a classe A corresponde a um local de maior perigo, que requer uma avaliação mais detalhada, para uma maior compreensão dos fatores.

Na avaliação mais detalhada são incluídos os parâmetros de avaliação *F5*, *F6* e *F7*, relacionados, respetivamente, com possíveis intervenções, custos associados às intervenções e a eficácia da intervenção. Assim, é determinada a melhor intervenção, a fim de mitigar os riscos identificados, otimizar os custos e identificar os tratamentos com maior eficácia e durabilidade.

2.2.3 *Rock Risk Assessment for Quarries (ROFRAQ)*

A *Spanish Association of Aggregate Producers (ANEFA)* reportou que a maioria dos acidentes em pedreiras e minas a céu aberto resultaram de quedas de rocha. Nesse sentido, foi desenvolvido o sistema de classificação *Rock Risk Assessment for Quarries (ROFRAQ)*, proposto por Alejano et al (2008), para reduzir este tipo de acidentes.

O *ROFRAQ* é então um método empírico destinado a regiões de clima temperado, que permite a avaliação de queda de rocha em minas a céu aberto e pedreiras. Este é baseado numa abordagem probabilística, onde assume uma sequência de eventos para que ocorra um acidente.

Assim, a probabilidade da ocorrência de acidentes é a probabilidade de cinco eventos acontecerem sequencialmente, sendo que cada um dos seguintes eventos irá representar um fator probabilístico (Anexo II.5).

- A) Existir um bloco solto independente;
- B) O bloco estar sob um mecanismo de instabilidade;
- C) Um fenómeno provocar um bloco instável;
- D) Os blocos chegarem ao fundo da pedreira;
- E) Pelo menos 1 bloco atingir um trabalhador ou máquina.

O produto de todos estes fatores, juntamente com uma correção, originam o índice *ROFRAQ*, que pretende representar uma estimativa anual da probabilidade de queda de rocha em minas e pedreiras.

2.2.4 *Missouri Rock Fall Hazard Rating System (MORFH RS)*

O sistema de classificação *Missouri Rockfall Hazard Rating System (MORFH RS)* foi desenvolvido, principalmente, para a avaliação das infraestruturas rodoviárias no estado de Missouri, as quais são constituídas por inúmeros taludes com problemas de estabilidade.

Como tal, o *Highway Departments of Transportation (DOTs)* recorreu ao *MORFH RS*, inicialmente proposto por Youssef et al. (2003) e posteriormente adaptado por Maerz et al. (2005), e aplicou o sistema à sua extensa rede, com o objetivo de otimizar o processo de manutenção das infraestruturas rodoviárias.

Inicialmente este sistema realiza um rastreio aos taludes, através utilização de imagens de vídeo, gravadas ao longo da infraestrutura rodoviária, que são posteriormente analisadas por técnicos com o auxílio do programa *RockSee*. Deste modo, é possível efetuar algumas medições dos parâmetros, tal como a altura e a inclinação dos taludes, largura e profundidade das valetas, potencialidade de quedas de rocha e outros parâmetros.

Posteriormente, esses parâmetros poderão ser cotados de acordo com o seu risco e consequência recorrendo a tabelas (Anexo II.6), e assim identificar quais as áreas que apresentam maior potencial de acidentes, para que seja possível definir prioridades de intervenções e, se necessário, realizar uma avaliação mais detalhada *in-situ*.

2.3 *Slope Quality Index (SQI)*

O sistema de classificação *Slope Quality Index (SQI)*, proposto por Pinheiro et al. (2015), no âmbito de um projeto europeu financiado pelo *QREN*, designado por *Sustainable Infrastructure Management System (SustIMS)* e promovido, em parceria, pela Universidade do Minho, Universidade Nova de Lisboa e a concessionária de autoestradas, Ascendi. Este sistema tem como objetivo otimizar o ciclo de vida das infraestruturas rodoviárias, para que deste modo se evitem incidentes e acidentes que possam provocar perdas financeiras e humanas.

Assim, este sistema veio responder às necessidades e opções estratégicas das empresas concessionárias de infraestruturas rodoviárias, permitindo não apenas avaliar a qualidade do talude, mas também prever modelos de degradação do talude ao longo do tempo, aumentando a segurança para os utilizadores da via e possibilitar políticas sustentáveis, melhorando assim as decisões no planeamento de intervenções.

A metodologia deste sistema empírico recorre ao sistema proposto por Liu e Chen (2007), passando o seu objetivo por integrar fatores, que interna ou externamente estão relacionados com a estabilidade dos taludes, ou seja, que influenciam direta ou indiretamente o seu comportamento, pelo risco de existência de dano ou mesmo colapso.

O *Slope Quality Index (SQI)* passa então por determinar um índice de qualidade final que terá uma cotação entre 1 e 5, ou seja, muito boa condição a muito má condição, respetivamente (Tabela 1). Para esse cálculo serão avaliados vários parâmetros com uma cotação também entre 1 e 5, para que se mantenha a consistência no valor final do índice, e cada um ponderado com um peso que poderá variar de 0 a 1. Deste modo, agrupados 9 fatores com os seus pesos ponderados por grau de importância, e cada um deles com os respetivos parâmetros também afetados, é possível obter um índice final (Figura 1).

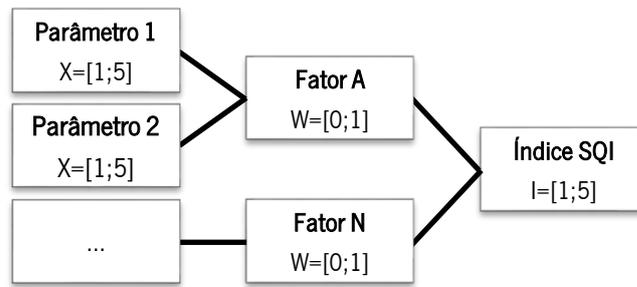


Figura 1 - Metodologia para obter o índice global do *SQI*.

Tabela 1 - Classificação quantitativa, qualitativa e grau de risco do talude.

<i>SQI</i>	Estado do talude	Grau de risco
[1; 1,4]	Muito bom	Muito baixo
[1,5; 2,4]	Bom	Baixo
[2,5; 3,4]	Médio	Médio
[3,5; 4,2]	Mau	Alto
[4,3; 5]	Muito mau	Muito alto

O cálculo do índice deve então ser realizado de acordo com a equação [4]:

$$SQI = \sum_{i=1}^n W_i \times X_i \quad [4]$$

Já a cotação atribuída a cada fator pode ser calculada individualmente através da equação [5]:

$$X_i = \sum_{i=1}^n W'_i \times X'_i \quad [5]$$

Onde, *SQI* representa o valor do índice de qualidade do talude; W_i representa o peso calculado para cada um dos 9 fatores; X_i representa a cotação atribuída a cada um dos 9 fatores; W'_i representa o peso atribuído a cada parâmetro; X'_i representa a cotação a atribuir a cada parâmetro.

Depois de realizado o cálculo do *SQI*, o valor numérico deverá ser convertido para uma escala qualitativa, dividida em cinco classes (Tabela 1). Este facto permite que a avaliação seja mais simples e intuitiva á compreensão do estado de qualidade do talude e o seu grau de risco, possibilitado assim o apoio à decisão.

2.3.1 Definição dos Fatores e Parâmetros

As principais causas associadas à instabilidade de taludes, segundo Terzaghi (1950), agrupam-se em causas internas, intermédias e externas, sendo que as mesmas poderão ocorrer ainda em simultâneo. As causas internas abrangem as que resultam numa redução da resistência ao corte, ou seja, alteração das propriedades dos maciços. Já as causas externas agrupam as alterações geométricas, vibrações de origem natural ou artificial, entre outras. E por fim as intermédias acabam por surgir através da assimilação das causas internas e externas.

O *SQ*/tem em conta o conjunto de todas estas causas e para isso recorreu às considerações e sugestões fornecidas pelas Estradas de Portugal (2009) e pelo Mapeamento de riscos em encostas e margens de rios, desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (Carvalho et al. (2007), Gao et al. (2011), Lindsay et al. (2001) e Naghadehi et al. (2013)), para definir os parâmetros necessários que permitem realizar uma avaliação fiável de taludes, que posteriormente foram agrupados em 9 fatores relevantes (Tabela 2).

Assim, a metodologia passa por considerar uma cotação parcial para cada fator, acabando por permitir a vantagem de uma perceção rápida e funcional dos taludes que estão expostos a maiores riscos e ainda quais os fatores e parâmetros que mais agravam a sua qualidade. Esta informação será bastante importante para otimizar futuramente os aspetos da intervenção.

Tabela 2 - Fatores e parâmetros em avaliação para o índice de qualidade.

Fator	Parâmetro
Geometria	Altura, inclinação, inclinação de banquetas e largura de banquetas
Geológico	Sistemas de classificação empírica RMR, SMR e Q, tipo de formação e avaliação do risco de queda de blocos
Sistema de drenagem	Sistema de drenagem superficial e profundo (existência e estado de conservação)
Inspeções	Avaliação do estado de manutenção e conservação
Monitorização	Resultados da monitorização incluído: inclinómetros, marcas topográfica, piezómetros, etc.
Imediações	Existência de sobrecargas (habitações, etc.) e eventuais vibrações (trabalhos, etc.)
Historial	Histórico de acidentes e intervenções
Revestimento	Proteção superficial (rede metálica, pregagens, etc.) e cobertura vegetal
Ambiental/Tráfego	Zona sísmica, precipitação e nível de tráfego

2.3.2 Pesos dos fatores

A aplicação de ponderações por pesos pretende traduzir a importância e influência de cada fator/parâmetro para o talude. Estas foram definidas através de inquéritos, distribuídos a profissionais da área da Geotecnia, e os resultados dos mesmos foram tratados pelo método *Analytic Hierarchy Process (AHP)*, proposto por Saaty (1980), que tem em consideração uma escala de 1 a 9, ou seja, igual importância e extrema importância entre fatores, respetivamente (Tabela 3).

Tabela 3 - Escala fundamental da *AHP* (adaptada de Saaty, 1980).

Intensidade da importância	Definição	Explicação
1	Igual importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo
2	Fraca	-
3	Importância moderada	Experiência e julgamento evidencia ligeiramente uma em relação à outra
4	Importância grande	-
5	Importância forte	Experiência e julgamento evidencia fortemente uma em relação à outra
6	Mais Forte	-
7	Muito forte	Uma atividade é muito importante em relação à outra. Demonstrado na prática
8	Extremamente forte	-
9	Extrema importância	A influência de uma atividade é claramente superior à outra
Recíproca	Se a atividade i apresenta uma das influências apresentadas sobre j, então j apresenta um valor recíproco.	Opção razoável

Foram assim obtidas 31 respostas dos inquéritos que foram distribuídos através por uma plataforma digital. No que concerne à análise das respostas foram consideradas 3 categorias de níveis de conhecimento sobre o assunto, nomeadamente: especialista, elevado conhecimento e algum conhecimento. Esta divisão possibilitou uma ponderação das respostas dos inquiridos e ainda uma análise das diferenças entre as várias categorias.

A metodologia proposta por Liu e Chen (2007) foi também utilizada para o tratamento dos resultados obtidos dos inquéritos, no entanto foi pouco visível a diferença nos pesos atribuídos pelos inquiridos com os diferentes graus de conhecimento, à exceção dos fatores inspeção e monitorização que foram mais valorizados pelos especialistas (Figura 2).

A obtenção dos valores finais dos pesos passou ainda pela consideração de 3 cenários diferentes. Um que considera a mesma importância de resposta para todos os graus de conhecimento, outro que majora em 20% as respostas dos especialistas e minimiza, na mesma dimensão, as respostas dos inquiridos com algum grau de conhecimento e por ultimo um cenário idêntico ao referido anteriormente mas com uma proporção de 30% (Figura 3). Após todo este processo de análises e verificações, o *SQI* acaba por adotar os valores do cenário 2 (Tabela 4).

Como o *SQI* se trata de um sistema para aplicação em fase de exploração, é normal que o nível de informação disponível varie bastante e por vezes não seja conhecida a informação em relação a alguns fatores ou parâmetros. Neste cenário os pesos dos fatores ou parâmetros em falta são distribuídos proporcionalmente pelos restantes fatores ou parâmetros conhecidos. São ainda apresentados todos os fatores, parâmetros, pesos, intervalos de variação e as cotações para o índice de qualidade no Anexo III.1.

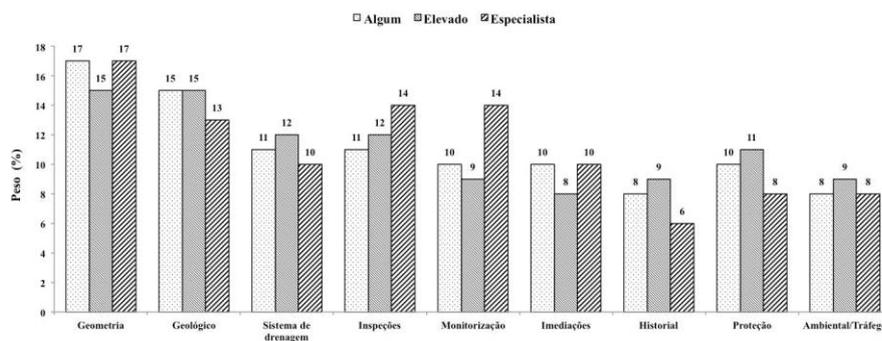


Figura 2 - Distribuição dos pesos dos fatores de acordo com o grau de conhecimento dos inquiridos (Pinheiro et al., 2015).

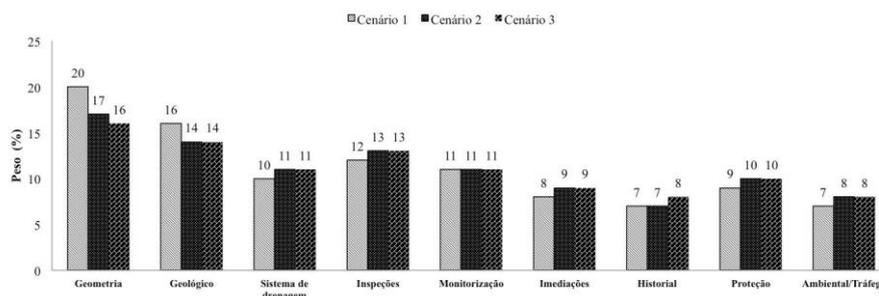


Figura 3 - Análise comparativa entre os 3 cenários considerados: diferença de 20% e 30% nos pesos (Pinheiro et al., 2015).

Tabela 4- Pesos dos fatores selecionados para o *SQI* (cenário 2).

Fator	Peso
Geométrico	0,17
Geológico	0,14
Sistema de drenagem	0,11
Inspeções	0,13
Monitorização	0,11
Imediações	0,09
Historial	0,07
Revestimento	0,10
Ambiental/Tráfego	0,08

2.3.3 Sistemas de classificação integrados no *SQI*

Relativamente à avaliação do fator geológico, o *SQI* tem por base os sistemas de classificação de maciços rochosos, *RMR*, *SMR* e *Q*, já referidos anteriormente, enquanto para a avaliação do potencial de queda de blocos é utilizado o sistema *RHRSm2*, que será posteriormente apresentado. Ou seja, o *SQI* integra estes sistemas na avaliação do talude, tendo estes o respetivo peso e uma cotação definida, melhorando desta forma a fiabilidade dos resultados do *SQI* (Anexo III.1).

O Rockfall Hazard Rating modified (*RHRSm*), proposto por Budetta (2004), surgiu após algumas modificações do sistema original *RHRS* (Pierson et al., 1990). O sistema *RHRSm* inclui a avaliação de 10 categorias através de uma escala logarítmica que varia entre 3 e 81, essa classificação é realizada de acordo com a Tabela 5.

Tabela 5 – Sistema de classificação *RHRSm* (adaptado de Budetta, 2004).

Categoria	Critério por pontos			
	3 Pontos	9 Pontos	27 Pontos	81 Pontos
Altura do Talude	7,5m	15m	22,5m	>30m
Eficácia da valeta de plataforma	Boa retenção	Moderada retenção	Retenção limitada	Retenção Muito limitada
Largura plataforma	13,2m	10,8m	8,4m	6m
Condição estrutural	Descontinuidades com orientação favorável	Descontinuidades com orientação aleatória	Descontinuidades com orientação desfavorável	Descontinuidades muito contínuas com orientação desfavorável
Alteração do maciço	Pouca	Ocasional	Muita	Elevada
Erosão	Pequena	Moderada	Elevada	Extrema
Tamanho dos blocos	0,3m	0,6m	0,9m	1,2m
Volume de blocos	2,3 m ³	4,6 m ³	6,9 m ³	9,3 m ³
Historial de queda de blocos	Poucas quedas	Quedas ocasionais	Muitas quedas	Constantes quedas
AVR	25%	50%	75%	100%
Distância de decisão	Adequada	Moderada	Limitada	Muito limitada
	100%	80%	60%	40%
Clima e presença de água no talude	Baixa precipitação	Moderada precipitação	Alta precipitação	-
	<1000	1000-2000	>2000	
	Sem presença de água	Água no talude	Presença contínua de água no talude	-

Contudo, para ajustar melhor este sistema ao *SQI*, foram realizadas algumas modificações, criando um novo sistema, designado por *RHRSm2*, que também está melhor adaptado às condições típicas das autoestradas de Portugal.

O sistema inicial apresentava 3 níveis de risco, baixo, médio e elevado. No entanto, para facilitar a integração deste sistema na metodologia geral do *SQI*, foi necessário considerar uma divisão de 5 intervalos de risco (Tabela 6).

Tabela 6 – Sistema de classificação *RHRSm2* e respetiva conversão para o índice geral do talude.

Classificação geral do talude			
<i>RHRSm2</i> Cotação	Grau de risco	Intervenção	<i>SQI</i>
<51	Muito baixo	-	1
51-153	Baixo	Médio prazo	2
153-333	Médio	Curto prazo	3
333-459	Alto	Urgente	4
>459	Muito alto	Instantâneo	5

Para complementar este sistema, foram ainda adicionadas as seguintes categorias:

- Inclinação do talude, a influência deste parâmetro é relevante para o desencadeamento da queda de blocos. Quanto mais inclinado o talude, maior o risco de queda e maior será a velocidade de impacto do bloco na plataforma, logo maior será o ressalto deste e probabilidade de acidentes;
- Zona de influência, a distância entre o pé do talude e a via de circulação mais próxima influencia consideravelmente a consequência da queda de blocos. Em casos de distâncias mais elevadas, os acidentes (impacto em veículos) deverão ser em menor número;
- Quantidade de blocos soltos, a quantidade de blocos influencia diretamente a probabilidade de queda e o risco associado a esta instabilidade. Quanto mais blocos soltos, maior será a probabilidade de acidentes;
- Clima, precipitações elevadas poderão criar fenómenos desestabilizadores nos taludes e aumentar a probabilidade associada à queda de blocos;
- Largura da plataforma, ajuste da largura de plataforma para a realidade de uma empresa concessionária de autoestradas, considerando como referência o sistema *RHRSm*;
- Largura das banquetas, a inclusão deste novo parâmetro, tendo em conta que a sua capacidade de retenção é tanto maior quando maior a sua largura.

Assim, o cálculo do valor de *RHRSm2* é deverá ser feito de acordo com o Tabela 7.

Tabela 7 – Sistema de classificação *RHRSm2*.

Categoria	Critério por pontos			
	3 Pontos	9 Pontos	27 Pontos	81 Pontos
Altura do Talude	7,5m	7,5-22,5m	22,5-30m	>30m
Inclinação	<30	30-40	40-50	>50
Largura das banquetas	≥4m	2-3m	≤1m	-
Eficácia da valeta de plataforma	Boa retenção	Moderada retenção	Retenção limitada	Retenção Muito limitada
Zona de influência	Longe	Média	Perto	Muito perto
Largura plataforma	21,5m	15,5m	9,5m	3,5m
Condição estrutural	Descontinuidades com orientação favorável	Descontinuidades com orientação aleatória	Descontinuidades com orientação desfavorável	Descontinuidades muito contínuas com orientação desfavorável
Alteração do maciço	Pouca W=1	Ocasional W=2-3	Muita W=3-4	Elevada W=5
Erosão	Pequena	Moderada	Elevada	Extrema
Tamanho dos blocos	0,3m	0,6m	0,9m	1,2m
Volume de blocos	2,3m ³	4,6 m ³	6,9 m ³	9,3 m ³
Quantidade dos blocos	Nenhuns	Pouco	Alguns	Muitos
Irregularidade da face	Baixa	Média	Alta	Muito alta
Presença de água	Seco	Húmido	Gotejante	Fluído
Historial de queda de blocos	Poucas quedas	Quedas ocasionais	Muitas quedas	Quedas constantes
	1/10 anos	3/ano	6/ano	9/ano
AVR	25%	50%	75%	100%
Distância de decisão	Adequada	Moderada	Limitada	Muito limitada
	100%	80%	60%	40%
Clima	Baixa precipitação	Moderada precipitação	Alta precipitação	-
	<1000	1000-2000	>2000	-

2.3.4 Aplicação e validação do *SQI*

O *SQI* foi aplicado a um grupo composto por 17 taludes, considerando um alerta de segurança ou mesmo intervenções de emergência, para as avaliações com índices de qualidade iguais ou superiores a 3. Neste grupo de taludes não foi considerado o fator da monitorização devido à falta de informação neste fator, assim sendo o valor do seu peso de 0,11, foi proporcionalmente distribuído pelos restantes fatores. Também as informações relativas aos sistemas de classificação geomecânicos (*RMR*, *Q*, *SMR*) se encontravam em falta e da mesma forma realizado para a monitorização, foi também executada a redistribuição pelos pesos dos restantes parâmetros do fator geológico. De referir ainda que também foi aplicado o sistema *RHRSm2* aos 17 taludes.

Os resultados foram posteriormente validados por um grupo de especialistas, solicitando aos mesmos que atribuissem uma cotação entre 1 e 5 a cada um dos taludes, após uma inspeção *in-situ*. Os resultados dos especialistas para os 17 taludes e a aplicação do *SQI*, encontram-se na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultados da aplicação do *SQI* e da avaliação dos especialistas para o grupo de 17 taludes.

Talude ID	<i>SQI</i>		Avaliação de especialistas	
	Valor	Estado	Valor	Estado
1	2,54	Médio	3,00	Médio
2	2,99	Médio	3,00	Médio
3	2,89	Médio	3,50	Mau
4	2,85	Médio	2,50	Médio
5	2,11	Bom	2,50	Médio
6	2,76	Médio	3,00	Médio
7	2,92	Médio	3,80	Mau
8	2,93	Médio	3,00	Médio
9	2,70	Médio	2,50	Médio
10	2,60	Médio	3,00	Médio
11	2,85	Médio	2,80	Médio
12	2,35	Bom	2,50	Médio
13	3,27	Médio	3,50	Mau
14	2,25	Bom	2,00	Bom
15	2,84	Médio	3,00	Médio
16	3,03	Médio	2,90	Médio
17	2,91	Médio	2,80	Médio

Foi assim possível concluir que as diferenças entre as duas avaliações foi residual, contudo para uma melhor comparação quantitativa, os resultados foram ainda tratados pelo cálculo do *Root Mean Square Error (RMSE)* [6] e do *Mean Absolute Deviation (MAD)* [7], para os quais foram obtidos valores de 0,35 e 0,28, respetivamente. Estes valores permitem concluir que o *SQI* apresenta resultados bastante semelhantes à avaliação dos especialistas, e como tal, bons resultados na avaliação dos taludes. Assim, poderá ser aplicado por não-especialistas e obter resultados similares a uma avaliação realizada por especialistas, evitando assim os custos de uma avaliação deste tipo acarreta e permitindo a sua aplicação generalizada.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(SQI - E)^2}{N}} \quad [6]$$

$$MAD = \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N |SQI - E| \quad [7]$$

Onde, N representa número de taludes em análise; SQI representa o valor obtido após a aplicação do sistema; E representa avaliação obtida pelo grupo de especialistas.

A Figura 4 exhibe as diferenças absolutas entre as duas avaliações apreciadas e, com a exceção de 2 taludes, essa diferença é sempre inferior a 0,50.

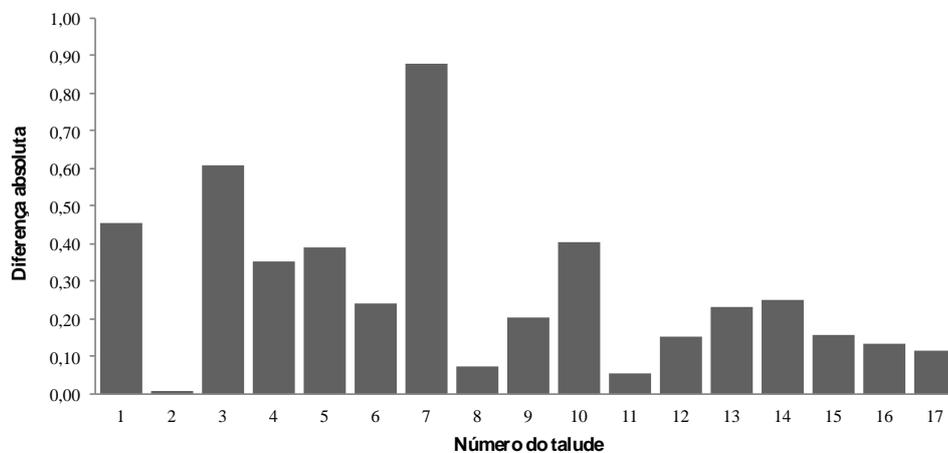


Figura 4 – Diferenças absolutas entre a avaliação do *SQI* e do grupo de especialistas (Pinheiro et al., 2015).

Após a validação do *SQI* conclui-se, que o mesmo é de grande interesse para empresas e instituições, porque permite conseguir informação relevante e constituir modelos de degradação dos taludes ao longo do tempo. Também possibilita uma percepção rápida e funcional, para averiguar os que estão em piores condições para que desta forma seja possível gerir de forma eficaz e atempadamente quais as intervenções a realizar.

2.4 Incerteza

A aplicação de abordagens determinísticas para análises de estabilidade em Geotecnia é muito frequente, no entanto, todas as análises realizadas nesta área apresentam sempre um grau de incerteza, estando este grau dependente de várias causas.

Uma das grandes causas da incerteza deve-se ao facto dos maciços estarem constantemente sujeito a ações que fazem com que suas características se modifiquem ao longo do tempo e do espaço, podendo os fenómenos geológicos gerar substratos extremamente heterogéneos. Existe assim uma variabilidade espacial das suas propriedades, onde as características do mesmo poderão ser idênticas em pontos próximos, mas as mesmas poderão ser modificadas significativamente em pontos mais afastados.

Outras causas da incerteza acabam por estar envolvidas em todas as fases da obra, desde a caracterização local, devido ao facto de tanto os ensaios de campo como de laboratório serem sempre limitados na quantificação das propriedades do maciço e devido às perturbação que os mesmos podem gerar devido à instalação de instrumentação ou extração de amostras. A incerteza poderá também estar presente nas fases de análise e de projeto, na tomada de decisões e, naturalmente, na construção da obra, pois o principal material de construção é definido pela natureza que tem, como já referido, características heterogéneas apresentadas ao longo do seu desenvolvimento.

Em suma, este grau de incerteza estará sempre presente e como tal deve ser levado em conta. Uma forma de mitigar estas incertezas é a consideração de uma distribuição de valores para cada parâmetro, dessas forma abordados como variáveis aleatórias numa abordagem probabilística. Esta consideração irá naturalmente reduzir a incerteza, para que desta forma seja possível otimizar a relação entre os custos e a segurança.

2.4.1 Causas da incerteza

As causas da incerteza têm sido classificadas por vários autores em diferentes grupos, todavia todos eles acabam por descrever causas muito idênticas. Vanmarcke (1977a) caracterizou a incerteza em três causas: a natural heterogeneidade ou variabilidade dos solos *in-situ*, a limitação das informações disponíveis para o conhecimento e os erros nas medições das propriedades dos solos. Já Morgensten (1995) também a dividiu em três causas: a incerteza dos parâmetros, a incerteza dos modelos e a incerteza humana. Lacasse e Nadim (1996) generalizam mais e apenas definem duas categorias: o inerente (ou natural) e a carência de conhecimento.

Mais recentemente outros autores como Baecher e Christian (2003) e Christian (2004) estudaram mais aprofundadamente esta temática e propuseram classificar as incertezas em três categorias: variabilidade natural, incerteza no conhecimento e incertezas nos modelos de decisão.

Neste trabalho aprofundar-se-ão as causas segundo Christian e Bacher (2003), nomeadamente a variação natural e a incerteza do conhecimento (Figura 5).

Relativamente à incerteza devida a variação natural, pode dizer-se que esta está relacionada com a aleatoriedade dos processos naturais. Estes processos poderão ser manifestados apenas num local ou serem processados em locais diferentes, podendo estes ser designados por variabilidade temporal e variabilidade espacial, respetivamente. Para entender essas variações tanto no espaço como no tempo são por vezes utilizados modelos matemáticos simplificados ou modelos físicos por forma a aproximar os resultados considerando os fenómenos naturais.

Outra causa da incerteza está relacionada com a falta de conhecimento. Esta acontece devido a falta de dados, de informação, de processos e mesmo pela falha de entendimento das leis físicas que limitam a capacidade de modelar as situações reais. Esta causa de incerteza também terá sempre presente o erro humano, que ocorre por falta de atenção, ignorância das normas, informações enganosas e, por vezes, falta de comunicação.

Apesar das informações reunidas na caracterização do local, também podem existir vários tipos de interpretações, pois existe também a presença da incerteza nos dados e na exploração, assim como uma má calibragem dos próprios instrumentos, podendo desta forma afetar os resultados de medição. Os resultados dos parâmetros passam deste modo a ser sempre uma estimativa, que ainda poderá resultar

de erros de outras más interpretações. Após a existência destas incertezas, um modelo escolhido por mais refinado que seja, nunca será possível representar a realidade das condições do terreno.

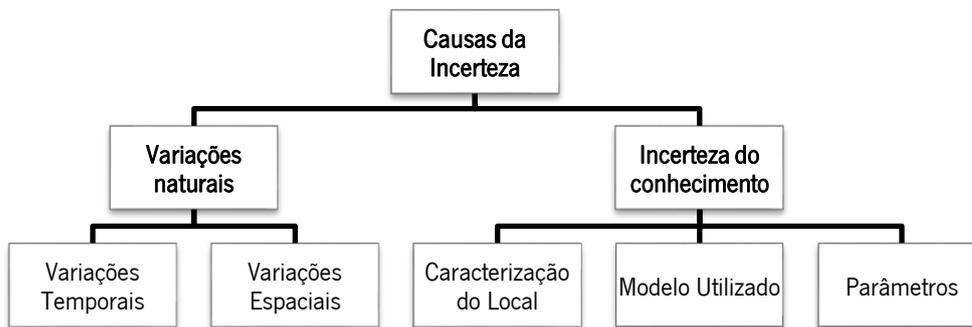


Figura 5 – Resumo das causas da incerteza.

2.4.2 Reduzir a incerteza

Como já referenciado, a incerteza estará sempre presente na geotecnia, por isso esta deve ser considerada para evitar um sobredimensionamento, resultando num aumento dos custos económicos ou um subdimensionamento, onde a estabilidade poderá ser posta em risco, pondo em causa a segurança. Assim, torna-se essencial lidar com a incerteza para que exista uma relação mais ajustada entre a economia e a segurança.

Face a esta realidade, uma forma de lidar com esta incerteza é a utilização de modelos probabilísticos, que acabam por complementar as análises determinísticas, visto estas não serem adequadas para lidar com as incertezas dos maciços. Por sua vez, os modelos probabilísticos permitirão estimar as incertezas e lidar com as mesmas.

Esses modelos irão tornar os termos matemáticos mais precisos e confiáveis, conseguindo uma abordagem capaz de lidar com a variação dos valores geomecânicos do solo, permitindo também uma análise de risco de rotura e fiabilidade da obra. Contudo, ao utilizar estes métodos probabilísticos é também necessário considerar as distribuições probabilísticas das variáveis aleatórias e ter em atenção os conceitos da incerteza da variabilidade e da heterogeneidade.

2.5 Abordagem Probabilística

Como referido anteriormente, o uso de métodos probabilístico são uma grande mais-valia para lidar com a incerteza. Segundo Christian e Bacher (2003), os riscos devem ser expressos segundo a linguagem probabilística e o cálculo do risco deve ser baseado em deduções suportadas por métodos estatísticos. Para a utilização de qualquer método probabilístico é necessário ter em conta as seguintes noções.

Média: a média indica o centro de gravidade de uma distribuição probabilística. Um exemplo prático seria analisar um número n de ensaios, relativos à caracterização de um solo, com a obtenção de n resultados. A média desses resultados seria dada pela equação [8]:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad [8]$$

Variância: a variância de uma amostra definida de acordo com a equação [9], representa o quão longe os valores se encontram do valor esperado.

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad [9]$$

Desvio padrão: o desvio padrão é calculado pela raiz quadrada da variância. É a medida mais utilizada para a dispersão estatística, pois mostra a dispersão que existe em relação a media. Baixos valores do desvio padrão indicam que os resultados tendem a estar próximos da média, enquanto um desvio padrão alto indica que os dados estão espalhados por uma gama alargada de valores.

Variável aleatória: a variável aleatória é determinada aleatoriamente, sendo que em geral só é conhecida após serem realizados os ensaios. Esta pode ser discreta, no caso de assumir valores inteiros e infinitos, ou contínua, que assume inúmeros valores num intervalo de números reais. Este último tipo de variáveis é o mais utilizado no campo da engenharia geotécnica, pois os parâmetros geomecânicos, como por exemplo, o ângulo de atrito, coeficiente de poisson, módulo de elasticidade e resistência à compressão, não possuem um valor fixo e determinístico.

Sempre que conhecidos todos os valores de uma variável aleatória, juntamente com as suas respetivas probabilidades estamos perante uma distribuição de probabilidades. Assim, a distribuição pode ser representada com frequências relativas, permitindo visualizar a forma da distribuição, a média, a variância e o desvio-padrão (Figura 6).

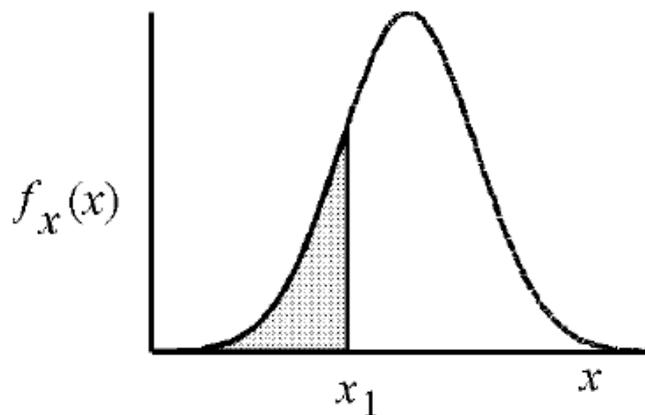


Figura 6 - Exemplo de uma distribuição probabilística.

Existem um número elevado de tipos de distribuição probabilísticas, contudo a mais utilizada é a distribuição normal ou de Gauss. Esta descreve funções probabilísticas de muitas variáveis aleatórias, sendo normalmente usada para executar análises probabilísticas em geotecnia.

Para definir esta distribuição, são necessários dois parâmetros: a média (μ) e o desvio padrão (σ). Normalmente, a forma de estimar estes valores é através das observações feitas em vários testes. Definidos a média e o desvio padrão, a função que descreve a distribuição probabilística é dada pela equação [10].

$$f(x) = \frac{\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right]}{\sigma\sqrt{2\pi}} \quad [10]$$

Na Figura 7 está representada uma distribuição probabilística normal. Neste tipo de distribuição cerca de 68% dos valores encontram-se dentro de um intervalo definido pela média +/- um desvio padrão, enquanto que cerca de 95% de todos os resultados se encontram dentro de um intervalo definido pela média +/- dois desvios padrão. Um pequeno desvio padrão indica um conjunto bem agrupado de dados,

enquanto um grande desvio padrão será encontrado num conjunto disperso de dados. De referir também que quanto maior o desvio-padrão, mais baixo será o valor máximo das frequências relativas.

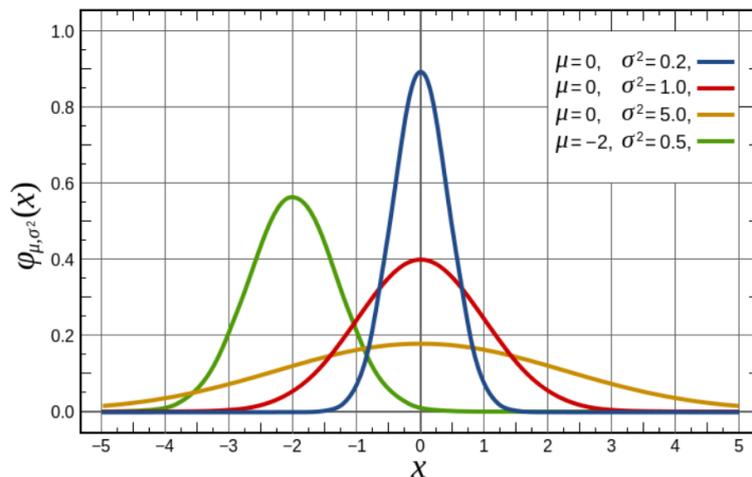


Figura 7 – Exemplos de distribuições probabilísticas normais.

Outra distribuição probabilística bastante utilizada é a distribuição probabilística triangular, que apenas precisa de um valor mínimo e um valor máximo para ser caracterizada. Assim, esta é representada por um valor médio que corresponde a um valor máximo e distribui-se linearmente até aos extremos do intervalo, na sua forma triangular (Figura 8). De forma geral a função distribuição de probabilidade de uma distribuição triangular é dada pela equação [11].

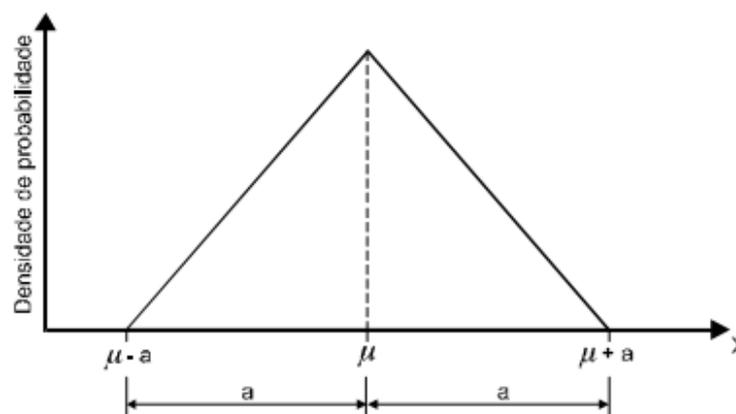


Figura 8 – Exemplo de uma distribuição probabilística triangular.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{2}{b-a} \left(\frac{x-a}{x-\mu} \right), & a \leq x \leq \mu \\ \frac{2}{b-a} \left(\frac{b-x}{b-\mu} \right), & \mu \leq x \leq b \end{cases} \quad [11]$$

Para além da distribuição probabilística normal e triangular, ainda existe um grande número de distribuições probabilísticas, a Tabela 9 apresenta as mais utilizadas.

Tabela 9 - Diferentes tipos de distribuições probabilísticas.

Distribuição	Função probabilística
Log-normal	$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \left(-\frac{(\ln(x)-\mu)^2}{2\sigma^2} \right), x > 0$
Uniforme	$f(x) = \frac{1}{b-a}, a \leq x \leq b$
Exponencial	$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}, x \geq 0$

Ainda relativo às análises probabilísticas desenvolvidas nestes últimos anos, surgem essencialmente dois grupos: os métodos aproximados ou a simulação de Monte Carlo, que é designada por métodos de amostragem porque pretende tirar amostras dos parâmetros a partir da sua distribuição de probabilidades.

2.5.1 Simulação do método do Monte Carlo

O Método de Monte Carlo (*MC*), proposto por Nicholas Metropolis et al. (1953), pode ser caracterizado como um método estatístico, onde se utiliza uma sequência de números aleatórios, de acordo com um tipo de distribuição probabilística para a realização de uma simulação. A Figura 8 representa uma simulação de 10 000 valores gerados aleatoriamente dentro do intervalo de 0 a 1, tendo em conta uma distribuição probabilística triangular.

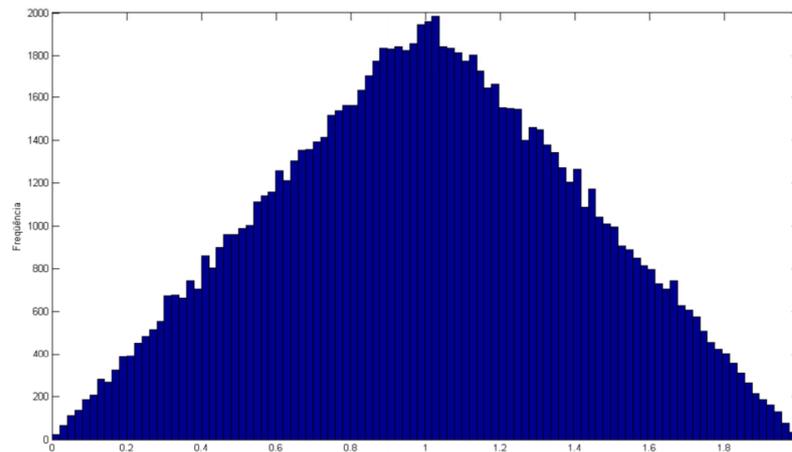


Figura 9 – Frequências de 10 000 números gerados aleatoriamente de acordo com uma distribuição probabilística triangular.

O método de *MC* permite através de um processo físico efetuar a simulação diretamente, ou seja, não necessita de descrever as equações matemáticas que representam o compartimento do sistema, sendo o único requisito necessário descrito por funções de densidade de probabilidade. Assim, o resultado desejado é obtido através da estimativa do valor médio das grandezas observadas, durante um determinado número de simulações. Em casos práticos, pode ser previsto o erro estatístico do valor médio e assim estimar o número de simulações necessárias para se atingir um determinado erro. Desta forma, o resultado das amostras aleatórias, ou tentativas, pode ser acumulado de uma forma apropriada para produzir o resultado desejado.

Este método pode ser aplicado um número considerável de vezes, variando as propriedades, e calculando diferentes distribuições para as variáveis, de forma a determinar as medidas probabilísticas. E ainda poderá ser facilmente aplicado a partir de uma análise determinística, para verificar as correlações que existem entre as diferentes variáveis.

Contudo, este método também implica um grande número de iterações, para verificar a estabilidade de uma estrutura, pois quanto maior o número de iterações realizadas, maior será a precisão dos resultados. Este facto leva muitas vezes a tempos computacionais bastante elevados, o que inviabiliza o uso mais frequente do método.

Capítulo 3

PROGRAMA COM MELHORIAS AO *SLOPE QUALITY INDEX (SQI)*

3.1 Melhorias ao *Slope Quality Index (SQI)*

Sabendo que o *Slope Quality Index (SQI)*, proposto por Pinheiro et al. (2015), foi aplicado a um conjunto restrito de taludes e verificado que o mesmo traduziu de forma realista o estado do talude, foi desenvolvido um programa informático com a finalidade de facilitar os seus processos de cálculo. Contudo, ao longo do desenvolvimento do programa foi possível efetuar algumas melhorias ao sistema *SQI* já existente.

Um dos aspetos centrais dessas melhorias partiu da introdução de uma abordagem probabilística, evitando assim a abordagem determinística, onde para cada fator ou parâmetro avaliado apenas era considerado um único valor. Desta forma, e como já referido anteriormente, o recurso a uma abordagem probabilística consegue reduzir as incertezas, lidando com intervalos e variações de valores.

Adicionalmente, também foi possível introduzir alterações aos valores dos pesos atribuídos aos fatores e parâmetros, ou seja, caso o utilizador não esteja de acordo com os pesos já predefinidos pelo *SQI*, poderá definir, com base no seu conhecimento e experiência, os pesos que julgar mais pertinentes, e assim ajustar os resultados obtidos para avaliação da qualidade do talude em análise.

O programa desenvolvido também permite a criação de uma base de dados, para que deste modo seja possível verificar ou alterar avaliações guardadas no mesmo. Assim, e com base nas avaliações guardadas na base de dados, é possível criar um histórico de avaliações de um talude. Este facto poderá ser de grande interesse para que, posteriormente, seja realizada uma comparação das avaliações ao longo do tempo.

Ao longo deste capítulo é apresentado o funcionamento do programa, assim como as melhorias efetuadas ao sistema *SQI* original de forma mais detalhada.

3.2 Funcionamento e arquitetura do programa

3.2.1 Interface

A interface de um programa é o principal elemento de interação com o utilizador. Caso esta não se mostre agradável, o funcionamento do programa poderá ser julgado como confuso e desinteressante. Posto isto, o desenvolvimento do programa necessitou da criação de uma interface simples, clara e intuitiva para que o utilizador se sinta confortável e sem dúvidas na sua utilização.

Assim, uma boa interface também deve informar o utilizador do que está a ser processado (*feedback*), ou seja, informar caso seja selecionado um botão, calculado um resultado, quais as ações que irão suceder assim como emitir mensagens de erro. Tudo isto permite elucidar o utilizador a executar o programa de forma correta, e ainda a evitar que o mesmo cometa erros no futuro. Deste modo, a interface não é só um elemento de estética, mas sim um elemento de auxílio ao utilizador, facilitando e possibilitando que este seja capaz de trabalhar de forma rápida e eficaz.

No que concerne à interface, esta foi desenvolvida com o recurso da ferramenta *guide* do Matlab 2014b. Esta ferramenta permite criar vários elementos, como ilustrado na Figura 10, que têm o propósito de fornecer uma utilização livre para que o programa seja executado de uma forma dinâmica e simples.

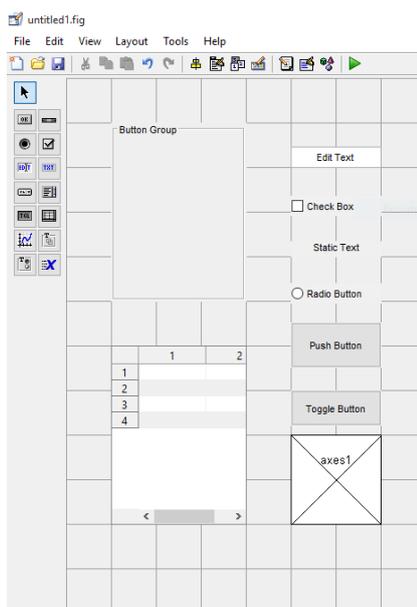


Figura 10 – Possíveis elementos da *guide* do Matlab 2014b.

3.2.2 Menu principal

O programa *Slope Quality Index (SQI)* é iniciado através de uma janela (Figura 11) que tem em consideração três propósitos, o primeiro é relativo à avaliação da estabilidade de taludes de acordo com o sistema *SQI* proposto por Pinheiro et al. (2015), ou seja, tem como objetivo obter automaticamente um índice de qualidade do talude. O segundo e terceiro propósitos estão representados pelo botão “Verificar/Alterar”, que permite visualizar uma base de dados criada de acordo com todas as avaliações de taludes guardadas no programa, e assim verificar ou alterar cada uma dessas avaliações anteriormente realizadas. Ainda neste menu é possível visualizar o logotipo do sistema, o logotipo de engenharia da Universidade do Minho e os criadores do programa, com os respetivos contactos.

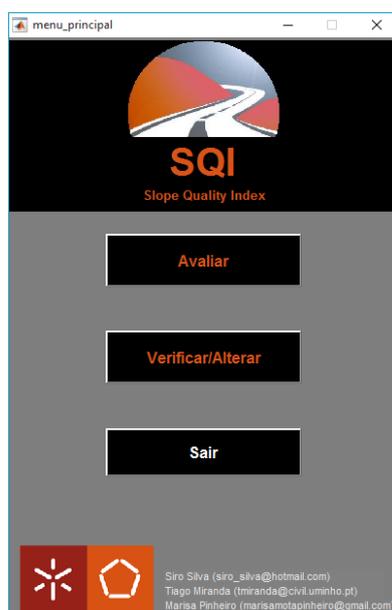


Figura 11 – Menu principal.

3.2.2 Avaliação do talude

Se o objetivo passa pela avaliação de um talude, ou seja, pela obtenção de um índice de qualidade do talude, deverá ser selecionado o botão “Avaliar”. Consequentemente, o programa exibe uma nova janela contendo 9 botões que pretendem representar os fatores que o *SQI* considera para a avaliação da qualidade de um talude (Figura 12a). Esta janela tem a vantagem de permitir ao utilizador escolher qual o fator que quer avaliar de forma independente, e ainda apresentar um posterior *feedback*, ou seja, caso a cor da letra do botão seja alterada para cor-de-laranja, o utilizador irá entender de acordo com essa informação que o fator já se encontra definido (Figura 12b).

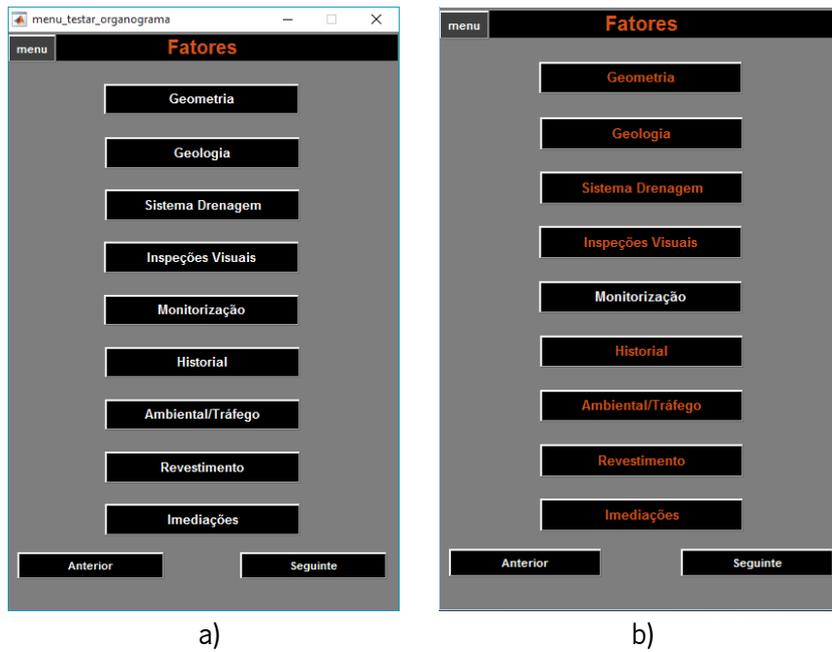


Figura 12 – Menu dos fatores: a) Menu dos fatores não definidos; b) *Feedback* dos fatores já definidos.

Após a seleção de cada um dos fatores uma janela será exibida com a intenção de clarificar quais os parâmetros que são conhecidos pelo utilizador (Figura 13). Assim, no caso de existir informação acerca de um parâmetro o utilizador deve colocar um visto na *checkbox* do respetivo parâmetro.

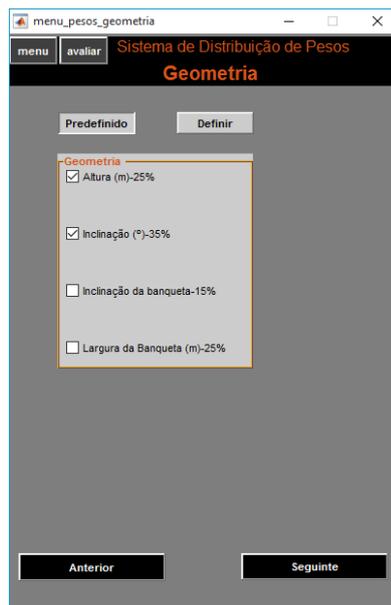


Figura 13 – Selecionar os parâmetros conhecidos.

Após esta seleção dos parâmetros com ou sem informação, o programa processa essa existência definindo os parâmetros como variáveis. Dessa forma, estas variáveis pretendem representar o peso a atribuir a cada parâmetro. No entanto, o valor final só deverá estar disponível após a redistribuição dos pesos. Este tipo de ação é necessária pois a partir da mesma o programa executará uma distribuição de pesos. Esta redistribuição é realizada, tal como referido anteriormente, no caso de não ser conhecido um dos parâmetros, pelos restantes parâmetros conhecidos de forma proporcional.

Outra forma de definir o valor destas variáveis é através do botão “Definir”. Esta possibilidade pretende traduzir uma das melhorias efetuadas no *SQI* original, pois permite definir os pesos dos parâmetros de forma manual adicionando assim alguma subjetividade à avaliação do talude. Como tal, se o utilizador considerar mais adequado pode escolher o peso que julgar ser mais relevante para cada parâmetro, em vez de realizar os cálculos através dos pesos predefinidos pelo *SQI* (Figura 14). Neste caso a distribuição de pesos deverá ser manual, ou seja, caso o utilizador não conheça um parâmetro deve colocar o valor nulo (0) e ter em atenção que o somatório de todos os pesos terá de ser igual a 100%.

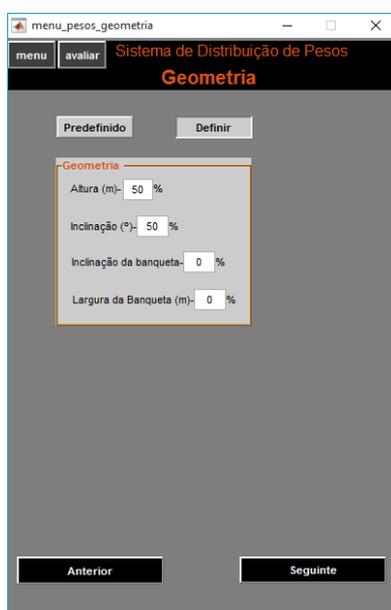


Figura 14 – Definir o peso dos parâmetros.

A título de exemplo, para o caso do fator geometria a distribuição é realizada através das equações [12] a [16], ou seja, o peso de cada parâmetro que constitui o fator é afetado pela soma de uma variável x que pretende representar o valor a ser distribuído. No entanto, caso a informação deste parâmetro não esteja disponível o seu peso é assumido como nulo.

$$W_{altura,final} = (W_{altura} + x) \vee W_{altura,final} = 0 \quad [12]$$

$$W_{inclin.,final} = (W_{inclin.} + x) \vee W_{inclin.,final} = 0 \quad [13]$$

$$W_{inclin. banq.,final} = (W_{inclin.banq.} + x) \vee W_{inclin. banq.,final} = 0 \quad [14]$$

$$W_{largura banq.,final} = (W_{largura banq.} + x) \vee W_{largura banq.,final} = 0 \quad [15]$$

Onde, $W_{altura,final}$ representa o peso final do parâmetro altura do fator geometria; W_{altura} representa o peso predefinido pelo *SQI* do parâmetro altura do fator geometria ou outro peso, no caso de este ser definido manualmente; x o valor do peso a ser redistribuído após a seleção dos parâmetros com ou sem informação. E da mesma forma para os restantes parâmetros e respetivas equações.

Sabendo que a soma de todos os parâmetros terá de ser igual a 1, é possível determinar o valor de x através da equação [16].

$$W_{altura,final} + W_{inclin.,final} + W_{inclin.banq.,final} + W_{largura banq.,final} = 1 \quad [16]$$

Assim, substituídos os valores dos pesos finais dos parâmetros recorrendo às equações [12] a [15], apresentadas anteriormente, é possível determinar o valor de x , para que posteriormente este seja substituído e desta forma se determine e armazene os valores para as variáveis dos pesos de cada parâmetro.

De forma a dinamizar o programa existem ao longo do mesmo, os botões de “menu”, que têm como objetivo permitir voltar ao menu inicial, o botão de “avaliar”, que possibilita ao utilizador voltar à janela onde estão representados os 9 fatores, e ainda os botões de “Anterior” e “Seguinte”, que permitem utilizar o programa de forma livre.

Após a distribuição dos pesos é exibida uma janela que agrupa os parâmetros em vários quadros. Estes permitem ao utilizador definir diretamente qual o intervalo, ou seja, escolher o intervalo já predefinido pelo sistema *SQI*, através da seleção de um *radio button*. Contudo, se o parâmetro não for dado como

conhecido anteriormente, o *SQI* bloqueará o quadro, para não possibilitar definir um intervalo para o mesmo (Figura 15).



Figura 15 – Escolher os intervalos dos parâmetros.

Assim, quando o utilizador seleccionar um *radio button* de um intervalo, o programa define uma variável para esse mesmo parâmetro e atribui o seu valor de acordo com a respetiva cotação do sistema *SQI* original, recorrendo a Tabela do Anexo III.1. Ou seja, se no caso do parâmetro altura do talude for seleccionado o intervalo de 10 a 20, o programa irá armazenar o valor da cotação de 2 numa variável correspondente ao parâmetro altura do talude. Seguindo esta metodologia para todos os parâmetros, e já com os valores dos pesos dos parâmetros anteriormente definidos, é possível calcular o índice do fator geometria de acordo com a equação [17].

$$SQI_{Geom.} = W_{altura,final} \times X_{altura} + W_{inclin.,final} \times X_{inclin.} + W_{inclin.banq.,final} \times X_{inclin.banq.} + W_{largura\ banq.,final} \times X_{largura\ da\ banq.} \quad [17]$$

Onde, $SQI_{Geom.}$ representa o índice do fator geometria; $W_{altura,final}$ representa o valor do peso final do parâmetro altura, ou seja, o valor já com a distribuição; X_{altura} representa o valor da cotação da altura para o respetivo intervalo escolhido. E da mesma forma para os outros parâmetros.

Através da análise da Figura 15, apresentada anteriormente, é possível verificar um *radio button* “Escolher intervalo”, e uma *checkbox*, com a informação “Indefinido”. Caso a *checkbox* seja acionada com um visto em conjunto com o *radio button* o programa possibilita a inserção de um intervalo de

valores à escolha do utilizador, ou seja, considerar valores mínimos e máximos diferentes dos utilizados no *SQI* original. Esta possibilidade de definir um intervalo de valores é outra das melhorias acrescentada ao sistema original. Contudo, a opção de escolha do intervalo apenas se justifica no caso de alguns parâmetros, mais precisamente aqueles que apresentam uma avaliação onde poderá existir a incerteza (Tabela 10), sendo que alguns deles terão de ser avaliados na mesma de forma determinística, como o exemplo do caso das imediações, onde a avaliação dos parâmetros sobrecarga e vibrações nas proximidades, apenas é considerado a existência ou não destes parâmetros, tomando assim a cotação 1 para o caso de não existir, e 5 para o caso de existir.

Tabela 10 - Parâmetros com a possibilidade de definir intervalo.

Fatores	Parâmetros	Possibilidade de definir intervalo		
Geometria	Altura do talude (m)	X		
	Inclinação do talude (°)	X		
	Inclinação da banqueteta	-		
	Largura da banqueteta (m)	X		
Geologia	Formação	Tipo	X	
		Grau de alteração (W)	X	
	Blocos	Falhas	-	
		Sistemas de classificação	Sistema RHRSm2	X
			Q	X
			RMR	X
		SMR	X	
Sistema de drenagem	Drenagem superficial	Estado de conservação	X	
		Estado de manutenção	X	
	Drenagem profundidade	Presença	-	
		Presença	-	
	Impermeabilização das banquetetas	-		
Inspeção Visual		Estado conservação	X	
		Estado manutenção	X	
Monitorização		Células de cargas	X	
		Inclinómetros	X	
		Piezómetros	X	
		Alvos topográficos	X	
Historial	Acidentes	Queda de blocos	-	
		Deslizamento planar	-	
		Cunha de rocha	-	
		Diretriz circular	-	
		Intervenções	X	
Ambiental/Tráfego	Zona sísmica	Tipo 2	-	
		Tipo 1	-	
		Precipitação média anual	-	
	Tráfego	Velocidade máxima (Km/h)	X	
Tráfego médio diário (TMD)		X		
Revestimento	Proteção superficial	X		
	Cobertura vegetal	X		
Imediações	Sobrecarga	-		
	Vibração nas proximidades	-		

Como consequência, para a definição do intervalo de valores é apresentada uma nova janela no programa (Figura 16) que requer ao utilizador que insira o valor mínimo e o máximo que achar adequado para a definição do intervalo relativo a cada um dos parâmetros em avaliação. Visto que em engenharia civil, mais precisamente na área da geotecnia existe alguma dificuldade na definição de alguns valores de forma assertiva, o recurso a um intervalo de valores permite lidar com as incertezas e aumentar assim a precisão dos resultados.

Após definidos os limites do intervalo e executado o botão “Calcular”, o programa recorre à abordagem probabilística que tem por base a simulação do método de Monte Carlo. A utilização deste método permite gerar valores aleatórios com base em uma distribuição triangular dentro do intervalo definido. A escolha do tipo de distribuição e o funcionalmente da simulação de Monte Carlo já foram anteriormente justificados no capítulo 2.

Considerando que a distribuição triangular apenas necessita dos valores máximos e mínimos do intervalo, o utilizador não necessita de fornecer *inputs* adicionais ou até mesmo possuir elevados conhecimentos estatísticos. A distribuição é assim realizada recorrendo à iteração da equação [18], ou seja a equação irá ser calculada 10 000 vezes para definir diferentes números aleatórios dentro do intervalo introduzido.

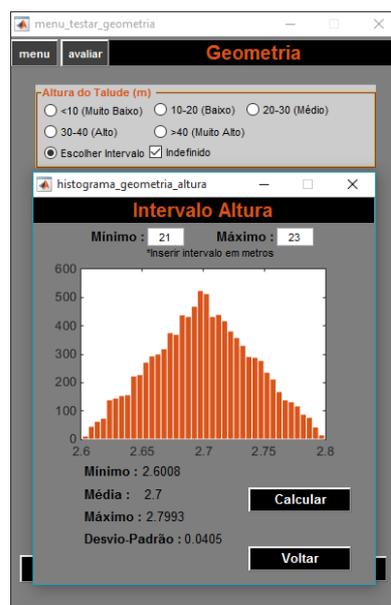


Figura 16 – Definir o intervalo do parâmetro altura.

$$N^{\circ}Aletório_{final} = V_{min} + (V_{máx} - V_{min}) \times \frac{(N^{\circ}Aletório + N^{\circ}Aleatório)}{2} \quad [18]$$

Onde, $N^{\circ}Aletório_{final}$ representa o resultado do número aleatório gerado; V_{min} representa o valor mínimo introduzido no intervalo; $V_{máx}$ representa o valor máximo introduzido no intervalo; $N^{\circ}Aletório$ representa um número gerado aleatoriamente dentro do intervalo introduzido.

Após realizado o cálculo, o valor para a variável do parâmetro não será um valor único, mas sim um vetor com 10 000 células com os diferentes valores gerados. Com base nestes valores, é possível determinar as frequências relativas dos números gerados, visualizar o histograma da distribuição triangular, obter os valores do mínimo e máximo gerado e por fim, obter a média e o desvio-padrão do intervalo (Figura 16).

Todo este processo representa uma melhoria ao sistema *SQI*, pois como anteriormente referido, uma abordagem probabilística permite aumentar a fiabilidade do sistema, tendo em consideração a incerteza.

De forma a facilitar a compreensão para utilizador, o programa *SQI* possui uma conversão automática para a cotação para cada parâmetro, ou seja, ao inserir os limites do intervalo com os valores das unidades reais do parâmetro, este realizada uma conversão automática cotando diretamente o valor do parâmetro para uma escala de cotações ente 1 a 5 (escala utilizada pelo *SQI*/original). Assim, o utilizador pode verificar de imediato a variação das cotações do parâmetro e entender o estado em que se encontra o mesmo. Para desenvolver esta conversão, foram criadas diversas retas de interpolação recorrendo a diferentes equações matemáticas. A título de exemplo, são apresentadas as retas correspondente ao parâmetro da altura do talude relativo ao fator geometria (Figura 17). Estas retas são definidas de acordo com o sistema *SQI*, ou seja, o intervalo de 10 m a 20 m que representa a cotação 2, corresponde ao ponto com as coordenadas (15;2), o intervalo de 20 m a 30 com a cotação de 3, corresponde ao ponto com as coordenadas (25;3), e assim sucessivamente. Logo, com os 5 ramos representados na Figura 9, é possível relacionar todos os valores gerados na sua unidade original, neste caso em metros, para cotações do *SQI*.

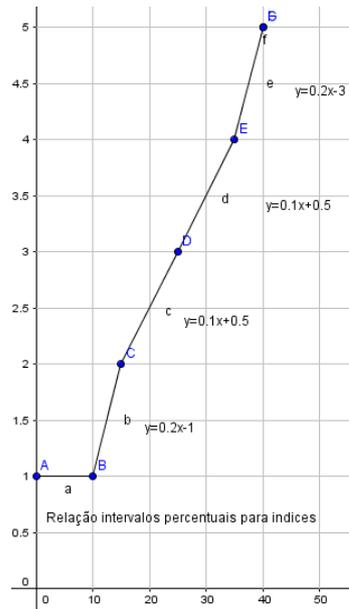


Figura 17 – Relação dos valores reais para cotações, do parâmetro altura.

Portanto, para o exemplo apresentado, a conversão das unidades reais para as cotações do parâmetro altura pode ser definida pelas equações [19] a [23], onde o valor de x representa um valor gerado aleatoriamente, sendo portanto realizada esta conversão para os 10 000 valores gerados.

$$x = 1, x < 10 \quad [19]$$

$$0,2 \times x - 1, x \geq 10 \vee x < 15 \quad [20]$$

$$0,1 \times x + 0,5, x \geq 15 \vee x < 35 \quad [21]$$

$$0,2 \times x - 3, x \geq 35 \vee x < 40 \quad [22]$$

$$x = 5, x \geq 40 \quad [23]$$

Ainda relativo à definição do intervalo de valores é importante referir que na janela da inserção do valor mínimo e máximo (Figura 16), é possível introduzir valores decimais, e ainda optar por um valor único que pode ser conseguida através da introdução dos mesmo valor para o máximo e mínimo (Figura 18). Assim, de acordo com a conversão o resultado será um valor de uma única cotação.

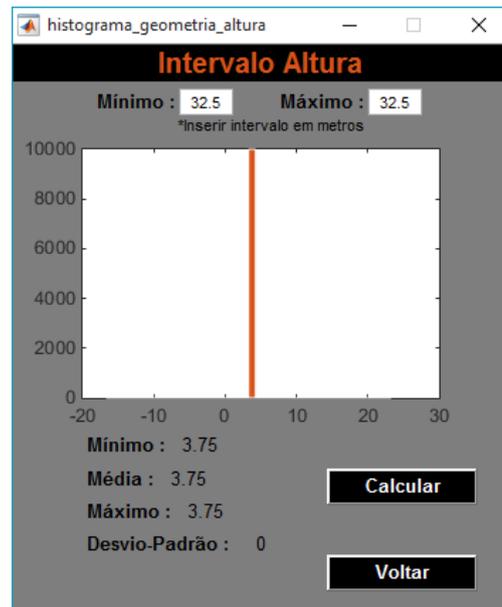


Figura 18 – Valor único.

Após aplicado o procedimento exposto a todos os fatores e parâmetros com informação é possível obter um índice de qualidade final. Para que tal seja possível, é necessário retroceder para a janela que apresenta os 9 fatores avaliados (Figura 12) e selecionar o botão “Seguinte”. Este, por sua vez, redireciona para uma nova janela que tem como objetivo distribuir os pesos dos fatores (Figura 19a).

Esta distribuição será efetuada de igual modo à distribuição dos pesos dos parâmetros. Assim, cada peso de cada fator representa uma variável e para definir os valores das variáveis é necessário recorrer às equações [24] a [32]. Sabendo que o somatório de todos os fatores terá de ser igual à unidade (100%) é possível determinar o valor de x , que representa o valor a acrescentar a cada peso dos fatores com informação. Esta ação também pode ser efetuada manualmente através da utilização do botão “Definir”.

$$W_{Geom.} = (0,17 + x) \vee W_{Geom.} = 0 \quad [24]$$

$$W_{Geol.} = (0,14 + x) \vee W_{Geol.} = 0 \quad [25]$$

$$W_{Sistema\ dren.} = (0,11 + x) \vee W_{Sistema\ dren.} = 0 \quad [26]$$

$$W_{Insp.visual} = (0,13 + x) \vee W_{Insp.visual} = 0 \quad [27]$$

$$W_{monito.} = (0,11 + x) \vee W_{monito.} = 0 \quad [28]$$

$$W_{Hist.} = (0,7 + x) \vee W_{Hist.} = 0 \quad [29]$$

$$W_{Amb./Tráf.} = (0,8 + x) \vee W_{Amb./Tráf.} = 0 \quad [30]$$

$$W_{Revest.} = (0,10 + x) \vee W_{Revest.} = 0 \quad [31]$$

$$W_{Imed.} = (0,9 + x) \vee W_{Imed.} = 0 \quad [32]$$

Adicionalmente, esta janela permite ao utilizador visualizar quais os valores dos pesos definidos pelo *SQI* e ainda informar os seus pesos finais após a redistribuição. Através da análise da Figura 19a e Figura 19b, é possível verificar que o valor do peso do fator monitorização foi distribuído pelos restantes oito fatores.

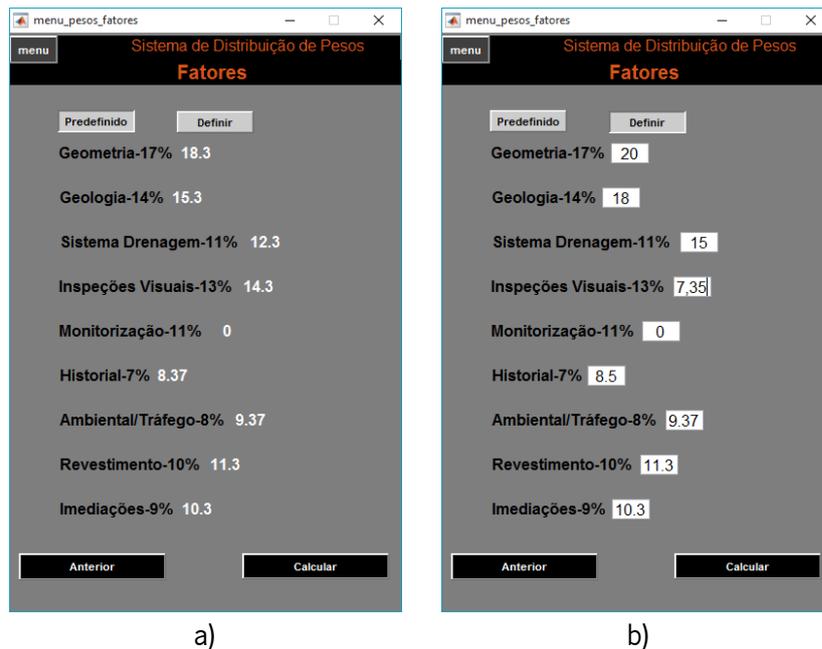


Figura 19 – Distribuição dos pesos dos fatores: a) Distribuição dos pesos dos fatores; b) Definição dos pesos dos fatores.

Após selecionado o botão “Calcular”, o programa calcula os índices de todos os fatores de acordo com a metodologia da anterior equação [17] e o valor final índice total através da equação [33].

$$SQI_{Total} = \sum_{i=1}^n W_i \times SQI_i \quad [33]$$

Onde, SQI_{Total} representa o resultado do índice final; W_i representa o peso do fator; SQI_i representa o índice do fator.

Nesse sentido os resultados são apresentados numa nova janela na qual é visível quais são os fatores mais condicionantes, ou seja, aqueles que mais contribuem para uma má qualidade e elevado risco de instabilidade do talude. O programa permite que esta análise seja efetuada de forma rápida visto que os valores dos índices dos vários fatores são apresentados através de uma gradação de cores de acordo com as apresentadas nas Figura 20a e Figura 20b. No caso de os fatores se encontrarem sob forma de intervalo a cor utilizada será selecionada com base na média dos valores gerados através da abordagem probabilística. Contudo, caso exista a necessidade de uma análise mais detalhada dos valores gerados para estes fatores, o utilizador poderá selecionar o botão que apresenta o intervalo do fator (Figura 20b).

Adicionalmente, na mesma janela referida anteriormente é apresentado um índice de fiabilidade. Este índice é calculado de acordo com a percentagem de fatores com informação, ou seja, quantos mais fatores definidos maior será o valor do índice de fiabilidade. À semelhança da cotação final do SQI , o índice de fiabilidade também assume uma classificação qualitativa, apresentada na Tabela 11.

Tabela 11 - Índice de fiabilidade.

Índice de fiabilidade	Percentagem (%)
Muito bom	>90
Bom	90-70
Satisfaz	70-60
Mau	60-20
Muito mau	<20

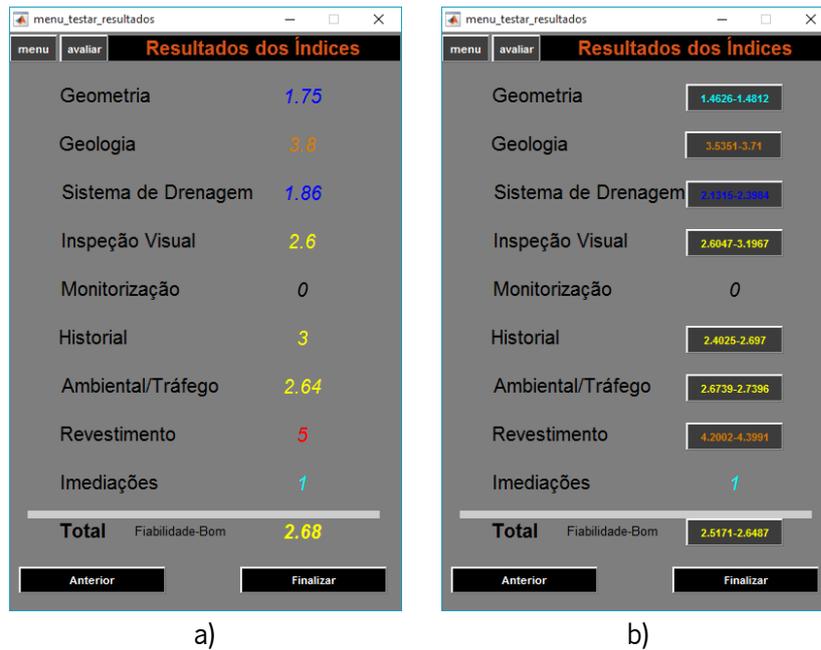


Figura 20 – Resultados finais: a) Resultados determinísticos; b) Resultados probabilísticos.

No que concerne à análise detalhada dos fatores com intervalos de valores, após selecionado o botão do intervalo do fator ou mesmo do índice final, o programa fornece uma nova janela que surge com alguns detalhes da análise probabilística. Dessa forma, a janela permite a visualização do histograma do índice final (Figura 21), do histograma com as variações das cotações dos parâmetros (Figura 22a) e do histograma da influência dos parâmetros (Figura 22b), ou seja, a cotação que estes irão representar para o somatório do índice final após serem afetados pelos diferentes pesos. Ainda, a janela permite verificar quais os valores de máximo e mínimo que foram gerados, a média dos 10 000 valores gerados, o desvio-padrão e ainda o intervalo de confiança de 95%. Estes resultados são obtidos com base numa distribuição normal dos resultados finais.

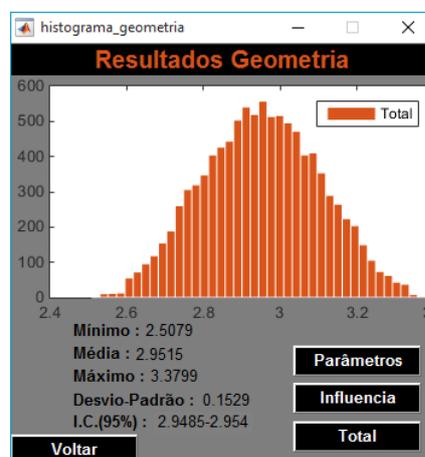


Figura 21 – Histograma do resultado do índice geometria.

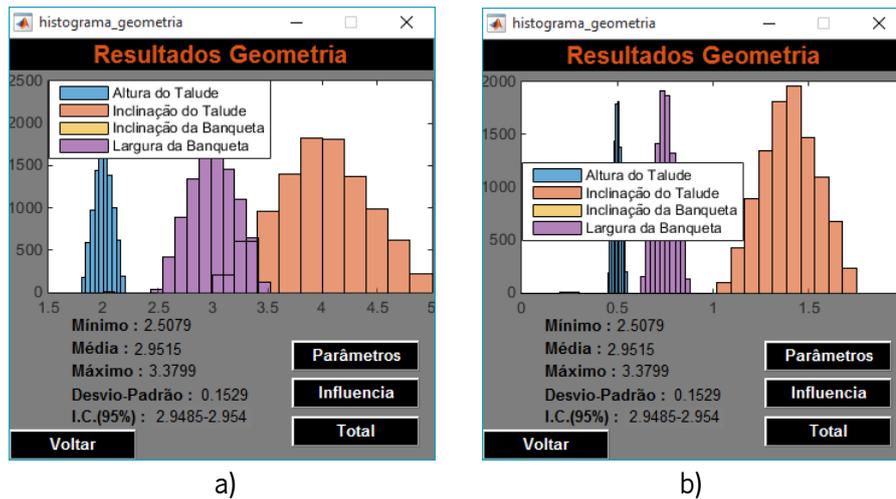


Figura 22 – Resultados do fator geometria: a) Histogramas das cotações dos parâmetros do fator geometria; b) Histograma da influência dos parâmetros do fator geometria.

3.2.3 Armazenamento das avaliações

Após realizada a avaliação do talude e obtido o valor final do índice *SQI*, o programa apresenta a opção de gravar a mesma através de uma questão como a apresentada na Figura 23. Esta ação necessita que, posteriormente, sejam preenchidos alguns elementos relativos à identificação e informação do talude em avaliação (Figura 24a). Seguidamente, a partir da opção “Verificar/Alterar”, apresentada no menu principal (Figura 11), é possível visualizar uma tabela que apresenta todos os dados e avaliações guardadas até ao momento (Figura 24b).

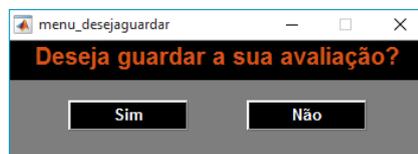


Figura 23 – Opção para gravar a avaliação.



Figura 24 – Avaliações guardadas: a) Dados a inserir para gravar a avaliação; b) Tabela de armazenamento das avaliações guardadas.

Caso seja selecionada a opção verificar, esta permite ao utilizar visualizar três quadros que apresentam um resumo dos valores dos índices de todos os parâmetros e fatores, tal como os resultados do índice total (Figuras 25).

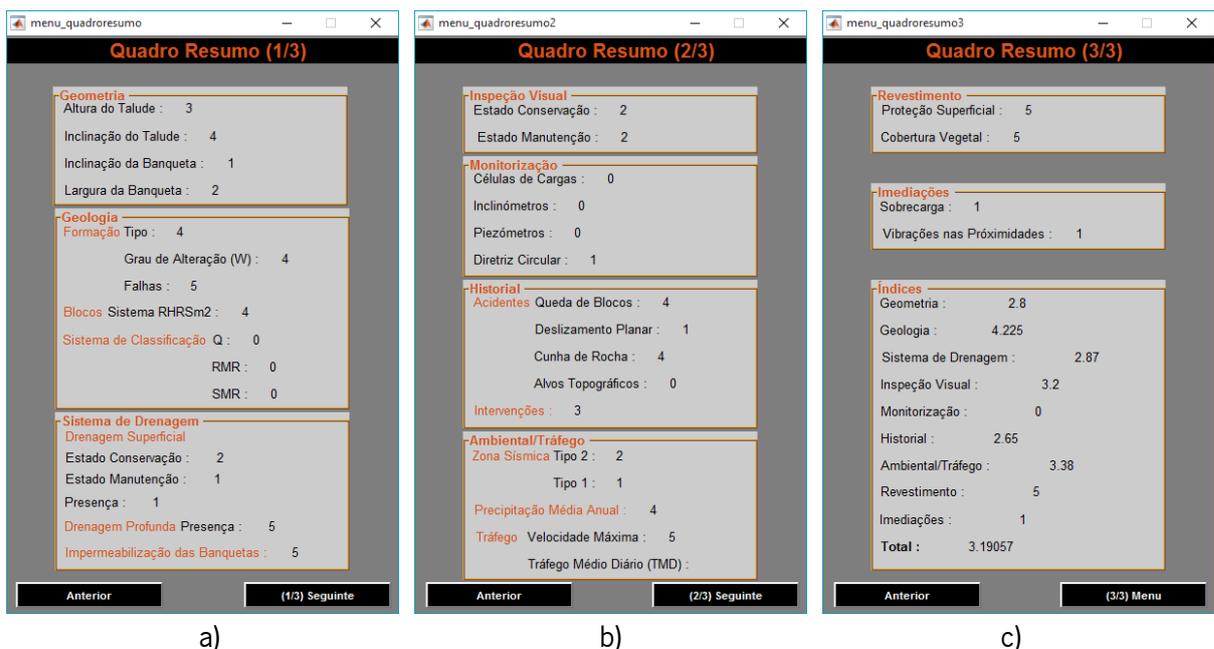


Figura 25 Quadro resumo: a) Quadro resumo 1; b) Quadro resumo 2; c) Quadro resumo 3.

Relativamente ao armazenamento das avaliações, foi necessário recorrer a um *array* de células, ou seja, um elemento que permite armazenar todo o tipo de dados com base numa escala temporal e hierárquica,

tal como representando no esquema da Figura 26, onde o *array* de células “base de dados” integra outros *arrays*. Assim, o programa possibilita o armazenamento de todas as informações a guardar, para que posteriormente encontre uma posição no *array* de células, e desta forma verifique toda a informação da avaliação realizada anteriormente, permitindo apresentar novamente todos os dados anteriormente inseridos. Para um melhor entendimento do programa é também apresentado um organograma na Figura 27 com o resumo do funcionamento do programa.

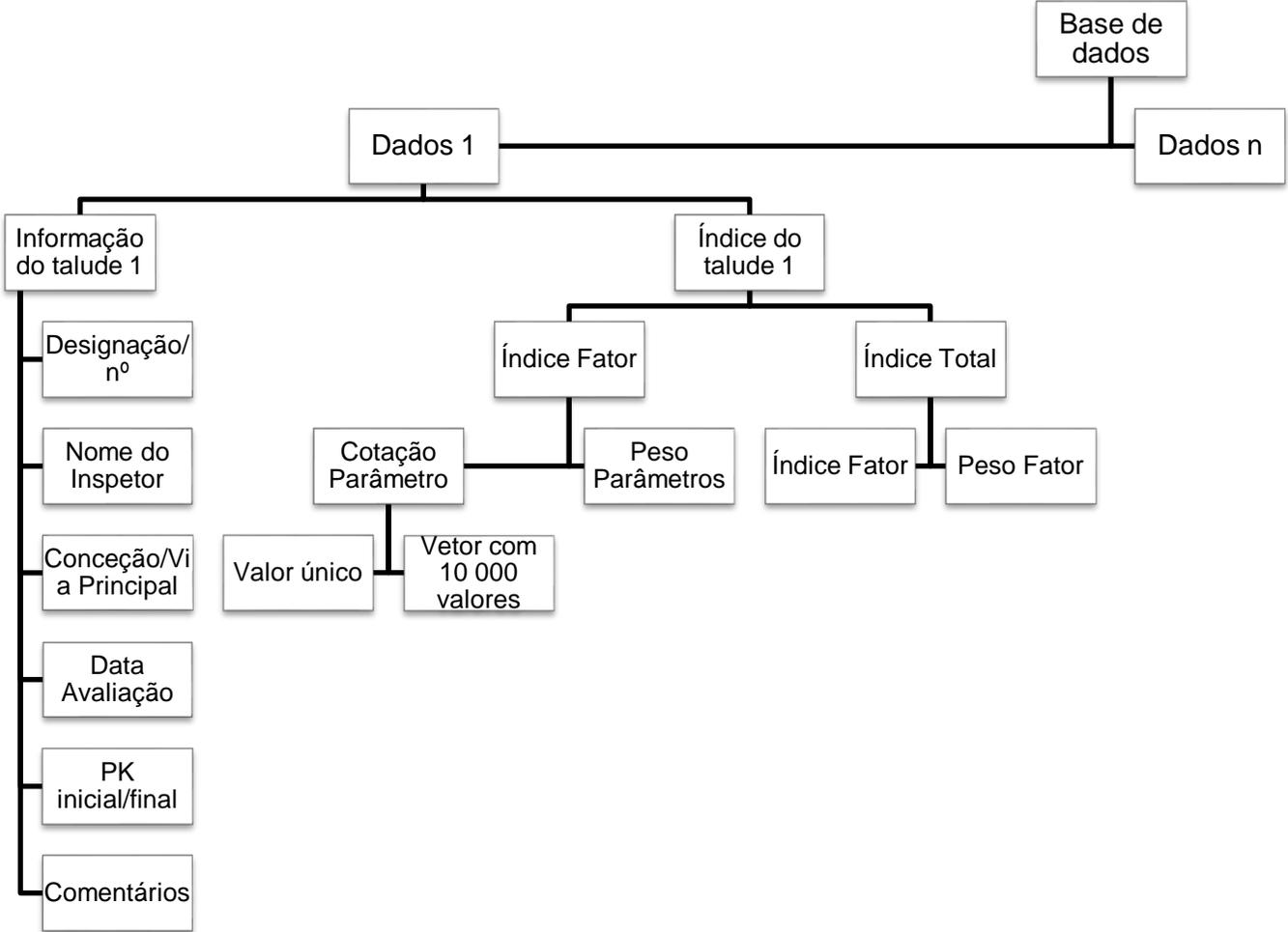


Figura 26 – Resumo do sistema de armazenamento das avaliações.

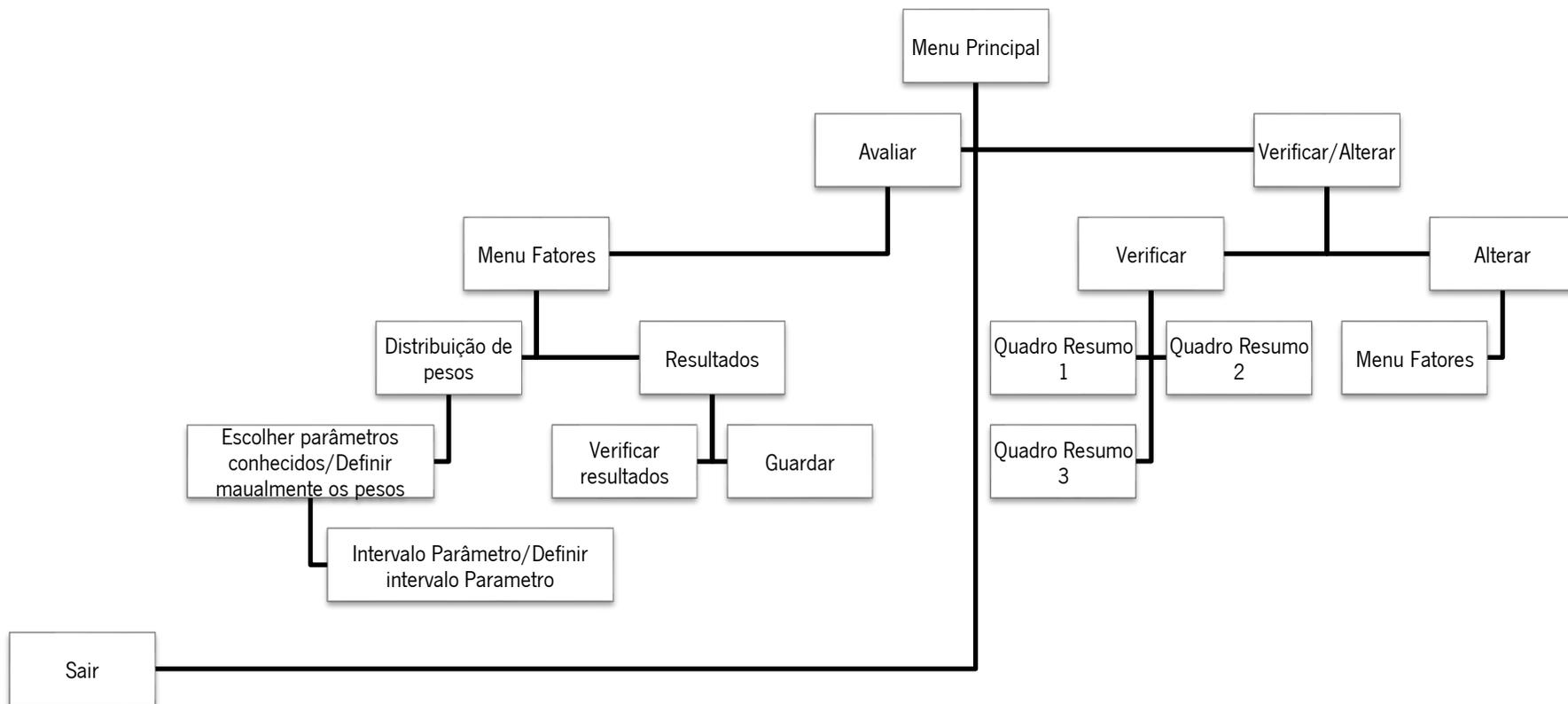
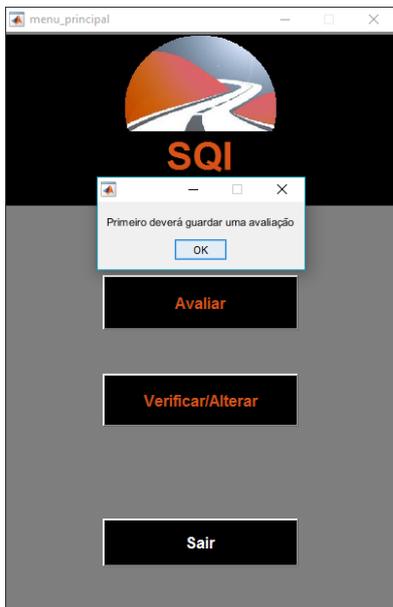


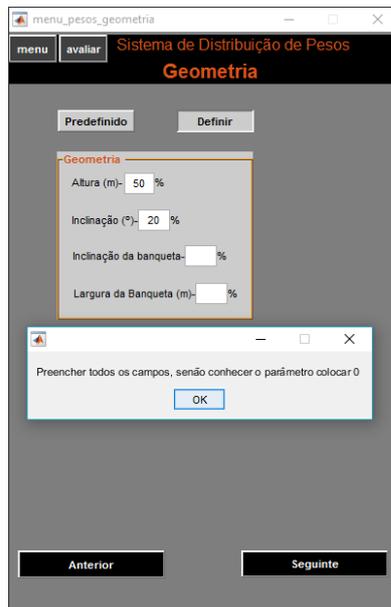
Figura 27 – Resumo do funcionamento do programa

3.2.4 Ajudas do programa

Como referido anteriormente o *feedback* do programa é importante para que o utilizador entenda se está ou não a trabalhar de forma correta, visto isto, foram adicionadas várias mensagens de erro, informações e ajudas ao longo do programa, para que desta forma o utilizador entenda o que o está a ser processado e assim evitar que o mesmo cometa erros futuros. A Figura 28 apresenta vários tipos de feedback que o programa utiliza.



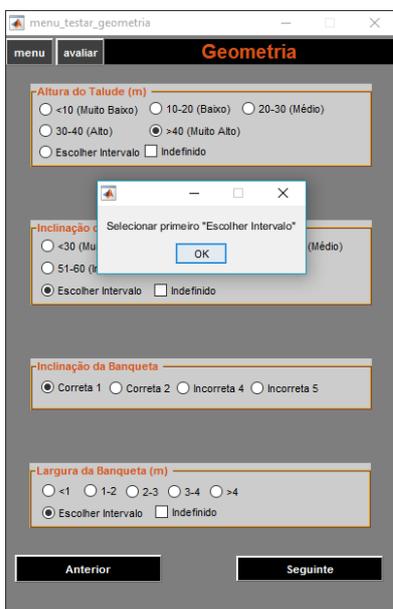
a)



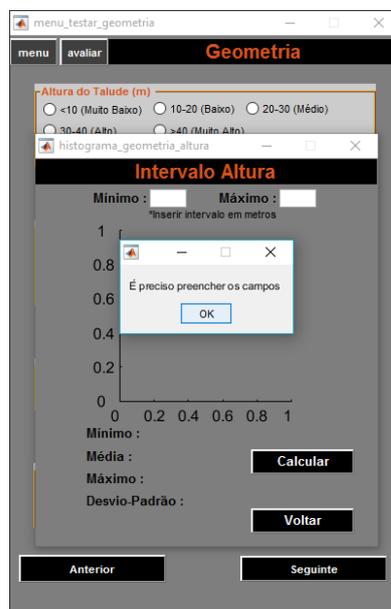
b)



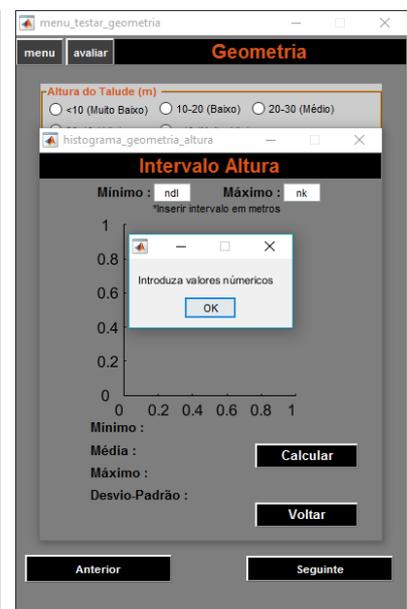
c)



d)



e)



f)

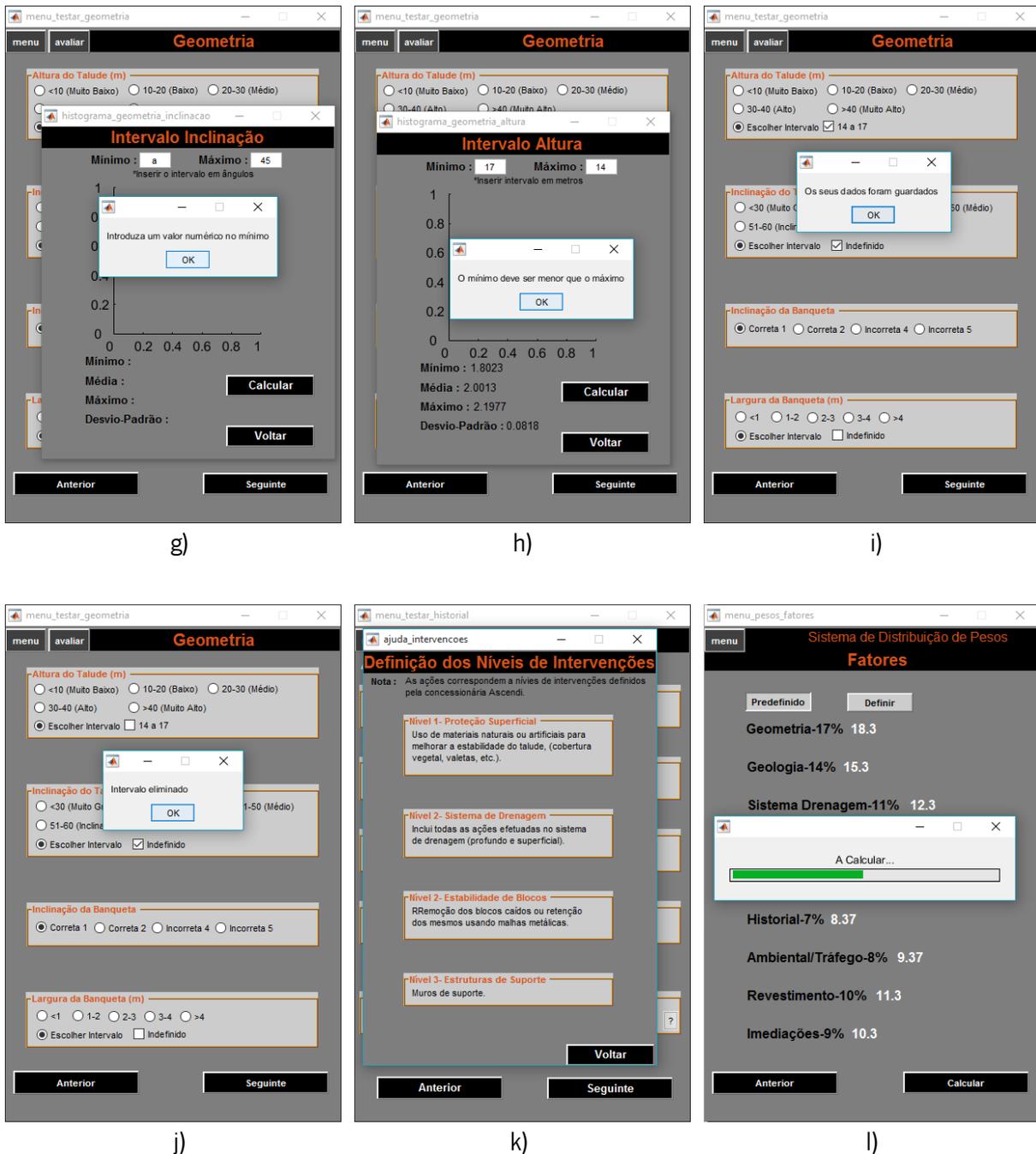


Figura 28 – Ajudas do programa: a) Erro: sem avaliações guardadas; b) Erro: Preencher todos os parâmetros; c) Informação dos *radio buttons*; d) Erro: seleccionar primeiro um intervalo; e) Erro: Preencher todos os campos; f) Erro: introduzir valores numéricos; g) Erro: introduzir valor numérico no mínimo; h) Erro: o mínimo deve ser maior que o máximo; i) Informação de dados guardados; j) Informação de intervalo eliminado; k) Informação dos níveis de intervenção; l) Barra de espera para os cálculos finais.

Capítulo 4

EXEMPLOS DE APLICAÇÃO E VERIFICAÇÃO DOS RESULTADOS

4.1. Aplicação determinística e validação do programa

Como referido anteriormente o sistema *Slope Quality Index (SQI)*, proposto por Pinheiro et al. (2015), foi aplicado a um grupo de 17 taludes escolhidos aleatoriamente da rede de taludes existente na concessão Beira Litoral. Na avaliação deste grupo de taludes a grande maioria da informação necessária foi considerada, à exceção do fator da monitorização, para o qual não existia qualquer registo. Dessa forma, o peso de 0,11, correspondente a esse fator, foi distribuído pelos restantes fatores conhecidos.

De referir também, que se encontraram em falta as informações relativas aos parâmetros que permite a caracterização do maciço através dos sistemas de classificação geomecânica *Rock Mass Rating (RMR)*, proposto por Bieniawski (1989); *Slope Mass Rock (SMR)*, proposto por Romana (1985); sistema *Q*, proposto por Barton et al. (1974), sendo assim os seus respetivos pesos foram da mesma forma distribuídos pelos restantes parâmetros que constituem o fator geológico. Contudo, para avaliação dos blocos foi aplicado o sistema *Rockfall Hazard Rating modified (RHRSm2)*, proposto por Pinheiro et al. (2015), em todos os 17 taludes em análise. Na Tabela 12 está representada a aplicação do sistema *RHRSm2* a um dos taludes do grupo selecionado, e na Tabela 13 são apresentadas todas as informações necessárias para a aplicação do sistema *SQI*.

Tabela 12 - Aplicação do sistema RHRSm2 ao talude selecionado para o estudo.

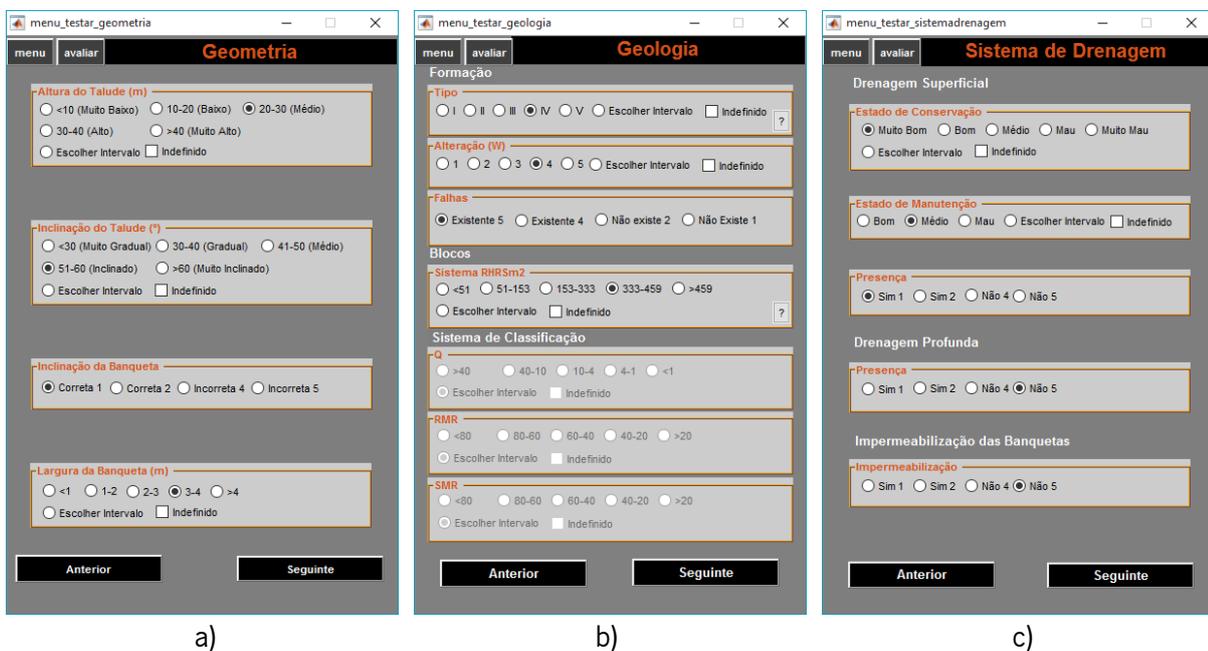
Categoria	Dados	Pontuação
Altura do Talude	22	9
Inclinação	56°	81
Largura das banquetas	3	9
Eficácia da valeta de plataforma	boa retenção	3
Zona de influência	Longe	3
Largura plataforma	12	27
Condição estrutural	Descontinuidades muito contínuas com orientação desfavorável	81
Alteração do maciço	W3/W4	27
Erosão	Elevada	27
Tamanho dos blocos	0,3	3
Volume de blocos por evento	2,3 m³	3
Quantidade dos blocos	Alguns	27
Irregularidade da face	Baixa	3
Presença de água	Húmido	9
Historial de queda de blocos	Muitas quedas	27
AVR (%)	>100	81
ADT	21800	
SL (km)	0.295	
PSP (km/h)	120	
Distância de decisão	Adequada	3
Clima	Moderada precipitação	9
TOTAL		432

Tabela 13 – Sistema de classificação *SQ*/ao talude em estudo.

Fator	Peso	Parâmetro	Valor
Geométrico	0,19*	Altura	22
		Inclinação	56°
		Inclinação das banquetas	Correta
		Largura das banquetas	3
Geológico	0,17 ¹	Formação - Tipo	Complexo xisto-grauváquico
		Formação - Grau de Alteração	W3 - W4
		Formação - Falhas	Sim
		Blocos - Sistema RHRS modificado	432
		Sistemas de classificação - Q	-
		Sistemas de classificação - RMR	-
		Sistemas de classificação - SMR	-
Sistema de drenagem	0,14 ¹	Drenagem Superficial - Estado de Manutenção	2
		Drenagem Superficial - Estado de Conservação	1
		Drenagem Superficial - Presença	Sim
		Drenagem Profunda - Presença	Não
		Impermeabilização das banquetas	Não
Inspeções Visuais	0,12 ¹	Estado de Conservação	4
		Estado de Manutenção	2
Historial	0,08 ¹	Acidentes - Queda de Blocos	Sim - Relativamente Ativa
		Acidentes - Deslizamento planar	Não
		Acidentes - Cunha de rocha	Sim - Relativamente Ativa
		Acidentes - Diretriz circular	Não
		Intervenções	Sim - Grau II
Ambiental/Tráfego	0,09 ¹	Zona Sísmica - Tipo 1	1,6
		Zona Sísmica - Tipo 2	2,4
		Precipitação média anual	1700
		Tráfego - Velocidade máxima	120
		Tráfego - TMD	21800
Revestimento	0,11 ¹	Proteção superficial	<25%
		Cobertura vegetal	Não
Imediações	0,1 ¹	Sobrecarga	Não
		Vibrações nas proximidades	Não

Com resultado final do *RHRSm2*, foi obtido o valor de 432, que corresponde a uma cotação de 4, de acordo com a tabela definida pelo *SQI*, ou seja, em relação ao potencial de queda de blocos, este talude apresenta um risco elevado e por conseguinte necessitava de uma intervenção urgente. Porém, após a aplicação geral do *SQI*, considerando todos os restantes fatores adicionais ao resultado do *RHRSm2*, foi obtido um índice final de 3,27, traduzindo-se num talude com um estado médio e que requer, principalmente, ações de manutenção.

De forma a verificar e validar o programa automático *SQI*, a mesma informação apresentada na Tabela 12 e Tabela 13 foi utilizada pelo programa *SQI* para comparação com o resultado referido anteriormente (3,27). Assim, a Figura 29, ilustra a sequência de janelas dos processos de introdução de dados dos vários parâmetros e fatores recorrendo ao programa automático.



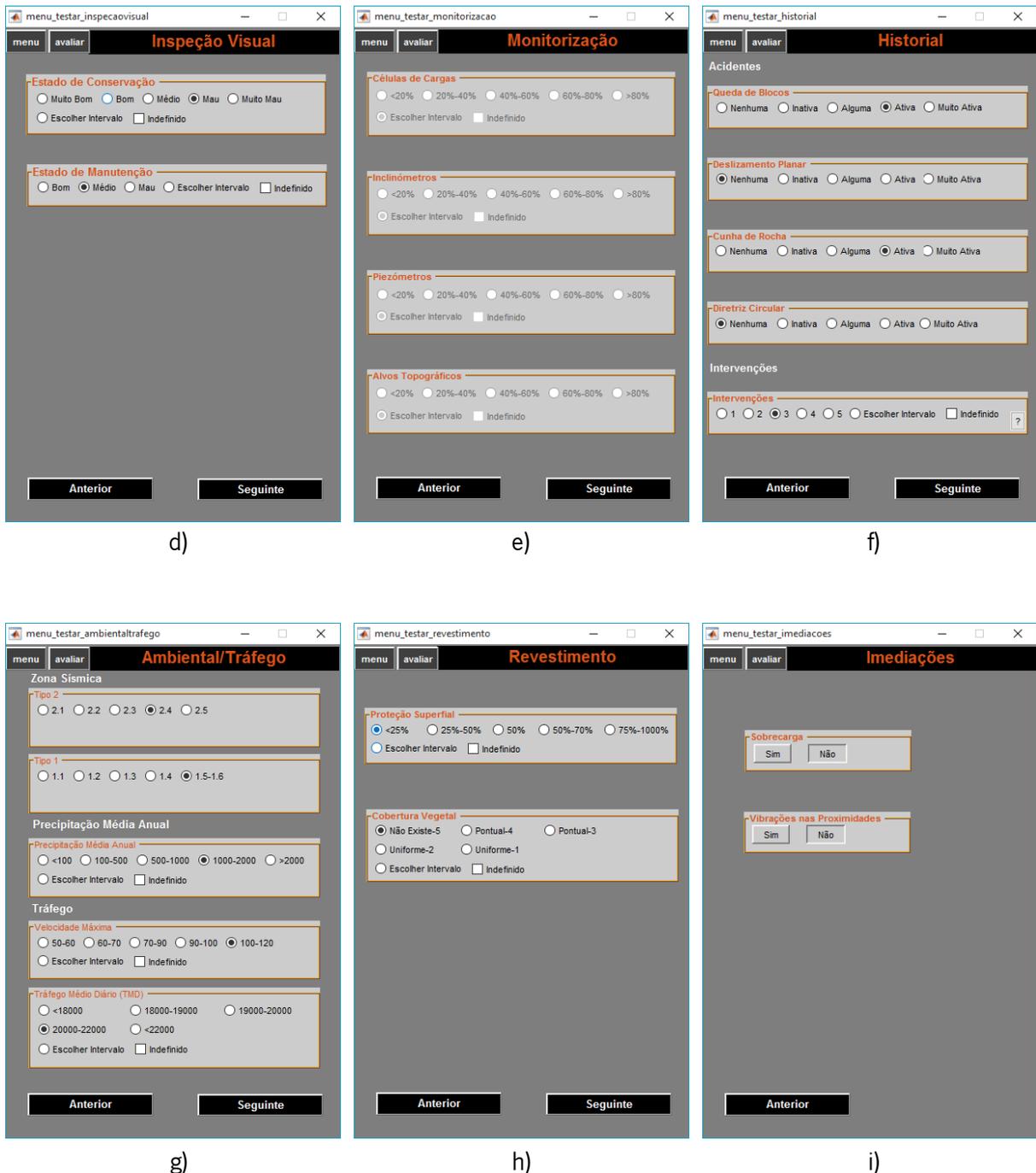


Figura 29 – Sequência para aplicação determinística: a) Definir geometria; b) Definir geologia; c) Definir sistema de drenagem; d) Definir inspeção visual; e) Definir monitorização; f) Definir historial; g) Definir ambiental/tráfego; h) Definir revestimento; i) Definir imediações.

Os resultados finais obtidos pelo programa automático SQI são apresentados na Figura 30. Através da análise dos resultados é possível verificar que o índice fornecido pelo programa é de 3,19 enquanto o apresentado pelos autores do SQI (Pinheiro et al., 2015) é de 3,27. Esta discrepância de valores ocorreu, pois o sistema SQI alterou recentemente os pesos do parâmetro formação do fator geologia de 65% para

60% e também o peso relativo ao sistema *RHRSm2* de 35% para 30%. Pode ainda ser facilmente verificado que os fatores com piores cotações foram o fator Revestimento e Geologia.



Figura 30 – Resultados finais do talude em estudo.

4.2. Exemplos de aplicação probabilísticos

Com base na informação do talude real, foram realizadas algumas alterações aos valores de forma a introduzir alguma incerteza. Estas alterações foram efetuadas como um exercício de análise ao programa desenvolvido e foram efetuadas por forma a aproximar o sistema à realidade atual em geotecnia, principalmente em fase de projeto, que carece de algum detalhe e rigor da informação disponível. Considerando o facto de que alguns parâmetros do *SQI* acabam por apresentar maior incerteza, ou seja, dificuldade em considerar um intervalo mais reduzido, levou a que o critério de atribuição das variações não fosse totalmente uniforme mas sim adaptado à natureza dos parâmetros e fatores. Assim, por forma a entender qual a influência da variação de intervalos foram considerados 2 exemplos distintos. O primeiro exemplo considera uma menor incerteza através de intervalos mais refinados, enquanto o segundo exemplo, considerou uma maior incerteza, ou seja, intervalos mais alargados para os parâmetros. Entendemos que com estes dois exemplos, embora que teóricos, seja possível entender e analisar as diferenças e a influência do rigor nos dados através dos resultados finais. Assim, a Tabela 14 apresenta os vários intervalos que foram considerados no programa automático *SQI* para os 2 exemplos. Nesse sentido, a Figura 31 apresenta a sequência de janelas do programa onde foram introduzidos os intervalos definidos para o exemplo 1.

Tabela 14 - Aplicação do *SQ* ao talude em estudo.

Fator	Parâmetro	Determinístico	Probabilístico	
		Valor	Exemplo Aplicação 1	Exemplo Aplicação 2
Geométrico	Altura	22	20-23	17-25
	Inclinação	56°	55-65	43-66
	Inclinação das banquetas	Correta	1	1
	Largura das banquetas	3	2 a 3	1,5-3,5
Geológico	Formação - Tipo	Complexo xisto-grauvácico	3-4	3-4
	Formação - Grau de Alteração	W3 - W4	3-4	3-4
	Formação - Falhas	Sim	5	5
	Blocos - Sistema RHRS modificado	432	400-450	350-450
	Sistemas de classificação - Q	-	?	?
	Sistemas de classificação - RMR	-	?	?
	Sistemas de classificação - SMR	-	?	?
Sistema de drenagem	Drenagem Superficial - Estado de Manutenção	2	1,8-2,2	1,5-2,5
	Drenagem Superficial - Estado de Conservação	1	1-1,3	1-1,5
	Drenagem Superficial - Presença	Sim	1	1
	Drenagem Profunda - Presença	Não	5	5
	Impermeabilização das banquetas	Não	5	5
Inspeções Visuais	Estado de Conservação	4	3,8-4	3-4
	Estado de Manutenção	2	2-2,5	2-3
Historial	Acidentes - Queda de Blocos	Sim - Relativamente Ativa	4	4
	Acidentes - Deslizamento planar	Não	1	1
	Acidentes - Cunha de rocha	Sim - Relativamente Ativa	4	4
	Acidentes - Diretriz circular	Não	1	1
	Intervenções	Sim - Grau II	2 a 3	2-4
Ambiental/Tráfego	Zona Sísmica - Tipo 1	1,6	1,6	1,6
	Zona Sísmica - Tipo 2	2,4	2,4	2,4
	Precipitação média anual	1700	1500-2000	1000-2000
	Tráfego - Velocidade máxima	120	120	120
	Tráfego - TMD	21800	21000-220000	20000-22000
Revestimento	Proteção superficial	<25%	<25%	<25%
	Cobertura vegetal	Não	5	5
Imediações	Sobrecarga	Não	1	1
	Vibrações nas proximidades	Não	1	1

Sistema de Drenagem

Drenagem Superficial

Estado de Conservação

Muito Bom Bom Médio Mau Muito Mau

Escolher Intervalo 1 a 1.3

Estado de Manutenção

Bom Médio Mau Escolher Intervalo 1.8 a 2

Presença

Sim 1 Sim 2 Não 4 Não 5

Drenagem Profunda

Presença

Sim 1 Sim 2 Não 4 Não 5

Impermeabilização das Banquetas

Impermeabilização

Sim 1 Sim 2 Não 4 Não 5

Anterior **Seguinte**

a)

Geologia

Formação

Tipo

I II III IV V Escolher Intervalo 3 a 4

Alteração (W)

1 2 3 4 5 Escolher Intervalo 3 a 4

Falhas

Existente 5 Existente 4 Não existe 2 Não Existe 1

Blocos

Sistema RHRSm2

<51 51-153 153-333 333-459 >459

Escolher Intervalo 400 a 450

Sistema de Classificação

Q

>40 40-10 10-4 4-1 <1

Escolher Intervalo Indefinido

RMR

<80 80-60 60-40 40-20 >20

Escolher Intervalo Indefinido

SMR

<80 80-60 60-40 40-20 >20

Escolher Intervalo Indefinido

Anterior **Seguinte**

b)

Geometria

Altura do Talude (m)

<10 (Muito Baixo) 10-20 (Baixo) 20-30 (Médio)

30-40 (Alto) >40 (Muito Alto)

Escolher Intervalo 20 a 23

Inclinação do Talude (°)

<30 (Muito Gradual) 30-40 (Gradual) 41-50 (Médio)

51-60 (Inclinado) >60 (Muito Inclinado)

Escolher Intervalo 55 a 65

Inclinação da Banqueta

Correta 1 Correta 2 Incorreta 4 Incorreta 5

Largura da Banqueta (m)

<1 1-2 2-3 3-4 >4

Escolher Intervalo 2 a 3

Anterior **Seguinte**

c)

Historial

Acidentes

Queda de Blocos

Nenhuma Inativa Alguma Ativa Muito Ativa

Deslizamento Planar

Nenhuma Inativa Alguma Ativa Muito Ativa

Cunha de Rocha

Nenhuma Inativa Alguma Ativa Muito Ativa

Diretriz Circular

Nenhuma Inativa Alguma Ativa Muito Ativa

Intervenções

Intervenções

1 2 3 4 5 Escolher Intervalo 2 a 3

Anterior **Seguinte**

d)

Monitorização

Células de Cargas

<20% 20%-40% 40%-60% 60%-80% >80%

Escolher Intervalo Indefinido

Inclinómetros

<20% 20%-40% 40%-60% 60%-80% >80%

Escolher Intervalo Indefinido

Piezómetros

<20% 20%-40% 40%-60% 60%-80% >80%

Escolher Intervalo Indefinido

Alvos Topográficos

<20% 20%-40% 40%-60% 60%-80% >80%

Escolher Intervalo Indefinido

Anterior **Seguinte**

e)

Inspeção Visual

Estado de Conservação

Muito Bom Bom Médio Mau Muito Mau

Escolher Intervalo 3.8 a 4

Estado de Manutenção

Bom Médio Mau Escolher Intervalo 2 a 2.5

Anterior **Seguinte**

f)



Figura 31 – Sequência para a aplicação do exemplo 1: a) Definir geometria; b) Definir geologia; c) Definir sistema de drenagem; d) Definir inspeção visual; e) Definir monitorização; f) Definir historial; g) Definir ambiental/tráfego; h) Definir revestimento; i) Definir imediações.

Após inseridos todos os dados do exemplo 1, de acordo com a Tabela 14, foi obtido um índice final entre 3,17 e 3,36, como pode ser visualizado na Figura 32. Este valor tem uma variação residual de proximamente 0,19, no entanto o intervalo obtido vai de encontro ao valor obtido na aplicação determinística, 3,19, pois este encontra-se dentro do intervalo obtido, representando portanto a mesma categoria para caracterização do talude, ou seja, um talude com um estado médio e que requer, principalmente, ações de manutenção (excetuando a situação já referida da urgência da remoção de blocos).

Contudo, visualizando a Figura 30 verifica-se que a média do intervalo obtido foi de 3,26, representado assim um resultado mais conservativo comparativamente ao obtido pelo sistema determinístico.

Tal como referido no capítulo 4, o programa automático *SQ* possibilita a obtenção de histogramas com os resultados finais, tal como o apresentado na Figura 33. Esta figura apresenta os histogramas de cada uma dos fatores avaliados (8 fatores), onde é possível verificar que, à semelhança da aplicação determinística, os fatores que mais contribuem para a instabilidade do talude é o fator geológico e o fator Ambiental/tráfego. Porém, é necessário considerar o fator revestimento, que também se apresenta uma cotação, embora este não seja representado em forma de histograma, visto não ter sido considerado

nenhum intervalo de variação de valores para este fator. No entanto, através da análise da Figura 33c, que apresenta a influência dos fatores, ou seja, considera os pesos que cada fator assume no resultado do índice final, é possível verificar que os fatores mais condicionantes passam a ser a Geologia e a Geometria, em vez do fator Ambiental/Tráfego. Este facto pode ser justificado pelo elevado peso que o fator geometria assume no cálculo final do índice, tornando-se deste modo um fator condicionante. Da mesma forma podem também ser analisados individualmente os fatores e assim analisar quais os parâmetros mais condicionantes. A Figura 34, apresenta os histogramas dos resultados dos índices finais da Geometria e Geologia, onde é visível que o índice do fator geometria varia de 2,85 a 3,40, ou seja, um intervalo de aproximadamente 0,55. Por outro lado, o valor para este fator obtido através da abordagem determinística é de 2,8, valor que não se encontra dentro do intervalo obtido. Possivelmente, este facto pode ser justificado através do parâmetro da inclinação do talude que é, muitas das vezes, um parâmetro de difícil medição levando a que no exemplo 1, o intervalo de valores tenha sido bastante mais elevado. No entanto, o fator geológico apresenta um intervalo que varia entre 3,76 e 4,32, quando o valor determinístico é de 4,22, o que vai de encontro aos resultados obtidos para o exemplo 1.

Contudo, apesar destas diferenças nos resultados, o índice final e o índice de cada fator, traduzem-se na mesma categoria do talude que o obtido pela abordagem determinística, ou seja, um talude num estado médio.



Figura 32 – Resultados finais do exemplo de aplicação 1.

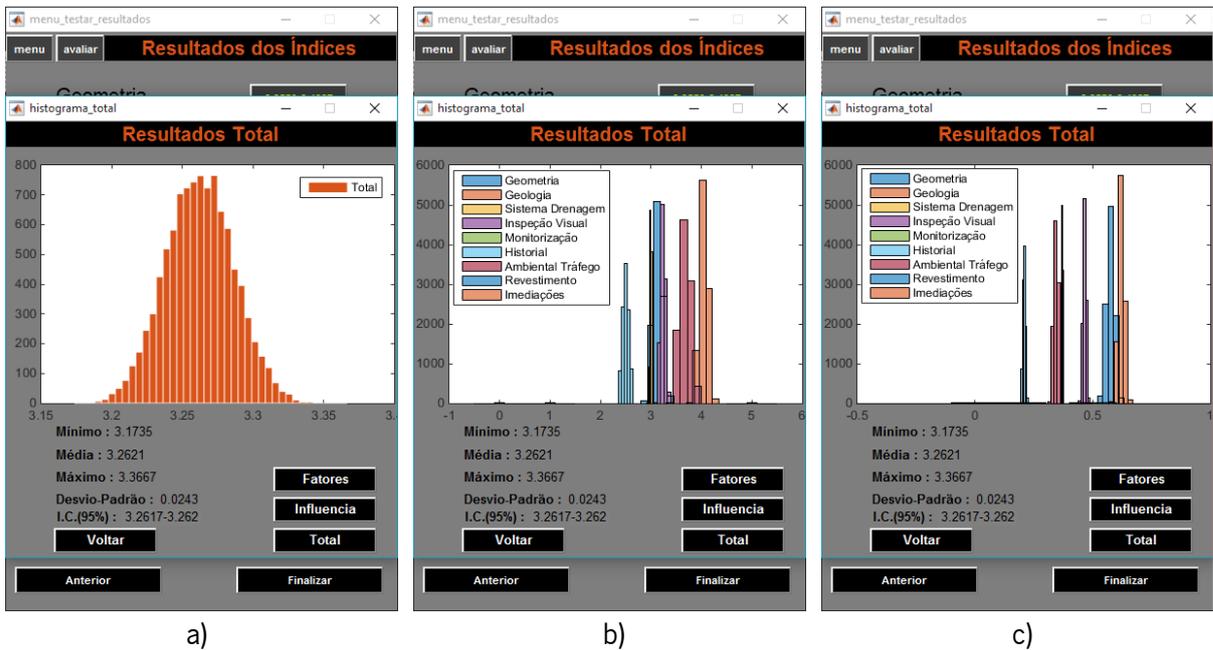


Figura 33 – Histogramas dos resultados finais: a) Histograma do índice total; b) Histogramas das cotações dos fatores; c) Histogramas das influências dos fatores;

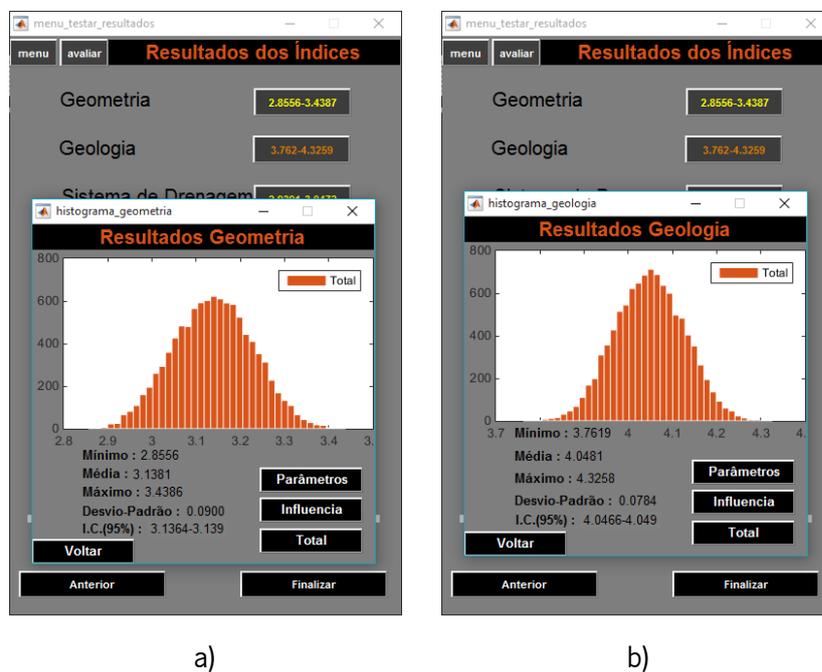


Figura 34 Histogramas finais dos fatores – a) Histograma do índice geometria; b) Histograma do índice geologia.

No que concerne à aplicação do exemplo 2, a Tabela 14, apresenta a informação considerada na aplicação. Neste exemplo os resultados obtidos são apresentados na Figura 35, Figura 36, Figura 37a e Figura 37b, na qual é possível verificar que o resultado do índice final variou de 2,82 a 3,23, ou seja, um intervalo com uma variação de 0,40, em vez de 0,19, como o obtido no exemplo 1. Todavia, apesar

desta maior variação, o talude encontra-se na mesma categoria anteriormente referida para a abordagem determinística e exemplo 1.

Relativamente ao fator geologia, o resultado obtido varia entre 3 e 4,29, o que representa uma variação de 1,29, que ainda assim não foi suficiente para deslocar este fator de categoria. Por outro lado, o fator geometria alterou a sua categoria anterior (determinístico e exemplo 1), através do resultado que varia entre 1,74 e 2,73. A Figura 37a mostra que uma variação elevada neste fator pode alterar o tipo de caracterização para este fator e a Figura 37b ilustra a elevada variação em todos os parâmetros deste fator.



Figura 35 – Resultados finais do exemplo de aplicação 2.



Figura 36 – Histograma do índice final.

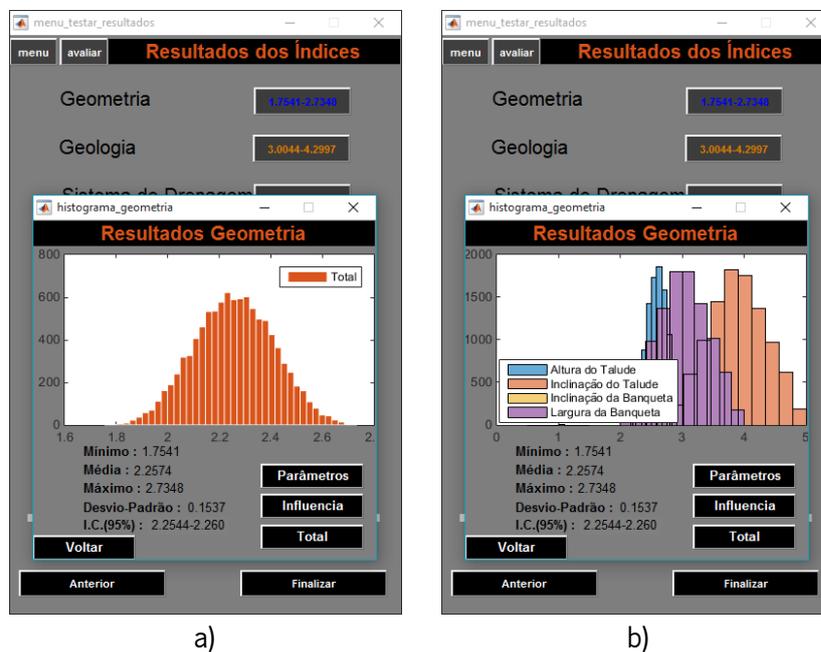


Figura 37 – Histogramas finais dos fatores: a) Histograma do índice geometria; b) Histogramas das cotações dos parâmetros do fator geometria.

Realizados estes dois exemplos de aplicação verificou-se que os resultados apresentam uma boa fiabilidade, precisão e eficiência. Contudo, caso o *SQI* seja aplicado com informação bastante limitada e pouco rigorosa, ou seja, caso sejam considerados intervalos de valores bastante alargados, os resultados serão mais amplos de forma a alterar o estado final do talude. No entanto, este facto poderá ser de grande utilidade, pois possibilita a obtenção dos cenários médios, mínimo e máximos, auxiliando assim o utilizador na tomada de decisão.

Outra das vantagens do programa automático desenvolvido passa pelo facto de este permitir lidar com intervalos de valores e permitir uma fácil utilização, para que assim seja possível a sua utilização por não especialistas e assim obter resultados similares a uma avaliação realizada por especialista ou até mesmo ao sistema *SQI* determinístico.

De referir também que os histogramas e cores utilizadas pelo programa possibilitam uma perceção rápida e funcional do estado do talude a avaliar, para averiguar quais os fatores e parâmetros que estão em condições mais desfavoráveis e ainda verificar quais os que agravam a qualidade do talude.

Em suma, este programa automático *SQI* é de grande interesse para empresas e instituições, que lidam frequentemente com este tipo de obras geotécnicas, pois permite avaliar o estado do talude em contexto de incerteza, e ainda permite obter informações relevantes para gerir de uma forma mais eficaz as intervenções a realizar.

Capítulo 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUJESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Considerações Finais

Neste capítulo é revisto todo o trabalho realizado e apresentado no presente documento, tendo como objetivo reunir as principais conclusões do desenvolvimento do programa e melhorias ao *Slope Quality Index (SQI)*, proposto por (Pinheiro et al., 2015). São ainda apresentadas algumas sugestões para desenvolvimentos futuros ao *SQI*, com base na experiência adquirida na realização deste trabalho.

Neste ponto é importante lembrar que a pesquisa bibliográfica efetuada possibilitou a compressão da temática de avaliação de taludes, sendo que foram pesquisados vários sistemas de avaliação, sendo o sistema *SQI* analisado em maior detalhe.

Após analisada a concepção do sistema *SQI* foi entendido que o mesmo poderia ser melhorado principalmente pela inserção de uma abordagem probabilística, e assim foi efetuada uma nova pesquisa bibliográfica, mas desta vez direcionada para a incerteza na geotecnia e a simulação do método de Monte Carlo.

Assim, as melhorias do sistema *SQI* passaram pelo desenvolvimento de um programa automático no Matlab 2014b, por forma a facilitar os processos de cálculos do sistema *SQI* com uma abordagem probabilística. Neste ponto surgiram várias dificuldades para a criação do código do programa e a sua interface, que foram ultrapassadas.

O programa *SQI* desenvolvido foi validado deterministicamente com os resultados do sistema *SQI* a um talude real e ainda foram realizados dois exemplos de aplicação considerando incertezas e verificou-se que os resultados apresentam uma boa fiabilidade, precisão e eficiência. Contudo, caso o *SQI* seja aplicado com informação bastante limitada e pouco rigorosa, ou seja, caso sejam considerados intervalos de valores bastante alargados, os resultados serão mais incertos e de mais difícil utilização. No entanto,

este facto poderá ter na mesma alguma utilidade, pois possibilita a obtenção dos cenários médios, mínimo e máximos, auxiliando assim o utilizador na tomada de decisão.

Como vantagens interessa destacar o fato de o programa permitir lidar com intervalos de valores e possibilitar a sua utilização por especialistas e não-especialistas (com conhecimentos básicos na estabilidade de taludes) para que consigam aplicar o sistema de uma forma mais independente e automática e com isso obter resultados similares a uma avaliação realizadas por especialistas, evitando assim os custos de uma avaliação por especialista.

De referir também que os histogramas e cores utilizadas pelo programa possibilitam uma perceção rápida e funcional do estado do talude a avaliar, para averiguar quais os taludes que estão em piores condições e ainda os fatores e parâmetros mais desfavoráveis e que agravam a qualidade do talude.

Em suma, o programa *SQI* tem grande interesse para empresas e instituições, porque permite conseguir informação relevante e constituir modelos de degradação dos taludes ao longo do tempo, para que desta forma seja possível gerir de forma eficaz e atempadamente quais as intervenções a realizar.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Com base nas tarefas realizadas e nas observações ao longo deste trabalho, é importante deixar algumas sugestões em relação a desenvolvimentos futuros relacionados com o sistema *SQI*, tendo em conta o carácter de continuidade deste projeto.

O programa *SQI* apenas foi validado e testado para um caso de um talude real, pelo que um trabalho futuro poderia passar pela sua aplicação a outros casos reais, e assim entender melhor os resultados e verificar a possibilidade de otimizar o programa por uma simplificação do código, de forma a tornar o programa mais rápido e eficaz, ou até mesmo criar uma versão executável do programa *SQI* para os sistemas iOS e Android, pois assim seria possível avaliar os taludes a tempo real.

Bibliografia

- Alejano, L. R., Stockhausen, H. W., Alonso, E., Bastante, F. G., Ramírez Ovanguren, P. (2008). ROFRAQ: A statistics-based empirical method for assessing accident risk from rockfalls in quarries. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 45 (8), pp. 1252-1272.
- Barton, N., Lien, R., Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, Vol. 6, pp. 189–236.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications*, John Wiley & Sons, New York, 251 p.
- Budetta, P. (2004). Assessment of rockfall risk along roads. *Natural Hazards and Earth System Science*, Vol. 4, pp. 71–81.
- Budetta, P. (2004). Assessment of rockfall risk along roads. *Natural Hazards and Earth System Science*, Vol. 4, pp. 71–81.
- Carvalho, C.S, Macedo, E.S., Ogura, A.T. (2007). *Mapeamento de Riscos em Encostas e Margens de Rios* Instituto de Pesquisas Tecnológicas- IPT, Brasília, Brasil, 176p.
- Christian and Baecher, 2003, *Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering*: London and New York: John Wiley & Sons
- Estradas de Portugal S.A. (2009). *Caderno de Encargos Tipo de Obra, Volume VIII: Capitulo 15.06/07 – Obras de Arte integradas-Obras do Tipo Passagens Superiores e Obras dos nós*.
- Estradas de Portugal S.A. *Inspeções principais – Especificações técnicas. Sistema de gestão de conservação de obras de arte da EP*, 53p.
- Franklin, J. A. and Senior, S. A. (1997). The Ontario Rockfall Hazard Rating System. *Proceedings of the International Conference on Engineer, Geology and the Environment*, Balkema, Rotterdam, Vol. 1, pp. 647–656.
- Gao Y., Zhang, Y., Jiang, L., Huang, Z. (2011). Researches on index system of rock slope safety evaluation for open pit mine. *First International Symposium on Mine Safety Science and Engineering*, *Procedia Engineering*, Vol. 26, pp. 1692-1697.

- Liu, Y. C., Chen, C.S. (2007). A new approach for application of rock mass classification on rock slope stability assessment. *Engineering Geology*, Vol. 89, pp. 129-143.
- Lindsay, P., Campbell, R.N., Fergusson, D.A., Gillard, G.R., Moore, T.A. (2001). Slope stability probability classification, Waikato Coal Measures, New Zealand. *International Journal of Coal Geology*, Vol. 45, pp. 127–145.
- Maleku, M.G., Chalise, D. N., (2003). Slope Management in DOR – Retrospect and Prospects. International Seminar of Slope Management – PIARC, Kathmandu, Nepal, pp.
- McMillan, P., Matheson, G.D. (1997). A two stage system for highway rock slope risk assessment. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 34.
- Metropolis, N., A. Rosenbluth, M. Rosenbluth, A. Teller, E. Teller, Equation of State Calculations by Fast Computing Machines, *Journal of Chemical Physics* 21, 1087 (1953).
- Morgenstern, N.R. Managing risk in geotechnical engineering. Proc. 10th Pan-American Conf. Soil Mech. Found. Engng, Guadalajara 4, 02–126. 1995.
- Naghadehi, M. Z., Jimenez, R., Khalokakaie, R., Mohammad, S., Jalali, E. (2013). A new open-pit mine slope instability index defined using the improved rock engineering systems approach. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 61, pp. 1-14.
- Nunes, A., Guedes, P., Cardoso, A. (2010). Análise de situações de instabilidade em taludes rochosos de escavação em meio rodoviário, aplicação ao trecho da EN 222 entre a régua e a ponte das bateiras.
- Pierson, L. A., Davis, S. A., and Van Vickle, R. (1990). Rockfall hazard rating system implementation manual. Report FHWA-OR-EG-90-01. Federal Highway Administration, US Department of Transportation, 80p.
- Pinheiro et al. (2015). Sistema de avaliação de qualidade de taludes rochosos em fase de exploração.
- Romana, M. (1985). New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. Proceedings of the International Symposium on “The role of rock mechanics”, ISRM, Zacatecas, Mexico, pp.49–53.

-
- Lacasse, S. & Nadim, F. Uncertainties in Characterizing Soil Properties, Proceedings, Uncertainty in the Geologic Environment: from Theory to Practice, Geotechnical Special Publication No. 58, ASCE, Vol. 1, pp. 49-75. 1996.
- Saaty, T.L. (1980). The Analytic Hierarchy Process. McGraw-Hill International Book Company, New York.
- Terzaghi, K. (1950). Mechanism of Landslides. Harvard University, Department of Engineering, 41p.
- Vanmarcke, E.H. Probabilistic modeling of soil profiles. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol 103, No. GT11, November 1977, pp. 1227-1246. 1977a.
- Washington State Department of Transportation (2010), WSDOT's Unstable Slope Management Program, pp.
- Youssef, A., Maerz, N.H., Fritz, M.A. (2003). A risk-consequence Rockfall hazard rating system for Missouri highways. Proceedings 54th Highway Geology Symposium, September 24–26, Burlington, Vermont, pp. 175–195.

Anexos

Anexo I

Anexo I.1 – Sistema *Rock Mass Rating (RMR)*.

A – Parâmetros de classificação e pesos							
Parâmetro		Intervalo de variação					
1	Resistência da rocha intacta	Carga Pontual (MPa)	>10	4-10	2-4	1-2	Ver compressão simples
		Compressão simples (MPa)	>250	100-250	50-100	25-50	5-25 1-5 <1
2		Peso	15	12	7	4	2 1 0
		RQD (%)	90-100	75-90	50-75	25-50	<25
3		Peso	20	17	13	8	3
		Espaçamento das descontinuidades (m)	>2	0,6-2	0,2-0,6	0,06-0,2	<0,06
4		Peso	20	15	10	8	5
		Condição das descontinuidades (ver B)	Superfícies muito rugosas, não contínuas, sem separação, paredes de rocha não alteradas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação <1 mm, paredes ligeiramente alteradas	Superfície ligeiramente rugosas, separação <1 mm, paredes muito alteradas	Superfícies polidas ou enchimento com espessura <5 mm ou juntas contínuas com separação 1-5 mm	Enchimento mole com espessura >5 mm ou juntas contínuas com separação >5 mm
5		Peso	30	25	20	10	0
		Caudal por 10 m de túnel (l/min)	Nenhum	<10	10-25	25-125	>125
5		Relação pressão da água vs tensão principal máxima	0	<0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	>0,5
		Condições gerais	Comportamento seco	Água intersticial	Húmido	Escorrimentos	Entrada de água
	Peso	15	10	7	4	0	
B – Orientações para a classificação das condições das descontinuidades							
	Comprimento da descontinuidade (m)	<1	1-3	3-10	10-20	>20	
	Peso	6	4	2	1	0	
	Abertura (mm)	Nenhuma	<0,1	0,1-1	1-5	>5	
	Peso	6	5	4	1	0	
	Rugosidade	Muito rugoso	Rugoso	Ligeiramente rugoso	Quase liso	Liso	
	Peso	6	5	3	1	0	
	Enchimento (mm)	Nenhum	Enchimento duro <5	Enchimento duro >5	Enchimento mole <5	Enchimento mole >5	
	Peso	6	4	2	2	0	
	Grau de alteração	Não alteradas	Ligeiramente alteradas	Moderadamente alteradas	Muito alteradas	Em decomposição	
	Peso	6	5	3	1	0	
C – Correção relacionada com a orientação das descontinuidades							
Direção perpendicular ao eixo do túnel			Direção paralela ao eixo do túnel				
Abertura do túnel no sentido da inclinação		Abertura do túnel no sentido inverso da inclinação		Inclinação 45-90°	Inclinação 20-45°	Inclinação 0-20°	
Inclinação 45-90°	Inclinação 20-45°	Inclinação 45-90°	Inclinação 20-45°				
Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável	Razoável	Razoável	
D - Classes do maciço rochoso e significado							
Peso global	100-81	80-61	60-41	40-21	<21		
Classe	I	II	III	IV	V		
Descrição	Maciço rochoso muito bom	Maciço rochoso bom	Maciço rochoso razoável	Maciço rochoso fraco	Maciço rochoso muito fraco		
Tempo médio para aguentar sem suporte	20 anos para 15 m de vão	1 ano para 10 m de vão	1 semana para 5 m de vão	10 horas para 2,5 m de vão	30 minutos para 1 m de vão		
Coesão da massa rochosa (KPa)	>400	300-400	200-300	100-200	<100		
Ângulo de atrito da massa rochosa (°)	>45	35-45	25-35	15-25	<15		

Anexo I.2 – Sistema *Slope Mass Rock (SMR)*.

A – Fator de ajustamento para a orientação das descontinuidades (F1, F2, F3)						
Tipo de situação		Muito favorável	Favorável	Normal	Desfavorável	Muito desfavorável
P	$|\alpha_j - \alpha_s|$					
B	$|\alpha_j - \alpha_s - 180|$	>30	20-30	10-20	5-10	<5
P/B	F1	0,15	0,4	0,7	0,85	1
P/B	$|\beta_j|$	<20	20-30	30-35	35-45	>45
P	F2	0,15	0,4	0,7	0,85	1
B		1	1	1	1	1
P	$\beta_j - \beta_s$	>10	0-10	0	0-10	0<-10
B	$\beta_j + \beta_s$	<110	110-120	>120	-	-
P/B	F3	-6	0	-25	-50	-60

Onde, *P* representa a rutura planar; *B* representa a rutura por basculamento; α_s representa a direção do pendor do talude; α_j representa a direção do pendor das diáclases; β_s representa o pendor do talude; β_j representa o pendor das diáclases.

B – Fator de ajustamento segundo o método de escavação (F4)					
Método	Talude natural ou vertentes	Desmorte de pré-corte	Desmorte com explosivos do tipo <i>smooth blasting</i>	Desmorte com explosivos ou escavação mecânica	Desmorte com explosivo deficiente
F4	15	10	8	0	-8

C – Classificação da estabilidade					
Classe	I	II	III	IV	V
Coesão (MPa)	0,4	0,3-0,4	0,2-0,3	0,1-0,2	<0,1
Ângulo de atrito (°)	>45	35-45	25-35	15-25	15
SMR	81-100	61-80	41-60	21-40	0-20
Descrição	Muito boa	Boa	Normal	Má	Muito má
Estabilidade	Completamente estável	Estável	Parcialmente instável	Instável	Completamente instável
Roturas	Nenhuma	Alguns blocos	Algumas roturas planares ou muitas roturas por cunhas	Roturas planares ou roturas por cunhas de grandes dimensões	Roturas de grandes dimensões por planos contínuos
Sustimento	Nenhum	Ocasional	Sistemático	Correção	Re-escavação

D – Medidas de sustentação	
SMR	Medidas de sustentação
>65	Sem sustentação
45-70	Proteção (valas de pé de talude; redes de superfície de talude)
30-75	Reforço (pregagens, ancoragens)
20-60	Betão (projetado; de enchimento, contraforte e/ou vigas, muros de pé de talude)
10-40	Drenagem (superficial ou profunda)
10-30	Re-escavação (muros de contenção)

Anexo I.3 – Sistema Q.

A – Designação da qualidade da rocha		
	Descrição do Parâmetro	R.Q.D.
A	Muito mau	0-25
B	Mau	25-50
C	Médio	50-75
D	Bom	75-9
E	Muito bom	90-100

Notas : a) Quando RQD for ≤ 10 (incluindo o 0), considera-se o valor nominal de 10 no cálculo de Q; b) Considerar intervalos de 5 no RQD é considerado adequado.

B – Índice das famílias de descontinuidades		
	Descrição do Parâmetro	J_n
A	Nenhuma ou poucas descontinuidades presentes	0,5-1
B	Uma família de descontinuidades	2
C	Uma família mais descontinuidades esparsas	3
D	Duas famílias de descontinuidades	4
E	Duas famílias mais descontinuidades esparsas	6
F	Três famílias de descontinuidades	9
G	Três famílias mais descontinuidades esparsas	12
H	Quatro ou mais famílias, descontinuidades esparsas, maciços muito fraturados	15
I	Rocha esmagada, tipo terroso	20

Notas : a) Nas interseções utilizar $3 \times J_n$; b) Para bocas de entrada do túnel utilizar $2 \times J_n$.

C – Índice de rugosidade das juntas		
	Descrição do Parâmetro	J_r
i) Contacto entre as paredes de rocha das descontinuidades		
ii) Contacto entre as paredes de rocha antes de 10 cm de escorregamento		
A	Juntas descontinuas	4
B	Descontinuidades rugosas, irregulares e onduladas	3
C	Descontinuidades suaves e onduladas	2
D	Descontinuidades polidas e onduladas	1,5
E	Descontinuidades rugosas ou irregulares, planas	1,5
F	Descontinuidades lisas, planas	1
G	Descontinuidades polidas, planas	0,5
c) Não há contacto entre as paredes de rocha no escorregamento		
H	Zona contendo minerais argilosos e sufiente espessa de modo a impedir o contacto entre as paredes	1
I	Zonas esmagadas contendo areis de modo a impedir o contacto entre as paredes	1

Notas: a) As descrições das alíneas i) e ii) referem-se a escalas de amostragem de pequena e média dimensão, respetivamente; b) Adicionar 1 se o espaçamento médio da família descontinuidades mais relevante for maior que 3 m; c) $J_r=0,5$ pode ser usado para descontinuidades polidas e planas contendo lineações, se essas lineações estiverem orientadas na direção de menor resistência

D – Grau de alteração das descontinuidades			
	Descrição do Parâmetro	J_a	$\Phi(^{\circ})$ aprox.
i) Contacto entre as paredes de rocha das descontinuidades			
A	Paredes duras, compactas, preenchimentos impermeáveis (quartzo ou epibolito)	-	-
B	Paredes não alteradas, somente com leve descoloração	25-35	25-35
C	Paredes ligeiramente alteradas, com partículas arenosas e rochas desintegradas não brandas	25-30	25-30
D	Paredes com partículas siltosas ou areno-argilosas	20-25	20-25
E	Paredes com partículas de materiais moles ou de baixo ângulo atrito, tais como caulinite, mica, gesso, talco, clorite, grafite, etc., e pequenas quantidades de argila expansivas	8-16	8-16
ii) Contacto entre as partículas de rocha das descontinuidades antes de 10 cm de escorregamento			
F	Paredes com partículas de areia e rochas desintegradas, etc	4	25-30
G	Descontinuidades com preenchimento argiloso sobreconsolidado (contínuo, mas com espessura < 5 mm)	6	16-24
H	Descontinuidades com preenchimento argiloso subconsolidado (contínuo, mas com espessura < 5 mm)	8	12-16
I	Descontinuidades com enchimento argiloso expansivo, como por exemplo montmorilonite (contínuo, mas com espessura < 5 mm); o valor de J_a depende da percentagem de partículas de argila expansiva e do acesso da água, etc	8-12	6-12

iii) Não há contacto entre as paredes de rocha das descontinuidades

J	Zona ou bandas com rochas desintegradas ou esmagadas com argila (ver G, H e I para condições do material argiloso)	6,8 ou 8-12	6-24
K	Zonas ou bandas siltosas ou areno-argilosas (ver G, H e I para condições do material argiloso)	5	-
L	Zonas contínuas de argila (ver G, H e I para condições do material argiloso)	10,13,13-20	6-24

Nota: Os valores do ângulo de atrito residual (Φ), devem considera-se como um guia aproximado das propriedades mineralógicas dos produtos de alteração

E – Índice das condições hidrogeológicas

Descrição do parâmetro	J_w	Pressão da água aprox. (MPa)
A	Escavações secas ou caudal afluído pequeno, isto é <5 l/min localmente	$<0,1$
B	Caudal médio ou pressão que ocasionalmente arraste o preenchimento das descontinuidades	0,1-0,25
C	Caudal ou pressão elevada em rochas competentes sem preenchimento	0,25-1
D	Caudal ou pressão elevada, com considerável arrastamento do preenchimento das descontinuidades	0,25-,
E	Caudal excepcionalmente elevado ou pressão explosiva, decaindo com o tempo	>1
F	Caudal excepcionalmente elevado ou pressão contínua, sem decaimento	>1

Notas : a) Os fatores nos casos C e F são estimados para condições naturais. O parâmetro J_w deverá ser aumentado caso sejam efetuadas drenagens; b) Os problemas especiais relacionados com a formação de gelo não são considerados

F – Fator de redução de tensões

i) Zonas de fraqueza intersectando a escavação, o que pode causar perdas do maço rochoso quando o túnel for escavado

Descrição do Parâmetro	SRF
A	Ocorrências de zonas alteradas múltiplas contendo argilas ou rochas quimicamente desintegradas em torno da cavidade (a qualquer profundidade)
B	Zonas de baixa resistência contendo argila ou rocha quimicamente desintegrada (profundidade da escavação ≤ 50 m)
C	Zonas de baixa resistência contendo argila ou rocha quimicamente desintegrada (profundidade da escavação > 50 m)
D	Zonas múltiplas de corte em rocha competente, sem argilas, com rocha desintegrada na vizinhança (todas as profundidades)
E	Zonas singulares de corte em rocha competente, sem argila (profundidades da escavação ≤ 50 m)
F	Zonas singulares de corte em rocha competente, sem argila (profundidades da escavação > 50 m)
G	Rocha competente, problemas de tensões na rocha (todas as profundidades)

ii) Rocha competente, problemas de tensões na rocha

Descrição	σ_c/σ_1	σ_θ/σ_c	SRF
H	Tensões baixas, próximo da superfície, diaclásas abertas	>200	$<0,01$
I	Tensões médias, condições de tensão favoráveis	200-10	0,01-0,3
J	Tensões altas, estrutura rochosa muito fechada (usualmente favorável para a estabilidade, pode ser desfavorável para a estabilidade das paredes)	10-5	0,3-0,4
K	Explosões moderadas de rochas depois >1 hora	5-3,0	0,33-0,16
L	Explosões moderadas de rochas maciças em poucos minutos	3-2	0,65-1
M	Explosões intensas de rochas maciças	<2	>1

iii) Rocha esmagada: plastificação de rochas incompetentes sob a influência de altas pressões de rocha

Descrição	σ_θ/σ_c	SRF
N	Pressão moderada da rocha esmagada	1-5
O	Pressão elevada da rocha esmagada	>5

iv) Rochas expansivas: atividade química expansiva devida à presença da água

Descrição	SRF
P	Pressão de expansão moderada
Q	Pressão de expansão elevada

Notas : Para a alinea i) reduzir os valores de SRF de 25% a 50% se as zonas alteradas influenciarem mas não intersectarem a escavação; b) Para os casos da alinea ii) e para tensões virgens fortemente anisotrópicas (se medidas: quando $5 \leq \sigma_1/\sigma_3 \leq 10$, reduzir σ_c para $0,75\sigma_c$. Quando $\sigma_1/\sigma_3 > 10$, reduzir σ_c para $0,5\sigma_c$, onde σ_c é a resistência à compressão simples, σ_1 e σ_3 são as tensões principais máxima e mínima, e σ_θ a tensão tangencial máxima (estimada através da teoria da elasticidade) ; c) Ainda na alinea ii), quando a profundidade da coroa é inferior ao vão, deve-se aumentar o valor de SRF 2,5 a 5 vezes (ver H), d) Casos de rocha esmagada podem ocorrer para profundidades $H > 350Q^{1/3}$. A resistência à compressão do maciço é de, aproximadamente, $0,7\gamma Q^{1/3}$, onde γ é o peso volumico da rocha em KN/m^3

G – Classes de classificação	
Valores de Q	Tipo de rocha
0,001-0,01	Excepcionalmente má
0,01-0,1	Extremamente má
0,1-1	Muito má
1-4	Má
4-10	Medianda
10-40	Boa
40-100	Muito boa
100-400	Extremamente boa
400-1000	Excepcionalmente boa

Anexo II

Anexo II.1 – Classificação preliminar do sistema *Rockfall Hazard Rating Systems (RHRS)*.

Criteria/Class	A	B	C
Estimated potential for rock on roadway	High	Moderate	Low
Historical rockfall activity	High	Moderate	Low

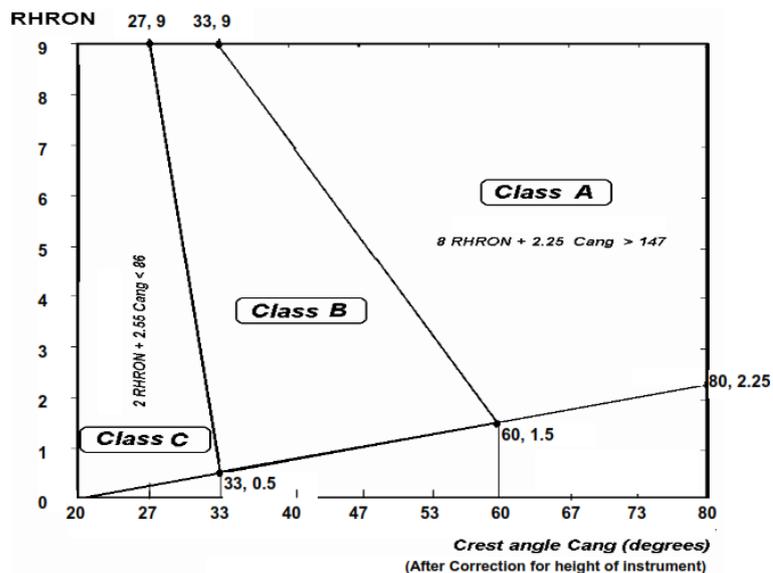
Anexo II.2 – Sistema *Rockfall Hazard Rating Systems (RHRS)*.

Category		Rating Criteria and Score				
		3 Points	9 Points	27 Points	81 Points	
Slope height		25 Feet	50 Feet	75 Feet	100 Feet	
Ditch effectiveness		Good catchment	Moderate catchment	Limited catchment	No catchment	
Average vehicle risk		25% of the time	50% of the time	75% of the time	100% of the time	
Percent of decision sight distance		Adequate sight distance, 100 % of low design value	Moderate sight distance, 80% of low design value	Limited sight distance, 60% of low design value	Very limited sight distance 40% of low design value	
Roadway width including paved shoulders		44 feet	36 feet	28 feet	20 feet	
Geologic Character	Case 1	Structural condition Rock friction	Discontinuous joints, favorable orientation Rough, Irregular	Discontinuous joints, random orientation Undulating	Discontinuous joints, adverse orientation Planar	Continuous joints, adverse orientation Clay, infilling, or slickensided
	Case 2	Structural condition Difference in erosion rates	Few differential erosion features Small difference	Occasional erosion features Moderate difference	Many erosion features Large difference	Major erosion features Extreme difference
<u>Block size</u>		<u>1 Foot</u>	<u>2 Feet</u>	<u>3 Feet</u>	<u>4 Feet</u>	
Volume of rockfall/event		3 cubic yards	6 cubic yards	9 cubic yards	12 cubic yards	
Climate and presence of water on slope		Low to moderate precipitation; no freezing periods; no water slope	Moderate precipitation or short freezing periods or intermittent water on slope	High precipitation or long freezing periods or continual water on slope	High precipitation and long freezing periods or continual water on slope and long freezing periods	
Rockfall history		Few falls	Occasional falls	Many falls	Constant falls	

Anexo II.3 - Sistema *Rockfall Hazard Rating Ontario (RHRON)*.

Rating	F1 – Magnitude	F2 – Instability	F3 - Reach	F4 - Consequences	
	Qtot (m³)	Frequency of falls	Crest angle – Cang (degrees)	Traffic density (AADT)	Visibility of rock on highway
0	1	>100 yr (slight chance of a fall)	20	0-750	>250m
1	2	50 yr	27	750-1500	233
2	3	10 yr	33	1500-3000	217
3	5	5 yr	40	3000-6000	200
4	8	Annually	47	6000-11000	183
5	13	6 Monthly	53	11000-20000	167
6	21	Monthly	60	20000-35000	150
7	36	Bi Weekly	67	35000-65000	133
8	60	Weekly	73	65000-11000	117
9	>100	Daily – Highly unstable, collapse imminent	80 (high face, narrow shoulder)	>110000	<100 m (very limited visibility)

Anexo II.4 - Classificação preliminar do sistema *Rockfall Hazard Rating Ontario (RHRON)*.



Anexo II.5 - Sistema *Rock Risk Assessment for Quarries (ROFRAQ)*.

Quarry: _____ Slope: _____ Date: _____

ARE THERE POTENTIAL FALLING BLOCKS? a	Joint sets (a)		Joint continuity (b)		Faults (c)		Observed overblasting damage (d)		Bench & berm cleanup (e)		Blocks on slopes (f)		Slope height (g)	$A = \frac{((a \cdot b) + c + d + e + f) / 2}{g}$ $0 < A < 10$
	0-1	0.5	<1 m	0.6	NO	0	Pre-split	-2	Very regular	-3	Many	7-10	<25 m		0.5
2	1	1-3 m	0.8	Small x 1	0.5	Small x 1	Half-barrels	-0.5	Regular	-1	Several	3-7	50 m	0.8
3	3	3-10 m	1	Large x 1	1	Large x 1	None	0	Occasional	0	Some	1-3	100 m	1
4	5	10-20 m	1.2	2	1.5	2	Slight	1	Infrequent	1	Few	0.1-1	150 m	1.3
>5	7	>20 m	1.4	>2	2	>2	Excess overbreak	2.5	Little/none	3	None	0.0-0.1	>250 m	1.5

ARE THE BLOCKS POTENTIALLY UNSTABLE? b	GEOTECHNICAL STUDY + JOINT DATA INTERPRETATION + IN SITU OBSERVATION/RECORDING OF SLOPE LOCAL AND GENERAL INSTABILITY MECHANISMS									
	Mechanism type (observed or estimated)						Affected slope area (%)			
	SIMPLE	B* (*0.8)	COMPLEX	B* (*1.1)	EVOLUTIVE	B* (*1.4)	IN-SITU OBS.	GEOTECH. STUDY	FALLEN BLOCKS AT SLOPE TOE	AVERAGE (correct. B*) P _i
	Plane failure		Ravelling		Block toppling		A			
Wedge failure		Many blocks		Flexural toppling		B				
Circular failure		Free blocks		Footwall slopes		C				
B* is a correction factor according to failure mechanism complexity										
Where P _i is the corrected average for the affected slope area %. Rating (B) is calculated as: $B = 10 \times \left(1 - \prod_{i=1}^n \left(1 - \frac{P_i}{100} \right) \right)$										
$0 < B < 10$										

IS A TRIGGERING EFFECT LIKELY TO PRODUCE INSTABILITY? Triggering Phenomena c	Max. 24h rainfall for a 50-year return period (a)		Average 0°C frost-free period (days) (b)		Slope water (c)		Weathering/erosion (d)		Blasting vibration (specific load) (e)		$C = a + b + c + d + e$ $0 < C < 10$
	<50 mm	0.1	>300	0.1	Dry	0	Unweathered	0	<250 gr/m ³	0.1	
	50 – 80 mm	0.5	250-300	0.4	Damp	0.1	Slightly weathered	0.1	250-400 gr/m ³	0.5	
	80 – 110 mm	1.5	200-250	1	Wet	0.3	Weathered	0.3	400-550 gr/m ³	1	
	110- 150 mm	4	150-200	2	Dripping	0.7	Very weathered	0.7	550-700 gr/m ³	1.5	
>150 mm	6	<150	2.5	Flowing	1	Extremely weathered	1	>700 gr/m ³	2		

ARE THE BLOCKS LIKELY TO REACH THE MINE BOTTOM? d	Bench height (m) & Berm/catch-bench width [BW] (m)										General slope dip (a)	Berm conditions & cleanup (b)		Face irregularity (c)		$D = (D_b + a + b + c) \cdot d$ $0 < D < 10$ Estimated probability of block reaching mine bottom (RockFall)
	5		10		12		15		20							
	BW	D _b	BW	D _b	BW	D _b	BW	D _b	BW	D _b						
	<1	10	<1	10	<2	10	<3	10	<4	10	40°	+2	Optimal	0	High		+2
1.5	7	2	9	3	8	4	9	5	9.5	48°	+1	Good	+0.5	Medium	+0.5	
2	4	3	6	4	5	5	6	6	7.5	56°	+0.5	Limited	+1	Low	0	
2.5	1	4	2	5	2.5	6	3	7.5	2.5	60°	0	Poor	+1.5	Mesh / ditches (d)		
>3	0	5	0.2	6	1	7	1	9	0.5	72°	-0.5	Very poor	+3	Yes	0	
		>5.5	0	7	>	0	>8.5	0	10	0	80°	-1		No	1	

ARE BLOCKS LIKELY TO IMPACT ON WORKERS OR MACHINERY? e	Block size (1 falling block) (a ₁)		Rock volume (>1 falling blocks) (a ₂)		Time spent at slope toe by machinery/workers (%) (b)		Space occupied by machinery/workers vs. slope length (%) (c)		Position of machinery/workers in relation to slope toe (d)		$E_{mach} = (b/100) \cdot (c - mach/100)^a \cdot (a_1 \text{ or } a_2)^d \cdot 10$ $E_{pers} = (b/100) \cdot (c - pers/100)^a \cdot (a_1 \text{ or } a_2)^d \cdot 10$ $E = 10 - [(10 - E_{mach}) \cdot (10 - E_{pers}) / 10]$ $0.00025 < E < 10$
	<0.001 m ³	0.9	<0.1 m ³	1	Days/year shifts/day hours/shift % time under slope	Space occupied by machine vs. slope length (C _{mach})	Space occupied by persons (1 m) vs. slope length (C _{pers})	Very close (x/H < 10 %)		1	
	0.001-0.1 m ³	1	0.1-5 m ³	1.5				Close (x/H < 25 %)	0.5		
	0.1-1 m ³	1.2	5-50 m ³	2				Average (x/H < 50 %)	0.1		
	>1 m ³	1.5	>50 m ³	2.5				Far (x/H < 100 %)	0.01		
					Very far (x/H > 100 %)	0.001					

f SLOPE ROCKFALL HISTORY						
No recorded rockfalls	Very few rockfalls	No data Unreliable observations	Occasional rockfalls	Several rockfalls No accidents	Some rockfalls 1 reported accident	Frequent rockfalls >1 reported accident
0.75	0.9	1.0	1.1	1.2	1.4	1.5

ROFRAQ = (A x B x C x D x E x F) =

ROFRAQ_{BASIC} = (A x B x C x D) =

ROFRAQ_{pers} = (A x B x C x D x E_{pers} x F) =

ROFRAQ_{mach} = (A x B x C x D x E_{mach} x F) =

Estimated probability of an accident due to rockfall occurring on the slope = ROFRAQ / 100,000 =

Preliminary assessment of the quarry face hazard according to ROFRAQ results					
Less than 10	10-25	25-100	100-250	250-1000	More than 1000
VERY LOW RISK No special measures required.	LOW RISK Simple precautionary measures required (inc. regular observation)	LOW TO AVERAGE RISK Some simple safety precautions required e.g. avoid traffic under slope during rainy periods, etc.	AVERAGE RISK Important safety measures required. Improve berms and catch-benches, cleanup, blasting control techniques, etc.	HIGH RISK Highly hazardous. Redraft mining plan, enlarge catch-benches, redesign locally, etc.	VERY HIGH RISK Redesign quarry, install meshes, build ditches, etc.

Anexo II.6 – Sistema *Missouri Rockfall Hazard Rating System (MORFH RS)*.

SH (Slope height)	10'	20'	30'	40'	50'	60'
(Risk) Rating	2	4	6	8	10	12

SA (Slope angle)	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
(Risk) Rating	0	2	4	6	8	10	12

for risk side. **AND** for consequence side:

SA (Slope angle)	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	85°	90°
(Consequence) Rating	0	12	10	6	3	2	4	12	0

RI (Rockfall instability)	Class No.	Description	(Risk) Rating
Completely unstable	4	Rocks often fall in this area and there is considerable evidence for that in the ditch and from maintenance records; this will be sites where severe rock fall events are common	12
Unstable	3	Rocks fall from time to time; the rock falls will occur frequently during certain times of the year, but will not be a significant problem during other times; this also is used where significant rock falls have occurred in the past	9
Partially stable	2	Rocks fall occasionally; rock falls can be expected several times per year, usually during storms	6
Stable	1	Very few blocks fall during a the year and only during a severe storms	3
Completely stable	0	No rock falls; no historical and physical evidence for any rock fall in the area	0

WF (Weathering factor)	Class No.	Description	(Risk) Rating
High	4	Major erosion features are present, there are many overhanging areas along the rock cut, differential erosion is evident along the rock cut	24
Moderate	3	Some erosion features are present, differential erosion features are large and numerous throughout the rock cut	18
Low	2	Minor differential erosion features appear widely distributed throughout the area, the differential erosion rate is limited	12
Slightly	1	Few differential erosion features, and the erosion rate is very low	6
Fresh	0	No evidence for weathering and the walls are smooth and planar	0

SOIR (Strength of intact rock)	Class No.	Description	(Risk) Rating
Very strong rock	4	>14504 psi, many blows by the hammer needed fracture the rock	0
Strong rock	3	7250 – 14504 psi, several blows to fracture the rock	3
Moderately strong rock	2	3626 – 7252 psi, a firm blow needed to fracture the rock	6
Weak rock	2	725 – 3626 psi, can indent the rock with a pick	9
Very weak rock	0	145 – 725 psi, can crumble by hand	12

Bench present?	Yes	NO	(if yes look at the bench and faces adobe the bench)		
Score			4	2	0
Faces above bench	Weathering		High	Low	Fresh
	Face irregularity		High	Moderate	Smooth
	Face looseness		Large	Moderate	No
Bench characteristics	Bench width		Narrow<5'	Moderate 15'	Wide<20'
	Rock on the bench		Large amount	Moderate	None
	Slope of the bench		Toward road	Horizontal	Back slope
Total score:			(if greater than 12 then bench is considered "bad")		

Screening calculation (form video) to determine if detailed assessment is required

Factor	Detailed assessment triggered IF
Weathering / Karst	1. A highly weathered rating on the video image, OR 2. Any indication of Karst (voids, filled sinks), OR 3. Any significant differential erosion (but back voids, overhangs), OR
Face Irregularity / Face Looseness	1. A highly irregular face or a moderately irregular face high on the cut, OR 2. A highly loose face or a moderately loose face high on the cut, OR
Fallen rock in the ditch or on the cut	Significant amount of loose rock visible in the ditch, OR
Ditch effectiveness	Ditch effectiveness is very low (too small, too narrow), OR
Adversely oriented discontinuities	Indication of adversely oriented discontinuities, OR
Bench(es)	Presence of bench(es).

NO Detailed assessment triggered IF					
Slope height		1. Slope height less than 10', OR 2. The slope height is less than the width of the ditch plus the shoulder.			
ERFQ (Expected rock fall quantities)	0 ft/ft	10 ft/ft	20 ft/ft	30 ft/ft	40 ft/ft
(Consequence) Rating	0	3	6	9	12
SW (Shoulder Width)	12'	9'	6'	3'	0'
(Consequence) Rating	0	3	6	9	12
NOL (number of lanes)	Four lanes	Three lanes	Two lanes	One lanes	
(Consequence) Rating	0	3	6	12	
ADT (Average daily traffic)	5000 Cars / day	10000 Cars / day	15000 Cars / day	20000 Cars / day	
(Consequence) Rating	3	6	9	12	
AVR (Average vehicle risk)	25% (time a vehicle is in rock cut zona)	50% (time a vehicle is in rock cut zona)	75% (time a vehicle is in rock cut zona)	100% (time a vehicle is in rock cut zona)	
(Consequence) Rating	3	6	9	12	
DSD (Decision sight distance)	Class No.	Description			(Consequence) Rating
Very limited	3	Distance is very small and there are many vertical and horizontal curves on the roads, vegetation obscures falling rock			12
Limited	2	There are some curves and obstacles on the road not giving the driver enough time to perceive that there are falling rocks on the road			8
Moderate	1	There are few curves and obstacles and the driver can control the vehicle easily because he sees falling or fallen rocks			4
Adequate	0	The road is completely straight without many obstacles or curves and the driver can see entire rock face and road at any time			0
Adjustment factor IF applicable					
AOD (Adversely oriented discontinuities)	<20°,90°	20 – 45°	45 – 65°	65 – 90°	
(Consequence) Rating	0	4	8	12	
Adjustment factor IF applicable					
KE (Karst effect)	Class No.	Description			(Consequence) Rating
Large	4	Karst features that appear on the rock cut face, width is 150', filled by boulders and cobbles with weak materials			12
Medium	3	Karst features that appear on the rock cut face, width is 100', filled by boulders and cobbles with weak materials			9
Small	2	Karst features that appear on the rock cut face, width 50', filled by boulders and cobbles or undercut with weak materials			6
Possible	1	Carbonate rocks that could possibly have karst features but are not evident on the rock cut face			3
None	0	Non-carbonate rocks (igneous, sandstone)			0
(The following is internally calculated)					
ERFQ/DV (Ditch Capacity Exceedance)	1x	2x	3x	4x	
Rating Value	0	5	10	15	
FI (Face irregular)	Class No.	Description			(Risk) Rating
Very high irregular face	4	There are many joints and overhanging features, irregular features everywhere throughout the site, the face is stepped everywhere			12
Highly irregular face	3	Much of the face is irregular and there are many joints and stepped faces			9
Moderately irregular face	2	There are many irregular areas in the face			6
Slightly irregular face	1	There are some irregular areas along the face			3
Smooth face	0	Very smooth face			0
FL (Face looseness)	Class No.	Description			(Risk) Rating
Very highly loose material	4	The face is completely covered by loose blocks			12
Highly loose material	3	Much of the face is covered by loose blocks			9
Moderately loose material	2	Some of the face is covered by loose blocks			6
Low loose material	1	Little of the face is covered by loose blocks			3

No loose material	0	There are no loose blocks on the face			0		
BS (Block Size)	5'	2.5'	1'	0.5'			
(Risk) Rating	0	4	8	12			
for risk side. AND for consequence side:							
BS (Block Size)	0.5'	1'	2.5'	5'			
(Consequence) Rating	0	4	8	12			
WOF (Water on face)	Class No.	Description			(Risk) Rating		
Flowing	4	Water flows from the face			12		
Dripping	3	Water drips from the face			9		
Wet	2	There is evidence of significant water on the face			6		
Damp	1	There is evidence of water on the face			3		
Dry	0	There is no water on the face			0		
DW (Ditch width)	15'	10'	5'	0'			
(Consequence) Rating	0	4	8	12			
AND							
DV (Ditch volume)	30 ft³/ft	25 ft³/ft	20 ft³/ft	15 ft³/ft	10 ft³/ft	5 ft³/ft	0 ft³/ft
(Consequence) Rating	0	2	4	6	8	10	12
For vertical slopes with no bad benches. OR for non-vertical slopes and bad bench(es):							
(Modified) DW (Ditch width)	30'	20'	10'	0'			
(Consequence) Rating	0	4	8	12			
AND							
DS (Ditch shape)	Large back slope (1V:4H), 14°	Moderate back slope (1V:6H), 9°	Slight back slope (1V:8H), 7°	Flat 0°			
(Consequence) Rating	0	4	8	12			

Anexo III

Anexo III.1 – Sistema *Slope Quality Index (SQI)*.

Fatores	Parâmetros		Categorias e cotações					
Geométrico 0.17	Altura do talude (m) 0.25		<10	10-20	20-30	30-40	>40	
			Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito alto	
		Cotação	1	2	3	4	5	
	Inclinação do talude (°) 0.35		<30	30-40	41-50	51-60	> 60	
			Muito gradual	Gradual	Médio	Inclinado	Muito inclinado	
		Cotação	1	2	3	4	5	
	Inclinação da banqueteta 0.15		Correta ²	Incorreta ¹	-	-	-	
			Cotação	1-2'	4-5'	-	-	-
Largura da banqueteta (m) 0.25		0-1	1-2	2-3	3-4	>4		
		Cotação	5	4	3	2	1	
Geológico 0.14	Tipo de formação 0.50	Tipo ^a 0.40	I	II	III	IV	V	
			Cotação	1	2	3	4	5
		Grau de alteração (W) ^b 0.30	Inalterado (W=1)	Ligeiramente (W=2)	Moderado (W=3)	Altamente (W=4)	Decomposto (W=5)	
			Cotação	1	2	3	4	5
		Falhas ^c 0.30	Existe	-	-	-	-	
			Cotação	4-5'	-	-	-	-
	Blocos 0.20	RHRSm2 1.00	<51	51-153	153-333	333-459	>459	
			Cotação	1	2	3	4	5
	Sistema empíricos de classificação 0.30	Q 0.33	40-1000	10-40	4-10	1-4	0.001-1	
			Cotação	1	2	3	4	5
		RMR 0.34	100-81	80-61	60-41	40-21	20-0	
			Cotação	1	2	3	4	5
		SMR 0.33	100-81	80-61	60-41	40-21	20-0	
			Cotação	1	2	3	4	5
Sistema de Drenagem 0.11	Drenagem superficial 0.60	Estado de conservação 0.35	Muito bom	Bom	Médio	Mau	Muito mau	
			Cotação	1	2	3	4	5
		Estado de manutenção 0.45	Bom	Médio	Mau	-	-	
			Cotação	1	2	3	-	-
		Presença 0.20	Sim	Não	-	-	-	
		Cotação	1-2'	4-5'	-	-	-	
	Drenagem profunda 0.20	Presença 1.00	Sim	Não	-	-	-	
			Cotação	1-2'	4-5'	-	-	-
		Drenagem das banquetetas 0.20	Sim	Não	-	-	-	
		Cotação	1-2'	4-5'	-	-	-	
Inspeções visuais 0.13	Estado de conservação 0.60	Classificação	Muito bom	Bom	Médio	Mau	Muito mau	
			Cotação	1	2	3	4	5
	Estado de manutenção 0.40	Classificação	Bom	Médio	Mau	-	-	
			Cotação	1	2	3	-	-
Monitorização ^a 0.11	Células de carga 0.25	Intervalos	1	2	3	4	5	
			[0%-20%[	[20%-40%[	[40%-60%[	[60%-80%[	[80%-100%[
			Cotação	1	2	3	4	5

		Intervalos	1	2	3	4	5
			[0%-20%[	[20%-40%[	[40%-60%[	[60%-80%[	[80%-100%[
	Inclinómetros 0.25	Cotação	1	2	3	4	5
		Intervalos	1	2	3	4	5
	Piezómetros 0.25	Cotação	1	2	3	4	5
		Intervalos	1	2	3	4	5
	Marcas topográficas 0.25	Cotação	1	2	3	4	5
		Intervalos	1	2	3	4	5
Historial 0.07	Acidentes no talude 0.70	Queda de blocos 0.25	Nenhum	Inativo	Alguns	Ativo	Muito ativo ^m
		Cotação	1	2	3	4	5
		Planar 0.25	Nenhum	Inativo	Alguns	Ativo	Muito ativo
		Cotação	1	2	3	4	5
		Cunha 0.25	Nenhum	Inativo	Alguns	Ativo	Muito ativo
		Cotação	1	2	3	4	5
		Circular 0.25	Nenhum	Inativo	Alguns	Ativo	Muito ativo
	Cotação	1	2	3	4	5	
	Intervenções 0.30	Nível 3	Nível 2	Nível 1	-	-	
	Cotação	1-2'	3	4-5'	-	-	
Ambiental/Tráfico 0.08	Zona sísmica ^m 0.30	Tipo 2 0.60	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5
		Cotação	5	4	3	2	1
		Tipo 1 0.40	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5-1.6
		Cotação	5	4	3	2	1
	Precipitação anual (mm) 0.50	<100	100-500	500-1000	1000-2000	>2000	
	Cotação	1	2	3	4	5	
	Tráfico 0.20	Velocidade máxima (Km/h) 0.50	50 – 60	60 – 70	70 – 90	90 – 100	100 - 120
		Cotação	1	2	3	4	5
Tráfego Médio Diário (TMD) (Veículos) 0.50		<18000	18000-19000	19000-20000	20000-22000	> 220000	
Cotação		1	2	3	4	5	
Proteção 0.10	Proteção à superfície 0.80	<25%	[25%-50%[	50%	]50%-75%]	]75%-100%]	
	Cotação	5	4	3	2	1	
	Proteção vegetal 0.20	Não existe	Pontual	Uniforme	-	-	
	Cotação	5	4-3'	1-2'	-	-	
Imediações 0.09	Sobrecargas 0.60	Sim	Não	-	-	-	
	Cotação	5	1	-	-	-	
	Vibrações nas imediações 0.40	Sim	Não	-	-	-	
	Cotação	5	1	-	-	-	

- Para uma cotação do tipo “Correta” a inclinação da banquetta deve ser oposta à inclinação do talude.
- Os tipos de rocha definidos baseara-se nos grupos definidos por Naghadedhi et al. (2013) e Hoek et al. (1995) e poderão ser adaptados e modificados de acordo com os tipos de formações existentes na geografia de aplicação do *SQI*.

Tipo	I	II	III	IV	V
Descrição das formações	Metamórficas: Gnaise, Quartezite, Amfibolite e Migmatito; Ígneas: Granito, Granodiorito, Diorito e Gabro	Metamórficas: Corneana; Sedimentares: Conglomerado; Ígneas: Aglomerado, Andesito, Norite, Obsidiana e Dolerite	Sedimentares: Arenito e Gauvaque; Ígneas: Basalto, Tufo, Brechia, Dacite e Riolite	Metamórficas: Xisto, Milonite, Mármore; Sedimentares: Anidrite e Gesso	Metamórficas: Filito e Ardósia; Sedimentares: Calcário, Siltito e Argilito

- O grau de alteração foi proposto por Bieniawski.
- Este parâmetro deve ser avaliado caso existam falhas desfavoráveis a orientação do talude. No caso de não existirem falhas, este parâmetro não deve ser avaliado.
- O fator monitorização considera a avaliação por meio de percentagens, medindo o intervalo entre o valores medido no aparelho e o limite definido em fase de projeto.
- Nenhum: nenhum acidente registado; Inativo: pequeno/médio acidente em 10 anos; Algum: pequeno/médio acidente em 5 anos; Ativo: pequeno/médio acidente em 3 anos e grandes acidentes em 1 no; Muito ativo: pequeno, médio ou grande acidente num espaço de 1 ano.
- Os intervalos definidos variam de acordo com a zona sísmica e ação sísmica de acordo com o estipulado no Eurocódigo 8 - NA-3.2.1 (2).
- Estas cotações apresentam um intervalo de valores com o propósito de melhor traduzir a subjetividade da avaliação. Cabe ao avaliador decidir se para um determinado parâmetro a cotação deverá ser máxima (5), ou se esse mesmo parâmetro apresenta um relevância reduzida, na avaliação do talude, que não justifique tal penalização.