

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**PROCESSOS DE DOMÍNIO DE TERRENOS EM
PEDREIRAS DE ROCHA ORNAMENTAL
O EXEMPLO DA PEDREIRA DE ARDÓSIA MILHÁRIA
S. MARTINHO DO CAMPO – VALONGO**

BRÍGIDA BEATRIZ OLAIO MORAIS ALVES

Dissertação realizada no âmbito do
MESTRADO EM ENGENHARIA DE MINAS E GEO-AMBIENTE

Orientador: Professor Doutor José Cardoso Guedes
Co-orientador: Professor Doutor Alexandre Júlio Machado Leite

29 de junho de 2021

“Somos máquinas de sentimentos que pensam e não máquinas racionais que se emocionam.”

António Damásio

RESUMO

Portugal é extremamente valorizado, ao nível da qualidade das rochas ornamentais, pelas empresas extratoras, transformadoras e fabricantes de equipamentos, compreendendo-se, assim, a sua presença no *ranking* dos principais produtores mundiais de rochas ornamentais. A ardósia, uma rocha ornamental, por deter uma beleza, resistência e cor inalterável é transformada em inúmeros produtos tanto para construção interior, como exterior, impulsionando a sua vasta comercialização.

Geologicamente, a ardósia, explora-se na região do anticlinal de Valongo, em terrenos da época do Ordovício, que datam os 450 milhões de anos. A Empresa de Lousas de Valongo, S.A., é proprietária de mais de 100 hectares de área extraível, constituindo a maior exploração a céu aberto de ardósia em Portugal.

A instabilização de taludes, repercussão da exploração de maciços rochosos, comporta um perigo elevado para as atividades humanas e, consequentemente, prejuízos económicos e/ou vítimas. Todavia, a solução passa pela sua mitigação por intermédio de um adequado conhecimento das propriedades e comportamento dos maciços que integram os taludes em questão, especialmente, a sua caracterização e avaliação de estabilidade.

O presente estudo pretende abordar a importância de um estudo de geomecânico da área mineira no apoio ao domínio de taludes/hasteais e, respetiva, otimização em explorações de maciços rochosos a céu aberto, centralizando-se no caso específico da Pedreira da Milhária em São Martinho do Campo, Valongo. Ímpar devido aos antigos poços de pedreiras subterrâneas, atualmente, desenvolve exploração de material ardosífero a céu aberto.

Neste âmbito realizou-se um levantamento de dados relevantes para o estudo, especificamente, qual o método de exploração e domínio de terrenos adotado na referida pedreira e, também, pretensões de dimensionamento de taludes para futura área de expansão tendo em conta as possíveis interações com as antigas pedreiras que irão manifestar a sua real geometria e dimensão à medida que progredirão os trabalhos de superfície.

Deste modo, definiram-se características relevantes do maciço rochoso para aplicação das classificações geomecânicas, abrangendo uma considerável amostragem das descontinuidades presentes, obtendo-se um cenário global da qualidade do maciço rochoso intercetado pelas escavações das antigas pedreiras nas distintas zonas.

Palavras-Chave: Rochas ornamentais, Ardósia, Valongo, Caracterização Maciços Rochosos, Instabilização de Taludes, Medidas Mitigadoras.

ABSTRACT

Portugal is extremely valued, in terms of the quality of ornamental stones, by companies extracting, transforming and manufacturing equipment, thus understanding its presence in the *ranking* of the world's leading producers of ornamental stones. Slate, an ornamental stone, for having and unchanging beauty, strength and colour is transformed into numerous products for both interior and exterior construction, boosting its vast commercialization.

Geologically, slate is explored in the *Valongo* anticline region, in lands dating back to 450 million years. The *Empresa de Lousas de Valongo, S.A.*, owns more than 100 hectares of extractable area, constituting the largest open-pit slate exploration in Portugal.

The instability of slopes, repercussions from the exploitation of rock masses, poses a high danger to human activities and, consequently, economic losses and/or victims. However, the solution involves its mitigation through an adequate knowledge of the properties and behavior of the massifs that make up the slopes question, especially their characterization and stability assessment.

This study intends to address the importance of a Geomechanical study of the mining area in supporting the domain of slopes/stems and, respectively, optimization in open-air rock mass explorations, focusing on the specific case of *Pedreira da Milhária* in *São Martinho do Campo, Valongo*. Unique due to the old underground quarry's wells, it is currently exploring open-pit slate material.

In this context, a survey of relevant data for the study was carried out, specifically, what is the method of exploration and domain of land adopted in that quarry and, also, intentions of dimensioning slopes for future expansion area, considering the possible interactions with the old quarries that will manifest their real geometry and dimension as the surface works progress.

Thus, relevant characteristics of the rock mass were defined for the application of geomechanical classifications, covering a considerable sample of the present discontinuities, obtaining a global scenario of the quality of the rock mass intersected by the excavations of the old quarries in the different zones.

Key words: Dimensional Rocks, Slate, *Valongo*, Rock Mass Characterization, Slope Instability, Mitigating Measures.

AGRADECIMENTOS

A entrega desta dissertação simboliza a finalização de uma importante fase a nível académico, mas igualmente relevante a nível pessoal. Várias foram as pessoas que, direta ou indiretamente, deram o seu contributo para que tudo isto se tornar real. A todas elas adoraria manifestar o meu mais sincero agradecimento.

Aos meus orientadores, Professor Alexandre Leite, Professor José Guedes e Professor Simões Cortez, agradeço a incansável disponibilidade, colaboração, empenho e exigência durante a realização deste trabalho e que sem os quais não seria exequível a sua materialização.

À Empresa de Lousas de Valongo, S.A. e ao Engenheiro Tiago Vieira, agradeço a disponibilidade dos dados cedidos e a oportunidade única que me proporcionou de presenciar todos os processos de extração, transformação e estabilização intrínsecos à execução deste trabalho.

Agradeço a todos os meus amigos, à Laura Correia, ao João Neto, à Catarina Pinho, à Cátia Correia e demais amigos, que me acolheram no princípio deste ciclo e com quem hoje partilho amizade e companheirismo, obrigado por serem grandes e verdadeiros amigos, obrigado por estarem sempre presentes, tanto nos bons como nos maus momentos.

À Universidade Federal de Ouro Preto que me permitiu vivenciar um intercâmbio inesquecível, tanto pelo ensino de qualidade, tanto por me proporcionar experiências inacreditáveis, inclusive, a conquista de amizades que levarei comigo para a vida, em especial, o Vinícius Oliveira, a Andressa Lina e o Thiago Yuri.

Por fim, mas não menos importante, um agradecimento especial aos meus pais e à minha irmã, Francisca, pela dedicação feita em mim que me permitiu alcançar esta formação, bem como todo o seu amor, paciência e carinho. Obrigado por acreditarem em mim, estarei eternamente grata.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	26
1.1	Objetivos	26
1.2	Empresa Lousas de Valongo, S.A.	27
1.3	Organização Tese	27
2	O SUBSECTOR DAS ROCHAS ORNAMENTAIS EM PORTUGAL.....	29
2.1	Distribuição Geográfica das Rochas Ornamentais em Portugal.....	29
2.2	Análise de Mercado do Subsector Rochas Ornamentais	30
2.3	Caracterização das Pedras Naturais: Ardósias Portuguesas	32
2.3.1	Composição Mineralógica	32
2.3.2	Composição Química	33
2.3.3	Características Físicas e Mecânicas	34
3	A EMPRESA DE LOUSAS DE VALONGO, S.A.	35
3.1	Enquadramento Geográfico	36
3.2	Enquadramento Geológico	37
3.2.1	Regional	37
3.2.2	Local.....	38
3.3	Características Ardósia	39
3.4	Produtos Comerciais	39
4	MÉTODOS DE EXPLORAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO DE ROCHAS ORNAMENTAIS ..	41
4.1	Extracção.....	42
4.1.1	Exploração Céu Aberto	43
4.1.2	Exploração Subterrânea	47
4.2	Transformação	50
4.2.1	Classificação e Selecção De Blocos	51
4.2.2	Processo de Transformação	53
4.2.3	Tipos e Acabamento	54
4.2.4	Controlo do Produto Acabado	54
5	CARACTERIZAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS	57
5.1	Caracterização Geotécnica	58
5.2	Descontinuidades.....	59
5.2.1	Tipos de Descontinuidades.....	59
5.2.2	Características Geométricas	60
5.2.3	Características Físicas	62
5.3	Descrição Geotécnica Básica de Maciços Rochosos (BGD)	67
5.4	Índice RQD(Rock Quality Designation Index)	68
5.5	Índice GSI (Geological Strength Index).....	69

6	ESTABILIDADE DE TALUDES ROCHOSOS	73
6.1	Conceitos Gerais	74
6.1.1	Taludes Naturais	74
6.1.2	Taludes Artificiais	74
6.2	Evolução Geomorfológica De Taludes - Classificação Dos Movimentos De Massa.....	75
6.2.1	Quedas (<i>Fall</i>)	76
6.2.2	Tombamentos (<i>Topple</i>).....	77
6.2.3	Escorregamentos ou Deslizamentos (<i>Slides</i>)	81
6.2.4	Expansão Lateral (<i>Lateral Spread</i>)	82
6.2.5	Fluxos (<i>Flows</i>)	83
6.2.6	Movimentos Complexos	83
6.3	Influência Das Características Geológicas E Ambientais	84
6.3.1	Litologia e Descontinuidades	84
6.3.2	Hidrogeologia e Clima	85
6.3.3	Vegetação	85
7	ANÁLISE DE ESTABILIDADE	87
7.1	Fatores de Instabilização de Taludes.....	87
7.2	Métodos Analíticos: Análise Cinemática	88
7.2.1	Abordagem Qualitativa	89
7.2.2	Abordagem Quantitativa	91
7.3	Cálculo do Fator de Segurança	91
7.3.1	Fator de Segurança para Roturas Planares (F_{sp})	92
7.3.2	Fator de Segurança para Roturas em Cunha (F_{sc})	94
7.4	Métodos Empíricos.....	95
7.4.1	Classificação <i>RMR</i>	96
7.4.2	Classificação <i>SMR</i>	99
8	MEDIDAS MITIGADORAS	102
8.1	Alteração da Geometria do Talude	103
8.2	Drenagem	104
8.3	Reforço Com Inclusões	105
8.3.1	Pregagens	105
8.3.2	Ancoragens	107
8.3.3	Microestacas.....	109
8.3.4	Colunas De <i>Jet Grouting</i>	111
8.4	Proteção Superficial	113
8.4.1	Recobrimento Vegetal	113
8.4.2	Betão Projetado	114
8.4.3	Redes Metálicas	115
9	ESTUDO DE CASO	116
9.1	Valongo	116
9.1.1	Extração	117
9.1.2	Transformação	118
9.1.3	Exploração	118
9.2	Milhária	119
9.2.1	Exploração Subterrânea (1984)	119
9.2.2	Exploração Subterrânea (2000)	122
9.2.3	Campo de Exploração da Milhária	123

9.2.4 Levantamento Topográfico	124
9.2.5 Descrição da Pedreira da Milhária.....	127
10 CONCLUSÃO	143
10.1 Taludes da Zona A	143
10.2 Zona B	145
10.3 Taludes Zona C	147
10.4 Trabalhos Futuros	149
11 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	150
12 ANEXOS	157
12.1 Anexo I – Perfis Típicos de Rugosidade e Termos Descritivos	157
12.2 Anexo II - Perfis <i>Standard</i> de Rugosidade e Valores de JRC	158
12.3 Anexo III – Ábaco para Estimação de RCU em Função de ΓE	159
12.4 Anexo IV – Tabelas para Aplicação da BGD	160
12.5 Anexo V – GSI (Geological Strenght Index)	161

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Distribuição dos centros de produção de Rochas Ornamentais em 2010. (DGEG, 2020).....	30
Figura 2.2 – Evolução da produção anual de rochas ornamentais em Portugal. (DGEG, 2020)	31
Figura 2.3 – Evolução da produção anual de ardósia em Portugal. (DGEG, 2020)	32
Figura 3.1 – Localização da Empresa de Lousas de Valongo, S.A.. (Google Earth, 2019)	36
Figura 3.2 - Unidades tectono-estratigráficas do Maciço Hespérico. (Pérez-Estaún et al., 2004)	37
Figura 3.3 – Mapa geológico da região de Valongo, com vista parcial do Anticlinal de Valongo. (Carta Geológica de Portugal, folha 9-D Penafiel, à escala 1: 50 000).	38
Figura 4.1 – Perfil exemplificativo da sequência da lavra e da recuperação. (Rui Pedra, 2013)	42
Figura 4.2 – Cortes executados nas massas rochosas. (Benetti Machine s.r.l., 2007)	45
Figura 4.3 – Ilustração das duas fases, a escavação da galeria e o seu rebaixamento, que definem o desmonte em subterrâneo. (Guerreiro, H., 2000).....	48
Figura 4.4 – Estratégias de alargamento da galeria piloto feitas na lavra subterrânea. (Guerreiro, H. 2000)	48
Figura 4.5 – Ilustração da ventilação insuflante e aspirante. (Guerreiro, H., 2000)	50
Figura 4.6 - Padrões viáveis de se conseguir através de blocos de uma rocha anisotrópica. (Moura, A.C. et al, 2007)	52
Figura 4.7 – Fluxograma de operações comumente incluídas no processo de transformação dos produtos de rocha ornamental. (Adaptado: Moura, A.C. et al, 2007)	53
Figura 5.1 – Avaliação da característica geométrica: atitude. (Traduzido: Vallejo et al., 2004)	60
Figura 5.2 – Ilustração dos vários perfis de rugosidade. (Vallejo et al, 2004)	63
Figura 5.3 – Representação da abertura de descontinuidades abertas e, também, da largura de descontinuidades preenchidas. (ISRM, 1978)	66
Figura 6.1 – Nomenclatura utilizada na descrição dos múltiplos constituintes dos taludes. (Caputo, 1977)	74
Figura 6.2 – Ilustração de um talude infinito e talude finito. (Caputo, 1977)	74
Figura 6.3 – Classificação dos taludes artificiais. (Caputo, 1977)	75
Figura 6.4 – Ilustração das diferentes trajetórias de queda. (Carcedo, 1987).....	76
Figura 6.5 – Distâncias de impacto para várias trajetórias. (Pierson et al. 2001)	76

Figura 6.6 – Situações de estabilidade de um único bloco para ocorrência de tombamento ou deslizamento numa superfície inclinada. (Traduzido: Ashby, 1971)	78
Figura 6.7 – Tombamento por bloco. (Goodman & Bray, 1976; Adhikary et al., 1997).....	78
Figura 6.8 – Tombamento flexural. (Goodman & Bray, 1976; Adhikary et al., 1997).....	79
Figura 6.9 – Tombamento bloco-flexural. (Goodman & Bray, 1976; Adhikary et al., 1997).....	79
Figura 6.10 – Tombamento e deslizamento no pé do talude. (Hoek & Bray, 1981)	79
Figura 6.11 – Tombamento e deslizamento na base do talude. (Hoek & Bray, 1981).....	80
Figura 6.12 – Tombamento e deslizamento na crista do talude. (Hoek & Bray, 1981)	80
Figura 6.13 – Tombamento e queda. (Hoek & Bray, 1981).....	80
Figura 6.14 – Tombamento por fendas de tração. (Hoek & Bray, 1981)	81
Figura 6.15 – Representação esquemática dos escorregamentos rotacionais: simples, múltiplos e sucessivos. (Vallejo et al., 2004).....	81
Figura 6.16 – Ilustração de escorregamentos translacionais. (Vallejo et al., 2004).....	82
Figura 6.17 – Representação esquemática: expansão lateral. (Vallejo et al., 2004).....	82
Figura 6.18 – Ilustração esquemática: Movimentos Complexos – A e I traduzem diferentes litologias. (UNESCO, 1993)	84
Figura 6.19 – Influência da orientação das descontinuidades na estabilidade de taludes.	85
Figura 6.20 – Interligação o solo-água-vegetação em taludes. (Adaptado: Greenway, 1987)	86
Figura 7.1 – Esquematização da geometria de talude evidenciando a rotura planar. (Traduzido: Wyllie e Mah, 2004).....	89
Figura 7.2 – Esquematização da geometria de talude evidenciando a rotura em cunha. (Traduzido: Wyllie & Mah, 2004)	90
Figura 7.3 – Geometria de uma rotura por tombamento. (Traduzido: Goodman, 1989).....	91
Figura 7.4 – Geometria de rotura planar: fenda de tração na crista do talude. (Wyllie & Mah, 2004)	93
Figura 7.5 – Geometria de rotura planar: fenda de tração na face do talude. (Wyllie & Mah, 2004)	93
Figura 7.6 – Esquematização das componentes da força de ancoragem. (Wyllie & Mah, 2004)	94
Figura 7.7 – Ábaco de valores da constante K a partir da geometria da cunha. (Wyllie & Mah, 2004).....	95
Figura 8.1 – Transformação da geometria de um talude. (Oliveira, 2010)	103
Figura 8.2 – Ilustração de banquetas intermédias. (P.A. Carvalho, 1991)	104
Figura 8.3 – Escavação e aterro na estabilização de taludes, tanto no pé, como na crista do mesmo. (Oliveira, 2010)	104
Figura 8.4 – Tipos de drenagem: (a) drenagem superficial; (b) drenagem profunda.	105

Figura 8.5 – Pregagem de tubo expansivo. (G. Santos, 2014)	106
Figura 8.6 – Pregagem de célula expansiva. (G. Santos, 2014)	106
Figura 8.7 – Execução de Ancoragens. (Adaptado: Serki, 2014)	107
Figura 8.8 – Obturador duplo para injeção IRS. (S. Coelho, 1996)	108
Figura 8.9 – Uso de microestacas na estabilização de taludes. (P.A. Carvalho, 1991)	109
Figura 8.10 – Dissemelhantes tipos de microestacas. (Adaptado: Shong & Chung, 2003)	111
Figura 8.11 – Aplicabilidade do Jet Grouting alternativamente a outros tipos de injeção. (Loureiro, 2008)	112
Figura 8.12 – Tecnologias díspares de Jet Grouting. (Adaptado: Ehsanzadeh & Ahangari, 2014)	112
Figura 8.13 – Exemplificação de um recobrimento vegetal por intermédio de geomateriais. (A. Pinto, 2012)	114
Figura 8.14 – Exemplo de uma aplicação de redes metálicas num talude rochoso. (A. Pinto, 2012)	115
Figura 9.1 – Esquematização de plantas e cortes de uma louseira de Valongo. (Galopim & Martins, 1971)	117
Figura 9.2 – Câmaras de exploração de Louseiras.	119
Figura 9.3 – Poeiras resultantes do processo de desmonte.	120
Figura 9.4 – Bravezas existentes numa das áreas da Pedreira da Milhária.	123
Figura 9.5 – Levantamento topográfico da Pedreira da Milhária. (ELV, 2016)	125
Figura 9.6 – Vista área da Pedreira da Milhária e suas respetivas áreas de desenvolvimento. (Adaptado: Geotek, 2021)	128
Figura 9.7 – Panorama da Área A da Pedreira da Milhária.	128
Figura 9.8 – Enchimento prévio das câmaras a ser exploradas – Área B.	129
Figura 9.9 – Altura média, entre 2 e 3 metros, das bancadas.	130
Figura 9.10 – (a) Roçadoura de braço utilizado num corte lateral; (b) Roço inferior.	130
Figura 9.11 – Rachagem do bloco por intermédio de martelos pneumáticos.	131
Figura 9.12 – Serrote monolâmina.	131
Figura 9.13 – Dumper preenchido por estéril do desmonte dos pilares de ardósia -Área B.	132
Figura 9.14 – “Slip-set” empregue na pedreira.	133
Figura 9.15 – Antiga frente de trabalhos, P1 e P2, da Pedreira da Milhária. (Adaptado: Dias, 2018)	134
Figura 9.16 – Divisão do antigo talude da Área B dividido em 13 zonas geotécnicas. (Dias, 2018)	135
Figura 9.17 – Área B e, por conseguinte, o Hasteal SE antes do desabamento.	136

Figura 9.18 – Domínio de terrenos, adotado até aos dias de hoje, por intermédio de ancoragens ligadas, nas cabeças, por tirantes de aço encostados ao maciço rochoso.	137
Figura 9.19 – Enchimento da área inferior do Hasteal SE.	138
Figura 9.20 – Cenário atual do enchimento do domínio do Hasteal SE.	138
Figura 9.21 – Cenário de enchimento no princípio do domínio do Hasteal SE.	139
Figura 9.22 – Variação do enchimento, a nível de comprimento, do vazio inferior do Hasteal SE.	139
Figura 9.23 – Visualização de desníveis e fissuras no solo resultante do enchimento do vazio inferior do Hasteal SE.	140
Figura 9.24 – Descontinuidades existentes numa pequena parte da Pedreira da Milhária, com especial enfoque para a descontinuidade que irá afetar a exploração da Área C (cor engenharia).	141
Figura 9.25 – Projeção dos (a) planos de descontinuidade e (b) polos dos planos de descontinuidade da Zona D. (<i>Adaptado: Geotek, 2021</i>)	141
Figura 9.26 – Locais de elevada propensão a queda de blocos. (<i>Adaptado: Geotek, 2021</i>)	142
Figura 10.1 – Projeção dos (a) planos de descontinuidade e (b) polos dos planos de descontinuidade. (<i>Adaptado: Geotek, 2021</i>)	143
Figura 10.2 – Aspeto de formação de uma qualquer cunha no talude NW na Zona A. (<i>Geotek, 2021</i>) ..	144
Figura 10.3 – Descontinuidade sub-horizontal. (<i>Adaptado: Geotek, 2021</i>)	144
Figura 10.4 – Panorama do Talude Nascente da Zona A e, respetivo, aspeto da falha N150/30E. (<i>Adaptado: Geotek, 2021</i>)	144
Figura 10.5 – Recuperação progressiva. (<i>ITGE, 1989</i>)	146
Figura 10.6 – Nova área da oficina de transformação da Pedreira Milhária. (<i>Adaptado: Geotek, 2021</i>)	147
Figura 10.7 – Zona D, subjacente à escombreira. (<i>Adaptado: Geotek, 2021</i>)	148
Figura 10.8 – Esquematização do maciço de contenção e delineação do desmonte. (<i>Adaptado: Google Earth, 2019</i>)	148

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Composição mineralógica das ardósias e xistos ornamentais em Portugal. (<i>Spínola, 2015</i>)	33
Tabela 2.2 – Composição química das ardósias e xistos ornamentais em Portugal. (<i>Spínola, 2015</i>)	34
Tabela 2.3 – Características físicas e mecânicas médias das ardósias e xistos ornamentais em Portugal. (<i>Spínola, 2015</i>)	34
Tabela 5.1 – Graus de alteração de uma rocha. (<i>Adaptado: ISRM, 1981</i>)	58
Tabela 5.2 – Principais tipos de descontinuidades. (<i>Adaptado: Vallejo et al., 2004</i>)	60
Tabela 5.3 – Classes de espaçamento. (<i>Traduzido: ISRM, 1978</i>)	61
Tabela 5.4 – Valores de persistência. (<i>ISRM, 1978</i>)	62
Tabela 5.5 – Métodos de “contato” e de “não contato” a fim de precisar a rugosidade. (<i>Adaptado: Ge et al., 2014</i>)	63
Tabela 5.6 – Classificação de rugosidade. (<i>Traduzido: ISRM, 1978</i>)	64
Tabela 5.7 – Aberturas das descontinuidades. (<i>Adaptado: ISRM, 1978</i>)	66
Tabela 5.8 – Caracterização da qualidade do maciço rochoso assente no Índice RQD. (<i>Traduzido: Deere & Deere, 1988</i>)	68
Tabela 5.9 – Valores estimados do fator D. (<i>Miranda, 2003</i>)	70
Tabela 5.10 – Valores estimados para o m_i . (<i>Traduzido: Hoek et al., 2013</i>)	71
Tabela 6.1 – Sistema classificação proposto por Varnes (1978). (<i>Traduzido: Dikau et al., 1996</i>)	75
Tabela 6.2 – Classes de fluxos e suas propriedades básicas. (<i>Adaptado: USGS, 2004; Highland & Bobrowsky, 2008</i>)	83
Tabela 7.1 – Fatores que intervêm na estabilidade dos taludes. (<i>Adaptado: Vallejo et al., 2004</i>)	88
Tabela 7.2 – Valores do FS global e a estabilidade relativa dos taludes.	92
Tabela 7.3 – Parâmetros e pesos do $RMR_{básico}$. (<i>Traduzido: Bieniawski, 1989</i>)	97
Tabela 7.4 – Classificação para condições das descontinuidades. (<i>Traduzido: Bieniawski, 1989</i>)	98
Tabela 7.5 – Efeito da direção e inclinação das descontinuidades. (<i>Traduzido: Bieniawski, 1989</i>)	98
Tabela 7.6 – Ajuste dos pesos em virtude da orientação das descontinuidades com informação proveniente da Tabela 7.5. (<i>Traduzido: Bieniawski, 1989</i>)	98
Tabela 7.7 – Classes do maciço rochoso. (<i>Traduzido: Bieniawski, 1989</i>)	99

Tabela 7.8 – Definição das classes do maciço rochoso. (Adaptado: <i>Bieniawski, 1989</i>).....	99
Tabela 7.9 – Fator de ajuste F_1 . (Traduzido: <i>Romana et al., 2003</i>)	99
Tabela 7.10 – Fator de ajuste F_2 . (Traduzido: <i>Romana et al., 2003</i>)	100
Tabela 7.11 – Fator de ajuste F_3 . (Traduzido: <i>Romana et al., 2003</i>)	100
Tabela 7.12 - Fator de ajuste F_4 . (Traduzido: <i>Romana et al., 2003</i>)	100
Tabela 7.13 – Descrição das classes de <i>SMR</i> . (Traduzido: <i>Romana, 1993</i>).....	100
Tabela 7.14 – Medidas minimizadoras. (Traduzido: <i>Romana et al., 2003</i>).....	101
Tabela 7.15 – Medidas minimizadoras por classes. (Traduzido: <i>Romana et al., 1993</i>)	101
Tabela 9.1 – Resultados adquiridos na execução do ensaio de resistência à compressão por intermédio do Martelo de <i>Schmidt</i> . (<i>Dias, 2018</i>)	126
Tabela 9.2 – Resultados adquiridos na execução do ensaio Tilt-Test. (<i>Dias, 2018</i>).....	127

ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

BGD	<i>Basic Geotechnical Description</i>
CNC	<i>Computer Numeric Control</i>
CXG	Complexo Xisto-Grauváquico
DGEG	Direcção Geral de Energia e Geologia
DGGM	Direcção Geral de Geologia e Minas
ELV	Empresa de Lousas de Valongo, S.A.
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
FS	Fator de Segurança Global
FS _c	Fator de Segurança para Roturas em Cunha
FS _p	Fator de Segurança para Roturas Planares
GSI	<i>Geological Strength Index</i>
IGU	Injeção Geral Uniforme
IRC	Índice de Rotura por Cunha
IRP	Índice de Rotura Planar
IRS	Injeção Repetida Seletiva
IRT	Índice de Rotura por Tombamento
ISRM	<i>International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering</i>
RCU	Resistência à Compressão Uniaxial
RQD	<i>Rock Quality Designation Index</i>
RMR	<i>Rock Mass Rating</i>
SMR	<i>Slope Mass Rating</i>
ZAL	Zona Astúrico Leonesa
ZC	Zona Cantábrica
ZCI	Zona Centro Ibérica
zGT	Sub-zona Galaico Transmontana
ZOM	Zona Ossa Morena
ZSP	Zona Sul Portuguesa

Lista de símbolos

X_d	Espaçamento Aparente
X_n	Espaçamento Normal
τ	Tensão de Corte
σ_n	Tensão Normal sobre Parede da Descontinuidade

$\phi_{básico}$	Ângulo de Atrito Básico da Superfície
i	Ângulo de Aspereza
ϕ_{pico}	Ângulo de Atrito de Pico
JRC	Joint Roughness Coefficient
JCS	Joint Wall Compression Strenght
$\phi_{residual}$	Ângulo de Atrito Residual
γ	Peso Volúmico do Material
R	“Dureza ao Ressalto” em Superfícies Não Meteorizadas
r	“Dureza ao Ressalto” em Superfícies Húmidas e Meteorizadas
J_v	Soma do Número de Descontinuidades por Unidade de Comprimento
λ	Frequência Média das Descontinuidades por Metro Linear
S	Distância Média entre Descontinuidades Consecutivas
σ'_1	Tensão Principal Efetiva Máxima
σ_c	Resistência à Compressão Simples
σ'_3	Tensão Principal
m_b	Valor Reduzido do Parâmetro m_i
s	Parâmetro que Resulta das Características do Maciço Rochoso
a	Parâmetro que Resulta das Características do Maciço Rochoso
D	Factor de Perturbação do Maciço
σ_{cm}	Resistência do Maciço Rochoso
b	Largura Bloco
h	Altura Bloco
α	Ângulo de Inclinação de Talude
θ	Ângulo de Atrito
ψ_i	Inclinação da Linha de Intersecção de Duas Descontinuidades
ψ_{fi}	Inclinação da Face do Talude
ϕ	Ângulo de Atrito Médio
ψ_d	Ângulo de Determinada Inclinação
ψ_f	Talude Inclinado com a Horizontal
c	Coesão do Talude
A	Área do Talude
W	Peso do Bloco Deslizado
U	Pressão Intersticial
V	Resultante da Pressão Aplicada na Fissura de Tração
$W \cos \psi_p$	Componente Estabilizadora do Peso
$W \sin \psi_p$	Componente Peso com Tendência ao Deslizamento
b	Comprimento do Topo do Talude
H	Altura do Talude

γ_r	Peso Volúmico do Material Instabilizado
γ_w	Peso Volúmico da Água
z	Profundidade em Relação ao Nível Freático
R_a	Reação Normal do Plano A (Direção Paralela)
R_b	Reação Normal do Plano B (Direção Perpendicular)
ε	Ângulo da Cunha
β	Inclinação Cunha
V_i	Volume “in situ” da Exploração
V_t	Volume Considerando o Ângulo do Talude
V_e	Volume Médio de Entulhos de Superfície e Ardósia Não Aproveitável
T_v	Tempo de Vida
ϕ_b	Ângulo de Atrito de Base

1 INTRODUÇÃO

Desde a pré-História até à contemporaneidade que a pedra natural com características raras ou cores fascinantes associadas a certas propriedades, nomeadamente, dureza, transparência, translucidez e trabalhabilidade, é assídua na construção e manufatura de objetos decorativos, detendo um elevado valor tanto estimativo como económico.

A produção de rocha ornamental em Portugal integra o *ranking* de maiores produtores deste tipo de rocha a nível mundial constituindo, assim, uma importante atividade económica (ANIET, 2017).

A ardósia, rocha sedimentar de granulação fina, francamente metamorfizada, desenvolve planos preferenciais de clivagem, intitulados de “clivagem ardosífera”, que proporcionam aos blocos/placas de ardósia a sua “abertura” em leitos muito finos, desde poucos milímetros de espessura, a leitos de muitos decímetros quadrados, inclusive, até metros quadrados, preservando a sua superfície plana contínua (Barbosa, 1974).

A pressão mecânica, a recristalização mineralógica ou a rotação dos cristais, no que se refere à clivagem ardosífera, precisam a forte orientação planar preferencial das escamas de mica branca (sericita) e de clorita, presentes na composição mineralógica da ardósia. Por sua vez, as propriedades físicas da ardósia, tais como clivagem preferencial, dureza média, baixa porosidade, alta resistência mecânica, entre outros, permitem a sua ampla utilização como revestimento.

Deste modo, a ardósia, integra um recurso mineral mundialmente conhecido e de larga utilização em edificações à custa dos mais diversificados padrões cromáticos, assegurado tanto por faces polidas quanto naturais, e da sua afinidade estética, em revestimentos internos, com madeiras, metais e tapeçarias. A tais atributos estéticos acrescem ainda a durabilidade dos revestimentos de ardósia e respetiva facilidade de manutenção e limpeza, fatores cruciais na construção civil.

1.1 OBJETIVOS

O propósito primário desta dissertação consiste na análise e estudo de processos adjacentes ao domínio de terrenos, particularmente em pedreiras de rocha ornamental, dispondo como sustentáculo múltiplas adversidades de implementação em consequência dos condicionalismos associados. Para esse fim salienta-se a familiarização relativamente aos métodos de exploração empregues em maciços ardosíferos e, ademais, metodologias de sustimento adequadas a este tipo particular de maciço rochosos.

Inclusive, o acompanhamento e visualização deste tipo soluções adotadas na Pedreira de Ardósia da Milhária, em São Martinho do Campo, Valongo, permitiu o contacto direto com a realidade em campo e com os obstáculos que surgem no seu desenvolvimento e, ainda, o confronto com as soluções recomendadas em projeto com as realmente executadas.

1.2 EMPRESA LOUSAS DE VALONGO, S.A.

Independentemente da elevada abundância de afloramentos de xistos ardosíferos em Portugal é na região de Valongo, precisamente, no flanco Este do Anticlinal de Valongo, que se situam as mais importantes explorações de lousas, com elevado significado industrial, em que a ardósia é extraída dos xistos ordovícicos do Landeiliano.

O fato de os portos do Douro e de Leixões se situarem excecionalmente próximos da região de Valongo acentuou a procura de ardósia como lastro dos navios da marinha mercantes que, vindos de Inglaterra com carvão, regressavam transportando placas de ardósia (*"dump-coarse"* e *"roofing slates"*) aplicáveis na construção civil, em Londres e Liverpool, particularmente, em telhados, pavimentos e revestimentos.

A Ardósia de Valongo (EN 12440), de cor cinzenta-azulada, homogénea, compacta e finamente granular, integra as suas qualidades naturais de beleza, resistência e cor inalterável que, além de permitir a sua extração até aos dias de hoje, usufrui de aplicações, desde o começo, tanto no setor da construção civil como na decoração.

Atualmente a produção da Empresa Lousa de Valongo, S.A. é responsável pela totalidade do processo, desde a extração, oriundo de pedreiras próprias, até ao acabamento final, executando uma elevada gama de produtos, com rigor e qualidade, particularmente, o fabrico de pedras para bilhares, chapas e ladrilhos clivados, serrados e polidos e lousas escolares.

Todos os produtos previamente citados são embalados de modo adequado para expedição mediante a utilização de caixas de madeira ou cartão. A capacidade de produção da Empresa de Lousa de Valongo, S.A., hoje em dia, é de 200 000 m²/ano, em que apesar de se verificar ultimamente uma crescente progressão de consumo por parte do mercado interno, 90% desta é para exportação.

1.3 ORGANIZAÇÃO TESE

- Capítulo 1 – Breve introdução à temática abordada na presente dissertação, compreendendo um enquadramento do tema, os objetivos e a metodologia adotada.
- Capítulo 2 – Análise do subsetor das Rochas Ornamentais em Portugal, inclusive, a sua distribuição geográfica e, respetivo estudo de mercado, tal como a caracterização das pedras naturais, especificamente, composição mineralógica, química e características físicas e mecânicas, com especial enfoque na Ardósia.
- Capítulo 3 – Descrição da Empresa de Lousas de Valongo, S.A. Enquadramento histórico, geográfico e geológico, contemplando o seu contexto sobre o Anticlinal de Valongo.

- Capítulo 4 – Estudo dos métodos de desmonte tanto a céu aberto, como em subterrâneo. Aborda-se, igualmente, os processos de transformação aplicado às rochas ornamentais, referindo Decretos-Lei e Normas Europeias em vigor.
- Capítulo 5 – Aborda-se a caracterização geotécnica de um maciço rochoso, contemplando, a qualificação das descontinuidades existentes, reavivando conceitos decisivos como o Índice *RQD* (Rock Quality Designation Index) e o Índice *GSI* (Geological Strength Index).
- Capítulo 6 – Relembra-se conceitos gerais sobre os constituintes dos taludes tanto naturais, como artificiais, incluindo com uma definição da sua evolução geomorfológica, ao nível da classificação dos movimentos de massa, e, também, com uma descrição da influência das características geológicas e ambientais.
- Capítulo 7 – Apresentam-se dois métodos de análise de estabilidade, nomeadamente, métodos analíticos, incluindo os vários tipos de roturas, e os métodos empíricos associados.
- Capítulo 8 – Dispõe-se um conjunto de medidas minimizadoras mais comuns, especificamente, a drenagem, o reforço com inclusões e a proteção superficial.
- Capítulo 9 – Breve introdução ao projeto desenvolvido, expondo-se as condições e metodologias envolvidas na parte experimental.
- Capítulo 10 – Considerações finais e discussão de eventuais desenvolvimentos futuros no âmbito da temática estudada.

2 O SUBSECTOR DAS ROCHAS ORNAMENTAIS EM PORTUGAL

O Sector da Indústria Extrativa é responsável por operar a extração de minerais metálicos e não metálicos, águas minerais e combustíveis fósseis em Portugal. O sector dos minerais não metálicos é composto pelo subsector das rochas ornamentais, com fins de aplicação em obra e com intuito ornamental, e o subsector das rochas industriais, em que a produção é absorvida pelo sector da construção, sector químico, sidero-metalúrgico e agro-alimentar.

A rocha ornamental é o material rochoso que depois de um processo de transformação, em que se mantém a sua composição, é apto para material de construção com função, essencialmente, decorativa. As características tecnológicas da rocha ornamental irão ditar o modo e âmbito da sua aplicação.

Considerado como um fator intrínseco, o aspeto estético litológico é fundamental para determinar a sua utilização como rocha ornamental. Deduz-se assim que a beleza ornamental, apesar de subjetiva, é uma condição a ter em atenção na fase de prospeção geológica. A cor, a textura e a existência ou não de descontinuidades constituem critérios observados a “olho-nú”, que no seu conjunto determinam o grau de homogeneidade da rocha.

2.1 DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DAS ROCHAS ORNAMENTAIS EM PORTUGAL

As características estéticas, físicas, mecânicas e de durabilidade associadas à diversidade em termos litológicos e cromáticos, aprimoram a qualidade e beleza, da pedra natural. Distribuída disformemente pelos diversos distritos de Portugal, unicamente influenciada pela geologia local, são três os grupos compõem a pedra natural: os granitos e rochas afins, os mármore e rochas afins e as ardósias.

Destaca-se a extração das ardósias, na zona norte de Portugal, e de rochas xistentas na região do Alentejo (Figura 2.1). A ardósia de Valongo, Arouca e Vila Nova de Foz Côa, de tonalidade cinzento-escuro e clivagem xistenta, é explorada através de câmaras subterrâneas e a céu aberto, onde são extraídos blocos para a produção de mesas de bilhar, pavimentos, revestimentos, entre outros. Por outro lado, os xistos ornamentais, explorados nos distritos de Beja e de Évora, são utilizados em revestimentos e tampas de mobiliário e apresentam uma tonalidade esverdeada e azulada.

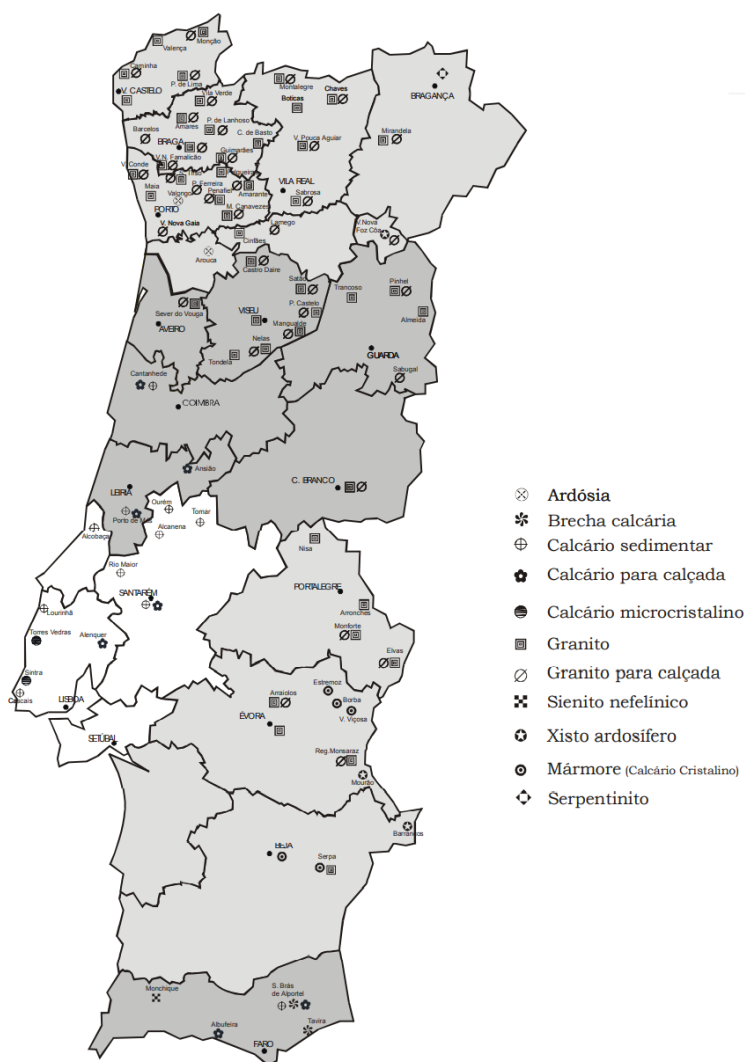


Figura 2.1 – Distribuição dos centros de produção de Rochas Ornamentais em 2010. (DGEG, 2020)

2.2 ANÁLISE DE MERCADO DO SUBSECTOR ROCHAS ORNAMENTAIS

O subsector das rochas ornamentais, um dos propulsores da economia nacional, suscita a recolha e tratamento dos dados estatísticos pela *Direcção Geral de Energia e Geologia (DGEG)* que os faculta, divulgando a sua produção nacional e a respetiva evolução no comércio externo e interno.

Entre os anos 2007 e 2019 a produção de rochas ornamentais exibiu uma tendência mais ou menos constante, que culminou em 2019 com a produção de 3.574.349 toneladas, o correspondente a 170 milhões de euros. Em 2008 e 2009 há uma diminuição da produção devido ao abrandamento verificado nas indústrias consumidoras nacionais (construção civil e obras públicas) e, por conseguinte, com reflexos na vulnerável estrutura comercial das empresas portuguesas junto do mercado externo. Independente da conjuntura menos favorável vivenciada no sector da construção civil e obras públicas, a partir do ano 2007 o crescente aumento da produção das rochas ornamentais deveu-se, com certeza, ao aumento da competitividade e a uma maior agressividade das empresas quanto ao comércio internacional associado ao reconhecimento interno dos produtos (Figura 2.2).

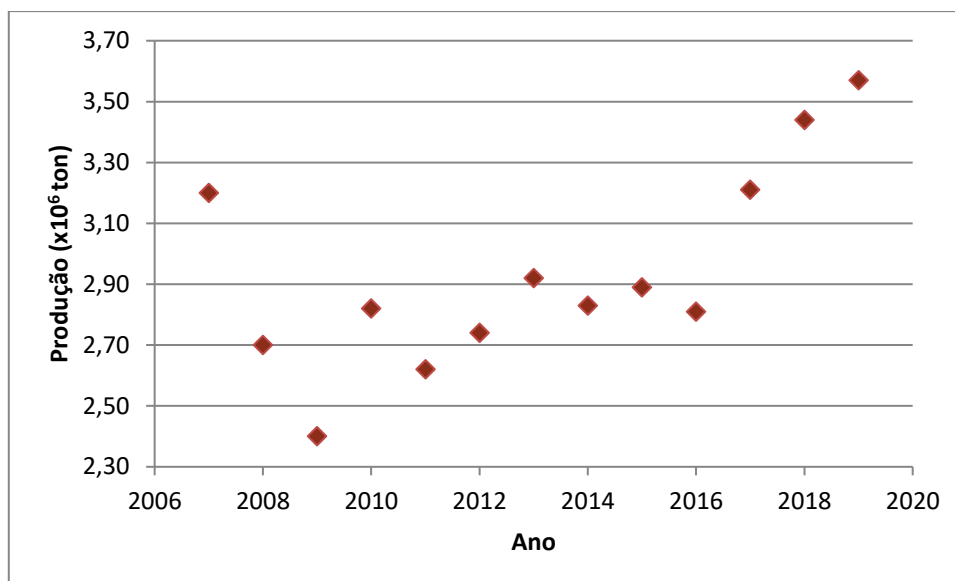


Figura 2.2 – Evolução da produção anual de rochas ornamentais em Portugal. (DGEG, 2020)

O facto de Portugal se encontrar entre os dez maiores produtores mundiais de rochas ornamentais deve-se ao papel preponderante da variedade de tipos litológicos aliada à exportação. Deste modo, segundo a DGEG (2019), a exportação de rochas ornamentais regista uma tendência crescente, com uma taxa de crescimento médio anual de 4%, sendo os principais países de destino destas rochas, por ordem crescente de importação: França, China, Espanha, Alemanha, Reino Unido e E.U.A..

A influência de determinados países como, por exemplo, a China e o Brasil, que figuram na concorrência com preços extremamente competitivos, impeliu a indústria portuguesa a se reorganizar de modo a fazer face à nova realidade. Como o comércio externo de um país advém da relação estabelecida entre a importação e exportação, em termos globais, a tendência dos últimos anos é a redução das entradas de rocha ornamental e um aumento das saídas.

O subsetor das rochas ornamentais, com uma taxa de 65% de exportação, é o que mais exporta, sobressaindo os mármore e rochas carbonatadas que representam 40%. Acompanhando, de forma mais ou menos constante, a exportação de rochas ornamentais em Portugal, desde o ano 2010 que se verifica um crescimento da exportação de ardósia no País (Figura 2.3).

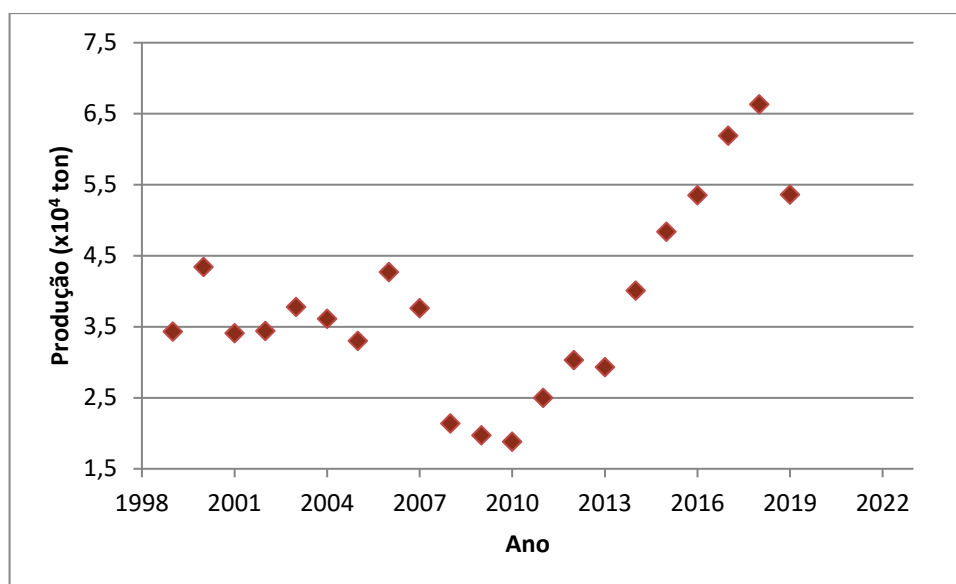


Figura 2.3 – Evolução da produção anual de ardósia em Portugal. (DGEG, 2020)

A relevância deste subsector na Indústria Extrativa e, naturalmente, na economia nacional, é indubitável, sendo por isso essencial que as empresas continuem a adotar medidas que visem a competitividade, particularmente, junto a mercados externos, e também, a adequada promoção das pedras naturais.

2.3 CARACTERIZAÇÃO DAS PEDRAS NATURAIS: ARDÓSIAS PORTUGUESAS

As deformações tectónicas indutoras do metamorfismo de baixa intensidade originam lousas e rochas xistosas com uma característica peculiar, a xistosidade ou foliação. Estas, inseridas no grupo das Ardósias ornamentais, apresentam tonalidades acinzentada ao cinzento-escuro, amareladas e acastanhadas ou avermelhas e, por possuírem granularidade fina, são transformadas segundo planos paralelos à sua foliação, em que, tradicionalmente, não são utilizadas ferramentas de corte, tornando este processo mais acessível.

A Ardósia de Valongo, o preeminente centro produtor, a Ardósia do Marão (cinzenta-escura), a Ardósia de Canelas (cinzenta-azulada), o 44Xisto de Barrancos (tonalidades esverdeada, amarelada ou avermelhada), o Xisto de Mourão (acinzentada a cinzento-azulada) e um quartzofilito conhecido como a Ardósia de Foz Côa (cinzento-escura), constituem as inúmeras variedades presentes em Portugal.

2.3.1 COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA

A composição mineralógica exprime a composição química e as condições de formação e alteração de cada mineral constituinte, interferindo nas propriedades e na durabilidade da rocha em análise. De acordo com os dados obtidos no *Catálogo de Rochas Ornamentais Portuguesas* (DGGM, 1983) a mineralogia das Ardósias Portuguesas consiste, maioritariamente, nos minerais argilosos (micas, sericite e clorite) e nos minerais granulares (quartzo e feldspato), podendo também apresentar

outros minerais como acessório ou presença vestigial como, por exemplo, os óxidos e sulfuretos de ferro e carbonatos (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 – Composição mineralógica das ardósias e xistos ornamentais em Portugal. (*Spínola, 2015*)

MINERAIS ESSENCIAIS						
	Valongo	Canelas	Marão	Barrancos	Mourão	Foz Côa
Mica (%)	66	55 Moscovite + Sericite	69 Moscovite + Sericite	80 Moscovite + Biotite	60 – 65 Biotite + Sericite e/ou Moscovite	58 Biotite + Sericite e/ou Moscovite
Cloritóide + Clorite (%)	20 – 25	12 – 15	24 Clorite	12 Clorite	15 Clorite	–
Quartzo + Feldspato	10 – 15	15	–	6 (Quartzo)	–	19 +16
Feldspato Potássico	–	–	–	–	14	–
MINERAIS ACESSÓRIOS						
Pirite	Vestígios	Vestígios	–	–	–	–
Minerais Opacos	Vestígios	Vestígios	–	–	–	–
Intercrecimentos Clorite/Sericite	–	3	–	–	–	–
Turmalina	–	–	–	–	–	–
Quartzo	–	–	5	–	6	–
Turmalina, Feldspato e Minerais Opacos	–	–	2	2 Feldspato K e Outros Opacos	0 – 5 Minerais Opacos e Turmalina	Turmalina, Apatite, Zircão, Carbonatos, Pirite e Outros Opacos – Vest.
Clorite	–	–	–	–	–	5
Plagioclase	–	–	–	–	–	2

2.3.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

O objetivo da análise química das rochas ornamentais é a sua classificação visando quantificar os elementos presentes, possibilitando o estudo da sua origem, formação, estabelecimento de relações entre elas, distinção entre rochas similares, entre outros. Os minerais quartzo (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e hematite (Fe_2O_3) são os elementos, por ordem crescente, com maior presença nas Ardósias Portuguesas (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 – Composição química das ardósias e xistos ornamentais em Portugal. (*Spínola, 2015*)

	VALONGO	CANELAS	MARÃO	BARRANCOS	MOURÃO	FOZ CÔA
SiO ₂ (%)	50,97	50,63	47,61	58,75	57,57	59,61
Al ₂ O ₃ (%)	24,86	25,95	23,78	22,13	19,96	18,68
Fe ₂ O ₃ (%)	9,88	9,72	13,78	6,29	7,23	6,69
MnO (%)	–	Vestígios	Vestígios	0,05	0,13	0,06
MgO (%)	1,92	2,31	2,87	1,4	1,37	2,24
CaO (%)	0,63	0,53	0,24	0,17	0,25	0,55
Na ₂ O (%)	1,43	1,42	0,46	1,52	1,42	2,23
K ₂ O (%)	3,29	3,3	4,43	3,76	5,57	5,32
TiO ₂ (%)	0,62	0,74	0,63	0,83	0,16	0,54
P ₂ O ₅ (%)	–	–	–	0,13	0,12	–
SO ₃ (%)	0,29	–	–	3,3	–	–
H ₂ O ⁺ (%)	–	–	–	0,55	3,57	–
H ₂ O ⁻ (%)	–	–	–	–	0,37	–
CO ₂ (%)	0,52	0,5	Vestígios	–	–	0,46
P.R. (%)	5,45	5,25	6,26	–	–	3,25

2.3.3 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MECÂNICAS

Apesar do valor de mercado da rocha ornamental se centrar no seu padrão ornamental, isto é, nas particularidades da sua tonalidade e da sua textura, não restam dúvidas de que se torna fundamental a determinação das suas características físico-mecânicas, de forma a perceber qual a utilização mais adequada em que se alcance um valor técnico, estético e comercial mais elevado.

Em Portugal, tanto as ardósias como os xistos ornamentais, apresentam qualidade para as várias aplicações tradicionais; no entanto é aconselhável ter em atenção o índice de tráfego previsto em pavimentos. De realçar, o fato de se recomendar a aplicação das rochas xistentas em interiores, cantarias e trabalhos decorativos.

Tabela 2.3 – Características físicas e mecânicas médias das ardósias e xistos ornamentais em Portugal. (*Spínola, 2015*)

	VALONGO	CANELAS	MARÃO	BARRANCOS	MOURÃO	FOZ CÔA
Res. Mec. Compressão (kg/cm ²)	1910	1590	430	440	400	1310
Compressão/ Gelividade (kg/cm ²)	1710	1410	450	430	340	1170
Res. Flexão (kg/cm ²)	580	340	561	355	333	622
Densidade Aparente (kg/m ³)	2820	2820	2800	2730	2730	2760
Absorção Água (% peso)	0,4	0,6	0,5	1	1,2	0,2
Porosidade Aberta (% vol.)	1,2	1,8	1,3	2,8	3,4	0,4
Coef. Dilat. Térmica (x10 ⁻⁶ /°C)	7,6	8,6	8,8	7,2	7,8	8,4
Resistência Desgaste (mm)	6,3	5	6,7	9,8	7,6	0,3
Resistência Choque (cm)	110	110	110	110	90	55

3 A EMPRESA DE LOUSAS DE VALONGO, S.A.

A exploração da “ardósia negra” remonta ao ano 1865 em que a firma inglesa *The Vallongo Slates & Marbles Quarries Company, Limited* iniciou a sua extração e transformação nas minas do Galinheiro, Vale de Amores e Susão, atualmente desativadas, em Valongo. A sua elevada procura proporcionou a sua extração em profundidade, através de poço, e sua exportação para a Inglaterra e Estados Unidos, para ser aplicada em telhados, pavimentos e revestimentos, material isolante e pedras para mesas de bilhar.

De forma a adquirir todo o ativo e passivo da *The Vallongo Slate & Marble Quarries Company, Limited* desenvolveu-se em 1930 a *Empresa de Lousas de Valongo, S.A. (ELV)*. Mas só no ano 1980 é que o controlo do capital se torna nacional, altura em que Maria Eugénia Lencastre Ribeiro da Silva Nunes de Matos se torna responsável pela gestão desta. Não acreditando no futuro da empresa, em 1982, a sociedade foi desfeita continuando, apenas, Maria Eugénia de Matos com a colaboração, desde cedo, dos seus filhos Rui de Matos e Ana Isabel e genro Teotónio Pereira.

A nova liderança e a mecanização dos equipamentos de corte e movimentação permitiram uma significativa evolução nas operações de extração e transformação, introduzindo-se novos métodos de exploração (a céu aberto) com rendimentos muito superiores aos tradicionais.

A ardósia de Valongo, registada sob a denominação EN12440, é célebre pelas peculiaridades específicas da zona de Valongo – Douro Litoral, região em que se situa, e pela idade geológica das suas pedreiras com cerca de 450 milhões de anos, correspondente à idade Landeiliano Superior. Daí adveio o facto de os produtos da *Empresa de Lousas de Valongo* terem recebido diversos prémios em exposições mundiais históricas, tais como: exposição mundial de Paris (1867), exposição de Viena (1873), Filadélfia (1876), Adelaide (1887), Lisboa (1888), Londres (1871), Porto (1897), Paris (1900) e Rio de Janeiro (1908). De notar que, a 5 de janeiro de 2016, a Câmara de Valongo atribuiu a medalha de mérito à empresa em questão, uma vez que esta, para além de pertencer ao conjunto de empresas que mais representam o concelho, é uma das mais antigas.

A capacidade de produção superior a 200 000 m³/ano traduz-se na colocação no mercado de ladrilhos clivados, serrados e polidos, placas para pavimentos e revestimento de paredes, soleiras, cobertura de degraus, rodapés, tampos de cozinha, telhas para telhados e pedras para bilhares. Apesar do crescimento do consumo interno nos últimos anos, 90% deste é exportado para mercados de destino

como: a Inglaterra, a Alemanha, a Espanha, a Suíça, os Estados Unidos, o Japão e países do norte da Europa.

Atualmente a *ELV* investe no aperfeiçoamento e criação de novos produtos, vanguarda da produção de ardósia, e no sector da energia que irão garantir uma grande poupança de eletricidade.

O atual património da *ELV* abrange a pedreira da Milhária e uma pedreira na zona de Murça onde é extraído um xisto quartzítico, o denominado quartzito de Murça, em que as suas principais características são a dureza e a coloração variada.

A *ELV* com uma extensão de mais de 100 ha de área explorável na faixa lousífera de Valongo tem o seu polo de extração na pedreira mais antiga em atividade, a Pedreira da Milhária. Também reconhecida como a maior exploração a céu aberto de lousa em Portugal, desta são extraídos grandes blocos de aproximadamente 16 toneladas que, depois de cuidadosamente inspecionados são selecionados e encaminhados para os sectores de transformação.

3.1 ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO

Junto à sede da *Empresa de Lousas de Valongo, S.A.* situa-se a pedreira da Milhária. A referida pedreira, assente no “anticlinal de Valongo”, com 15 ha de área destinados à extração e transformação de ardósia está localizada na União de Freguesias de Campo e Sobrado, concelho de Valongo no distrito do Porto (Figura 3.1).



Figura 3.1 – Localização da Empresa de Lousas de Valongo, S.A.. (Google Earth, 2019)

A região é caracterizada pela presença, a leste, da Serra da Murta e a oeste das Serras de Santa Justa e Pias, estabelecendo-se um vale (Vale-Longo) que é atravessado pelo Rio Ferreira que no Alto do Castelo “corta” a Serra de Pias e se instala entre esta e a Serra de Santa Justa. A área em estudo encontra-se posicionada nas margens do rio Ferreira segundo um alinhamento NW-SE na bordadura limite da serra de Santa Justa.

3.2 ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO

3.2.1 REGIONAL

O fragmento rochoso que integra maioritariamente a Península Ibérica é o denominado Maciço Hespérico, um planalto sobrelevado ao mar, com mais de 200 milhões de anos, no qual se instalaram posteriormente bacias sedimentares. Esta unidade morfoestrutural é caracterizada, em termos gerais pelo predomínio de formações de idade paleozóica e precâmbrica, metamorfizadas, deformadas e intruídas por batólitos graníticos, xistos e quartzitos (Ribeiro *et al.*, 1991).

Os processos tectónicos convergentes, ligados ao fecho do Mar de *Tethys*, no decorrer da Era Paleozóica, permitiram a formação de zonas geotectónicas com diferenças na zonalidade paleogeográfica, no estilo tectónico, no magmatismo e no metamorfismo no Maciço Hespérico. Assim, a análise tectono-estratigráfica desta orogenia permite distinguir a distribuição espacial, de NE para SW, das várias unidades que o representam (Lotze, 1945; Julivert *et al.*, 1974): a Zona Cantábrica (ZC), a Zona Astúrico Leonesa (ZAL), a Zona Centro Ibérica (ZCI), que inclui a sub-zona Galaico Transmontana (ZGT), a Zona de Ossa Morena (ZOM) E A Zona Sul Portuguesa (ZSP). (Figura 3.2)

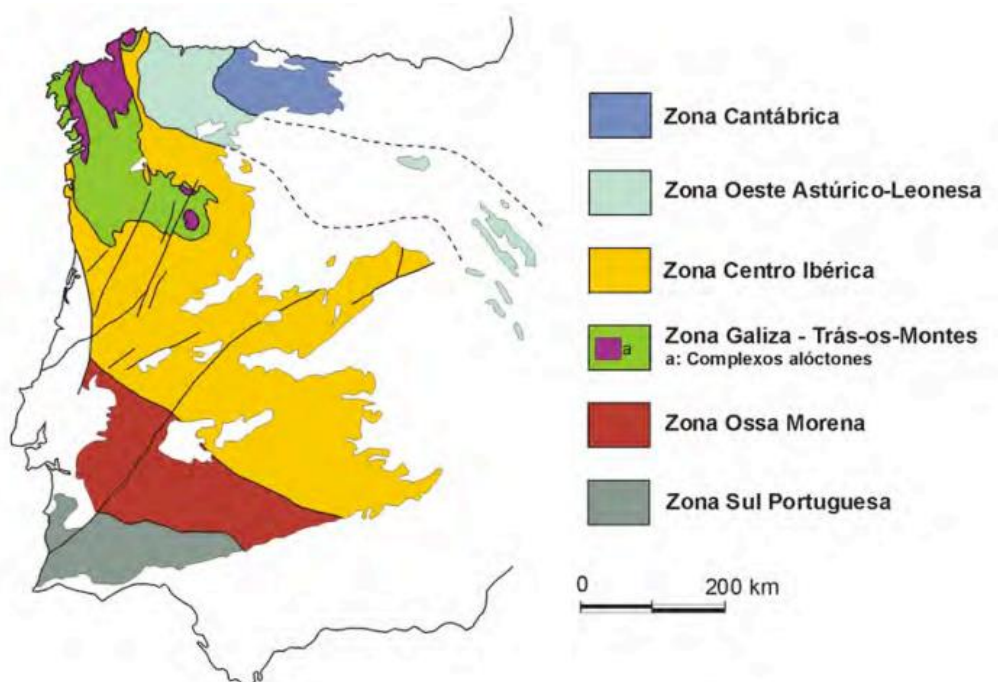


Figura 3.2 - Unidades tectono-estratigráficas do Maciço Hespérico. (Pérez-Estaún *et al.*, 2004)

No Maciço Hespérico, ao contrário do que ocorre nas zonas externas (ZC e ZSP), representadas pelo Paleozóico superior, é nas zonas internas (ZAL, ZCI e ZOM), representadas pelo Precâmbrico e o Paleozóico inferior, que a deformação é a mais intensa e o magmatismo e o metamorfismo sinorogénios são mais proeminentes.

As características morfotectónicas da *Zona Centro-Ibérica* do Maciço Hespérico definem-se pela Falha de Viveiro, o limite mais setentrional, e pela zona de cisalhamento Tomar-Badajoz-Córdoba, o limite meridional (Martinez Catalán *et al.*, 2004). A ZCI, que por sua vez, se divide segundo critérios

estratigráficos resultantes da diferenciação das rochas infrajacentes às séries do Ordovício inferior: Domínio *Ollo de Sapo*, identificado pela existência de um complexo plutovulcânico granítico e o Domínio Complexo Xisto-Grauváquico (CXG) que se equipara a uma espessa sequência terrígena (Martinez Catalán *et al.*, 2004).

O CXG, também denominado Super Grupo Dúrico-Beirão, domínio no qual se insere a região em estudo, é uma unidade litoestatigráfica que reúne as sequências ante-ordovícicas retratadas por xistos, conglomerados, alguns níveis de grauvaques e rochas carbonatadas, que se individualiza em duas unidades litológicas: Grupo do Douro e Grupo das Beiras (Sousa, 1982; Medina, 1996).

3.2.2 LOCAL

O Anticlinal de Valongo que se prolonga desde Valongo às proximidades de Castro Daire, segundo a direção NW-SE, apresenta dois alinhamentos orográficos retilíneos, sensivelmente paralelos entre si, constituindo as denominadas Serras do Porto. Evidenciadas pelo contraste morfológico com a Plataforma Litoral do Porto, estas compreendem relevos residuais quartzíticos com vertentes verticalizadas, acompanhadas de formações xistentas paleozóicas, sendo o seu extremo Norte contemplado pela maior altitude regional, a Serra de Santa Justa, com 376 m.

A megadobra arquitetada na fase inicial da orogenia Hercínica, o Anticlinal de Valongo, compreende essencialmente xistos, grauvaques do Grupo do Douro (Proterozoico final-Câmbrico), uma sequência de xistos, grauvaques e quartzitos (Ordovício-Devónico) e uma estreita faixa de conglomerados e arenitos do Carbonífero superior (Fernandes, 2005).

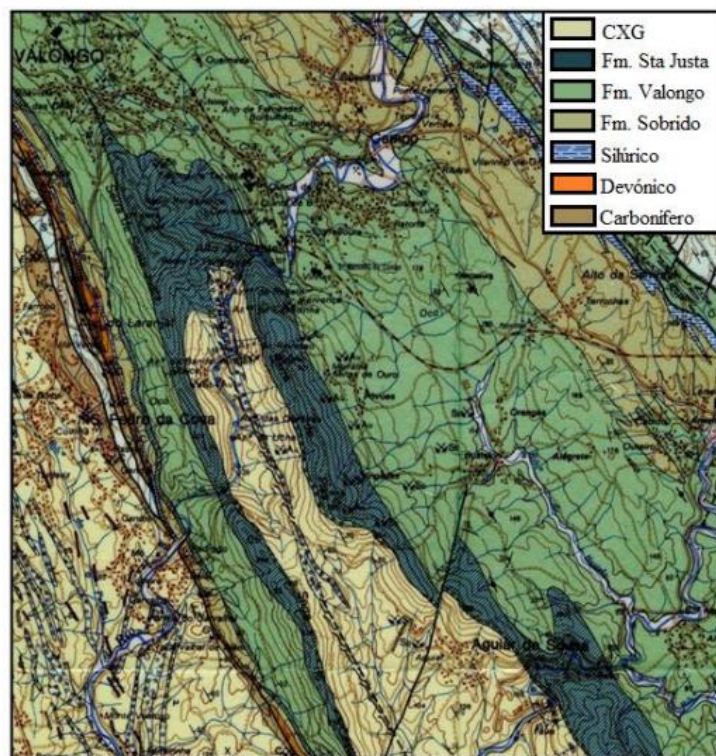


Figura 3.3 – Mapa geológico da região de Valongo, com vista parcial do Anticlinal de Valongo. (Carta Geológica de Portugal, folha 9-D Penafiel, à escala 1: 50 000).

As formações do Paleozóico inferior, sob o ponto de vista estrutural, integram um antiforma anticlinal assimétrico com direção *NW-SE* e vergência para Oeste, em que o eixo da dobra se inclina 5 a 15° para *NW* e o, respetivo, plano axial 60° para *NE*. Este domínio geotectónico é constituído por dois flancos: o flanco oriental que dispõe de uma inclinação média de 35° para *NE*, por 20 km, de Valongo até Castelo de Paiva, onde é interrompido por intrusões graníticas hercínicas; e o flanco inverso, a ocidente, com litologias praticamente verticalizadas, estende-se por 50 km até às vizinhanças de Castro Daire, intercetado, igualmente, por rochas graníticas hercínicas (Couto, 1993; Ferraz, 2004).

O afloramento em estudo, onde está implantada a Pedreira da Milhária, situa-se em Campo - Valongo, a leste da cidade do Porto, no flanco normal do Anticlinal de Valongo. De notar, que no flanco oposto ao do estudo observa-se uma transição gradual do Silúrico para o Devónico, sendo mais fóssilífero. (Dias *et al.*, 2013)

3.3 CARACTERÍSTICAS ARDÓSIA

A ardósia, rocha de grão muito fino, têm a sua génese associada a rochas argilosas, frequentemente com fósseis, que foram sujeitas a um grau moderado de metamorfização. Os seus componentes mineralógicos mais abundantes são a ilite (sericite e moscovite), o quartzo e a clorite, simultaneamente com os minerais mais raros: biotite, albite, turmalina, rútilo, zircon, ilmenite, apatito e os sulfuretos de ferro (calcopirite, pirite, pirrotite, marcassite e carbonatos).

Este xisto ardósico homogéneo, compacto e de cor cinzenta-azulada a cinzento-escura, resultante da grafite ou matéria carbonosa que apresenta, é notável pela clivagem xistenta nítida. A orientação preferencial dos filossilicatos, a moscovite e clorite, permite a clivagem da ardósia, sendo o espaçamento entre os potenciais planos de fratura por estes determinado em detrimento do diâmetro dos minerais de origem detrítica, sobretudo o quartzo.

3.4 PRODUTOS COMERCIÁVEIS

A aplicação vasta gama de produtos desde grandes blocos transformados, para fins arquitetónicos e até ao pó de lousa empregue em tintas, borrachas, plásticos, entre outros, integra o propósito da exploração de ardósia.

Atualmente, a Empresa de Lousas de Valongo, S.A., é responsável pela produção dos mais variados produtos:

- i. Ladrilhos e Placas:
 - Paredes interiores/exteriores;
 - Pavimentos interiores e exteriores;
 - Peitoris, Ombreiras e Padieiras;
 - Cobertores de degraus, espelhos e rodopé;
 - Soleiras;
 - Frentes de lareira.

- ii. Soletos para telhados: desde a Idade Média estes integram os telhados e as fachadas garantindo excelentes resultados de isolamento.
- iii. Tapos:
 - Cozinha e W.C.;
 - Mesas e Lavatórios.
- iv. Mesas de bilhar: capaz de produzir pedras para bilhares das mais variadas dimensões por intermédio de uma produção mecanizada e acabamentos com elevada precisão;
- v. Gravilha de ardósia: de qualquer tamanho e formato tipo palheta, obtêm-se através da ardósia natural britada e classificada, com aplicações em decoração, cobertura de jardins, terraços e, também, com fins de minimização do impacto visual da paisagem.

4 MÉTODOS DE EXPLORAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO DE ROCHAS ORNAMENTAIS

A utilização da Pedra Natural pelo Homem é intemporal uma vez que desde muito cedo houve a percepção da sua importância e do quão inigualável esta seria como ferramenta, material de construção, ou como mero objeto decorativo. Impôs-se assim a necessidade de reconhecer as características físicas e mecânicas ou visuais da Pedra, de forma a acompanhar os usos humanos, atribuindo a esta matéria-prima um valor estimativo que integra o mercado da rocha ornamental, fortemente marcado e vinculado por aspetos subjetivos, e não meramente técnicos.

A rocha ornamental é um recurso endógeno de uma determinada região, que por ser finito à escala humana, se torna insubstituível. Merecedora da sua valorização face a materiais que atualmente disputam o mesmo mercado, esta deve proporcionar alternativas em termos de produto final, e jogar com aquilo que tem de mais forte, a sua “história” e as suas características naturais, de certo modo inimitáveis, com o intuito de fazer face à sua concorrência.

A extração, a transformação e a aplicação/manutenção são etapas imprescindíveis da cadeia de valor da rocha ornamental. A extração de blocos de forma e dimensões regulares da massa mineral realiza-se por intermédio de uma sequência de operações, cada uma destas exigindo um ou mais tipos de máquinas, equipamentos e pessoal especializado.

Nesta indústria os blocos são transformados de acordo com as especificações exigidas para os produtos finais e as características e restrições estabelecidas pela matéria-prima. Por conseguinte, a etapas de transformação e; processamento da rocha, regem-se consoante as exigências do mercado, que apontam para uma alta precisão dimensional e a alta qualidade estética (polimento e acabamento de superfícies).

O setor da construção, principal consumidor dos produtos de pedra, exhibe um favoritismo pelos produtos de pedra natural dado que os aplica na configuração e equipamento de numerosos espaços, a título de exemplo, na construção de pisos e outras aplicações de interiores, pátios, calçadas, praças, esculturas, entre outros.

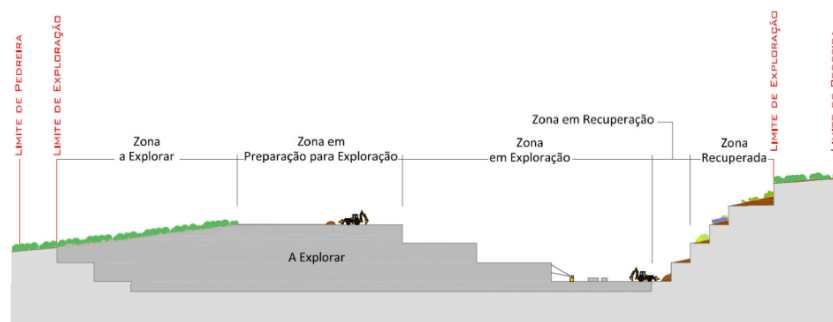


Figura 4.1 – Perfil exemplificativo da sequência da lavra e da recuperação. (Rui Pedra, 2013)

É alcançado um compromisso viável entre a exploração e a recuperação das áreas afetadas, durante o desenvolvimento da lavra, racionalizando-se o aproveitamento do recurso mineral em termos técnicos e económicos e, paralelamente, minimizando os impactes ambientais; por outras palavras, os trabalhos devem restringir-se à área estritamente necessária e, sempre que possível, liberar as áreas para a recuperação paisagística imposta por Lei (Figura 4.1).

No presente capítulo aborda-se a cadeia de produção da rocha ornamental, não de forma exaustiva, mas no sentido de uma descrição dos processos, nomeadamente, o seu processo extrativo e transformador, nas suas componentes gerais e operações/conceitos relevantes.

4.1 EXTRACÇÃO

O Decreto-Lei nº340/2007 de 12 de outubro define pedreira como *“o conjunto formado por qualquer massa mineral objeto de licenciamento, pelas instalações necessárias à sua lavra, área de extração e zonas de defesa, pelos depósitos de massas minerais extraídas, estéreis e terras removidas e, bem assim, pelos seus anexos”*.

Os critérios naturais referentes a aspetos de génese geológica determinam a localização rígida do substrato e, se a matéria-prima apresentar potencialidade e características justificativa para a sua exploração comercial, independentemente da vontade humana em mover a massa mineral, a localização da pedreira estará sempre condicionada pela especificidade da matéria-prima explorada.

Em termos técnicos de exploração as pedreiras de rocha com fins ornamentais diferenciam-se das pedreiras com fins industriais na sua forma, localização geomorfológica e método de desmonte. Deste modo a exploração de rochas ornamentais ocorre em:

- Pedreiras a Céu Aberto:
 - Flanco de Encosta;
 - Poço ou Fosso.
- Pedreiras Subterrâneas.
- Pedreiras Mistas (reúne no mesmo espaço a exploração a céu aberto e a exploração em subterrâneo).

A exploração de pedreiras envolve vantagens e desvantagens específicas ao método de exploração a adotar, onde se terão de pesar questões relacionadas, a título de exemplo, com a tipologia

de investimento, ou com os impactos sobre o meio ambiente. Consequentemente, o método de exploração a aplicar deve retificar-se e ajustar-se consoante as evoluções técnicas, a aplicação das melhores tecnologias disponíveis e as adequadas práticas ambientais.

Os critérios que persuadem a seleção de uma tipologia, subterrânea ou a céu aberto, têm de ser compatíveis com o valor da rocha, com o seu posicionamento face a formações não exploráveis sobrejacentes e com o investimento capital para a extração.

A título de exemplo, se as condições geotécnicas o permitirem, os cenários em que se justifique a exploração subterrânea abarcam o contexto em que a rocha classificada como *sã* e de boa qualidade se situa a uma profundidade considerável, sendo necessário remover elevadas quantidades de material sem valor comercial, ou na situação em que é crucial a remoção de um aterro de inertes (escombreira).

Em síntese, e apesar de se considerar que as geometrias definidas para as escavações asseguram uma boa estabilidade, atendendo às características geotécnicas do maciço, efetuam-se recolhas de dados geotécnicos durante os avanços da lavra, tanto a céu aberto como em subterrâneo, de modo a permitir uma intervenção na eventualidade de ser detetada alguma anomalia geológica que possa pôr em causa a estabilidade dos desmontes. O reconhecimento de fenómenos de instabilidade, determina potencial para mudança da geometria da escavação, a qual deve ser participada de imediato à entidade licenciadora.

Uma breve apreciação a respeito de cada tipologia de exploração de rocha ornamental, distinguindo o processo industrial, por outras palavras, as suas diferenças e semelhanças, é apresentada de seguida.

4.1.1 EXPLORAÇÃO CÉU ABERTO

Uma exploração a céu aberto, conforme a forma e a localização geomorfológica da pedreira, pode ser desenvolvida em flanco de encosta ou em poço, esta última também intitulada de rebaixo.

A rocha explorada em encosta, num monte ou cerro, arquitetando degraus, de cima para baixo, descreve o desmonte em flanco de encosta. O sentido do progresso dos degraus é feito almejando a evolução de uma exploração estável, do ponto de vista geotécnico, salvo quando, as boas práticas mineiras, recomendem que se deva consumir uma boa recuperação à retaguarda, reduzindo os impactos visuais e suscitando o enquadramento e reabilitação futura do espaço da pedreira.

O desmonte em profundidade compreende a conceção de patamares de exploração descendentes; em profundidade, num formato pirâmide invertida, devido ao fato de não ser autorizado, por questões de estabilidade, a exploração em “paredes direitas”, em que cada avanço é salvaguardado por uma distância de segurança. O prolongamento da vida útil de uma exploração subterrânea impõe uma área ou corta suficientemente alargada, que impeça um afunilamento prematuro, uma vez que esse processo, vulgarmente denominado por “cegar a pedreira”, torna tecnicamente inviável a sua exploração. Tal e qual o método anterior, o desmonte realiza-se por degraus direitos; todavia, a recuperação à retaguarda, na maior parte dos casos não é exequível.

4.1.1.1 OPERAÇÕES UNITÁRIAS

Antes da fase de exploração é indispensável apurar a viabilidade económica do jazigo por intermédio de ações de pesquisa, nomeadamente, reconhecimento geológico de superfície, levantamentos geofísicos, realização de sondagens mecânicas, abertura de sanjas ou valas e colheita de amostras para ensaios laboratoriais ou semi-industriais.

Em explorações a céu aberto, a execução da metodologia da lavra abrange inúmeras fases, particularmente, a preparação e traçagem, o desmonte, a remoção e o transporte. O conjunto de operações preparatórias, especificamente as que visam garantir os critérios de segurança, de economia, de benéfico aproveitamento do recurso mineral e de proteção ambiental, por outras palavras, atividades que abrangem a traçagem gradual dos acessos e das rampas, a remoção do coberto vegetal (desmatagem) e das terras de cobertura (decapagem), integram as ações precedentes ao desmonte do maciço rochoso.

As operações de desmatagem e decapagem devem, em termos temporais, realizar-se suficientemente próximas da extração, com o propósito de não afetar a área de intervenção mais do que o necessário em cada período. Contudo, estas devem ter lugar a uma distância razoável da frente de desmonte para que não se interrompa a atividade extrativa ou haja um conflito entre as operações. Inclusive a preparação das frentes incorpora o saneamento das bancadas e, também, a manutenção dos acessos às bancadas inferiores, os quais evoluem com a progressão da lavra.

Sob outra perspetiva, em subterrâneo, as mesmas operações inicializam-se com a preparação e abertura da acessibilidade à frente subterrânea, a galeria piloto, com 20 a 30 metros de extensão, favorecendo, igualmente, a avaliação das condições geológicas e geotécnicas do maciço de modo a definir a geometria do avanço da extração, assim como a posição dos pilares de suporte.

Tanto a céu aberto como em subterrâneo, as operações de preparação pretendem minimizar os impactos ambientais e, simultaneamente, sem repercussões nefastas para a atividade produtiva.

4.1.1.1.1 FASE DE PREPARAÇÃO E TRAÇAGEM

Numa fase inicial a rocha explorável é colocada a descoberto, seguida da delimitação da área de corta à superfície, originando faces livres para o avanço da exploração. Existem quatro operações de Preparação e Traçagem, são elas:

- ❖ Destapamento ou Decapagem – é removido o solo, terras vegetais e de cobertura, existente à superfície (desmatagem) da rocha que se tenciona desmontar, circunscrevendo simultaneamente a área de corta.
- ❖ Desmonte da Rocha Sem Valor Ornamental – consiste no desmonte da rocha sem valor comercial ou no contexto que a rocha superficial se apresente alterada e não seja passível de a explorar como rocha ornamental, permitindo pôr a descoberto o piso que se pretende explorar.

- ❖ Abertura de Caixas e Canais – operação que indica o início da exploração de um novo piso. De modo a ser exequível o desmonte da rocha através da individualização de talhadas de rocha e, posterior, execução de canais é essencial criar quatro faces livres num espaço suficiente, a intitulada abertura da caixa. Por sua vez abertura de canais possibilita a conceção de mais faces livres, definindo a massa a desmontar.
- ❖ Definição das Frentes de Desmonte – compreende a orientação dos canais e a determinação dos sentidos de desmonte com vista à otimização dos trabalhos, aumentando ao máximo o rendimento da exploração.

4.1.1.1.2 FASE DE DESMONTE

As principais operações que integram o método de desmonte executado na exploração asseguram o arranque da rocha e sua posterior preparação para beneficiação. Após a abertura de canais e determinadas as frentes de desmonte, a pedreira experimenta condições para dar início à exploração nas faces livres da massa rochosa exposta pela remoção das talhadas dos canais.

As operações da fase de desmonte dividem-se em:

- ❖ Perfuração – constitui a execução de furos horizontais e verticais com o objetivo de delimitar a massa a desmontar e permitir a passagem do fio diamantado.
- ❖ Corte – individualização das massas rochosas, frequentemente conhecidas por bancos, mediante a realização de cortes longitudinais, transversais, horizontais e verticais.

A sequência de corte com o fio diamantado é executada do seguinte modo (Figura 4.2):

1. Golpe vertical posterior;
2. Golpe de levante;
3. Golpe vertical lateral.

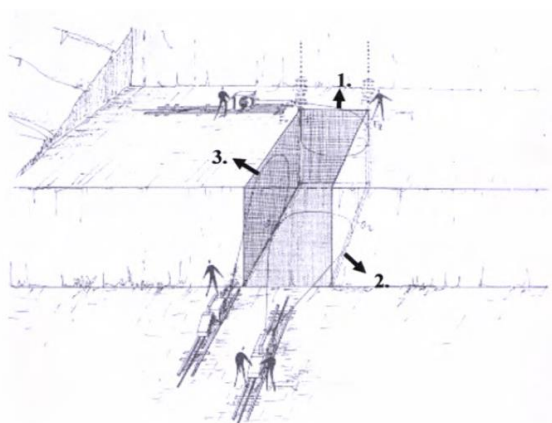


Figura 4.2 – Cortes executados nas massas rochosas. (Benetti Macchine s.r.l., 2007)

- ❖ Derrube – uma vez individualizados os bancos, efetua-se o derrube por desequilíbrio das talhadas, que acabam por tombar numa “cama” de escombros, pneus e/ou terra.

- ❖ Esquadrejamento – depois de derrubadas, as talhadas são individualizadas em blocos de dimensão transportáveis. Esta operação é extremamente influenciada pelas características de fracturação do bloco.

4.1.1.1.3 FASE DE REMOÇÃO, CARREGAMENTO E TRANSPORTE

Consiste na operação de remoção, carregamento e transporte de blocos com as dimensões comercializáveis desde a frente de desmonte até à futura área para depósito de blocos. Porém, a remoção, carregamento e transporte do material sem aptidão ornamental (escombros) existente na(s) frente(s) da pedreira é dirigido para a escombreira.

4.1.1.2 OPERAÇÕES AUXILIARES

Numa pedreira nem todas as operações estão diretamente ligadas à extração da rocha, como é o caso das operações auxiliares. Estas são essenciais para o funcionamento da pedreira e equivalem fundamentalmente à drenagem e esgotos, alimentação de energia elétrica e ar comprimido e construção e gestão de acessos.

4.1.1.2.1 SISTEMA DE ACESSOS

O sistema de acessos de uma pedreira é composto por caminhos de expedição para fora da exploração e também por caminhos internos de acesso às frentes de desmonte. Tais caminhos/pistas requerem uma manutenção sistemática, de forma a minimizar os custos de transporte e de manutenção dos equipamentos, tal como a minimização de impactes relativos à circulação de veículos e máquinas. Os acessos internos da pedreira, de largura conveniente ao tipo de circulação que neles vão ocorrer, e rampas de acesso ao interior da corta com uma determinada inclinação, dependem da evolução da lavra e do avanço das frentes de desmonte.

Por seu turno, os acessos às frentes de desmonte, arquitetados nos patamares entre bancadas, porém com ligação à rampa principal, estabelecem-se em conformidade com o avanço e condições locais existentes.

4.1.1.2.2 DRENAGEM E ESGOTOS

Dando importância às características drenantes dos maciços rochosos, especificamente, a permeabilidade destas formações rochosas, a drenagem de águas pluviais desenrola-se por intervenção de fendas e fraturas presentes no maciço rochoso. Na eventualidade de alguma água se acumular em ponto mais profundos da área de exploração a céu aberto, é fundamental a sua bombagem com destino a um depósito de água de utilização industrial ou um sistema de drenagem natural.

Os esgotos domésticos provenientes das instalações de apoio são, usualmente, dirigidos para uma fossa séptica periodicamente esvaziada por uma entidade competente.

4.1.2 EXPLORAÇÃO SUBTERRÂNEA

Vários são os fatores que influenciam a decisão de avanço para uma exploração em subterrâneo, sobretudo:

- ❖ Presença de material de excelente qualidade sob elevadas coberturas de solos e de material de fraca aptidão ornamental;
- ❖ Áreas licenciadas de reduzidas dimensões que impossibilitam o alargamento da pedreira e a remoção das camadas superficiais estéreis;
- ❖ Elevada pressão ambiental.

A abertura de uma exploração subterrânea estipula a execução de estudos minuciosos não só para precisar a dimensão e qualidade da jazida, como para permitir a caracterização do maciço rochoso e, subsequente definição de um “modelo geomecânico”, com base no qual serão efetivados, com êxito, os trabalhos de desmonte (e.g. dimensionamento e localização de pilares) e estabilização (e.g. pregagens). Os estudos preliminares associados à exploração subterrânea são (Moura, A. *et al*, 2007):

- I. Estudo geológico;
- II. Características estruturais da jazida;
- III. Características geomecânicas do maciço;
- IV. Estado de tensão *in situ*;
- V. Dimensões possíveis para as cavidades;
- VI. Recuperação da jazida;
- VII. Rendimento.

Elaborados os estudos acima citados é indispensável selecionar o método de desmonte suportado nos seguintes fatores:

- I. Características geológicas do local;
- II. Morfologia;
- III. Espessura e inclinação das camadas;
- IV. Continuidade da jazida;
- V. Profundidade da jazida;
- VI. Fatores económicos.

O sistema de lavra comum em pedreiras subterrâneas, é o método de câmaras e pilares, que no processo de desmonte, a massa mineral útil é retirada das câmaras, conservando-se um conjunto de pilares, previamente dimensionados na construção do modelo geomecânico, e em conformidade com as especificidades locais para que se venha a garantir um adequado suporte do teto da escavação.

Não obstante, ao facto de o ciclo produtivo de uma exploração subterrânea obedecer a um conjunto de operações unitárias e auxiliares, com recurso a equipamento e pessoal especializados, é particular desta tipologia de exploração, a definição de um plano de instrumentação para a monitorização do desmonte, assim como a definição dos métodos de suporte para salvaguardar cenários de rutura e deformação do maciço, necessários para garantir as condições de estabilidade.

O melhor aproveitamento do recurso natural em subterrâneo, instituído nas frentes limite da exploração a céu aberto, é feito em concordância com as características geotécnicas e apetência para a possibilidade de obtenção de produtos finais ornamentais do maciço, por intermédio de uma gestão de câmaras e pilares, zelando pelas condições de segurança e de estabilidade deste. Isto em concordância com as condições do maciço, tanto a determinação da cota base de exploração subterrâneo como a configuração proposta dispõe de capacidade para se modificarem.

4.1.2.1 OPERAÇÕES UNITÁRIAS

Independentemente de, na essência, a sequência de desmonte em subterrâneo ser em todo similar à sequência de desmonte a céu aberto, no desmonte subterrâneo subsiste a distinção de duas fases, escavação da galeria e o rebaixamento da galeria, conforme se verifica na Figura 4.3.

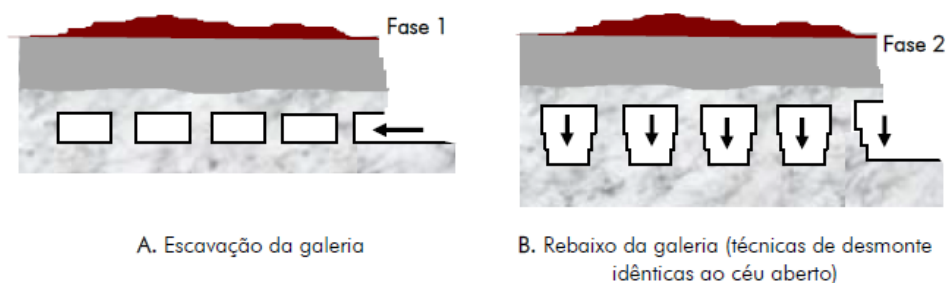


Figura 4.3 – Ilustração das duas fases, a escavação da galeria e o seu rebaixamento, que definem o desmonte em subterrâneo. (Guerreiro, H., 2000)

A escavação da galeria, etapa extremamente específica, evolui em conformidade com a sequência de operações para a abertura da galeria (corte, derrube e remoção, carregamento e transporte), onde o tipo de equipamento a utilizar e as características do maciço influenciam as suas dimensões. Mais tarde, a galeria, sujeitando-se às características do maciço, em particular a orientação das fraturas e da estratificação, é alargada para a dimensão projetada através de uma ou outra técnica, de avanço lateral ou avanço frontal (Figura 4.4), com o propósito de oferecer espaço de manobra com a finalidade de nele operarem meios mecânicos de lavra a céu aberto.

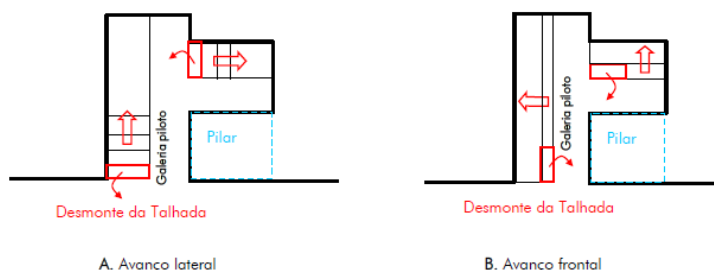


Figura 4.4 – Estratégias de alargamento da galeria piloto feitas na lavra subterrânea. (Guerreiro, H., 2000)

A etapa imediata, o rebaixamento da galeria em conformidade com o projetado, é desenvolvida exatamente como nos trabalhos a céu aberto, praticando a sequência anteriormente definida no ponto 4.1.1.1.2. da presente dissertação.

Posteriormente efetua-se uma breve análise de cada tipologia de exploração de rocha ornamental, destacando o processo industrial, isto é, as suas diferenças e semelhanças, e o tipo equipamento nelas usado.

4.1.2.1.1 CORTE

Numa galeria, a sequência de desmonte principia com a execução dos cortes de levante (horizontais), o corte de base seguido do corte de topo e posteriores cortes verticais que começam num dos limites da galeria até ao seu oposto. Os cortes verticais são três, dois deles (hasteais) a limitar a galeria e o outro, a definir o canal, pode ser central ou descentrado consoante a opção técnica.

Depois de devidamente delimitada a massa de rocha útil a desmontar e seu canal, procede-se à execução do canal para a realização do corte posterior e, conseqüente, individualização dos blocos, tudo isto recorrendo a equipamento tipo roçadora ou sistema de corte com fio diamantado.

Finalmente, quando a área subterrânea é extensa, realiza-se o desenvolvimento da exploração de cima para baixo, geralmente utilizando a técnica operada nas explorações a céu aberto.

4.1.2.1.2 DERRUBE

O derrube do canal dos blocos individualizados é efetuado por intervenção de pistons hidráulicos, colchões de alumínio empregues nos cortes horizontais ou máquina giratória munida de *ripper*. Por sua vez, o esquadrejamento da massa útil é efetivado pela máquina de fio diamantado.

4.1.2.1.3 REMOÇÃO, CARREGAMENTO E TRANSPORTE

A remoção, carregamento e transporte dos escombros e blocos esquadrejados é completada primeiramente por intermédio de uma máquina giratória e, posteriormente, por uma grua até à superfície.

4.1.2.2 OPERAÇÕES AUXILIARES

Além das operações auxiliares comuns à exploração a céu aberto essenciais ao desenrolar da exploração, existem na exploração subterrânea as operações de iluminação e ventilação.

A iluminação é um dos aspetos a não descuidar numa exploração de rocha ornamental em subterrâneo, pois permite a realização dos trabalhos em segurança. De fato, é feita uma distribuição uniforme da luz no interior dos trabalhos conforme as características refletoras das paredes, do teto e do chão das galerias (*Fornaro, M. et al, 1995*).

Nas explorações subterrâneas é obrigatório equacionar as operações de ventilação das frentes. O dimensionamento do sistema ventilação, dependente da dimensão da exploração e da sua evolução, pode compreender (*Guerreiro, H., 2000*):

- i. Ventilação Natural – sempre que a circulação de ar se realiza naturalmente sem instalação de ventilador.
- ii. Ventilação Artificial – quando é indispensável a instalação de ventiladores para facilitar a circulação do ar. Compreende a:
 - Ventilação insuflante – é injetado ar fresco diretamente na frente o que impede a contaminação do ar que alcança a zona de desmonte.
 - Ventilação aspirante – é desenvolvida uma depressão na frente que faz com que o ar presente nas cavidades de desmonte afluja à frente. Exibe a desvantagem de fazer chegar à zona de desmonte ar já contaminado.

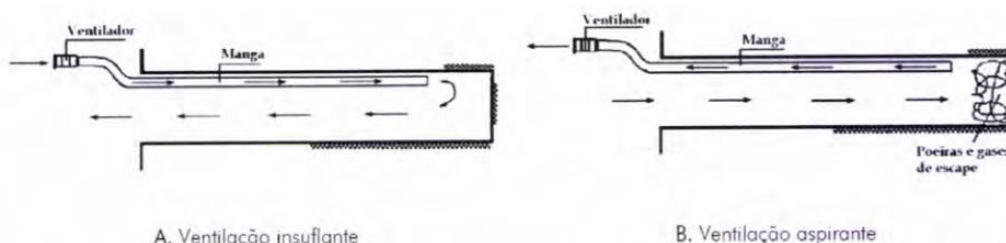


Figura 4.5 – Ilustração da ventilação insuflante e aspirante. (Guerreiro, H., 2000)

O artigo 76º do Decreto-Lei nº162/90, de 22 de maio, determina que o caudal de ar que chega às frentes de trabalho corresponde ao valor 805,5 m³/min (13425 l/s) tendo em atenção que os equipamentos a utilizar na frente subterrânea são essencialmente elétricos, com o máximo de 6 trabalhadores. No mesmo decreto-lei, no artigo 77º, é disposto que a velocidade do fluxo de ar nos trabalhos subterrâneos onde circulem trabalhadores não deve ultrapassar os 8 m/s nem ser inferior a 0,2 m/s.

Os trabalhos a efetuar no interior das cavidades podem ser definidos como tarefas visuais simples, que não exigem grande esforço, pelo que a iluminação a instalar centra-se na ordem dos 120-150 lux, de acordo com a norma DIN 5035 (1990), salientando-se que nas zonas de passagem, onde não se efetuam trabalhos, o valor estabelecido pode diminuir para 30-60 lux.

Os sistemas a aplicar, sujeitos às soluções existentes no mercado à época do desenvolvimento da exploração em subterrâneo, constarão de: lâmpadas fluorescentes, para alturas até 5 m, e holofotes de sódio-vapor, para alturas superiores a 5 m. A otimização da potência destes sistemas advém das características refletoras do piso e das paredes de escavação e, também, do tipo de local onde se tenciona instalar o sistema de iluminação.

4.2 TRANSFORMAÇÃO

Atualmente, a nível global, assiste-se à crescente tendência na utilização da pedra natural impelindo a realização de variadíssimos estudos na ótica abrangente da transformação desde o bloco ao produto acabado. O Sector da Transformação de Rochas Ornamentais Portuguesas, provido da mais moderna tecnologia ao serviço de uma forte tradição, integra uma importante estratégia no panorama

da economia nacional, competindo com rigor e qualidade a nível global e, portanto, preenchendo todo e qualquer requisito prescrito para a marcação CE.

Não obstante à circunstância de em Portugal as fábricas de transformação de Pedra Natural deterem as melhores tecnologias disponíveis, as fábricas vêm, também, passo a passo, a materializar princípios de gestão também eles coerentes com uma sociedade e com um mercado cada vez mais exigentes.

A transformação da rocha ornamental consiste no processamento da matéria-prima extraída nas pedreiras, em forma de bloco paralelepípedo, tendo em vista a fabricação de vários produtos, conforme as solicitações do mercado. Estes produtos experimentam acabamentos como chapa serrada, polida ou outro, ladrilho *standard* e obras por medida (peças dimensionadas consoante a solicitação do cliente e que se desviam das medidas “padrão”), empregues essencialmente na construção civil.

4.2.1 CLASSIFICAÇÃO E SELECÇÃO DE BLOCOS

Depois de individualizar a massa mineral, esta é esquartejada, sob a forma de um paralelepípedo, em blocos que serão submetidos a um processo de seleção e classificação tendo em vista a determinação do seu valor comercial.

A Norma Europeia 1467:2004 desenvolvida com o propósito de uniformizar os critérios e requisitos para os blocos em bruto de pedra natural, a partir dos quais são fabricados inúmeros produtos a utilizar na construção civil e/ou trabalhos similares, atende a:

- I. Definições, como bloco em bruto, bloco irregular, bloco aparelhado e bloco de tamanho específico;
- II. Determinação das dimensões: comprimento, largura e altura, medidas reais de um bloco em bruto, medidas úteis de um bloco em bruto e medidas comerciais de um bloco em bruto.
- III. Condições relativas às características geométricas: critérios de medição, requisitos característicos à forma e ao volume.
- IV. Requisitos da pedra natural para blocos em bruto: denominação, aspeto visual, massa volumica aparente e porosidade aberta, resistência à flexão e outros, quando essencial.

4.2.1.1 TAMANHO DOS BLOCOS

As dimensões máximas admissíveis pelos equipamentos de serragem existentes e as características geológicas locais onde se encontra implantada a exploração, especificamente a intensidade de fracturação do maciço, a espessura e homogeneidade dos vários litótipos presentes na exploração, bem como a cor, granulometria e porosidade da rocha, compõem o elenco de variáveis responsáveis pelo tamanho dos blocos destinados à indústria de transformação de rochas ornamentais.

4.2.1.2 SELECÇÃO DE BLOCOS

A seleção dos blocos de rocha ornamental é influenciada pelos seguintes aspetos principais:

- I. Aspeto macroscópico – geometria e dimensão dos blocos, cor, textura, porosidade, homogeneidade do bloco, vergadas, etc.
- II. Fatores penalizantes – manchas e/ou auréolas de alteração de minerais, ocorrência de fraturas ou microfraturas, ocorrência de heterogeneidades como variações de tonalidade, de textura, vergadas, nódulos, poros, concentrações de minerais acessórios, entre outros.

A avaliação da qualidade dos blocos, tanto em termos estéticos como em termos físico-mecânicos, facilita a determinação do seu valor comercial e a identificação de particularidades penalizantes e “defeitos” de modo a impedir possíveis prejuízos durante o corte e serragem do bloco.

Usualmente, a avaliação da qualidade dos blocos é efetuada visualmente, mas também pode ser efetuada mediante uma avaliação acústica através do som produzido após a percussão com um objeto metálico no bloco ou por intermédio de ultrassons, visando determinar a ocorrência de fraturas, microfraturas e descontinuidades existentes no bloco.

4.2.1.3 PLANOS DE CORTE

A escolha do plano de corte destina-se à definição de um plano com as características estéticas pretendidas ou, simplesmente, o mais favorável, dispondo como premissa o maior rendimento possível do bloco.

Os inúmeros aspetos ornamentais adquiridos em consequência da deformação geológica sofrida ou ocorrência de vergadas exigem um estudo adequado do seu efeito ornamental e decorrente indicação do plano de corte nos blocos, mediante a marcação de traços paralelos, de modo a auxiliar a sua orientação correta nos equipamentos de corte e serragem.

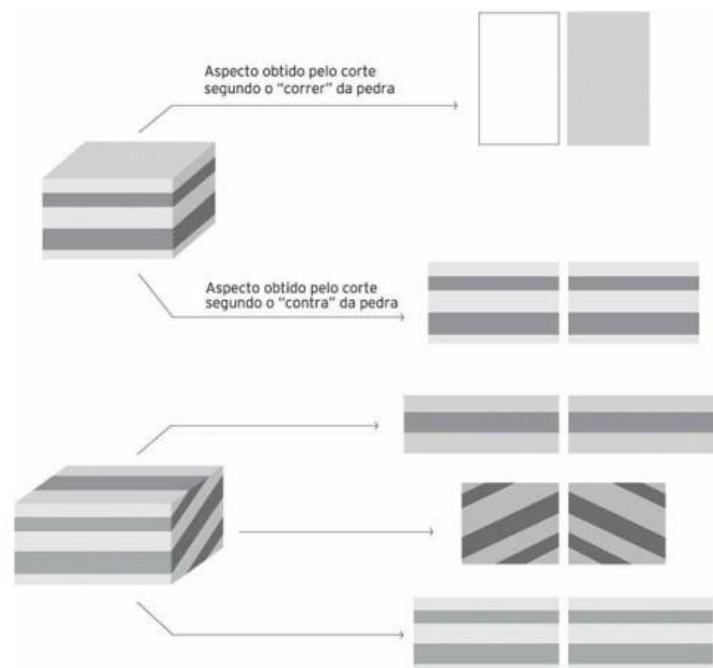


Figura 4.6 - Padrões viáveis de se conseguir através de blocos de uma rocha anisotrópica. (Moura, A.C. et al, 2007)

Com uma beleza natural inquestionável, a pedra natural, ao serviço da criatividade humana, dispõe de aptidão para ser esculpida, polida e cortada em formatos dispare. Em conformidade com o plano de corte utilizado e da presença de vergadas ou bandas de diferentes tonalidades e feitios, é exequível obter aplicações finais ímpares, em que se pode notar o movimento da vergada e idealizar combinações de painéis únicos, criados pela Natureza e aprimorados pelo Homem (Figura 4.6).

4.2.2 PROCESSO DE TRANSFORMAÇÃO

Em regra, o processo de transformação é desencadeado com a entrada do *input*, que corresponde ao bloco anteriormente selecionado em concordância com o produto final que se deseja obter (*output*).

Na Figura 4.7, é representado de forma sintetizada, o processo de transformação da rocha ornamental, que sem descurar a existência de vários cenários e nuances que o podem tornar mais complexo, serve para compreender o fluxo normal dos trabalhos desde a entrada do bloco na fábrica até à saída dos produtos finais.

O processo de transformação começa com a preparação do bloco, por outras palavras, é efetuado o seu esquadreçamento de modo a rentabilizar a matéria-prima bem como o equipamento de serragem. Esta operação, denominada transformação primária, é muitas vezes executada ainda no local de extração.

A elevada eficiência do processo transformador, maximizando o aproveitamento da rocha enquanto se reduz os consumos e a produção de resíduos, constitui o princípio inerente a esta primeira fase.

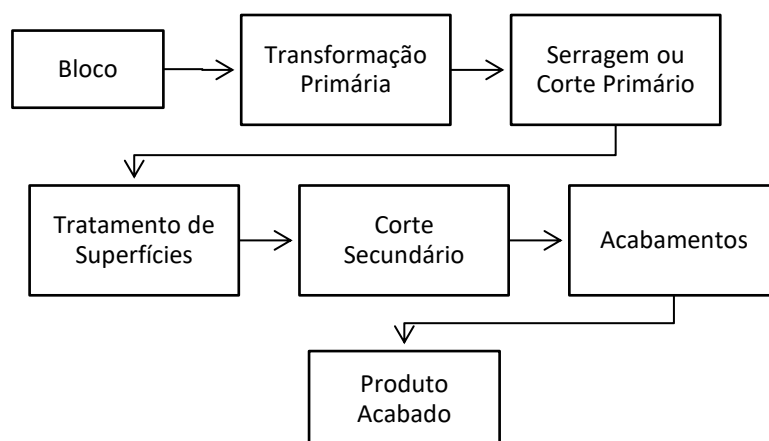


Figura 4.7 – Fluxograma de operações comumente incluídas no processo de transformação dos produtos de rocha ornamental. (Adaptado: Moura, A.C. et al, 2007)

Posteriormente, segue-se a operação de serragem ou corte primário. Evidentemente o produto final que se deseja obter advém do equipamento operado, isto é, do tipo de serragem selecionado. A operação seguinte, o tratamento de superfícies, refere-se ao aspeto a conferir à face visível depois de concluída, devendo a superfície ostentar um aspeto uniforme no final do seu processo.

No fim, surgem as operações de corte secundário e acabamentos. Neste grupo de operações, ao se examinar os equipamentos utilizados nos últimos anos, especificamente o fabrico assistido por computador, equipamento laser e máquinas de corte com controlo numérico (CNC), verifica-se um desenvolvimento tecnológico com maior expressão e um melhor aproveitamento das chapas de pedra.

4.2.3 TIPOS DE ACABAMENTO

O acabamento de uma superfície é ditado pelo aspeto da face visível após finalizada, devendo a superfície ostentar um aspeto uniforme no fim do processo.

Em concordância com as normas europeias, as superfícies dos produtos transformados podem ser conseguidas por abrasão, por ferramentas de percussão ou por outros processos de acabamentos. Como tal, os vários acabamentos das superfícies dos produtos devem assentar nas seguintes normas europeias, designadamente:

- I. EN 12057 – especifica os preceitos para os ladrilhos modulares planos de pedra natural empregues no acabamento de pavimentos, degraus, paredes e tetos;
- II. EN 12058 – define os requisitos para as placas de pedra natural planas utilizadas em pavimentos e degraus;
- III. EN 1469 – menciona as condições para as placas de pedra natural aplicadas no revestimento de paredes e de tetos.

Ocasionalmente, é indispensável o preenchimento ou reconstituição superficial para colmatação de falhas, fraturas ou orifícios naturais por intermédio de aplicação de produtos artificiais, como é o caso de massas, polímeros, resinas ou outros, com o propósito de uniformizar as superfícies ou aprimorar a resistência e a durabilidade da pedra.

As superfícies alcançadas por abrasão provêm do desgaste impelido pelos diversos tipos e granulometrias de abrasivos; em alternativa, as superfícies alcançadas por percussão decorrem do golpeamento da superfície através de cinzéis, picões ou utensílios de bujardar; e, por último, as superfícies obtidas por outros métodos derivam da utilização de equipamentos específicos, como por exemplo, lança chamas para obter superfícies flamejadas.

4.2.4 CONTROLO DO PRODUTO ACABADO

Alguns produtos finais do processo de transformação, tais como lajes, cubos e paralelepípedos, guias, placas para revestimentos de paredes, pavimentos e escadas e ladrilhos modulares, resultam da verificação de requisitos presentes em diversas normas harmonizadas antes da sua disponibilização no mercado da Comunidade Europeia.

O controlo da qualidade dos produtos contempla inúmeras atividades que não se concretizam unicamente no final da linha de produção, mas ao longo das diversas etapas de produção; assim, para o efeito, o controlo, é efetuado em concordância com as normas ulteriores:

- I. NP EN 1341:2004 – Lajes de Pedra Natural para Pavimentos Exteriores. Requisitos e Métodos de Ensaio.

- **Laje** é um “qualquer elemento de pedra natural utilizado como material de pavimentação em que a largura nominal é superior a 150 mm e excede, em geral, duas vezes a espessura”.
- II. NP EN 1342:2004 – Cubos e Paralelepípedos de Pedra Natural para Pavimentos Exteriores. Requisitos e Métodos de Ensaio.
 - **Cubo ou paralelepípedo** é um “pequeno elemento de pedra natural utilizado como material de pavimentação, com dimensões nominais compreendidas entre 50 mm e 300 mm, em que, geralmente, nenhuma dimensão planar (comprimento e largura) excede o dobro da espessura. A espessura nominal mínima é de 50 mm”.
- III. NP EN 1343:2005 – Guias de Pedra Natural para Pavimentos Exteriores. Requisitos e Métodos de Ensaio.
 - **Guia (ou lancil)** é um “elemento com comprimento superior a 300 mm, normalmente utilizado para as bordaduras das estradas ou passeios”.
- IV. NP EN 1469:2004 – Produtos em Pedra Natural: Placas para Revestimentos de Paredes. Requisitos.
 - **Placa para revestimento** é uma “placa cortada à medida destinada a revestimento de paredes e de tetos exteriores ou interiores, fixadas a uma estrutura quer mecanicamente, que por intermédio de argamassas ou colas”.
- V. NP 12057:2004 – Produtos em Pedra Natural: Ladrilhos Modulares. Requisitos.
 - **Ladrilho modular** é um “elemento plano quadrado ou retangular de pedra natural com medidas normalizadas, geralmente menores ou iguais a 610 mm, obtido por corte ou clivagem a uma espessura nominal igual ou inferior a 12 mm”.
- VI. NP EN 12058:2004 – Produtos em Pedra Natural: Placas para Pavimentos e Escadas. Requisitos. Determina que:
 - **Placa para pavimentos** é um “elemento plano de pedra natural obtido por corte ou fendilhamento com uma espessura nominal superior a 12 mm, que é colocado sobre uma estrutura por intermédio de argamassas, colas ou outros elementos suporte”;
 - **Rodapé** é um “elemento plano de pedra natural obtido por corte ou fendilhagem com uma espessura nominal superior a 12 mm, que é colocado em cada parede nas orlas de um pavimento e fica em contacto com o mesmo”;
 - **Placa para degraus** é um “elemento plano de pedra natural obtido por corte ou fendilhagem com uma espessura nominal superior a 12 mm (exceto os espelhos) para constituir a parte horizontal de um degrau de escada (cobertor ou piso) ou a parte vertical de um degrau de escada (espelho)”.

Atualmente, em consequência das solicitações do mercado e das imposições da Comunidade Europeia, as ações de controlo caracterizam-se não só pelo controlo dimensional, mas também pela avaliação das características físico-mecânicas do produto.

Os requisitos dimensionais e, porventura, outros requisitos correlacionados a declarar são, usualmente, verificados por lote de produção. A verificação do controlo dimensional assenta nos requisitos relativos à espessura, planeza, largura e comprimento, ângulos e formas especiais, localização de orifícios de ancoragem, dimensões comerciais. Ademais, são igualmente monitorizados os requisitos inerentes ao acabamento da superfície e ao aspeto visual.

As características físico-mecânica, determinadas com uma periodicidade mais elevada, encontram-se sujeitas à aplicação pretendida e ao produto final, e são, nomeadamente, as seguintes:

- i. Descrição petrográfica;
- ii. Resistência à flexão;
- iii. Resistência à compressão;
- iv. Carga de rutura ao nível de um orifício de ancoragem;
- v. Absorção de água à pressão atmosférica e por capilaridade;
- vi. Massa volúmica aparente e porosidade aberta;
- vii. Resistência ao gelo;
- viii. Resistência ao choque térmico;
- ix. Permeabilidade ao vapor de água;
- x. Força de aderência;
- xi. Resistência ao desgaste;
- xii. Resistência ao escorregamento;
- xiii. Tactilidade.

O procedimento de controlo do produto final exhibe uma importância acrescida comparativamente a todo o ciclo de produção, pois, só assim, a indústria, promovendo a melhoria contínua ao longo do processo produtivo, poderá ir de encontro às exigências do cliente da forma mais eficaz.

5 CARACTERIZAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS

Um maciço rochoso é constituído por rocha “intacta” e contínua, limitado por planos de fraqueza (descontinuidades), de origem mecânica ou sedimentar, com comportamento anisotrópico e um carácter heterogéneo vinculados à sua génese, frequência e orientação dos planos.

A avaliação do comportamento de um maciço rochoso, tão próximo do real quanto exequível, face às inúmeras solicitações a que eventualmente possam ser expostos, é efetuada mediante a caracterização e descrição deste. Essa avaliação é conseguida numa fase inicial, por meio de uma descrição geral do maciço, recorrendo a métodos expeditos, como por exemplo a Descrição Geotécnica Básica (BGD, em inglês), que mais à frente será referida.

Habitualmente, a distinção de zonas geotécnicas, aproximadamente, homogéneas, como consequência de condições litológicas e estruturais naturais, compreende o procedimento de descrição geral dos aspetos e características observáveis. Por último, de acordo com a informação compilada, é plausível a classificação de maciços rochosos e, similarmente, a antecipação de alguns tipos de respostas para a obtenção de indicadores empregues na modelação do respetivo comportamento geomecânico.

Em seguida, após se destacar às particularidades das descontinuidades e aspetos elementares na temática maciços rochosos de resistência elevada, também se citam alguns índices quantitativos que classificam ou detalham a sua qualidade.

As rochas referidas como brandas (*weak rocks*), também qualificadas como rochas de resistência baixa (≤ 20 MPa), compreendem os pelitos, xistos argilosos, xistos grafitosos, ardósias, arenitos, alguns grauvaques e calcarenitos, entre outras litologias. Todas elas do tipo evolutivo, segundo *Durmekova et al.* (2003) e *Santi* (2006), experienciam repetidamente os seguintes tipos de problemas: deformabilidade relevante, frequentemente análoga à fluência e/ou anisotropia, permeabilidade principalmente por fracturação, em alguns casos modificação de volume na presença de água (expansibilidade), uma durabilidade fraca e uma resistência à meteorização limitada. As duas últimas características transfiguram-se vulneráveis a mudanças extremas de temperatura e à pluviosidade intensa, desintegrando-se facilmente num ínfimo intervalo de tempo (*Durmekova et al.*, 2003), sendo capaz de conduzir à rotura assim que são expostas, sem qualquer aviso prévio.

O facto de, próximo ao pé dos taludes se verificar uma deterioração mais significativa dos maciços, é consequência do contacto direto com os agentes de meteorização à superfície e ao longo

das respectivas descontinuidades e, além disso, convergem nessa zona, as águas de percolação superficiais e é mais direta a ação das vibrações, por efeito da circulação dos veículos motorizados.

Estes materiais graças à sua génese, salvo as características anteriormente definidas, exibem inúmeros tipos de descontinuidades isoladas ou com uma distribuição sistemática, por exemplo, estratificação, xistosidade, diáclases e falhas, cujas orientações, aliadas com a do talude, condicionam a estabilidade deste e, inclusive, o tipo de diligências a adotar para a sua reabilitação.

5.1 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

As propriedades geotécnicas de rochas com resistência baixa estão estritamente associadas com as características mineralógicas e texturais, uma vez que são a transição entre solos e rochas. (Gomes, 1992). Estas, bastante sensíveis à água, ocasionam uma rápida diminuição da sua resistência e um aumento da deformabilidade, dado que experimentam expansibilidade, favorecendo a instabilização do maciço rochoso.

As múltiplas adversidades de trabalhar neste tipo de materiais incita a prática, *in situ*, de ensaios de sísmica direta entre os furos de sondagem, por efeito dos grandes contrastes de velocidades existentes entre os diferentes materiais, tendo em vista o levantamento de informações sobre a sua baixa resistência e alta deformabilidade. (Gomes, 1992)

O grau de alteração dos maciços rochosos determinado pela alteração química, física ou mecânica, resulta da mudança da sua composição inicial, induzida pela alteração da rocha devido a processos de desagregação e/ou decomposição. O seu aspeto *in situ*, os ensaios laboratoriais e a prospeção geofísica permitem, pela classificação universal proposta pela *ISRM* (1981) (Tabela 6.1), quantificar o seu grau de alteração.

Tabela 5.1 – Graus de alteração de uma rocha. (*Adaptado: ISRM, 1981*)

GRAU DE METEORIZAÇÃO	SIMBOLOGIA	DESCRIÇÃO	CARACTERÍSTICAS
Sã ou não alterada	W ₁	Não se visualizam sinais de modificação na matriz rochosa.	- Sã e compactada;
Pouco alterada	W ₂	Alterações na cor inicial da matriz rochosa (descoloração) perto de descontinuidades.	- Descontinuidades fechadas; - Permeabilidade é praticamente nula.
Medianamente alterada	W ₃	O material rochoso está modificado, mas não se desagrega e preserva a sua composição química inicial.	- Maciços aproximadamente sãos; - Intersectado por descontinuidades abertas.
Muito alterada	W ₄	Mais de metade do material rochoso está decomposto e/ou desagrega-se; a rocha é muito friável.	- Zona alterada excessivamente alterada ou mesmo decomposta;
Decomposta	W ₅	Todo o material rochoso está muito decomposto e/ou desagregado como um solo residual.	- Permeabilidade do tipo intersticial.

A fim de caracterizar uma rocha, é determinante classificar o ângulo de atrito visto que, de modo geral, as rochas de grão fino e ou com elevado teor em mica inclinam-se para valores baixo desse ângulo, enquanto rochas de grão grosseiro ou de elevada resistência, apresentam um mais elevado ângulo de atrito (Hoek, 2006). Assim, a partir do material em estudo é exequível prever, minuciosamente, a gama de valores do ângulo de atrito:

- i. Rochas com baixo atrito (20° - 27°): xisto micáceo, argila xistosa, marga;
- ii. Rochas de médio atrito (27° - 34°): arenito, siltito, cré, gnaiss, ardósia;
- iii. Rochas de elevado atrito (34° - 40°): basalto, granito, calcário, conglomerado.

5.2 DESCONTINUIDADES

No contexto da presente dissertação, o termo “descontinuidade”, usado sem qualquer conotação genética, aponta para qualquer interrupção na continuidade de um maciço rochoso; acresce, inclusive, que a sua resistência à tração é inexistente e, de modo consequente, os termos “diáclases” ou “falhas” apresentam géneses distintas (Hudson & Harrison, 1997).

As descontinuidades, quer em termos de resistência, quer em deformabilidade e comportamento hidráulico, influenciam as propriedades dos maciços rochosos (ISRM, 1981). A presença de descontinuidades equivale a uma variação das características de deformabilidade, resistência ao corte e permeabilidade, condicionando o comportamento mecânico do maciço rochoso, e, no caso de um talude, a sua estabilidade.

Daí a importância de uma correta e detalhada descrição do maciço para prever o seu comportamento. Posto isto, apresenta-se uma breve descrição de algumas características imprescindíveis à caracterização das descontinuidades.

5.2.1 TIPOS DE DESCONTINUIDADES

Como mencionado, o termo “descontinuidade” é empregue sem qualquer referência à sua génese, pelo que estas descontinuidades, singulares ou sistemáticas, podem apresentar as seguintes particularidades:

- ❖ Singulares – com maior dimensão que as sistemáticas, podem controlar o comportamento mecânico do maciço; mais contínuas e persistentes podendo atingir vários quilómetros; requerem descrição e tratamento individual. Ocorrem sob a forma de um único plano cruzando o maciço.
- ❖ Sistemáticas – caracterizadas por parâmetros médios. Manifestam em famílias.

Na tabela 5.2 são mencionadas algumas das peculiaridades das descontinuidades.

Tabela 5.2 – Principais tipos de descontinuidades. (Adaptado: Vallejo et al., 2004)

DESCONTINUIDADES	SISTEMÁTICAS	SINGULARES
Planares	- Diáclases - Planos de estratificação - Planos de clivagem - Planos de xistosidade - Foliação	- Falhas - Discordâncias
Lineares	- Intersecção de descontinuidades planares	- Eixos de dobras

5.2.2 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

A atitude, espaçamento e persistência integram as características geométricas das descontinuidades responsáveis pela geometria da compartimentação dos maciços rochosos.

5.2.2.1 ATITUDE

A atitude é a orientação de qualquer superfície plana, segundo a sua direção, determinada pelo ângulo que o plano faz com a direção Norte-Sul, e a inclinação, estabelecida pelo ângulo do plano da superfície com o plano horizontal, e pela indicação do quadrante para o qual a superfície mergulha (Rocha, 2013). Na análise de um maciço rochoso, é primordial a medição de inúmeras descontinuidades para assim definir cada família de descontinuidade. (Hudson & Harrison, 1997)

5.2.2.1.1 MEDIÇÃO

A ISRM (1978) com a intuito de avaliar esta característica geométrica, a atitude, mecaniza a utilização de dois métodos: (i) utilização de bússola e clinómetro para a medição de ângulos em concordância com a Figura 5.1.; e (ii) método fotogramétrico por intermédio da fotogrametria para determinar as coordenadas de, no mínimo, quatro pontos em planos de descontinuidades evidentes, delimitando assim a orientação desses planos.

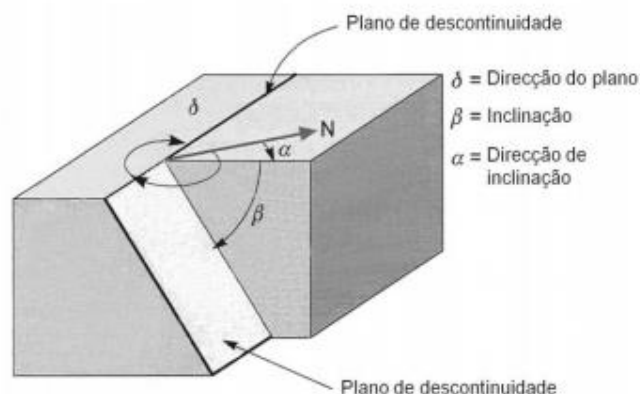


Figura 5.1 – Avaliação da característica geométrica: atitude. (Traduzido: Vallejo et al., 2004)

5.2.2.1.2 RESULTADOS

A representação gráfica dos dados obtidos para as distintas famílias de descontinuidades, independentemente do método utilizado, é conseguida através de:

- i. Símbolos em mapas geológicos que precisam os valores médios de direção e de mergulho para os diversos tipos principais de descontinuidades.
- ii. Blocos diagrama, admitindo um cenário geral das famílias e suas respectivas orientações.
- iii. Diagrama de roseta, que retrata um grande número de medidas de orientação de forma quantitativa.
- iv. Projeção estereográfica dos polos dos planos evidenciando os valores médios das diferentes famílias.

5.2.2.2 ESPAÇAMENTO

O espaçamento, parâmetro imprescindível, está frequentemente associado as roturas dos maciços que, conseqüentemente, variam em função da relação entre as dimensões do espaçamento das descontinuidades. (Hudson & Harrison, 1997)

De facto, o espaçamento entre descontinuidades pode ser determinado mediante três perspectivas: espaçamento total, espaçamento por famílias e espaçamento normal (Wines & Lilly, 2002).

O espaçamento total integra a distância medida por toda a extensão de uma linha de levantamento de distâncias (*scanline*), entre duas descontinuidades adjacentes, particularizando a sua localização e orientação. Sob outra perspectiva, o espaçamento por famílias também medida ao longo de uma *scanline*, especificando a localização e orientação, é o espaçamento entre duas descontinuidades adjacentes da mesma família. Por último, o espaçamento normal, é o espaçamento por toda a extensão de uma linha normal à orientação média de uma certa família.

5.2.2.2.1 MEDIÇÃO E RESULTADOS

Tanto o espaçamento total, como o espaçamento por famílias é determinado diretamente por meio de uma fita métrica de, no mínimo, três metros, calibrada com divisões em milímetros e o valor obtido é exibido consoante a terminologia universal da Tabela 5.3. (ISRM, 1978)

Tabela 5.3 – Classes de espaçamento. (Traduzido: ISRM, 1978)

DESCRIÇÃO	ESPAÇAMENTO (mm)
Extremamente próximas	< 20
Muito próximas	20 – 60
Próximas	60 – 200
Moderadamente próximas	200 – 600
Afastadas	600 – 2000
Muito afastadas	2000 – 6000
Extremamente afastadas	> 6000

Ao invés, o espaçamento normal, é definido através da equação [5.1], em que X_n corresponde ao espaçamento normal e X_d é um valor de espaçamento aparente medido na face do maciço para uma família cuja normal faz um ângulo agudo, δ , com a *scanline* utilizada.

$$X_n = X_d \cos \delta , \quad [5.1]$$

5.2.2.3 PERSISTÊNCIA

A persistência, parâmetro mais difícil de quantificar, configura o comprimento visível do traço de descontinuidade verificado numa face exposta de um maciço rochoso. *Einstein et al.* (1983) asseguram que este parâmetro detém um grande efeito quanto à resistência do maciço rochoso; todavia, o seu levantamento no interior do maciço é inviável.

5.2.2.3.1 MEDIÇÃO

A medição da persistência é efetuada mediante uma fita métrica de, pelo menos, dez metros de comprimento. Na hipótese de o afloramento proporcionar a visualização tridimensional dos planos de descontinuidades, torna-se possível que o comprimento desta possa ser medido em concordância com a direção e a inclinação desses planos, admitindo-se o maior valor e, também, indicando se a descontinuidade culmina, ou não, contra outra descontinuidade. (*ISRM*, 1978)

5.2.2.3.2 RESULTADOS

Este parâmetro pode ser quantificado de acordo com a terminologia proposta pela *ISRM* (1978), evidenciada na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Valores de persistência. (*ISRM*, 1978)

DESCRIÇÃO	COMPRIMENTO (m)
Persistência muito baixa	< 1
Persistência baixa	1 – 3
Persistência média	3 – 10
Persistência elevada	10 – 20
Persistência muito elevada	> 20

5.2.3 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

A rugosidade, enchimento e abertura compõe as características físicas das descontinuidades responsáveis pela resistência das suas paredes.

5.2.3.1 RUGOSIDADE

As irregularidades e ondulações existentes nas superfícies das paredes das descontinuidades, relativamente ao plano médio das mesmas, define a rugosidade. A rugosidade irregular decorre das condições em que as paredes das descontinuidades se originam ou às existentes *in situ*. Este parâmetro,

correlacionado com a resistência ao corte da própria descontinuidade, permite deduzir que descontinuidades com elevada rugosidade assinalam maior resistência ao corte, que decresce com o incremento da abertura e/ou da espessura do enchimento.

Como os valores de rugosidade diferem segundo a direção, estes, numa mesma descontinuidade, são capazes de ser surpreendentemente diferentes pelo que, quando se analisa um problema de escorregamento é relevante a definição da direção presumível do movimento.

5.2.3.1.1 MEDIÇÃO E RESULTADOS

Assente em equações matemáticas ou, então, mediante observações de campo, com o auxílio de perfis padrão de rugosidade (Figura 5.2), torna-se possível conseguir uma medida qualitativa deste parâmetro.

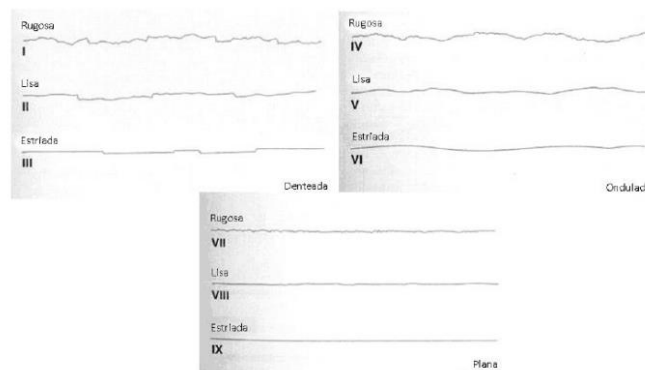


Figura 5.2 – Ilustração dos vários perfis de rugosidade. (Vallejo et al, 2004)

Os métodos que se aplicam para a quantificação da rugosidade em maciços rochosos dividem-se em métodos de “contato” e métodos de “não contato”. (Ge et al., 2014) Os primeiros obrigam a que o operador ou o instrumento de medida, contatem fisicamente com a superfície da descontinuidade de modo a compilar as medidas ou áreas estabelecidas. Em oposição, os segundos não carecem desse contato (Tabela 5.5).

Tabela 5.5 – Métodos de “contato” e de “não contato” a fim de precisar a rugosidade. (Adaptado: Ge et al., 2014)

MÉTODOS DE “CONTACTO”	MÉTODOS “SEM CONTACTO”	
Criação de um perfil linear	Perfilómetro a laser	
Bússola e discos clinométrico	Técnicas de projeção estrutura de luz	Varrimento a laser
Perfilometria das sombras		Câmeras estéreo topométricas
Técnicas de amostragem pontual ou do plano tangente		
Perfilometria mecânica ou eletrónica		

Os métodos de “contato”, sempre que confrontados com os métodos de “não contato”, apresentam a restrição de serem morosos e de, possivelmente, não permitirem obter um número suficiente de dados para a quantificação detalhada e precisa da rugosidade; em contrapartida são

métodos relativamente acessíveis, ocasionalmente, com a capacidade de fornecerem dados suficientes para quantificar a rugosidade em grande escala.

Por vezes existem limitações em fases preliminares de caracterização geotécnica, fases de viabilidade, que dificultam a utilização das técnicas acima expostas. Deste modo, a descrição da rugosidade será restrita ao uso de termos descritivos fundamentados em duas escalas de observação: grande escala (centimétrica) e escala intermédia (métrica). A associação da escala intermédia dividida em irregular, ondulada e planar, com a escala grande, sobreposta na intermédia, dividida em rugosa, lisa e estriada, permite uma classificação em nove classes (Tabela 5.6) cujos perfis típicos estão presentes no Anexo I.

Tabela 5.6 – Classificação de rugosidade. (Traduzido: ISRM, 1978)

CLASSES	DESCRIÇÃO	
	ESCALA GRANDE	ESCALA INTERMÉDIA
I	Rugosa	Irregular
II	Lisa	
III	Estriada	
IV	Rugosa	Ondulada
V	Lisa	
VI	Estriada	
VII	Rugosa	Planar
VIII	Lisa	
IX	Estriada	

O propósito primordial da descrição da rugosidade é o de favorecer a estimativa da força de corte que poderá ser alcançada mediante a equação [5.2], válida para tensões normais baixas, desenvolvida por Patton (*Hoek, 2007*):

$$\tau = \sigma_n \tan (\phi_{básico} + i) \quad [5.2]$$

Onde:

τ – Tensão de corte; σ_n – Tensão normal sobre parede da descontinuidade; $\phi_{básico}$ – Ângulo de atrito básico da superfície; i – Ângulo de aspereza = inclinação da rugosidade em relação à direção de corte.

O valor da tensão de corte de pico é sujeito ao valor da tensão normal na parede da descontinuidade e ao grau rugosidade; em oposição ao valor do ângulo de atrito residual que, em concordância com *Barton & Choubey (1977)*, resulta do grau de meteorização das paredes da descontinuidade e do tipo de material. Este último é estimado segundo o rácio entre o valor do ressalto do martelo de Schmidt conseguido numa zona de material meteorizado na parede na descontinuidade e o obtido em material sem qualquer indício de meteorização.

Valores de ângulo de atrito de pico (ϕ_{pico}) são alcançados pela subsequente equação [5.3]:

$$\phi_{pico} = JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_{residual} \quad [5.3]$$

Onde:

JRC – Joint roughness coefficient; JCS – Joint wall compression strength; σ_n – Tensão normal na parede da descontinuidade; $\phi_{residual}$ – Ângulo de atrito residual.

O parâmetro JRC obtêm-se pela comparação da superfície de descontinuidade com perfis standard indicados no Anexo II.

Por sua vez, o parâmetro JCS reporta-se à resistência à compressão do material das paredes da descontinuidade, estimando-se por intermédio de medições com o martelo de Schmidt aferindo o valor do ressalto com o peso volúmico do material, recorrendo ao ábaco exposto no Anexo III ou, sob outra perspetiva, mediante a aplicação da expressão [5.4] apresentada por *Barton & Choubey* (1977):

$$\log_{10} JCS = 0,00088 \gamma R + 1,01 \quad [5.4]$$

Onde:

JCS – Joint wall compression strength (MN/m²); γ – Peso volúmico do material (kN/m³); R – “Dureza ao ressalto” em superfícies não meteorizadas.

Barton & Choubey (1977) recomendam, ainda, que o ângulo de atrito residual se avalie mediante a equação [5.5]:

$$\phi_{residual} = (\phi_{básico} - 20) + 20 \left(\frac{r}{R} \right) \quad [5.5]$$

Onde:

r – “Dureza ao ressalto” em superfícies húmidas e meteorizadas; R – “Dureza ao ressalto” em superfícies sem meteorização.

5.2.3.2 ABERTURA

A abertura é definida como a distância, na perpendicular, entre as paredes adjacentes das descontinuidades, em que o espaço intersticial é preenchido por ar ou água. (*ISRM*, 1978) Esta distância, na condição de o material de preenchimento ser material sólido, é frequentemente nomeada de largura (Figura 5.2).

Este parâmetro, inconstante ao longo da descontinuidade, em virtude de as descontinuidades não serem regulares, é comprovado pelo facto de à superfície, as aberturas tenderem a ser maiores, alcançando às vezes a dezena de milímetro, ao passo que em profundidade tendem a encontrar-se completamente fechadas.

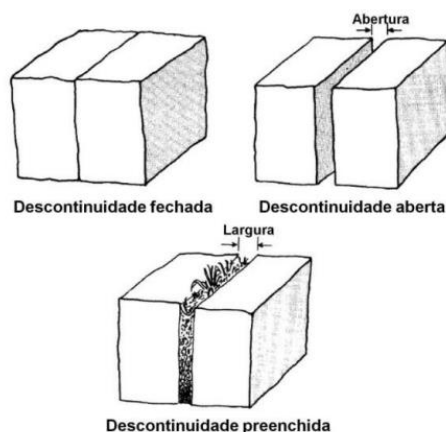


Figura 5.3 – Representação da abertura de descontinuidades abertas e, também, da largura de descontinuidades preenchidas. (ISRM, 1978)

No que respeita ao comportamento hidráulico, a distribuição espacial da abertura e da rugosidade perturba imediatamente a tortuosidade e conectividade das zonas preferenciais de fluxo hídrico que, por seu turno, controlam a transmissividade hidráulica da descontinuidade. (Tatone & Grasselli, 2012)

5.2.3.2.1 MEDIÇÃO

Com uma fita de, no mínimo, três metros de comprimento, calibrada em milímetros é executada a medição da abertura em conformidade com classificação universal de ISRM (1978) exibida na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Aberturas das descontinuidades. (Adaptado: ISRM, 1978)

ABERTURA (mm)	DESCRIÇÃO	DESIGNAÇÃO
< 0,1	Muito apertada	Descontinuidades “fechadas”
0,1 – 0,25	Apertada	
0,25 – 0,5	Parcialmente aberta	
0,5 – 2,5	Aberta	Descontinuidades “entreabertas”
2,5 – 10	Moderadamente larga	
> 10	Larga	
10 – 100	Muito larga	Descontinuidades “abertas”
100 – 1000	Extremamente larga	
> 1 m	Cavernosa	

5.2.3.3 ENCHIMENTO

O enchimento caracteriza-se pelo material que completa total ou parcialmente o espaço entre as paredes da descontinuidade; regularmente muito diversificado, é mais brando que a rocha envolvente. (ISRM, 1978)

Esta característica física permite monitorizar o comportamento da descontinuidade, a qual, numa fase inicial, carece de conhecimento e descrição de aspetos relativos às suas propriedades. (Vallejo et al, 2004) Hudson & Harrison (1997) referem, ainda, que os preenchimentos com materiais

brandos ou argilosos dispensam maiores cuidados, dado que as propriedades físicas, mecânicas e químicas do preenchimento da descontinuidade apresentam o potencial de modificar os parâmetros do maciço rochoso, como a resistência ao corte, a deformabilidade e a permeabilidade.

5.2.3.3.1 MEDIÇÃO E RESULTADOS

A diversidade de material de enchimento promove a vasta variedade de comportamento físico das descontinuidades preenchidas, especificamente, no que concerne à resistência ao corte, deformabilidade e permeabilidade.

Interessa afirmar que a vasta variedade desses comportamentos depende de muitos fatores, pelo que importa uma descrição cuidada dos parâmetros condicionantes, realçando-se, provavelmente, os mais importantes (ISRM, 1978):

- i. Mineralogia do material de enchimento;
- ii. Graduação ou dimensão dos grãos;
- iii. Grau de sobreconsolidação;
- iv. Teor em água e permeabilidade;
- v. Deslocamentos prévios por corte;
- vi. Rugosidade das paredes;
- vii. Largura;
- viii. Fracturação ou esmagamento das paredes.

5.3 DESCRIÇÃO GEOTÉCNICA BÁSICA DE MACIÇOS ROCHOSOS (BGD)

A ideia de um sistema descritivo da qualidade de maciços rochosos, com o intuito de facultar uma linguagem normalizada que proporcione ao observador obter uma impressão geral sobre o maciço rochoso, em especial quanto à antecipação do seu comportamento mecânico, foi desenvolvida pelo *Internacional Society for Rock Mechanics and Rock Engineering (ISRM, 1978)*.

Numa fase inicial o maciço rochoso deve ser dividido em zonas, unidades geotécnicas, cujas características possam ser consideradas uniformes relativamente aos requisitos do projeto de engenharia como, a título de exemplo, variações no estado de meteorização, litologia, grau de fracturação, entre outros.

Só depois é efetuada a caracterização mecânica do comportamento dos maciços dessas unidades geotécnicas, compreendendo os seguintes parâmetros (ISRM, 1981):

- i. O nome da rocha, associando-lhe uma descrição geológica simplificada. Supletivamente existe a hipótese de se incluir um parâmetro alusivo ao estado de alteração.
- ii. Duas características estruturais do maciço: espessura das camadas, desde que se trate de um maciço estratiforme, e espaçamento entre fraturas.
- iii. Duas características mecânicas do maciço: resistência à compressão uniaxial (RCU) e ângulo de atrito das fraturas.

As características indispensáveis à aplicação da *BGD* são apresentadas no Anexo IV.

5.4 ÍNDICE *RQD* (*ROCK QUALITY DESIGNATION INDEX*)

O *Rock Quality Designation Index* permite a estimativa quantitativa da qualidade do maciço rochoso, atendendo à observação de testemunhos de sondagens, em que se contam comprimentos de rocha intacta superiores ou iguais a 10 cm.

Deere (1967) aferiu que esses comprimentos intactos são adicionados e manifestados em percentagem do comprimento total do testemunho recolhido numa manobra, a fim de calcular o *RQD* [5.6]:

$$RQD = \frac{\sum_{i=1}^n \text{comprimento do trecho } i \geq 10\text{cm}}{\text{comprimento total do testemunho}} \times 100 \text{ [\%]} \quad [5.6]$$

Estabelecido o valor de *RQD*, *Deere & Deere* (1988) propôs a consulta da Tabela 6.8 alusiva à qualidade do maciço rochoso.

Tabela 5.8 – Caracterização da qualidade do maciço rochoso assente no Índice *RQD*. (*Traduzido: Deere & Deere, 1988*)

ÍNDICE <i>RQD</i> [%]	DESCRIÇÃO DA QUALIDADE DO MACIÇO ROCHOSO
0 – 25	Muito fraco
25 – 50	Fraco
50 – 75	Razoável
75 – 90	Bom
90 – 100	Excelente

No contexto em que não existem testemunhos de sondagem, mas a presença de descontinuidades é notória em superfícies expostas do maciço, então o número de descontinuidades por unidade de volume fundamenta o índice *RQD*, por intermédio da correlação teórica [5.7] (*Palmstrom, 1982*):

$$RQD = 115 - 3,3 J_v ; \quad (RQD = 100 \text{ para } J_v < 4,5) \quad [5.7]$$

O parâmetro J_v representa a soma do número de descontinuidades por unidade de comprimento para todas as famílias.

O valor de *RQD*, fortemente condicionado pela orientação da amostragem comparativamente à orientação das descontinuidades sugere a utilização do índice volumétrico proposto por *Palmstrom* (1982), em vez da expressão clássica [5.6].

A respeito, os autores *Priest & Hodson* (1976) também propuseram uma correlação [5.8] que abrange a utilização de uma distribuição exponencial negativa, instituindo a relação entre o índice *RQD* e a frequência média das descontinuidades por metro linear (λ). Equivalente teórico do parâmetro *RQD*, a última correlação quantifica, deste modo, o total de espaçamentos entre descontinuidades.

$$RQD = 100e^{-0,1\lambda}(0,1\lambda + 1) \quad \text{onde } \lambda = \frac{1}{S} \quad [5.8]$$

O parâmetro S reproduz a distância média, em metros, entre as descontinuidades consecutivas por toda a extensão de uma linha de amostragem linear, não obstante à sua família.

A atual necessidade de uma nova abordagem que proporcione o aperfeiçoamento da observação de descontinuidades nos testemunhos de sondagens incitou *Olson et al. (2015)* a manipular a imagem laser 3-D para localizar, contar e distinguir fraturas mecânicas de fraturas naturais. Várias são os benefícios desta metodologia, entre os quais, o quão pouco dispendioso é armazenar dados de imagem com perspectiva de esses dados serem acedidos em inúmeras ocasiões.

5.5 ÍNDICE *GSI* (GEOLOGICAL STRENGTH INDEX)

O *Geological Strength Index*, estimado visualmente por inspeção direta do maciço, inclui a avaliação da litologia, da estrutura e das condições das descontinuidades expostas à superfície dos maciços rochosos. É um índice qualitativo que cogita sob as propriedades e a capacidade de as descontinuidades existentes no maciço deslizarem entre si sob diferentes condições de tensão. Ainda que aconselhável a aplicação direta desta classificação (*Hoek et al., 2007*), o índice *GSI* pode ser estimado a partir do índice *Rock Mass Rating (RMR)*, isto, se o maciço não for de muito fraca qualidade ($RMR \geq 23$), (*Bieniawski, 1989*).

A tectonização e a alternância de camadas com competências diversas, de espessura centimétrica a métrica, de maciços de natureza flyschóide, oferecem dificuldades na sua classificação; assim, para aferir o *GSI*, foi feita uma tabela específica por *Hoek et al.*, Anexo V, que dá ênfase às condições das descontinuidades e ao estado de meteorização/tectonização do maciço. A imprevisibilidade associada à existência de água no maciço, fator penalizante no valor final obtido, compele à deslocação para a classe posicionada à direita da obtida no caso de o maciço estar seco (Anexo V), diminuindo o valor do índice final.

Como o *GSI* não coincide com um valor específico, propõe-se a utilização de um intervalo de valores; todavia, se a gama de valores obtida for baixa ou nula, *Hoek et al.* recomendam atenção especial, dado que se podem verificar eventos de instabilização excepcionais, explanando que o comportamento das roturas neste tipo de maciço está condicionado pelos planos de estratificação prevalecendo, deste modo, as do tipo planar ou em cunha.

Futuramente e após precisado o valor do *GSI* para o maciço rochoso em consideração, calculam-se os parâmetros de resistência segundo o critério de rotura generalizado de *Hoek-Brown* (*Hoek et al., 2002*) [5.9].

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_c \times \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_c} + s \right)^a \quad [5.9]$$

Onde:

σ'_1 – Tensão principal efetiva máxima; σ_c – Resistência à compressão simples; σ'_3 – Tensão principal; m_b – Valor reduzido do parâmetro m_i [5.10]; s – Parâmetro que resulta das características do maciço rochoso [5.11]; a – Parâmetro que advém das características do maciço rochoso [5.12]; D – Fator de perturbação do maciço, associado à libertação de tensões a que foi submetido no decorrer do desmonte, difere entre 0 para maciços não perturbados e 1 para maciços muito perturbados (Hoek et al., 2002), Tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Valores estimados do fator D. (Miranda, 2003)

DESCRIÇÃO DO MACIÇO ROCHOSO	D, SUGERIDO
Rebentamentos controlados de excelente qualidade ou escavação por TBM resultam em perturbações mínimas no maciço rochoso em torno do túnel.	D = 0
Escavação mecânica ou manual em maciços rochosos de má qualidade (sem rebentamentos) resulta em perturbações mínimas do maciço rochosos em torno do túnel. Quando existe levantamentos importantes do fundo da escavação devido a problemas de esmagamento, a perturbação pode ser elevada a menos que um aterro provisório seja colocado, como na ilustração à esquerda	D = 0 D = 0,5 (sem aterro provisório)
Rebentamentos de muito má qualidade num maciço muito rijo resulta em perturbações locais graves, numa extensão de 2 a 3 m, no maciço rochoso circundante.	D = 0,8
Os taludes de grandes dimensões para exploração de rocha sofrem significativas perturbações devido aos rebentamentos e também devido ao alívio de tensões provocado pela libertação de materiais. Em rochas mais brandas pode ser executado através de meios mecânicos.	D = 0,7 (Remoção Mecânica) D = 1 (Remoção com Explosivos)

$$m_b = m_i \times e^{\left(\frac{GSI-100}{28-14 \times D}\right)} \quad [5.10]$$

Onde:

m_i – Valor obtido na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Valores estimados para o m_i . (Traduzido: Hoek et al., 2013)

TIPO DE ROCHA	CLASSE	GRUPO	TEXTURA			
			GROSSEIRA	MÉDIA	FINA	MUITO FINA
Sedimentar	Clástica		Conglomerados (21±3)	Arenito 17±4	Siltito 7±2	Argilito 4±2
			Grauvaque (18±3)			
	Não-clástica	Orgânico	Carvão (8±21)			
		Carbonato	Calcário cristalino (19±5)	Calcário compacto 10±2	Calcário Grosseiro 9±2	
		Químico		Gesso 8±2	Anidrite 12±2	
Metamórfica	Não foliada		Mármore 9±3	Corneana 9±3	Quartzite 20±3	
	Levemente foliada		Migmatito 29±3	Anfibolite 26±6	Milonite 29±3	
	Foliada*		Gnaise 28±5	Xisto 12±3	Filite 7±3	Ardósia 7±4
Ígnea	Clara		Granito 32±3		Riolite (25±5)	Obsidiana (19±3)
			Granodiorito 29±3		Dacite 16±5	
			Diorito 25±5		Andesite 25±5	
	Escura		Gabro 27±3	Dolerite (9±3)	Basalto (25±5)	
			Norite 20±5			
	Tipo piroclástica extrusiva		Agglomerado (19±3)	Brecha (19±5)	Tufo (13±5)	

Notas:

- Os valores entre parênteses são estimados;
- Os valores assinalados com (*) são para amostras de rocha ensaiadas numa direção normal à estratificação ou foliação;
- Os valores de m_i serão significativamente diferentes se ocorrer rotura ao longo de superfícies de baixa resistência.

$$s = e^{\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right)} \quad [5.11]$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \times \left(e^{\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}} \right) \quad [5.12]$$

A resistência do maciço rochoso é determinada pela execução da equação [5.13]:

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} \times \frac{[m_b + 4s - a(m_b - 8s)] \left(\frac{m_b}{(4+s)^{a-1}} \right)}{2(1+s)(2+a)} \quad [5.13]$$

Por último, definem-se os valores dos parâmetros resistentes, ângulo de resistência ao corte [5.14] e ângulo de resistência à coesão [5.15].

$$\phi' = \text{sen}^{-1} \left[\frac{6 \times a \times m_b \times (s + m_b \times \sigma'_{3n})^{a-1}}{2 \times (1+a) \times (2+a) + 6 \times a \times m_b \times (s + m_b \times \sigma'_{3n})^{a-1}} \right] \quad [5.14]$$

$$c' = \frac{\sigma_c [(1+2 \times a) \times s + (1-a) \times m_b \times \sigma'_{3n}] \times (s + m_b \times \sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a) \times (2+a) \times \sqrt{1 + (6 \times a \times m_b \times (s + m_b \times \sigma'_{3n})^{a-1})} / ((1+a) \times (2+a))} \quad [5.15]$$

6 ESTABILIDADE DE TALUDES ROCHOSOS

Os movimentos de terrenos, tanto dos solos como das rochas, constituem uma preocupação transversal, por isso tendo sido objeto dos mais variadíssimos estudos, não apenas pela sua importância como agentes atuantes no desenvolvimento das formas de relevo, mas também em função das suas implicações práticas e relevância do ponto de vista económico. (*Guidicini & Nieble, 1894*)

Um movimento de terreno compreende um deslocamento de massas instabilizadas, de solo ou rocha, que se destacam de um dado maciço seguindo-se a sua movimentação em direção ao sopé da vertente, alcançando diferentes velocidades de movimentação conforme a tipologia, a morfologia do talude e as características físicas e mecânicas da massa instabilizada.

Como tal, o estudo da estabilidade de taludes é imprescindível, uma vez que envolve grandes massas de terras que têm a si associadas um sem número de heterogeneidades e uma longa história de tensões que influenciam e condicionam o seu comportamento.

Estes condicionantes impossibilitam que o seu estudo seja simples, por isso sendo tão importante que os conceitos e métodos que permitem uma análise pertinente estejam adequadamente organizados e interiorizados em toda a sua magnitude, ganhando entre eles supremacia aqueles que desempenharem mais capazmente os quesitos de aplicabilidade, segurança e rapidez.

Do ponto de vista teórico, um talude é sujeito a três campos de força distintos em equilíbrio:

- i. Peso dos materiais;
- ii. Escoamento da água;
- iii. Resistência ao cisalhamento.

O estudo da estabilidade dos taludes permite concluir que as duas primeiras forças, respetivamente, o peso dos materiais e o escoamento da água, tendem a movimentar a massa de solo encosta abaixo, em oposição à última força, a resistência ao cisalhamento, a única que atua como um freio a essa movimentação. Além do mais, é muito importante compreender exatamente o mecanismo de atuação de cada força, a fim de projetar corretamente as medidas preventivas de escorregamentos.

6.1 CONCEITOS GERAIS

Um talude, definido como uma superfície inclinada que limita um maciço de terra, de rocha ou de solo e rocha, pode adquirir a terminologia natural ou artificial. (Caputo, 1977) Uma representação do mesmo, e sua respetiva nomenclatura, pode ser observada na Figura 6.1.

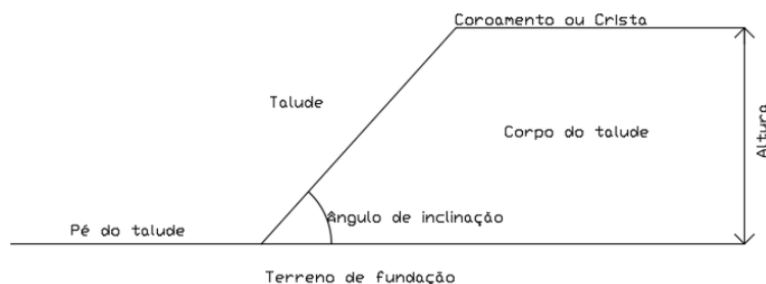


Figura 6.1 – Nomenclatura utilizada na descrição dos múltiplos constituintes dos taludes. (Caputo, 1977)

6.1.1 TALUDES NATURAIS

Os taludes naturais, caso das encostas ou vertentes, caracterizam-se por serem pouco homogêneos e com a presença de variações geológicas, que incluem as descontinuidades e alterações do maciço. Os taludes naturais dividem-se em taludes infinitos ou taludes finitos (Figura 6.2).

Um talude diz-se infinito quando a determinada profundidade, abaixo da respetiva superfície, as propriedades do maciço são aproximadamente constantes e a espessura do maciço que tende a escorregar é muito pequena quando comparada com o desenvolvimento do talude. Este é frequentemente associado a um talude natural que apresenta uma camada superficial de solo ou de rocha muito alterada sob a qual se encontram formações rochosas bem mais resistentes. (Fernandes, 2011) Em contrapartida, um talude é finito quando se encontram definidas a altura, base e topo. (Fiori, 2016)

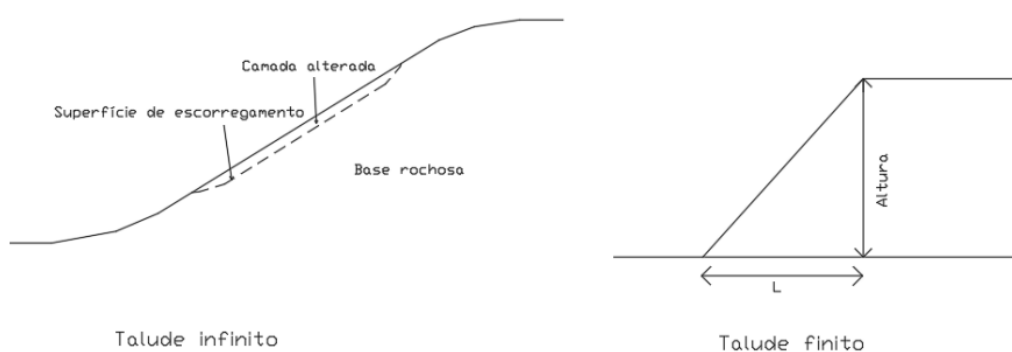


Figura 6.2 – Ilustração de um talude infinito e talude finito. (Caputo, 1977)

6.1.2 TALUDES ARTIFICIAIS

Desenvolvidos pelo Homem, os taludes artificiais podem ser de três tipos: talude em aterro, talude misto e talude em escavação (Figura 6.3).



Figura 6.3 – Classificação dos taludes artificiais. (Caputo, 1977)

O Homem é responsável por controlar a qualidade do material na construção de um talude em aterro, aterro este com baixas inclinações e, por vezes, revestido por vegetação para evitar erosão. Em contrapartida, o talude em escavação, grande parte resultado de um reperfilamento, advém de uma escavação de um terreno já existente, podendo também ser revestido por vegetação de modo a evitar a erosão. O fruto das duas situações supracitadas, talude em aterro e talude em escavação, perfaz os intitulados taludes mistos.

6.2 EVOLUÇÃO GEOMORFOLÓGICA DE TALUDES - CLASSIFICAÇÃO DOS MOVIMENTOS DE MASSA

Dentro da literatura de movimentos de terrenos existem inúmeras classificações, cada qual provindo da seleção de um fator de deslizamento díspar ou do propósito do autor. Posto isto, a generalidade assenta no tipo de movimento e no material envolvido.

A proposta de Varnes (1978), a que reúne maior consenso na comunidade científica, fundamenta a sua classificação no tipo de movimento e no tipo de material, delineando cinco tipos principais, aos quais acrescenta um sexto, resultante de combinações dos anteriores.

Tabela 6.1 – Sistema classificação proposto por Varnes (1978). (Traduzido: Dikau et al., 1996)

TIPO DE MOVIMENTO		TIPO DE MATERIAL		
		MACIÇOS ROCHOSOS	SOLOS	
			PREDOMINANTEMENTE GROSSEIROS	PREDOMINANTEMENTE FINOS
Quedas (<i>Fall</i>)		Queda de Blocos	Queda de Detritos	Queda de Terras
Tombamentos (<i>Topple</i>)		Tombamento de Blocos	Tombamento de Detritos	Tombamento de Terras
Deslizamentos (<i>Slide</i>)	Rotacionais	Deslizamento em Rochas	Deslizamentos em Detritos	Deslizamentos em Terras
	Translacionais			
Expansão Lateral (<i>Lateral Spread</i>)		Expansões Laterais em Rochas	Expansões Laterais em Detritos	Expansões Laterais em Terras
Fluxos (<i>Flows</i>)		Fluxos em Rochas	Fluxos em Detritos	Fluxos em Terras
Complexos		Ocorrência de um ou mais dos principais tipos de movimentos associados.		

6.2.1 QUEDAS (FALL)

As quedas consistem em movimentos bruscos de blocos de materiais geológicos (rochas, detritos ou blocos), total ou parcialmente em queda livre, originários de taludes muito inclinados, com possibilidade de conduzir a um impacto a cota inferior, seguido de ressaltos e/ou rolamento dos blocos na direção do sopé sem que haja uma superfície de movimentação definida (Figura 6.4).



Figura 6.4 – Ilustração das diferentes trajetórias de queda. (Carcedo, 1987)

A origem da rotura tanto pode estar na existência de fissuras, na subescavação de uma zona de escarpa deixando-a em consola, como na desagregação da matriz que envolve o bloco instável, apenas quando o material destacado for um único bloco ou um pequeno volume de solo. (Dikau et al., 1996) De realçar, em material rochoso, que o destacamento dos blocos ocorre a partir de fatores internos e externos, tais como, a orientação das descontinuidades e o seu ângulo de inclinação, muitas vezes associados a outros fatores, como o alargamento de fissuras derivado de fenómenos como a crioclastia e, menos comum, a termoclastia ou o crescimento de raízes.

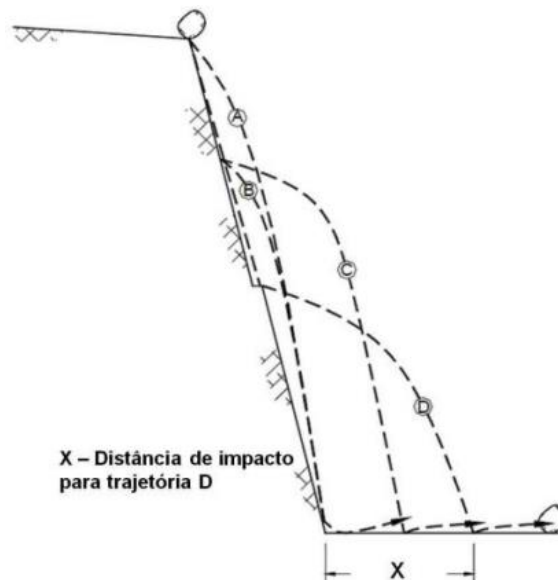


Figura 6.5 – Distâncias de impacto para várias trajetórias. (Pierson et al. 2001)

É importante diferenciar a distância de impacto, determinada como a distância entre a base do talude e o ponto onde o bloco destacado atinge primeiro o solo, e a distância de rolamento como a

distância entre a base do talude e o ponto mais distante que o bloco atinge adiante daquela, concluindo que áreas de captação mais inclinadas reduzem drasticamente essa distância.

A variável distância é influenciada pela topografia, presença de obstáculos que impeçam a deslocação de blocos, declive do talude, ângulo de impacto inicial e pelas características físicas e mecânicas do material. É importante diferenciar distância de impacto de distância de rolamento.

A distância de impacto é estipulada como a distância entre a base do talude e o ponto onde o bloco destacado atinge primeiro o solo (Figura 6.5). Em contrapartida a distância de rolamento é delineada como a distância entre a base do talude e o ponto mais distante que o bloco atinge adiante daquela, inferindo que áreas de captação mais inclinadas reduzem drasticamente a última distância. Não obstante, se o bloco não se deslocar após o primeiro impacto, sugere que a distância de impacto será igual à distância de rolamento. (Pierson *et al.*, 2001)

6.2.2 TOMBAMENTOS (*TOPPLE*)

A presença de superfícies de descontinuidades, persistentes, associadas a planos de estratificação, xistosidade, diáclases ou fendas de tração, regularmente experimentam orientações para o interior do maciço ou mesmo verticais, favorecendo o destacamento do painel.

O tombamento, impelido pela descompressão do maciço e a pressão hidrostática induzida pela presença de água no interior das descontinuidades, equivale à rotação de painéis ou blocos de rochas, ou solos, para frente, em torno de um eixo situado abaixo do centro de gravidade da massa instabilizada ou na sua base. Independentemente da última fase da rotura culminar com frequência numa queda abrupta ou num deslizamento extremamente rápido, este movimento pode iniciar-se vagarosamente. (Hungr *et al.*, 2014)

Dikau *et al.* (1996) enumeram múltiplas ações que desempenham papéis importantes para a evolução deste tipo de rotura:

- i. Meteorização ou erosão progressiva, sucedendo um enfraquecimento ou perda de elasticidade do material da base, impelindo a um tombamento rápido ou gradual.
- ii. Expansão e retração de material argilosos motivado por mudanças no teor em água, induzindo um tombamento progressivo.
- iii. Efeito de sapa pela erosão, cada vez mais profundo incentivando o aumento da inclinação geral do talude, oportunando a sua descompressão.

Os vários estados de estabilidade referidos por Ashby (1971) expressam-se pelas seguintes inequações, que mostram os critérios para tombamento e deslizamento de um único bloco num plano inclinado, através do estudo da relação entre a largura (b) e do bloco e a sua altura (h), isto é, o rácio b/h , bem como α o ângulo de inclinação de talude e θ o ângulo de atrito (Figura 6.6):

- i. O bloco está estável, não irá deslizar ou tombar, quando $\alpha < \theta$ e $b/h > \tan \alpha$.
- ii. O bloco só irá deslizar quando $\alpha > \theta$ e $b/h > \tan \alpha$.
- iii. O bloco irá tombar, mas não irá deslizar, quando $\alpha < \theta$ e $b/h < \tan \alpha$.
- iv. O bloco irá tombar e deslizar simultaneamente quando $\alpha > \theta$ e $b/h < \tan \alpha$.

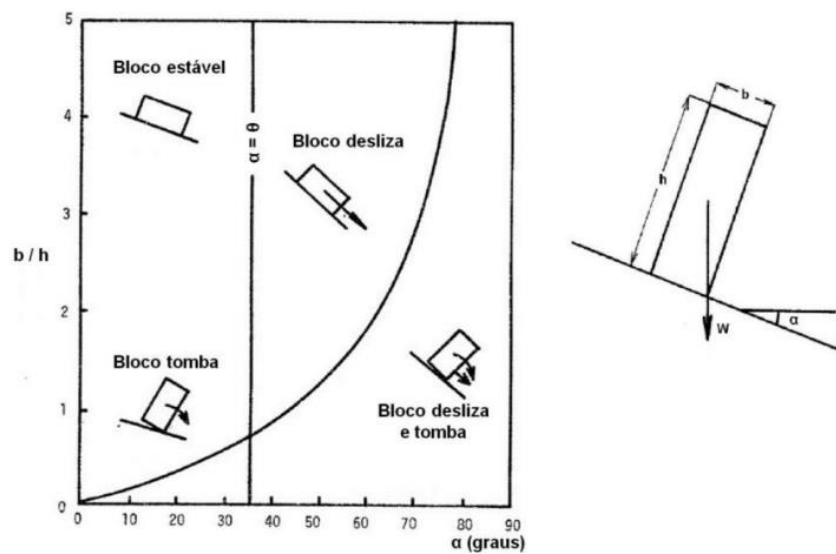


Figura 6.6 – Situações de estabilidade de um único bloco para ocorrência de tombamento ou deslizamento numa superfície inclinada. (Traduzido: Ashby, 1971)

O tombamento múltiplo é integrado por diversificados mecanismos de instabilidade em conformidade:

- ❖ Tombamento por Bloco – no momento que uma coluna de rocha se encontrar compartimentada por descontinuidades transversais amplamente espaçadas em que umas delas é sub-horizontal, originando pequenas colunas.

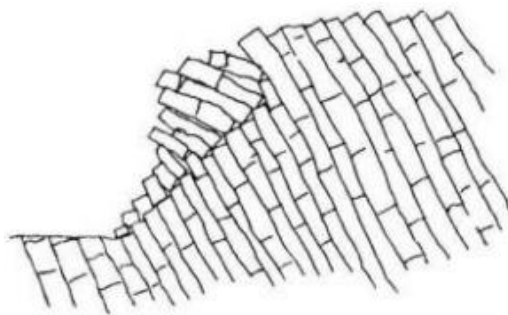


Figura 6.7 – Tombamento por bloco. (Goodman & Bray, 1976; Adhikary et al., 1997)

O movimento é desencadeado na coluna de face livre, progredindo para um tombamento em cascata do agrupamento de blocos situados superiormente, que ficaram desapoitados (Figura 6.7).

- ❖ Tombamento Flexural – abrange a encurvadura de um conjunto de colunas de rocha constituídas por uma única família subvertical de descontinuidades muito persistente.

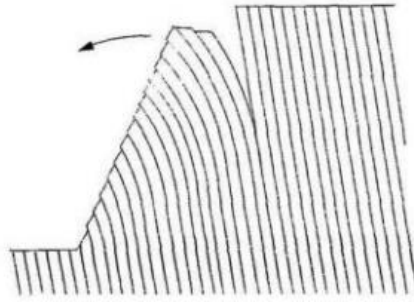


Figura 6.8 – Tombamento flexural. (Goodman & Bray, 1976; Adhikary et al., 1997)

Os conjuntos de colunas criadas além de fixas a uma certa profundidade, são suscetíveis de arquear no sentido da face livre do talude (Figura 6.8).

- ❖ Tombamento Bloco-Flexural – flexão pseudo-contínua por toda a extensão de colunas de rocha compartimentadas por descontinuidades transversais.

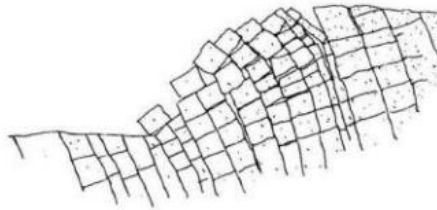


Figura 6.9 – Tombamento bloco-flexural. (Goodman & Bray, 1976; Adhikary et al., 1997)

Ao invés de sofrer uma rotura por flexão, induzindo o tombamento flexural, o tombamento das colunas é consequência de um acumular de deslocamentos (Figura 6.9).

Finalmente por ação da atividade antrópica e dos processos naturais, tais como, erosão ou meteorização, é removido material da base do talude auxiliando o começo do tombamento secundário. Independentemente da circunstância, a rotura primária (ou inicial) do material compreende um deslizamento ou uma queda do material impelindo o tombamento como repercussão da primeira. Segundo Hoek & Bray (1981) os distintos tipos de rotura por tombamento secundário e, respetivas, condições para ocorrência são:

- ❖ Tombamento e deslizamento no pé do talude – cenário em que uma camada subvertical de rocha competente é carregada por material instável da parte superior do talude (Figura 6.10).

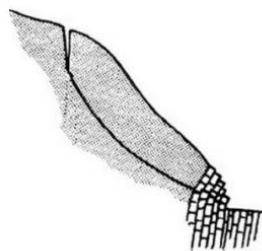


Figura 6.10 – Tombamento e deslizamento no pé do talude. (Hoek & Bray, 1981)

- ❖ Tombamento e deslizamento na base do talude – situação que uma camada subvertical é arrastada pela instabilidade do material sobrejacente (Figura 6.11).

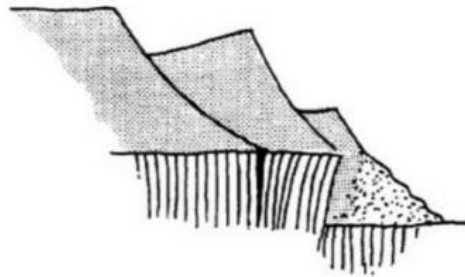


Figura 6.11 – Tombamento e deslizamento na base do talude. (Hoek & Bray, 1981)

- ❖ Tombamento e deslizamento na crista do talude – cenário em que a ocorrência de deslizamentos por toda a extensão do talude liberta espaços para o tombamento (Figura 6.12).

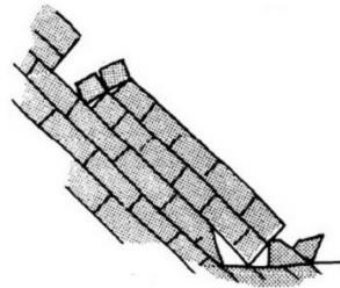


Figura 6.12 – Tombamento e deslizamento na crista do talude. (Hoek & Bray, 1981)

- ❖ Tombamento e queda – conjuntura em que existe alteração do material subjacente ao maciço rochoso fraturado (Figura 6.13).

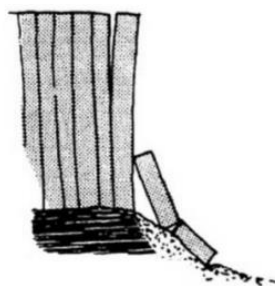


Figura 6.13 – Tombamento e queda. (Hoek & Bray, 1981)

- ❖ Tombamento por fendas de tração – contexto que na parte superior do talude progridem fendas de tração (Figura 6.14).

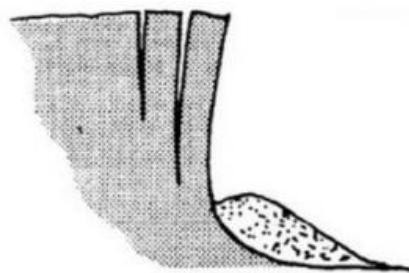


Figura 6.14 – Tombamento por fendas de tração. (Hoek & Bray, 1981)

6.2.3 ESCORREGAMENTOS OU DESLIZAMENTOS (*SLIDES*)

O escorregamento ou deslizamento associados, maioritariamente, a maciços terrosos, consiste num movimento de material, a massa instabilizada, como uma unidade ao longo de uma superfície de corte bem definida no interior do maciço. De notar que a sua ocorrência não é estranha em maciços rochosos, estando nesses casos dependente das características estruturais do maciço.

Os diferentes tipos de escorregamentos separados de acordo com o tipo e número de superfícies de rotura caracterizam-se por serem escorregamentos rotacionais (*rotational slides*) e escorregamentos translacionais (*translational slides*).

6.2.3.1 ESCORREGAMENTOS ROTACIONAIS (*ROTATIONAL SLIDES*)

O termo escorregamento rotacional é empregue se a massa instabilizada sofrer uma rotação em torno de um eixo paralelo à superfície do terreno e transversal ao escorregamento e a superfície de rotura for semicircular, com a concavidade direccionada para cima.

Em particular, nos maciços rochosos, para que tal aconteça, é imprescindível a existência de uma densa fracturação orientada arbitrariamente. *Dikau et al.* (1996) afirma inclusive que, frequentemente, é nos mármore e calcários ou arenitos, por compreenderem formações rochosas intercaladas por material mais resistente e de menor resistência, que ocorre esta qualidade de escorregamento.

Por sua vez, os escorregamentos rotacionais dividem-se em escorregamentos rotacionais simples (*single*), múltiplos (*multiple*) e sucessivos (*sucessive*) (Figura 6.15).

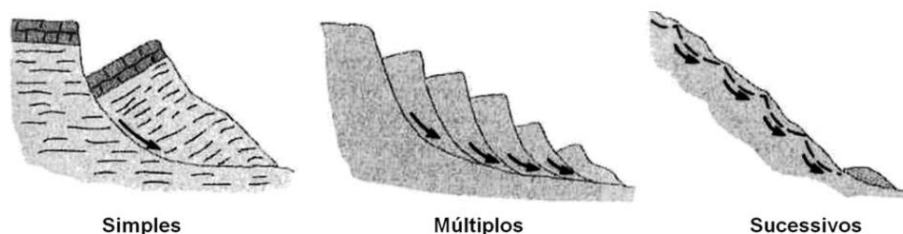


Figura 6.15 – Representação esquemática dos escorregamentos rotacionais: simples, múltiplos e sucessivos. (Vallejo et al., 2004)

6.2.3.2 ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS (*TRANSLATIONAL SLIDES*)

O escorregamento translacional, habitual em regiões montanhosas, qualifica-se por uma rotura não circular imediata a uma translação ao longo de uma superfície totalmente planar ou muito próxima disso.

O movimento é comedido pela existência de descontinuidades inclinando frequentemente para fora do talude, proporcionando que os terrenos sobrejacentes se desloquem sobre elas quando as tensões tangenciais instaladas forem superiores à resistência ao corte ao longo das mesmas. Ademais é viabilizada a rotura em cunha, ao longo da linha intercetante de dois planos que cortem o talude segundo diferentes orientações (Figura 6.16).



Figura 6.16 – Ilustração de escorregamentos translacionais. (Vallejo et al., 2004)

6.2.4 EXPANSÃO LATERAL (*LATERAL SPREAD*)

O movimento de terreno que equivale a uma deslocação morosa de blocos rochosos ou solos coesivos e cimentados em cima de um material mais brando e deformável integra a expansão lateral. Este mecanismo de expansão lateral decorre conforme (Ayala Carcedo, 1987):

- i. Movimentos de extensão, sem que se reconheça ou exista uma superfície basal de corte nítida ou se crie um fluxo plástico.
- ii. Movimentos que podem compreender uma extensão e fracturação do material mais competente (rocha ou solo), em consequência da liquefação ou deformação plástica do material subjacente. Simultaneamente e nos materiais superiores, podem-se dar fenómenos de subsidência, translação, rotação e entre outros, em conformidade com a natureza intrínseca do material.

No que diz respeito à expansão lateral da rocha (*rock spread*), sob tensões gravíticas, repercussão de uma deformação plástica de um maciço rochoso em profundidade que se desenvolve até à superfície, o material é dividido em blocos sucessivos dispostos em *horsts* e *grabens*. A extremidade da camada rochosa de cobertura, mais rija, estará segmentada em lamelas ou blocos deslocados da sua posição original.



Figura 6.17 – Representação esquemática: expansão lateral. (Vallejo et al., 2004)

6.2.5 FLUXOS (FLOWS)

O termo fluxo é usado para descrever o movimento espacialmente contínuo em que as superfícies de rotura por corte são de duração efêmera, muito próximas entre si e, geralmente, não se preservam. A distribuição da velocidade na massa deslocada equipara-se a um líquido viscoso. (UNESCO, 1993)

Os fluxos, apesar de constituírem um mecanismo de instabilidade pouco comuns em rochas de resistência elevada estão presentes na classificação de *Varnes* (1978). Deste modo, apenas se mostram algumas características básicas deste mecanismo dependentes da quantidade de água presente, da mobilidade e da evolução do movimento (Tabela 5.2). De realçar a frequência elevada com que se verifica a mudança gradual de escorregamentos para fluxos.

Tabela 6.2 – Classes de fluxos e suas propriedades básicas. (Adaptado: USGS, 2004; Highland & Bobrowsky, 2008)

CATEGORIAS DE FLUXOS	CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL	MECANISMO DE DESENCADEAMENTO	VELOCIDADE DO ESCOAMENTO
Fluxo de Detritos (<i>Debris Flows</i>)	< 50% de finos	- Intensos fluxos de água à superfície; - Regularmente estruturados segundo outros tipos de deslizamentos efetivados.	Rápido a extremamente rápido (56 km/h)
Avalanche de Detritos (<i>Debris Avalanche</i>)	Volumosas massas de terra e fragmentos rochosos	- Repercussão da instabilidade decorrente de um talude, durante uma rotura devido à ação do tempo ou pela desintegração de uma camada rochosa aquando de um deslizamento a alta velocidade.	Rápido a extremamente rápido, sendo capaz de atingir 100 m/s (360 km/h)
Fluxos de Terras (<i>Earthflows</i>)	Solos finos (argilas e siltes) e rochas argilosas	- Erosão por linhas de água na base do talude; - Rebaixamento rápido nível freático; - Saturação do solo graças às chuvas intensas e prolongadas ou degelo; - Terramotos ou vibrações induzidas.	Lenta a muito rápida
Fluxos de Lamas (<i>Mudflows</i>)	- É um fluxo de terras em que o teor em água é o bastante para fazer fluir o material; - Pelo menos 50% areia, siltes e argilas.		
Fluências (<i>Creep</i>)	Material brando ou rochosos estratificado ou diaclasado	- Chuva e degelo; - Drenagens insuficientes; - Construções instabilizadoras, entre outros.	Muito lento a extremamente lento (menos 1 metro por década)

6.2.6 MOVIMENTOS COMPLEXOS

Os movimentos de terrenos são a combinação de no mínimo dois tipos cruciais de movimentos anteriormente mencionados (Figura 6.18). Estes podem ser considerados de dois modos:

- Movimentos em que a massa total instabilizada é sujeita numa parte a um tipo de movimento e noutra parte a outro tipo de movimento.
- Movimentos em que uma massa instabilizada se transforma, no decurso do deslocamento, de um tipo de movimento para outro tipo de movimento.

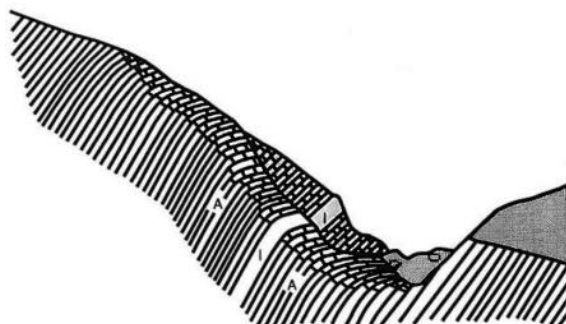


Figura 6.18 – Ilustração esquemática: Movimentos Complexos – A e I traduzem diferentes litologias.
(UNESCO, 1993)

6.3 INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E AMBIENTAIS

No contexto geotécnico, a imprescindibilidade associada à percepção das características dos maciços que integram os taludes, incentiva à seleção de informação basilar para a concepção de soluções que apaziguem o risco de instabilização. Disciplinas, tais como, a Geomorfologia, a Litologia, a Hidrogeologia e o estudo do clima proporcionam a apreciação de fenômenos que condicionam a evolução dos taludes, a identificação de zonas prestes a instabilizar e o estudo de mecanismos responsáveis.

6.3.1 LITOLOGIA E DESCONTINUIDADES

A Litologia pressupõe os constituintes das formações, assim como, as características resistentes do material consentindo a compreensão quanto a alterabilidade dos terrenos. A relevância da determinação do material constituinte do talude e complementar, sempre que plausível, através de ensaios adequados, deve-se ao fato de que quanto maior a alteração, menor a coesão e, consequentemente, menor a resistência.

Presente em taludes rochosos, precisando a sua resistência e estabilidade, o termo descontinuidade é definido como qualquer interrupção na continuidade física de um determinado maciço como, por exemplo, as diáclases, falhas, planos de xistosidade, de clivagem, superfícies de estratificação, entre outros.

O estudo das descontinuidades, por outras palavras, o conhecimento das suas características geométricas, físicas e mecânica admite depreender a respeito da qualidade do maciço e do risco de ocorrerem instabilizações (Figura 6.19).

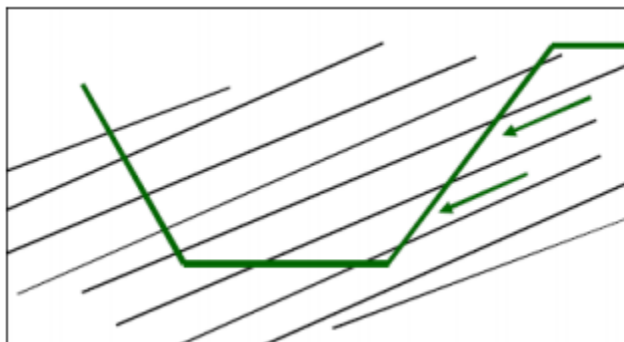


Figura 6.19 – Influência da orientação das descontinuidades na estabilidade de taludes.

6.3.2 HIDROGEOLOGIA E CLIMA

Os taludes são expostos, frequentemente, a fatores climáticos de papel determinante na estabilidade destes, como chuva, vento e neve. A água, fator com maior relevância na instabilização de taludes, precipita sobre eles sendo capaz de escorrer sobre a sua superfície, instigando a erosão superficial ou, caso ocorram precipitações volumosas e persistentes, infiltrar-se e percolar, vertical e lateralmente, até ao pé do talude, aumentando o seu teor em água.

De um modo geral, a presença de água num talude amplifica substancialmente o risco de instabilidade, por outras palavras:

- i. A resistência diminui graças ao efeito das pressões intersticiais;
- ii. A percolação de água, para além de conduzir à meteorização/alteração de certos constituintes químicos e/ou ter uma ação de elemento expansivo, causa forças prejudiciais à estabilidade do talude;
- iii. A variação da quantidade de água acarreta a variação do peso e, consequentemente, a variação do estado de tensão.

6.3.3 VEGETAÇÃO

A vegetação, especificamente, a folhagem superficial e a matéria orgânica presente em taludes, atuam como uma camada de amortecimento contra a água da chuva, vento ou impactos mecânicos. Caracterizada também como uma camada de proteção que influencia a movimentação de água entre a atmosfera e o terreno, é responsável por minimizar significativamente o fluxo de água superficial e a sua velocidade, diminuindo como resultado a erosão superficial.

Por seu turno, as raízes da vegetação, salvo o incentivo à absorção de água, cooperam no reforço, ancoragem e incremento da resistência do solo por intermédio de um aumento da coesão na zona solo-fibras. A existência de raízes num talude integra um reforço mecânico do solo na eventualidade de as raízes intersectarem as superfícies de deslizamento potenciais.

Os efeitos negativos relativos às raízes instaladas em descontinuidades abertas de rochas constituem a instabilidade dos maciços em virtude do seu crescimento, ao passo que em árvores de

vultosas dimensões subsiste um efeito de sobrecarga ou forças dinâmicas disseminadas aos terrenos por efeito da ação do vento sobre a vegetação.

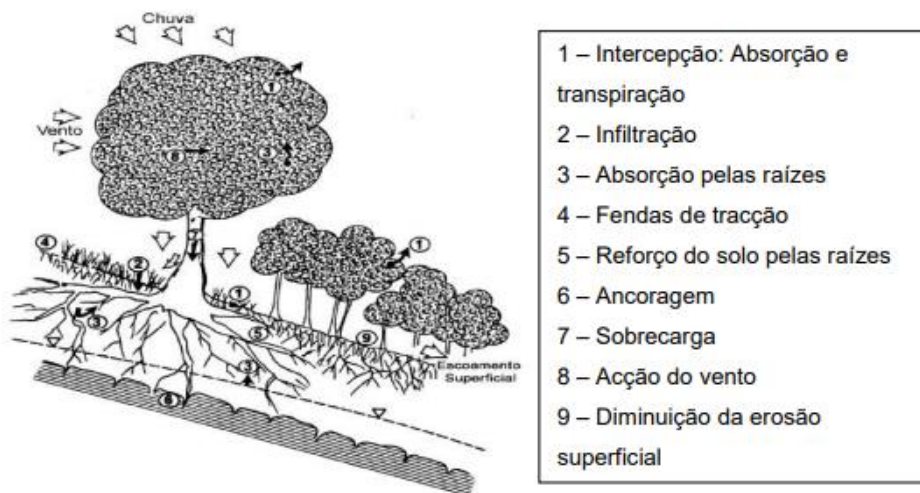


Figura 6.20 – Interligação o solo-água-vegetação em taludes. (Adaptado: Greenway, 1987)

A respeito dos solos expansivos, a presença de vegetação e raízes favorece a redução exagerada da humidade do solo, impelindo a manifestação de fendas de tração, o que para além de promover um aumento das pressões intersticiais, pode ainda originar uma ação de pressões hidrostáticas na água inclusa na fenda, direccionando a um decremento apreciável da estabilidade do talude. A Figura 6.20 informa de um modo geral a interação solo-água-vegetação.

7 ANÁLISE DE ESTABILIDADE

A análise de estabilidade de taludes, imposta numa vasta variedade de projetos tanto na engenharia civil como na indústria mineira, é efetivada para aferir as condições de equilíbrio e garantir a segurança não apenas no decurso do estudo de viabilidade, mas também durante a exposição aos agentes erosivos. Para tal se cumprir, é possível seguir várias abordagens; porém, o seu cumprimento irá resultar de condicionantes como a fase de projeto, as condições locais ou o tipo de rotura do maciço rochoso.

Os tópicos subsequentes, enumerados por *Eberhardt* (2003), precisam objetivos primários de análise de estabilidade de taludes rochosos:

- i. Estabelecer as condições de estabilidade do talude;
- ii. Apurar os potenciais mecanismos de rotura;
- iii. Delinear a sensibilidade/ suscetibilidade do talude face a distintos mecanismos desencadeadores;
- iv. Testar e confrontar várias alternativas de contenção;
- v. Projetar taludes ideais em termos de segurança, confiabilidade e economia.

7.1 FATORES DE INSTABILIZAÇÃO DE TALUDES

A alteração da posição de equilíbrio estático e consequente instabilização de taludes de escavação promove alterações das condições hidrogeológicas e hidráulicas, até mesmo alterações do nível freático; e também está, frequentemente, associada com o tipo de desmonte a que o talude foi sujeito, i.e., por meios mecânicos o maciço não sofre tantas vibrações como por explosivos, sendo que o último é mais instabilizador que o primeiro. Depois do desmonte, o maciço tenderá a descomprimir e suportar processos de meteorização física e química.

Como são inúmeros os processos que acarretam a instabilização do maciço, agrupam-se em dois grupos: os fatores condicionantes ou passivos, intrínsecos ao material rochoso e aptos para suscitar uma provável rotura no talude; os fatores desencadeadores ou ativos, em oposição, abarcam o meio envolvente, interferindo com as propriedades e características do maciço, pondo em causa o respetivo equilíbrio (Tabela 7.1).

Tabela 7.1 – Fatores que intervêm na estabilidade dos taludes. (Adaptado: Vallejo et al., 2004)

FATORES CONDICIONANTES	FATORES DESECANDEADORES
Estratigrafia e litologia	Sobrecargas estáticas
Estrutura geológica	Solicitações dinâmicas
Condições hidrogeológicas e comportamento hidrogeológico dos materiais	Mudanças nas condições hidrogeológicas Fatores climáticos
Propriedades físicas, resistentes e deformabilidade	Variação na geometria
Tensões naturais e estado de tensão-deformação	Redução de parâmetros resistentes

Assente num vasto número de deslizamento de taludes de escavação Pires-Carreto (1989) dispôs que:

- i. A água executa um papel importante na rotura;
- ii. A multiplicidade de situações pressupõe que depois da escavação do talude a instabilidade poderá ocorrer num intervalo temporal de meses a anos;
- iii. Atendendo a que em escavações provisórias não se efetivam estudos, é normal a existência de riscos potenciais um tanto conscientes, exteriorizando-se o problema, no fato de, ocasionalmente, os taludes deixarem de ser provisórios e passarem a ser definitivos.

A queda de blocos pode igualmente estar relacionada com, pelo menos, um conjunto de agentes, provenientes da chuva, nível freático, do escoamento canalizado ou não, da erosão diferencial e de eventuais infiltrações, nomeadamente: chuva, congelamento e descongelamento de água em fissuras/poros e/ou escoamento canalizado. Além disso, outros motivos, por exemplo, o crescimento de raízes de árvores ou de outro tipo de vegetação que expandem nas descontinuidades dos maciços, graças ao efeito alavanca, promovem um aumento significativo da abertura das fissuras.

É de senso comum, que a instabilidade visa implementar-se particularmente entre o período do Outono e Primavera, época onde as condições climáticas são menos favoráveis em função da forte pluviosidade e/ou temperaturas baixas. De notar que a água, à superfície ou no subsolo, constitui o principal desencadeador da instabilidade um qualquer maciço, por conseguinte, é conveniente o seu adequado controlo numa obra de engenharia.

7.2 MÉTODOS ANALÍTICOS: ANÁLISE CINEMÁTICA

O conceito “cinemática” remete para movimento de corpos sem referência às forças que causam o movimento. (Goodman, 1989) Assim, o estudo cinemático de taludes rochosos é efetuado atendendo a uma abordagem tanto qualitativa como quantitativa.

Conforme Admassu (2012), a análise cinemática, fundamentada no teste de Markland, consta de um método utilizado para examinar o potencial de vários modos de rotura em taludes rochosos (deslizamento planar, por cunha e por tombamento), que sucedem em virtude da existência de descontinuidades com orientações desfavoráveis.

7.2.1 ABORDAGEM QUALITATIVA

Na metodologia de Projeção Estereográfica, a projeção no hemisfério inferior das descontinuidades (direção e inclinação) em simultâneo com o plano da face do talude e um círculo, caracterizando o valor do ângulo de atrito, retrata o procedimento “tradicional” da análise cinemática, a respeito da abordagem qualitativa.

Frequentemente há um grande número de descontinuidades envolvidas, com imprescindibilidade de identificar famílias e considerar apenas valores representativos das respectivas atitudes; mas, por vezes, o agrupamento circular dessas atitudes na identificação de famílias é de tal forma extenso que torna os resultados pouco fiáveis.

De seguida descrevem-se os três tipos de roturas, nomeadamente, rotura planar, rotura em cunha e rotura por tombamento que, apesar de simples compreensão, na Natureza, encontram-se combinados.

7.2.1.1 ROTURA PLANAR

A existência de uma família de descontinuidades aliada à sua persistência significativa que mergulha na mesma direção que a superfície do talude (Figura 7.1 (a)) justifica a rotura do tipo planar. *Hoek e Bray (1981)* notaram que, para ocorrer este tipo de rotura, as seguintes condições geométricas necessitam ser cumpridas:

- i. A direção do plano de rotura deve ser paralela ou quase paralela à direção do plano estipulada pela face do talude, com uma diferença máxima de 20° ;
- ii. A inclinação do plano de rotura (ψ_p) deve ser superior ao ângulo de atrito (ϕ) desse mesmo plano;
- iii. O plano de deslizamento deverá intersectar a face do talude, de modo que a inclinação desse plano seja inferior à inclinação do plano (ψ_p) determinado pela face do talude (ψ_f);
- iv. Existência de descontinuidades laterais de baixa resistência, perpendiculares à face do talude, delimitando os limites laterais do deslizamento. Em contrapartida, há possibilidade de rotura planar cortar uma esquina ou saliência do talude (Figura 7.1 (b)).

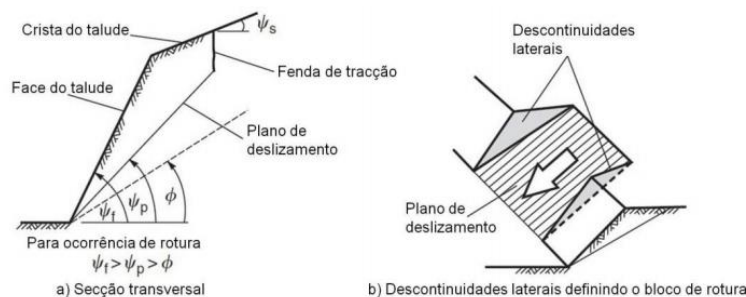


Figura 7.1 – Esquematização da geometria de talude evidenciando a rotura planar. (Traduzido: Wyllie e Mah, 2004)

Os parâmetros a examinar para qualificar a potencialidade cinemática deste tipo de rotura suceder são: a atitude do talude, a atitude da descontinuidade e o ângulo de atrito.

7.2.1.2 ROTURA EM CUNHA

O deslizamento em cunha sempre que comparado com a rotura planar manifesta-se sob uma maior variedade de condições geológicas e geométricas.

A rotura em cunha é descrita como um deslizamento de um bloco de rocha limitado por duas famílias de descontinuidades, que se intersectam segundo essa linha e especificam uma cunha. Característico de maciço rochosos que detêm inúmeras famílias de descontinuidades, cuja orientação, espaçamento e continuidade indicam as dimensões da cunha, devem cumprir as seguintes condições geométricas (Hoek & Bray, 1981):

- i. A inclinação da linha de intersecção de duas descontinuidades (ψ_i), arquitetando um bloco em cunha, deve ser inferior à inclinação da face do talude (ψ_{fi}) e superior ao ângulo de atrito médio (ϕ) entre os dois planos;
- ii. Aquela linha de intersecção deve inclinar na mesma direcção que a face do talude (Figura 7.2).

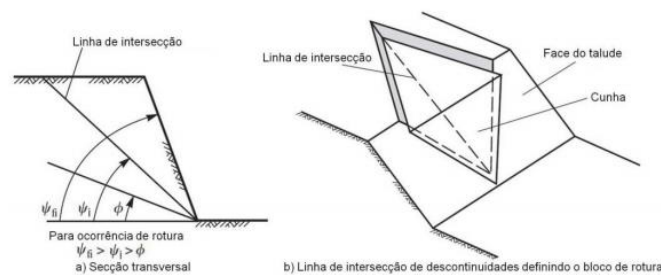


Figura 7.2 – Esquematisação da geometria de talude evidenciando a rotura em cunha. (Traduzido: Wyllie & Mah, 2004)

A atitude do talude, a atitude da cunha e o ângulo de atrito mobilizado integram os parâmetros a estudar a respeito da potencialidade cinemática deste tipo de rotura.

7.2.1.3 ROTURA POR TOMBAMENTO

Sob ponto de vista cinemático, uma rotura por tombamento ocorre devido à existência de descontinuidades subverticais com uma inclinação desfavorável, isto é, com uma direcção paralela, ou próxima disso, à do talude (diferença máxima de 30°). Tais descontinuidades devem apresentar uma forte inclinação para o seu interior, além da presença de uma segunda família de diáclases, sensivelmente ortogonal à anterior e à face do talude (Figura 7.3).

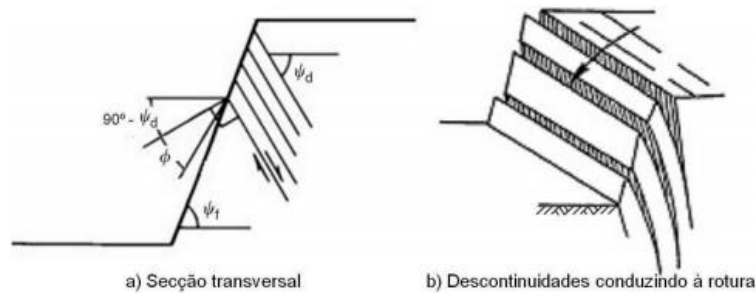


Figura 7.3 – Geometria de uma rotura por tombamento. (Traduzido: Goodman, 1989)

Goodman (1989) afirma que se as descontinuidades detiverem um ângulo de inclinação de ψ_d , a rotura por tombamento irá ocorrer num talude inclinado ψ_f graus com a horizontal se a condição [7.1] se corroborar:

$$(90 - \psi_d) + \phi < \psi_f \quad [7.1]$$

7.2.2 ABORDAGEM QUANTITATIVA

A problemática da abordagem qualitativa reside no fato de a identificação e consideração de famílias de descontinuidades ser falível. Admassu (2012), perante este quesito, desenvolveu uma abordagem quantitativa que considera, separadamente, cada plano de descontinuidade e as inter-relações entre cada plano, de outro modo, todas as possíveis intersecções, quantificando a existência de cada tipo de rotura na forma de um índice de rotura planar (IRP) [7.2], índice de rotura por cunha (IRC) [7.3] e índice de rotura por tombamento (IRT) [7.4].

$$IRP = \frac{\text{Total de descontinuidades ou intersecções que causam rotura planar}}{\text{Total de descontinuidades ou intersecções}} \quad [7.2]$$

$$IRC = \frac{\text{Total de descontinuidades ou intersecções que causam rotura por cunha}}{\text{Total de descontinuidades ou intersecções}} \quad [7.3]$$

$$IRT = \frac{\text{Total de descontinuidades ou intersecções que causam rotura por tombamento}}{\text{Total de descontinuidades ou intersecções}} \quad [7.4]$$

De salientar que quão mais elevado o valor de um determinado índice de rotura, tanto maior a possibilidade de ocorrência dessa rotura.

7.3 CÁLCULO DO FATOR DE SEGURANÇA

A seleção do método apropriado que se adapta às características geológicas e geomecânicas do talude, i.e., dos respetivos parâmetros geométricos, geológicos, geomorfológicos e hidrogeológicos, é parte integrante da análise numérica da estabilidade de taludes de escavação ou de aterro.

A impossibilidade relacionada com a situação em que as forças resistentes superam as instabilizantes, particularizando o comportamento e condições de estabilidade dos taludes, integra o

princípio físico-matemática do método de equilíbrio limite que, por sua vez, institui o cálculo do fator de segurança global (FS) [7.5].

$$FS = \frac{\text{Forças estabilizadoras}}{\text{Forças instabilizadoras}} \quad [7.5]$$

Com base no cálculo do fator de segurança global para um dado mecanismo de rotura é possível classificar as condições de estabilidade relativa (Tabela 7.2).

Tabela 7.2 – Valores do FS global e a estabilidade relativa dos taludes.

FS	ESTABILIDADE RELATIVA
$FS \leq 1$	Instável (rotura certa)
$1 < FS < 1.25$	Instável (rotura provável)
$1.25 < FS < 1.5$	Marginalmente estável
$FS > 1.5$	Estável

Uma vez que os tombamentos não são viáveis em taludes ardosíferos, somente se emprega esta abordagem numérica em roturas do tipo planar e em cunha.

7.3.1 FATOR DE SEGURANÇA PARA ROTURAS PLANARES (FS_p)

O FS_p é constituído pelas forças resistente e atuantes na superfície de rotura, sendo que as forças resistentes superam as forças atuantes, é definido matematicamente por:

$$FS_p = \frac{c \times A + (W \cos \psi_p - U - V \sin \psi_p) \tan \phi'}{W \sin \psi_p + V \cos \psi_p} \quad [7.6]$$

Onde:

c – Coesão do talude; A – Área do talude; W – Peso do bloco deslizado; U – Pressão intersticial; V – Resultante da pressão aplicada na fissura de tração; $W \cos \psi_p$ – Componente estabilizadora do peso (normal à superfície de deslizamento); $W \sin \psi_p$ – Componente do peso que tem tendência ao deslizamento (paralela à superfície de deslizamento); $(W \cos \psi_p - U - V \sin \psi_p) \tan \phi'$ – Força de corte do plano de deslizamento.

Por seu turno, o parâmetro A obtêm-se mediante a subsequente equação:

$$A = (H + b \tan \psi_p - z) \times \operatorname{cosec} \psi_p \quad [7.7]$$

As pressões hidrostáticas que irão atuar tanto na fenda de tração como no plano de deslizamento advém de se presumir que o nível freático se posiciona acima da fenda de tração. (Wyllie & Mah, 2004) Desta forma, o peso do bloco instabilizado é definido por intermédio de dois métodos. O primeiro deles, expresso com recurso à equação [1.16], admite que a fenda de tração se restrinja ao topo do talude (Figura 7.4).

$$W = \gamma_r \left[(1 - \cot\psi_f \tan\psi_f) \times \left(bH + \frac{1}{2} H^2 \cot\psi_f \right) + \frac{1}{2} b^2 (\tan\psi_s - \tan\psi_p) \right] \quad [7.8]$$

Onde:

b – Comprimento do topo do talude; H – Altura do talude.

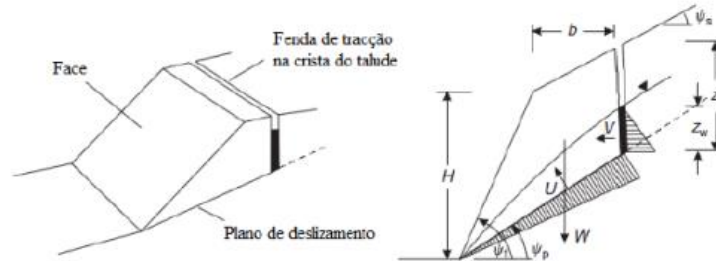


Figura 7.4 – Geometria de rotura planar: fenda de tração na crista do talude. (Wyllie & Mah, 2004)

Contrariamente, o segundo método, expresso com auxílio à equação [7.9], pressupõe que a fenda de tração se situe na face do talude (Figura 7.5).

$$W = \frac{1}{2} \times \gamma_r H^2 \left[\left(1 - \frac{z}{H} \right)^2 \cot\psi_p (\cot\psi_p \tan\psi_f - 1) \right] \quad [7.9]$$

Onde:

γ_r – Peso volúmico do material instabilizado.

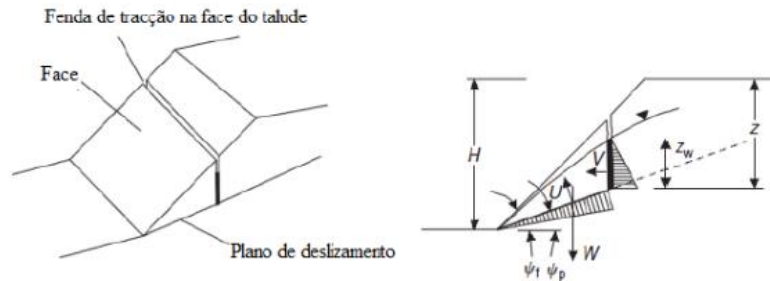


Figura 7.5 – Geometria de rotura planar: fenda de tração na face do talude. (Wyllie & Mah, 2004)

Tanto num método, como no outro, desde a visualização do traço da fenda de tração na superfície do talude até à projeção de um perfil transversal preciso, determina-se, respetivamente, a sua posição e profundidade e, consequentemente, é exequível o cálculo das pressões exercidas pela água, U e V , por intermédio das equações [7.10] e [7.11].

$$U = \frac{1}{2} \times \gamma_w z A \quad [7.10]$$

$$V = \frac{1}{2} \times \gamma_w z^2 \quad [7.11]$$

Onde:

γ_w – Peso volúmico da água (9,8 kN/m³); z – Profundidade em relação ao nível freático.

Na eventualidade de o talude dispor de elementos de estabilização, a título de exemplo, uma ancoragem, acresce ao valor de tensão uma força ativa na face do talude, T , (Figura 7.6) transformando-se o FS_p em:

$$FS_p = \frac{c \times A + (W \cos \psi_p - U - V \sin \psi_p + T \sin(\psi_T + \psi_p)) \tan \phi'}{W \sin \psi_p + V \cos \psi_p - T \cos(\psi_T + \psi_p)} \quad [7.12]$$

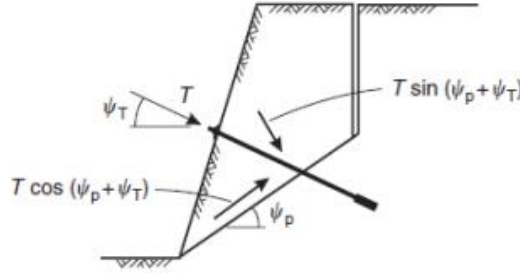


Figura 7.6 – Esquemática das componentes da força de ancoragem. (Wyllie & Mah, 2004)

7.3.2 FATOR DE SEGURANÇA PARA ROTURAS EM CUNHA (FS_c)

Do mesmo modo que o cálculo do FS_p , o FS_c deriva de diferentes condições, i.e., peso da cunha e a área de cada uma das faces, pressão da água, entre outros fatores se indispensáveis, como a ocorrência de tensões de ancoragens e forças sísmicas. Wyllie e Mah (2004) apontam a existência de forças atuantes em cada um dos planos de deslizamento, contribuindo para a complexidade da resolução destes casos.

Pressupondo que o atrito está presente nos planos da cunha e que o seu ângulo é o mesmo para ambos os planos, o FS_c é dado por [7.13]:

$$FS_c = \frac{(R_A + R_B) \times \tan \phi'}{W \sin \psi_p} \quad [7.13]$$

Onde:

R_A e R_B – Reações normais dos planos A e B, direção paralela e perpendicular à linha de interseção dos planos da cunha; $W \sin \psi_p$ – Componente instabilizadora, o peso da cunha.

$$R_A \sin \left(\beta - \frac{1}{2} \varepsilon \right) + R_B \sin \left(\beta + \frac{1}{2} \beta \right) = W \cos(\psi_p) \quad [7.14]$$

$$R_A \sin \left(\beta - \frac{1}{2} \varepsilon \right) = R_B \sin \left(\beta + \frac{1}{2} \beta \right) \quad [7.15]$$

Onde:

ε – Ângulo da cunha; β – Inclinação da cunha.

A resolução do sistema de equação culmina em [7.16]:

$$FS_c = \frac{\sin \beta}{\sin(\frac{\epsilon}{2})} \times \frac{\tan \phi'}{\tan \psi_p} \quad [7.16]$$

A aplicação desta última equação abrange a problemática de considerar apenas o maciço seco, menosprezando o nível freático do maciço. Todavia, se se conhecer o valor de FS_p , é executável o cálculo do FS_c em função do primeiro fator, isto porque o FS_p é suportado pelo ângulo de atrito, ao passo que o FS_c a rotura ocorre por toda a extensão do plano de deslizamento, com um ângulo de atrito, ϕ' , e uma inclinação similar à linha de intersecção das cunhas, ψ_p (Gonçalves, 2013). Assim, o FS_c é escrito em conformidade com equação [7.17] (Wyllie & Mah, 2004):

$$FS_c = KFS_p \quad [7.17]$$

Onde:

K – Depende do ângulo da cunha, ϵ , e a inclinação da cunha, β , porém calculado com base no ábaco da Figura 7.7.

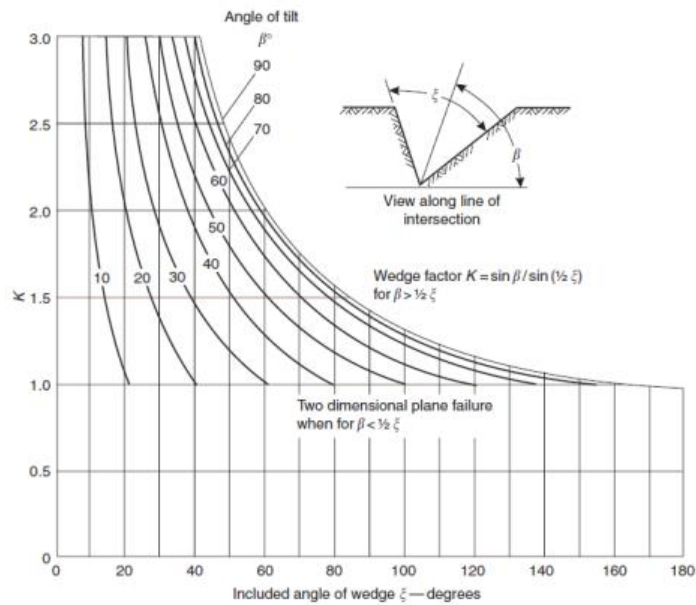


Figura 7.7 – Ábaco de valores da constante K a partir da geometria da cunha. (Wyllie & Mah, 2004)

7.4 MÉTODOS EMPÍRICOS

O espaçamento, as condições das descontinuidades e, geralmente, a resistência à compressão do material definem os fundamentos dos métodos empíricos. Estes são, essencialmente, baseados na experiência adquirida em projetos anteriores similares; assim, estes sistemas de análise/classificação não fornecem diretamente parâmetros geotécnicos, sendo necessárias observações com o objetivo de obter ponderações apropriadas para os parâmetros em causa (GEO, 2007).

7.4.1 CLASSIFICAÇÃO RMR

O *Rock Mass Rating (RMR)*, embora inicialmente utilizado para definir o tipo de sustimento em túneis, ao longo dos anos, em resultado do aumento do número de casos examinados, foi continuamente modificado, experimentando a última atualização em 1989. O intuito deste índice, à exceção de o relacionar com os respetivos parâmetros geotécnicos, é atribuir ao maciço rochoso um valor índice de qualidade compreendido entre 0 e 100.

Os subsequentes parâmetros são primordiais para a compreensão do *RMR*:

- i. Resistência à compressão uniaxial;
- ii. RQD (*Rock Quality Designation*);
- iii. Espaçamentos das descontinuidades;
- iv. Condições das descontinuidades (rugosidade, abertura, enchimento, persistência e estado de alteração das paredes);
- v. Percolação de água;
- vi. Orientação das descontinuidades.

Em campo, o maciço rochoso deve ser dividido em zonas de características estruturalmente uniformes, em que o índice para cada uma deles segue a metodologia da Tabela 7.3, referente aos primeiros cinco parâmetros citados obtendo-se o valor de *RMR* básico – $RMR_{básico}$.

Tabela 7.3 – Parâmetros e pesos do $RMR_{básico}$. (Traduzido: Bieniawski, 1989)

PARÂMETROS			INTERVALOS DE VALORES						
1	Resistência da rocha intacta	Point load (MPa)	> 10	4 – 10	2 – 4	1 – 2	Compressão uniaxial		
		Compressão uniaxial (MPa)	> 250	100 – 250	50 – 100	25 – 50	5 – 25	1 – 5	< 1
	Peso		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD (%)		90 – 100	75 – 90	50 – 75	25 – 50	< 25		
	Peso		20	17	13	8	3		
3	Espaçamento das descontinuidades		> 2 m	0,6 – 2	200 – 600 mm	60 – 200 mm	< 60 mm		
	Peso		20	15	10	8	5		
4	Condição das descontinuidades (consultar Tabela 7.4)		Superfícies muito rugosas, Sem continuidade, Sem separação, Paredes não meteorizadas	Superfícies ligeiramente rugosas, Separação < 1 mm, Paredes ligeiramente meteorizadas	Superfícies ligeiramente rugosas, Separação < 1 mm, Paredes muito meteorizadas	Superfícies estriadas ou com enchimentos < 5 mm de espessura ou separações com 1 – 5 mm contínuas	Enchimento mole com > 5 mm ou separações > 5 mm contínuas		
	Peso		30	25	20	10	0		
5	Percolação de água	Caudal por 10 m de túnel (L/min)	Nenhum	< 10	10 – 25	25 – 125	> 125		
		(Pressão de água nas diáclases) / (tensão principal máxima)	0	< 0,1	0,1 – 0,2	0,2 – 0,5	> 0,5		
		Condições gerais	Completamente seco	Ligeiramente húmido	Húmido	Gotejando	Fluindo		
	Peso		15	10	7	4	0		

Na situação em que a informação existente sobre o parâmetro condições das descontinuidades é mais minuciosa, prefere-se a utilização da Tabela 7.4, em que o respetivo peso total será a soma dos parâmetros nela presente.

Tabela 7.4 – Classificação para condições das descontinuidades. (Traduzido: Bieniawski, 1989)

PARÂMETRO	INTERVALO DE VALORES				
Comprimento da descontinuidade (persistência)	< 1 m	1 – 3 m	3 – 10 m	10 – 20 m	> 20 m
Peso	6	4	2	1	0
Separação (abertura)	Nenhuma	< 0.1 mm	0,1 – 1 mm	1 – 5 mm	> 5 mm
Peso	6	5	4	1	0
Rugosidade	Muito rugosa	Rugosa	Ligeiramente rugosa	Macia	Lisa
Peso	6	5	3	1	0
Enchimento	Nenhum	Enchimento duro		Enchimento mole	
		< 5 mm	> 5 mm	< 5 mm	> 5 mm
Peso	6	4	2	2	0
Meteorização	Sem meteorização	Ligeiramente meteorizada	Medianamente meteorizada	Muito meteorizada	Decomposta
Peso	6	5	3	1	0

Dependente do tipo de obra de engenharia, nomeadamente, túneis, minas, fundações ou taludes, o parâmetro orientação das descontinuidades é examinado de modo isolado (Tabela 7.5 e Tabela 7.6). (Bieniawski, 1989)

Tabela 7.5 – Efeito da direção e inclinação das descontinuidades. (Traduzido: Bieniawski, 1989)

1. DIREÇÃO PERPENDICULAR AO EIXO DO TÚNEL			
Escavação no sentido da inclinação		Escavação no sentido oposto da inclinação	
Inclinação 45° – 90°	Inclinação 20° – 45°	Inclinação 45° – 90°	Inclinação 20° – 45°
Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável
2. DIREÇÃO PARALELA AO EIXO DO TÚNEL		3. INDEPENDENTE DA DIREÇÃO	
Inclinação 20° – 45°	Inclinação 45° – 90°	Inclinação 0° – 20°	
Razoável	Muito desfavorável	Razoável	

Tabela 7.6 – Ajuste dos pesos em virtude da orientação das descontinuidades com informação proveniente da Tabela 7.5. (Traduzido: Bieniawski, 1989)

DIREÇÃO E INCLINAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES		MUITO FAVORÁVEL	FAVORÁVEL	RAZOÁVEL	DESFAVORÁVEL	MUITO DESFAVORÁVEL
Pesos	Túneis e minas	0	-2	-5	-10	-12
	Fundações	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	

Depois do somatório dos pesos dos parâmetros atrás mencionados, a classificação final do índice de *RMR* determinará uma das cinco classes e, posterior, qualidade do maciço rochoso (Tabela 7.7). Ademais, é exequível obter uma estimativa de intervalos de valores referentes à coesão e ângulo de atrito do maciço rochoso (Tabela 7.8).

Tabela 7.7 – Classes do maciço rochoso. (Traduzido: Bieniawski, 1989)

VALOR <i>RMR</i>	100 – 81	80 – 61	60 – 41	40 – 20	< 21
Classe	I	II	III	IV	V
Descrição	Rocha muito boa	Rocha boa	Rocha razoável	Rocha fraca	Rocha muito fraca

Tabela 7.8 – Definição das classes do maciço rochoso. (Adaptado: Bieniawski, 1989)

CLASSE	I	II	III	IV	V
Coesão maciço rochoso (kPa)	> 400	300 – 400	200 – 300	100 – 200	< 100
Ângulo de atrito do maciço rochoso (°)	> 45	35 – 45	25 – 35	15 – 25	< 15

7.4.2 CLASSIFICAÇÃO *SMR*

O *Slope Mass Rating (SMR)*, sistema de classificação geomecânico para taludes, aborda uma modificação do sistema *RMR* de Bieniawski (1989), em que o valor do índice *SMR* deriva do valor de *RMR_{básico}* ao qual acrescem dois princípios de ajuste: um que se submete à orientação relativa entre as descontinuidades e o talude; e o outro que é função do método de desmonte [7.17]. O valor de *SMR* deve ser estimado para cada família de descontinuidade adotando-se, futuramente, o de menor valor.

$$SMR = RMR_{básico} + (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4 \quad [7.17]$$

Onde:

RMR_{básico} – *RMR* básico relativo à tabela 7.3;

*F*₁ – obedece ao paralelismo entre a direção da face do talude e a direção da descontinuidades, variando entre 1,00 – circunstância em que um e outro são praticamente paralelos – a 0,15 – o ângulo entre eles é maior que 30° e, deste modo, a probabilidade de rotura é muito baixa. Obtêm-se por intermédio da leitura da Tabela 7.9.

Tabela 7.9 – Fator de ajuste *F*₁. (Traduzido: Romana et al., 2003)

CAUSA DA ROTURA	MUITO FAVORÁVEL	FAVORÁVEL	RAZOÁVEL	DESFAVORÁVEL	MUITO DESFAVORÁVEL
Planar $ \alpha_j - \alpha_s $	> 30°	30° – 20°	20° – 10°	10° – 5°	< 5°
Tombamento $ \alpha_j - \alpha_s - 180^\circ $					
Valor de <i>F</i> ₁	0,15	0,40	0,70	0,85	1,00
Relação	$F_1 = (1 - \sin \alpha_j - \alpha_s)^2$				

α_j – Direção da descontinuidades; α_s – Direção da face do talude.

*F*₂ – aborda a inclinação da descontinuidades, em rotura planar, vista como uma medida de resistência ao deslizamento da descontinuidades. Valor compreendido entre 1,00 e 0,15, respectivamente para descontinuidades inclinando mais de 45° e menos de 20° (Tabela 7.10).

Tabela 7.10 – Fator de ajuste F_2 . (Traduzido: Romana et al., 2003)

CAUSA DE ROTURA		MUITO FAVORÁVEL	FAVORÁVEL	RAZOÁVEL	DESFAVORÁVEL	MUITO DESFAVORÁVEL
$ \beta_j $		$< 20^\circ$	$20^\circ - 30^\circ$	$30^\circ - 35^\circ$	$35^\circ - 45^\circ$	$> 45^\circ$
Valor de F_2	Planar	0,15	0,40	0,70	0,85	1,00
	Tombamento	1,00				
Relação		$F_2 = \tan^2 \beta_j$				

β_j – Inclinação da descontinuidade.

F_3 – define a relação da inclinação entre a descontinuidades e a face do talude. Os valores propostos por Bieniawski mantêm-se, exclusivamente, para este parâmetro. Obtêm-se por intermédio da Tabela 7.11.

Tabela 7.11 – Fator de ajuste F_3 . (Traduzido: Romana et al., 2003)

CAUSA DE ROTURA	MUITO FAVORÁVEL	FAVORÁVEL	RAZOÁVEL	DESFAVORÁVEL	MUITO DESFAVORÁVEL
Planar $ \beta_j - \beta_s $	$> 10^\circ$	$10^\circ - 0^\circ$	0°	$0^\circ - (-10^\circ)$	$< (-10^\circ)$
Tombamento $ \beta_j + \beta_s $	$< 110^\circ$	$110^\circ - 120^\circ$	$> 120^\circ$	–	–
Valor de F_3	0	-6	-25	-50	-60

β_j – Inclinação da descontinuidade; β_s – Inclinação da face do talude.

F_4 – obtido de forma empírica, integra o fator de ajuste relativo ao método de escavação, através da Tabela 7.12.

Tabela 7.12 - Fator de ajuste F_4 . (Traduzido: Romana et al., 2003)

MÉTODO	TALUDE NATURAL	PRÉ-CORTE	EXPLOSÕES LEVES	EXPLOSÕES NORMAIS OU ESCAVAÇÃO POR MEIOS MECÂNICOS	EXPLOSÕES DEFICIENTES
Valor de F_4	15	10	8	0	-8

A caracterização das classes obtidas pela aplicação do índice SMR e, posterior, descrição da estabilidade, tipos de roturas comuns e potenciais necessidade de suporte exibem-se na Tabela 7.13.

Tabela 7.13 – Descrição das classes de SMR . (Traduzido: Romana, 1993)

CLASSE	VALOR DE SMR	DESCRIÇÃO	ESTABILIDADE	ROTURA	SUPORTE
I	81 – 100	Muito bom	Completamente estável	Nenhuma	Nenhum
II	61 – 80	Bom	Estável	Alguns blocos	Ocasionalmente
III	41 – 60	Normal	Parcialmente estável	Pequenas planares ou muitas por cunhas	Sistemático
IV	21 – 40	Mau	Instável	Planar ou grandes por cunhas	Importante/corretivo
V	0 – 20	Muito mau	Completamente instável	Grandes planar ou circular	Re-escavação

Algumas medidas minimizadoras associam-se ao valor obtido do índice *SMR* (Tabela 7.14).

Tabela 7.14 – Medidas minimizadoras. (Traduzido: Romana et al., 2003)

MEDIDAS		VALOR DE <i>SMR</i>
Correção	Re-escavação	10 – 30
	Muros de contenção	
Drenagem	Drenagem superficial	10 – 40
	Drenagem profunda	
Reforço (com betão)	Betão projetado	20 – 60
	Betão de limpeza	
	Vigas e/ou contrafortes	
	Muros no pé do talude	
Reforço (com inclusões)	Pregagens	30 – 75
	Ancoragens	
Proteção	Valas de pé de talude	45 – 70
	Vedações no talude ou sopé	
	Redes	
Sem suporte	Reperfilamento	65 – 100
	Nenhum	

Romana (1993) estabelece um conjunto de medidas minimizadoras preferencialmente pormenorizadas e subdivididas dentro das cinco classes de *SMR* (Tabela 7.15).

Tabela 7.15 – Medidas minimizadoras por classes. (Traduzido: Romana et al., 1993)

CLASSE	<i>SMR</i>	MEDIDA
Ia	91 – 100	Nenhuma
Ib	81 – 90	Nenhuma; Reperfilamento
IIa	71 – 80	Nenhuma; Valas de pé de talude ou vedações Pregagens esporádicas
IIb	61 – 70	Valas de pé de talude; Redes Pregagens esporádicas ou sistemáticas
IIIa	51 – 60	Valas de pé de talude e/ou redes Pregagens esporádicas ou sistemáticas Betão projetado esporádico
IIIb	41 – 50	Valas de pé de talude e/ou redes Pregagens sistemáticas; Ancoragens Betão projetado sistemático Muros no pé do talude e/ou betão de limpeza
IVa	31 – 40	Ancoragens Betão projetado sistemático Muros no pé do talude e/ou vigas de betão (Reperfilamento) Drenagem
IVb	21 – 30	Betão projetado com fibras Muros no pé do talude e/ou vigas de betão Reperfilamento. Drenagem interna
V	11 – 20	Muros de gravidade ou ancorados Reperfilamento

8 MEDIDAS MITIGADORAS

As medidas mitigadoras a adotar, para além de se enquadrarem nos inúmeros casos, necessitam de uma análise de estabilidade de taludes e de um conhecimento das condicionantes daquela estabilidade, cujo objetivo principal passa por um aumento da segurança associada a cada talude. Com o objetivo de delinear e executar tais medidas, é crucial o domínio de (Vallejo *et al.*, 2004):

- i. Propriedades e comportamento geomecânico do maciço que institui o talude;
- ii. Tipo e mecanismo de rotura, envolvendo a velocidade, direção e geometria;
- iii. Fatores geológicos, hidrogeológicos, ambientais e relacionados com a atividade antrópica, assim como outros que comprometam a estabilidade.

Sem menosprezar a disponibilidade de materiais, a urgência de intervenção, a magnitude e dimensão da instabilização, tal como os custos associados que, em virtude do prejuízo elevado relacionado com roturas são, várias vezes, economicamente justificados.

Uma obra de estabilização de taludes de cariz fortemente geotécnico, além de admitir a incerteza associada aos materiais geológicos, é retrata por quatro fases (P.A. Carvalho, 1991):

- i. Investigação;
- ii. Projeto de Execução;
- iii. Execução;
- iv. Observação e Manutenção.

A escassez de dados e a pouca representatividade da situação real instigam à realização de uma campanha de prospeção e amostragem, com possibilidade de ser complementada com métodos geofísicos e ensaios laboratoriais ou *in situ*, como primeira fase de uma obra de estabilização. As informações necessárias ao projeto de execução devem abranger as propriedades físicas e químicas dos terrenos, as condições da água no terreno e, por fim, a litologia. No caso particular de roturas em taludes, é crucial discernir a fenomenologia dos processos de instabilização, do clima, da vegetação e da ação antrópica local.

A fase de projeto de execução manipula as informações obtidas na fase de investigação no sentido de desenvolver modelos aproximados, assentes em geometrias ideais e em comportamentos geológicos simples, que permitam definir e calcular soluções consoante a regulamentação em vigor, atendendo à interação entre economia *versus* solução ideal técnica.

Posteriormente, a fase de execução, fase construtiva, é individualizada pela implementação dos métodos definidos na fase anterior, certificando a mais plausível tradução do projeto para o que é verdadeiramente executado em obra, ajustando o projeto à medida que os condicionalismos, em que este foi fundamentado, se comprovem desfasados da realidade.

Depois de o talude ser estabilizado, deve ser previsto um plano de observação e instrumentação e, também, definidos critérios de alerta e de alarme e prováveis medidas de reforço, de modo a asseverar a sua observação periódica e, subsequente, manutenção.

8.1 ALTERAÇÃO DA GEOMETRIA DO TALUDE

A alteração da geometria de um talude mediante escavações e aterros, devidamente localizados, constitui a forma mais simples e eficaz de aumentar a sua estabilização. Com o propósito de incrementar a estabilidade de um qualquer talude atua-se, geralmente, de três formas díspares:

- i. Redução da inclinação média – talude contínuo ou banquetas;
- ii. Escavação de material na zona iminentemente instável e/ou na crista do talude;
- iii. Aterro de material granular no pé do talude.

A redução da inclinação média de um ângulo α para um ângulo menor β , favorece o aumento das ações estabilizadoras face a uma minimização das forças desestabilizadoras (Figura 8.1).



Figura 8.1 – Transformação da geometria de um talude. (Oliveira, 2010)

No caso de taludes com uma altura superior a 5 metros, a diminuição da inclinação é alcançada mediante a realização de banquetas intermédias, escalonando o talude, e, por conseguinte, para além de aumentarem a estabilidade do talude, retêm a queda de materiais e de água e, também, servem como plataformas de inspeção (Figura 8.2).

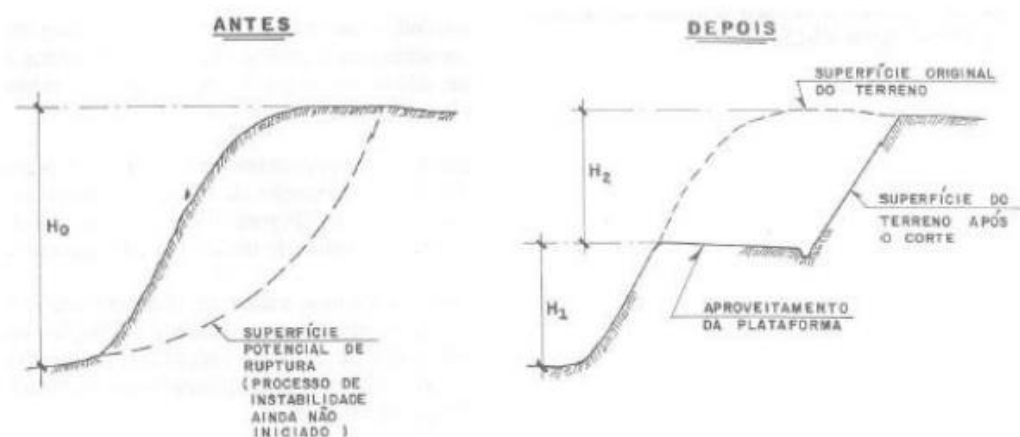


Figura 8.2 – Ilustração de banquetas intermédias. (P.A. Carvalho, 1991)

A escavação de material na crista do talude possibilita a eliminação do peso da parte superior do talude e, por isso, requer uma redução na parcela do momento atuante. Como nem sempre é exequível o acesso à crista, revisa-se a execução de aterros no pé do talude (Figura 8.3).



Figura 8.3 – Escavação e aterro na estabilização de taludes, tanto no pé, como na crista do mesmo. (Oliveira, 2010)

A ação estabilizante face ao deslizamento de um talude é obtida pelo aumento das tensões normais por intermédio do peso na zona de pé, no qual o material disposto deve ser granular, interpondo um geotêxtil entre o terreno natural, evitando a lavagem de finos.

De acordo com Carvalho (1991) não importa qual o tipo de solo ou rocha, a condição de ocorrência ou a ação de quaisquer esforços, existindo sempre uma condição geométrica compatível com o talude que oferecerá estabilidade ao maciço. Todavia, em certos casos, não há espaço suficiente para se conseguir o reperfilamento necessário, ou então esse reperfilamento solicita volumes exorbitantes de terraplanagem e de movimentação de terras.

8.2 DRENAGEM

A água, o maior fator de instabilização, impõe que as obras de drenagem, de mais larga utilização na estabilização de taludes, ostentem os mecanismos mais eficientes, podendo ser utilizadas como recurso único ou conciliadas com outros tipos de soluções. Neste tipo de obras a drenagem superficial,

assim como a drenagem profunda são articuladas, harmoniosamente, com o objetivo de a água captada no interior dos maciços ser direcionada de modo adequado (Figura 8.4).

A drenagem superficial integra a captação e direcionamento de águas que percolem a face dos taludes acarretando como repercussões a diminuição de infiltração de água no interior dos maciços e a dificuldade de se realizarem fenómenos de erosão superficial. As valas ou canaletas, descidas de água e órgãos de dissipação são os sistemas de drenagem superficial mais comuns.

Contrariamente, a drenagem profunda, remove a água que percola no interior dos maciços e desce o nível freático. Os drenos sub-horizontais, as trincheiras drenantes, galerias, ponteiros e poços de alívio integram as principais soluções deste tipo de drenagem.

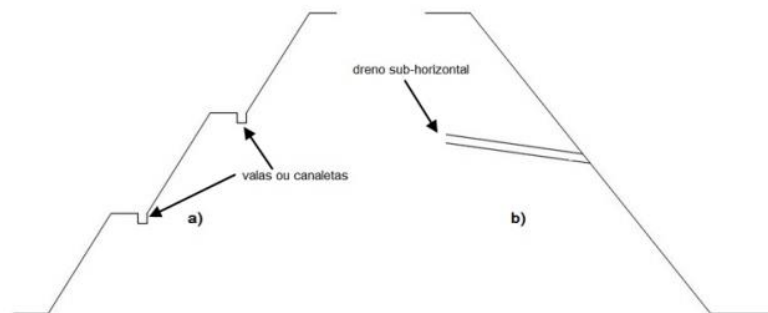


Figura 8.4 – Tipos de drenagem: (a) drenagem superficial; (b) drenagem profunda.

Numa etapa inicial, a execução de estudos no que respeita aos índices pluviométricos, à área da bacia hidrográfica de contribuição e às propriedades dos materiais que são percolados concebem um correto dimensionamento de sistemas de drenagem. Importa apontar que os dispositivos de drenagem padecem de uma elevada suscetibilidade a entupimentos e a danos físicos à sua estrutura, por isso são periodicamente vistoriados, limpos e mantidos, assegurando o seu correto funcionamento.

8.3 REFORÇO COM INCLUSÕES

A estabilidade de um talude também pode ser efetivada pela introdução de elementos de elevada resistência no terreno, salientando-se as pregagens, ancoragens, estacas passivas, microestacas e colunas de *Jet Grouting*.

8.3.1 PREGAGENS

As inclusões lineares que, regularmente, usufruem de carácter passivo e toleram esforços axiais, de flexão e de corte, expressam uma técnica de estabilização de maciços *in situ* intitulada por pregagens (Schlosser, 1982). As últimas, configuradas por varões nervurados ou roscados de aço de alta qualidade introduzem-se no terreno através de três tecnologias:

- i. Cravação – diretamente no próprio solo por intermédio de percussão, vibração ou propulsão de ar comprimido;

- ii. Furação – inserção num furo efetuado preliminarmente, por furação de pequeno diâmetro e subsequente selagem com calda cimentícia;
- iii. Auto-perfuração – simultaneamente à injeção de caldas cimentícias de selagem, o corpo de pregagem, parte do processo de furação, depois instalada a armadura à roto-percussão funciona como broca de perfuração.

Usualmente as pregagens dividem-se em tubo expansivo e célula expansiva. A pregagem de tubo expansivo, inserida em pré-furos e injetada com água sob pressão, proporcionando a insuflação e o contato do tubo de aço diretamente com o maciço, dispõe de uma secção transversal oca em forma de ómega (Figura 8.5).



Figura 8.5 – Pregagem de tubo expansivo. (G. Santos, 2014)

A pregagem de célula expansiva, de fixação mecânica, detém uma célula de expansão na extremidade do varão (Figura 8.6). A garantia de fixação e agarramento do maciço é permitida pela aplicação de um pré-esforço, a partir da cabeça, por intermédio de uma chave dinamométrica ou de um macaco hidráulico. Ao contrário da pregagem de tubo expansivo, são seladas com calda de cimento ou resinas, de modo a assegurar a mobilização de resistência lateral ao longo do comprimento selado.



Figura 8.6 – Pregagem de célula expansiva. (G. Santos, 2014)

O critério de escolha entre soluções deve dar importância ao tipo e à qualidade do maciço, rochoso ou terroso, a tratar de acordo com situações particulares de execução. As pregagens constituem uma solução de estabilização de taludes deveras vantajosa pois:

- i. Aplicação rápida e flexível por meio de poucos equipamentos mecânicos, o que suscita a sua execução em locais exíguos e de difícil acesso;

- ii. Adaptação da orientação, comprimento ou densidade de pregagens em concordância com as condicionantes geológicas examinadas durante a execução;
- iii. Método construtivo de impacto ambiental reduzido que propicia um resultado final agradável de panorama estético e um custo competitivo face a outras soluções.

Porém, é uma solução que ostenta algumas limitações, tais como:

- i. Adoção de um sistema de proteção à corrosão em pregagens de carácter definitivo, devido a problemas de durabilidade;
- ii. Aplicação em solos sem coesão, solos argilosos com elevado teor em água e solos que vivenciem período gelo-degelo prejudica o mecanismo de resistência da pregagem;
- iii. Deformações imprescindíveis para mobilizar as forças resistentes podem não ser oportunas perante a deformabilidade de estruturas vizinhas.

8.3.2 ANCORAGENS

As ancoragens instituem um método de reforço ativo de solos ou maciços rochosos, por instalação de cordões ou barras de aço pré-tensionadas, com o propósito de favorecer um aumento de tensões efetivas e por conseguinte, de resistência ao corte. De modo geral este tipo de reforço é composto, essencialmente, por três elementos:

- i. Cabeça – conjunto idealizado por uma placa de distribuição, uma placa porta-cunhas e dispositivos de proteção permanente;
- ii. Comprimento livre – troço de armadura entre a cabeça e o bolbo de selagem, no qual não são disseminadas tensões ao terreno;
- iii. Bolbo de selagem – troço da ancoragem que facilita a execução do pré-esforço na armadura e a transmissão de tensões ao terreno. É efetuado injetando calda de cimento, ou resinas, sob pressão.

Almejando a sua efetivação é indispensável o seguimento das subsequentes quatro fases: a furação, a colocação da armadura, as injeções e a aplicação de pré-esforço (Figura 8.7).

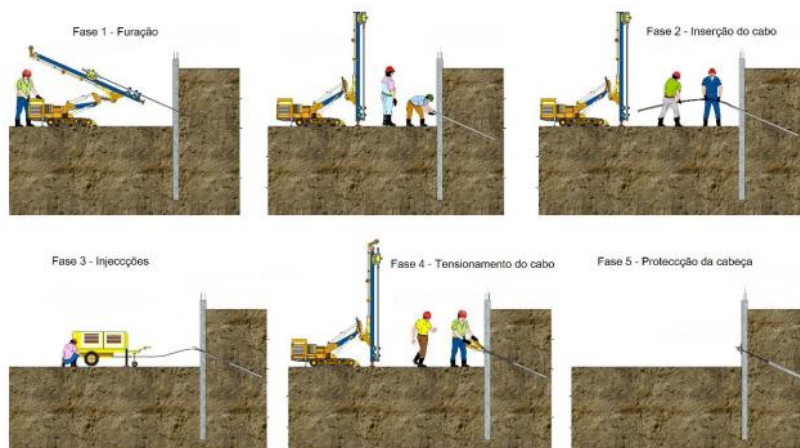


Figura 8.7 – Execução de Ancoragens. (Adaptado: Serki, 2014)

O processo fundamental de seleção do método de furação deve considerar os múltiplos fatores presentes como a água, o tipo de material a furar, as dimensões e inclinação do furo e o local de acesso. A rotação com trado, técnica mais utilizada, viabiliza o entubamento e injeção de água em solos mais incoerentes ou a utilização de um martelo de fundo de furo em rochas. No fim desta fase, é primordial certificar que o fundo se encontra totalmente limpo.

Antecedida por uma inspeção cuidadosa com o intuito de identificar possíveis defeitos ou danos a colocação da armadura no furo exige que seja realizada o mais rapidamente possível. Conforme se opera a introdução da armadura, o seu manuseamento deve ser firme e cuidado, evitando retorcimentos ou curvaturas excessivas.

De acordo com a norma EN 1537 as injeções da ancoragem devem cumprir os seguintes pontos:

- i. Formação de bolbo de ancoragem, com o propósito de difundir pelo terreno a força aplicada na armadura;
- ii. Assegurar a proteção da armadura contra a corrosão;
- iii. Alargar as paredes do furo na área do comprimento de selagem, no sentido de aumentar a sua capacidade resistente;
- iv. Selar o terreno nas imediações da zona de selagem para minimizar a perda de calda.

A injeção efetua-se em duas fases distintas. A primeira fase, a injeção inicial de preenchimento e selagem, manipula a calda por gravidade ou baixa pressão até completar o furo na sua totalidade, finalizando, apenas, quando a calda retornar à boca do furo limpa de impurezas.

Por seu turno, a segunda fase de reinjeção, a qual é indispensável para garantir a capacidade resistente do bolbo de selagem, é executada após se dar um tempo para que a calda injetada na primeira fase principie o processo de presa. No momento que a calda injetada exibir uma consistência pastosa, é altura de começar a reinjeção que pode ser efetuada atendendo a um dos dois métodos: Injeção Repetida Seletiva (IRS) ou Injeção Geral Uniforme (IGU).

O contraste entre estes dois métodos reside na repetibilidade e seleção da Injeção Repetida Seletiva. A IRS é estruturada por intermédio de um obturador duplo expansível, posicionado ao longo do tubo, assente no fundo do furo, em cada “manchete” (Figura 8.8). Por seu lado, o obturador duplo admite que cada válvula seja injetada isoladamente, usufruindo da salvaguarda de abertura de todas as válvulas.

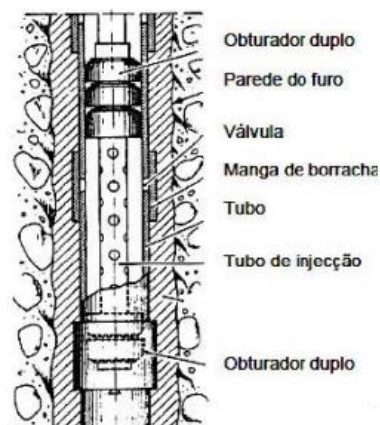


Figura 8.8 – Obturador duplo para injeção IRS. (S. Coelho, 1996)

A última etapa da efetivação de uma ancoragem decorre do seu tensionamento, valendo-se de um sistema de pré-esforço composto por um macaco hidráulico. Tanto este processo como os ensaios de receção a realizar à posteriori são enumerados pela norma EN 1537. Se a ancoragem dispuser de um carácter definitivo, é proveitosa a aplicação de um sistema de proteção anti-corrosão para a cabeça e de células de carga a fim de monitorizar a perda de tensão.

Os benefícios da aplicação de ancoragens para a estabilização de taludes compreendem:

- i. Aptidão de acomodarem elevadas cargas;
- ii. Técnica versátil e suscetível de ser ajustada às condições do terreno;
- iii. Testadas individualmente certificam um elevado controlo da qualidade de execução.

Os inconvenientes associam-se a:

- i. Ancoragens longas tendem conduzem a algum desvio, instigando a mobilização de tensões tangenciais no comprimento livre;
- ii. Monitorização ao longo do período de vida útil;
- iii. Pressões de injeção realizadas a pressões satisfatórias para impelir ao levantamento e até fratura hidráulica no terreno.

8.3.3 MICROESTACAS

As microestacas, varões ou perfis metálicos, de diâmetro variável entre os 80 e 250 mm, executam-se como armadura em furos previamente abertos que serão selados com calda de cimento.

Independentemente da sua orientação no terreno, as microestacas atuam à compressão e à tração de cargas de serviço em valores compreendidos no intervalo 200-1000 kN. A transmissão de forças para o terreno é exercida essencialmente através do atrito lateral, mas, também, por uma pequena contribuição da resistência de ponta. As microestacas são agrupadas e solidarizadas por intermédio de um bloco de ligação ou de uma viga de travamento (Figura 8.9). É pertinente assegurar que o bolbo de selagem se situe numa zona estável maciço, de outro modo, exterior à cunha de deslizamento.

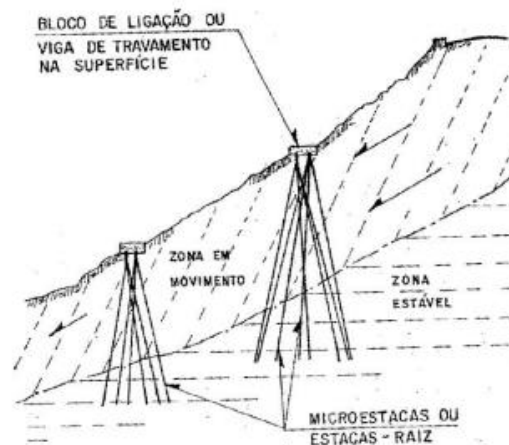


Figura 8.9 – Uso de microestacas na estabilização de taludes. (P.A. Carvalho, 1991)

De acordo com Brito (1999), sob o ponto de vista de execução, o faseamento pode ser dividido em 5 fases:

- i. Marcação ou implantação;
- ii. Furação;
- iii. Colocação da armadura;
- iv. Injeção;
- v. Ligação à estrutura ou solidarização através de bloco.

O tipo de terreno e a existência de estruturas adjacentes e sua respetiva sensibilidade induzem a técnica de execução de furos por cravação ou por furação. Contudo, em virtude das vibrações e ruídos desenvolvidos pela cravação, a furação é de utilização assídua. Na temática furação, as técnicas triviais de aplicação envolvem o recurso a trado e às máquinas de roto-percussão equipadas com varas e bits.

Depois de furar posiciona-se a armadura no furo de forma manual, ou com recurso a um meio de elevação, assegurando-se a sua correta posição e, na hipótese de armaduras em varão, o recobrimento com recurso a espaçadores.

A capacidade de carga das microestacas dispõe de um íntimo relacionamento com a fase de injeção e selagem. *Shong & Chung* (2003) defendem que a calda de injeção e selagem reúne as seguintes múltiplas funções:

- i. Move a carga do perfil metálico para o terreno circundante;
- ii. Incremento da resistência à compressão da seção transversal da microestacas;
- iii. Salvaguarda os elementos de aço de fenómenos de corrosão e de encurvadura;
- iv. Efeitos expandem-se para além do furo, cooperando no aprimoramento dos estratos de solo atravessados.

Em síntese, a fluidez, estabilidade, durabilidade e resistência da calda requer propriedades oportunas. O método de selagem precisa e quantifica o atrito ao longo do comprimento do bolbo, existindo, segundo a *Federal Highway Administration* (FHWA) quatro tipos de categorização relativamente ao processo de execução de selagens (*Armour, Groneck, Keeley & Sharma*, 2000):

- i. Tipo A – a microestaca com ou sem armadura usufrui de uma selagem com auxílio de calda de cimento ou argamassa, sem pressão e de baixo para cima;
- ii. Tipo B – a microestacas com armadura de reforço (varão, grupo de varões, perfis metálicos ou tubos de aço) apresentam uma selagem de baixa pressão, entre 0,3 MPa a 1 MPa, e de baixo para cima por intervenção de calda de cimento.
- iii. Tipo C – célebre por IGU (Injeção Global Unitária) divide a selagem em duas fases. Inicialmente, a calda de cimento é selada sem pressão como nas microestacas tipo A. Depois, procede-se à injeção de calda de cimento com pressões até 1 MPa. Os tubos manchete são empregues no bolbo de selagem, com válvulas espaçadas.
- iv. Tipo D – qualificado por IRS (Injeção Repetitiva e Seletiva) também advém de duas fases. A princípio a calda de cimento é selada sem pressão equivalente às microestacas tipo A. Após a calda ter adquirido presa realiza-se a injeção com auxílio de obturadores duplos que são empregues em todas as válvulas – manchetes com pressões entre os 2

e 8 MPa, selecionando a válvula onde a injeção será efetuada. Estas operações, repetidas, 2 a 3 vezes, até se conquistar a mobilização da tensão de atrito reivindicada na interface do bolbo.

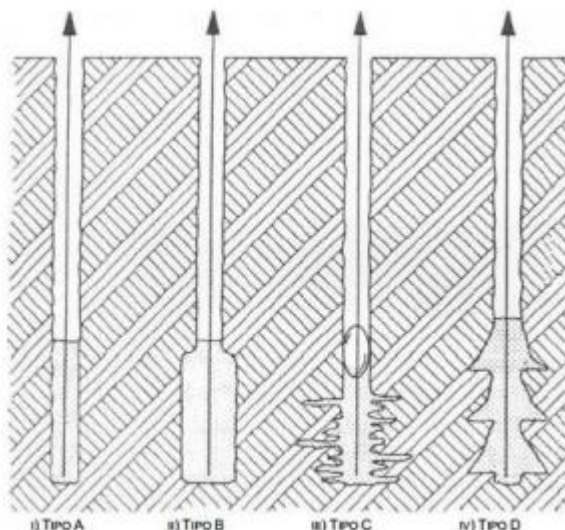


Figura 8.10 – Dissemelhantes tipos de microestacas. (Adaptado: Shong & Chung, 2003)

Os benefícios relativos a este tipo de solução abrangem:

- i. Versatilidade e oportunidade de execução, em planta e em altura, face a espaços limitados;
- ii. Capacidade de carga elevada em relação ao pequeno diâmetro e a possibilidade de atuar tanto à tração como à compressão. A efetivação de microestacas inclinadas viabiliza a resistência a solicitações horizontais.
- iii. Perturbação mínima do terreno e utilização de pequenos equipamentos de furação compatível, sob o ponto de vista de equipamentos e mão-de-obra, a uma solução económica.

No que diz respeito aos inconvenientes:

- i. Problema de encurvadura em relação a elementos esbeltos;
- ii. Reduzida capacidade para disseminar cargas por ponta;
- iii. Impulsionam a resistência por atrito lateral, principalmente, em solos com $N_{SPT} > 40$ pancadas.

8.3.4 COLUNAS DE JET GROUTING

O Jet Grouting é um método de tratamento versátil que, por intermédio da adição de um ligante, atua num domínio alargado de solos (Figura 8.11). A elevada energia cinética transmitida ao solo através de um mecanismo de mistura permite o corte e desagregação da estrutura do solo natural e, posteriormente, a adição de uma calda ao solo indicado facilita a obtenção de corpos sólidos e pouco

permeáveis com um incremento das características mecânicas, por outras palavras, o incremento da resistência e a diminuição da deformabilidade (Falcão, Pinto, & Pinto, 2000).

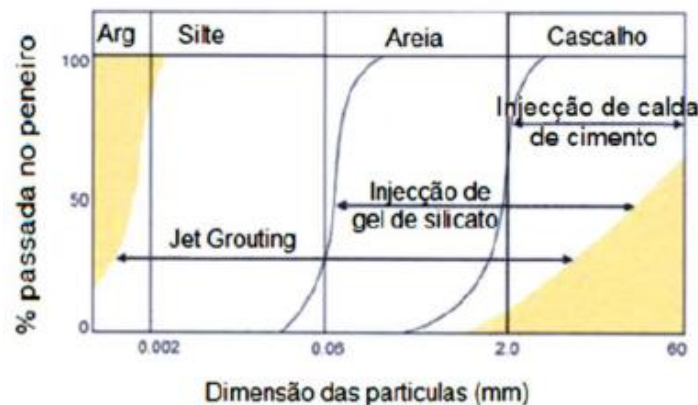


Figura 8.11 – Aplicabilidade do Jet Grouting alternativamente a outros tipos de injeção. (Loureiro, 2008)

P. Coelho (2010) afirma que a evolução da tecnologia ao longo dos anos permitiu a conceção de três tipos de *Jet Grouting* (Figura 8.12):

- JET 1 ou jato simples – a injeção da calda impulsiona o corte e erosão entre as partículas e a sua aglutinação.
- JET 2 ou jato duplo – constituído por um jato de calda responsável pela ação desagregadora e de mistura e, um outro jato, de ar comprimido que assegura o aumento do alcance do jato.
- JET 3 ou jato triplo – composto por um jato de ar comprimido e água para a desagregação do solo. A calda injetada por meio de um bico, diferente e separado, propicia a aquisição de corpos de maiores dimensões, porém com menor resistência para iguais dosagens de cimento.

De realçar a existência de um quarto sistema, *super jet*, empregue exclusivamente em casos particulares.

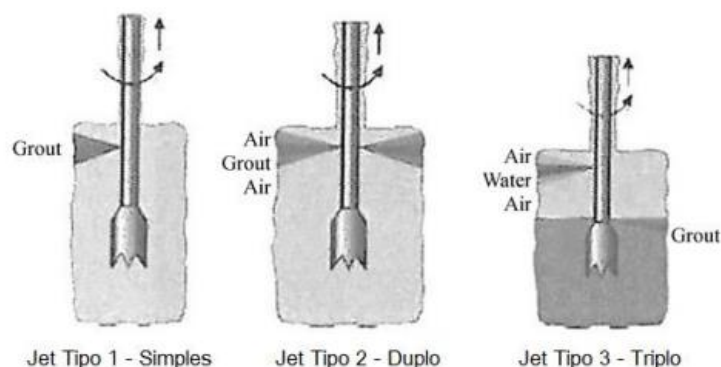


Figura 8.12 – Tecnologias díspares de *Jet Grouting*. (Adaptado: Ehsanzadeh & Ahangari, 2014)

Com um campo de aplicação bastante vasto em obras de cariz geotécnico distinguem-se as seguintes vantagens:

- i. Evita-se a descompressão do solo uma vez que não é imperativo a escavação para efetivar o tratamento;
- ii. Execução de qualquer tipo de seção, forma e inclinação com garantia de reduzida vibração e ruído.
- iii. Eventual consumação em áreas confinadas e, também, inserção de elementos metálicos no seu interior.

Contudo esta tecnologia também apresenta algumas limitações (Sousa, 2008):

- i. Dificuldade em assegurar a verticalidade para colunas excessivamente compridas;
- ii. Solos de granulometria elevada com ausência de finos, solos muito heterogêneos com grandes descontinuidades e vazios sujeitos a percolação, solos orgânicos de alta acidez ($\text{pH} < 5$) e solos argilosos muito compactos ou rochas integram circunstâncias de aplicabilidade pouco eficaz.
- iii. À exceção da aplicação de uma armadura, a tecnologia em apreciação exhibe um baixo desempenho à flexão e à tração.

8.4 PROTEÇÃO SUPERFICIAL

A erosão superficial, uma das notáveis adversidades associadas a taludes, usufrui como medida de mitigação a proteção superficial. A proteção superficial, usualmente associada a outros tipos de solução de estabilização, pretende resguardar as vias de circulação de obstrução com material que impeça a circulação, tal como reforçar a resistência da face frontal dos taludes a roturas superficiais.

8.4.1 RECOBRIMENTO VEGETAL

Como já referido anteriormente, é inegável que o revestimento vegetal de taludes acautela o fenómeno de erosão superficial, minimiza a infiltração de água para o maciço por intermédio da superfície exposta e acentua a resistência superficial dos solos por mérito das raízes.



Figura 8.13 – Exemplificação de um recobrimento vegetal por intermédio de geomateriais. (A. Pinto, 2012)

O recobrimento vegetal deve usar espécies locais, adicionando uma qualidade estética, fomentando igualmente a integração no meio envolvente. Inúmeras soluções sobrevivem agregadas a materiais geossintéticos, como colchões de geomalha, com um revestimento final em hidrossementeira (Figura 8.13).

8.4.2 BETÃO PROJETADO

Solução amplamente aplicada na estabilização passiva de taludes, em maciços rochosos com risco de erosão superficial, a aplicação de betão projetado armado, com espessura entre 5 e 8 cm, agregado a pregagens no maciço, é realizado recorrendo a rede electrossoldada. No cenário de a face do talude ser irregular, de modo a se garantir uma melhor adaptação ao terreno, recorre-se a fibras metálicas.

O fato de esta solução transformar o talude em impermeável obriga à conceção de sistemas de drenagem que consintam a percolação controlada de água, dificultando os impulsos hidrostáticos indesejados e a rápida degradação do betão.

A projeção do betão realiza-se mediante dois métodos díspares, via seca ou via húmida, que divergem meramente no estágio em que é acrescentada água à mistura cimento/agregados. A seleção do método a executar numa determinada obra advém da avaliação das vantagens e desvantagens intrínsecas a cada um destes procedimentos, optando-se por aquele cujas particularidades se ajustem melhor às imposições da obra (M. Santos, 2011).

O ricochete de agregados grossos ou a formação de bolsas de ricochete constituem episódios que resultam da projeção de betão induzindo a alteração da granulometria do betão e, decorrente, diminuição da resistência, aumento da retração e formação de zonas de betão não compactado e hidratação insuficiente (M. Santos, 2011).

A resolução destas dificuldades de execução passa por assegurar que o operador usufrui de uma elevada capacidade técnica e que fatores, tais como, a velocidade de projeção, o caudal, o ângulo, a

distância de impacto e a espessura a aplicar sejam monitorados (Ryan, 1973). De modo a garantir a integração paisagística, adicionam-se pigmentos que modificam a sua cor final.

8.4.3 REDES METÁLICAS

Em taludes rochosos fraturados, onde o risco de desprendimento de blocos é elevado, recomenda-se a aplicação de redes metálicas elaboradas por arame de aço de alta resistência de dupla ou tripla torção, associadas frequentemente a pregagens e cabos de aço.

A suspensão de uma rede no talude com pregagens, seladas no topo, na parte posterior da crista do talude, incorpora a solução mais acessível uma vez que a rede irá operar como um elemento de dissipação da energia cinética cometida pelo desprendimento de blocos, que se norteiam para o pé do talude onde se depositam em segurança (Figura 8.14).



Figura 8.14 – Exemplo de uma aplicação de redes metálicas num talude rochoso. (A. Pinto, 2012)

As redes metálicas compreendem revestimentos flexíveis dado que recebem e aplicam impulsos ao terreno de forma contínua, porém o seu comportamento obedece ao espaçamento entre pregagens. Por outro lado, estas são caracterizadas por constituírem estruturas de suporte ligeiras e flexíveis, que se adaptam a superfícies irregulares, confinam, impossibilitam a gradual desagregação superficial do maciço e ostentam uma preocupação de ordem estética e paisagística (Cardoso & Quintanilha, 2009).

9 ESTUDO DE CASO

9.1 VALONGO

Em Portugal, independentemente da abundância de afloramentos de xistos ardosíferos, verificou-se que é na região de Valongo que a sua exploração perfez o valor industrial.

O início do século testemunhou a acentuada procura de ardósia aliada às duas dezenas de quilómetros de Valongo aos portos, Douro e Leixões, em consequência do fato de os navios provenientes de Inglaterra, repletos de carvão, realizarem o seu retorno com o transporte das placas de ardósia como lastros. Posteriormente, a ardósia, era empregue na construção civil tanto em Londres como em Liverpool.

Contudo, unicamente a progressiva solicitação de lousas escolares pelos mercados da Indonésia e da América acarretou o surgimento de pequenas empresas, quase de carácter artesanal, muitas das quais simplesmente se dedicavam ao encaixalhamento das referidas lousas escolares. Perante estes dados, é normal depreender que os produtos desta indústria têm, atualmente, colocação em vários continentes.

As formações xistentas do Ordovício médio, precisamente, os xistos com *Uralichas ribeiroi*, que configuram a parte superior do Landeiliano contam com a presença das várias pedreiras de ardósia da região de Valongo. As pedreiras sob o ponto de vista estrutural compõem a faixa ardosífera do flanco oriental do anticlinal de Valongo. O referido anticlinal detém um plano axial fortemente inclinado (60 a 80°) para ESE e um mergulho axial fraco (10 a 20°) para NN, para além de ser acompanhado de uma clivagem xistenta de plano axial.

Por sua vez, os níveis explorados estão intercalados numa série monótona de xistos cinzento-azulados muito homogéneos e sua estratificação é exclusivamente evidenciada por raras intercalações centimétricas de siltitos, intituladas “bravezas”. A já mencionada clivagem xistenta, distintamente perceptível, reflete o plano de achatamento dos fósseis, nódulos e outros objetos pré-orogénicos.

A meteorização da rocha a nível superficial exterioriza-se, excecionalmente, fraturada à custa da conjuntura de diáclases irregulares de descarga controladas pela topografia. Em alternativa, as diáclases instaladas abaixo de 10 a 20 metros, para além de se organizarem melhor, diferenciam-se nos seguintes tipos:

- i. Diáclases de tração, sensivelmente normais aos eixos das dobras, manifestam preenchimento de calcite e quartzo, com uma espessura média de 1 mm e um aumento do espaçamento com a profundidade.
- ii. Diáclases de cisalhamento articuladas cuja confluência está integrada na clivagem xistenta e é normal ao eixo das dobras. Importa evidenciar que estas manifestam maior dispersão na orientação e espaçamento comparativamente às diáclases de tração.

Uma vez que as diáclases de tração limitam a largura dos blocos de ardósia, é dependente destas que a exploração se efetiva. Verifica-se, por vezes, que em algumas faixas se dá um rejogo por deslizamento paralelamente ao plano de clivagem xistenta, estimulando uma fracturação muito apertada o que, naturalmente, impede o aproveitamento da ardósia.

9.1.1 EXTRAÇÃO

A extração de ardósia em Valongo normalmente executa-se sob câmaras com desmonte descendente em degraus direitos, por outras palavras, do teto para o muro da camada numa direção normal ao plano desta (Figura 9.1).

O processo de extração começa pela construção de um poço vertical, de aproximadamente 20 m² de seção retangular, que atravessa a zona superficialmente alterada até atingir a zona útil posicionada entre os 20 e 30 metros de profundidade. No momento em que se alcança a ardósia de interesse industrial, começa o alargamento do poço, que, ostentando um aspeto de tronco de pirâmide de base retangular, vai simultaneamente progredir em profundidade expandindo a projeção horizontal dessa base.

Não obstante às dezenas de metros de distância mensurada na horizontal entre o teto e muro da exploração, somente são permitidos, no máximo, 15 metros de dimensão da câmara segundo a direção das camadas.

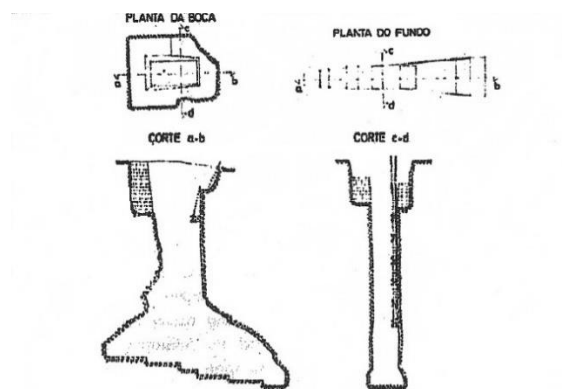


Figura 9.1 – Esquematização de plantas e cortes de uma louseira de Valongo. (Galopim & Martins, 1971)

De qualquer modo, estas dimensões também se submetem não só às condições de segurança, mas também aos condicionalismos de carácter económico ao se deparar, na progressão do desmonte, com áreas alteradas ou com características mecânicas impróprias à sua subsequente maquinação. Estas

áreas evidenciam uma possança tal que não fundamentam o seu desmonte, para alcançar novamente, na mesma câmara, zonas úteis.

A realização de roços horizontais e verticais, por intermédio de martelos pneumáticos picadores, implementa no espelho do degrau mais três faces livres do bloco a destacar e, seguidamente, separam-se os blocos pela menor resistência dos planos de clivagem com recurso a cunhas.

As variáveis que condicionam o dimensionamento dos blocos a destacar, de cerca de 3 a 4 toneladas, abrange as diáclases existentes, a capacidade dos “*derricks*” de extração e o equipamento de transporte exterior e de transformação.

9.1.2 TRANSFORMAÇÃO

O princípio tecnológico adotado alicerça-se sob a xistosidade, de outro modo, as peças são talhadas com o desígnio de alcançar a sua menor dimensão em concordância com a normal aos planos de xistosidade.

As oficinas da indústria ardosífera, à semelhança da indústria dos mármore são equipadas com máquinas de corte por meio de disco diamantado, fresadoras e polidoras, sendo poucas aquelas que se reservam ao fabrico de pedra para bilhares, com o quesito de precisão elevada.

De modo a racionalizar os processos, introduziram-se máquinas de serrar de movimento alternativo, por intermédio de lamas abrasivas. No que se refere à produção de placas polidas, aplaina-se as superfícies por intermédio de máquinas próprias.

9.1.3 EXPLORAÇÃO

Independentemente do pressuposto da existência de outros níveis produtivos, as explorações ardosíferas desenrolam-se perante um nível xistento sensivelmente constante, nível esse com profundidades superiores a 20-25 metros.

Ainda que em profundidades superiores às mencionadas a rocha seja sã e economicamente aproveitável, são abundantes e altamente desfavoráveis as diáclases transversais, juntas, normais ao eixo do anticlinal de Valongo e igualmente, mas menos frequentes, as fraturas subverticias cruzadas, “refustes” e “contra-refuste”, cujo diedro principal usufrui em retilíneo de uma direção subvertical paralela ao eixo do anticlinal.

O método de exploração elegido, o método por câmaras e pilares descendente implica que o desmonte se realize por degraus direitos e executa-se, sempre que as condições o impõem, o atirantamento do teto, *roof-bolting*. A clivagem xistenta e a estratificação não admitem a abertura de galerias consoante a direção das bancadas; porém, abrem-se poços perpendiculares à estratificação com a máxima dimensão praticável, consumando profundidades entre 20 e 80 metros.

O avanço das frentes efetua-se perpendicularmente à direção das bancadas, o qual, sempre que sucede para leste, pelo muro, denomina-se em linguagem corrente por “avessas”, e sempre que avança para oeste, pelo teto, denomina-se por “direitas”.

Por sua vez, o arranque, por intermédio de martelos picões propicia a execução do “corte” por golpes verticais e laterais do boco a arrancar e, posteriormente, a realização do “roço” através do golpe inferior do bloco. Em sequência, a “canhola”, ou seja, o bloco destacado do banco, subdivide-se em conformidade com os planos normais à xistosidade e, também, mediante a xistosidade. Finalmente, a extração à custa de um pequeno “derricks”, com capacidade de 3 a 4 toneladas, é consumada.

9.2 MILHÁRIA

9.2.1 EXPLORAÇÃO SUBTERRÂNEA (1984)

A história da Milhária, além de única, reflete uma evolução em relação à exploração da lousa portuguesa. Primitivamente o método de exploração praticado concretiza-se por câmaras, que podem contemplar grandes dimensões, separadas umas das outras por pilares abandonados.

Cada uma das câmaras dispõe de um poço de acesso de dimensões de 5 x 5 metros que comunica com o exterior e, para além disso, constitui um intermédio de extração do material a explorar. O poço de acesso, por outras palavras, abertura de paredes verticais até se atingir a lousa de boa qualidade, inaugura o “enfornamento”, particularizado por um alargamento do poço no sentido perpendicular à xistosidade quer para as “direitas”, que para as “avessas”.

O sentido geral do desmonte, descendente, por intermédio de degraus direitos perpendiculares à direcção da xistosidade e, por razões de segurança, é executado das “avessas” para as “direitas”, preservando-se a frente do degrau com inclinação oposta à frente de trabalho.

A operação “rachar a canhola” equivale à separação de cada placa de lousa do respetivo degrau valendo-se da superfície de menor resistência, o plano de xistosidade, depois de concluído um corte inferior denominado “roço” e dois cortes verticais, da altura do degrau, nomeados de “cortes”. A operação que se segue, “dividir” ou “escamar”, abarca a colocação vertical da canhola assegurando a divisão em placas de inúmeras dimensões conforme os pedidos realizados do exterior.

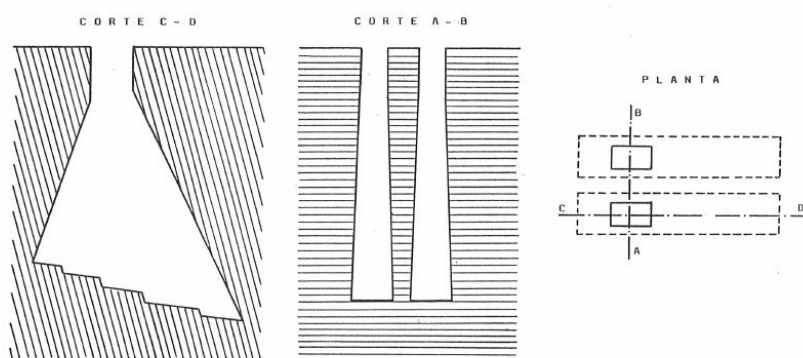


Figura 9.2 – Câmaras de exploração de Louseiras.

Nos primórdios da exploração subterrânea de lousas a realização de cortes e do “roço” ocorria com o auxílio de picos e serras manuais; mais tarde, devido ao surgimento de martelos picadores acionados a ar comprimido, leves e pequenos, que admitem tanto a aplicação de água para a eliminação de poeiras como picos de cortes com punho de seção hexagonal, cumpre-se um aumento de produção.

As adversidades alusivas à eliminação de poeiras, presentes até aos dias de hoje, associadas ao aparecimento de máquinas de cortes “roçadoras”, enfatizando a utilização de água por parte destas, predispõe a diminuição significativa dos índices de empoeiramento e, simultaneamente, o aumento de produção de ardósia (Figura 9.3).



Figura 9.3 – Poeiras resultantes do processo de desmonte.

No se refere à mão de obra humana, morosa e cansativa, essencialmente na abertura de um “banco”, as “roçadoras” vieram dar um grande contributo não só simplificando o ofício como aumentando a velocidade de avanço. As “roçadoras” são utilizadas para a abertura de uma cavidade de secção triangular, “banco”, e, a consequente iniciação de uma nova série de degraus com configurações mais planas propicia a circulação de pequenas máquinas carregadoras e transportadoras e, também, a diminuição da produção de estéril, entulho, procedente da abertura de “roços” e cortes com martelos picadores.

A observação das frentes e dos tetos constitui a premissa para a aplicação deste sistema de lavra de modo a serem tomadas as medidas necessárias para garantir a máxima estabilidade dos trabalhos.

O grau de humidade dos locais de trabalho, o elevado empoeiramento e a dificuldade de, consoante a evolução da profundidade, poderem ser identificadas anomalias quer das frentes quer do teto, que se deforma e fratura, tornando a exploração relativamente perigosa, especialmente em terrenos menos sólidos, integram os inconvenientes deste tipo de lavra.

9.2.1.1 CIRCULAÇÃO DE PESSOAL

O acesso de pessoal ao fundo das câmaras é efetivado por intermédio de escadas metálicas com aros metálicos, nos hasteais do poço, que assentam em patamares os quais, por sua vez, são posicionados de modo que a distância entre dois consecutivos, medida na vertical, não seja superior a cinco metros.

9.2.1.2 TRANSPORTE DE LOUSA

Depois de destacados dos degraus de desmonte, os blocos de lousa, são derrubados sob pneus de modo a envolvê-los através de um cadeado ou um cabo de aço, conforme, critérios de segurança, a fim de realizar a sua extração. Ato contínuo ao seu envolvimento o bloco é conduzido até ao prumo do poço e guindado até ao exterior.

9.2.1.3 TRANSPORTE DE ESTÉRIL

Um dos impasses deste método de exploração reside na produção uma elevada quantidade de estéril, pequenos blocos de lousa inaproveitáveis, na abertura de bancos, mediante a execução de cortes e roços. Similarmente, as zonas de braveza, induzem a quebra de lousa em fragmentos de apreciáveis dimensões, em que tanto estes fragmentos como os primeiros integram as entulheiras.

O estéril produzido dispõe de caixões de madeira ou chapa de ferro de planta retangular, aberto num dos lados, ou dispondo de uma porta de descarga, em momento algum totalmente cheios, com o objetivo de o transportar.

Os caixões, colocados no prumo do poço e elevados até à sua superfície, são engatados no gancho de extração. A máquina de extração é constituída por um guincho instalado no exterior e uma lança triangular com um eixo de rotação, de modo que seja possível retirar os caixões ou pedras, da vertical do poço, aquando da sua chegada à superfície.

9.2.1.4 REVESTIMENTO

A presença de dois refustes concorrentes, refuste e contra-refuste, que desencadeiam o destacamento fácil de uma cunha de terreno, ou um qualquer acidente geológico cuja posição e configuração ofereça perigo, fundamentam circunstâncias em que se torna basilar o revestimento.

O revestimento consiste na aplicação de carris de ferro fixados ao terreno através de tirantes de expansão ou chumbados aos hasteais; por vezes, também, abandonam-se maciços, intitulados pontes, ou até mesmo, as bravezas, que funcionam como escoras.

9.2.1.5 ESGOTO

O rebaixamento do nível freático e, consequente, afluência de águas para o fundo das câmaras é uma repercussão da abertura destas. Assim, a presença de bombas potentes por andares, face à grande profundidade dos trabalhos, advém da imposição de se lançar essas águas diretamente para o exterior, para que não se interrompa a produção.

9.2.1.6 VENTILAÇÃO

Numa fase inicial de abertura do poço, a pouca profundidade do mesmo, permite a ventilação natural, mas com o aumento da profundidade é imprescindível recorrer a outros tipos de ventilação. Os empoeiramentos provenientes da perfuração com martelos picadores, extremamente prejudiciais à

saúde dos trabalhadores, incentiva a aplicação de água nos martelos, ou uso de roçadoras, e, principalmente, o desenvolvimento de um bom sistema de ventilação.

Em profundidade a ventilação é insuflante, apesar de não ser o mais aconselhável, graças à geometria afunilada dos poços, à dificuldade de elevação das partículas de pó de lousa e à extrema humidade do ambiente.

9.2.2 EXPLORAÇÃO SUBTERRÂNEA (2000)

9.2.2.1 ESTIMATIVA DAS RESERVAS

A Pedreira da Milhária é caracterizada por uma altura de 60 metros de ardósia a explorar, em que os entulhos de superfície e ardósia não aproveitável constituem 15 metros e o ângulo de talude (teto e muro) é de 70°. Portanto, para uma estimativa das reservas existentes é necessário ter em consideração os parâmetros anteriormente mencionados, depreendendo-se que:

- i. Volume “in situ” da exploração (V_i) = 408 250,1 m³;
- ii. Volume considerando o ângulo de talude (V_t) = 290 867,8 m³;
- iii. Volume médio de entulhos de superfície e ardósia não aproveitável (V_e) = 94 932,0 m³.

Por sua vez, a diferença entre o V_t e o V_e , comporta o volume efetivo de 195 935,1 m³ de ardósia a explorar. Todavia, o fato de não existirem dados suficientes que permitam um melhor conhecimento do alcance real das antigas explorações subterrâneas, estima-se o valor de 50%, com alguma margem de erro, em que o valor efetivo converte para 97 967,6 m³. Finalmente, como o aproveitamento comercial da pedreira é de 30% do volume extraído, então o volume comercial é 29 390,1 m³.

9.2.2.2 PLANO DE EXPLORAÇÃO

A Milhária, com um tempo de vida (T_v) de 16,5 anos, é explorado subterraneamente através de câmaras individuais, separadas por pilares abandonados, em que cada uma das câmaras, de largura máxima 15 metros, equipara-se a uma garrafa em que o “gargalo” é um paralelepípedo retangular de base 10 x 5 metros e altura variável entre 10 e 30 m. O seu “corpo” é um tronco de pirâmide de base 15 x 60 – 100m e altura 50 – 90 m. As câmaras separam-se por pilares abandonados de 15 m de largura à superfície e mínimo de 5 m na base.

9.2.2.2.1 INCOVENIENTES DO MÉTODO

Tanto a segurança como o aproveitamento do jazigo incorporam as objeções intrínsecas à lavra subterrânea de ardósia.

No que concerne à primeira objeção, a circunstância de trabalhar sob o mesmo teto durante extensos períodos de tempo e, ainda, aliada ao fato de tal teto se deformar com o tempo e poder fraturar-se, não facilita, passado esse tempo, a sua vigilância nem a execução de eventuais medidas de segurança. Acresce, além do mais, o risco subsequente da elevação dos blocos, o qual durante o percurso destes para o exterior impõe a criação de abrigos no fundo para o pessoal ou que este se afaste para um dos extremos da câmara, não descurando o prejuízo resultante da paragem dos operários.

Ainda em virtude de se trabalhar sob o mesmo teto, impõe-se a obrigatoriedade do levantamento, razoavelmente preciso, da fracturação do maciço, nomeadamente, a natureza, a inclinação, a direcção e a frequência das fraturas, admitindo o planeamento e aplicação oportuna de elementos do domínio dos terrenos adequados: maciços abandonados (laterais, de topo ou intermédios, contínuos ou descontínuos – “pontes”); ancoragens (simples ou interligadas por perfis de aço); maciços artificiais de betão armado; eventualmente, outros.

A segunda objecção, o mau aproveitamento do jazigo, exprime dois cenários:

- i. Abandono dos pilares intermédios das câmaras, o que equivale, em média a 50 % do volume;
- ii. Abandono das zonas de teto e muro das câmaras pois, por razões de segurança, a coroa de trabalhos baixa progressivamente. Excetuam-se os “desmontes a pique”, por outras palavras, com coroa horizontal, que só se concretizam em maciços de comportamento geomecânico exceccionalmente bom. Estes abandonos representam valores entre 10% a 20% de perdas, de acordo com a forma das câmaras e as suas dimensões em extensão e profundidade.

9.2.3 CAMPO DE EXPLORAÇÃO DA MILHÁRIA

O campo de exploração da Milhária é composto por três camadas, de direcção NNO-SEE, especificamente, a camada nordeste, central e sudoeste, todas de distinta qualidade, contudo economicamente aproveitáveis. Entre estas camadas percebe-se a presença de acidentes geológicos responsáveis pela sua divisão:

- i. Camada Nordeste e Central – fita de camas e podriqueira, com restos de fósseis, de espessura mínima entre 24-30 metros, e com uma inclinação de 52° para Nordeste (F1).
- ii. Camada Central e Sudoeste – “braveza”, de espessura aproximada entre 5-6 metros, com inclinação média de 60° para Nordeste (V1).



Figura 9.4 – Bravezas existentes numa das áreas da Pedreira da Milhária.

9.2.3.1 CAMADA NORDESTE

Um refuste, de possança mínima igual a 5 metros, com um ângulo de 28° relativamente à direção média das camadas integra a camada Nordeste, tornando inaproveitável a área posicionada entre ele e a fita de camas F1.

O aproveitamento da camada Nordeste é limitado, portanto, pelos subseqüentes acidentes:

- i. Direitas – zona de camas e podriqueiras (F1), aproximadamente paralela à direção média das camadas;
- ii. Aversas – refuste supracitado e limite legal de 10 metros de proteção ao caminho de ferro.

No que se refere à sua extensão a camada é restringida a:

- i. Norte – caminho de ferro;
- ii. Sul – demarcações de propriedade e, novamente, o refuste mencionado.

9.2.3.2 CAMADA CENTRAL

O aproveitamento desta camada centralizado, essencialmente, após a guerra deixou virgem a área a Nordeste, porém a Sul a camada foi totalmente explorada até ao limite da área dos terrenos. Exatamente a Nordeste, atualmente, é onde se pretende abrir novos poços situados nas aversas e paralelamente aos poços antigos. Para tal acontecer, é imprescindível a remoção de um certo volume de terras, contudo, contrabalançado, pelo cenário de abrir 4-5 novos poços semelhantes.

9.2.3.3 CAMADA SUDOESTE

A camada Sudoeste, a mais intensamente explorada, é atravessada por um refuste que afeta a parte norte deste campo, tanto as direitas como as aversas dos poços, limitando o aproveitamento desta fita para Norte. Devido ao elevado número de poços o eventual aproveitamento das pequenas áreas que restaram irão respeitar:

- i. Direitas de um poço e, através dele, continuação do “túnel” entre outros dois poços;
- ii. Abertura de um poço para o aproveitamento da camada Central pelas direitas.

9.2.4 LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO

O fato de não existirem atualizações recentes do levantamento topográfico desencadeou a utilização de um levantamento topográfico do ano 2016, embora este não expresse, integralmente, a realidade atual da Pedreira da Milhária (Figura 9.3).



Figura 9.5 – Levantamento topográfico da Pedreira da Milhária. (ELV, 2016)

A caracterização dos parâmetros geotécnicos do maciço baseia-se na determinação da resistência à compressão, através do Martelo de *Schmidt*, do ângulo de atrito interno, por intermédio do “*Tilt test*”, e sobre amostras extraídas da pedreira, ensaios de compressão uniaxial simples.

9.2.4.1.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO – MARTELO DE SCHIMDT

O Martelo de *Schmidt*, método complementar, útil para avaliações expeditas da resistência à compressão em trabalho de campo, não permuta os demais métodos de investigação geotécnicos.

Os inúmeros ensaios executados pela utilização do Martelo de *Schmidt*, diretamente no maciço ardósifero, realizaram-se em distintos locais da pedreira de acordo com as frentes libertas, acessíveis e limpas, e, inclusive, sem preocupação quanto ao ângulo de aplicação. À exceção da litologia do maciço, é primordial registrar o seu grau de alteração por classificação visual.

O principal fator de variabilidade dos ensaios é o estado da superfície, dado que superfícies irregulares ou ásperas proporcionam resultados dispersos e, como resultado, tais ensaios não podem ser aproveitados; por essa razão, é tão importante que as superfícies se encontrem preparadas e polidas. Na Pedreira da Milhária, a conjuntura do método de desmonte adotado, fio diamantado, e as propriedades da rocha que ao clivar permitem obter superfícies muito limpas propiciaram a renúncia de uma de preparação especial de superfícies.

Tabela 9.1 – Resultados adquiridos na execução do ensaio de resistência à compressão por intermédio do Martelo de *Schmidt*. (Dias, 2018)

teste nº	RM	σ Mpa	teste nº	RM	σ Mpa	teste nº	RM	σ Mpa	teste nº	RM	σ Mpa
1	50,4	149,35	19	52,1	162,24	38	41,6	97,29	56	48,8	138,15
2	33,0	64,00	20	49,4	142,25	39	43,5	106,72	57	44,7	113,15
3	36,4	75,53	21	48,1	133,52	40	46,1	121,13	58	50,8	152,28
4	52,1	162,24	22	50,5	150,08	41	51,2	155,28	59	57,0	205,96
5	48,1	133,52	23	52,4	164,62	42	44,1	109,89	60	40,5	92,22
6	41,8	98,24	24	54,9	185,94	43	41,4	96,35	61	56,3	199,06
7	47,7	130,94	25	44,4	111,50	44	46,1	121,13	62	43,1	104,66
8	38,7	84,48	26	49,2	140,87	45	50,2	147,90	63	54,2	179,71
9	44,8	113,70	27	39,7	88,69	46	50,8	152,28	64	45,3	116,50
10	41,4	96,35	28	37,0	77,76	47	49,3	141,56	65	48,6	136,81
11	43,5	106,72	29	41,8	98,24	48	46,6	124,11	66	51,3	156,04
12	45,4	117,07	30	43,0	104,16	49	44,4	111,50	67	45,6	118,22
13	47,2	127,79	31	44,8	113,70	50	50,1	147,18	68	42,5	101,65
14	43,5	106,72	32	49,1	140,18	51	49,1	140,18	69	51,6	158,33
15	54,9	185,94	33	51,5	157,56	52	48,9	138,83	70	48,0	132,87
16	50,5	150,08	34	52,6	166,24	53	52,1	162,24	71	51,4	156,80
17	52,4	164,62	35	46,3	122,31	54	48,2	134,17	72	43,3	105,69
18	50,2	147,90	36	47,5	129,68	55	49,7	144,34	73	38,1	82,04
			37	53,4	172,84				74	37,6	80,07

Examina-se por interpretação dos resultados que as variações derivam de (Tabela 9.1):

- Orientação da xistosidade, valores elevados advêm de ensaios efetuados perpendicularmente à xistosidade, por outras palavras, esses valores são a consequência da maior resistência da rocha nesse alinhamento por efeito das suas propriedades anisotrópicas;
- Zonas ligeiramente alteradas ou com descontinuidades que sucedem de ensaios com valores de resistência inferiores.

A dureza superficial da rocha e, posterior, correlação com as demais propriedades da rocha, tais como, resistência e/ou módulo de elasticidade, é definida pelo índice esclerométrico. Tal índice integra um parâmetro muito sensível ao grau de alteração da rocha, depreendendo-se que para valores superiores a 100 a ardósia é sã, porém, para valores inferiores a 30 os xistos são extremamente alterados.

9.2.4.1.2 TILT-TEST

Hu e *Cruden* (1992) defendem que as combinações de descontinuidades com a superfície aberta irão, eventualmente, originar blocos instáveis, por isso, é crucial na avaliação da estabilidade de taludes a determinação do ângulo de atrito intrínseco ao maciço.

O ensaio *Tilt-Test*, apesar de teoricamente não muito preciso, é um teste de fácil preparação de amostras e rápida execução indicado à verificação do ângulo de atrito interno. Numa etapa posterior, por intermédio do ângulo de atrito interno e os resultados obtidos no ensaio Martelo de *Schmidt*, é plausível aferir o ângulo de atrito de base ϕ_b e o coeficiente de rugosidade, *JRC* (*Barton*, 1980).

Tabela 9.2 – Resultados adquiridos na execução do ensaio Tilt-Test. (Dias, 2018)

ensaio 1						
medidas da pedra superior (CxLxA) m			peso C*L*A*2850	deslocamento		ângulo
				inicial	nv	nv
2,708	1,095	0,034	287,33	final	> 30 mm	27º
ensaio 2						
medidas da pedra superior (CxLxA) m			peso C*L*A*2850	deslocamento		ângulo
				inicial	nv	nv
2,708	1,095	0,034	287,33	final	> 30 mm	27º
ensaio 3						
medidas da pedra superior (CxLxA) m			peso C*L*A*2850	deslocamento		ângulo
				inicial	nv	nv
2,2	1,1	0,025	172,43	final	> 30 mm	28º
ensaio 4						
medidas da pedra superior (CxLxA) m			peso C*L*A*2850	deslocamento		ângulo
				inicial	6 mm	21º
2,2	1,1	0,025	172,43	final	> 30 mm	28º

Obs: Os ensaios 1 e 2 foram realizados com pedras "aplainadas". Os 3 e 4 com "clivadas".
O movimento "inicial", no ensaio 4, poderá dever-se a um ajuste devido ao clivado da pedra.
nv - não verificado

A utilização de placas com acabamento "liso" e perfeitamente planas determinam as condições limite inferiores por não refletirem as condições reais da pedreira em que as descontinuidades apresentam rugosidades, deflexões e ondulações diversas. Deste modo, os resultados alcançados (Tabela 9.2) patenteiam uma aproximação àquilo que se considera as piores condições possíveis, embora não atingíveis, no maciço rochoso da Pedreira da Milhária.

Os valores que rondam 27º a 28º para o ângulo de atrito interno, na verdade, estão num limiar inferior ao real, que, pela verificação de dados complementares deverá rondar um valor deveras superior, próximo dos 45º (Dias, 2018).

9.2.5 DESCRIÇÃO DA PEDREIRA DA MILHÁRIA

O propósito de mudança de uma exploração subterrânea para céu aberto, reside, especialmente, do diagnóstico das vantagens de beneficiamento dos pilares abandonados entre câmaras exploradas, especificamente:

- Percepção quase total em termos de qualidade e atitude das camadas lousíferas;
- Amortização total dos trabalhos existentes;
- Perspetivas de usufruir, sem restrições, de equipamentos de obras públicas;
- Aumentar o rendimento e a produtividade mediante a oportunidade de desmontar e extrair blocos de maiores dimensões.

A Pedreira da Milhária, atualmente, é composta por três áreas, nomeadamente: a Área A, área de exploração de ardósia, a Área B área de domínio de terrenos, e, por último, a Área C, área de futura expansão (Figura 9.6.).



Figura 9.6 – Vista área da Pedreira da Milhária e suas respectivas áreas de desenvolvimento. (*Adaptado: Geotek, 2021*)

9.2.5.1 ZONA A

Presentemente, cumprem-se as operações unitárias e auxiliares que detalham o método de exploração de uma qualquer exploração a céu aberto, todavia adequadas ao caso específico da exploração de ardósia, a céu aberto, da Área A (Figura 9.7).



Figura 9.7 – Panorama da Área A da Pedreira da Milhária.

9.2.5.1.1 PREPARAÇÃO

A preparação do jazigo para as etapas subsequentes, nomeadamente traçagem, desmonte e remoção, inicia-se, por razões de segurança, com o enchimento prévio das câmaras que ainda não o tenham sido anteriormente, dado que é extremamente perigoso trabalhar com pessoal em cima de pilares de largura reduzida (em média, 10 metros), com vazios laterais de dezenas de metros de profundidade (Figura 9.8).



Figura 9.8 – Enchimento prévio das câmaras a ser exploradas – Área B.

Segue-se o desmonte dos entulhos de superfície, dos paredões e da zona superficial em áreas que restaram. Este último, efetuado no interior da zona fixada para o início da recuperação, eventualmente obriga ao uso de explosivos em casos pontuais. Daqui advêm entulho e estéril que se adequam ao enchimento das câmaras existentes.

Finalmente, os acessos à exploração tanto para o equipamento como para o pessoal são delineados e ajustados.

9.2.5.1.2 TRAÇAGEM

O começo da abertura de uma bancada é dado especificamente pelo desmonte de um banco de 40 – 50 cm largura num dos encostos. Por seu turno, a bancada dispõe da largura do pilar que se vai desmontar, exceto na zona do muro da massa, em que toda a zona dos tetos das câmaras não desmontados e dos pilares viabiliza frentes de desmonte de algumas dezenas de metros.

9.2.5.1.3 DESMONTE

O desmonte do maciço executa-se em conformidade com o plano de menor resistência que a clivagem dispõe. Já a sua direção pode ser definida por meio de um dos dois tipos:

- Particular – a direção definida como normal integra a direção da clivagem xistosa, impulsionando que o avanço se realize no sentido do teto para o muro (avanço para as direitas) ou do muro para o teto (avanço para as avessas).
- Geral – em que as múltiplas direções que a compreendem são:
 - do teto para o muro;

- do muro para o teto;
- para um e outro lado, alargando a escavação atendendo a direção da faixa lousífera;
- em profundidade.

O desmonte é efetivado por intermédio de degraus direitos descendentes, de altura média entre 2 – 3 m, integrando bancadas de largura variável de acordo com o andamento e posição do desmonte (Figura 9.9).



Figura 9.9 – Altura média, entre 2 e 3 metros, das bancadas.

Apesar de os cortes laterais não constituírem parte integrante na exploração dos pilares, estes são imprescindíveis quer na repartição da largura dos pilares na dimensão dos blocos pretendida quer na realização da mesma divisão na zona do teto. No entanto, a operação de roço inferior permanece imprescindível (Figura 9.10 (b)). Tanto para a realização de cortes laterais como a realização de roço inferior operam dois tipos de equipamento, o fio diamantado e a roçadoura de braço (Figura 9.10 (a)).

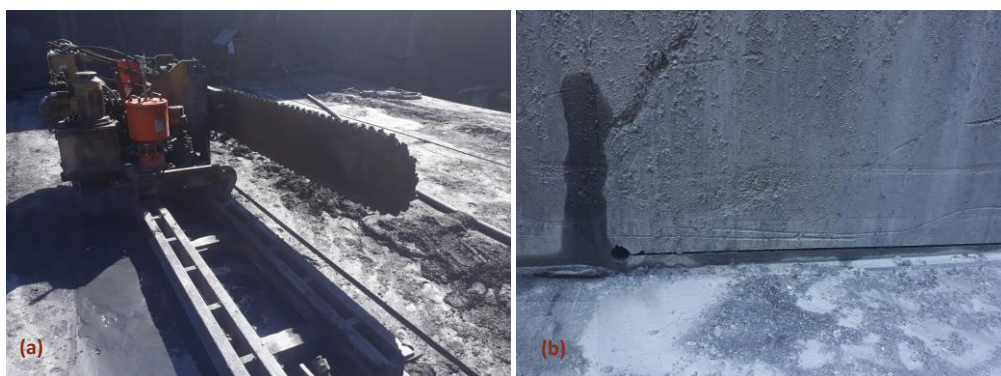


Figura 9.10 – (a) Roçadoura de braço utilizado num corte lateral; (b) Roço inferior.

Posteriormente, a rachagem do calhau, ou bloco, por outras palavras, a abertura conforme a clivagem xistosa destacando-o da bancada, é efetuado pelo recurso a palmetas percutidas com marretas ou martelos pneumáticos.



Figura 9.11 – Rachagem do bloco por intermédio de martelos pneumáticos.

A operação imediata, o escanamento, caracterizada pela divisão do calhau em blocos, não é mais necessária em consequência da execução do corte prévio dos blocos pelo fio diamantado ou roçadoura. A problemática da queda de blocos sobre a bancada inferior é solucionada mediante o seu amortecimento com pneus usados ou por pilha de entulho, protegendo-o de danos ou quebra.

9.2.5.1.4 REMOÇÃO

A operação remoção trata da remoção de blocos, aproveitáveis ou não, e de blocos de estéril. A remoção de blocos aproveitáveis para o exterior é efetuada por intermédio de uma grua tipo “derricks”, mas sempre que os blocos se situem afastados da área de alcance da grua, serão conduzidos para a zona de prumo por recurso a uma retroescavadora de esteiras.

Na situação em que tais blocos se apresentem com elevada dimensão, compensa a sua divisão, através de um serrote monolâmina (Figura 9.12), em blocos de menores dimensões para depois se suceder ao seu transporte por camião até à oficina de preparação.



Figura 9.12 – Serrote monolâmina.

Os blocos não aproveitáveis executam o seu transporte por *dumper* ou por retroescavadora de esteiras para os poços esgotados e, congruentemente, em curso de enchimento.

A remoção progressiva e oportuna, ao ritmo do desmonte, do estéril do próprio desmonte dos pilares abandonados e, também, a remoção do entulho antecipadamente lançado para o enchimento das câmaras é efetuado diretamente nos poços em enchimento, por retroescavadora de esteiras, ou conduzidos para o exterior, por *dumper*, descarregando-os nos poços em enchimento (Figura 9.13).



Figura 9.13 – *Dumper* preenchido por estéril do desmonte dos pilares de ardósia -Área B.

9.2.5.1.5 DOMÍNIO DOS TERRENOS

A pedreira da Milhária a respeito do domínio dos terrenos particulariza três padrões díspares de acordo com a área da pedreira:

- Zona do teto dos trabalhos;
- Zona do muro dos trabalhos;
- Zonas laterais da exploração, para um e outro lado, ao longo da direção da clivagem.

A zona do teto situada sob as “avessas” de antigos poços é cortada por algumas zonas de falha, “refustes”, promovendo o reforço da sua estabilidade quer por meio natural que por meio artificial. O reforço natural é alicerçado pelos pilares abandonados e pela inclinação a dar à configuração da escavação. Em alternativa, o reforço artificial é desenvolvido por intervenção de ancoragens tipo “*slip-set*”, com 12 metros de comprimento, empregues nesses pilares, sempre que as condições geomecânicas do maciço o requeiram.



Figura 9.14 – “Slip-set” empregue na pedreira.

Depois de atingida a rocha sã, a zona do muro é integrada por:

- i. Camadas louseiras que devido à sua natureza participam na operação de desmorte;
- ii. Muro do jazigo, ou falso muro, talvez já alcançado nas “direitas” de antigos poços, e que o verdadeiro muro é constituído por uma formação não lousífera, por outras palavras, constituído pela formação quartzítica da base do Ordovícico, cujo afloramento em anticlinoriúm é bem visível na montanha, fronteira à exploração, da serra de Santa Justa. Na hipótese de o muro se encontrar em falha, preenchida, com enchimento instável, será integralmente retirado, caso se apresente fraturado, será dominado por ancoragens simples do tipo “slip-set” ou ancoragens complexas constituídas por “slip-sets” ligados por perfis normalizados de aço.
- iii. Ardósia não aproveitável incita a paragem na faixa em questão, com uma inclinação da clivagem xistosa, isto é, 75-90°, influenciando, em junção com a sua fracturação, a instabilidade do talude. Se necessário são utilizadas as soluções de domínio mencionados no ponto anterior.

Por último, localizadas para NO e SE da exploração, as zonas laterais dispõem das inclinações pretendidas.

9.2.5.1.6 VENTILAÇÃO, ILUMINAÇÃO E ESGOTO

Uma vez que é uma exploração a céu aberto tanto a ventilação como a iluminação são naturais. A exceção, a iluminação aquando do trabalho em dois turnos ou prolongamento do turno normal na época de inverno, impõe o engendramento de iluminação coletiva através de grandes focos, instalados em locais próprios, fixos ou móveis. Já as máquinas de remoção detêm equipamento próprio de iluminação.

Relativamente ao esgoto, enquanto não se alcança o nível freático geral da zona, o esgoto não constitui um problema uma vez que a água é escoada para os poços, por intermédio de entulhos, dado que é um circuito fechado, posteriormente é captada a “água industrial” num desses poços. No momento que seja alcançado o nível freático, a água será bombada a ritmo inevitável, por bombas

elétricas, que a elevarão para o exterior e a lançarão nos poços reservados para volante geral da água industrial.

9.2.5.2 ZONA B

A caracterização dos taludes rochosos da Área B, direcionados aproximadamente segundo a orientação N145°E, equivale a taludes com uma altura média de 35 m com declives acentuados, com ângulos entre 55°-65° ou até mesmo superiores.

Área próxima à oficina de transformação, constituiu outrora a frente de trabalhos da Pedreira da Milhária por uma extensão de 125 metros (Figura 9.15), com uma área de exposição de sensivelmente 4 000 m², em que se garantia a drenagem através da bombagem para poços inativos, nos quais se depositavam os finos e clarificava a água com destino a um novo ciclo de utilização.



Figura 9.15 – Antiga frente de trabalhos, P1 e P2, da Pedreira da Milhária. (Adaptado: Dias, 2018)

Dividiu-se o objeto alvo de estudo, a frente do talude, em múltiplos setores ou zonas, em consequência de algumas características distintas das mesmas, totalizando o zonamento geotécnico. A divisão efetuada permitiu uma análise expedita, por outras palavras, identificou por cruzamento de toda a informação geológica e geotécnica a qualidade geotécnica e, conseqüentemente, as zonas mais críticas que exigiram intervenção.

De um modo geral o maciço rochoso, dividido em 13 zonas geotécnicas, comparativamente ao grau de classificação enquadrava-se como medianamente a pouco alterado (Figura 9.16).

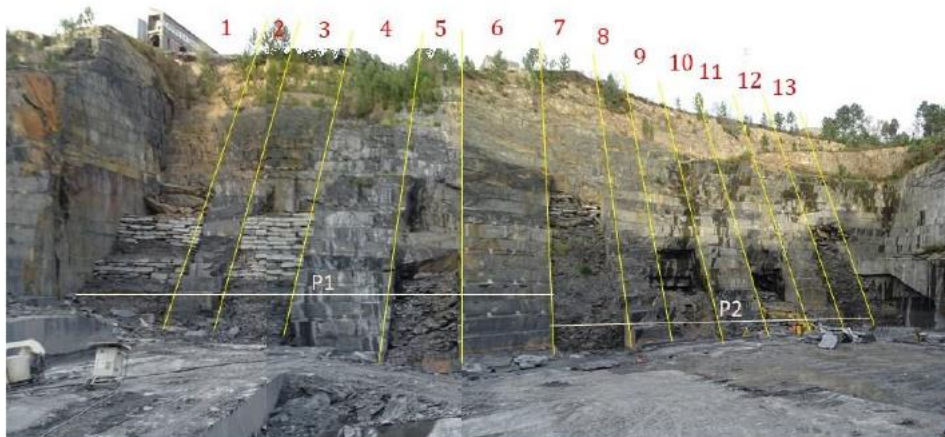


Figura 9.16 – Divisão do antigo talude da Área B dividido em 13 zonas geotécnicas. (Dias, 2018)

A identificação dos riscos, e respectivos impactos, existentes nos hasteais de dimensões cada vez maiores e que promovem um eventual risco de queda de rochas sobre estruturas e área da atividade extrativa em curso, instigaram o desenvolvimento de eventuais medidas para sua mitigação. Os parâmetros que admitiram a detecção de todo e qualquer sinal de instabilidade que pudesse ter consequências ou, favorecer a geração de riscos instabilizadores envolveram (Dias, 2018):

- i. Geometria do talude (ângulo, altura, rugosidade do declive e vegetação) e a altura das áreas de possível libertação de rochas;
- ii. Estado geológico e condições do maciço do talude, nomeadamente, condição das descontinuidades da rocha, a resistência da rocha intacta, a presença de cavidades e o volume e o número de blocos potenciais;
- iii. Fatores desencadeantes (precipitação, sismicidade da área) e condições de drenagem das águas subterrâneas a estabilidade das rochas;
- iv. Impactos nas estruturas e elementos associados, bem como na acessibilidade da inclinação;
- v. Observação direta de potenciais fatores instabilizantes do maciço.

Contabilizados um total de 148 planos de descontinuidades, irrefutável maioria diáclases, dos quais 72 descontinuidades no talude “avessas” da Pedreira da Milhária, definiram com o auxílio do sistema *Rockfall Risk Rating*, parâmetros que diferem de uma para outra zona geotécnica. Tais parâmetros caracterizaram-se por (Dias, 2018):

- i. Volume e número de blocos rochosos;
- ii. Espaçamento e persistência das descontinuidades;
- iii. Altura da área de lançamento;
- iv. Largura da zona de captação livre;
- v. Presença de estruturas ou atividades humanas na área de exploração.

O fato das características geomorfológicas, altura do declive e ângulo dos hasteais, apresentarem condições idênticas em toda a área da pedreira definiram, em média, que o risco no

talude da Área B era baixo e, por conseguinte, o impacto sobre as estruturas e meios presentes também o era.

Contudo, uma análise mais pormenorizada detalhou que:

- Zonas Geotécnicas 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 – risco baixo, sem necessidade de intervenção e monitorização mensal;
- Zonas Geotécnicas 1, 9, 10 e 12 – risco médio, intervenção ligeira (saneamento e pregagens) e monitorização quinzenal.
- Zonas Geotécnicas 11 e 15 – risco alto, intervenção urgente (saneamento, pregagens e redes metálicas) e monitorização a definir.

Talvez a combinação de fatores instabilizadores com a circunstância das zonas geotécnicas de risco médio e, predominantemente, as zonas geotécnicas de risco alto, incitaram o deslizamento do Hasteal SE da Pedreira da Milhária.

9.2.5.2.1 DESLIZAMENTO HASTEAL SE

Numa área do hasteal SE da Pedreira da Milhária, dia 7 de fevereiro de 2020, verificou-se um desabamento parcial no topo de SW, cujas terras caíram para o fundo dela. A zona inferior ao desabamento era constituída por antigos poços de exploração subterrânea, efetuada há mais de 90 anos, não integralmente preenchidos com entulho e/ou estéril, preservando-se apenas o suporte pelos pilares intermédios (Figura 9.17).



Figura 9.17 – Área B e, por conseguinte, o Hasteal SE antes do desabamento.

O domínio dos terrenos, inclusive da área afetada, realizado sistematicamente no decorrer da exploração a céu aberto, era caracterizado pelo uso de ancoragens, de 12 metros de comprimento, com espaçamento entre 3 a 4 metros ligadas nas cabeças por tirantes de aço. Com o aparecimento das primeiras fissuras, cerca de um ano antes do desabamento, a área de exploração da pedreira subjacente foi abandonada e, logo depois, posicionados testemunhos longitudinais e transversais nas fissuras que iam ocorrendo.



Figura 9.18 – Domínio de terrenos, adotado até aos dias de hoje, por intermédio de ancoragens ligadas, nas cabeças, por tirantes de aço encostados ao maciço rochoso.

A área afetada foi de 2913 m² o que equivale a um volume de terras deslocado de 87390 m³. Inicialmente foi delimitado um perímetro de segurança provisório, devidamente sinalizado e vedado, em que dentro do mesmo só era autorizada a permanência ou circulação de técnicos ou operários da empresa, previamente autorizados e acompanhados. Posteriormente, iniciou-se o enchimento do vazio originado até à cota de superfície do topo inicial, ao longo de cerca de 10000 m².

É importante referir que a área até ao momento é visitada por técnicos da empresa proprietária e explorada de forma a conservar condições de segurança suficientes.

9.2.5.2.2 DOMÍNIO DOS TERRENOS HASTEAL SE

A abertura de uma pedreira abrange 3 fases – fase de abertura ou construção, fase operacional ou de exploração e, a última, a fase de abandono e recuperação – originando, impactes tanto negativos como positivos, como consequência das ações praticadas sobre os sistemas presentes.

O adequado planeamento das operações de exploração e recuperação, através da sua articulação, durante a vida útil de uma pedreira, considerando a eventualidade de reduzir a superfície total da área explorada através da recuperação de área anteriormente funcionais, beneficia a redução do impacto visual. (IGM, 1999)

O Decreto-Lei n.º10/2010 define que o plano de deposição de resíduos tem como alvo a fomentação da gestão dos estéreis originados durante a exploração de um recurso mineral, harmonizando as tarefas de deposição com as atividades de lavra e de recuperação paisagística, de modo a alavancar, gradativamente, o enquadramento paisagístico, ambiental e de segurança da área intervencionada.

Os resíduos de extração da Pedreira da Milhária, considerados inertes, irão integrar a recuperação paisagística da área de intervenção, especificamente, reabilitação e modelação

topográfica, introduzidos nos vazios da escavação, através do preenchimento de antigos poços de exploração subterrânea e/ou enchimento do vazio da zona inferior do Hasteal SE (Figura 9.19).



Figura 9.19 – Enchimento da área inferior do Hasteal SE.

No decurso das visitas à Pedreira da Milhária foi registado, por serventia de uma câmara fotográfica, o atual enchimento do vazio inferior do Hasteal SE (Figura 9.20).



Figura 9.20 – Cenário atual do enchimento do domínio do Hasteal SE.

Por comparação à fase inicial de enchimento do mesmo vazio (Figura 9.21), deduz-se um aumento de deposição de estéril e respetivo volume, proveniente das atividades de exploração de material ardosífero da Área A.



Figura 9.21 – Cenário de enchimento no princípio do domínio do Hasteal SE.

O diagnóstico da Figura 9.22 expressa uma maior percepção de quanto evolui o enchimento do vazio inferior do Hasteal SE e, também, que durante o período de tempo da variação de enchimento concretizaram-se assentamentos de estéril diferidos no tempo, justificados pela presença de áreas de solo mais elevadas quando comparadas com outras e pela existência de fissuras no solo.



Figura 9.22 – Variação do enchimento, a nível de comprimento, do vazio inferior do Hasteal SE.



Figura 9.23 – Visualização de desníveis e fissuras no solo resultante do enchimento do vazio inferior do Hasteal SE.

9.2.5.3 ZONA C

O dimensionamento de taludes e, consequente, abertura ou expansão em profundidade de taludes a céu aberto deve preservar o mesmo nível de operacionalidade e segurança de exploração e reforçar, ainda mais, a responsabilidade de dimensionar projetos com ângulos mais íngremes. Independentemente da escavação do maciço, de natureza aleatória, os taludes são constituídos por materiais naturais de grande variabilidade a que as análises deverão atender, por comparação às suas propriedades geológicas e geotécnicas.

A abordagem determinística adotada no dimensionamento de taludes de uma pedreira a céu aberto, desde a pré-viabilidade ao fim do ciclo de exploração, usa, como premissas para determinação dos fatores de segurança (FS), valores representativos dos parâmetros de resistência, das condições de saturação, dos carregamentos externos, dos modos de rutura, e entre outros, de modo a otimizar os ângulos médios da face ou entre rampas.

Contudo as incertezas relacionadas à verdadeira estabilidade geotécnica dos taludes são persuadidas por variações inerentes do modelo geológico, dos parâmetros de resistência, das propriedades físicas dos materiais ou, até mesmo, da influência do fator tempo, com possibilidade de se tornarem críticas a longo prazo. Porém, a adoção de geometrias muito abatidas, indispensáveis para coexistir com as incertezas consoante a abordagem determinística, pode resultar em custos de implantação, operação e desativação significativamente dispendiosos.

A área C, local onde se situa a oficina de transformação, integra a próxima zona de exploração de ardósia da Pedreira da Milhária. Inferiormente à oficina de transformação existem antigas câmaras de exploração subterrânea e, como já dito anteriormente, o interesse centraliza-se no desmonte dos respetivos pilares.

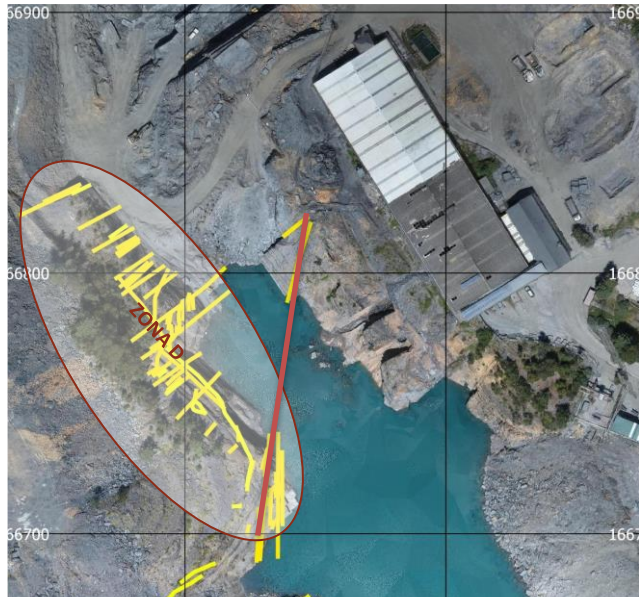


Figura 9.24 – Descontinuidades existentes numa pequena parte da Pedreira da Milhária, com especial enfoque para a descontinuidade que irá afetar a exploração da Área C (cor engenharia).

Antes de encarar a mudança para este novo campo de exploração, o inerente investimento à realocização da oficina de transformação e, possível, aumento das despesas de transporte irão tornar este processo moroso. Associado às problemáticas mencionadas, a Área C, situada nas “avessas” no talude, é atravessada por uma descontinuidade problemática dificultando ainda mais o processo de exploração (Figura 9.24).

A projeção dos planos de descontinuidade e dos polos dos planos de descontinuidade das descontinuidades existentes na Zona D da Figura 9.24 são expostos na Figura 9.25.

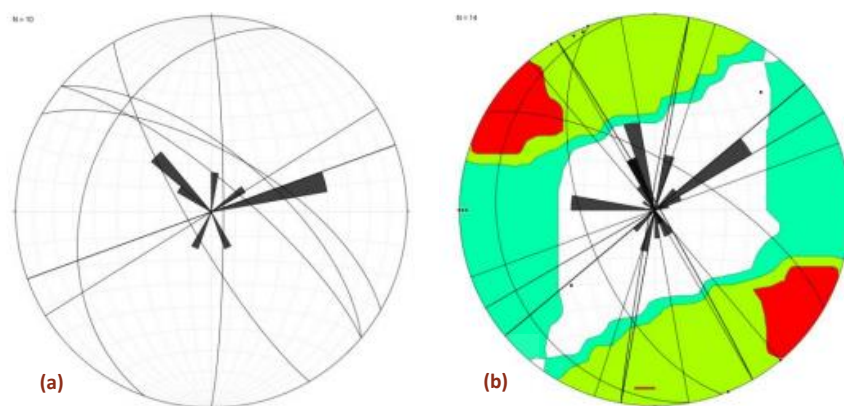


Figura 9.25 – Projeção dos (a) planos de descontinuidade e (b) polos dos planos de descontinuidade da Zona D. (Adaptado: Geotek, 2021)

A Zona D é constituída por cisalhamentos N60/sub-verticais, que, associados com a foliação N135/70NE e descontinuidades N130/30N substancializam circunstâncias de elevada instabilidade e, posterior, escorregamento e/ou queda de blocos (Figura 9.26).



Figura 9.26 – Locais de elevada propensão a queda de blocos. (*Adaptado: Geotek, 2021*)

O fato de Área C se localizar nas “avessas” do talude, impulsiona a que este, durante a sua exploração se incline, com probabilidade de cair, para o interior do talude, onde irá decorrer a fase desmonte. A utilização de ancoragens com 12 metros de comprimento, com espaçamento entre 3 e 4 metros, ligadas nas cabeças por tirantes de aço, não será suficiente.

10 CONCLUSÃO

Depois da caracterização e observação da informação presente no capítulo anterior importa sugerir propostas de otimização, gestão das condições de estabilidade e segurança dos taludes da Pedreira da Milhária e, também, alguns trabalhos futuros alusivos ao tema da presente dissertação.

10.1 TALUDES DA ZONA A

A Figura 10.1 exprime a projeção dos planos de descontinuidades e, inclusive, a respetiva projeção dos polos dos planos de descontinuidade dos taludes da Zona A, examinando-se uma enorme heterogeneidade.

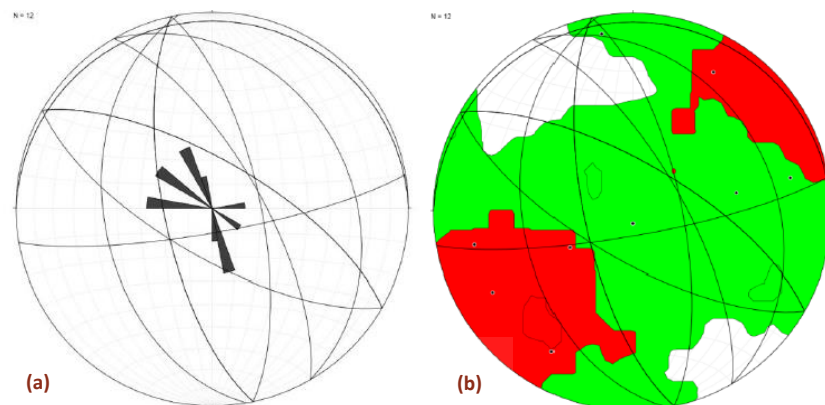


Figura 10.1 – Projeção dos (a) planos de descontinuidade e (b) polos dos planos de descontinuidade.
(Adaptado: Geotek, 2021)

O talude NW predispõe de uma relativa facilidade em originar cunhas graças à intersecção de planos de descontinuidade de orientação N168/70E com planos de orientação N120/70N, congruentes à foliação N154/sub-vertical (Figura 10.2).



Figura 10.2 – Aspetto de formação de uma qualquer cunha no talude NW na Zona A. *(Geotek, 2021)*

As discontinuidades supracitadas são truncadas por uma discontinuidade sub-horizontal (Figura 10.3). De realçar que a instabilidade deste talude se deve, essencialmente, à existência de água nas discontinuidades adjacentes.



Figura 10.3 – Descontinuidade sub-horizontal. *(Adaptado: Geotek, 2021)*

Por último, a presença de uma falha N150/30E com preenchimento argiloso, entre 30 a 50 centímetros, e a elevada extensão no Talude Nascente da Zona A, condicionam as operações de desmonte (Figura 10.4).



Figura 10.4 – Panorama do Talude Nascente da Zona A e, respetivo, aspeto da falha N150/30E. *(Adaptado: Geotek, 2021)*

10.1.1.1 MEDIDA PROPOSTA

A estabilização e proteção de riscos inerentes aos taludes em maciços, especificamente, desprendimentos, deslizamentos ou colapsos depende de determinadas ações que poderão ser implementadas.

A presença da falha N150/30E recomenda o progressivo abandono da exploração e, posterior, promoção de vegetação no talude NW da Zona A, preservando a largura de bancada de modo a favorecer a sua estabilização e, similarmente, a implementação de pregagens com as seguintes características para admitir o encaixe perfeito: espaçamento entre 3 a 4m, $\varnothing_{\text{varão}}=35\text{mm}$, $\varnothing_{\text{furo}}=95\text{mm}$ e comprimento de varão entre 8 e 12 metros de comprimento.

Também a presença de um poço, presentemente inutilizável, poderá ser considerado como provável fonte de abastecimento de água a fim de auxiliar as operações de extração e transformação.

A água, por intermédio de fluxos ou proveniente da precipitação, num qualquer talude maciço ou hasteal, caracteriza um dos fatores que maior implicância comporta ao nível da estabilidade. Os fluxos de água na descontinuidade sub-horizontal e, respetivas, descontinuidades adjacentes estimulam o aumento do peso específico, introduz em pressões intersticiais, aceleram processos erosivos e, ainda, propiciam condições vitais ao aparecimento e proliferação de espécies arbustivas e arbóreas.

Com o intuito de uma eficiente gestão, a despeito das diversas soluções de drenagem, recomenda-se o encaminhamento de águas, superficiais ou intersticiais, na área da descontinuidade sub-horizontal por intermédio de:

- i. Drenos superficiais no tardo do talude, os quais garantem que as águas superficiais não alcançam o mesmo;
- ii. Drenos profundos, mesmo que não utilizados com frequência em pedreiras de rochas ornamentais por induzirem perdas económicas em zonas ainda exploráveis, certificam a correta drenagem das águas presentes no interior do mesmo.

A disposição de drenos superficiais e profundos irá dificultar o alcance da água ao talude rochoso, especificamente a sua face, e, portanto, impedir os efeitos lesivos impelidos à sua estabilidade.

10.2 ZONA B

A Pedreira da Milhária dispõe como objetivo a maximização da exploração, não existindo espaço, usualmente, para um planeamento mais apropriado e integrado no contexto paisagístico e, por conseguinte, a minimização do impacte visual. Assim, o planeamento de escombros pode ser acautelado na sua forma e localização, de modo a alcançar-se uma favorável integração na topografia.

A recuperação de terrenos afetados por explorações pretende criar uma relação entre o material vegetal de uso previsto e a modelação das superfícies (ITGE, 1989), de modo a que a recuperação, no caso da Pedreira da Milhária, tenha em vista o reaproveitamento económico direto – agrícola, florestal ou outro tipo distinto do pré-existente – ou pelo enquadramento e integração da pedreira na paisagem envolvente, através da sua inclusão na rede contínua de conservação da natureza com carácter não

diretamente produtivo, mas de extrema relevância para a conservação e valorização do equilíbrio biofísico e paisagístico do território.

O plano de recuperação dividido em 3 fases, nomeadamente, a fase de construção ou preparação, a fase de exploração e a fase de recuperação, que podem ocorrer de forma simultânea, integram a estratégia de recuperação mais indicada por possibilitar a recuperação à medida que a exploração avança (Figura 10.5). (ITGE, 1989)

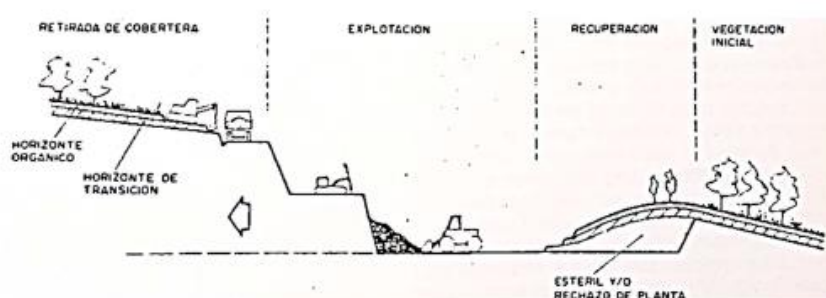


Figura 10.5 – Recuperação progressiva. (ITGE, 1989)

As condicionantes da recuperação progressiva advêm de espaço inocupado (pedreiras de áreas reduzidas ou fundas), avanços de lavra (desenho e avanços das bancadas de exploração e topografia) e, por último, do obstáculo de obtenção de materiais para enchimento, quer por falta de disponibilidade em escombrelas, quer do exterior.

10.2.1.1 MEDIDA PROPOSTA

A regularização do terreno abrange múltiplos tipos de perspectiva, análoga as circunstâncias de estabilidade, tipo e dimensão das frentes, disponibilidade de materiais de enchimento, natureza do mesmo e viabilidade de desempenhar diferentes ações de mitigação ou recuperação de modo síncrono. (ITGE, 1989)

Na Pedreira da Milhária, especificamente, na Zona B a regularização do terreno, por outras palavras, o tipo de enchimento/entulhamento eleito, poderá ser:

- i. Entulhamento Completo, que compreende o enchimento até às cotas da bordadura da escavação e posterior restauro do uso do solo;
- ii. Entulhamento Parcial, que compreende o enchimento parcial e posterior revestimento das vertentes desenvolvidas por vegetação arbórea, arbustiva e herbácea;
- iii. Entulhamento Reduzido de enchimento limitado proporciona a implantação de vegetação de revestimento, porém exclusivamente revestimento herbáceo;

A implementação de um qualquer enchimento/entulhamento e, subsequentemente, solução de reaproveitamento do solo irá permitir a estabilização do terreno, a segurança (evita a queda de pessoas e animais e o acesso a zonas instáveis onde possa suceder desprendimento de material) e o aperfeiçoamento da qualidade visual e estética.

10.3 TALUDES ZONA C

A Zona C, área de futura expansão, expõe como primeiro constrangimento a transferência das instalações da oficina de transformação para a sua lateral (Figura 10.6).



Figura 10.6 – Nova área da oficina de transformação da Pedreira Milhária. (*Adaptado: Geotek, 2021*)

A nova área selecionada para a transferência da oficina de transformação é constituída por antigos poços de exploração, aterrados com escombro originário da sua própria escavação. Contudo a realização de ensaios desencorajou a preferência por fundações diretas dentro dos limites da boca dos poços, uma vez que subsiste a eventualidade de um assentamento diferencial.

Como solução, tais fundações executar-se-ão no maciço rochoso envolvente, perante a análise da traçagem da exploração subterrânea, em que a colmatação de vazios derivados da granulometria variável do escombro aí depositado ocorrerá ao longo da execução de obras. Uma estrutura de segurança na boca dos poços aterrados, como por exemplo, perfis metálicos, de escoramento, lintéis ou laje completa em betão, será desenvolvida com o intuito de impedir um provável derrube das paredes dos mesmos.



Figura 10.7 – Zona D, subjacente à escombreira. (Adaptado: Geotek, 2021)

A Zona D, subjacente à escombreira, evidencia fenômenos de descompressão do maciço suscetíveis de espoletar fenômenos de escorregamento e/ou queda de blocos, harmonizando como solução a implementação de um programa de monitorização por intervenção de alvos topográficos e fissurómetros ou, inclusive, o enchimento total do respetivo talude a fim de estabilizar e atenuar este fenómeno (Figura 10.7).

A circunstância da Zona C se situar nas “avessas” do talude e, também, a presença de uma descontinuidade confirma a insuficiência do atual processo de contenção de taludes empregue na Pedreira da Milhária.



Figura 10.8 – Esquematisação do maciço de contenção e delineação do desmonte. (Adaptado: Google Earth, 2019)

Prontamente se propõe que o desmonte comece entre os 50 a 70 metros, em profundidade, relativamente à frente de desmonte, permitindo a construção de um maciço de contenção (Figura 10.8). Para lá deste maciço executar-se-ia o atual método de exploração adotado, na Zona A, pela Pedreira da Milhária, associado à utilização de pregagens como complemento da providência crucial de controle do talude, o maciço de contenção.

10.4 TRABALHOS FUTUROS

O tempo disponível para este estudo não foi o bastante; deste modo, recomenda-se, como trabalho futuro, uma análise prolongada e assente no domínio de taludes de Ardósia da Pedreira da Milhária ou de outras rochas ornamentais.

A existência de incontáveis poços antigos de exploração subterrânea de ardósia, na área da Pedreira da Milhária, incentiva à elaboração de um estudo de aproveitamento subterrâneo de tais poços, por outra palavras, qual a hipótese e como se deve prosseguir com a sua exploração em subterrâneo.

Por último, como trabalho futuro, sugere-se, igualmente, um estudo pormenorizado da eventual transferência de instalações da atual Oficina de Transformação e Escritórios para um novo lugar, sem interferência com o maciço ardosífero, viabilizando a exploração desta nova área que se sabe ser economicamente rentável.

11 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **ADMASSU**, Y. (2012). *User's Guide DipAnalyst 2.0 for Windows*. Software for Kinematic Analysis of Rock Slopes.
- [2] **ADHIKARY**, D.; **DYSKIN**, A.; **JEWELL**, R.; **STEWART**, D. (1997). *A Study of the Mechanism of Flexural Toppling Failure of Rock Slopes*. Rock Mechanics and Rock Engineering, 30 (2). 75-93.
- [3] **ANIET**. (2017). *Diagnóstico Competitivo sobre o Setor da Extração e Transformação da Pedra Natural. Projeto GAP – Ganhar a aposta na Pedra Natural*. COMPETE2020.
- [4] **ARMOUR**, T.; **GRONECK**, P.; **KEELEY**, J.; **SHARMA**, S. (2000). *Micropile Design and Construction Guidelines Implementation Manual*. US Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- [5] **ARTUR**, A.C.; **FILHO**, C.C.; **RODRIGUES**, E.P. (2003). *Ardósias de Minas Gerais, Brasil: Características Geológicas, Petrográficas e Químicas*. UNESP. São Paulo. 119-126.
- [6] **ASHBY**, J. (1971). *Sliding and toppling modes of failure in models and jointed rock slopes*. Imperial College of Science & Technology, London, UK.
- [7] **AYALA CARCEDO**, F. (1987). *Manual de Taludes*. Instituto Geológico y Minero de España (IGME).
- [8] **BARBOSA**, A.L.M. (1974) *Curso de Petrologia – I. Minerais petrográficos, II. Petrografia macroscópica*. Ouro Preto: Escola de Minas e Metalurgia. UFOP. 248 p.
- [9] **BARTON**, N.; **CHOUBEY**, V. (1977). *The shear strength of rock joints in theory and practice*. Rock Mechanics, 10. 1-54.
- [10] **BARTON**, N., **LOSET**, F.; **LIEN**, R. & **LUNDE**, J. (1980). *Application of Q-system in design decisions concerning dimensions and appropriate support for underground installations*. In: Bergman M., ed., Proceedings, Subsurface Space, ISRM International Symposium – Rockstore'80, Stockholm. Pergamon Press Ltd., 2. 553-561.
- [11] **BIENIAWSKI**, Z.T. (1989). *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil and petroleum engineering*. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- [12] **BONITO**, N. (2010). *Sustentabilidade na Indústria da Rocha Ornamental*. Dissertação apresentada à UEvora para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Geológica. Évora.
- [13] **BRITO**, J. de. (1999). *Tecnologia de Contenções e Fundações*. Lisbon.

- [14] **CAPUTO**, H.P. (1977). *Mecânica dos Solos e suas aplicações*. Vol 2), 3ª Edição. Rio de Janeiro, Brasil: Livros técnicos e científicos editora S.A.
- [15] **CAPUZZI**, Q. (2000). *Modern Technology and Machinery for Marble Quarrying*. Benetti Machine s.r.l..
- [16] **CARDOSO**, A. I., & **QUINTANILHA**, J. M. (2009). *Estudo da interação mecânica entre redes metálicas pregadas e taludes rochosos*. X Congresso Nacional de Geotecnia.
- [17] **CARVALHO**, A.; **MARTINS**, O. (1971). *Rochas e minerais não metálicos de Portugal. I Congresso Hispano-Luso-Americano de Geologia Económica. Direção-Geral de Minas e Serviços Geológicos*. Lisboa.
- [18] **CARVALHO**, P. A. (1991). *Manual de geotecnia: Taludes de rodovias: orientação para diagnóstico e soluções de seus problemas*. Departamento de Estradas e Rodagens do Estado de São Paulo, Instituto de Pesquisa Tecnológicas.
- [19] **COELHO**, S. (1996). *Tecnologia de Fundações*. Amadora: Edições E.P.G.E
- [20] **CORTEZ**, J. A. S. (2020). *Pedreira n.º18 - "Lugar da Milhária": Desabamento do Hasteal SE*. ELV.
- [21] **COUTO**, H. (1993). *As mineralizações de Sb-Au da região Dúrico-Beirã*. Tese apresentada ao FCUP para obtenção de grau de Doutor em Geologia. Porto. 663 p.
- [22] **DEERE**, D.U; **DEERE**, D. W. (1988). *The rock Quality Designation (RQD) index in practice. Symposium on Rock Classification Systems for Engineering Purposes*. ASTM STP 984, Lois Kirkaldie, Ed.. Philadelphia: American Society for Testing and Materials. 91-101.
- [23] **DGEG** – Direção Geral de Energia e Geologia. (2015). *Boletim de Minas*. Volume 50. Lisboa.
- [24] **DGEG** – Direção Geral de Energia e Geologia. (2019-2020). *Boletim de Minas: Rochas Ornamentais*. Volume 54. Lisboa.
- [25] **DIAS**, R. **ÁRAUJO**, A. **TERRINHA**, P. & **KULBERG**, J.C. (eds.). (2013). *Geologia de Portugal. Vol. I - Geologia Pré-mesozóica de Portugal*. Escolar Editora. 807 p.
- [26] **DIAS**, J.M.M. (2018). *Gestão de segurança dos taludes de escavação da Pedreira da Milhária, Valongo*. Dissertação apresentada ao ISEP para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente. Porto.
- [27] **DIKAU**, R.; **BRUNSDEN**, D.; **SCHROTT**, L.; **IBSEN**, M.L. (1996). *Landslide recognition: Identification, movement, and causes*. John Wiley & Sons Ltd.
- [28] **DURMEKOVA**, T.; **HOLZER**, R.; **WANGNER**, P. (2003). *Weak rocks in engineering practice. Geotechnical measurements and modelling*. Germany: Karlsruhe Taylor and Francis. 185-192.
- [29] **EBERHARDT**, E. (2003). *Rock Slope Stability Analysis - Utilization of Advanced Numerical Techniques*. Vancouver, Canada: Earth and Ocean sciences at UBC.
- [30] **EHSANZADEH**, B., & **AHANGARI**, K. (2014). *A Novel Approach in Estimation of the Soilcrete Column's Diameter and Optimization of the High Pressure Jet Grouting Using Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS)*. Open Journal of Geology, 4 (August). 386-398.

- [31] **EINSTEIN, H. H.; VENEZIANO, D.; BAECHER, G.B.; O'REILLY, K.J.** (1983). *The Effect of discontinuity persistence on rock slope stability. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics*, 20.
- [32] **ELV** – Empresa de Lousas de Valongo. (2000). *Pedreira n.º18 – Milhária: 2ª Actualização do Plano de Lavra*. Valongo.
- [33] **ELV** – Empresa de Lousas de Valongo. (2021). Acedido em: 25 de julho de 2021, em: <http://www.valongoslate.com/pt/>
- [34] **FALCÃO, J.; PINTO, A.; PINTO, F.** (2000). *Casos práticos de soluções de Jet Grouting vertical*. VII Congresso Nacional de Geotecnia, II. 1055–1065.
- [35] **FERNANDES, I.** (2005). *Percursos Geológicos no Sulco Carbonífero Dúrico-Beirão (Valongo-Gondomar-Castelo de Paiva)*. Coleção Ciências e Natureza. Edições Afrontamento. 144 p.
- [36] **FERNANDES, M.M.** (2011). *Mecânica dos Solos. Introdução à Engenharia Geotécnica*. Vol) 2. FEUP Edições.
- [37] **FERRAZ, S..** (2004). *O Parque Paleozóico de Valongo como recurso educativo*. Dissertação apresentada à FCUP para obtenção de grau de Mestre em Geologia. Porto. 158 p.
- [38] **FRIORI, A.P.** (2016). *Estabilidade de taludes: exercícios práticos*. São Paulo: Oficina de Textos.
- [39] **FORNARO, M.; BOSTICCO, L. e BIOLATTI, G.** (1995). *The environmental advantages and operating results of underground quarrying of na ornamental stone*. Lisboa.
- [40] **GE, Y.; KULATILAKE, P. H. S. W.; TANG, H.; XIONG, C.** (2014). *Investigation of natural rock joint roughness. Computers and Geotechnics*, 55. 290-305.
- [41] **GEO.** (2007). *Engineering geological practice in Hong Kong*. Geotechnical Engineering Office. Civil Engineering and Development Department, The Government of the Hong Kong. Special Administrative Region.
- [42] **GOODMAN, R.E.** (1989). *Introduction to Rock Mechanics*. New York: John Wiley & Sons.
- [43] **GOMES, C.** (1992). *Caracterização geotécnica de rochas brandas*. Dissertação apresentada ao IST para obtenção de grau de Mestre em Geologia de Engenharia. Lisboa.
- [44] **GUERREIRO, H.J.P.** (2000). *Exploração Subterrânea de Mármore – Aspetos Geotécnicos*. Dissertação apresentada ao IST para obtenção de grau de Mestre em Georrecursos – Área de Geotecnia. Lisboa.
- [45] **GUIDICINI, G.; NIEBLE, C.M.** (1984). *Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação*. São Paulo, Brasil: Editora Edgar Blücher Ltda.
- [46] **GREENWAY, D.R.** (1987). *Vegetation and Slope Stability*. In J. Wiley (Ed.), *Slope Stability*. New York. 187-320.
- [47] **HIGHLAND, L. M.; BOBROWSKY, P.** (2008). *The Landslide Handbook — A Guide to Understanding Landslides*. Landslides. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey. 129 p.
- [48] **HOEK, E.; BRAY, J.W.** (1981). *Rock Slope Engineering*. London, United Kingdom: Institution of Mining and Metallurgy. 358 p.

- [49] **HOEK, E., CARRANZA-TORRES, C., & CORKUM, B.** (2002). *El criterio de rotura de Hoek-Brown*. Edición 2002. Rocscience, 8.
- [50] **HOEK, E.** (2006). *Practical rock engineering, Vol 1*. Toronto: Rocscience. 237.
- [51] **HOEK, E.** (2007). *Practical Rock Engineering*. Rocscience: Hoek's Corner.
- [52] **HOEK, E.; MARINOS, P; MARINOS, V.** (2007). *Geological strength index (GSI). A characterization tool for assessing engineering properties for rock masses. Underground Works under Special Conditions*. Lisbon: Taylor and Francis. 13-21.
- [53] **HOEK, E., CARTER, T. G., & DIEDERICH, M. S.** (2013). *Quantification of the geological strength index chart*. Rocscience, 9.
- [54] **HUDSON, J.; HARRISON, J.** (1997). *Engineering rock mechanics: An introduction to the principles*. Oxford, United Kingdom: Elsevier Science Ltd. 444 p.
- [55] **HUNGR, O.; LEROUÉIL, S.; PICARELLI, L.** (2014). *The Varnes classification of landslide types, na update. Landslides*, 11. 167-94.
- [56] **INETI – Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial.** (2001). *Guia Técnico: Sector da Pedra Natural*. Lisboa.
- [57] **INSTITUTO GEOLÓGICO E MINEIRO.** (1999). *Regras de Boa Prática no Desmonte a Céu Aberto*. INETI.
- [58] **INSTITUTO TECNOLÓGICO GEOMINERO DE ESPAÑA.** (1989). *Manual de Restauración de Terrenos y Evaluación de Impactos Ambientales en Minería*. Madrid: Ministerio de Industria, Comercio y Turismo.
- [59] **ISRM – International Society of Rock Mechanics, Commission on the classification of rock masses** (1978). *Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 15 (4). 33-35.
- [60] **ISRM – International Society of Rock Mechanics, Commission on the classification of rock masses** (1981). *Basic geotechnical description of rock masses. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts*, 18. 85-110.
- [61] **JULIVERT, M., FONTBOTÉ, J.M., RIBEIRO, A., CONDE, L.** (1974). *Mapa tectónico de la Península Ibérica y Baleares*. IGME. 94 p.
- [62] **LEITE, A.** (1984). *Relatório sobre a Indústria Lousífera da Região de Valongo*. Direção de Serviços Regional do Porto.
- [63] **LOTZE, F.** (1945) – *Zur Gliederung der Varisziden der Iberischen Meseta*. Geotekt. Forsch., 6: 78-92. (Tradução de J. M. Rios: Observaciones respecto a la division de los variscides de la Meseta Iberica. Inst. L. Mallada, Publ. Extranjeras, V (27). Geol. España, 5, Madrid, 1950. 149-166.
- [64] **LOUREIRO, Telma.** (2008). *Aspetos geotécnicos na construção de túneis em áreas urbanas: aplicação a terrenos de baixa resistência do miocénico de Lisboa*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- [65] **MARTÍNEZ CATALAN, J., MARTÍNEZ POYATOS, D., BEA, F.** (2004). *Zona Centro Ibérica (Coords.)*. In: VERA, J.A. (ed.) *Geología de España*, SGE-IGME, Madrid. 68-133.

- [66] **MEDINA, J.** (1996). Contribuição para o conhecimento da geologia do Grupo das Beiras (CXG) na região do Caramulo-Buçaco (Portugal Central). Tese apresentada à U Aveiro para obtenção de grau de Doutor em Geologia. Aveiro. 202 p.
- [67] **MIRA, M.** (2013). *Plano de Pedreira – Pedreira Portela das Salgueiras - Licenciamento*. Arquivo RuiPedra.
- [68] **MIRANDA, T.** (2003). *Contribuição para a obtenção de parâmetros geomecânicos para modelação de obras subterrâneas em maciços graníticos*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade do Minho. Escola de Engenharia. Guimarães.
- [69] **MOURA, A. Casal; CARVALHO, C.; ALMEIDA, I; SAÚDE, J.; RAMOS, J.; AUGUSTO, J.; RODRIGUES, J.; CARVALHO, J.; MARTINS, L.; MATOS, M.; MACHADO, M.; SOBREIRO, M.; MARTINS, N.; BONITO, N.; HENRIQUES, P.; SOBREIRO, S.** (2007). *Mármore e Calcários Ornamentais de Portugal*. INETI.
- [70] **OLSON, L.; SAMSON, C.; MCKINNON, S.D.** (2015). *3-D Laser imaging of drill core for fracture detection and Rock Quality Designation. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 73. 156-164.
- [71] **PALMSTROM, A.** (1982). *The volumetric joint count – a useful and simple measure of the degree of rock mass jointing. Proc. of the 4th Congr. Int. Assoc. of Engng. Geology*, 2(3). 221-228.
- [72] **PÉREZ-ESTAÚN, A., BEA, F., BASTIDA, F., MARCOS, F., MARTÍNEZ CATALÁN, J.R., MARTÍNEZ POYATOS, D., ARENAS, R., DÍAZ GARCIA, F., AZOR, A., SIMANCAS, J. & GONZALEZ, F.** (2004). *La cordillera Varisca Europea: El Macizo Ibérico*. In: J.A. VERA (Ed.) *Geología de España*. SGE-IGME, Madrid. 21-25.
- [73] **PIERSON, L.A.; FRED GULLIXSON, C.; CHASSIE, R.G.** (2001). *Rockfall Hazard Rating System – Implementation Manual*. Report FHWA-OR-EG-90-01, FHWA, U.S. Dep. of Transp.
- [74] **PINTO, A.** (2012). *Estabilidade de Taludes*. Disciplina Túneis. Instituto Superior Técnico de Lisboa.
- [75] **PIRES CARRETO, A.** (1989). *Técnicas de estabilização de taludes*. III Congresso Nacional de Geotecnia. FEUP: Porto. 87-109.
- [76] **PLIZ, A. J. S.** (2016). *Integração e Recuperação Paisagística em Pedreiras*. Dissertação apresentada à UÉvora para obtenção de grau de Mestre em Arquitetura Paisagista. Évora.
- [77] **PRIEST, S.D.; HUDSON, J.A.** (1976). *Discontinuity spacing in rock. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics*, 13 (1). 135-148.
- [78] **RIBEIRO, A., SILVA, J.B., DIAS, R., PEREIRA, E., OLIVEIRA, J.T., REBELO, J.A., ROMÃO, J. & SILVA, A.F.** (1991). *Sardic inversion tectonics in the Centro-Iberian Zone*. III Congr. Nac. Geol., Resumos, Coimbra. 71 p.
- [79] **ROCHA, M.** (2013). *Mecânica das Rochas*. LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Edição do âmbito das comemorações do nascimento do Engenheiro Manuel Rocha – 1913 – 2013 (Obra Póstuma). 410 p.

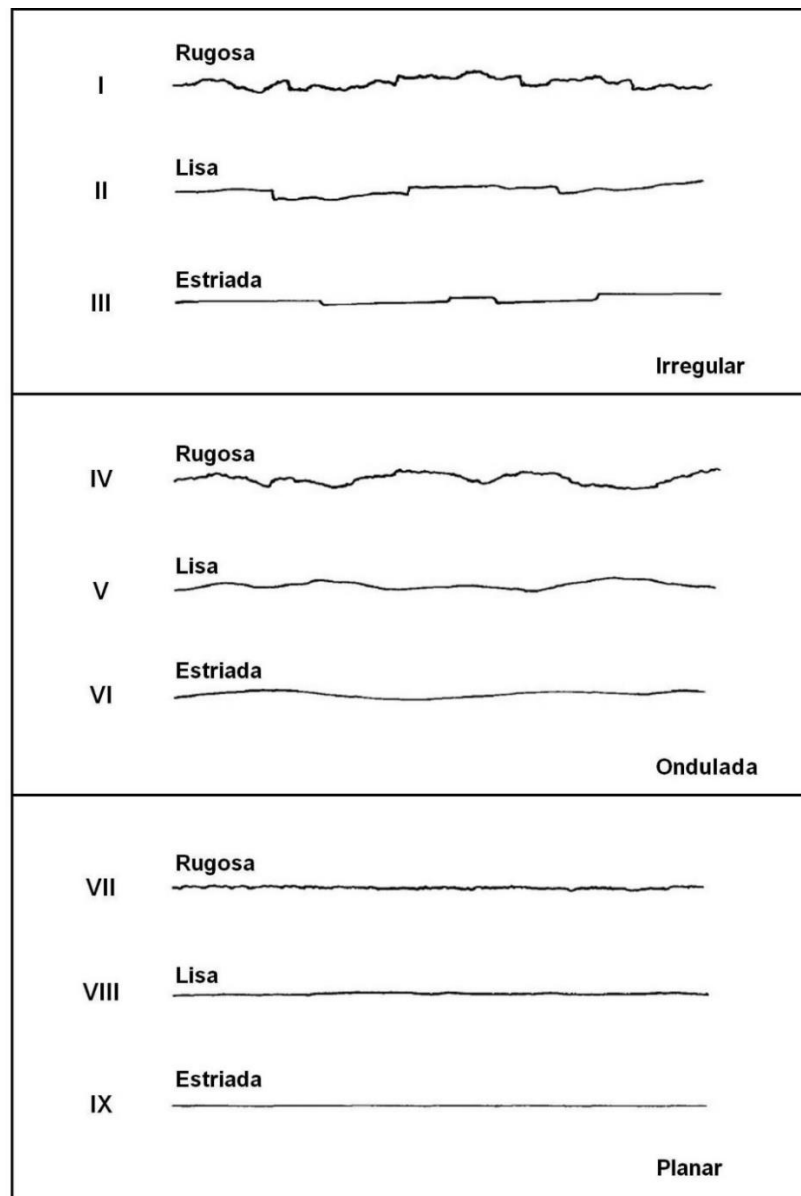
- [80] **ROMANA**, M. (1993). *A Geomechanical Classification for Slopes: Slope Mass Rating*. In *Comprehensive Rock Engineering*. John A. Hudson, Editor-in-Chief. 575–600.
- [81] **ROMANA**, M., **SERÓN**, J. B., & **MONTALAR**, E. (2003). *SMR Geomechanics classification: Application, experience and validation*. ISRM 2003–Technology Roadmap for Rock Mechanics, South African Institute of Mining and Metallurgy, 1–4.
- [82] **RUI PEDRA**. (2013). Plano de Pedreira Portela das Salgueiras – Alcobertas – Rio Maior – Santarém.
- [83] **RYAN**, T. F. (1973). *Gunitite: a handbook for engineers*. London: Cement and Concrete Association.
- [84] **SANTI**, P. M. (2006). *Field methods for characterizing weak rock for engineering*. *Environmental & Engineering Geoscience*. America: The Geological Society of America.
- [85] **SANTOS**, M. (2011). *Avaliação do desempenho do betão projetado em reparação de estruturas*. Instituto Superior Técnico de Lisboa.
- [86] **SCHLOSSER**, F. (1982). *Behaviour and design of soil nailing*. In *Proceedings of Symposium on Recent Developments in Ground Improvement Techniques*. Bangkok. 399-413.
- [87] **SHONG**, I. L. S.; **CHUNG**, F. C. (2003). *Design & Construction of Micropiles*. In *Geotechnical Course for Pile Foundation Design and Construction*. Ipoh. 29–30.
- [88] **SILVA**, J.M.C.D. (2018). *Caracterização e aproveitamento das lamas geradas no corte primário de rocha ornamental*. Dissertação apresentada ao ISEP para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente. Porto.
- [89] **SOUSA**, M. B. (1982). *Litostratigrafia e estrutura do Complexo Xisto-Grauváquico ante-Ordovício – Grupo do Douro (NE de Portugal)*. Dissertação apresentada à UCoimbra para obtenção de grau de Doutor em Geologia. Coimbra. 223 p.
- [90] **SOUSA**, S. (2008). *Projeto e Observação de Obras Geotécnicas: Sana Torre Vasco da Gama Royal Hotel: Soluções adoptadas*. Instituto Superior Técnico.
- [91] **SPÍNOLA**, S.V.P.A. (2014). *Caracterização Térmica de Pedras Naturais*. Tese apresentada à UAveiro para obtenção de grau de Doutor em Geociências. Aveiro.
- [92] **TATONE**, B.; **GRASSELI**, G. (2012). *Quantitative measurements of fracture aperture and directional roughness from rock cores*. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45. 619-629.
- [93] **UNESCO** Working Party on World Landslide. (1993). *Multilingual landslide glossary*. Bitech Publishers, Richmond, B.C., Canada.
- [94] **USGS** - United States Geological Survey. (2004). *Landslide Types and Processes*. Fact Sheet 2004-3072, (July). 1–4.
- [95] **VALLEJO**, L.I.; **FERRER**, M.; **ORTUÑO**, L.; **CARLOS**, O. (2004). *Ingeniería geológica*. Madrid: Prentice Hall.
- [96] **VARNES**, D. J. (1978). *Slope movement types and processes*. In *Landslides: Analysis and Control*. Transportation Research Board. 11-33.

[97] **WINES**, D.R.; **LILLY**, P. A. (2002). *Measurement and analysis of rock mass discontinuity spacing and frequency in part of the Fimiston Open Pit operation in Kalgoorlie, Western Australia: A case study*. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39. 589-602.

[98] **WYLLIE**, D. C.; **MAH**, C. W. (2004). *Rock Slope Engineering: Civil and Mining*. London and New York: Spon Press. 431 p.

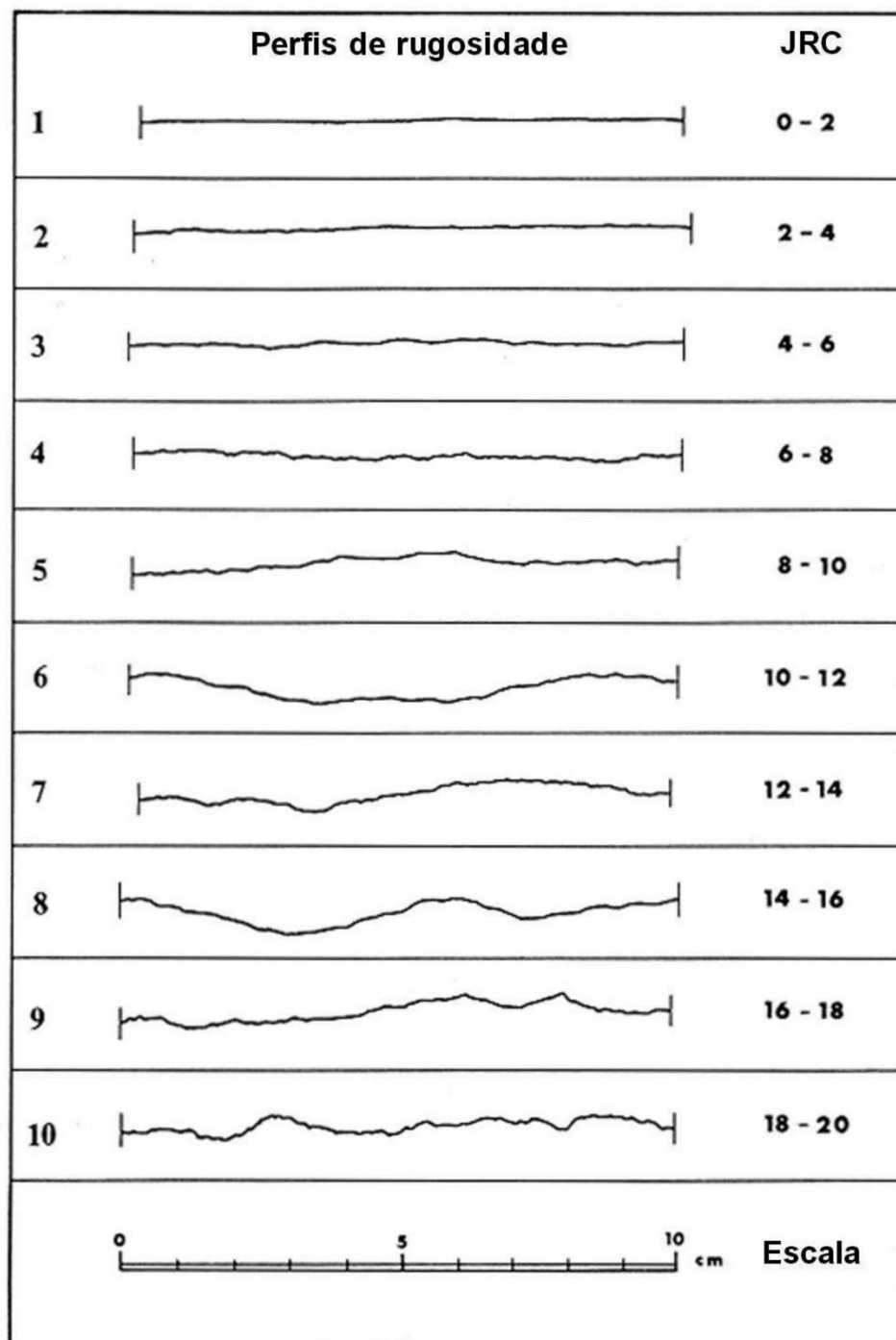
12 ANEXOS

12.1 ANEXO I – PERFIS TÍPICOS DE RUGOSIDADE E TERMOS DESCRITIVOS



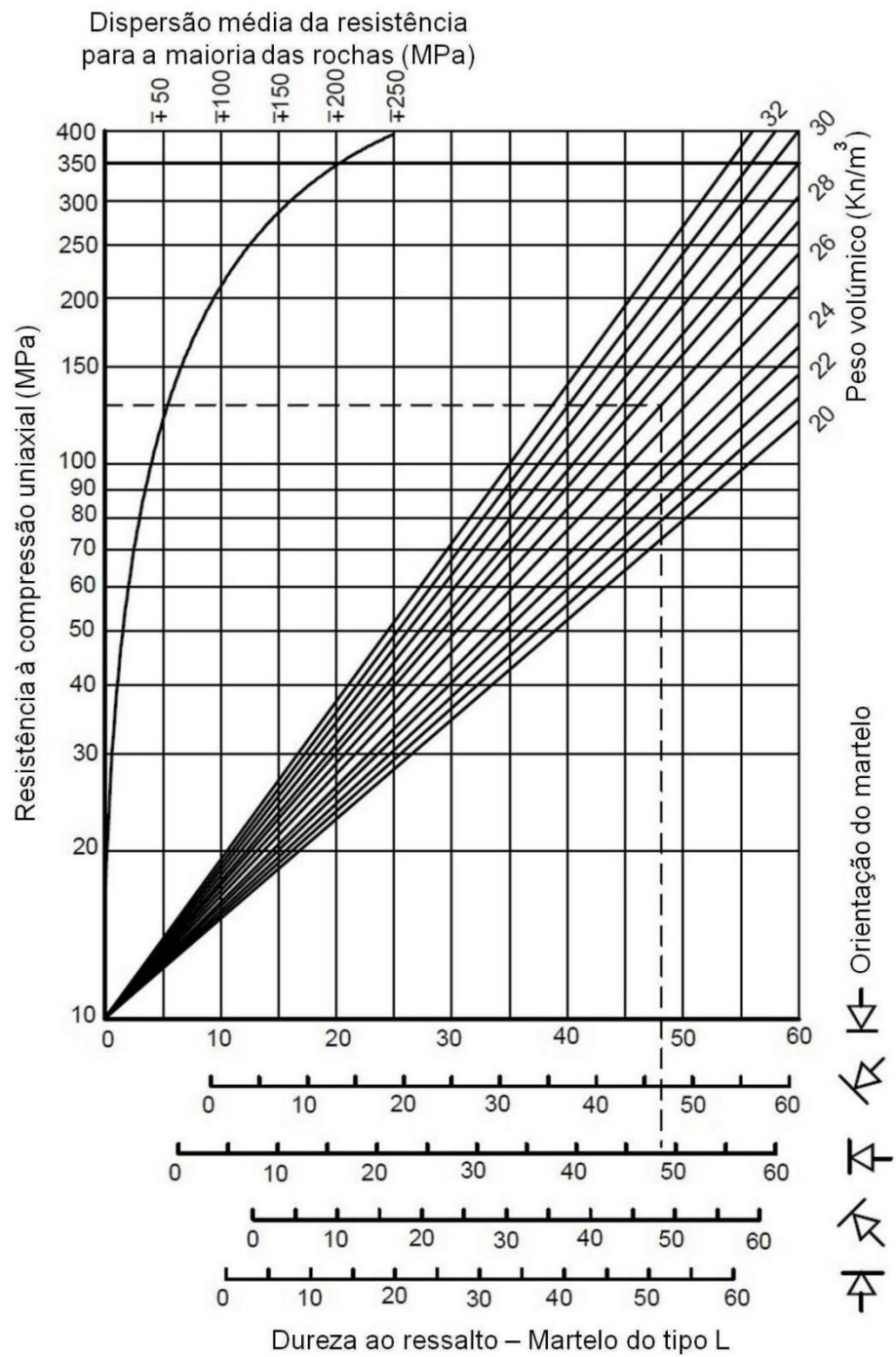
Perfis típicos de rugosidade e respetiva descrição. (Traduzido: ISRM, 1978)

12.2 ANEXO II - PERFIS STANDARD DE RUGOSIDADE E VALORES DE JRC



Perfis de rugosidade e valores de JRC. (Traduzido: Barton & Choubey, 1977)

12.3 ANEXO III – ÁBACO PARA ESTIMAÇÃO DE RCU EM FUNÇÃO DE γ E



Estimativa da resistência à compressão uniaxial e/ou parâmetro JCS. (Traduzido: Hoek, 2007)

12.4 ANEXO IV – TABELAS PARA APLICAÇÃO DA BGD

Parâmetros espessura das camadas. *(Traduzido: ISRM, 1981)*

ESPESSURA DAS CAMADAS				
Intervalos (cm)	Simbologia		Termos Descritivos	
> 200	L ₁	L ₁₋₂	Muito espessas	Espessas
60 – 200	L ₂		Espessas	
20 – 60	L ₃	L ₃	Moderadamente espessas	Moderadamente espessas
6 – 20	L ₄	L ₄₋₅	Delgadas	Delgadas
< 6	L ₅		Muito delgadas	

De acordo com a ISRM (1981), em maciços não estratificados, por exemplo, rochas ígneas, atribui-se o símbolo L₀.

Parâmetro espaçamento entre fraturas. *(Traduzido: ISRM, 1981)*

ESPAÇAMENTO FRATURAS				
Intervalos (cm)	Simbologia		Termos Descritivos	
> 200	L ₁	L ₁₋₂	Muito afastadas	Afastadas
60 – 200	L ₂		Afastadas	
20 – 60	L ₃	L ₃	Moderadamente afastadas	Moderadamente Afastadas
6 – 20	L ₄	L ₄₋₅	Afastadas	Próximas
< 6	L ₅		Muito afastadas	

De acordo com a ISRM (1981), em zonas do maciço sem fraturação, atribui-se o símbolo L₀.

Parâmetro resistência à compressão uniaxial. *(Traduzido: ISRM, 1981)*

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL				
Intervalos (cm)	Simbologia		Termos Descritivos	
> 200	S ₁	S ₁₋₂	Muito elevada	Elevada
60 – 200	S ₂		Elevada	
20 – 60	S ₃	S ₃	Moderada	Moderada
6 – 20	S ₄	S ₄₋₅	Baixa	Baixa
< 6	S ₅		Muito baixa	

Parâmetro ângulo de atrito das fraturas. *(Traduzido: ISRM, 1981)*

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL				
Intervalos (°)	Simbologia		Termos Descritivos	
> 45	A ₁	A ₁₋₂	Muito elevado	Elevado
35 – 45	A ₂		Elevado	
25 – 35	A ₃	A ₃	Moderado	Moderado
15 – 25	A ₄	A ₄₋₅	Baixo	Baixo
< 15	A ₅		Muito baixo	

12.5 ANEXO V – GSI (GEOLOGICAL STRENGTH INDEX)

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX (GSI) FOR HETEROGENEOUS ROCK MASSES SUCH AS FLYSCH (V. Marinós, 2007, under publication)

Heterogeneous rockmasses are meant those with alternating layers of clearly different lithology types with significant differences in their strength properties. For flysch, a typical formation with heterogeneous rock masses, these alternations are consisting of sandstones and siltstones. Clay shales may be present. From a description of the lithology, structure and surface conditions of discontinuities (particularly of the bedding planes), choose a box in the chart. The selection of the structure should be based on the tectonic disturbance (undisturbed, slightly disturbed, strongly disturbed - folded, desintegrated, sheared), the proportion of siltstones against sandstones and the expressed or not stratification inside the siltstone layers. In the type IV and V when the thickness of sandstone beds exceed 50cm an increase of the GSI value by 5 is suggested. From type IV and the following types, the stratification planes are perceptible inside the siltstone mass. Locate the position in the box that corresponds to the conditions and estimate the average value GSI from the contours. The determination of the structure and the condition of discontinuities may range between two adjacent fields. Note that the Hoek - Brown criterion does not apply to structurally controlled failures. Where unfavourably oriented continuous weak planar discontinuities are present, these will dominate the behaviour of the rock mass. The strength of some rock masses is reduced by the presence of groundwater and this can be allowed for by a slight shift to the right in the columns for fair, poor and very poor conditions. Water pressure does not change the value of GSI and it is dealt with by using effective stress analysis.

STRUCTURE AND COMPOSITION

TYPE I. Undisturbed, with thick to medium thickness sandstone beds with sporadic thin films of siltstone. In shallow tunnels or slopes where confinement is poor the mode of the failure has a kinematic character controlled by the bedding planes and GSI is meaningless

TYPE II. Undisturbed massive siltstone (stratification planes are imperceptible) with sporadic thin interlayers of sandstones

TYPE III. Moderately disturbed sandstones with thin films of interlayers of siltstone

TYPE IV. Moderately disturbed rockmass with sandstone and siltstone similar amounts

TYPE V. Moderately disturbed siltstones with sandstone interlayers

TYPE VI. Moderately disturbed siltstones with sparse sandstone interlayers

TYPE VII. Strongly disturbed, folded rockmass that retains its structure, with sandstone and siltstone in similar extend

TYPE VIII. Strongly disturbed, folded rockmass, with siltstones and sandstone interlayers. The structure is retained and deformation - shearing is not strong

TYPE IX. Desintegrated rockmass that can be found in wide zones of faults or/and of high weathering. In this type mainly brittle material is present with some disturbed siltstones between rock pieces

TYPE X. Tectonically deformed intensively folded/ faulted siltstone or clay shale with broken and deformed sandstone layers forming an almost chaotic structure

TYPE XI. Tectonically strongly sheared siltstone or clayey shale forming a chaotic structure with pockets of clay. Thin layers of sandstone are transformed into small rock pieces. Ultimately the ground behavior is that of a soil

Mass deformation after tectonic disturbance

SURFACE CONDITIONS OF DISCONTINUITIES (Predominantly bedding planes)

VERY GOOD
Very rough, fresh unweathered surfaces

GOOD
Rough, slightly weathered or oxydised surfaces

FAIR
Smooth, moderately weathered and altered surfaces

POOR
Very smooth, occasionally siltkenised surfaces with compact coatings or fillings

VERY POOR
Very smooth, siltkenised or highly weathered surfaces with soft clay coating or fillings

DECREASE OF THE QUALITY OF DISCONTINUITIES

80	I	II																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
----	---	----	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--