

**ESTUDO GEOMECÂNICO DA AMPLIAÇÃO DA
PEDREIRA DO OUTÃO E RETROANÁLISE DE ALGUNS
FENÓMENOS DE INSTABILIDADE DE TALUDES**



VISA CONSULTORES

Fevereiro de 2020



Laboratório de Geomecânica
Edifício de Engenharia de Minas e Georrecursos
Instituto Superior Técnico
Avenida Rovisco Pais, 1
1049-001 Lisboa



+351 218 417 447



geomecanica.laboratorios@mg.ist.utl.pt



+351 218 419 035



http://cerena.ist.utl.pt/?page_id=5270

ESTUDO GEOMECÂNICO DA AMPLIAÇÃO DA PEDREIRA DO OUTÃO E RETROANÁLISE DE ALGUNS FENÓMENOS DE INSTABILIDADE DE TALUDES

INDICE DO TEXTO

1.	- INTRODUÇÃO	1
2.	AS ÁREAS DA NOVA PEDREIRA “VALE DE MÓS A”	1
2.1.	Constituição geográfica.....	1
2.2.	Análise da Geologia Estrutural.....	2
2.3	– Estratificação.....	5
2.4	- Diaclasamento.....	6
2.5	– Falhas Geológicas.....	7
2.6	Condicionamento da estrutura global dos taludes.....	8
3	SONDAGENS E ENSAIOS GEOMECÂNICOS	10
3.1	– Objetivos	10
3.2	Ensaio laboratoriais	12
3.2.1	Considerações Gerais	12
3.2.2	Descrição das amostras.....	12
4	RETROANÁLISES SOBRE OS ESCORREGAMENTOS OCORRIDOS NO OUTÃO	19
4.1	Generalidades	19
4.2	Retroanálises de deslizamentos na pedreira do Outão	20
4.3	Análise das principais instabilidades ocorridas na pedreira do Outão	22
4.4	Retroanálise da instabilização junto à sondagem S1	24
4.5	Retroanálise da instabilização junto à sondagem S2.....	26
4.6	Análise da estabilidade dinâmica na encosta Sul da zona ampliada da pedreira.....	27
5	Setorização da futura pedreira	30
6	Previsões de instabilidades futuras na área da pedreira	31
7	- Conclusões e Sugestões	33

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização da futura pedreira Vale de Mós A, com área licenciada de 98.67 ha, e área de ampliação de 18.56 ha, situada a Sul.....	2
Figura 2 - Aspeto geral das unidades geológicas identificadas.....	4
Figura 3- - Aspeto geral das unidades geológicas identificadas	5
Figura 4 - Inclinação geral das camadas, definida pela estratificação das rochas calcárias	6
Figura 5 - Caixa da falha F3 com cerca de 20cm de espessura	7
Figura 6 - Evidência da ocorrência da falha F2	7
Figura 7 - Evidência da falha F4.....	8
Figura 8 - Esquema demonstrativo dos mecanismos de escorregamento existentes (falhas).....	9
Figura 9 - Esquema demonstrativo dos mecanismos de escorregamento existentes (diaclasses).....	9
Figura 10 - Exemplo de conjugação das diaclasses com superfície de estratificação.	9
Figura 11 - Localização das sondagens (S1 com cota da boca 144m e S2 com cota da boca 260m)...	10
Figura 12 - Corte Geológico N-S que contém o furo da sondagem S1.....	11
Figura 13 - Corte Geológico N-S que contém o furo da sondagem S2.....	11
Figura 14 – Representação gráfica da variação da tensão de corte, em função do deslocamento tangencial induzido durante o ensaio, para os três níveis de tensão normal considerados para a amostra F1-A5, da segunda fase dos trabalhos laboratoriais.....	15
Figura 15 – Envolvente de Mohr-Coulomb obtida para a o provete F1-A15.....	16
Figura 16 – Principais tipos de taludes: encosta natural, de corte e artificial ou de aterro	19
Figura 17 – Imagem de rotura por deslizamento ocorrida no talude Sul Norte da pedreira, com as respetivas dimensões aproximadas.....	22
Figura 18 - Imagem aérea da zona Sul da pedreira, com indicação das duas sondagens S1 e S2, e as áreas (em azul) onde se depositaram os volumes de rocha instabilizados.....	23
Figura 19 – Principais características geológicas e topográficas da instabilidade ocorrida junto à sondagem S1 (corte vertical na direção N-S).....	24
Figura 20 – Principais características geológicas e topográficas da instabilidade ocorrida junto à sondagem S2 (corte vertical na direção N-S).....	26
Figura 21- Localização, corte vertical e características dos pontos A, B e C	28
Figura 22 – Proposta de setorização geotécnica da área total.....	31
Figura 23 – Zonamento de área suscetível de deslizamento nas imediações da zona de ampliação ..	32

Figura 24 - Ocorrência de uma zona de instabilidade futura provável, fora dos limites da pedreira e nas proximidades da Estrada Nacional 379-1	32
Figura 25 - Secção vertical da futura evolução da lavra da Pedreira.....	33
Figura 26 - Esquema de escavação da possível futura ampliação da Pedreira, com execução de bancadas sobrepostas.....	34

INDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Características das sondagens.....	10
Tabela 2 – Descrição dos provetes obtidos dos testemunhos de sondagens para realização dos ensaios de determinação da resistência à compressão uniaxial	13
Tabela 3 – Valores da resistência à compressão uniaxial obtidos nas amostras consideradas na primeira fase.....	14
Tabela 4 - Valores da resistência à compressão uniaxial obtidos nas amostras consideradas na segunda fase.....	14
Tabela 5 - Resultados dos ensaios de determinação da resistência ao corte das descontinuidades obtidas de blocos recolhidos das frentes de desmonte, na primeira fase dos trabalhos laboratoriais	16
Tabela 6 – Resultados dos ensaios de determinação da resistência ao corte das descontinuidades obtidas de testemunhos de sondagens da segunda fase dos trabalhos laboratoriais.....	17
Tabela 7 – Resultados dos ensaios de determinação da resistência à compressão uniaxial obtidas de testemunhos de sondagens dos trabalhos laboratoriais.....	18

ESTUDO GEOMECÂNICO DA AMPLIAÇÃO DA PEDREIRA DO OUTÃO E RETROANÁLISE DE ALGUNS FENÓMENOS DE INSTABILIDADE DE TALUDES

1. - INTRODUÇÃO

O conteúdo do presente relatório é baseado na respetiva proposta de prestação de serviços elaborada em 28-03-2019, intitulada “Estudos geotécnicos sobre as novas áreas de ampliação da Pedreira do Outão”.

O objetivo principal do presente estudo consiste em avaliar as condições geotécnicas de fusão das duas pedreiras (Vale de Mós A e Vale de Mós B) e ampliação da área de exploração para Sul. Também é pretendida a expansão das suas áreas de exploração, através de ampliação para Sul.

Para que tal evolução logística seja conseguida é importante garantir a estabilidade dos novos taludes a criar para a extração do minério, sem deixar de controlar os impactes ambientais resultantes da utilização de explosivos nas atividades de escavação, nomeadamente vibrações nos terrenos e estruturas próximas, além de ruídos, poeiras e até a estabilidade das encostas na zona sul, evitando as quedas de blocos rochosos ao longo da encosta montanhosa.

A abordagem do problema envolve a caracterização geomecânica das condições físicas do maciço rochoso afetado, nomeadamente as suas descontinuidades, a estratificação, o grau de alteração e os estados de tensão e de deformação que o afetam durante a vida do empreendimento. Já as condições operacionais de exploração do maciço rochoso envolvem com detalhe a caracterização da geometria dos novos taludes a criar (altura e inclinação) tendo enorme importância o dimensionamento e a composição das cargas explosivas a utilizar para a respetiva escavação.

Nos capítulos seguintes são abordados estes aspetos da problemática criada com a nova disposição geográfica das áreas dos maciços rochosos a explorar, tendo em vista garantir a respetiva contribuição para a continuidade da atividade industrial da empresa Secil, se possível em melhores condições do que operava no passado.

2. AS ÁREAS DA NOVA PEDREIRA “VALE DE MÓS A”

2.1. Constituição geográfica

A ampliação das zonas disponíveis para a futura exploração da jazida mineral do Outão, cuja atividade data desde 1930, é perfeitamente justificada em consequência das limitações de

vária ordem que se verificavam nas anteriores áreas de exploração, designadamente as reduzidas dimensões das reservas de rocha calcária disponível.

Concretamente havia a assinalar duas áreas contíguas mas distintas, designadas por Vale de Mós A e Vale de Mós B, que respetivamente possuem as áreas licenciadas de 53.94 ha e de 44.73 ha, atingindo um total de 98.67 ha.

A nova conceção envolveu um acréscimo de área com 18.56 ha e a libertação de uma parte já explorada com 34.09 ha, ficando assim a existir uma área total explorável com 83.14 ha, a que é dada a designação oficial de Vale de Mós A (ver Figura 1).



Figura 1 - Mapa de localização da futura pedreira Vale de Mós A, com área licenciada de 98.67 ha, e área de ampliação de 18.56 ha, situada a Sul

2.2. Análise da Geologia Estrutural

Para melhor se compreender a geologia e geomecânica que existem na Arrábida, e em particular a Pedreira de “Vale de Mós A”, sabe-se que o reconhecimento geológico de superfície identificou quatro formações presentes nessa área que são designadas por J^2_P , J^3_{Ar} , J^3_A e J^3_{Ra} .

Em termos litológicos, pode-se considerar a existência de duas séries de formações, uma representada por calcários cristalinos (J^2_P) e outra representada por uma alternância de argilas, grés, conglomerados, margas e calcários (J^3_{Ar} , J^3_A e J^3_{Ra}).

A formação J^2_P (Calcários de Pedreiras), com cerca de 230 metros de espessura, ocorre no extremo Sul da pedreira, sendo representada por calcários micríticos com pelóides, bioclastos e raros intraclastos. Trata-se de uma sequência de bancadas métricas de calcários cristalinos, bastante compactos, de textura micrítica, de granularidade fina e de tons esbranquiçados a acinzentados.

A formação J^3_{Ar} (Margas, Argilas, Calhaus Negros e Conglomerados de Arrábida), é representada por uma alternância de conglomerados (conhecidos também por “Brecha da Arrábida”), calcários argilosos intraclásticos (calhaus negros), margas e argilas, apresentando o conjunto tonalidades avermelhadas.

A formação J^3_A (Calcários de Azóia), com uma espessura da ordem da dezena de metros, é representada por bancadas de calcários micríticos e biomicríticos e por calcários oolíticos. Finalmente a formação J^3_{Ra} (Argilas, grés, conglomerados e calcários de Vale da Rasca), predominantemente carbonatada, é constituída por um complexo de calcários micríticos, margas arenosas, arenitos, margas, argilas e conglomerados calcários que, progressivamente, se vão carregando de quartzo para o topo da série, já fora da área da pedreira.

Da visita ao local, identificaram-se as diferentes formações referidas, e apresenta-se na figura seguinte os limites geológicos referidos bem como as diversas falhas identificadas no terreno e que têm condicionado os escorregamentos que se têm verificado.

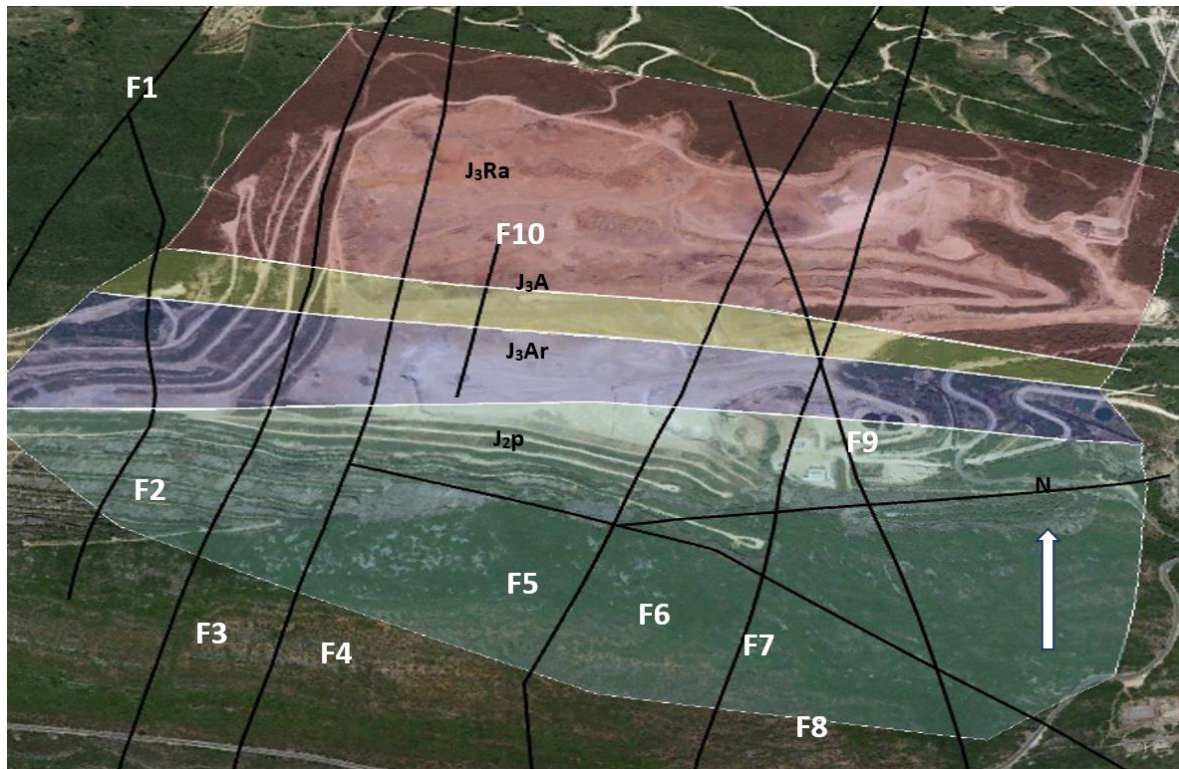


Figura 2 - Aspeto geral das unidades geológicas identificadas

Para efeitos do estudo geotécnico, essas 6 litologias podem ser agrupadas em duas unidades geológicas principais: “calcários” e “margas”, devido às suas características litológicas, conforme se discrimina de seguida (Figura 3):

Calcários cristalinos compactos;	}	Calcários
Calcários cristalinos;		
Margas;	}	Margas
Margas e calcários margosos;		
Grés e conglomerados;		
Margas e conglomerados.		

Seguem-se fotos dessas formações geológicas mais características da zona de estudo.



Calcários cristalinos compactos



Calcários cristalinos



Margas



Margas e calcários margosos



Grés e conglomerados



Margas e conglomerados

Figura 3- - Aspeto geral das unidades geológicas identificadas

2.3 – ESTRATIFICAÇÃO

Grande parte dos deslizamentos que têm ocorrido nas frentes de desmonte são causados devido ao facto da estratificação coincidir com o sentido de desmonte (frente de escavação).

Os deslizamentos são por isso evidentes nas unidades calcárias, onde a estrutura por camadas é mais marcada.



Figura 4 - Inclinação geral das camadas, definida pela estratificação das rochas calcárias

Já nas margas, a instabilidade dos taludes é essencialmente provocada pelo carácter incoerente das unidades mais margosas, que possuem características friáveis. Nas unidades mais calcárias que ocorrem intercaladas nas margas, verificam-se deslizamentos semelhantes às unidades calcárias como era de supor.

2.4 - Diaclasamento

As diaclases são exclusivas das unidades calcárias que apresentam um comportamento frágil, comparativamente com as margas que apresentam um comportamento mais dúctil. As diaclases ocorrem individualizadas nas bancadas de calcários, raramente passando para mais do que uma bancada, pelo que possuem extensões métricas a sub-métricas, restritas à espessura das bancadas de calcários.

Os comprimentos das diaclases são variáveis, podendo atingir vários metros na mesma bancada. De um modo geral, os comprimentos são métricos, sendo intersectados por diferentes diaclases, levando à individualização de blocos pela combinação com a estratificação.

Os espaçamentos entre diaclases também são variáveis, geralmente decimétricos, embora existam também alguns espaçamentos métricos que originam a individualização de blocos de grandes dimensões.

Foram identificadas duas famílias de diaclases no terreno, provavelmente conjugadas e aproximadamente perpendiculares à estratificação. Embora tenham sido observadas pontualmente apenas uma das famílias de diaclases em algumas zonas, não parece existir qualquer domínio de nenhuma das famílias de diaclases, sendo comum a presença de ambas as famílias. Também não foram identificados quaisquer preenchimentos dentro das diaclases. As atitudes gerais das duas famílias de diaclases são as seguintes:

Família de diaclases 1: N25-55°E, 72-85°SE;

Família de diaclases 2: N30-50°W, 60-85°SW.

2.5 – Falhas Geológicas

Da observação aérea tridimensional proporcionada pelo Google Earth, complementada pelas observações do terreno envolvente e escarpas da pedreira, foi possível identificar um conjunto de fraturas que se encontram marcadas nas Figuras seguintes.

Estas falhas estão bem evidenciadas nos taludes, algumas delas com caixa de falha, nomeadamente a falha F3. As figuras seguintes mostram aspetos particulares das mesmas.



Figura 5 - Caixa da falha F3 com cerca de 20cm de espessura



Figura 6 - Evidência da ocorrência da falha F2

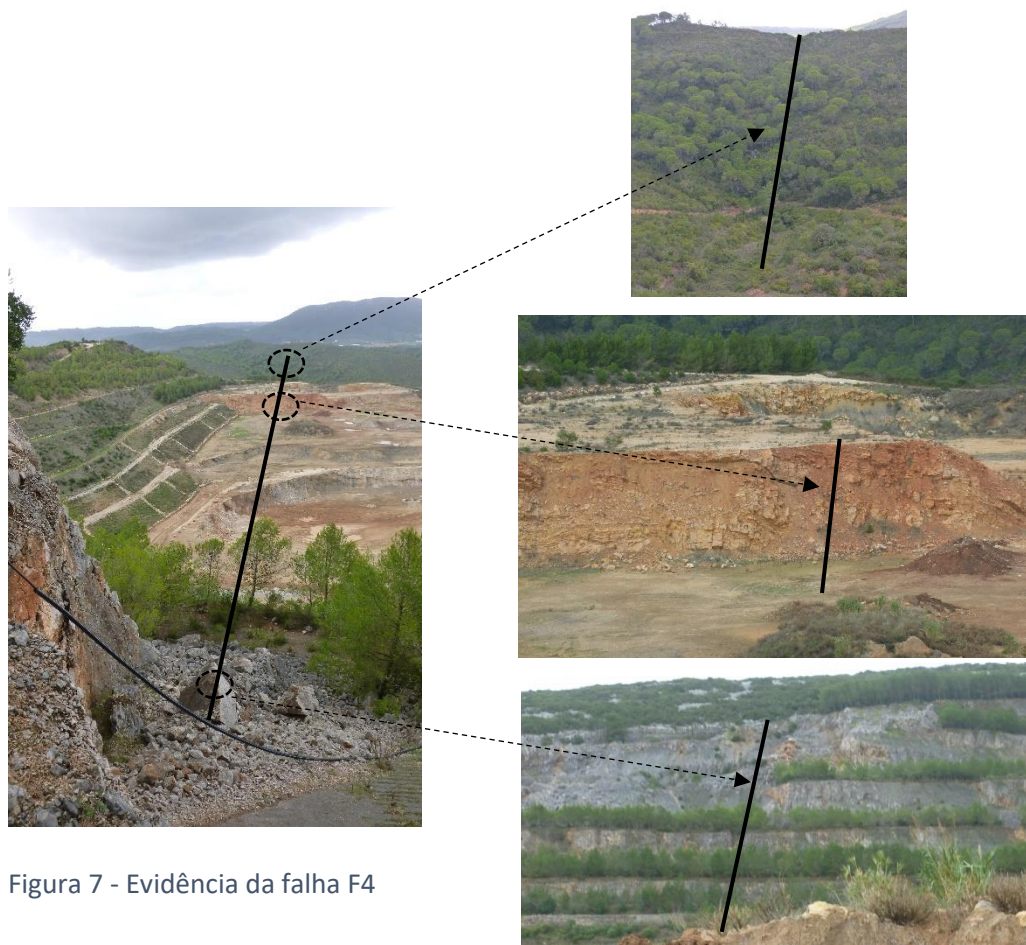


Figura 7 - Evidência da falha F4

2.6 Condicionamento da estrutura global dos taludes

Face aos desenvolvimentos anteriores, a conjugação simultânea das diversas superfícies de compartimentação envolvidas, leva a que se verifique forte instabilidade de taludes que põem em perigo as condições normais de circulação e de operação.

A exposição aos agentes atmosféricos e a própria descompressão das rochas envolvidas, adicionadas às diaclases e falhas, fazem com que as condições propícias a deslizamentos ocorram.

Em primeira análise, e como já referido, verifica-se que existem duas condições que condicionam fortemente a estabilidade da rocha e que são a estratificação e sua inclinação. Desta forma, estes dois elementos quando combinados com a superfície de corte do talude e com as falhas sub-verticais ocorrentes, geram deslizamentos conforme se pode ver abaixo.

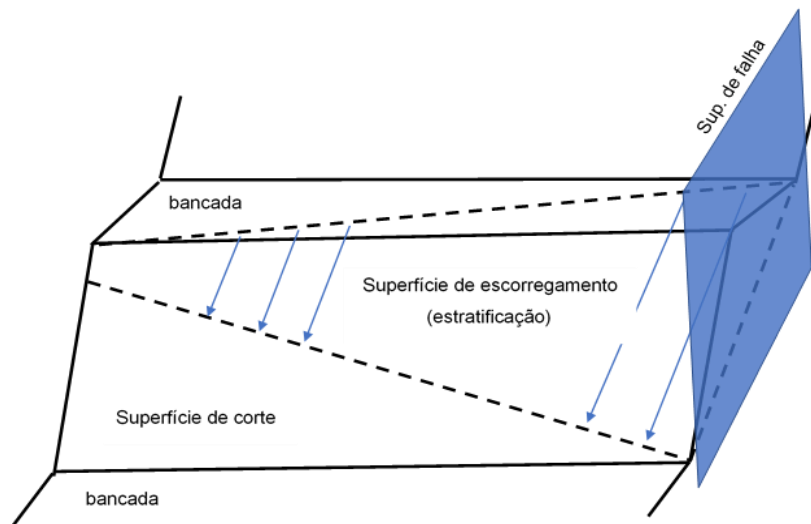


Figura 8 - Esquema demonstrativo dos mecanismos de escorregamento existentes (falhas).

Quando temos o sistema de diaclasamento também envolvido, podem ser gerados escorregamentos de menor dimensão e obedecendo ao mecanismo descrito de seguida.

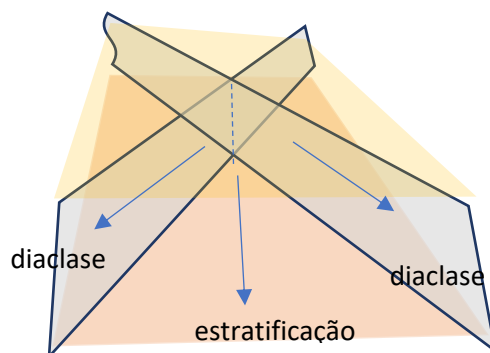


Figura 9 - Esquema demonstrativo dos mecanismos de escorregamento existentes (diaclases)



Figura 10 - Exemplo de conjugação das diaclases com superfície de estratificação.

3 SONDAGENS E ENSAIOS GEOMECÂNICOS

3.1 – Objetivos

Baseados nos conhecimentos envolvidos na instabilidade do maciço rochoso que é patente em dois deslizamentos de taludes ocorridos no passado, foram realizadas nesses locais duas sondagens mecânicas inclinadas a 45º para Sul, com recuperação de amostras cilíndricas das quais foram selecionados provetes para realização de ensaios geomecânicos.

Também se aproveitou essa fonte de informação para promover o reconhecimento das propriedades geomecânicas das rochas envolvidas na futura escavação de taludes na zona Sul da pedreira, para onde se desenvolverá a ampliação da área de exploração futura.

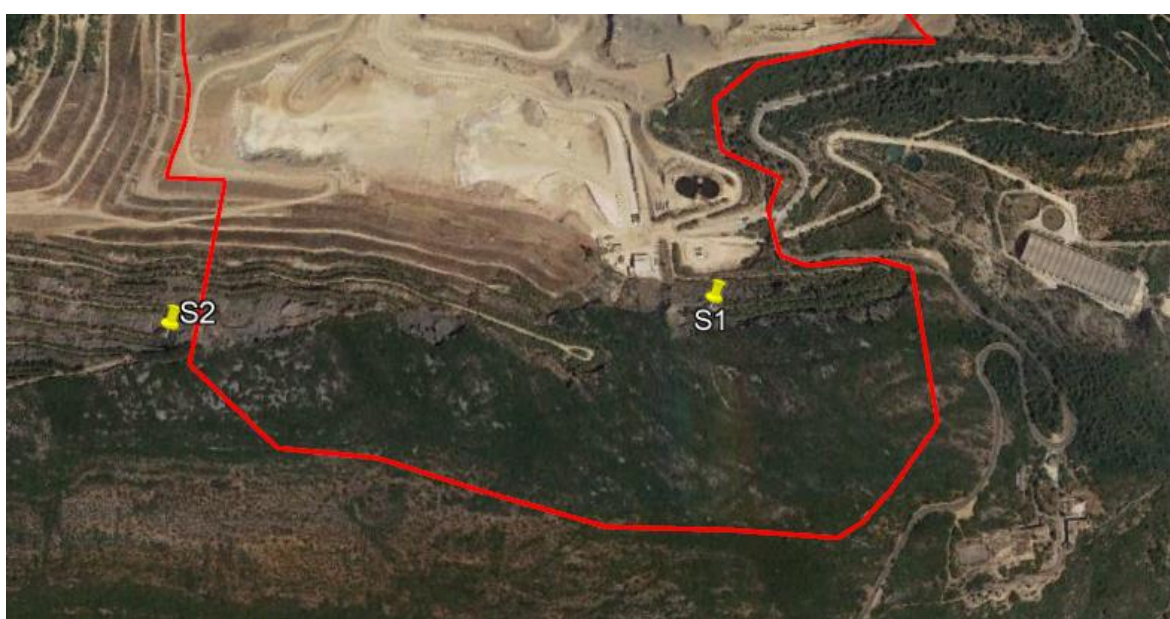


Figura 11 - Localização das sondagens (S1 com cota da boca 144m e S2 com cota da boca 260m)

As sondagens de prospeção realizadas têm as seguintes características:

Tabela 1 – Características das sondagens

Sondagem	Coordenadas	Inclinação	Cota	Prof.	Datas
S1	M= - 70610 P= - 130160	45° S	144m	150,4m	13/09/2019
S2	M= - 71340 P= - 130125	45° S	260m	88,7m	24/09/2019

De seguida apresenta-se o perfil de cada sondagem sintetizado, com marcação das superfícies de estratificação, das falhas intersetadas e uma tentativa de correlação entre elas.

Como referido anteriormente, a formação J3Ar assenta em discordância sobre J2p, o que parece evidente pela topografia e respetivas camadas.

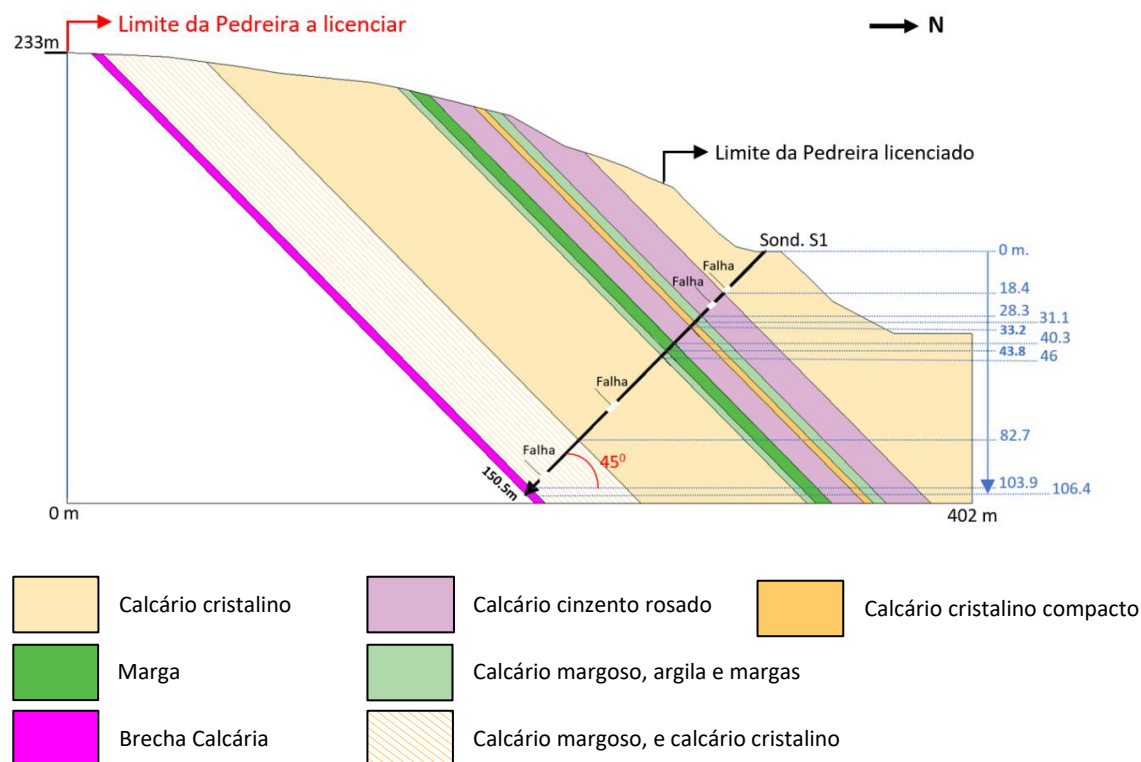


Figura 12 - Corte Geológico N-S que contém o furo da sondagem S1

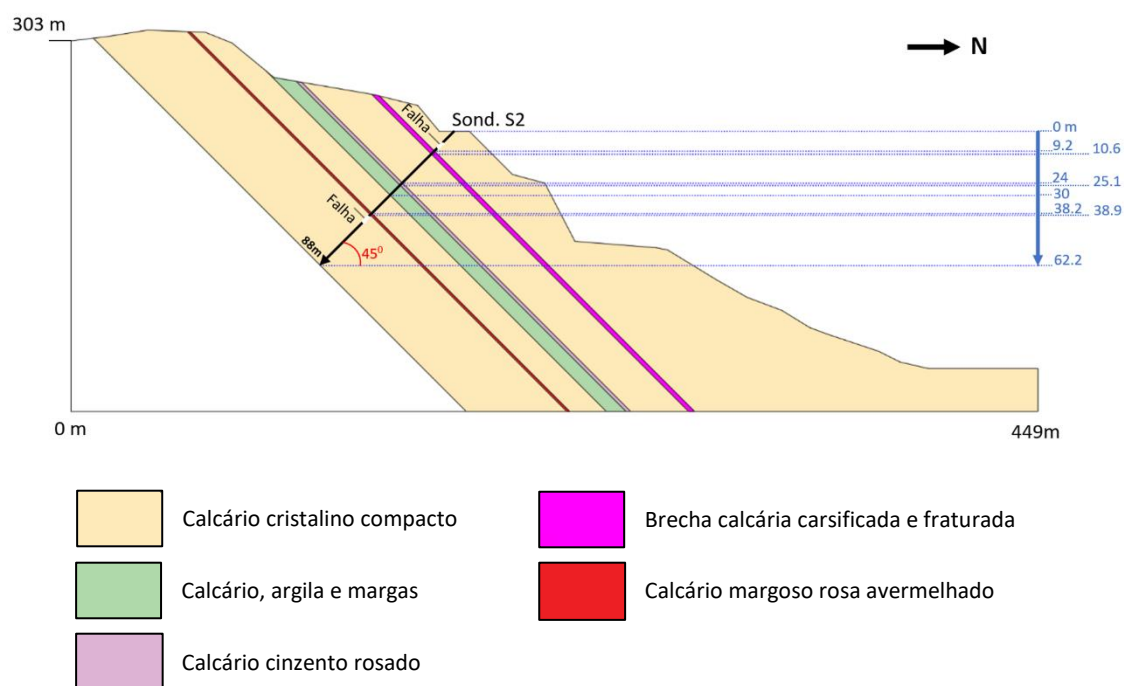


Figura 13 - Corte Geológico N-S que contém o furo da sondagem S2

3.2 Ensaaios laboratoriais

3.2.1 Considerações Gerais

Com o objetivo de se proceder à caracterização mecânica dos materiais rochosos, foram desenvolvidos diversos ensaios geomecânicos no GEOLAB do Instituto Superior Técnico, sobre amostras rochosas obtidas em duas fases. Numa primeira fase, foram consideradas amostras recolhidas diretamente das frentes de desmonte da pedreira. Esta recolha, efetuada em 16 de maio de 2019, considerou a obtenção de blocos de calcário facilmente transportáveis, tendo sido selecionadas amostras para determinação da resistência à compressão uniaxial e ensaio de deslizamento de diaclases. Numa segunda fase, foi possível obter amostras não perturbadas de diferentes litologias, obtidas de duas sondagens efetuadas em setembro de 2019, nas imediações da atual área de exploração. De igual forma, foram desenvolvidos ensaios de determinação da resistência à compressão uniaxial, bem como ensaios de resistência ao corte, considerando as famílias de descontinuidades presentes.

As secções que se seguem apresentam uma descrição sucinta das amostras e dos ensaios efetuados, seguindo-se um resumo dos resultados obtidos. Resta referir que os ensaios foram desenvolvidos de acordo com os métodos da Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (ISRM Suggested Methods, Ulusay & Hudson, 2007).

3.2.2 Descrição das amostras

Conforme referido anteriormente, os ensaios de caracterização dos materiais geológicos da Pedreira do Outão foram desenvolvidos considerando uma primeira fase onde foram recolhidas amostras de calcário das frentes de exploração e uma segunda fase, onde as amostras foram obtidas por meio de furos de duas sondagens (amostras intactas),

Assim, na primeira fase, dos blocos recolhidos em campo foi possível obter 4 provetes para determinação da resistência à compressão uniaxial e 5 diaclases para desenvolvimento do ensaio de resistência ao corte direto.

Na segunda fase, dos testemunhos de sondagens a que se teve acesso, foram obtidos sete provetes de diferentes litologias, as quais se encontram resumidas na Tabela 2.

Tabela 2 – Descrição dos provetes obtidos dos testemunhos de sondagens para realização dos ensaios de determinação da resistência à compressão uniaxial

Amostra	Furo	Referência	Litologia
1	1	7	Argila margosa creme
2	1	17	Calcário compacto
3	1	20	Brecha
4	1	21	Brecha
5	2	25	Calcário compacto
6	2	28	Calcário compacto
7	2	29	Calcário compacto

Nesta fase, foram ainda preparados 11 provetes para desenvolvimento do ensaio de determinação da resistência ao corte direto.

3.2.3 Ensaios de determinação da resistência à compressão uniaxial

O ensaio de compressão uniaxial compreende a determinação do valor da tensão máxima (σ_c), calculado a partir do registo da carga máxima de rotura, quando o provete é solicitado uniaxialmente até à rotura.

Para os 4 provetes obtidos na primeira fase, foram obtidos os resultados resumidos na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores da resistência à compressão uniaxial obtidos nas amostras consideradas na primeira fase

Amostra	Resist. Compressão Uniaxial, σ_c (MPa)
1	31.26
2	77.67
3	36.88
4	30.11

A Tabela 4 resume os resultados obtidos para os provetes obtidos dos testemunhos de sondagens, na segunda fase do trabalho.

Tabela 4 - Valores da resistência à compressão uniaxial obtidos nas amostras consideradas na segunda fase.

Amostra	Furo	Referência	Resist. Compressão Uniaxial, σ_c (MPa)
1	1	7	10.51
2	1	17	72.38
3	1	20	9.25
4	1	21	9.69
5	2	25	112.55
6	2	28	71.00
7	2	29	91.04

De acordo com os resultados obtidos, verifica-se que os provetes de amostras recolhidas nas frentes de produção da área de exploração apresentam, regra geral, valores muito abaixo daqueles da resistência à compressão uniaxial obtidos para os provetes recolhidos dos testemunhos de sondagens. Esta constatação estará certamente relacionada com o facto de as amostras recolhidas na primeira fase terem resultado das atividades de produção, em particular, terem sido sujeitas a solicitações dinâmicas por ação das detonações com recurso a substâncias explosivas que produzem dano permanente no maciço remanescente.

3.2.4 - Ensaios de determinação da resistência ao corte direto (deslizamento de diaclases).

O ensaio de corte direto compreende a aplicação de tensões de corte (τ) progressivamente mais elevadas, para um determinado nível de tensão normal (à diaclase, σ). Assim, para cada provete ensaiado, foram aplicados três diferentes níveis de carga normal que, em função da área, corresponderão a três diferentes níveis de tensão normal.

Refere-se que, para cada ensaio efetuado, foi considerado, no mínimo, um deslocamento tangencial de 7 mm.

A Figura 13 apresenta, a título exemplificativo, uma representação gráfica da variação da tensão de corte em função do deslocamento tangencial induzido, para os três níveis de tensão normal considerados para um dos provetes ensaiados.

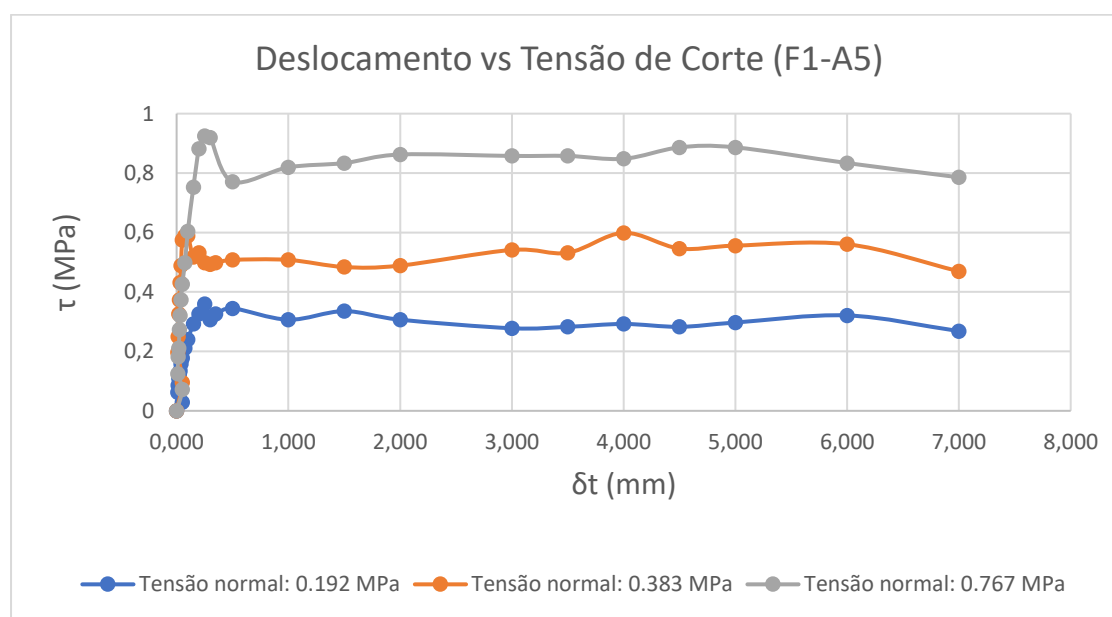


Figura 14 – Representação gráfica da variação da tensão de corte, em função do deslocamento tangencial induzido durante o ensaio, para os três níveis de tensão normal considerados para a amostra F1-A5, da segunda fase dos trabalhos laboratoriais.

Após a determinação das resistências ao corte para cada nível de tensão normal, por meio de regressão linear simples é traçada a envolvente de Mohr-Coulomb (Figura 2).

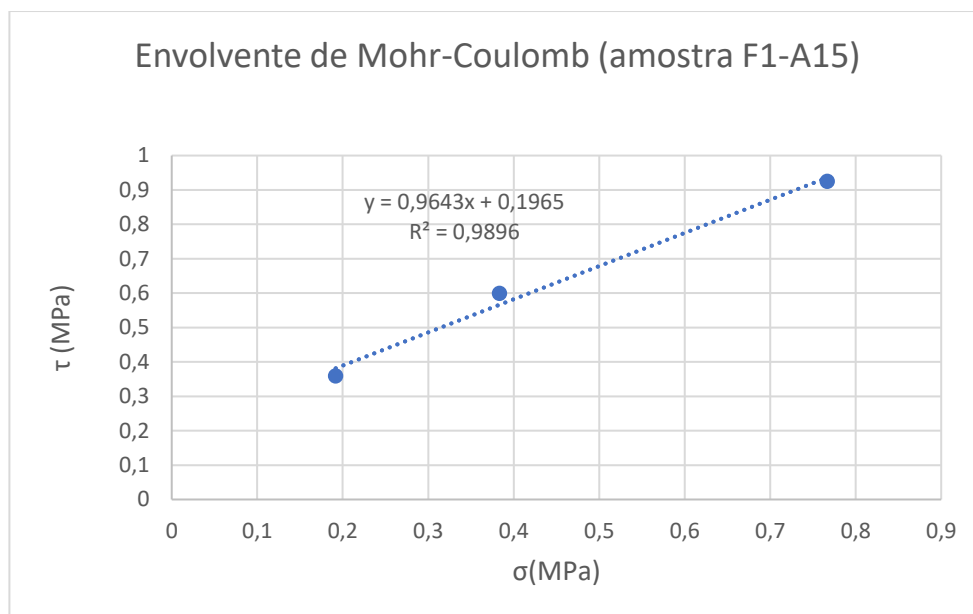


Figura 15 – Envolvente de Mohr-Coulomb obtida para a o provete F1-A15.

Determinada a envolvente de Mohr-Coulomb é possível obter-se dois parâmetros de resistência essenciais à caracterização mecânica das descontinuidades, a saber: coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ). A Tabela 5 resume os resultados obtidos para os provetes obtidos na primeira fase dos trabalhos de laboratório e a Tabela 6, aqueles obtidos para os provetes da segunda fase.

Tabela 5 - Resultados dos ensaios de determinação da resistência ao corte das descontinuidades obtidas de blocos recolhidos das frentes de desmorte, na primeira fase dos trabalhos laboratoriais

Amostra	σ (MPa)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	c (MPa)	ϕ (°)
1	0.09	0.23	0.19	24.40
	0.18	0.28		
	0.35	0.35		
2	0.14	0.15	0.06	41.53
	0.28	0.44		
	0.56	0.56		

4	0.08	0.30	0.23	35.54
	0.16	0.31		
	0.32	0.47		
6	0.16	0.45	0.35	28.65
	0.32	0.51		
	0.63	0.70		
8	0.09	0.26	0.13	59.48

Tabela 6 – Resultados dos ensaios de determinação da resistência ao corte das descontinuidades obtidas de testemunhos de sondagens da segunda fase dos trabalhos laboratoriais.

Amostra	σ (MPa)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	c (MPa)	ϕ (°)
F1-A10	0.18	0.42	0.21	47.72
	0.37	0.60		
	0.74	1.03		
F1-A7	0.17	0.50	0.29	47.12
	0.35	0.62		
	0.70	1.05		
F1-A4	0.17	0.57	0.41	44.73
	0.34	0.76		
	0.67	1.07		
F1-A17	0.17	0.40	0.31	44.69
	0.33	0.67		
	0.66	0.91		
F1-A18	0.15	0.46	0.36	43.91
	0.31	0.72		
	0.62	0.93		
F1-A8	0.18	0.65	0.49	35.13
	0.35	0.68		
	0.71	1.00		

F2-A22	0.19	0.17	0.08	25.59
	0.38	0.27		
	0.76	0.44		
F2-A24	0.15	0.28	0.23	45.30
	0.31	0.60		
	0.61	0.78		

Conforme se pode verificar, ambas as tabelas revelam resultados consistentes, quer ao nível dos valores de resistência, quer ao nível dos valores de coesão e de ângulo de atrito.

Os resultados dos ensaios são apresentados em anexo a este relatório e constam dos boletins de ensaio elaborados pelo CERENA - Laboratório de Geomecânica.

Em síntese, obtiveram-se os seguintes resultados:

Tabela 7 – Resultados dos ensaios de determinação da resistência à compressão uniaxial obtidas de testemunhos de sondagens dos trabalhos laboratoriais.

Amostra	Local	Referência Profundidade	Litologia	Resist. Compressão Uniaxial, σ_c (MPa)
1	Frente			31.26
2	Frente			77.67
3	Frente			36.88
4	Frente			30.11
1	S1	7	Argila margosa creme	10.51
2	S1	17	Calcário compacto	72.38
3	S1	20	Brecha	9.25
4	S1	21	Brecha	9.69
5	S2	25	Calcário compacto	112.55
6	S2	28	Calcário compacto	71.00
7	S2	29	Calcário compacto	91.04

4 RETROANÁLISES SOBRE OS ESCORREGAMENTOS OCORRIDOS NO OUTÃO

4.1 Generalidades

Para que ocorra um escorregamento em qualquer talude é necessário que a relação entre a resistência média ao corte do maciço rochoso e as tensões médias de corte verificadas na superfície potencial de rotura tenham decrescido, desde um valor inicial maior que 1 até à unidade, no instante do escorregamento. O decréscimo nesta relação é sempre gradual, envolvendo uma deformação progressiva do volume do material situado acima da superfície potencial de escorregamento, seguido de um movimento descendente de todo esse volume por ação da gravidade.

Ao se analisar a estabilidade de taludes, torna-se importante que seja realizada uma ampla investigação geotécnica da área, de maneira que se possam determinar os possíveis mecanismos de rotura propensos de acontecer. É também interessante efetuar a avaliação dos riscos e das consequências decorrentes de uma eventual rotura, após conhecer a situação anterior do talude, como mostra a Figura 15.

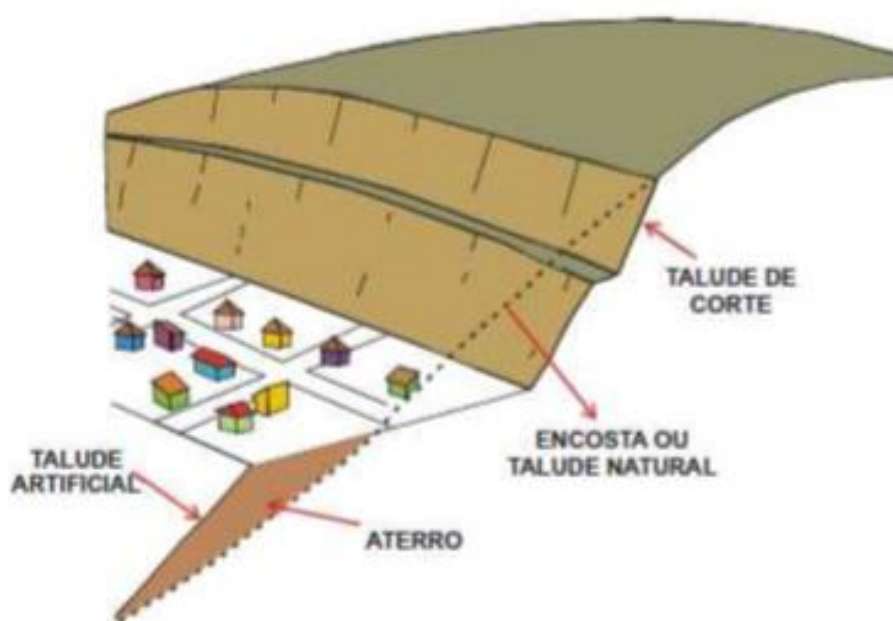


Figura 16 – Principais tipos de taludes: encosta natural, de corte e artificial ou de aterro

Os tipos de movimentos ou deslizamentos de maciços terrosos ou rochosos, nem sempre se apresentam bem caracterizados e definidos, existindo diversas propostas de sistemas de classificação, sendo a de Varnes (1978) a mais utilizada internacionalmente.

Ela subdivide os movimentos em: queda, tombamento, escorregamento, expansão lateral, escoamento e complexo, sendo aplicável a solos e rochas, conforme a Tabela seguinte.

De interesse para o presente estudo, são as instabilidades de rochas e blocos rochosos em escorregamentos translacionais.

Tabela – Classificação de Varnes sobre tipos de movimentos e de materiais rochosos envolvidos nas análises da estabilidade de taludes

TIPO DE MOVIMENTO			TIPO DE MATERIAL		
			Rocha	Solo (engenharia)	
				Grosseiro	Fino
Quedas			De rocha	De detritos	De terra
Tombamentos			De rocha	De detritos	De terra
Escorregamento	Rotacional	Poucas unidades	Abatimento de rocha De blocos rochosos De rocha	Abatimento de detritos De blocos de detritos De detritos	Abatimento de terra De blocos de terra De terra
	Translacional	Muitas unidades			
Expansões laterais			De rocha	De detritos	De terra
Corridas/Escoamentos			De rocha	De detritos	De terra
Complexos: combinação de dois ou mais dos principais tipos de movimentos					

4.2 Retroanálises de deslizamentos na pedreira do Outão

Como exemplo de uma simples retroanálise de instabilidade ocorrida na zona Norte da Pedreira, num talude rochoso de dimensões reduzidas, apresenta-se o exemplo constante da Figura 17, com as características de uma análise tridimensional.

As dimensões do bloco rochoso afetado são de 6m x 1.5m x 1.5m, tendo deslizado a partir de um plano de rotura inclinado com $\beta = 32^\circ$.

O respectivo fator de segurança será calculado a partir da expressão seguinte:

$$F_s = \frac{W \cdot \cos \beta \cdot \operatorname{tg} \phi + A \cdot c}{W \cdot \sin \beta}$$

onde W representa o peso do bloco que deslizou ($13.5 \text{ m}^3 \times 25 \text{ kN/m}^3 = 337.5 \text{ kN}$), A é área do plano de deslizamento (9 m^2) e as grandezas a determinar ϕ e c são, respetivamente, o ângulo de atrito e a coesão da superfície de deslizamento que viabilizou essa instabilização.

A situação de equilíbrio limite é alcançada quando o fator de segurança atinge o valor 1, pelo que efetuando a substituição de valores na expressão do fator de segurança, obtem-se a seguinte relação:

$$1 = 1.58 \operatorname{tg} \phi + 0.05 c$$

Se existisse outro caso de rotura com idêntico tipo de rocha e de instabilidade de taludes, poder-se-ia obter uma segunda equação similar, a qual permitiria obter os valores de ϕ e c respetivos.

Aproximadamente pode-se considerar a intervenção igual dos dois parâmetros ϕ e c na expressão da resistência ao corte, obtendo-se para este caso os seguintes valores: um ângulo de atrito de 17.5° e uma coesão de 10 kPa.

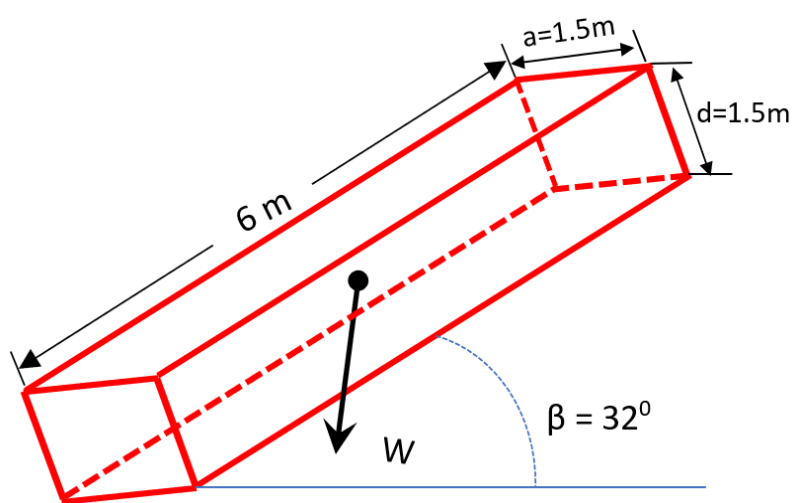
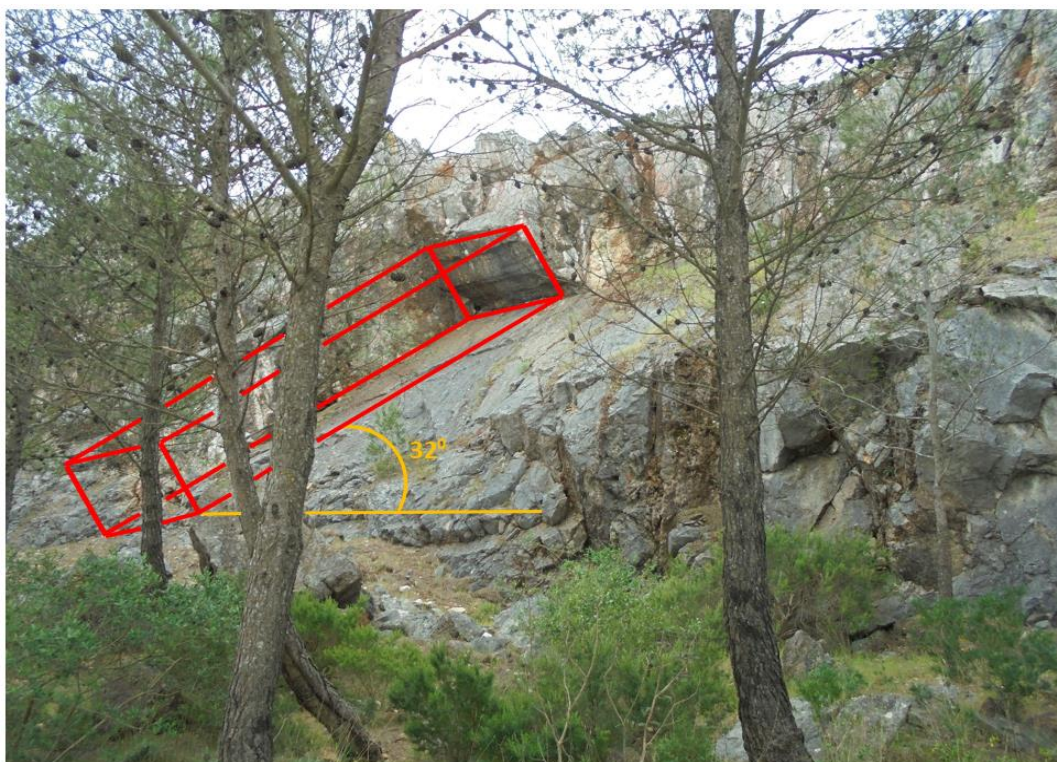


Figura 17 – Imagem de rotura por deslizamento ocorrida no talude Sul Norte da pedreira, com as respetivas dimensões aproximadas

4.3 Análise das principais instabilidades ocorridas na pedreira do Outão

Para além de pequenas instabilizações de taludes que ocorreram nas bancadas de desmonte, por isso não tendo mais de 10 m de altura, há a registar alguns deslizamentos de maior dimensão, envolvendo alturas superiores. Estes últimos foram assinalados principalmente na

zona Sul da pedreira, um deles próximo das instalações de apoio da pedreira, dos escritórios e estacionamento da empresa e outro mais a Oeste, em cotas mais elevadas.

Dada a importância da encosta Sul, pela nova área de exploração obtida, foi decidido mandar executar sondagens nessas duas posições, a que foram dadas as designações S1 e S2 (ver Cap. 3, Figuras 12 e 13).

A Figura 18 mostra as referidas localizações, junto às quais foram adicionadas as zonas onde se depositaram os materiais rochosos resultantes dessas instabilizações.

As ordens de grandeza dessas zonas de escombros são as seguintes: para o furo S1, a área atinge 2 298 m² e o seu perímetro é de 227 m; já para o furo S2 a área alcança 1 507 m² e um perímetro de 224m.



Figura 18 - Imagem aérea da zona Sul da pedreira, com indicação das duas sondagens S1 e S2, e as áreas (em azul) onde se depositaram os volumes de rocha instabilizados

4.4 Retroanálise da instabilização junto à sondagem S1

As instabilidades de taludes que envolviam mais de uma bancada não foram frequentes nesta pedreira e as suas características principais foram corrigidas com a proteção de pessoas e veículos nas suas imediações, evitando que se multiplicassem os danos ao maciço rochoso.

Numa fase em que a área de exploração vai ser ampliada na zona Sul, torna-se conveniente projetar adequadamente os futuros trabalhos de escavação de bancadas com o propósito de obter condições de segurança favoráveis à atividade extrativa.

A execução de duas sondagens localizadas nas proximidades dessas instabilizações constitui um fator importante para obtenção de conhecimentos favoráveis a essa segurança, pelo melhor conhecimento do sub-solo nessas áreas de futura atividade extrativa. Um outro aspecto de interesse refere-se aos estudos de retroanálise das roturas ocorridas no passado, na medida em que permite quantificar as características de resistência mecânica do maciço rochoso já explorado e permite extrapolar essas propriedades para a concepção e projeto das novas áreas de exploração.

Iniciando esta análise para a área vizinha à sondagem S1, foi possível estimar as características físicas dos taludes que se instabilizaram nas suas imediações, conforme mostra a Figura 19.

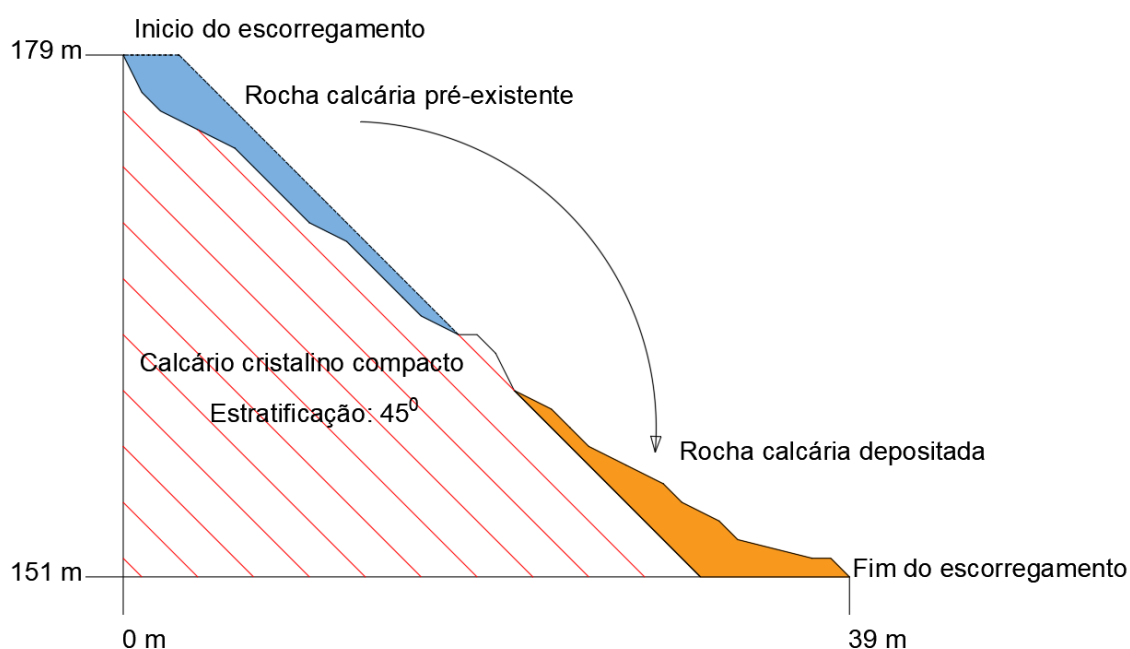


Figura 19 – Principais características geológicas e topográficas da instabilidade ocorrida junto à sondagem S1 (corte vertical na direção N-S)

Com o objetivo de quantificar esse fenômeno de instabilidade, utilizou-se a expressão geral referente ao Fator de Segurança do talude, visando roturas bidimensionais de espessura unitária, que é a seguinte:

$$F_s = \frac{cA + (W \cos \beta - kW \sin \beta - U) \cdot \tan \phi}{W \sin \beta + kW \cos \beta}$$

Onde: c e ϕ representam a coesão e o ângulo de atrito da rocha afetada pela rotura, A é a dimensão da face rochosa que suporta a pressão da água subterrânea, W o peso da volume deslizado, β o ângulo de inclinação do plano de rotura, k o coeficiente sísmico de vibração das ondas de tensão que são libertadas pelos desmontes com explosivos, e U o impulso hidráulico das águas infiltradas no talude.

Esta expressão permite calcular as situações mais desfavoráveis, podendo intervir simultaneamente a ação do impulso hidráulico U e as vibrações transmitidas aos terrenos (coeficiente k).

No caso presente obtiveram-se, para a situação mais desfavorável, os valores numéricos das seguintes variáveis:

- A = 24.36 m
- W = 787.5 kN
- $\beta = 38^\circ$
- k = 0.5 (de acordo com o critério de Thonen & Windes)
- Z = 15 m
- $U = \frac{\gamma_a Z^2}{4 \sin \beta} = 922. \text{ kN}$

O resultado desta simulação forneceu a seguinte relação:

$$F_s = 0.05 c - 1.25 \tan \phi$$

Para a situação de equilíbrio limite será $F_s = 1$, sendo possível obter numerosas soluções como as seguintes:

- c = 1 kPa $\phi = 37.25^\circ$
- c = 29.1 kPa $\phi = 20^\circ$

$$c = 34.4 \text{ kPa} \quad \phi = 30^\circ$$

etc.

A escolha da opção mais representativa será possível com uma segunda retroanálise conjugada, de acordo com o parágrafo seguinte.

4.5 Retroanálise da instabilização junto à sondagem S2

As características da zona da pedreira que é anexa à sondagem S2 podem ser referenciadas como mostra a Figura 20. As principais variáveis intervenientes na mesma equação do fator de segurança acima referida são:

$$- A = 15.0 \text{ m}$$

$$- W = 510 \text{ kN}$$

$$- \beta = 27^\circ$$

$$- k = 0.5$$

$$- Z = 6.8 \text{ m}$$

$$- U = \frac{\gamma a Z^2}{4 \sin \beta} = 204.8 \text{ kN}$$

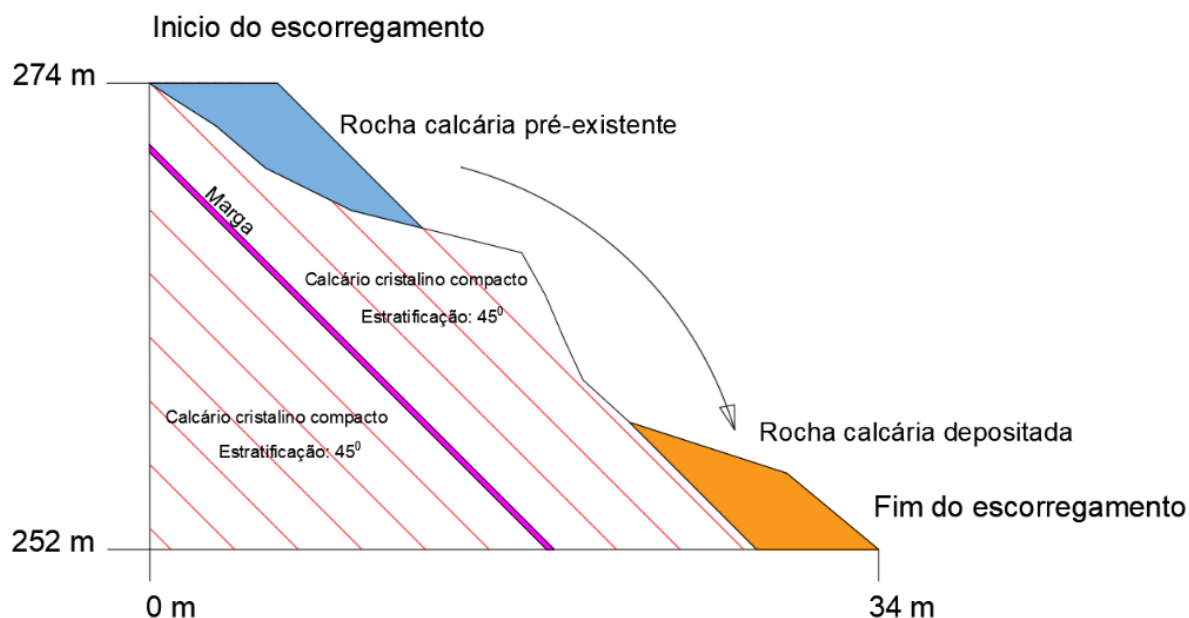


Figura 20 – Principais características geológicas e topográficas da instabilidade ocorrida junto à sondagem S2 (corte vertical na direção N-S)

O resultado desta simulação forneceu a seguinte relação:

$$Fs = 0.032 c + 0.233tg \varphi$$

Para a situação de equilíbrio limite será $Fs = 1$, sendo possível obter numerosas soluções como as seguintes:

$$c = 1 \text{ kPa} \quad \phi = 71^\circ$$

$$c = 28.60 \text{ kPa} \quad \phi = 20^\circ$$

$$c = 27.0 \text{ kPa} \quad \phi = 30^\circ$$

etc.

Obtem-se assim um sistema de duas equações a duas incógnitas (ambas com $Fs = 1$) que, uma vez resolvido, proporciona o seguinte resultado:

$$c = 28.75 \text{ kPa} \quad \text{e} \quad \phi = 19.3^\circ$$

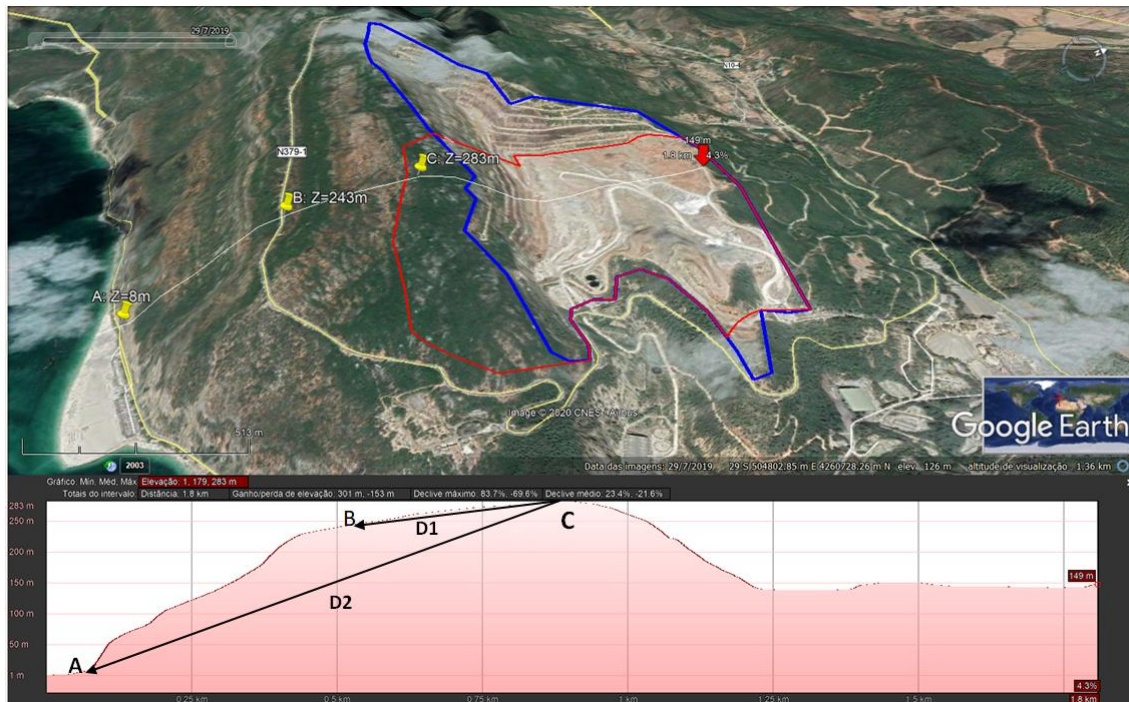
Trata-se de uma solução relativamente esperada, face aos resultados dos ensaios laboratoriais de deslizamento de diaclases, que se pode atribuir às pequenas diferenças de propriedades e de cotas topográficas entre os dois maciços rochosos analisados, não esquecendo que se tratam das situações mais desfavoráveis analisadas.

Conforme as normas do setor, estes valores dos parâmetros de resistência do rocha ao corte podem ser aplicados nos projetos futuros de taludes que serão criados na área de expansão para Sul da pedreira do Outão.

4.6 Análise da estabilidade dinâmica na encosta Sul da zona ampliada da pedreira

A expansão da área de exploração para Sul terá como consequência a aproximação das atividades de desmonte de rocha com recurso a explosivos, as quais poderão afetar a estabilidade dos taludes rochosos situados na proximidade do traçado da Estrada Nacional 379-1 e, também, da Estrada marginal junto à praia da Figueirinha.

A Figura 21 ilustra a situação dessa zona, com destaque para um corte vertical situado próximo da metade desse limite, onde se assinalam 3 pontos relevantes A (junto à Estrada Marginal), B (na EN 379-1) e C (onde se localizarão as cargas explosivas mais próximas).



	Coord. E-W (m)	Coord. N-S (m)	Altitude (m)
Ponto A: Estrada Marginal Praia	504566.00	4259623.00	8
Ponto B: Estrada N379-1	504577.00	4260043.00	243
Ponto C: Inicio da 1.ª bancada	504583.00	4260389.00	283
$D1 = \sqrt{(C_x - B_x)^2 + (C_y - B_y)^2 + (C_z - B_z)^2} = 348.4m$			
$D2 = \sqrt{(C_x - A_x)^2 + (C_y - A_y)^2 + (C_z - A_z)^2} = 814.0m$			

Figura 21- Localização, corte vertical e caraterísticas dos pontos A, B e C

Com o propósito de analisar os possíveis efeitos danosos provocados pelas vibrações oriundas dos desmontes com explosivos, haverá que conhecer as leis de propagação de vibrações nos terrenos afetados.

Dentre as várias fontes de informação existentes, selecionaram-se a partir de relatórios técnicos elaborados pelo Centro de Geotecnia do IST em Outubro de 2005 sob os títulos:

“Estudo das vibrações causadas pelos desmontes com explosivos realizados na pedreira do Outão e dos seus efeitos sobre a estabilidade de blocos das falésias próximas”.

“Estudo cinemático da queda de blocos na Encosta Sul da Serra da Arrábida sobre a EN 379-1”

As contribuições mais relevantes para o presente estudo envolvem o conhecimento da lei de propagação de vibrações no maciço calcário da Pedreira do Outão, a que se expressa pela seguinte relação:

$$V = 3.71 Q^{0.71} D^{-0.715}$$

à qual se associava um coeficiente de correlação estatística de 0.782.

Nesta equação V é a velocidade de vibração resultante expressa em mm/s, Q é carga de explosivo máxima instantânea detonada nas proximidades, em kg, e D representa a distância, em metros, entre a o local da detonação e a posição do aparelho de registo de vibrações.

É da maior importância aplicar a legislação vigente em Portugal acerca da “Avaliação da influência de vibrações impulsivas em estruturas”, Norma Portuguesa NP 2074 / 2015, que especifica os valores limites admissíveis para quaisquer estruturas sujeitas a vibrações dos terrenos.

Considerando como estruturas sensíveis as duas estradas e as rochas circundantes em estudo (em vez das opções correntes e reforçadas que fornecem valores superiores), obtém-se desta Norma o valor da velocidade de vibração admissível que é de 1.5 mm/s.

Tendo em vista determinar as características reais do diagrama de fogo que poderá ser aplicado na Pedreira para que nos locais a proteger das vibrações não ocorram danos nem fraturas, podem-se calcular os valores de Q para as duas situações do caso presente, que são:

Ponto A (Estrada Marginal): Distância $D_2 = 814.0$ m $Q = 237.91$ kg

Ponto B (Estrada N379-1) : Distância $D_1 = 348.4$ m $Q = 111.79$ kg

Por consequência, os diagramas de fogo a realizar futuramente junto aos limites da futura pedreira não poderão utilizar cargas explosivas instantâneas máximas de valor superior a 111.79 kg.

5 Setorização da futura pedreira

As etapas que se devem adotar no projeto de pedreiras baseiam-se nas seguintes etapas (segundo SME Mining Engineering Handbook, 2nd edition):

- Definição de setores de projeto, de acordo com características semelhantes de geologia e de natureza operacional
- Realização de análise do projeto das bancadas para determinar qual é a máxima inclinação da estrada interior da pedreira
- Efetuar esse projeto da via interior usando critérios económicos para a seleção das suas inclinações ótimas
- Avaliar a estabilidade geotécnica do traçado da via interior final

O primeiro critério a utilizar deve basear-se na escolha de domínios estruturais, com base nas propriedades das rochas e das suas descontinuidades.

Segue-se a escolha da direção das paredes das bancadas com vista a terem os mesmos modos de instabilização e de inclinações, e depois utilizar considerações operacionais adequadas. Obviamente que esta definição de setores deve ser compatível com o planeamento mineiro. No caso presente, utilizaram-se diversas informações disponíveis para alcançar essa setorização, algumas de tipo qualitativo e outras de caráter quantitativo, em face dos estudos de estabilidade de taludes existentes, com destaque para as descontinuidades (ou falhas) que cruzam o maciço rochoso (ver Figura 2).

O resultado alcançado consta da Figura 21, que sugere a divisão da pedreira em 8 setores (A, B, C, D, E, F, G, H), cada um dos quais com um ângulo médio de inclinação dos taludes que é proposto para o planeamento da sua exploração futura.

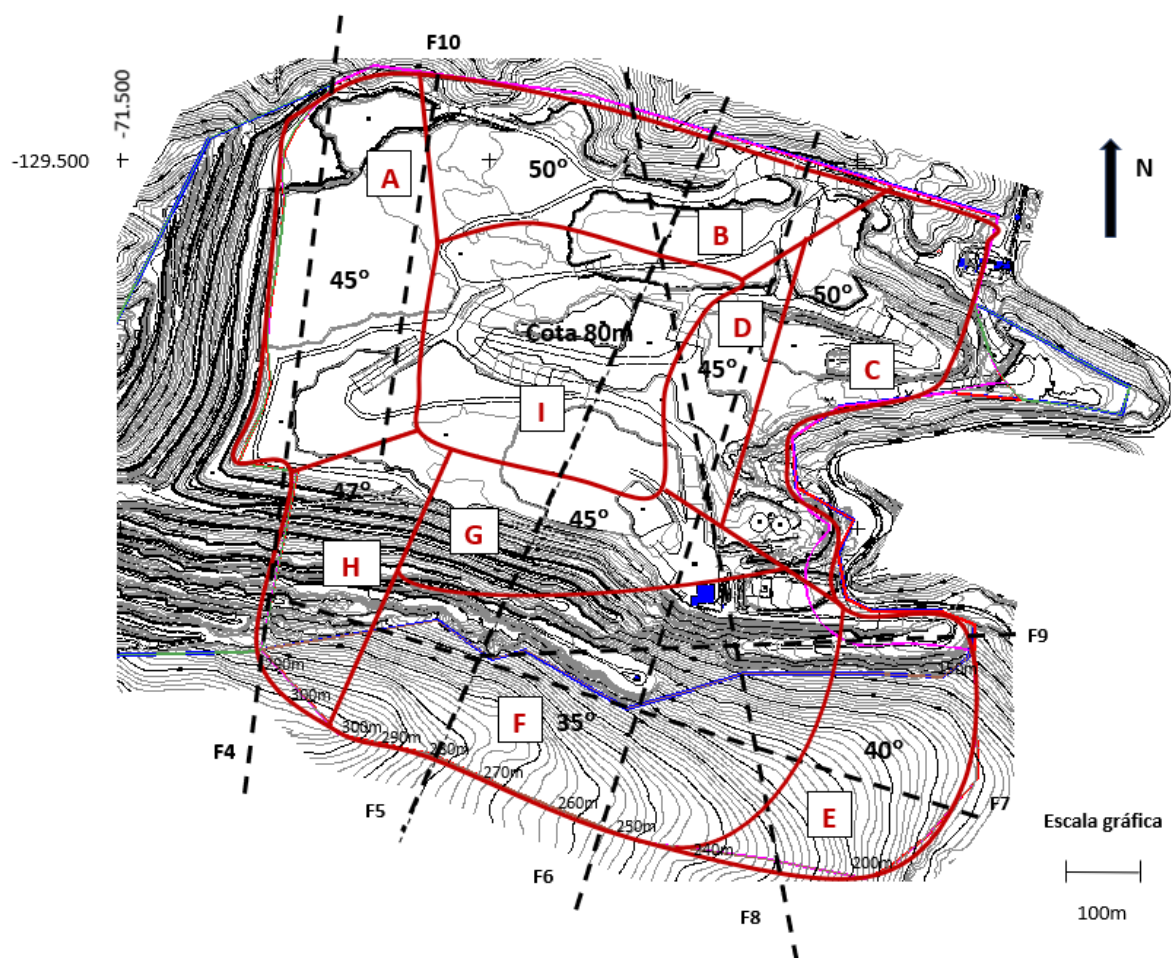


Figura 22 – Proposta de setorização geotécnica da área total

6 Previsões de instabilidades futuras na área da pedraira

Para além das caracterizações de falhas geológicas já referidas anteriormente no item 2.5 – Falhas, correspondendo às classificadas como F2, F3 e F4 nas Figuras 5, 6 e 7, existem outras áreas (ver figuras abaixo) com idênticos fenómenos de escorregamento/corte, pelo que novos exemplos podem ser classificadas como possíveis instabilidades futuras.

Estas falhas (F2 e F3) têm atitude aproximada de N10°-20°W, subvertical e condicionam a estabilidade da encosta sul, uma vez que os pequenos escorregamentos/desprendimentos que se verificam, ocorrem associados à sua passagem.



Figura 23 – Zonamento de área suscetível de deslizamento nas imediações da zona de ampliação

A falha F5 e a sua interseção com as falhas F7 e F9 são as principais responsáveis pelo maior escorregamento que afetou esta pedreira até ao momento. As evidências desta falha são inúmeras e encontram-se documentadas fotograficamente. Comprova-se nesta falha que as interseções falha/superfície de corte/superfície de estratificação, são as principais causas dos escorregamentos verificados. Para comprovar o modelo tectónico que afeta esta pedreira, e por estas falhas atravessarem as formações existentes estendendo-se por vários quilómetros, com a ajuda do Google Earth foi possível a identificação das mesmas falhas afetando os calcários das Pedreiras, nas imediações da estrada da Arrábida, conforme é possível verificar na fotografia seguinte.

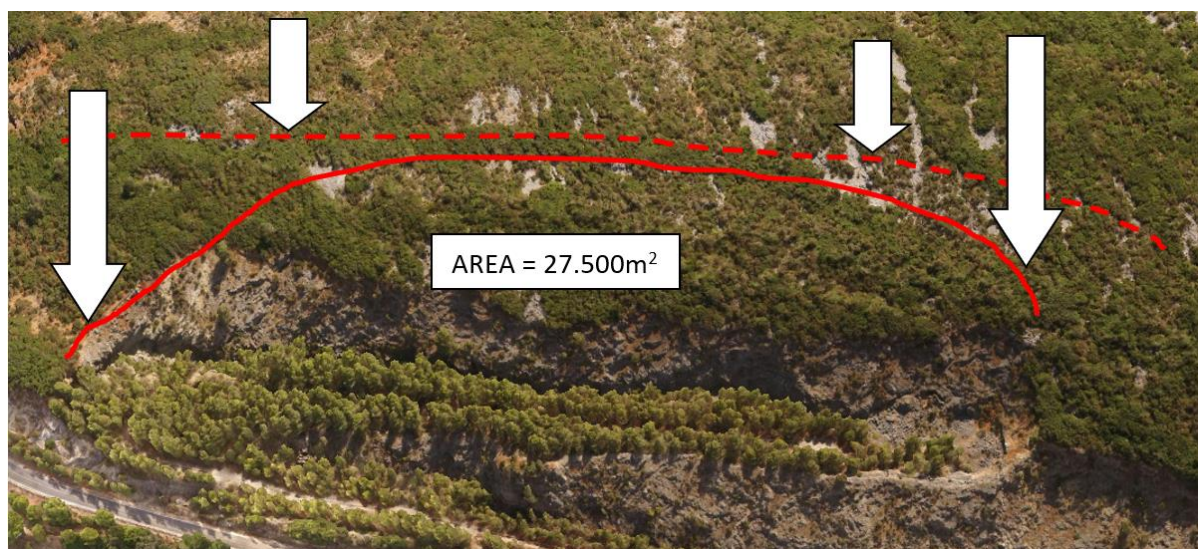


Figura 24 - Ocorrência de uma zona de instabilidade futura provável, fora dos limites da pedreira e nas proximidades da Estrada Nacional 379-1

7 - Conclusões e Sugestões

Em conformidade com as análises anteriormente desenvolvidas, procedeu-se à estimativa das futuras operações extrativas numa perspetiva de equilíbrio entre segurança e economia, através da proposta de evolução da lavra que consta da Figura 24.

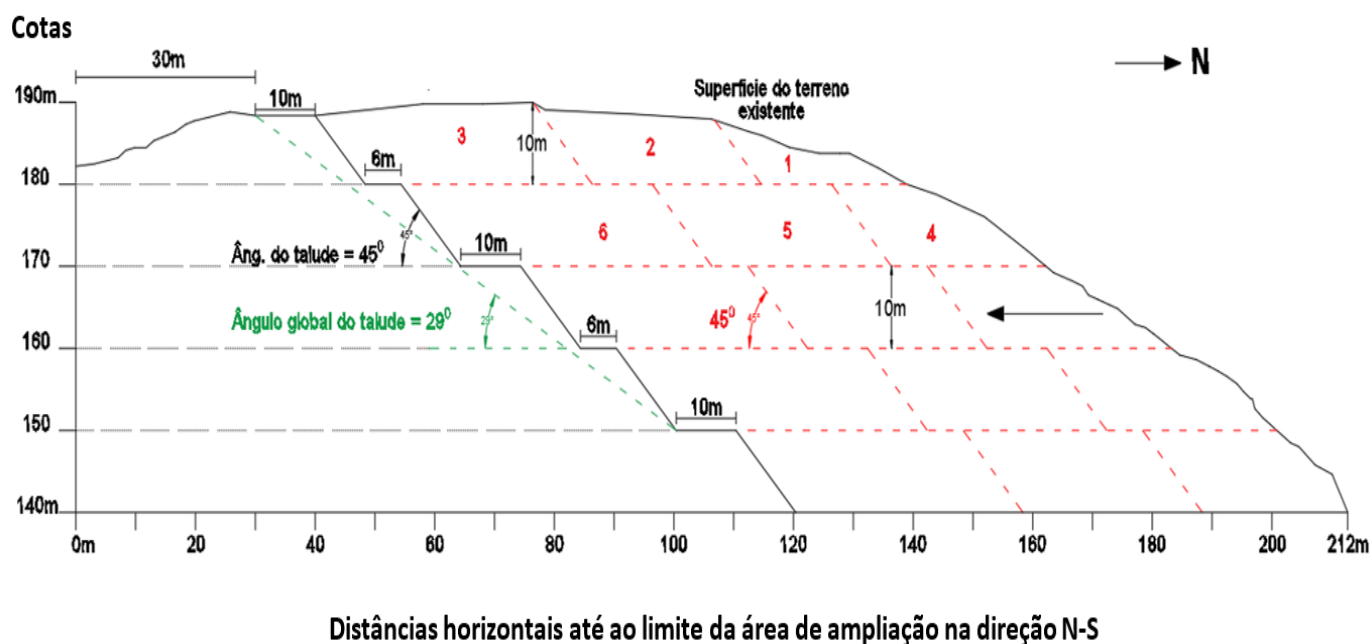


Figura 25 - Secção vertical da futura evolução da lavra da Pedreira

Também numa perspetiva de otimização das atividades extrativas futuras, é apresentada seguidamente uma sugestão de configuração final das bancadas de exploração que poderão ser utilizáveis até ao limite da concessão atribuída à SECIL S.A. (ver Figura 25).

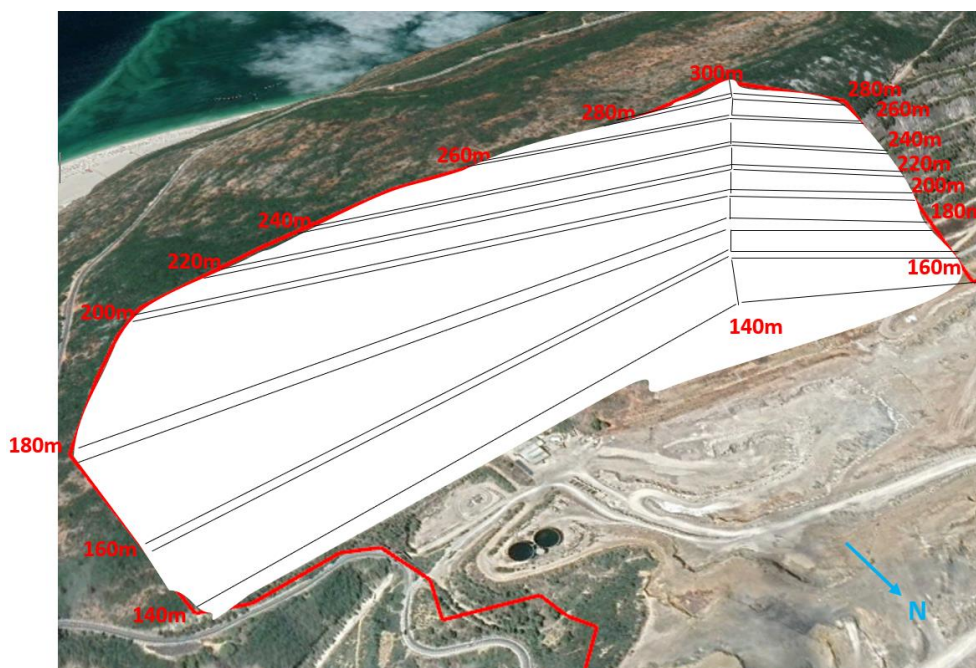


Figura 26 - Esquema de escavação da possível futura ampliação da Pedreira, com execução de bancadas sobrepostas

Como conclusão do presente relatório, é sugerida uma fase subsequente de contatos com o cliente acerca das soluções técnicas consideradas mais discutíveis, visando a sua aplicabilidade plena.

Lisboa, 12 de Fevereiro de 2019

Carlos Dinis da Gama
(Prof. Catedrático Jubilado do IST)