



**Yucânia da Conceição Cristóvão da Cruz**

Licenciada em Engenharia Geológica

**Estudos geotécnicos de uma barragem  
de aterro em Angola – Fase de  
concurso**

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia  
Geológica

Orientadora: Doutora Paula F. da Silva, Prof.<sup>a</sup> Auxiliar,  
FCT/UNL

Co-orientador: Doutor Rui J. F. L. Freitas, COBA, S.A.

Júri:

Presidente: Prof. Doutor José António de Almeida

Arguente: Prof. Doutor Pedro Calé da Cunha Lamas

Vogal: Prof. Doutora Paula F. da Silva



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Março 2016**



## **Estudos geotécnicos de uma barragem de aterro em Angola – Fase de concurso**

**Copyright@** em nome de Yucânia da Conceição Cristóvão da Cruz, FCT/UNL e UNL.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositório científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



Ao meu pai, Armando J. Da Cruz Júnior, por  
todos bons momentos gerados, nunca perdidos,  
pelo amor, pela ternura de pai e todas as lições  
apreendidas.

Um muito obrigada por abrires este caminho por  
mim,

Onde quer que estejas.



## **AGRADECIMENTOS**

A realização da presente dissertação só se tornou possível com momentos únicos na presença de pessoas e entidades às quais quero manifestar a minha gratidão.

À Faculdade de Ciências e Tecnologia e à Universidade Nova de Lisboa, por me terem recebido ao longo destes anos e por terem proporcionado vivências que definiram um trajecto até hoje.

Aos docentes e pessoal técnico do Departamento de Ciências da Terra, um muito obrigada pela vossa contribuição na minha formação profissional e pessoal.

À minha orientadora, Doutora Ana Paula Silva, por ter reduzido a distância em meros números. Por sempre ter acreditado em mim enquanto sua aluna, pela motivação, amizade, confiança e paciência em todo o meu percurso.

Ao meu orientador, Doutor Rui Freitas, que nunca desistiu de mim durante este percurso que começou sendo uma brincadeira de faculdade. Muito obrigada pelas horas passadas à conversa, por dúvidas tiradas e por momentos de apoio.

À COBA, S.A., em especial ao serviço de geotecnia e aos trabalhadores da COBAngola por tamanha liberdade, carinho e compreensão. Um muito obrigado por todo o à vontade criado, pelo apoio e cedência dos dados.

Aos meus colegas de curso que tornarem estes anos ainda mais surreais e memoráveis. A eles devo horas de chatices, espírito de entreajuda, alegrias e abraços. Em especial, gostaria de agradecer à Ana Rita Ferreira, à Ana Luísa Ramada, à Catarina Fernandes, à Mariana Pinto, à Soraia Botelho e ao João Ferreira, sem esquecer o David Silva, o João Miranda e o Raul Conceição.

Aos meus amigos de outrora, dos quais roubei algum tempo para estar cá hoje, pela vossa ajuda, pelo carinho, pelas palavras de motivação e presença.

Ao André Abel por estar presente neste último par de anos e ver o melhor que tenho e que posso dar. Muito obrigada por todos os momentos de paciência, de amor e de carinho. Por teres sempre acreditado.

À minha família, especialmente às minhas tias, por todo o vosso amor, carinho, alegria, ralhetes e as maiores palavras de encorajamento e de desafio. Ao meu irmão, pela nossa infância, pelas dores de cabeça e estímulo de competição.

À minha mãe, que tem sido mãe e pai ao longo destes anos, pelo seu amor e tamanha paciência por mim. Por toda a determinação, confiança que transparece e por todos os momentos gerados. Por todo o amor dedicado.



## RESUMO

A alteração de maciços rochosos traduz-se num leque de modificações às respectivas propriedades físicas, químicas e mecânicas. Num ambiente tropical, o material encontra-se exposto a mais intempéries, submetendo a rocha a um ciclo de meteorização mais intenso. Em qualquer infra-estrutura a ser edificada, realça-se o papel fulcral do estudo geotécnico do solo e/ou rocha, a ele advém o papel de reconhecer e definir os materiais com melhores características para construção

A presente dissertação incide no Aproveitamento Hidroeléctrico de Chicapa II, em Angola, projectado pela Tetraplano (COBA Group), estando a COBA S.A. encarregue dos respectivos estudos geológicos e geotécnicos. O futuro empreendimento localizar-se-á na província da Lunda Sul, e encontra-se em fase de concurso. Abordam-se os estudos geológicos e geotécnicos complementares necessários à execução da respectiva barragem de aterro realizados na fase de concurso. Apresentam-se, igualmente, os resultados de alguns ensaios de laboratório realizados em amostras de rocha intacta. Posteriormente, expõe-se uma análise crítica dos resultados com base no reconhecimento de campo, na prospecção geofísica, na prospecção mecânica e nos ensaios de laboratório

Paralelamente à análise de resultados, aplicam-se metodologias que, baseadas em critérios genéticos e geotécnicos, permitem entender e antever o comportamento do maciço no âmbito de fundações, nomeadamente de barragens de aterro, e contribuir para melhorar o sucesso geotécnico de futuros empreendimentos. Pretende-se com a presente dissertação e uma vez concluídos os estudos geológicos e geotécnicos, otimizar a avaliação das condições geotécnicas para o respectivo zonamento da fundação e reconhecer o terreno classificado como bom, eliminar o terreno e o classificado como intermédio.

**Palavras-chave:** Barragem de aterro, Prospecção geofísica, Prospecção mecânica, Índice Q;  
Zonamento geotécnico



## **ABSTRACT**

The weathering of a rock mass translates in a range of physical, chemical and mechanical properties. In a tropical environment, the ground is exposed to a more intense weathering cycle. In any structure to be built, the geotechnical study of the soil and rock plays a central role and the geotechnical studies must be capable to recognize and define the materials with better characteristics for construction.

This dissertation focuses on Chicapa II Hydroelectric, in Angola. Tetraplano (COBA Group) has designed the hydroelectric project while COBA S.A. is in charge of the inherent geological and geotechnical studies. The future structure will be located in the province of Lunda Sul and at the moment the project is at the phase of bid. The present document presents the geological and geotechnical studies necessary to carry out the construction of the embankment dam for the present phase of bid. It introduces a critical review of the information gathered based on field work and subsurface exploration. Subsequently, certain results of field and laboratory tests on rock samples are also discussed.

Concurrently, methodologies based on genetic and geotechnical criteria allowing to understand and to predict the rock mass behavior's at the foundation are also applied, thus contributing to improve the success of future geotechnical studies of embankment dams.

Once completed the geological and geotechnical studies and being a purpose of this dissertation, the optimization of the evaluation of geotechnical conditions for the foundation and its zoning is achieved in order to: recognize the adequate ground, eliminate the weak and improve the one classified as intermediate.

**Keywords:** Embankment dam, Geophysical exploration; Mechanical exploration, Q-value; Geotechnical zoning.



<b>ÍNDICE GERAL</b>	
AGRADECIMENTOS	v
RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
ÍNDICE GERAL	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xv
ÍNDICE DE TABELAS	xix
ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	xxi
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 ENQUADRAMENTO E OBJECTIVOS DE ESTUDO	1
1.2 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	2
2 BARRAGENS DE ATERRO	3
2.1 ASPECTOS GERAIS	3
2.2 PERFIS TIPO	5
2.3 CONDICIONALISMOS INERENTES	8
2.3.1 A selecção do perfil tipo	8
2.3.2 Material de construção para barragens de aterro	9
2.3.3 Fundação	10
2.3.4 Permeabilidade da fundação	11
2.3.5 Neotectónica e sismicidade induzida	12
2.3.6 Estabilidade dos taludes da albufeira	13
2.3.7 Estanqueidade da albufeira	14

2.3.8	Orgãos anexos	15
3	MACIÇOS TERROSOS E ROCHOSOS	17
3.1	METEORIZAÇÃO	17
3.2	DESCRIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE CORPOS ROCHOSOS QUANTO AO ESTADO DE ALTERAÇÃO E FRACTURAÇÃO	20
3.2.1	Descrição geotécnica básica de maciços rochosos (bgd)	24
3.2.2	Classificação geomecânica - correlação entre a prospecção geofísica e o índice Q	26
3.2.3	Índices de alteração	27
4	CASO DE ESTUDO: APROVEITAMENTO HIDROELÉCTRICO DE CHICAPA II	29
4.1	ESTUDOS ANTERIORES E ACTUAL FASE DE CONCURSO	30
4.2	ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO E GEOMORFOLÓGICO GERAL	34
4.3	LITOESTRATIGRAFIA	36
4.4	HIDROGEOLOGIA	38
4.5	TECTÓNICA E ESTRUTURA	39
5	ESTUDO GEOTÉCNICO DA BARRAGEM DE CHICAPA II: TRABALHOS REALIZADOS E RESULTADOS OBTIDOS	41
5.1	RECONHECIMENTO DE CAMPO	46
5.1.1	Características gerais	46
5.1.2	Discussão	48
5.2	PROSPECÇÃO GEOFÍSICA	49
5.2.1	Características gerais	49

5.2.2	Discussão	51
5.3	PROSPECÇÃO MECÂNICA	59
5.3.1	Características gerais	59
5.3.2	Resultados dos ensaios “ <i>in situ</i> ”	63
5.3.3	Discussão	66
5.4	ENSAIOS DE LABORATÓRIO	68
5.4.1	Características gerais	68
5.4.2	Ensaio de identificação e de resistência à compressão uniaxial	69
5.4.3	Discussão	73
5.5	PROPOSTA DE ZONAMENTO	76
6	CONCLUSÕES, ANÁLISE CRÍTICA E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	79
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
	ANEXOS	87
	ANEXO I – TABELAS PARA APLICAÇÃO DA BGD	89
	ANEXO II – ÍNDICES DE METEORIZAÇÃO	93
	ANEXO III – PERFÍS SÍSMICOS DE REFRACÇÃO	97
	ANEXO IV – RESUMO PERFÍS SÍSMICOS	101
	ANEXO V – DESCRIÇÃO DAS SONDAGENS DE ROTAÇÃO À FURAÇÃO	103
	ANEXO VI – RESULTADOS DA PROSPECÇÃO MECÂNICA	111



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Aspecto da evolução de perfis-tipo de barragens de terra e mistas com respectivas limitações de altura .....	6
Figura 2.2 Aspecto da evolução de perfis-tipo de barragens de terra e mistas com respectivas limitações de altura, continuação.....	7
Figura 3.1 Esquema entre os factores de influência nas propriedades de solos sedimentares e residuais .....	18
Figura 3.2 Esboço da influência do clima na profundidade de meteorização e nos seus derivados.....	19
Figura 3.3 Classificação da qualidade das rochas em função do seu estado e fissuração .....	24
Figura 3.4 Correlação entre RQD, frequência de profundidade $F_m^{-1}$ , .....	27
Figura 4.1 Localização do aproveitamento na província da Lunda Sul, Angola.....	29
Figura 4.2 Extracto da Carta Geológica de Angola à escala 1/1.000.000 (1992) e respectiva legenda.....	34
Figura 4.3 Esboço das Unidades Geomorfológicas de Angola .....	35
Figura 5.1 Planta geológica com representação da prospecção mecânica e geofísica ...	42
Figura 5.2 Localização aproximada do eixo da barragem, central hidroeléctrica e órgãos anexos em fotografia aérea do Google Earth.....	44
Figura 5.3 Esboço da metodologia de trabalho seguida com base nos estudos geológicos e geotécnicos e ensaios de laboratório.....	45
Figura 5.4 Aspecto geral da fundação da barragem .....	47
Figura 5.5 Aspecto geral da zona da central.....	47
Figura 5.6 Localização dos perfis sísmicos em fotografia aérea do Google Earth .....	50

Figura 5.7 Esquema comportamental das ondas longitudinais dos perfis sísmicos da margem esquerda com a profundidade.....	52
Figura 5.8 Esquema comportamental das ondas longitudinais dos perfis sísmicos da margem direita com a profundidade.....	53
Figura 5.9 Esquema comportamental das ondas longitudinais dos perfis sísmicos da zona da central hidroeléctrica com a profundidade.....	53
Figura 5.10 Correlação da velocidade $V_p$ com o índice Q na margem esquerda .....	56
Figura 5.12 Correlação da Velocidade $V_p$ com o índice Q no local da central hidroeléctrica e órgãos anexos.....	57
Figura 5.11 Correlação da Velocidade $V_p$ com o índice Q na margem direita .....	57
Figura 5.13 Esboço da correlação do valor de pancadas do ensaio SPT com a profundidade nas zonas ensaiadas .....	63
Figura 5.14 Relação obtida entre o valor de absorção de água com a respectiva profundidade na margem esquerda, para os terrenos do Pré-Câmbrico e Paleozóico Inferior.....	64
Figura 5.15 Relação obtida entre o valor de absorção de água com a respectiva profundidade na margem direita, para os terrenos do Pré-Câmbrico e Paleozóico Inferior .....	65
Figura 5.16 Relação obtida entre o valor de absorção de água com a respectiva profundidade na central e órgãos hidráulicos, para os terrenos do Pré-Câmbrico e Paleozóico Inferior .....	65
Figura 5.17 Determinação da classe dos corpos rochosos tendo em conta o peso volúmico .....	71
Figura 5.18 Determinação da classe dos corpos rochosos tendo em conta a porosidade	71
Figura 5.19 Determinação do estado de meteorização do maciço tendo em conta o índice de qualidade e a porosidade.....	72

Figura 5.20 Classificação do maciço rochoso tendo em conta o valor de resistência à compressão uniaxial .....	72
Figura 5.21 Correlação entre o valor de resistência à compressão uniaxial com o estado de alteração de cada provete ensaiado .....	73
Figura 5.22 e Figura 5.23 Esboço da relação entre a resistência à compressão e o módulo de deformabilidade de rochas sedimentares (grés quartzítico) e metamórficas (quartzito), respectivamente (Retirado de [26]) .....	75
Figura 6.1 Esboço do perfil geotécnico longitudinal pelo eixo da barragem (Escala V: 1/250, H: 1/2.500).....	83
Figura 6.2 Perfil geotécnico longitudinal pela central e órgãos hidráulicos (Escala V: 1/250, H: 1/500).....	84



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 Conformidade da relação corda/altura com o tipo de barragem.....	5
Tabela 2.2 Órgãos anexos e respectivas características a serem investigadas .....	16
Tabela 3.1 Classificação dos diferentes estados de meteorização.....	22
Tabela 3.2 Classificação dos maciços com base no RQD .....	22
Tabela 3.3 Determinação da classe de corpos rochosos tendo em conta o peso volúmico seco e a porosidade .....	23
Tabela 3.4 Classificação BGD de acordo com os valores de resistência à compressão	25
Tabela 4.1 Trabalhos de prospecção realizados nas diferentes fases de estudo .....	31
Tabela 4.2 Variantes estudadas para o futuro empreendimento .....	33
Tabela 5.1 Projecção estereográfica das discontinuidades e identificação das principais famílias .....	48
Tabela 5.2 Classificação sísmica em maciços rochosos - Qualidade do maciço .....	51
Tabela 5.3 Classificação de solo arenoso com base na resistência à penetração dinâmica .....	60
Tabela 5.4 Classificação de solos coesivos e correlações aproximadas (com base no ensaio SPT).....	60
Tabela 5.5 Classificação do maciço rochoso consoante o valor de unidade Lugeon do ensaio de perda de água sobre pressão .....	63
Tabela 5.6 Resultados dos ensaios de identificação dos provetes ensaiados e respectivo estado de alteração.....	69
Tabela 5.7 Resultados do ensaio de resistência à compressão uniaxial dos provetes ensaiados.....	70
Tabela 6.1 Parâmetros considerados para a execução do zonamento geotécnico .....	80



## ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

### Abreviaturas e Siglas

AH: Aproveitamento Hidroeléctrico

COBA: Consultores de Engenharia e Ambiente S.A.

BCC: Betão compactado com cilindro

BGD: *Basic Geotechnical Description* – Descrição Geotécnica Básica

G&G: Geológicos e Geotécnicos

HP: Hidrotécnica Portuguesa

IAEG: *International Association for Engineering Geology and the Environment*

ICOLD: *International Commission on Large Dams*

IQ: Índice de qualidade

ISRM: *International Society for Rock Mechanics*

M.D.: Margem Direita

M.E.: Margem Esquerda

RCU: Resistência à compressão uniaxial

RQD: *Rock quality designation*

SC: Sondagem da central hidroeléctrica

SFV: Sondagem do fundo do vale

SMD: Sondagem da margem direita

SME: Sondagem da margem esquerda

SPT: *Standard penetration test*

T<sub>D</sub>: Tiro directo

T<sub>I</sub>: Tiro inverso

USCS: *Unified Soil Classification System*

ZG: Zona geotécnica

## Símbologia

### **Alfabeto latino**

dh: perda de carga entre dois pontos de uma trajectória do escoamento

ds: comprimento do caminho percorrido para a realização da perda de carga

E: Módulo de deformabilidade

$E_w$ : Evaporação registada no mês mais quente de um ano

H: Altura

$i$ : gradiente hidráulico

$J_a$ : *Joint alteration number* – estado de alteração

$J_n$ : *Joint set number* – número de famílias de descontinuidades

$J_r$ : *Joint roughness number* - rugosidade

$J_w$ : *joint alteration number* – estado de alteração

k: condutividade hidráulica do meio

L: comprimento do coroamento

Lu: Unidade Lugeon

N: Índice de Weirnet

$N_{(SPT)}$ : Número de pancadas obtido durante a cravação dinâmica no ensaio SPT

n: Porosidade

$P_a$ : Média anual de precipitação

$P_e$ : Pressão de ensaio

Q: Índice Q

SRF: *Stress reduction factor* – tensões instaladas no maciço

$V_p$ : velocidade de propagação da onda sísmica longitudinal

v: velocidade de escoamento

## **Alfabeto grego**

$\rho_d$  : peso volúmico seco

$\sigma$ : Tensão



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 ENQUADRAMENTO E OBJECTIVOS DE ESTUDO

A Engenharia Geológica é a ciência aplicada ao estudo do meio geológico e solução dos problemas do meio ambiente, derivados da interacção das actividades. Tem como objectivo assegurar que as condicionantes geológicas das diversas obras são consideradas, assim como evitar as eventuais consequências associadas aos riscos geológicos [1].

De forma semelhante à realização de cartas geotécnicas, o estudo de qualquer projecto conceptual deverá ter em conta o princípio de que as propriedades geotécnicas desses materiais no seu estado presente dependem dos efeitos combinados da génese e dos processos diagenéticos, metamórficos, tectónicos e de meteorização que os mesmos foram sofrendo ao longo da sua história geológica.

No seguimento de investigações geotécnicas necessárias para trabalhos à superfície e/ou em profundidade, a avaliação das condições requer o reconhecimento de campo e posterior realização de ensaios *in situ* ou em laboratório. Este leque de etapas intitula-se por estudos geológicos e geotécnicos (G & G). A avaliação das condições complicar-se-á proporcionalmente em relação ao grau de alteração manifestado pelo material rochoso ou terroso. Estes estudos serviram de base para a realização de um mapeamento e definição da distribuição das propriedades geotécnicas características em profundidade versus o grau de alteração dos maciços existentes, para o futuro Aproveitamento Hidroeléctrico (A.H.) de Chicapa II. O futuro empreendimento localizar-se-á na província da Lunda Sul, e encontra-se em fase de concurso.

Abordam-se os estudos geológicos e geotécnicos complementares necessários à execução da respectiva barragem de aterro, em clima tropical, realizados na fase de concurso. Nestes climas o perfil típico característico do solo é resultado da alteração laterítica, muito comum no hemisfério sul, nas latitudes da África subsariana, na América do Sul e na Australásia. Estes solos possuem características geotécnicas específicas que condicionam o seu comportamento, influenciadas pela respectiva génese, características morfológicas e composições química e mineralógica. Utilizam-se os critérios genéticos e geotécnicos que permitem entender e antever o respectivo comportamento no âmbito das fundações, tais como em barragens de terra, e contribuir para melhorar o comportamento geotécnico de futuros empreendimentos.

Com as metodologias referidas, juntamente com o tratamento de dados provenientes da prospecção geotécnica *in situ* e de ensaios de laboratório, em rocha, pretende-se otimizar a

avaliação das condições geotécnicas para o eixo da barragem em referência e desenvolver o respectivo zonamento geotécnico.

Pretende-se com a presente dissertação e uma vez concluídos os estudos geológico e geotécnicos, com base no respectivo zonamento, reconhecer o terreno classificado como bom, eliminar o fraco e melhorar o classificado como intermédio.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação encontra-se estruturada em oito capítulos. No presente, expõe-se uma introdução ao trabalho realizado composto pelo enquadramento e discriminação dos objectivos do estudo.

No Capítulo 2 faz-se uma exposição de diversas fontes bibliográficas com o objectivo de definir e classificar uma infraestrutura, barragens de aterro. No mesmo capítulo referem-se os condicionamentos inerentes à existência e aplicabilidade de uma barragem de aterro.

O Capítulo 3 inicia-se pela definição de material rochoso e terroso, solo, e onde descrevem-se os processos de alteração e/ou meteorização do material rochoso, rocha-mãe, em clima tropical até ao estado de total desagregação. De seguida, descrevem-se metodologias e fundamentos teóricas, para caracterização e classificação do material rochoso em processo de meteorização.

No Capítulo 4 apresenta-se a região em estudo onde, igualmente, são expostos os estudos anteriores e actual fase da infraestrutura. Descrevem-se os enquadramentos: geológico e geotécnico; litoestratigráfico; hidrogeológico, tectono e estrutural.

No Capítulo 5 apresentam-se os trabalhos de campo, prospecção e ensaios de laboratório realizados, em fases anteriores e na actual de estudo do empreendimento. Tecem-se alguns comentários sobre os resultados obtidos. Igualmente elabora-se uma sobreposição dos resultados obtidos

O Capítulo 6 tece-se uma análise crítica a metodologia e valores obtidos e, sugerem-se propostas para trabalhos futuros para determinação do grau de meteorização de maciços rochosos em clima tropical.

Finalmente, listam-se as referências bibliográficas empregadas na realização desta dissertação e, ainda, os anexos.

## 2 BARRAGENS DE ATERRO

Ao longo dos tempos, assistiu-se a um aumento de necessidades das populações conduzindo à implantação de infraestruturas com objectivo de acompanhar esse aumento de necessidades. Uma das infraestruturas desenvolvidas para esses fins foram as barragens e, ao longo dos últimos séculos, verificou-se o aprimoramento dos estudos requeridos para a sua implantação e uma maior precisão nas investigações realizadas.

No capítulo que se apresenta descrevem-se as linhas gerais de conceitos associados a uma barragem e dá-se particular atenção às barragens de aterro, seus perfis tipo e os condicionalismos inerentes à construção das mesmas.

### 2.1 ASPECTOS GERAIS

As barragens são geralmente classificadas em função da finalidade, da altura e da capacidade da albufeira, bem como dos materiais aplicados na respectiva construção.

Consoante a aplicação a ter, estas estruturas poderão ser consideradas:

- a) De armazenamento, construídas para a reter água durante longos períodos da sua reduzida reposição para supressão de necessidades;
- b) De retenção, normalmente construídas para providenciar/ transportar a água para diques, canais ou sistemas de abastecimento.
- c) De controlo de cheias, estruturadas para retardar enchentes e minimizar o efeito de cheias rápidas.

Outrora a construção das barragens destinava-se a propósitos simples, como o consumo de água ou a irrigação. Simultaneamente ao progresso sócio-económico das civilizações, os objectivos destas estruturas evoluíram com a adição do controlo de cheias e do transporte de mercadorias, a navegabilidade de cursos de água, a produção de energia hidroeléctrica, a pesca, o recreio e o armazenamento de resíduos industriais, as designadas barragens de rejeitados [1].

Actualmente, a execução destas estruturas poderá ter apenas um ou mais de um propósito. A construção de barragens tende para finalidades como a irrigação, a produção de energia, o armazenamento de água e o controlo de cheias, estando estes objectivos em ordem decrescente. Segundo a *International Commission on Large Dam – ICOLD* (2014) encontram-se registadas no mundo 58.266 barragens, em que 63% são barragens de aterro.

Segundo o Decreto-Lei n.º344 de 15 de Outubro de 2007, do Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações portuguesas, as barragens classificam-se segundo dois grandes grupos:

- a) As grandes barragens, de altura igual ou superior a 15 m, ou barragens de altura igual ou superior a 10 m cuja albufeira tenha capacidade superior a  $10^6$  m<sup>3</sup>;
- b) As outras barragens, de altura inferior a 15 m que não estejam incluídas no grupo anterior e cuja albufeira tenha capacidade superior a 100.000 m<sup>3</sup>.

Consoante o tipo de material utilizado na construção de barragens, estas podem ser ou de aterro, de alvenaria ou de betão. As barragens existem há cerca de 4600 anos, sendo as de aterro as mais antigas e os seus derivados, desde ruínas diversas a estudos sobre albufeiras, encontram-se em culturas ancestrais de povos africanos, asiáticos e do médio oriente. O registo mais antigo de planeamento e construção de uma barragem de aterro é datado entre 2700 e 2600 a.C. e corresponde à execução da barragem de Sadd el-Kafara, no Egipto [3]. Estas estruturas eram construídas com solos e blocos de rochas, e a compactação realizada directamente pelo Homem ou com auxílio de engenhos rudimentares. [1,4,5,6].

Uma das principais características e vantagens das barragens de aterro é não serem tão exigentes a nível das condições de fundação, podendo ser construídas em depósitos aluvionares e permeáveis, desde que a sua estabilidade não seja posta em causa, bem como o seu custo de execução ser geralmente mais reduzido, já que a sua construção depende, principalmente, de materiais fornecidos na envolvente do local de obra.

A execução deste tipo de barragens é indicada para locais com topografias suaves e vales amplos ou para localizações geográficas inadequadas à construção de barragens de betão e que impliquem dispendiosas operações para remoção das formações de cobertura ou de tratamento de maciços rochosos.

Inerente à escolha do tipo de barragem deverá estar presente a seguinte relação entre a corda e a altura da barragem [7]. Esta correlação apresenta-se na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1 Conformidade da relação corda/altura com o tipo de barragem (retirado de [7])**

<b>Relação corda/altura</b>	<b>Tipo de barragem</b>
<3	Betão arco
3 - 5	Betão gravidade
>5	Aterro

## 2.2 PERFIS TIPO

Existem inúmeros tipos/configurações para os materiais constituintes de barragens de aterro. Estas características são variadas e dependem do grau de segurança que se pretende dotar a estrutura e do grau de percolação existente. Na presente dissertação apresenta-se o caso de estudo de um projecto para concurso, cuja solução mais vantajosa é a construção de uma barragem de aterro.

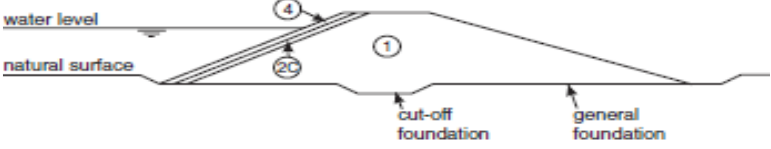
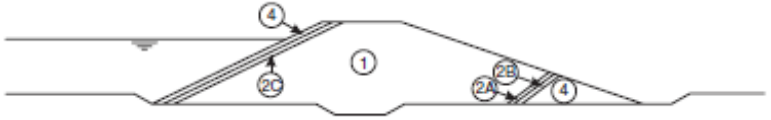

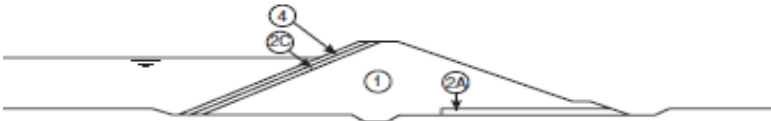
A acessibilidade, a quantidade e qualidade dos materiais de construção, o controlo de inundações, as condições climáticas, o risco sísmico, as características de percolação da água, a hidrologia, a hidráulica, a forma do vale e o risco geológico/geotécnico funcionam como critérios de definição para a demarcação do local a instalar o corpo da barragem e definição do perfil que terá a estrutura. Desta forma, o desenho de uma barragem de aterro terá de ser realista ao ponto de reflectir as condições de fundação e a disponibilidade dos materiais seleccionados para a construção do aterro.

Porém, em cada local de obra devem ser feitas previsões fiáveis sobre os métodos de construção adequados e, posteriormente, devem definir-se os parâmetros adoptados, de entre os mencionados no parágrafo anterior [1,6].

Ao longo da história verificou-se um aprimoramento dos perfis tipo de barragens, passando de simples barragens homogéneas, constituídas por material terroso, a barragens de aterro, tornando-as mais complexas e constituídas por material terroso e/ou grosseiro. Sendo que a essa evolução explicita-se nas Tabelas 2.2 e 2.3, juntamente com as respectivas limitações de altura verificadas para cada perfil tipo e a sua composição/disposição.

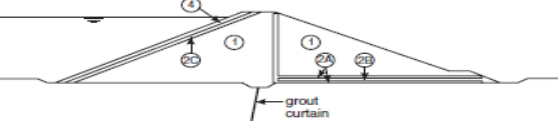
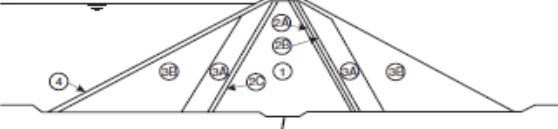
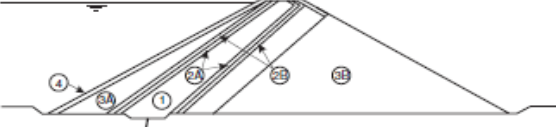

O desenvolvimento da composição/disposição do corpo de uma barragem passou por minimizar a percolação de água, e compatibilizar a presença dos materiais de construção com os requisitos de construção e de dimensionamento.

Figura 2.1 Aspecto da evolução de perfis-tipo de barragens de terra e mistas com respectivas limitações de altura (adaptado de [6])

<p>Barragem de terra homogénea</p>		<p><math>h_{m\acute{a}x} \leq 5m</math></p>
<p>Barragem de terra homogénea com pé drenante a jusante</p>		<p><math>h_{m\acute{a}x} \leq 10 m</math></p>
<p>Barragem de com perfil misto zonada</p>		<p><math>h_{m\acute{a}x} \leq 20m</math></p>
<p>Barragem de terra homogénea com dreno horizontal</p>		<p><math>h_{m\acute{a}x} \leq 10m</math></p>

**Legenda:** 1 – Material de preenchimento terroso; 2A e AB – Material drenante fino e grosseiro; 2C – Filtro de montante ou de rip rap; 2D e 2E – Fina e grosseira camada de transição; 1-3 – Material de preenchimento rochoso e terroso; 3A – Material de preenchimento rochoso; 3B – Material rochoso grosseiro; 4 – Rip-Rap.

**Figura 2.2** Aspecto da evolução de perfis-tipo de barragens de terra e mistas com respectivas limitações de altura, continuação (adaptado de [6])

<p>Barragem de terra homogénea com dreno horizontal e vertical</p>		<p><math>30 \leq h_{\text{máx}} \leq 50 \text{ m}</math></p>
<p>Barragem de enrocamento com núcleo de terra</p>		<p><math>h \leq 300 \text{ m}</math> para <math>h &lt; 30</math> tornam-se mais onerosas</p>
<p>Barragem de enrocamento com núcleo de terra inclinado</p>		<p><math>15 \text{ m} \leq h_{\text{mín}} \leq 20 \text{ m}</math></p>
<p>Barragem de perfil misto com paramento de betão a jusante</p>		<p><math>h_{\text{mín}} \geq 20 \text{ m}</math></p>

**Legenda:** 1 – Material de preenchimento terroso; 2A e AB – Material drenante fino e grosseiro; 2C – Filtro de montante ou de rip rap; 2D e 2E – Fina e grosseira camada de transição; 1-3 – Material de preenchimento rochoso e terroso; 3A – Material de preenchimento rochoso; 3B – Material rochoso grosseiro; 4 – Rip-Rap.

Dando maior ênfase ao posicionamento do rip-rap, da camada grosseira de transição e do betão, constata-se que os agregados, posicionados no paramento de montante, possuem um objectivo: assegurar a longevidade da estrutura face à acção destrutiva das ondas da albufeira do local de implantação. Salienta-se a aplicação de enrocamento, geralmente, à esquerda da zona impermeável do corpo da barragem. Esta localização permitirá diminuir a ocorrência de fenómenos de *piping* e de formação de caminhos de percolação no interior da estrutura [1,6].

### 2.3 CONDICIONALISMOS INERENTES

Para o bom êxito de um planeamento das barragens, é necessária a compreensão dos meios humano e natural. Nos dias de hoje, já se reflecte o efeito na legislação e na preocupação pública perante decisões das entidades, pelo que estas necessitam de disponibilizar informações detalhadas sobre os impactes ambientais dos empreendimentos a executar. No leque de considerações a ter em conta encontra-se a vida selvagem, a qualidade da água, a arqueologia, eventos históricos e a oportunidade de criar espaços de recriação.

A natureza dos solos de cobertura e dos solos da franja superficial de alteração, as características do maciço rochoso, tanto a matriz da rocha como a micro e macroestrutura, a alteração e a permeabilidade devem estar enquadrados nos factores e condicionantes de estudo [6]. Um estudo geotécnico detalhado conduz à mitigação e minimização de problemas associados ao serviço da barragem, enquanto a sua insuficiência poderá ter efeitos adversos quer na construção quer no funcionamento de toda a obra.

Na presente secção abordam-se os factores e condicionalismos que incrementam o aprofundamento dos estudos geológico e geotécnicos (G&G), que constituem um dos principais factores condicionantes da construção do aproveitamento hidroeléctrico, a analisar no Capítulo 5. Estes mesmos factores e condicionantes incutem uma maior ponderação na escolha do tipo de barragens e das medidas técnicas a implementar nas diferentes fases de obra.

#### 2.3.1 A SELECÇÃO DO PERFIL TIPO

A selecção do perfil tipo de uma barragem apresenta uma interdependência com determinados parâmetros e factores do local (condições climáticas, topografia da região, etc.). Destaca-se: o controlo de fluxo através do corpo da barragem, tratando-se do dimensionamento do sistema de drenagem interna; o controlo das enchentes na albufeira; a estabilidade dos paramentos de montante e jusante; a análise de compatibilidade das deformações entre a estruturação e a

fundação e a protecção contra a erosão superficial dos taludes da albufeira e do corpo da barragem.

A selecção do perfil-tipo para o projecto da estrutura deverá ser a de custo mínimo, preferencialmente para que se possa alcançar uma melhor optimização dos materiais disponíveis, incluindo os materiais provenientes de escavações na fundação, do eventual túnel de desvio, da central e de trabalhos de logística.

### 2.3.2 MATERIAL DE CONSTRUÇÃO PARA BARRAGENS DE ATERRO

A construção destas estruturas deverá satisfazer a topografia e as condições de fundação do local, de modo a que se faça um uso adequado dos materiais de construção. Desta forma, não existe um projecto tipo ou padronizado para barragens de aterro.

O solo/material ocorre em infinitas combinações de tamanho, de composição e, conseqüentemente, manifestará diferentes comportamentos consoante as condições de carregamento e de teor em água.

Em certas estruturas requerem-se escavações significativas para alcançar uma fundação com as características desejáveis. Em algumas ocasiões, destas escavações resultam materiais com qualidade e em quantidades suficientes para usos específicos na construção da barragem. Do desmonte de trechos destinados ao túnel de desvio e para outros órgãos hidráulicos, podem derivar materiais apropriados para filtros, para núcleos impermeáveis ou para outras zonas do corpo do aterro. Contudo, quase sempre são necessárias áreas de empréstimo para a obtenção de volumes suficientes para a dimensão da obra e para garantir a qualidade adequada tendo em vistas as diferentes finalidades do material. Igualmente, estas áreas deverão apresentar uma reduzida distância ao local da obra, condições ambientais de exploração aceitáveis e serem de fácil exploração. O reconhecimento destas áreas deverá ser realizado de forma planeada, conjuntamente com investigação bibliográfica, a execução de prospecção e ensaios, em laboratório e/ou *in situ*.

Existe a necessidade de averiguar a disponibilidade e tipo de materiais existentes na envolvente à obra, independentemente do tipo de barragem a executar. Todos os materiais analisados devem respeitar e corresponder a certos parâmetros, de acordo com a sua utilização prevista. Os materiais escolhidos não se podem deixar alterar, dissolver e evoluir de forma a modificar as suas propriedades físicas e/ou químicas.

Para caracterização destes materiais procede-se à investigação, em provetes remoldados, das seguintes propriedades para que se possa obter a resistência e compacidade necessárias para a execução da obra [8,1].

1. Mineralogia e a sua relação com a expansibilidade;
2. Granulometria e plasticidade e
3. Dispersividade e potencial de desgaste.

No âmbito de barragens de aterro e para o núcleo impermeável, os materiais devem ser facilmente compactáveis, com um valor bastante reduzido de permeabilidade,  $10^{-5}$  cm/s ou inferior, não podendo conter matéria orgânica nem ser solúveis. Habitualmente, as argilas e as margas são os materiais que possuem estas características. Por regra, o seu índice de plasticidade, IP, deverá rondar entre 15 e 35%.

Os maciços estabilizadores, que conferem estabilidade e resistência à estrutura, devem apresentar uma granulometria maior, um valor de resistência ao corte e ao carregamento elevado a. Igualmente devem possuir um módulo de deformabilidade reduzido. Normalmente, a resistência propícia para os constituintes dos maciços deverá rondar entre 50 e 150 MPa, porém são registados casos em que se aceitam rochas com resistência igual ou superior a 30 MPa.

Os materiais a aplicar nos maciços estabilizadores podem ser classificados em:

- Solo;
- Enrocamento;
- Camada de transição;
- Filtro ,
- Dreno.

### 2.3.3 FUNDAÇÃO

A fundação da barragem, que se encontra abaixo do nível do solo e, por regra, coberta por solo ou rocha alterada, que devem ser retiradas, possui a incumbência de ser resistente o suficiente para admitir o peso da estrutura e a pressão de água derivada da permeabilidade, em grande e pequeno, actuante. Em determinadas condições, o mesmo material é retirado até que os requisitos de fundação sejam alcançados e/ou substituído por material considerado de melhor qualidade.

Através da prospecção geotécnica é necessário reconhecer a cobertura e espessura de solos e rocha alterada presentes na fundação da barragem. Deve-se aprofundar o conhecimento das

características da transição solo-rocha e características geotécnicas dos solos e das rochas. O estudo geomecânico deve ser sucinto, minucioso e sem lapsos, e verificar se as condições de resistência, deformabilidade, compressibilidade e resistência ao corte presentes se coadunam com o tipo de solicitações impostas pela obra. Caso não se enquadrem no projecto, estes comportamentos devem ser minorados ou serem alvo de substituição e/ou melhoramento.

Nas barragens de aterro, tendo estas bases largas e os paramentos mais suaves, as exigências de fundação quanto aos assentamentos e material existente são muito menores. Isto porque o corpo da barragem transmite reduzidas tensões à fundação, podendo esta estrutura ser construída sobre materiais de rocha branda ou mesmo solos.

A existência de uma zona na fundação do aterro com um grau de compressibilidade elevado pode induzir assentamentos localizados e aberturas de fendas internas sobre esse local.

#### 2.3.4 PERMEABILIDADE DA FUNDAÇÃO

Os espaços vazios no solo, a porosidade, promovem não apenas o mecanismo para a sua variação de volume como também caminhos para passagem de água pela massa de solo [9]. Por meio da acção de forças gravitacionais, o movimento da água designa-se de percolação, sendo a medida deste movimento denominada por permeabilidade descrita na Eq. 1.1 [10].

$$v = k \times (dh \div ds) \Leftrightarrow v = k \times i \quad \text{Equação (1.1)}$$

Sendo  $v$  a velocidade de escoamento,  $k$  o coeficiente de permeabilidade do meio e  $i$  o gradiente hidráulico. O coeficiente de permeabilidade em depósitos de solo natural torna-se bastante variável, isto porque depende da temperatura e viscosidade. Porém, alguns solos manifestam uma permeabilidade sensível às diferentes variações de densidade, conteúdo e/ou com a variação granulométrica. A propensão para que se gere um fluxo, grupo de linhas de corrente, é função da granulometria do solo. Esta característica também está conotada à eventual ocorrência de superfícies de descontinuidades [11,12].

A permeabilidade pode ser definida em dois grupos devido a duas características: a porosidade e o controlo estrutural. A primeira encontra-se ligado à litologia e é habitualmente designado por permeabilidade em pequeno. Possui uma grande influência em maciços areníticos de elevada porosidade. Já o controlo estrutural, mais proeminente em maciços rochosos, relaciona-se com zonas de maior alteração, fracturas, falhas, diaclases e outras descontinuidades. Designa-se por permeabilidade em grande, porque beneficia determinados cursos de percolação [7,9].

A permeabilidade em meios naturais detém um valor distinto para a percolação na direcção horizontal ou vertical.

A definição do coeficiente de permeabilidade é importante para garantir a estabilidade e segurança de estruturas de transporte e de retenção de água. O incessante movimento da água pelo corpo de uma estrutura poderá conduzir à remoção de partículas solúveis ou na erosão interna que, quando remontante, é denominada de *piping*. O cuidado perante esta última consequência deve ser redobrado já que o fenómeno não se torna, geralmente, aparente até ao momento em que a rotura da estrutura esteja iminente.

Em estruturas hidráulicas, neste caso barragens, a minimização da permeabilidade é alcançada através do discernimento, minucioso, dos materiais de construção. Estes materiais estarão sujeitos à fiscalização da respectiva compactação e, em determinadas situações, são-lhe aplicados ligantes.

### 2.3.5 NEOTECTÓNICA E SISMICIDADE INDUZIDA

Num projecto de uma barragem, muito associada à sua dimensão e custo, é necessário ter em conta a acção sísmica que poderá afectar a estrutura quanto à sua segurança e estabilidade, tratando-se de uma actividade sísmica com uma magnitude significativa. É importante reconhecer que na proximidade de falhas activas possa existir a probabilidade de deslocamento pela reactivação destas.

Em muitas áreas, a actividade sísmica é fraca e, em alguns locais, quase indetectável, enquanto noutros poderá ser elevada, como é possível verificar em zonas próximas de contactos entre placas tectónicas (exemplo: Andes, Alpes, Himalaias, Turquia), etc.

Quanto se trata de barragens de dimensão grande é necessário reconhecer a possibilidade de sismicidade induzida. Nos seus relatórios de 1983 e 1989, a ICOLD refere que a retenção de água numa albufeira pode, em determinadas situações, aumentar a actividade sísmica no reservatório e/ou nas suas proximidades [6]. Esta tem lugar em barragens com mais de 100 m de altura ou cuja albufeira seja superior a 100 milhões de m<sup>3</sup>. Este tipo de sismicidade deve-se a fenómenos de fracturação hidráulica, relativas a falhas e fracturas submetidas a pressões intersticiais grandes, e à carga hidráulica elevada imposta [11].

Os sismos impõem cargas adicionais às experimentadas em condições estáticas. A carga sísmica, caracterizada por ser de reduzida duração, é cíclica e envolve deslocamentos em ambas as direcções, vertical e horizontal. Consequentemente, actividade sísmica pode ter as seguintes repercussões numa barragem de aterro [8]:

- i. Assentamentos e fissuras, particularmente na respectiva crista;
- ii. Decréscimo da folga devido ao assentamento, que poderá conduzir ao galgamento;
- iii. Instabilidade dos paramentos;
- iv. Movimentos diferenciais entre o aterro e o túnel de desvio que levam ao aumento de fugas e rotura por erosão interna;
- v. Liquefacção ou perda de resistência de corte no aterro e na fundação devido ao aumento da pressão intersticial,
- vi. Galgamento.

A magnitude destas consequências depende da sismicidade do local, das características e das condições topográficas da zona de fundação, do tipo e tamanho da barragem. A quantidade de prospecção, o dimensionamento e medidas construtivas adicionais, somando às necessárias para condições estáticas, dependerão dos factores acima mencionados, e ainda do risco associado à barragem [6].

### 2.3.6 ESTABILIDADE DOS TALUDES DA ALBUFEIRA

A estabilidade dos taludes marginais a uma albufeira representa um dos factores mais importantes para estudo no âmbito da implementação de uma barragem. A instabilidade associada a esses taludes pode desencadear deslizamentos de massas grandes, que podem gerar grandes ondas e, na sequência, o galgamento da barragem e afectação das estruturas auxiliares das barragens [8].

Em locais de implantação de barragens é comum encontrar evidências de antigos movimentos de terra. Estas são consideradas habituais, visto que o desenvolvimento do vale ter-se-á dado através da acção da erosão desencadeada pela linha de água, por processos de alteração mecânica/química, pela fluência e deslizamento solo e queda de blocos.

O grau de importância de um reconhecimento prévio de evidências de antigos movimentos de massa no local de projecto, devem-se a [6]:

- i. Os materiais deslocados (depósitos de vertente), constituídos por fragmentos de rocha, solo ou mistura de ambos, num estado solto não são aceites em fundações de barragens de aterro. Isto devido ao seu potencial elevado de compressibilidade, variável e muitas vezes

imprevisível, e respectiva permeabilidade. Simultaneamente, os depósitos situar-se em zonas de esmagamento ou superfícies de rotura com uma resistência ao corte residual.

ii. Se há evidências de deslizamentos antigos, muitos próximos da área da barragem e nas zonas de trabalhos (pedreiras, túnel de desvio, áreas de empréstimo, etc.), existe um risco acrescido de reactivação desses movimentos durante a fase de construção e, mais seriamente durante a fase de exploração do aproveitamento.

iii. Se existem deslizamentos fósseis ou deformações a eles associadas na área de influência da albufeira, os movimentos podem ser reactivados durante o respectivo enchimento.

Desta forma, salienta-se a importância dos estudos destinados à investigação de antecedentes de escorregamentos nos taludes da futura albufeira. A investigação deve avaliar a tipologia, o grau de actividade, a geometria e o volume dos deslizamentos potenciais, tal como as distâncias entre eles e o reservatório.

Verifica-se a indispensabilidade da implementação de medidas mitigadoras e de instrumentação, durante a fase de construção e exploração da obra, para observação/estudo das zonas de fraqueza identificadas.

### 2.3.7 ESTANQUEIDADE DA ALBUFEIRA

A estanqueidade relaciona-se com as características geológicas do maciço rochoso/terroso. Desta forma, reincide-se na importância do estudo da percolação da água.

A construção de uma barragem impõe relevantes modificações na hidrologia e hidrogeologia da zona que passará a albergar a albufeira. Esta edificação conduzirá à inundações de uma parte do vale, à elevação dos níveis freáticos e a uma oscilação periódica dos mesmos. Estas modificações afectam a hidrodinâmica dos aquíferos e a análise/compreensão dependerá de estudos hidrogeológicos.

Nas fundações deste tipo de estruturas, a percolação é minorada com a utilização de diferentes barreiras impermeáveis consumadas com injeções de material na fundação, através de métodos como a injeção de caldas e da compactação de solo. Esta densificação do solo poderá realizar-se por meio da compactação dinâmica, por vibração ou por carregamento do terreno. O controlo do efluente é alcançado pelo zonamento, em barragens de terra e em bancos de areias, através da aplicação de drenos e filtros. O mesmo objectivo poderá ser adquirido com drenos e poços de

redução de pressão. A selecção do método de controlo é, essencialmente, dependente do valor associado ao tratamento [9].

Os critérios gerais para a análise da estanqueidade baseiam-se em factores hidrogeológicos, litológicos e estruturais. Destes factores destaca-se um leque de ocorrências e litologias que deverão ser alvo de maior investigação [8,9]:

- i. Material terroso com elevada porosidade desde material detrítico, areias e arenitos, a certas rochas vulcânicas, depósitos do quaternário e paleocanais;
- ii. Rochas solúveis, destacando-se rochas evaporíticas, halite e gesso, e rochas carbonatadas, calcários e dolomitos e suas misturas, como é o caso de margas gipsíferas;
- iii. Existência de explorações mineiras actuais ou abandonadas onde se podem originar casos de infiltrações preferenciais significatas,
- iv. Presença de dobras, falhas e descontinuidades que podem condicionar o fluxo da água.

#### 2.3.8 ORGÃOS ANEXOS

Considerando que um aproveitamento hidroeléctrico é constituído por mais que um órgão, podendo este ser de segurança ou de exploração, encontra-se associado à estrutura um novo empreendimento com um determinado projecto de execução. Cada nova estrutura auxiliar estará inserida em locais estratégicos relativamente ao eixo da barragem. Esta localização em função de certas variantes nas propriedades geotécnicas gera nuances que conduzem à interpretação de problemas geotécnicos distintos que se encontram identificados na Tabela 2.4.

**Tabela 2.2 Órgãos anexos e respectivas características a serem investigadas (adaptado de [7,9])**

Evacuador de cheias	Estabilidade dos taludes de escavação; Permeabilidade e resistência mecânica da fundação da soleira; Erosão a jusante; Ripabilidade/escavabilidade, Sub-pressões.
Central não subterrânea	Deformação da fundação; Estabilidade dos taludes de escavação, Sub-pressões.
Canais	Estabilidade dos taludes de escavação; Resistência das formações à erosão; Ripabilidade das formações, Sub-pressões.
Central subterrânea	Deformabilidade do maciço; Estado de tensão; Estabilidade e permeabilidade do tecto e paredes, Blocometria.
Chaminés de equilíbrio	Permeabilidade da escavação; Permeabilidade; Estado de tensão, Deformabilidade do maciço.
Túneis de adução	Estabilidade da escavação; Permeabilidade; Estado de tensão, Erosão.
Descargas de fundo e galerias de desvio	Estabilidade da escavação; Permeabilidade; Erosão a jusante, Deformação do maciço.
Tomadas de água, galerias de restituição	Estabilidade da escavação; Permeabilidade, Estado de tensão.

### 3 MACIÇOS TERROSOS E ROCHOSOS

Os geólogos reconhecem uma única ocorrência natural de material na Terra, a esta denominam de rocha. Um dos objectivos dos engenheiros é fundamentar as diferenças entre rochas e solos porém, que em determinadas situações são difíceis de distinguir [10].

A definição de solo em engenharia conota-se a um conjunto de partículas sólidas entre as quais se registam vazios, que podem conter água ou ar, ou ambos. No caso de uma contínua exposição do solo, desenvolve-se um perfil característico em profundidade desde a superfície. Este desenvolvimento é influenciado pelos seguintes aspectos: tipo de rocha-mãe, condições climáticas; espessura vegetal, nível da água [13].

Consoante o clima, os solos podem ser classificados de: podzólicos, ocorrente em regiões de tundra, por exemplo; carbonatados, ocorrente em regiões temperadas e, lateríticos, predominante em regiões tropicais e subtropicais [14]. Este é formado pela meteorização física e/ou alteração química de um maciço-rochoso, a rocha-mãe. A influência da rocha-mãe é muito mais marcante na fase inicial do processo de alteração em comparação com as fases finais, onde os factores de alteração química se destacam.

Neste capítulo define-se o conceito de meteorização num corpo rochoso e as etapas que acompanham este processo. Igualmente, apresentam-se metodologias e parâmetros de descrição e/ou classificação de materiais que tenham estado sujeitos as diferentes etapas de meteorização.

#### 3.1 METEORIZAÇÃO

A meteorização inclui o conjunto de processos, mais ou menos profundos, que degradam e modificam o material. Pode ser classificada de química e física ou mecânica, havendo também quem considere os processos biológicos [14]. Manifesta-se como a resposta à mudança de pressão, temperatura, constituintes e ambientes químicos em que o material foi originalmente formado [6].

Na perspectiva macro, o ponto de partida para o processo de meteorização é a análise dos sistemas de descontinuidades desenvolvidos quer pelo ciclo geológico, quer pelo ciclo tectónico. Os sistemas de descontinuidades revelam-se como o produto de mudanças de temperatura e tensão, tal como o aumento/decréscimo de pressão.

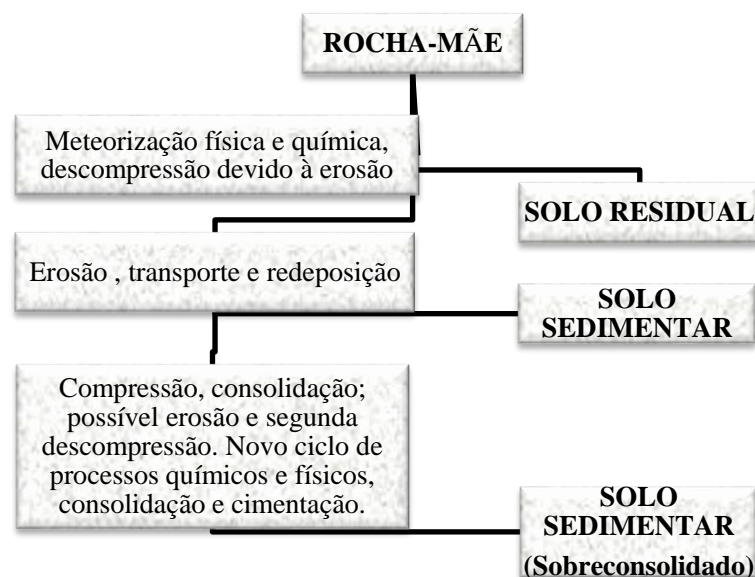
Estes sistemas de descontinuidades são, maioritariamente, constituídos por famílias de diáclases, as famílias, que intersectam a matriz rochosa. As famílias de famílias agrupam-se consoante as

suas direcções e inclinações, e caracterizam-se pelo seu espaçamento, extensão, rugosidade, preenchimento e pelos caminhos de percolação que proporcionam.

A meteorização física tem lugar nas fracturas existentes numa massa rochosa separando blocos e desagregando-as em partículas, com ciclos de aumento/decrécimo de tensões, produto de diferentes tipos de alteração física (crioclastia, haloclastia, insolação e termoclastia) e química (cristalização). Estes ciclos conduzem a uma contínua redução da dimensão máxima da partícula e a um aumento da micro-fracturação.

As acções referidas previamente aumentam as fracturas já existentes e desarticulam os grãos que se encontram agrupados, desagregando a massa rochosa sem provocar qualquer alteração mineralógica. Porém, este efeito aumenta a permeabilidade e as condições necessárias para a ocorrência de um ataque químico, geralmente fornecido pela presença de água. As reacções químicas, agrupando a hidrólise, a troca catiónica e a oxidação, têm como consequência, na maioria dos casos, a modificação da mineralogia para um estado mais estável ou mesmo a transformação em minerais secundários, maioritariamente minerais de argila. As restantes reacções químicas, tal como a lixiviação, hidratação e reacções com matéria orgânica, também possuem um papel essencial para a alteração química, conduzindo igualmente à formação de minerais de argila [15].

Na Figura 3.1 destaca-se o começo da meteorização, que se inicia na rocha-mãe, e as diferentes etapas associadas para obtenção de solos distintos: residual, sedimentar e sedimentar sobreconsolidado.

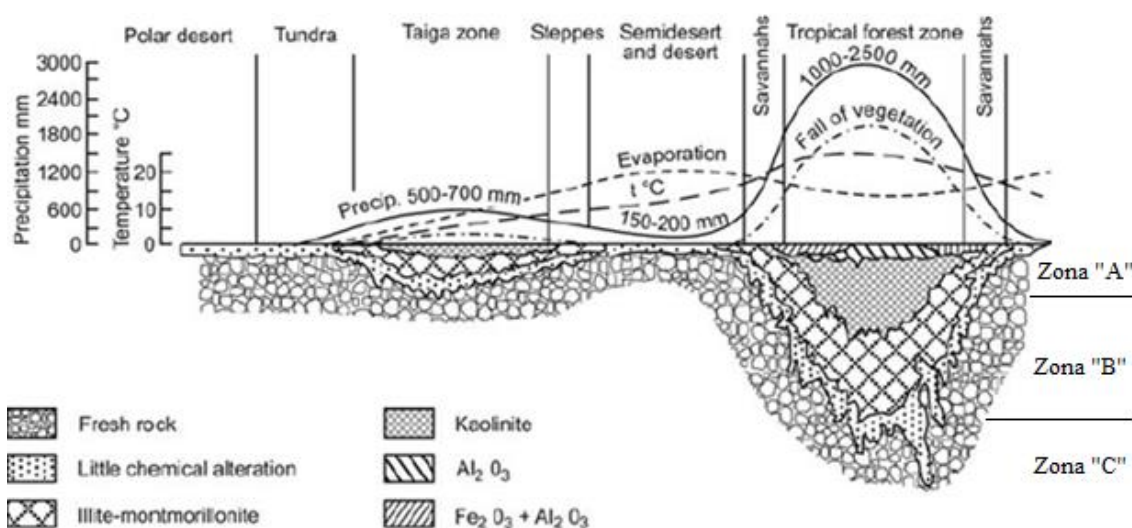


**Figura 3.1** Esquema entre os factores de influência nas propriedades de solos sedimentares e residuais (adaptado de [15])

Como referido, a formação de diferentes solos está intrinsecamente conectada ao clima. Na Figura 3.2 apresenta-se um esquema da influência do clima, ou seja da precipitação e da temperatura sobre a rocha-mãe, em diferentes zonas da Terra. Igualmente estabelecem-se os diferentes perfis, e realça-se a presença de três zonas distintas (zonas “A”, “B” e “C”), relacionadas com distintos processos químicos e/ou físicos e material originado.

O desenvolvimento das diferentes zonas, em profundidade, caracteriza-se por:

- i. Aumento dos minerais de sílica;
- ii. Decréscimo de processos químicos,
- iii. Decréscimo da percentagem de material solto.



**Figura 3.2 Esboço da influência do clima na profundidade de meteorização e nos seus derivados (retirado de [15, 16])**

Em ambiente tropical, verifica-se que a hidrosfera e o clima apresentam uma maior relevância para os processos de meteorização da rocha-mãe e desenvolvimento de um perfil característico do solo: a hidrosfera tendo um papel importante na alteração física e química, tal como no transporte de sedimentos; o clima, de grande relevância para a definição do tipo de meteorização a ocorrer. Este factor controla as variações de precipitação, de evaporação e de temperatura num ambiente local [17].

O clima encontra-se associado ao desenvolvimento de forças de sucção. Estas forças são de extrema importância para o comportamento geotécnico dos corpos rochosos. Para outros fins, não incluindo o da presente dissertação, relaciona-se o potencial de evaporação (Eq. 3.1), índice de Weirnet, durante o mês mais quente ( $E_w$ ) e a média anual de precipitação ( $Pa$ ).

$$N = \frac{12Ew}{Pa}$$

Equação (3.1)

Concluindo, são as características intrínsecas do corpo rochoso, constituído pela sua matriz e um sistema de fracturas, que têm um factor de influência directo com o potencial de meteorização. Num contexto semelhante, a mineralogia da matriz rochosa influencia o tipo e a taxa de alteração química, devido à susceptibilidade diferencial.

A meteorização poderá ser resumida através da elaboração de simples esquemas. Porém, podem não ser aplicáveis a determinados estados de meteorização ou a um determinado material que se encontre num sítio específico. Esquemas mais elaborados capacitam a inclusão de mais diversos materiais e de ambientes mas, simultaneamente, são demasiado complexos e de difícil compreensão.

Os primeiros estágios de meteorização na rocha são, usualmente, descritos como perda de tonalidade, descoloração, que se manifesta directamente proporcional ao estado de meteorização.

### 3.2 DESCRIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE CORPOS ROCHOSOS QUANTO AO ESTADO DE ALTERAÇÃO E FRACTURAÇÃO

Um dos aspectos mais importantes ligados aos estudos de terrenos para fins de engenharia civil é o da respectiva classificação, nomeadamente no que se refere à definição dos parâmetros que melhor caracterizam uma unidade do ponto de vista da geologia de engenharia [18]. No que respeita aos maciços rochosos, não se verifica uma classificação generalizada. No entanto, identificam-se propostas de vários autores com análogas linhas de pensamento.

Para um conhecimento geotécnico adequado e apropriado de material meteorizado e/ou alterado, é fulcral que se estabeleça uma relação entre as propriedades geotécnicas do material e o respectivo estado de alteração. Porém, desenvolver uma relação com a profundidade de alteração é um processo complicado, visto que depende e relaciona-se com muitos outros factores [16].

Através de uma cartografia e caracterização geotécnica em vários pontos do mundo, detectaram-se grandes oscilações da meteorização em relação à profundidade. A tentativa de enquadrar estas oscilações a valores máximos de profundidade de meteorização constitui um erro, ou a origem de outros inúmeros problemas (Thomas, 1974). O estado de meteorização define-se como sendo o conjunto de propriedades químicas, mineralógicas, físicas e mecânicas que caracterizam a rocha num determinado momento da sua evolução [16].

Nalguns estudos levados a cabo, num passado não muito distante, recorreu-se a diversos coeficientes de meteorização para avaliar e caracterizar a extensão de meteorização e alteração num maciço rochoso. Os mesmos coeficientes tiveram em consideração a natureza e o objectivo dos estudos [19].

Estes coeficientes traduzem uma medida quantitativa do estado de meteorização de um maciço rochoso, fornecendo um modelo de previsão para avaliação das propriedades de resistência e de deformação. Estes classificam-se em químicos, (micro) petrográficos e geotécnicos.

A diminuição de locais ‘virgens’, ou seja, a predominância de sítios em que as características geotécnicas não sejam as mais adequadas para a construção de um empreendimento, conduzem a uma maior necessidade em aprimorar os métodos de investigação, bem como as técnicas para associar o estado de meteorização com a resistência e a estabilidade de uma massa rochosa/terrosa.

A caracterização do estado de meteorização do material terroso ou rochoso poderá ser realizada com 5 abordagens distintas.

- i. Escalas qualitativas de friabilidade;
- ii. Comparação entre a distribuição granulométrica e outras propriedades mecânicas;
- iii. Medição do grau de alteração química ou mineralógica, tendo por base a comparação com a rocha-mãe,
- iv. Caracterização da natureza, abundância e tipo de microfracturas.

A classificação de áreas por zonas de alteração não possui grande aplicabilidade e nem apresenta grande prudência, no que toca a pequenas amostras, tais como tarolos provenientes de sondagens de furação, mas torna-se útil para reunir e classificar grandes volumes de maciço rochoso alterado com características similares.

Classificações baseadas na estimação e descrição da desagregação física e modificação química, são aplicadas para a determinação do estado de meteorização do material. A Tabela 3.1 apresenta uma correlação entre a descrição do material com e o respectivo estado de meteorização. O número de estados a serem considerados em relação a alteração varia com o tipo de problema, ou seja, com a necessidade de pormenorizar ou não a informação respectiva [20].

**Tabela 3.1 Classificação dos diferentes estados de meteorização (Adaptado de [19])**

<b>Simbologia</b>	<b>Estado de meteorização (%)</b>	<b>Designação</b>	<b>Descrição</b>
W <sub>1</sub>	< 25	Rocha sã	Sem quaisquer sinais de alteração
W <sub>2</sub>	25 – 50	Rocha pouco alterada	Sinais de alteração apenas nas imediações das descontinuidades
W <sub>3</sub>	50 – 75	Rocha medianamente alterada	Alteração visível em todo o maciço rochoso mas a rocha não é friável
W <sub>4</sub>	> 75	Rocha muito alterada	Alteração visível em todo o maciço e a rocha é parcialmente friável
R	100	Solo residual/ rocha completamente alterada	O maciço apresenta-se completamente friável e com comportamento de solo

Igualmente relacionado com os estados de meteorização e fracturação, desenvolveu-se um sistema de classificação baseado num índice indicativo da qualidade de maciços rochosos. O Índice RQD (*“Rock quality design”*), definido por Deere em 1976, é definido a partir dos testemunhos de sondagens realizadas com recuperação contínua da amostra [20]. Define-se como a percentagem determinada pelo quociente entre o somatório dos troços das peças de amostra separadas por fracturas naturais, e com comprimento superior a 10 cm e o comprimento total furado em cada manobra. Em função dos valores de RQD torna-se possível classificar a qualidade dos maciços rochosos. Esta classificação apresenta-se na Tabela 3.2.

**Tabela 3.2 Classificação dos maciços com base no RQD (Retirado de [20])**

<b>RQD (%)</b>	<b>Classificação do maciço rochoso</b>
0 – 25	Muito fraco
25 – 50	fraco
50 – 75	Razoável
75 – 90	Bom
90 - 100	Excelente

Para o apoio da descrição do estado de meteorização de um maciço rochoso aplicam-se diferentes classificações tendo por base as propriedades físicas das rochas. A determinação das classes de maciços rochosos tendo em conta o peso volúmico e a porosidade encontram-se referenciadas na Tabela 3.3.

**Tabela 3.3 Determinação da classe de corpos rochosos tendo em conta o peso volúmico seco e a porosidade (Traduzido de [19])**

Classe	Peso volúmico seco (kN/m <sup>3</sup> )	Descrição	Porosidade (%)	Descrição
1	< 18	Muito baixo	> 30	Muito alta
2	18 - 22	Baixo	30 - 15	Alta
3	22 - 255	Moderado	15 - 5	Média
4	25,5 - 27,5	Alto	5 - 1	Baixa
5	> 27,5	Muito alto	< 1	Muito baixa

Martin (1986) salientou que um método quantitativo simples a ser aplicado para determinação do estado de meteorização pode ser estabelecido com base numa propriedade física do maciço rochoso. Esta interpretação baseia-se no facto de qualquer propriedade física se alterar de um modo unidirecional, decrescente em relação ao peso volúmico e crescente em relação a porosidade, durante todo o processo de desgaste e cujo valor permite determinar o estado de meteorização [16].

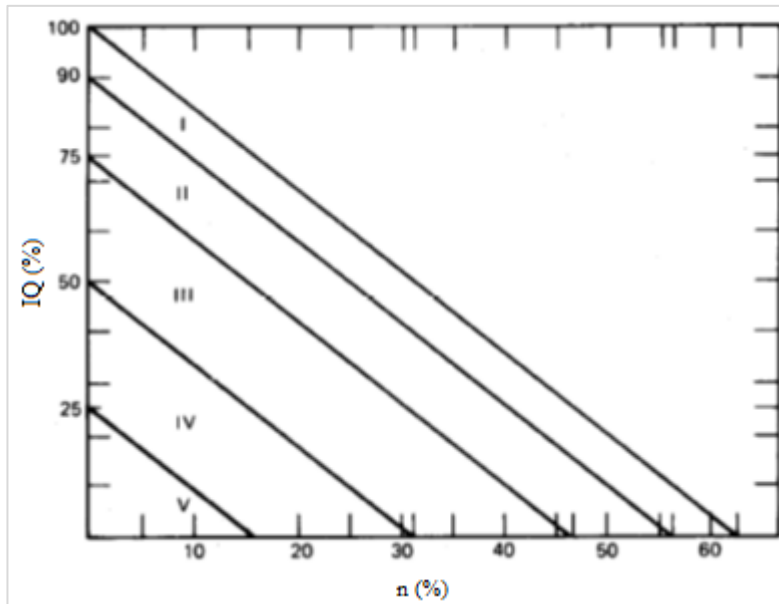
Enunciado por Formmaintraux (1976), o Índice de Qualidade (IQ), aplica-se para a determinação da qualidade do corpo rochoso. Este tem em conta a porosidade do material e permite concluir que, para rochas não fissuradas o valor de IQ é afectado pelos vazios naturais [20].

O cálculo do IQ tem como base a Equação:

$$IQ = 100 - 1,6 * n_p \quad \text{Equação (3.2)}$$

Onde  $n_p$  representa a porosidade da rocha (relação entre o volume de vazios e o volume total da rocha), expressa em percentagem.

Assume-se que a presença de fissuras conduz a um decréscimo de IQ. Na Figura 3.3 apresenta-se o gráfico baseado na proposta de Formmaintraux. Este permite avaliar o IQ. Conclui-se do mesmo modo que a fissuração em provetes de rocha afecta os valores das velocidades de propagação de ondas, também a fracturação ou as descontinuidades nos maciços, principalmente se estas estiverem abertas, irão afectar as velocidades de propagação de ondas obtidas em ensaios realizados *in situ* [20].



**Figura 3.3 Classificação da qualidade das rochas em função do seu estado e fissuração (Retirado de [19])**

### 3.2.1 DESCRIÇÃO GEOTÉCNICA BÁSICA DE MACIÇOS ROCHOSOS (BGD)

A *Basic Geotechnical Description* (BGD), proposta pela International Society of Rock Mechanics (Anon, 1981) é um sistema descritivo da qualidade de maciços rochosos que considera as seguintes características [20]:

- i. Nome da rocha, com base numa simples descrição geológica simplificada;
- ii. A espessura das camadas e o grau de fracturação (descontinuidade) que intersecta a massa rochosa: características estruturais,
- iii. A resistência à compressão uniaxial (RCU) do material rochoso e o ângulo de atrito das fracturas: características mecânicas.

A BGD sugere a divisão, quando necessário, da massa rochosa em zonas ou unidades geotécnicas. A divisão do corpo é realizada tendo em conta o projecto em questão, tornando possível o emprego da classificação em cada secção. Primariamente, atribui-se o nome ao corpo rochoso e seguidamente, a descrição geológica simplificada que depende do carácter da massa rochosa envolvida. Esta concretiza-se com os requisitos apresentados no Anexo I, e em consideração com duas características do material: o primeiro grupo que abrange a composição mineralógica, a textura e a cor da rocha, o segundo grupo considerada o grau de alteração/natureza das descontinuidades e a estrutura geológica do corpo rochoso.

Adicionalmente, a ISRM recomenda que se providencie uma descrição geológica geral para a massa rochosa tal como se realiza para cada unidade geológica.

No que respeita à caracterização geológica, igualmente, aconselha-se a associação ao grau de alteração das rochas (Anexo I), à natureza das descontinuidades e das estruturas geológicas /dobras, falhas, atitude das famílias de descontinuidades, etc.) das massas rochosas.

O espaçamento das descontinuidades que constituem fracturas e a espessura das camadas são duas características estruturais recomendadas pela ISRM. Para descrição das características mecânicas utilizam-se os valores de compressão simples do material rocha e o ângulo de atrito das descontinuidades (consultar Anexo I).

No âmbito do caso de estudo, Capítulo 4, é aplicada a classificação BGD para valores de RCU para corpos rochosos. Esta classificação permite referenciar os valores de resistência à compressão uniaxial, provenientes de amostras individuais, como valores característicos/médios do local em estudo. Na Tabela 3.4 identificam-se os intervalos de valores adoptados pela ISRM e respectiva descrição do material e, igualmente comparam-se os valores definidos pela International Association for Engineering Geology (IAEG) [19].

**Tabela 3.4 Classificação BGD de acordo com os valores de resistência à compressão (Adaptado de [19])**

<b>BGD</b>	<b>Simbologia</b>	<b>Descrição de resistência do corpo rochoso</b>	<b>International Association for Engineering Geology, IAEG</b>	<b>Descrição do corpo rochoso</b>
<b>Valores de RCU (MPa)</b>			<b>Valores de RCU (MPa)</b>	
> 200	S1	Muito elevada	> 230	Extremamente rijo
60 – 200	S2	Elevada	120 - 230	Muito rijo
20 – 60	S3	Moderada	50 - 120	Rijo
6 – 20	S4	Baixa	15 - 150	Moderadamente rijo
< 6	S5	Muito baixa	1,5 - 15	Brando

### 3.2.2 CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA - CORRELAÇÃO ENTRE A PROSPECÇÃO GEOFÍSICA E O ÍNDICE Q

As classificações geomecânicas utilizam-se para a caracterização dos maciços rochosos, agrupando as propriedades dos maciços rochosos. As propriedades a serem agrupadas, para posterior classificação, são obtidas por observação directa e os ensaios realizados *in situ* ou em amostras recolhidas em sondagens [20].

Uma das classificações geomecânicas extensamente aplicada é a Classificação de Barton et al. (Sistema Q). Esta classificação foi fundamentada na observação de um grande número de escavações subterrâneas e assenta na definição de um índice de qualidade Q, Eq. 3.3, baseado na análise de seis factores considerados relevantes para a qualificação do comportamento dos maciços rochosos para aquele fim:

$$Q = \left( \frac{RQD}{J_n} \right) * \left( \frac{J_r}{J_a} \right) * \left( \frac{J_w}{SRF} \right) \quad \text{Equação (3.3)}$$

Onde:

- ❖  $\frac{RQD}{J_n}$ : caracteriza a estrutura do maciço rochoso e fornece uma ideia genérica da dimensão dos blocos, definidos pela compartimentação dos maciços diaclasados;
- ❖  $\frac{J_r}{J_a}$ : qualifica as discontinuidades e/ou o seu preenchimento sob o aspecto da rugosidade e do grau de alteração,
- ❖  $\frac{J_w}{SRF}$ : representa o estado de tensão no M.R.

De acordo com Barton (1991), o rácio da velocidade de propagação de ondas longitudinais e de ondas transversais, obtidas através da prospecção geofísica, correlaciona-se com o *rock mass quality Q-value* [21]. A qualidade do maciço rochoso poderá, igualmente, ser estimada através da correlação da velocidade longitudinal,  $V_p$ , que simultaneamente reflecte uma caracterização da frequência das discontinuidades. A relação entre a velocidade longitudinal e o índice Q apresenta-se na Equação 3.4:

$$V_p \approx 3,5 + \log_{10} Q \quad \text{Equação (3.4)}$$

Esta equação obtém valores de  $Q$  inferiores ou superiores a 1. Os valores inferiores a 1,  $Q < 1$  tendem a representar maciços rochosos extremamente fracturados, com preenchimento argiloso, enquanto que valores de  $Q > 1$  correlacionam-se com corpos de melhor qualidade, com fracturas com um espaçamento maior e sem preenchimento [21].

Em níveis menos profundos, regista-se uma variabilidade extrema junto à superfície que poderá ser resultado do contraste geológico entre materiais e de diferentes graus de meteorização. Desta forma, aconselha-se um discernimento atento à prospecção geofísica realizada entre a superfície e 50 m de profundidade.

Devido a relação da propagação de ondas longitudinais com o grau de fracturação do maciço rochoso, a investigação geológica sobrepõe informações derivadas da prospecção *in situ* e reconhecimento de campo. Para um melhor entendimento do estado do maciço, sobrepõem-se informações sobre: o Índice  $Q$ ; o RQD obtido por sondagens de furação; a  $V_p$  derivada da prospecção geofísica e o grau da fracturação (fracturas por metro,  $\lambda \text{ m}^{-1}$ ). A correlação das características mencionadas apresenta-se na Figura 3.4

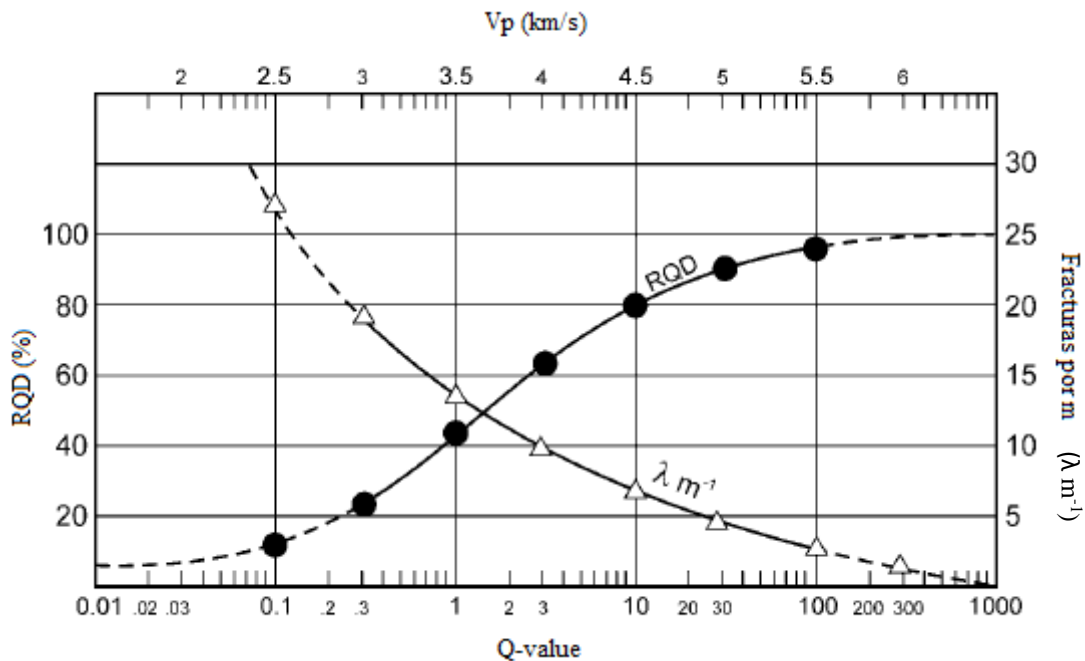


Figura 3.4 Correlação entre RQD, frequência de profundidade  $\text{Fm}^{-1}$ , Índice  $Q$  e  $V_p$  (Retirado de [21])

### 3.2.3 ÍNDICES DE ALTERAÇÃO

Como referido, a meteorização revela-se um processo evolutivo com um impacto importante quer em maciços rochosos como em maciços terrosos. É relevante estabelecer as componentes que permitem analisar a intensidade de alteração, índices de alteração. Estes podem ser

agrupados em índices de alteração químicos, mineralógicos, petroquímicos e geotécnicos. Entre 1970 e 1978, estudos levados a cabo por Parker, Irfan e Dearman verificaram uma correlação favorável entre os diversos coeficientes. Como consequência dos escassos ensaios realizados ainda não se verifica uma abrangência da sua aplicabilidade em determinados materiais rochosos. Porém, diversos estudos concluíram que existe uma relação entre a deformabilidade e a resistência à compressão ( $\sigma_c$ ). Estes parâmetros físicos apresentam uma relação inversamente proporcional ao avanço da meteorização, respectivamente [16].

No âmbito desta dissertação não é possível aplicá-los uma vez que não foi possível obter os resultados de ensaios necessários para isso em tempo útil. Porém, a descrição destes índices encontra-se no Anexo II.

#### 4 CASO DE ESTUDO: APROVEITAMENTO HIDROELÉCTRICO DE CHICAPA II

O Aproveitamento Hidroeléctrico (HP) de Chicapa II situa-se no rio Chicapa, afluente da margem esquerda do rio Cassai, na Província da Lunda-Sul, em Angola, como se encontra representado na Figura 4.1. Este aproveitamento localiza-se a cerca de 20 km para norte da cidade de Saurimo [22].



Figura 4.1 Localização do aproveitamento na província da Lunda Sul, Angola (Adaptado de [22,23])

O aproveitamento objecto do presente programa será construído imediatamente a montante do aproveitamento de Chicapa I, em funcionamento desde 2008, no início de um troço do rio acidentado por rápidos e pequenas quedas, precedendo as Quedas de Chicapa.

O aproveitamento de Chicapa II tem como objectivo principal a criação de uma albufeira, o aproveitamento do potencial hidroeléctrico existente e a regularização de caudais na bacia hidrográfica.

No presente Capítulo apresenta-se uma breve síntese de trabalhos realizados para a execução do futuro empreendimento. Igualmente, expõem-se os diferentes enquadramentos (geológico, morfológico) e descreve-se a litoestratigrafia, hidrogeológica e tectónica da região em estudo.

#### 4.1 ESTUDOS ANTERIORES E ACTUAL FASE DE CONCURSO

Os primeiros estudos destinados ao Aproveitamento Hidroeléctrico de Chicapa II foram solicitados pela Diamang, Companhia de Diamantes de Angola, e realizados pela Hidrotécnica Portuguesa (HP) em 1975. Os estudos encontram-se repartidos em duas fases. A primeira fase foi destinada ao Estudo Prévio e a segunda focalizou a Escolha Final da Solução e o Programa de Recolha de Elementos de Base.

A primeira fase, datada de 1984, Estudo Prévio, apresenta-se na forma de dois volumes. O Volume I compreende a Memória e Desenhos e Estudos Hidrológicos e Energéticos. Apresentam-se os elementos topográficos e geológicos, a implantação do local destinado ao aproveitamento hidroeléctrico, os estudos hidrológicos e energéticos com os respectivos esquemas das diferentes soluções estudadas.

No Volume II, Reconhecimento Geotécnico e Estudo das Soluções Alternativas, apresentam-se as soluções de montante e de jusante do Aproveitamento Hidroeléctrico. Descrevem-se os trabalhos de reconhecimento da fundação da barragem, da central e das áreas de empréstimo. Abordam-se os respectivos ensaios de identificação (granulometria, limites de Atterberg), por peneiração e sedimentação, e de caracterização (ensaios de compactação, ensaios de permeabilidade e ensaios de corte directo, rápidos e lentos em amostras remoldadas).

Com início em 2015 e até ao presente momento, desenrola-se a Fase de Concurso destinada ao futuro aproveitamento que contou com a participação da COBAngola para elaboração/accompanhamento da prospecção geotécnica, do programa de ensaios de laboratório e preparação da cartografia geológica da região em estudo.

No presente Projecto de Concurso, iniciado em 2014, desenvolvido com uma parceria COBAngola e Tetraplano (COBA Group), realizaram-se ensaios de laboratório em rocha para determinação de características físico-químicas e mecânicas (resistência e deformabilidade).

Na Tabela 4.1 identificam-se os ensaios realizados nas diferentes fases de estudo e a sua quantificação.

**Tabela 4.1 Trabalhos de prospeção realizados nas diferentes fases de estudo**

<b>Trabalhos de prospeção e ensaios de laboratório em solos</b>	<b>Campanha da Hidrotécnica Portuguesa (1984)</b>	<b>Campanha de reconhecimento actual (desde o Estudo Base, EB, até à Fase de Concurso, FC)</b>	<b>Total</b>
Poços de reconhecimento	16	11	27
Sondagens de furação à rotação	-	15	15
Recolha de amostras remexidas	30	36	66
Análise granulométrica por peneiração	30	36	66
Análise granulométrica (peneiração e sedimentação)	-	17	17
Limites de Atterberg	30	36	66
Densidade das partículas sólidas	-	20	12
Ensaio de Compactação (Proctor de molde pequeno ou normal)	-	15	15
Ensaio para determinação de características mecânicas e parâmetros de permeabilidade	-	2	10
Ensaio para determinação da dispersividade	-	7	7
Ensaio para determinação do teor em água natural	-	10	10
Ensaio para determinação do teor em matéria orgânica	-	15	15
Ensaio para determinação do equivalente de areia	-	4	4

No Estudo de Viabilidade Técnico-Económica e Ambiental, Projecto Base e Processo de Concurso, apresentado em Novembro de 2014, foram estudadas três variantes para ao corpo da barragem. Estas três variantes encontram-se exemplificadas na Tabela 4.2, juntamente com os respectivos aspectos considerados mais relevantes, onde H e L representam a altura da barragem e a largura do coroamento, respectivamente. [22].

A maior diferença entre as variantes apresentadas na Tabela 4.2, baseou-se na previsão de uma barragem com corpo em betão compactado (BCC). A construção do corpo da barragem em BCC deve-se à grande extensão da barragem e ao correspondente volume do corpo. Os agregados destinados à construção da barragem seriam obtidos nas formações rochosas que ocorressem na albufeira em pedreiras em exploração.

Actualmente, destinada à Fase de Concurso do AH estudam-se duas concepções do perfil tipo em variante de aterro. A primeira seria a concepção da barragem em perfil de aterro homogéneo, igualmente considerado pela HP em 1985, cuja implantação estaria condicionada pela caracterização geotécnica dos materiais de empréstimo. A segunda variante de aterro, com uma extensão de coroamento aproximada de 2550 m, é a construção de uma barragem de enrocamento compactado, em que o órgão impermeabilizante é constituído por um núcleo argiloso construído com materiais provenientes de explorações locais.

Tabela 4.2 Variantes estudadas para o futuro empreendimento (adaptado de [22])

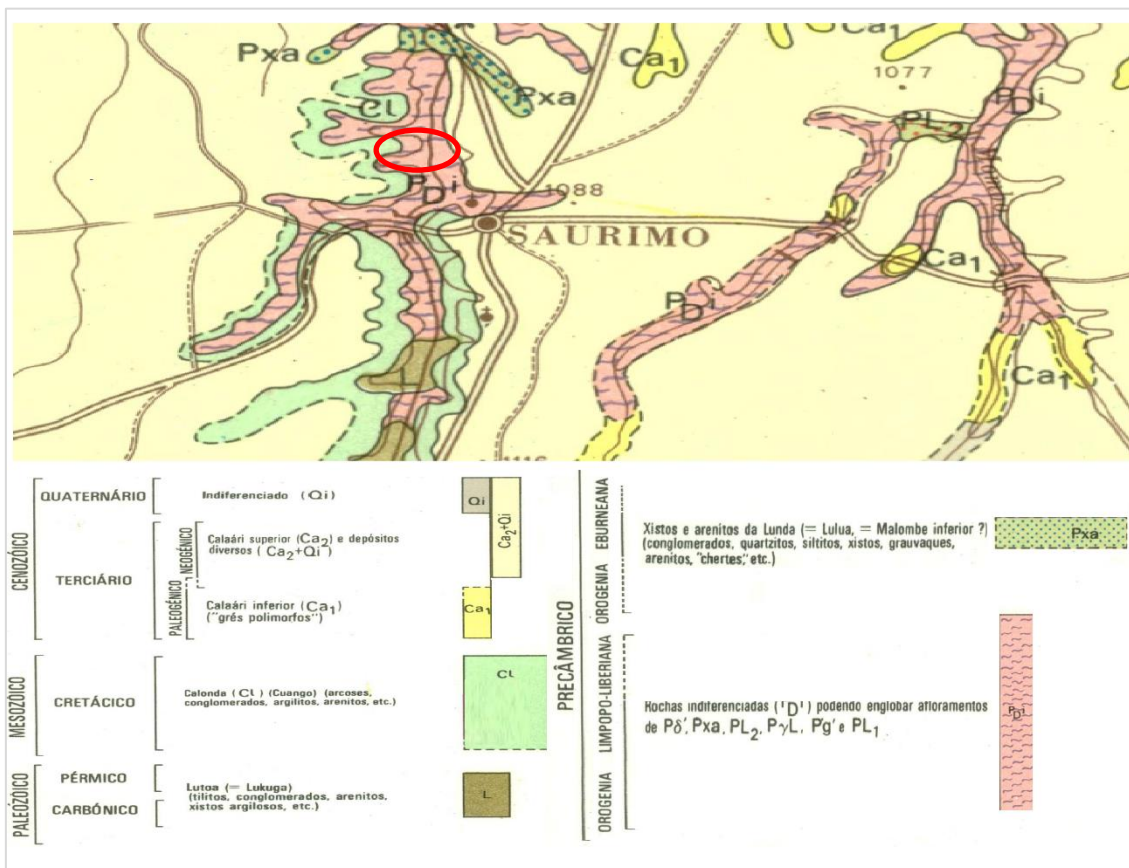
<p><b>Variante I</b></p>	<p>Concepção de um perfil de aterro homogéneo</p>	<p>Colocação de um dreno longitudinal na base do filtro e uma “vala corta águas”, com o objectivo de garantir o melhor encastramento do aterro na fundação.</p> <p>O paramento de montante prevê-se ser protegido com a aplicação de uma camada de enrocamento, enquanto no paramento de jusante será aplicado um revestimento vegetal. <math>H = 23 \text{ m}</math>, <math>L = 8 \text{ m}</math></p>
<p><b>Variante II</b></p>	<p>Concepção de um perfil de enrocamento</p>	<p>Existência de um dreno longitudinal na base do filtro e uma “vala corta águas”, com o objectivo de garantir o melhor encastramento do aterro na fundação.</p> <p>O paramento de montante prevê-se ser protegido com a aplicação de uma camada de enrocamento, enquanto no paramento de jusante será aplicado um revestimento vegetal. <math>23 \leq H \leq 25 \text{ m}</math>, <math>L = 8 \text{ m}</math></p>
<p><b>Variante III</b></p>	<p>Concepção de um perfil em betão compactado com cilindro, BCC</p>	<p>Para a edificação da barragem, os agregados para betão obter-se-iam nas formações rochosas presentes na albufeira ou em pedreiras da região.</p> <p><math>23 \leq H \leq 25 \text{ m}</math>, <math>L = 6 \text{ m}</math></p>

## 4.2 ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO E GEOMORFOLÓGICO GERAL

Na região em estudo predominam dois grupos geológicos bem distintos, representados na Figura 4.2:

- as formações do substrato, de idades compreendidas entre o Pré-Câmbrico e Paleozóico inferior, que se dividem em duas grandes unidades: o Complexo de Base e o Sistema de Kibaras, ambos do Pré-Câmbrico, e o Grupo do Luana.
- e as formações de cobertura, de idades entre o Carbónico superior e o Plistocénico inferior, da qual fazem parte o Sistema do Karroo, o Sistema Continental Intercalar, a Formação do Calonda, o Sistema Kalahari e as “formações superficiais”.

Os grupos geológicos acima descritos encontram-se delimitados na Figura 4.3, onde igualmente a área destinada à implantação do AH encontra-se assinalada a vermelho.

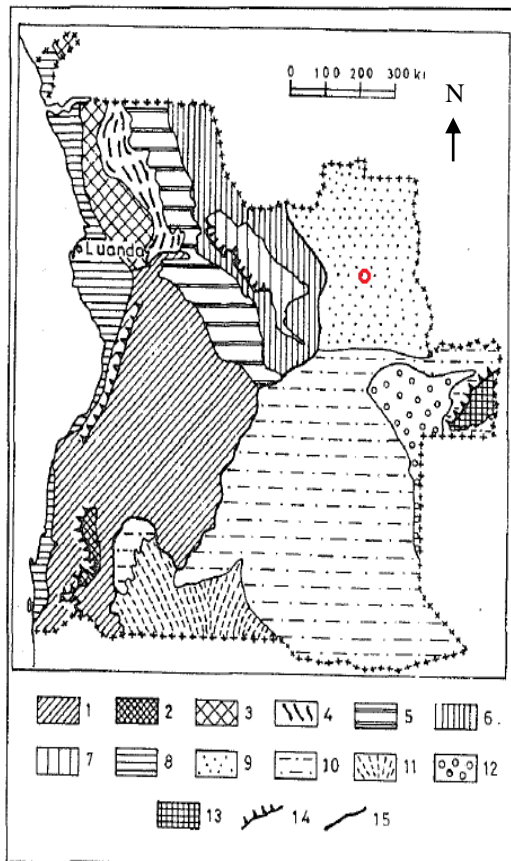


○ Localização do aproveitamento hidroeléctrico

**Figura 4.2** Extracto da Carta Geológica de Angola à escala 1/1.000.000 (1992) e respectiva legenda (Retirado de [22])

Do ponto de vista geomorfológico, o território de Angola encontra-se subdividido em duas partes tal como indicado na Figura 4.3, Ocidental e Oriental. Para a parte Oriental é característico o

relevo de acumulação, enquanto na parte Ocidental predomina o relevo de denudação com intensos fenómenos de erosão recente.



Parte Ocidental:

1 - Planalto Central; 2 - Cadeia de montanhas marginais de Angola; 3 - Planície do Maiombe com relevo pouco acidentado; 4 - Zona em cordilheira do Zenza - Loge; 5 - Planície ondulada do Kwanza - Longe; 6 - Planície fortemente dissecada do Cuango; 7 - Depressão de Cassanje; 8 - Depressão litoral.

Parte Oriental:

9 - "Plateau" da Lunda; 10 - Planície leste; 11 - Planície coluvionar do Cunene; 12 - Depressão de Cameia - Lumbate; 13 - Elevação do Alto Zambeze. Outras convenções: 14 - Os mais importantes degraus formados por efeitos de tectónica e denudação; 15 - limite entre as partes oriental e ocidental.

○ Localização do aproveitamento hidroeléctrico

(in Notícia Explicativa da Carta Geológica à escala 1:1.000.000, 1992)

Figura 4.3 Esboço das Unidades Geomorfológicas de Angola (Retirado de [22])

Do ponto de vista geomorfológico, a zona em estudo enquadra-se no "Plateau" da Lunda, planura de relevo ondulado largo e suavizado, caracterizada pela ausência de qualquer acidente orográfico que mereça menção. O relevo é apenas marcado pelos rios, através dos seus vales abertos e bem definidos, que se desenvolvem por centenas de quilómetros, no sentido S-N.

A espessa cobertura de areias eólicas, suavizando o relevo, é apenas quebrada pelos vales dos rios, que em alguns troços rasgaram profundamente a peneplanície, dissecando-a em toda a sua extensão.

As maiores altitudes ocorrem nos topos interfluviais da zona ocidental e meridional (1100 m) e rondam os 800 m no vale do Cassai, pendendo assim esta região francamente para Norte.

A rede hidrográfica, através do seu principal afluente Cassai, para onde confluem todos os importantes rios da Lunda, drena directamente para a grande depressão central congoleza.

A orientação no sentido S-N dos cursos de água, o seu traçado quase rectilíneo e a sua equidistância e paralelismo indicam a implantação recente destes rios, que na sua evolução erosiva começaram por romper a cobertura arenosa e agora circulam velozmente através dos substratos rochosos do maciço antigo, originando rápidos e pequenas quedas. Nestas zonas, as encostas declivosas definem vales encaixados, muito estreitos e profundos, com diferentes níveis de terraços constituídos por materiais cascalhentos.

Quando interessam apenas as formações arenosas de cobertura, o perfil transversal dos cursos de água da região apresenta-se em vales muito abertos, onde circulam em leitos pouco profundos, com águas que correm lentamente e que provocam alagamentos prolongados nas largas baixas marginais, tomando cada vez maior expressão quanto mais para jusante se situam nos respectivos cursos.

O vale do rio Chicapa, no local de implantação da futura barragem de Chicapa II, situa-se a jusante de um longo troço aluvial e no início de um trecho do rio acidentado por rápidos e pequenas quedas que antecede as Quedas do Chicapa.

O perfil transversal deste vale aberto é assimétrico, com a vertente direita apresentando pendor mais acentuado, passando do fundo aluvial à superfície planáltica numa distância relativamente curta, enquanto a vertente esquerda tem menor declive, passando do leito de estiagem do rio ao planalto numa distância muito superior.

#### 4.3 LITOESTRATIGRAFIA

No local de implantação da barragem e respectiva albufeira identificaram-se as seguintes unidades geológicas [22]:

##### Depósitos indiferenciados (Pliocénico superior ou do Plistocénico) – (Q<sub>i</sub>)

Tratam-se de depósitos eólicos, prolúvio-aluvionares e delúvio-eluvionares formados pela erosão eólica e remoção dos depósitos da série superior do Grupo Kalahari (“argilas arenosas ocre”), constituindo formas características do relevo da planície designadas por "chanas". A espessura destes depósitos varia conforme a sua posição geomorfológica, entre a unidade e as poucas dezenas de metros, ocorrendo nas baixas ou meandros abandonados e nas superfícies dos interflúvios e encostas de elevações com pendor suave.

Consistem, essencialmente, em areias limpas ou argilosas e de argilas de cores amareladas, pardacentas e alaranjadas, podendo ainda ocorrer cascalhos de natureza idêntica às rochas subjacentes. Nas zonas mais aplanadas ocorrem frequentemente cimentados por hidróxidos de ferro, formando "couraças lateríticas" e "couraças conglomeráticas".

#### Sistema do Kalahari (Plistocénico e Terciário continental) – (Ca<sub>1</sub> e Ca<sub>2</sub>)

Neste sistema distinguem-se duas séries:

- a série superior ou das “argilas arenosas ocre” (Ca<sub>2</sub>), constituída por depósitos brandos e conglomeráticos envolvendo seixos quartzosos, nódulos de limonite e blocos de couraça laterítica, seguindo-se um manto espesso de areias argilosas amarelas acastanhadas, de grão fino e origem eólica.
- a série inferior ou dos “grés polimorfos” (Ca<sub>1</sub>), constituída, da base para o topo, por conglomerados, grés silicificados, calcedónias gresosas, grés calcários, grés silicificados e quartzíticos e arenitos claros ou avermelhados;

#### Formação de Calonda (Cretácico médio e Cretácico superior) – (Cl)

Esta formação caracteriza-se por ser o primeiro conjunto de rochas sedimentares que se segue às erupções kimberlíticas, daí a ocorrência de grandes quantidades de diamantes nestas camadas detríticas e a sua grande importância económica.

É constituída, da base para o topo, por conglomerados, areias argilosas, arenitos, argilitos, conglomerados, e por rochas silicificadas, grés e areias, que fazem a transição para o Sistema do Kalahari.

#### Sistema do Karroo - Série do Lutôe (Carbónico superior e Pérmico inferior) – (L)

O Sistema do Karroo é formado por um conjunto de rochas sedimentares que se depositaram em grande discordância sobre o Complexo Base, estando representado no local em estudo pela série do Lutôe. Esta série é constituída por xistos argilo-gresosos, conglomerados, grés argilosos, grés arcósicos e argilitos, rochas estas de cores muito variadas e distingue-se por uma moreia ou tilito na base (conglomerado de origem glaciária).

#### Grupo de Luana (Pré-Câmbrico e Paleozóico inferior) – (Pxa)

É o grupo rochoso mais representativo na zona do aproveitamento hidroeléctrico. Trata-se de um conjunto rochoso de fácies sedimentar e de composição siliciosa constituído por quartzitos, grés quartzíticos vermelhos, conglomerados, xistos vermelhos e negros, xistos argilosos e grés feldspáticos. São ainda assinaláveis intrusões de pórfiros graníticos.

### Rochas indiferenciadas (Pré-Câmbrico) – (P<sub>Di</sub>)

É um conjunto de rochas que inclui afloramentos de diversas formações:

P<sub>DL</sub> – é constituído por granitos porfiróides.

P<sub>Đ'</sub> – trata-se essencialmente de rochas constituídas por doleritos, dioritos, gabros, etc.

(P<sub>x</sub>a) – Grupo de Luana.

PL<sub>2</sub> – Série Metamórfica Superior da Lunda que é constituída por conglomerados, arenitos, xistos, etc.

P<sub>g</sub>' – é constituído por granitos em regra gnaissificados.

PL<sub>1</sub> – trata-se da Série Metamórfica Inferior da Lunda que é constituída por gnaisses, leptinitos, xistos, quartzitos, anfibolitos, etc.

#### 4.4 HIDROGEOLOGIA

A litologia, a estrutura geológica, o grau de alteração e fracturação, o tipo de solo e coberto vegetal constituem o grupo de factores condicionantes das características hidrogeológicas das formações da região. As características hidrogeológicas referidas baseiam-se no valor e no tipo de permeabilidade das formações existentes no local.

A natureza essencialmente arenosa e a topografia quase plana dos depósitos eólicos, prolúvio-aluvionares e delúvio-eluvionares e da série superior do Grupo Kalahari (“argilas arenosas ocre”), com grande representatividade na zona do estudo, bem como os solos residuais e as camadas detríticas da Formação de Calonda reúnem, em regra, características de permeabilidade passíveis de facilitar a infiltração das águas e o seu armazenamento inferiormente suportado pelas formações rochosas subjacentes, menos permeáveis. Assim, do ponto de vista hidrogeológico, estas unidades originam aquíferos livres sujeitos a variações sazonais, pelo que é de prever a presença de um nível freático a reduzida profundidade nestas formações, o qual, durante e após a época das chuvas, se poderá situar na vizinhança da superfície, nomeadamente nas zonas topograficamente mais baixas.

Na zona superficial das rochas areníticas, constituída predominantemente por solos, o nível de água não deverá constituir uma superfície contínua, devido aos blocos de rocha sã e a níveis silto-argilosos (menos permeáveis), permitindo assim, a existência de água em vários níveis independentes, isto é, formando-se aquíferos confinados a semi-confinados, em profundidade, e aquíferos suspensos, mais à superfície.

Os “grés polimorfos”, a Série do Lutôe, o Grupo de Luana (ocorrentes na zona da barragem) e as Rochas indiferenciadas apresentam uma permeabilidade fissural, fazendo-se a infiltração através de fracturas e a circulação de água através da rede de diaclases, de zonas de esmagamento ou ainda de zonas de contacto. Contudo, na zona superficial dos maciços rochosos, em que estes se encontram mais descomprimidos, com maior fracturação e fracturas abertas, a permeabilidade deverá ser mais elevada. Assim, é de prever que, a partir de reduzida profundidade e em consequência do fechamento das fracturas e do enchimento argiloso, a permeabilidade se torne reduzida. Deste modo, ao longo dos maciços rochosos metamórficos e ígneos, não deverão existir aquíferos, isto é, formações capazes de armazenar e produzir caudais significativos, podendo, contudo, a circulação da água ser facilitada ao longo de zonas singulares em que a fracturação seja favorável, como é o caso das zonas com filões e filonetes de quartzo.

#### 4.5 TECTÓNICA E ESTRUTURA

Sob o ponto de vista tectono-estratigráfico Angola está inserida no cratão Cassai-Congo. De acordo com a Carta Geológica de Angola à escala 1:1 .000.000, neste sector do cratão, que se caracteriza por uma grande estabilidade tectónica, destacam-se fundamentalmente dois andares estruturais: i) o inferior, constituído pelo soco cristalino que é formado por rochas do Arcaico e do Proterozóico Precoce; ii) e o superior que constitui a cobertura e é formada por complexos de idade mais recente, desde o Proterozóico Tardio até ao Cenozóico (Plistocénico e Holocénico) [22].

Neste contexto e sob o ponto de vista geotectónico, o aproveitamento hidroeléctrico e respectiva albufeira desenvolvem-se fundamentalmente sobre Formações Superficiais do Pliocénico superior ou do Plistocénico, que cobrem as formações do substrato, constituídas por rochas cristalinas de idade mais antiga do complexo inferior (Proterozóico Precoce), as quais são relacionadas com a fase final de estruturação da crosta continental que se depositaram em depressões e rifts.

As formações postas a descoberto por acção da erosão encontram-se muito deformadas (com dobras de diferentes características) devido à acção das orogenias pré-câmblicas. As formações constituintes do soco encontram-se frequentemente cobertas por depósitos horizontais de idades neogénica-quadernária e quadernária, que podem ter espessuras muito elevadas da ordem das dezenas de metros.

Compreende-se que a condicionante tectónica do local apresenta-se fulcramente no percurso desenvolvido pela linha de água, devido à presença de um troço do rio acidentado por rápidos e pequenas quedas.



## 5 ESTUDO GEOTÉCNICO DA BARRAGEM DE CHICAPA II: TRABALHOS REALIZADOS E RESULTADOS OBTIDOS

Neste Capítulo apresentam-se os trabalhos de campo e a prospecção geotécnica, considerados para a elaboração da presente dissertação e que tiveram lugar para a execução de uma memória para a Fase de Concurso para o AH. Igualmente, expõe-se os resultados obtidos juntamente com uma breve avaliação e discussão dos mesmos.

Com o objectivo de aprofundar o conhecimento sobre o local do futuro Aproveitamento Hidroeléctrico, realizou-se uma campanha de prospecção geotécnica, mecânica e geofísica. Esta foi definida pelo projectista, COBA S.A., e levada a cabo pelo empreiteiro, Mota-Engil Angola. Durante a realização da memória, a autora da dissertação teve oportunidade de trabalhar directamente com a COBA S.A no tratamento de dados no Serviço de Geotecnia. A campanha de prospecção visou caracterizar o local da barragem e identificar materiais possíveis de serem utilizados na respectiva construção.

O plano dos trabalhos de prospecção geotécnica foi elaborado tendo em consideração o tipo de terrenos ocorrentes na região em que se insere a barragem e a respectiva albufeira, o tipo de parâmetros geotécnicos essenciais para uma adequada caracterização das formações a interessar e das características da obra. A campanha consistiu: na execução de 9 perfis de refração sísmica com 60 m de comprimento e 3 pontos de tiro; na abertura de 11 poços de reconhecimento (4 na margem esquerda, 5 na margem direita e 2 na zona da futura central), 15 sondagens de furação à rotação (5 na margem esquerda, 6 na margem direita e 4 na zona da central), verticais ou com 60° de inclinação com a horizontal, possibilitando a realização de ensaios *in situ* para avaliação da condutividade hidráulica em maciços rochosos e terrosos. As sondagens realizaram-se com diâmetros entre os 76 e os 101 mm, consoante o material atravessado, e possibilitaram a recolha de tarolos em todas elas. Igualmente, quando a geologia assim o permitisse (zonas de solos ou de maciços rochosos decompostos), foram realizados ensaios de penetração dinâmica normalizados, SPT (“*Standard Penetration Test*”).

Na Figura 5.1, identificam-se os locais onde tiveram lugar os trabalhos de prospecção mecânica e geofísica, juntamente com a respectiva fase de estudo.

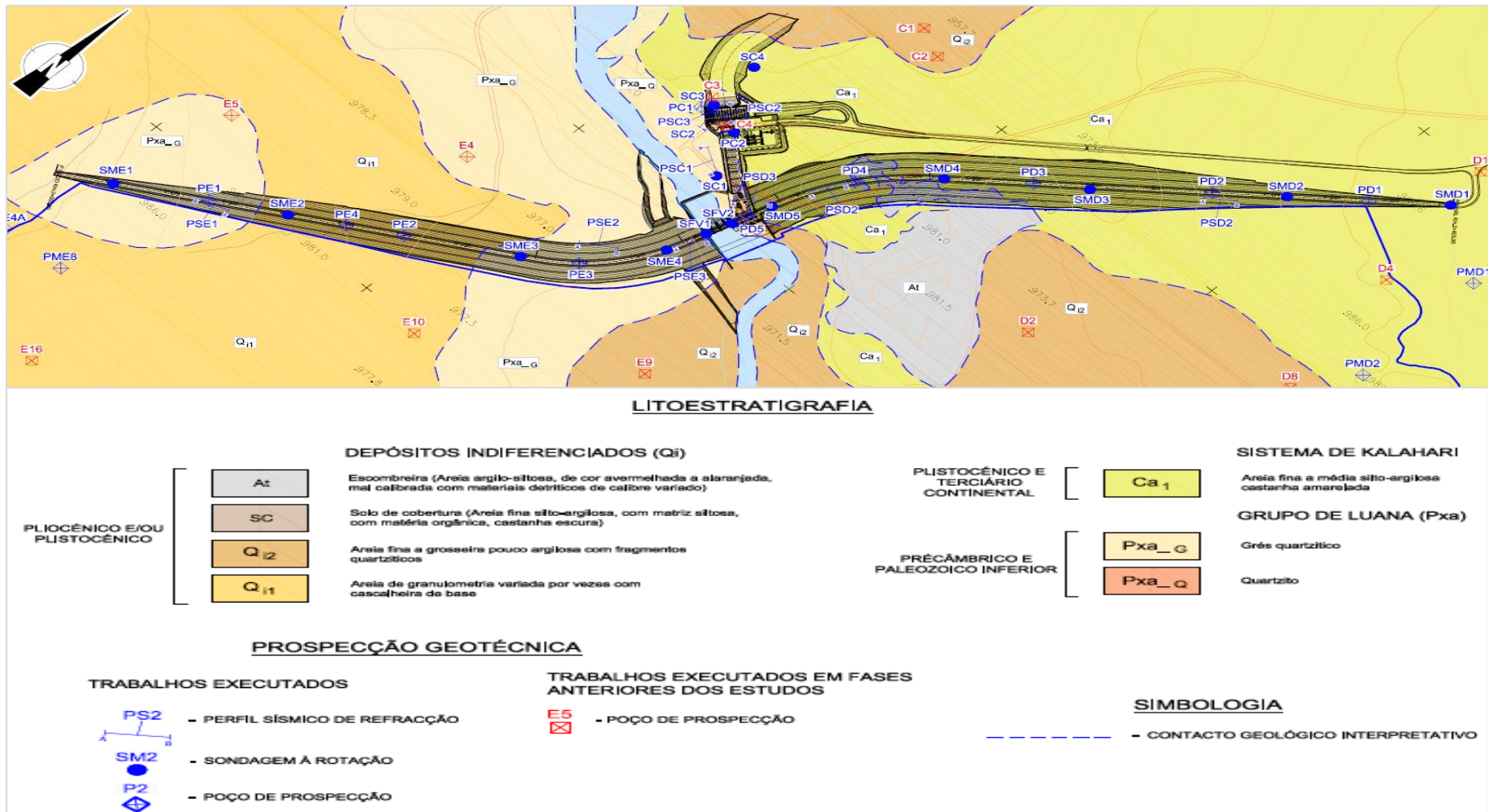


Figura 5.1 Planta geológica com representação da prospecção mecânica e geofísica (Adaptado de [22])

Com a recolha de amostras, na abertura dos poços, e de tarolos, com a execução de sondagens à rotação, obtiveram-se 32 amostras de solo e 18 de rocha.

Os ensaios de identificação e de caracterização mecânica realizados nas amostras de solo previstos foram:

- Análise granulométrica por peneiração;
- Análise granulométrica por peneiração e sedimentação;
- Determinação dos limites de consistência;
- Determinação do teor em água natural;
- Determinação da densidade das partículas sólidas;
- Determinação da dispersividade dos solos finos;
- Compactação do tipo Proctor normal em molde pequeno,
- Determinação do teor em matéria orgânica.

Os ensaios de identificação e de caracterização mecânica nas amostras de rocha previstos foram:

- Determinação da porosidade, massa volúmica e absorção de água;
- Análise petrográfica;
- Determinação da velocidade de propagação de ultra-sons;
- Determinação da resistência à fragmentação – ensaio de desgaste pela máquina de Los Angeles;
- Ensaio de desgaste por abrasão Los Angeles;
- Ensaio de resistência ao desgaste pelo método de Micro-Deval;
- Ensaio de resistência à compressão uniaxial;
- Ensaio de resistência à carga pontual ("point load test");
- Reactividade aos alcális,
- Análises químicas para determinação de sais mineirais: sulfatos, cloretos e carbonatos.

A recolha de amostras teve como critério a selecção de diferentes horizontes litológicos interessados, com excepção das camadas mais superficiais, para caracterização da natureza das formações ocorrentes. A não recolha de amostras em camadas mais superficiais deve-se ao seu possível grau de erosão e meteorização, e existência de matéria orgânica, podendo não corresponder às características das formações existentes no local.

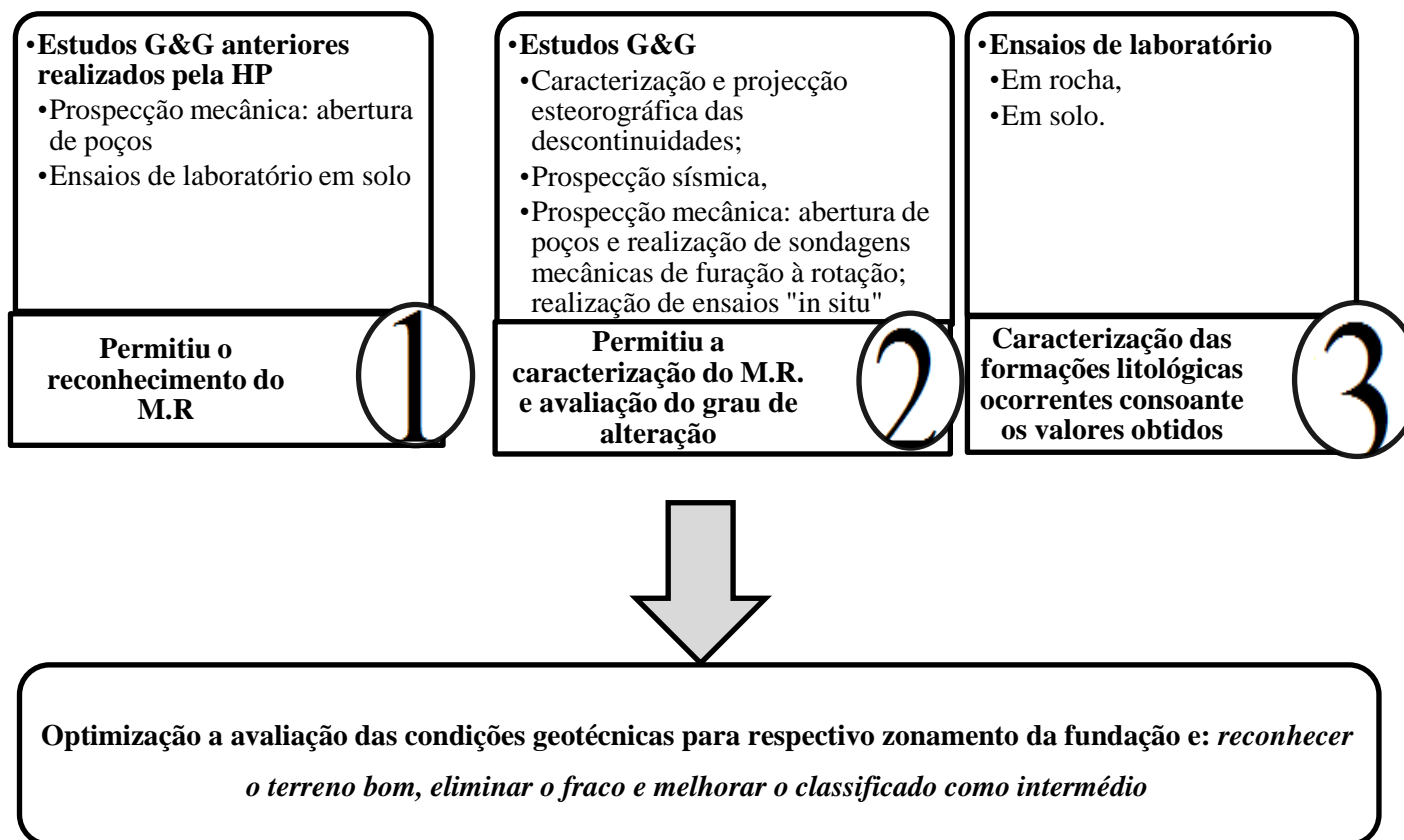
Na Figura 5.2 encontram-se identificadas a possível localização para a implantação do eixo da barragem e da futura central hidroeléctrica e órgãos anexos.



**Figura 5.2** Localização aproximada do eixo da barragem, central hidroelétrica e órgãos anexos em fotografia aérea do Google Earth

Na Figura 5.3 enumeram-se e descrevem-se as metodologias de trabalho seguidas tendo por base os estudos G&G e ensaios de laboratório.

Figura 5.3 Esboço da metodologia de trabalho seguida com base nos estudos geológicos e geotécnicos e ensaios de laboratório



## 5.1 RECONHECIMENTO DE CAMPO

### 5.1.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS

No ano de 2014 o serviço de geotecnia da COBA S.A, COBAngola e Tetraplano realizaram uma visita ao local do futuro empreendimento com o objectivo de se realizar um reconhecimento de campo. Do reconhecimento, identificou-se um perfil assimétrico do vale. Igualmente, reconheceram-se os afloramentos e sua litologia (arenitos quartzíticos, arenitos e quartzitos). Estes apresentam uma direção paralela às margens do rio. A vertente de menor pendor encontra-se coberta por areias finas mais ou menos argilosas e possuem um nível de separação (cascalho areno-quartzítico, rolado) com o maciço rochoso. A vertente de pendor mais acentuado, margem direita, está coberta por areias finas argilosas e igualmente possuem uma camada de separação (saibro argiloso com concreções ferruginosas) com o M.R. Da Figura 5.3 a 5.4 é possível visualizar o aspecto geral da fundação da barragem e do local da central, respectivamente.

Durante a caracterização do local, não se identificaram acidentes ou estruturas tectónicas. Este levantamento focou-se na identificação e medição de atitudes das descontinuidades (fracturação) em afloramentos existentes. A identificação e caracterização das descontinuidades deu-se em 3 zonas: margem esquerda; margem direita e central hidroeléctrica – margem direita.

A caracterização e projecção estereográfica das descontinuidades realizou-se como auxílio do software Dips da Rocscience (versão 6). Na Tabela 5.1 apresentam-se as atitudes das descontinuidades medidas e projectadas na rede de Schmidt, por tipo de descontinuidade, os respectivos planos e pólo, identificando-se as orientações médias das principais famílias de descontinuidades em cada um dos locais de estudo.

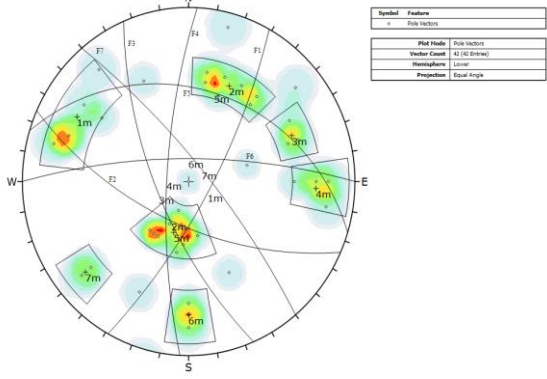
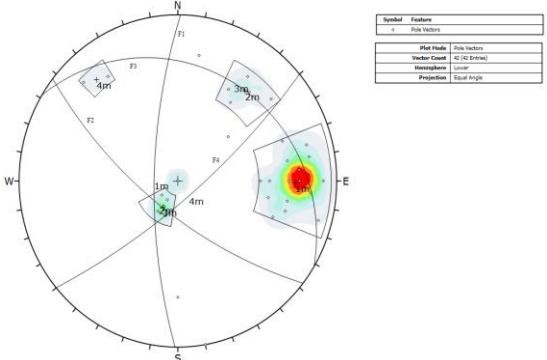
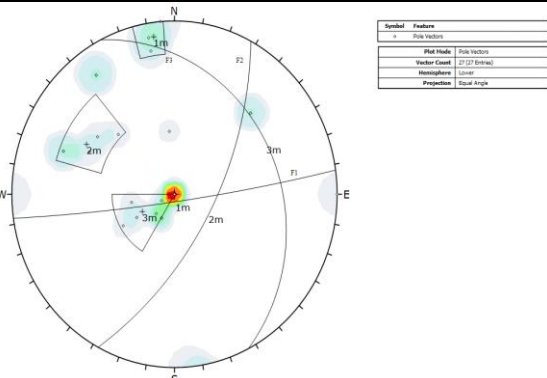


**Figura 5.4** Aspecto geral da fundação da barragem (Retirado de [22])



**Figura 5.5** Aspecto geral da zona da central (Retirado de [22])

**Tabela 5.1 Projecção estereográfica das descontinuidades e identificação das principais famílias**

Tipo de intervenção	Projecção estereográfica (rede de Schmidt) das descontinuidades	Atitudes das principais famílias de descontinuidades
Barragem (M.D.)		<p>Diaclases</p> <p>F1 = N 29° E, 75° SE            F2 = N 66° W, 62° SW            F3 = N 23° W, 68° SW            F4 = N 3° E, 75° W            F5 = N 73° W, 34° N            F6 = E- W, 75° N            F7 = N 40° W, 78° NE</p>
Barragem (M.E.)		<p>Diaclases</p> <p>F1 = N 1° E, 73° W            F2 = N 52° W, 69° SW            F3 = N 59° W, 21° NE            F4 = N 50° E, 77° SE</p>
Central e órgão hidráulicos – (M.D.)		<p>Diaclases</p> <p>F1 = N 82° E, 85° S            F2 = N 28° E, 63° SE            F3 = N 27° W, 25° NW</p>

### 5.1.2 DISCUSSÃO

Com base na projecção estereográfica executada pelo software *Dips*, tendo por base o reconhecimento de campo, diferencia-se o comportamento das margens.

Da projecção estereográfica entende-se:

- i. Na margem esquerda, M.E, a orientação das descontinuidades apresenta um intervalo entre NE e NW, com inclinações a variar entre  $73 - 77^\circ$  W/SE e  $21 - 69^\circ$  SE/SW.  
Famílias de descontinuidades sub-verticais a verticais.
- ii. Na margem direita, M.D., a orientação das descontinuidades é de NE a NW a E-W, com uma inclinação entre  $62 - 75^\circ$  SW/W a  $34 - 78^\circ$  NE/N.  
Famílias de descontinuidades maioritariamente sub-verticais.
- iii. O local da central hidroeléctrica (M.D.) possui planos de descontinuidade com direcções entre NE a NW, com inclinações de  $63 - 85^\circ$  S/SE e  $25^\circ$  NW, respectivamente.  
Famílias de descontinuidades maioritariamente sub-verticais.

Admite-se a existência de quatro famílias na M.E. Na margem direita, o aglomerado criado através da inserção dos valores de direcção e inclinação dos planos conduz a uma identificação de sete famílias principais; porém, assume-se a existência de três grandes famílias. Tal se deve ao facto de manifestarem direcções e inclinações semelhantes entre elas, com as seguintes combinações:

- F1 e F4;
- F2, F3;
- F5 e F4;

O local previsto para a implantação da central e órgão hidráulicos, apresenta a mesma ocorrência de famílias.

Na ausência de fotografias aéreas, analisou-se a Figura 5.2, retirada do Google Earth. Nesta, identifica-se uma descoloração e uma sobreposição de saliências que poderão estar ligadas a alguma particularidade tectono/estrutural.

As medições da estratificação foram registadas em afloramentos de grés quartzítico.

## 5.2 PROSPECÇÃO GEOFÍSICA

### 5.2.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS

A prospecção geofísica realizada na campanha de investigação da fase de concurso do futuro Aproveitamento Hidroeléctrico de Chicapa II inclui apenas o método sísmico de refacção, que fundamenta na teoria da elasticidade.

Através da prospecção geofísica obtêm-se valores de velocidades de ondas sísmicas, que permitem a estimação de parâmetros de resistência do maciço rochoso, passíveis de correlação com a qualidade da rocha e intensidade de fracturação. Igualmente, os valores de velocidade correlacionam-se com a densidade e a porosidade da rocha em função da profundidade. Sendo que os parâmetros referidos, densidade e porosidade, anteriormente manifestam-se de forma directa e inversamente proporcional ao estado de tensão do maciço e profundidade, respectivamente.

Durante a campanha de prospecção, realizaram-se 9 perfis sísmicos de refração. Na margem esquerda executaram-se 3 perfis (PSE1, PSE2 e PSE3) coincidentes com o eixo da barragem. Os restantes perfis, (PSD1, PSD2, PSD3, PSC1, PSC2 e PSC3), foram realizados na margem direita e a sua execução coincidiu com o eixo da barragem e o local de implantação da central hidroeléctrica. Recorreu-se a um martelo como fonte de energia, tendo-se definido os horizontes sísmicos com base nas ondas longitudinais  $V_p$ , com a finalidade de se determinar a profundidade aproximada a que se encontra o maciço rochoso e, por consequência, a espessura de sedimentos existentes. Cada perfil sísmico teve um comprimento total de 60 m a que corresponde uma profundidade de investigação da ordem dos 15-20 m. Os perfis sísmicos obtidos encontram-se no Anexo III.

Na Figura 5.6 localizam-se os tiros directos e inversos de cada perfil sísmico preconizado. Os perfis de cada zona encontram-se diferenciados pela sua cor. Estando os perfis da margem esquerda identificados a encarnado, os perfis da margem direita a verde e os do local da central a azul.



**Figura 5.6** Localização dos perfis sísmicos em fotografia aérea do Google Earth

## 5.2.2 DISCUSSÃO

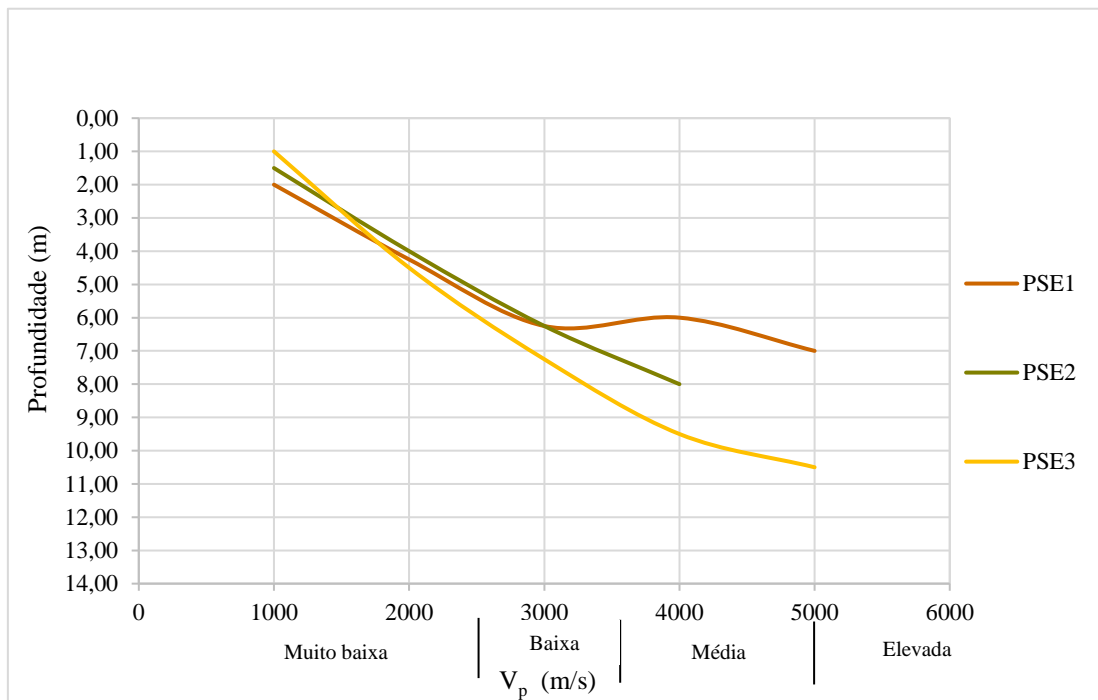
Através dos perfis sísmicos adquiridos, Anexo III, identificaram-se as profundidades das velocidades longitudinais,  $V_p$ , registadas. Estas variam entre os 1000 e 5000 m/s. Com a análise dos mesmos esboçou-se o comportamento das  $V_p$ , em profundidade, em relação à profundidade registada. A ausência de representação entre os 0 e 1000 m/s (entre os 0 e 6 m, mediante o local) deve-se à presença de material terroso, cuja interpretação não se encontra em estudo no âmbito da presente dissertação visto que o seu objectivo seria estabelecer graus de meteorização para maciços rochosos.

A classificação dos valores de  $V_p$  tiveram em conta a Tabela 5.2.

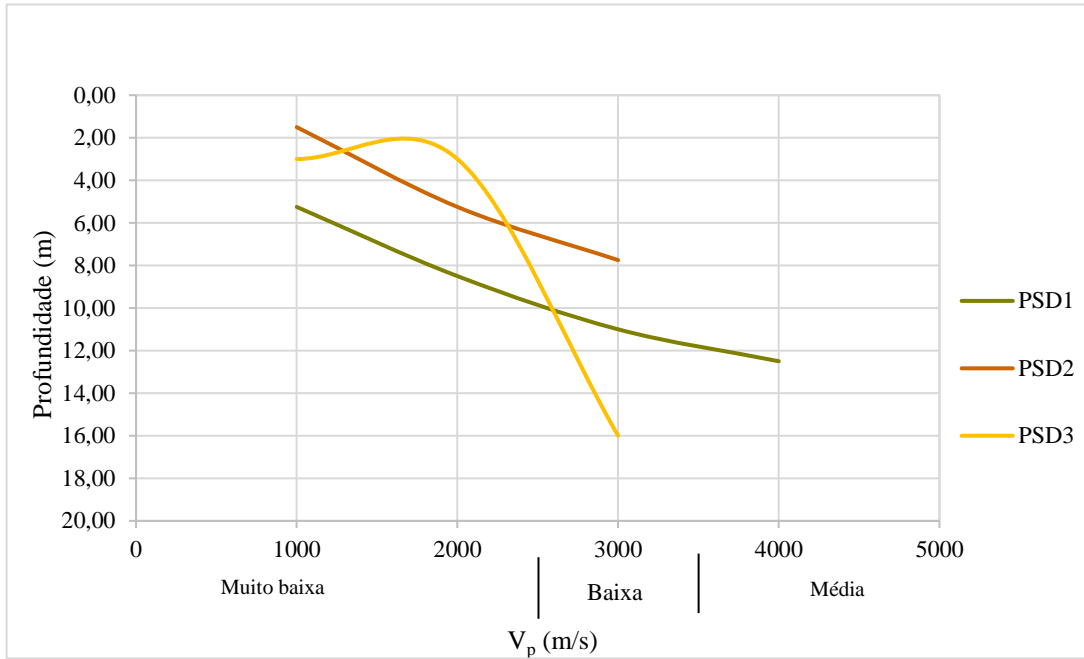
**Tabela 5.2 Classificação sísmica em maciços rochosos - Qualidade do maciço**  
(Adaptado [24])

<b>Designações da qualidade</b>	<b><math>V_p</math> (m/s)</b>
Muito baixa	< 2500
Baixa	2500 - 3500
Médio	3500 - 5000
Elevada	5000 - 7000
Muito elevada	> 7000

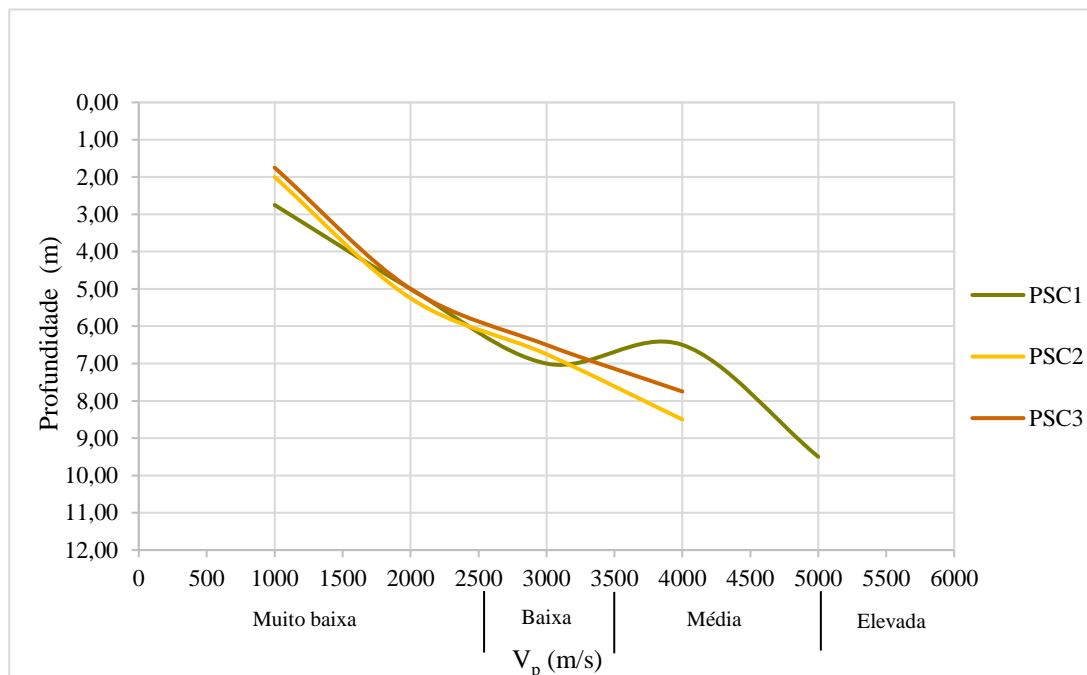
Nas Figuras 5.7 a 5.9 esboça-se o comportamento das velocidades longitudinais, das ondas acústicas em profundidade, em relação à profundidade registada.



**Figura 5.7** Esquema comportamental das ondas longitudinais dos perfis sísmicos da margem esquerda com a profundidade



**Figura 5.8** Esquema comportamental das ondas longitudinais dos perfis sísmicos da margem direita com a profundidade



**Figura 5.9** Esquema comportamental das ondas longitudinais dos perfis sísmicos da zona da central hidroeléctrica com a profundidade

A prospecção geofísica realizada na M.E. realizou-se num alinhamento para NE, na direcção do vale, com a seguinte ordem: PSE1; PSE2 e PSE3.

Do esboço da margem M.E retira-se que:

- i. O PSE1 verifica um comportamento anómalo aos 6 m, visto que tende para uma velocidade constante, de 3000 m/s, o que pode corresponder à passagem de um acidente geológico subvertical.

Este perfil regista que, até aos 6 m de profundidade, o local prospectado corresponde a um maciço de muito baixa a baixa qualidade.

- ii. A velocidade longitudinal do PSE2 regista um comportamento directamente proporcional à profundidade investigada, admitindo-se que o material presente, em profundidade, um grau de compactação maior, uma diminuição da porosidade e um aumento da qualidade do maciço.

A qualidade do maciço varia de muito baixa a baixa até 7,5 m.

- iii. O PSE3 também apresenta um comportamento directamente proporcional entre  $V_p$  e a profundidade.

A qualidade do maciço varia de muito baixa a baixa até 8 m.

Admite-se que a qualidade do maciço decresce em profundidade do PSE1 ao PSE3, dos 6 para os 8 m. Este decréscimo deverá estar associado à proximidade do fundo do vale, isto é, do curso do rio. Salienta-se a situação anómala registada no PSE1, visto que, supostamente, o material litológico estudado entre os três perfis será o mesmo.

A prospecção geofísica na margem direita realizou-se segundo um alinhamento para NE, afastando-se do vale para o topo da encosta, com a seguinte ordem: PSD3; PSD2 e PSD1.

Da área prospectada na M.D. verifica-se que:

- i. O perfil PSD3 reflecte uma caso de proporcionalidade directa entre  $V_p$  e a profundidade.

A qualidade do maciço varia de muito baixa a baixa até 16 m, tendo a prospecção geofísica alcançado uma profundidade máxima de 16 m.

- ii. O perfil PSD2 que teve um alcance de 8 m, regista unicamente uma qualidade do maciço, a variar entre muito baixa a baixa.

Verifica-se uma ocorrência de proporcionalidade directa entre  $V_p$  e a profundidade.

iii. O PSD1 apresenta uma profundidade alcançada de 12 m, igualmente em proporcionalidade directa com  $V_p$ .

Verifica-se o valor mais elevado de  $V_p$ , 4000 m/s.

A qualidade do maciço varia de muito baixa a baixa até 12 m.

Numa análise entre o PSE3 e PSD3 admite-se um grande intervalo, de 8 a 16 m, entre as sucessivas profundidades registadas para consideração de uma maciço de média qualidade ( $V_p > 3500$  m/s). A prospecção da M.D. indica que há um aumento para classificação média do maciço entre o PSD3 e o PSD1, ou seja, há um decréscimo de profundidades para valores de  $V_p > 3500$  m/s.

A variação de valores acima referidos sugere margens assimétricas e existência de um possível acidente geológico a ser investigada entre a margem esquerda e direita.

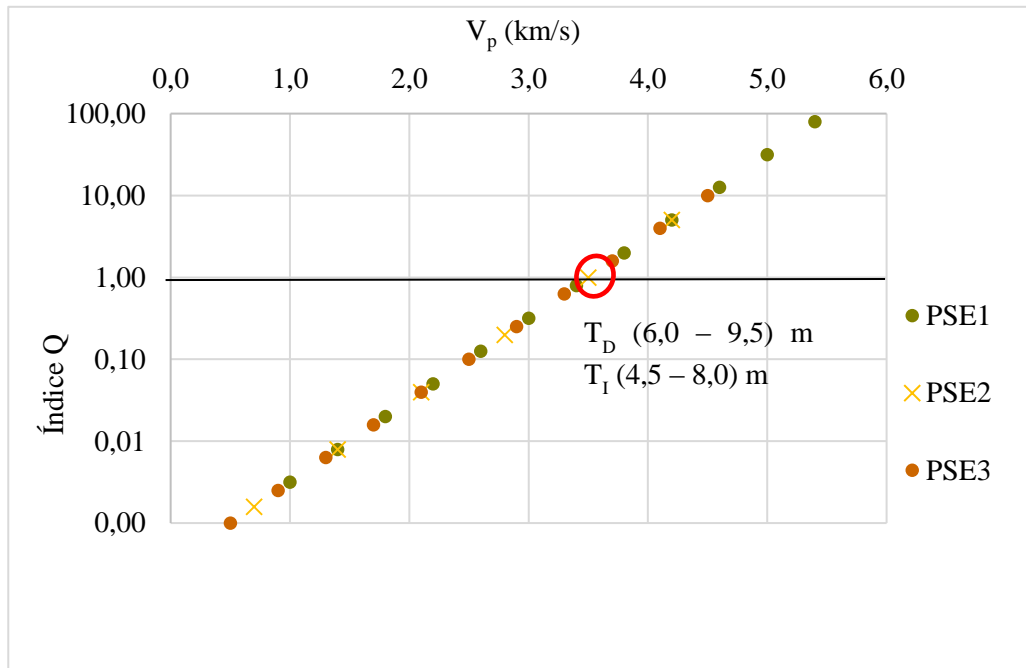
A prospecção geofísica realizada no local da central e órgãos hidráulicos, margem direita, não apresenta qualquer alinhamento significativo. O PSC1 realizou-se paralelamente ao túnel de adução, e os PSC2 e PSC3 realizaram-se perpendicularmente entre si, no local da central.

Da análise dos resultados obtidos para o local da central e órgãos hidráulicos, na margem direita, verifica-se que:

- i. O PSC1 apresenta um comportamento de proporcionalidade directa entre 3 e 7 m; posteriormente regista-se um ponto de inflexão, a partir do qual o  $V_p$ , com um aumento progressivo, regista-se a uma menor profundidade. Esta situação reflecte o aumento da elevação, em cerca de 2 m, entre o tiro directo ( $T_D$ ) e o tiro inverso ( $T_I$ ). Consultando o perfil verifica-se que as linhas representativas de  $V_p$  acompanham este comportamento.
- ii. O PSC2 e PSC3, realizados perpendicularmente entre si, apresentam um comportamento de proporcionalidade directa. Ambos os perfis alcançaram profundidades máximas semelhantes, entre 7,5 e 8,5 m.  
A qualidade do maciço varia de muito baixa a baixa, entre 7 e 7,5 m de profundidade, nos dois perfis.

Admite-se a existência de uma zona de melhor qualidade da rocha, paralelamente ao túnel de adução, sugerida pelo perfil PSC1. Esta situação requer maior atenção para o estudo da fundação do órgão anexo. Igualmente, presencia-se um comportamento do M.R semelhante nas direcções S-N e W-E, registado nos perfis PSC2 e PSC3.

A Equação 3.4 permite calcular o índice Q. Valores de  $Q < 1$  tendem a representar maciços rochosos extremamente fracturados, com preenchimento argiloso, e valores de  $Q > 1$  correlacionam-se com corpos de melhor qualidade, com fracturas com um espaçamento maior e sem preenchimento [21]. Assume-se que Q será maior que 1 quando o valor de  $V_p$  for igual, ou superior, a 3500 m/s. Através dos valores de  $V_p$  adquiridos na realização dos perfis sísmicos, calculou-se o índice Q para cada perfil. As correlações entre  $V_p$  e Q encontram-se expostas nas Figuras 5.10, 5.11 e 5.12.



**Figura 5.10** Correlação da velocidade  $V_p$  com o índice Q na margem esquerda

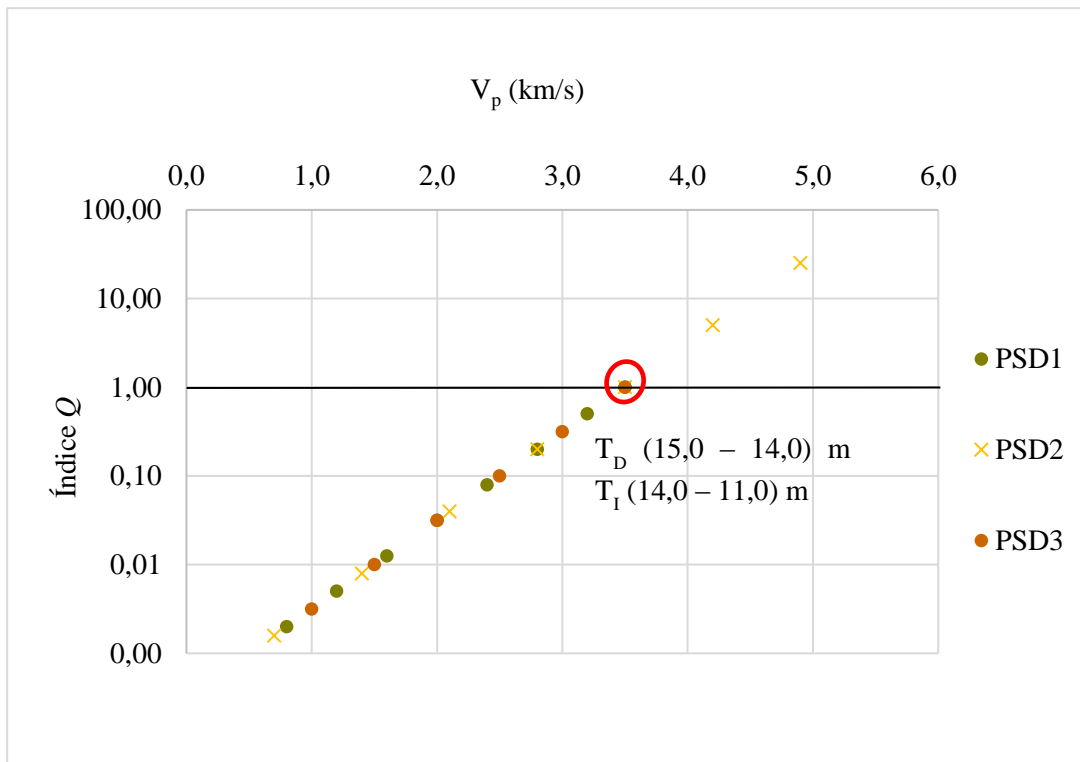


Figura 5.11 Correlação da Velocidade  $V_p$  com o índice  $Q$  na margem direita

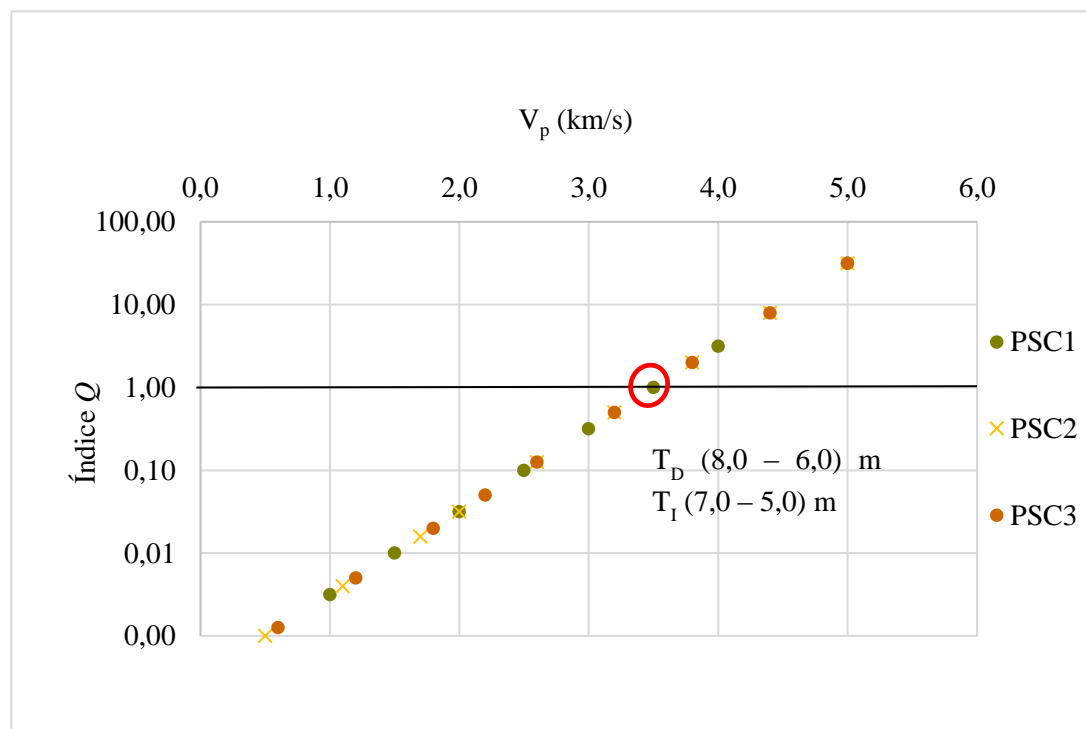


Figura 5.12 Correlação da Velocidade  $V_p$  com o índice  $Q$  no local da central hidroelétrica e órgãos anexos

Da análise conjunta dos perfis de refração sísmica da margem esquerda, Anexo III, com o resumo dos resultados dos perfis de refração sísmica, Anexo IV, conclui-se que nessa margem:

- i. Índice  $Q > 1$  do PSE1, verifica-se a profundidade de 6,0 e 4,5 m,  $T_D$  e  $T_I$ , respectivamente.
- ii. Índice  $Q > 1$  do PSE2, regista-se a profundidade de 8,0 e 6,0 m,  $T_D$  e  $T_I$ , respectivamente.
- iii. Índice  $Q > 1$  do PSE3, verifica-se a profundidade de 9,5 e 8,0 m,  $T_D$  e  $T_I$ , respectivamente.

Do exposto resulta que existe um decréscimo na profundidade do M.R. correspondente a  $Q > 1$ . Este decréscimo verifica-se entre os tiros directos e inversos. Este aumento pode dever-se à contínua aproximação do curso do rio e ao maior estado de meteorização apresentado pelo M.R. junto a ele.

Da análise ao Anexo III, perfis de refração sísmica da M.D., e do Anexo IV, resumo dos resultados dos perfis de refração sísmica, conclui-se:

- i. Índice  $Q > 1$  do PSD3, verifica-se a profundidades superiores a 15,0 e 14,0 m,  $T_D$  e  $T_I$ , respectivamente.
- ii. Índice  $Q > 1$  do PSD2, regista-se a profundidade de 9,5 e 8,5 m,  $T_D$  e  $T_I$ , respectivamente.
- iii. Índice  $Q > 1$  do PSD1, regista-se a profundidade de 14,0 e 11,0 m,  $T_D$  e  $T_I$ , respectivamente.

Infere-se a ocorrência de um trecho de índice  $Q > 1$  a maior profundidade, 15,0 a 14,0 m, no sopé da M.D. do rio, indicando um local com estado de meteorização maior, eventualmente associado a um acidente tectónico que ali exista; esta conclusão é também sustentada pela rotação de atitudes das descontinuidades nas imediações desta área, conforme referido anteriormente (secção 5.1.1). Assume-se a melhoria das características do M.R, visto que  $Q > 1$  tende a ser verificado para valores de profundidade menores, no PSD2. Identifica-se um aumento do índice  $Q$  correspondente a uma profundidade maior, entre 14,0 e 11,0 m, o que se verifica a aproximadamente 950 m, tendo sido registado pelo PSD1. Contudo a sua localização ainda coincide com o eixo da barragem e estará associada à presença de material terroso.

Da análise ao Anexo III, perfis de refração sísmica da central hidroeléctrica e órgãos anexos, e do Anexo IV, resumo dos resultados dos perfis de refração sísmica, conclui-se:

- i. Índice  $Q > 1$  do PSC1, regista-se a profundidades superiores a 8,0 e 6,0 m,  $T_I$  e  $T_D$ , respectivamente.
- ii. Índice  $Q > 1$  do PSC2, regista-se a profundidades de 7,0 e 5,0 m,  $T_I$  e  $T_D$ , respectivamente.
- iii. Índice  $Q > 1$  do PSC3, regista-se a profundidades a partir de 6,0 m,  $T_D$  e  $T_I$ , respectivamente.

Com o estudo da prospecção geofísica em ambas as margens e no local da central e órgãos hidráulicos, margem direita, constata-se uma diferença de comportamentos do M.R.. O comportamento variável do M.R. deriva de um acréscimo do estado de meteorização, com um alinhamento de Sudoeste para Nordeste.

### 5.3 PROSPECÇÃO MECÂNICA

#### 5.3.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS

Na actual fase de concurso procedeu-se à abertura de um conjunto de 11 poços, repartidos entre o eixo da barragem e áreas de empréstimo, perfazendo um total de 15 poços com a campanha de prospecção realizada pela HP (1984). Estes poços foram abertos com o objectivo de aferir/caracterizar o eixo da barragem, as potenciais áreas de empréstimo e os locais determinados para a implantação da tomada de água, da descarga de fundo, do descarregador de cheias e da central hidroeléctrica.

Igualmente realizaram-se 15 sondagens mecânicas de furação à rotação, estando a sua implantação repartida entre o local da barragem e os órgãos hidráulicos anexos. A sua localização em planta pode ser consultada na Figura 5.1

As sondagens tiveram como principal objectivo a investigação, em profundidade, das principais características do maciço, quer no que se refere à natureza das formações em matéria de consistência, compacidade, grau de alteração e espaçamento de fracturas, quer do comportamento hidráulico. Simultaneamente à realização das sondagens mecânicas realizaram-se 13 ensaios de penetração dinâmica do tipo SPT (“*Standard Penetration Test*”). Este representa a cravação de um amostrador com dimensões e energia de cravação normalizadas. O número de pancadas necessárias para atingir a penetração de 30 cm define o valor de  $N_{(SPT)}$ . A análise dos valores obtidos da realização do ensaio SPT assentou na aplicação das Tabelas 5.3 e 5.4.

**Tabela 5.3 Classificação de solo arenoso com base na resistência à penetração dinâmica (Adaptado de [25])**

$N_{(SPT)}$	Compacidade
< 4	Muito solto
4 - 10	Solto
10 - 30	Medianamente Solto
30 - 50	Compacto
> 50	Muito compacto

**Tabela 5.4 Classificação de solos coesivos e correlações aproximadas (com base no ensaio SPT) (Adaptado de [25])**

$N_{(SPT)}$	Resistência à compressão uniaxial, $\sigma$ (kN/m <sup>2</sup> )	Consistência
< 2	< 25	Muito mole
2 – 15	25 - 50	Mole
5 – 10	50 - 100	Consistência média
10 - 20	100 - 200	Duro
20 - 30	200 - 400	Muito duro
> 30	> 400	Rijo

Para caracterização do maciço rochoso, os tarolos obtidos durante a furação classificaram-se quanto à litologia, Percentagem de Recuperação (Rec), Índice RQD (*Rock Quality Design*) e Estado de Alteração (W).

As sondagens atingiram uma profundidade média da ordem de 22 m, tendo os comprimentos variado entre 10 e 30 m. As sondagens de furação executaram-se definindo uma inclinação de 60° ou 90° com a horizontal, visando identificar e atravessar o maior número de descontinuidades possível. No decorrer da furação foram recolhidas 20 amostras indeformadas, distribuídas por diversas sondagens. No local da barragem recolheram-se 13 amostras e na área prevista para a implantação dos órgãos anexos, recolheram-se 5. A descrição das sondagens de furação encontra-se no Anexo V.

A partir da realização dos ensaios SPT, aferem-se as qualidades dos terrenos, tornando possível a sua classificação quanto à compacidade ou consistência, terrenos arenosos e argilosos, respectivamente. Estes realizaram-se com um espaçamento de 1,5 m ou quando houvesse variação na litologia. Devido à segunda situação, o ensaio passa-se a realizar em

duas fases: uma primeira penetração de 15 cm e a segunda com um total 30 cm (15 +15 cm). O ensaio dá-se por terminado após concluída a 2ª fase, ou quando  $N_{(SPT)} = 60$  pancadas.

No Anexo V, constata-se a presença de material terroso (solo de cobertura e formações arenosas) desde a superfície até 1,7 m de profundidade, na margem esquerda. Na margem direita, verifica-se a presença do material terroso entre a superfície e 4,8 m de profundidade. No local destinado à implantação da central e dos órgãos hidráulicos, o solo de cobertura e a formação arenosa manifestam-se até 3,2 m de profundidade. No Anexo V, observam-se igualmente as formações geológicas predominantes e correspondente profundidade a que ocorrem.

Da análise do Anexo V, identifica-se o grés quartzítico como a litologia predominante da área investigada. Este classifica-se como sendo um arenito, rocha sedimentar. Trata-se de uma areia cimentada cuja granulometria poderá ser fina, média ou grossa. Por outras palavras, um arenito é uma rocha sedimentar clástica em que os grãos minerais e fragmentos rochosos encontram-se coesos através de um cimento e/ou uma matriz. Contudo, existem vários tipos de rochas sedimentares cuja classificação depende da sua composição, mais especialmente da proporção de feldspato, quartzo e matriz detrítica. O peso volúmico seco e, em especial, a porosidade de um arenito são francamente influenciáveis pela quantidade de cimento e/ou matriz que ocupam os espaços entre os grãos. Normalmente, o peso volúmico de um arenito aumenta proporcionalmente com a profundidade de amostragem. A resistência à compressão uniaxial de um arenito é influenciado pela sua porosidade, pela porção/ tipo de cimento e/ou matriz e pela composição individual de cada grão. Apresentam uma tonalidade branca, cinzento pálido ou cor-de-rosa. O seu grau de litificação varia entre não consolidado a estilhaçado. Exibe uma granulometria variável, porém no geral os seus grãos são satisfatoriamente redondos. As maiorias dos grãos são o quartzo cuja proveniência remete à presença de rochas ígneas, metamórficas e cherts. A presença de água também se apresenta como um condicionante às características de deformabilidade e, igualmente como o peso específico e a porosidade, a resistência à compressão [13].

O material rochoso registado nas sondagens à furação, com uma predominância inferior ao grés quartzítico, foi o quartzito. Trata-se de um arenito submetido a metamorfismo, cuja porção da composição química não terá sofrido qualquer alteração com excepção da água, constituintes voláteis e matéria orgânica. O metamorfismo que modifica arenitos para quartzitos possibilita a diminuição da porosidade e o aumento da resistência à compressão uniaxial. Devido à uniformidade da sua granulometria, de forma esférica, e baixa percentagem de argilas, os quartzitos deverão apresentar elevados valores de porosidade e de permeabilidade no momento da sua deposição. A cimentação está a cargo da calcite ou de

sílica secundária. É de comum registo que sofram mais de um ciclo de meteorização, erosão, transporte e deposição para o enalço da maturidade de classificação. De acordo com Tricart (1972), quartzitos e arenitos quartzíticos são comumente considerados rochas pouco solúveis. Os quartzitos revelam-se praticamente imunes à meteorização química [19].

A condutividade hidráulica expressa a capacidade do terreno em permitir o escoamento de água através dos seus espaços vazios, e representa-se pelo coeficiente de condutividade hidráulica ( $k$ ). Esta propriedade é controlada pela porosidade e granulometria, no que respeita a maciços terrosos, e pela estrutura e compartimentação de blocos, quando se trata de maciços rochosos.

Em maciços rochosos utiliza-se o ensaio de absorção de água sob pressão do tipo Lugeon, tratando-se de um ensaio de absorção de água *in situ*, realizado em furos de sondagens abertos em maciços rochosos, que consiste na injeção radial de água sob pressão num dado trecho isolado do furo de sondagem e na medição da quantidade de água que entra no maciço, durante um certo intervalo de tempo, após registar um escoamento permanente.

Em conformidade com o programa de prospecção geotécnica definido, o ensaio realiza-se em trechos de 3 a 5 m, com 5 patamares de pressão (3 ascendentes e 2 descendentes). Os ensaios realizaram-se no ponto intermédio de cada trecho definido. Estes, definidos no Projecto Base, apresentam uma dependência com o grau de fracturação,  $F$ , do trecho a ensaiar e um comprimento entre 3, para os primeiros metros ensaiados, e 5 m.

A análise dos valores obtidos pelo ensaio de absorção de água sob pressão do tipo Lugeon realiza-se com o apoio da classificação dos maciços rochosos em função da permeabilidade Lugeon, como se apresenta na Tabela 5.5.

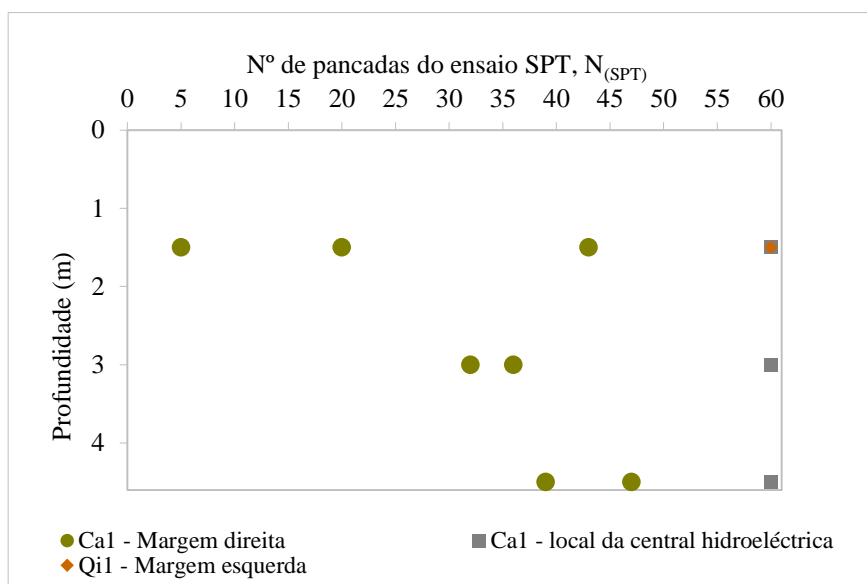
**Tabela 5.5 Classificação do maciço rochoso consoante o valor de unidade Lugeon do ensaio de perda de água sobre pressão (Retirado de [25])**

Tipo de maciço	Lu	P <sub>e</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )
Muito impermeável	0 – 1	10
Praticamente impermeável	1 – 3	10
Permeável	> 3	10
	1,5 – 6	5
Muito permeável	> 3	10
	> 6	5

Durante a revisão dos boletins de ensaio, fornecidos pela Mota-Engil Angola, confirma-se que os valores de pressão de ensaio registados são admissíveis para os valores obtidos.

### 5.3.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS “*IN SITU*”

Num total de 15 ensaios SPT: realizaram-se 8 ensaios na M.D, 1 na M.E e 4 no local da central e órgãos hidráulicos. A correlação dos valores de N<sub>(SPT)</sub> obtidos com a profundidade esboça-se na Figura 5.12.



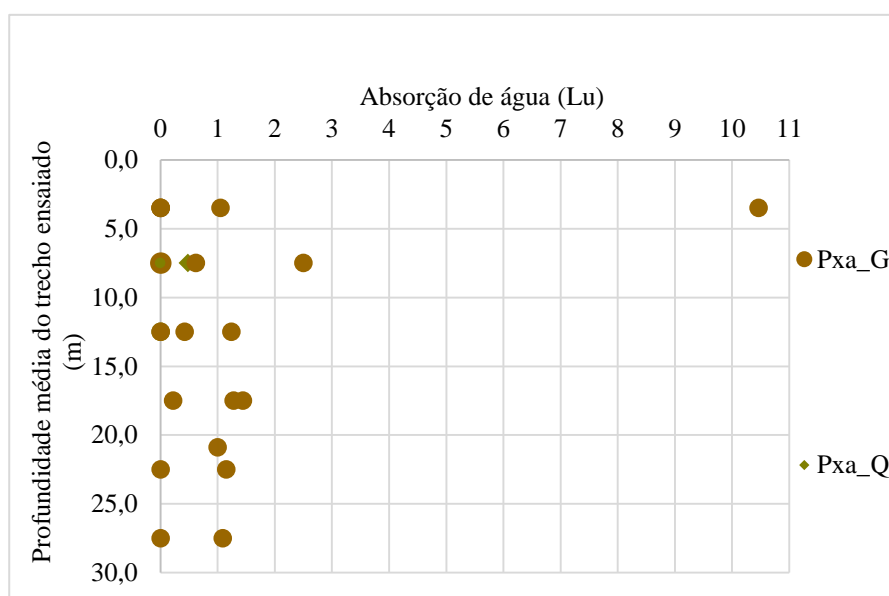
**Geologia:** PLIOCÉNICO E/OU PLISTOCÉNICO – Qi<sub>1</sub>:Areia de granulometria variada por vezes com cascalheira de base; Ca<sub>1</sub>: Areia fina a média silto-argilosa castanha amarelada

**Figura 5.13 Esboço da correlação do valor de pancadas do ensaio SPT com a profundidade nas zonas ensaiadas**

A realização do ensaio teve como objetivo fundamental fornecer informação sobre o comportamento hidráulico do maciço, com base no qual foi possível identificar/caracterizar as propriedades geológicas e geotécnicas do mesmo.

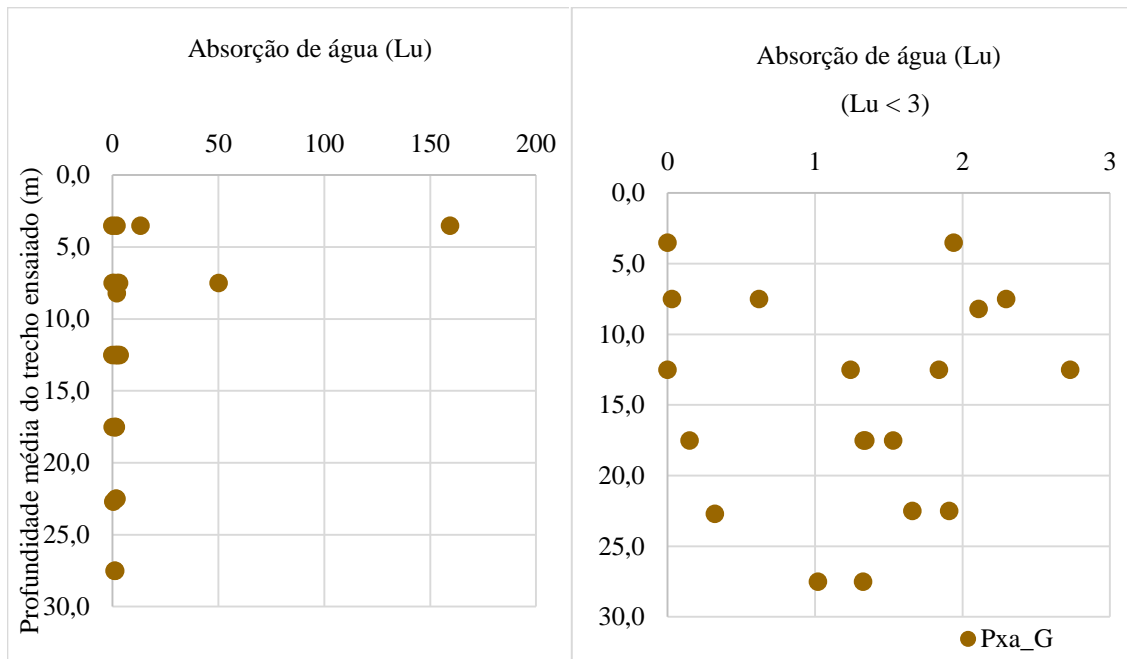
Num total de 61 ensaios de absorção de água sob pressão do tipo Lugeon realizaram-se 22 na M.E., 24 na M.D. e 15 no local da central e órgãos hidráulicos.

Da análise dos resultados dos ensaios de absorção de água sob pressão do tipo Lugeon, Anexo VI, obtiveram-se as seguintes correlações, Figura 5.14 a 5.16 entre o valor de absorção de água do maciço e a profundidade.

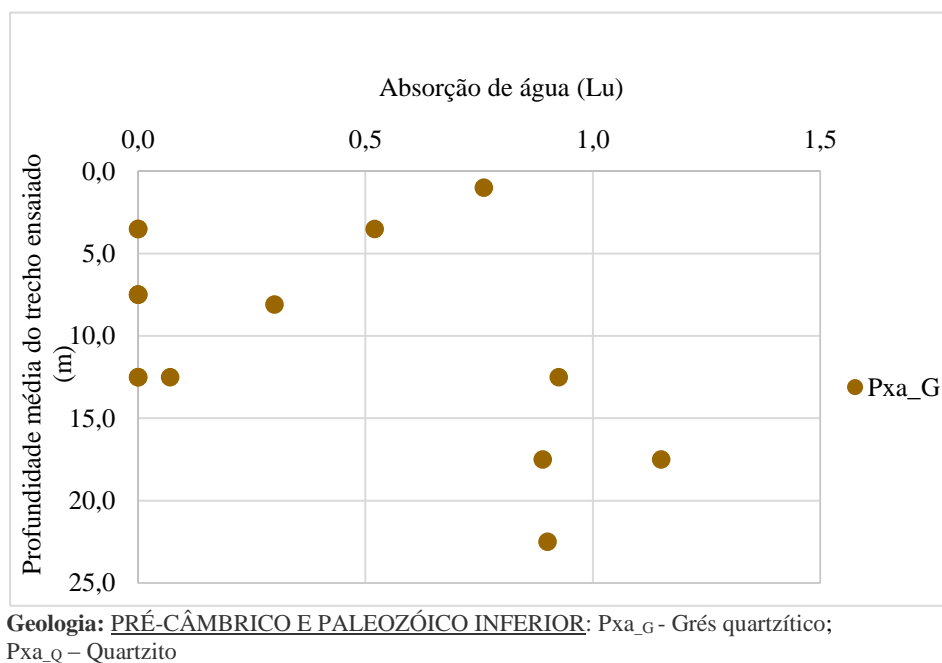


Geologia: PRÉ-CÂMBRICO E PALEOZÓICO INFERIOR: Pxa\_G - Grés quartzítico;  
Pxa\_Q - Quartzito

**Figura 5.14 Relação obtida entre o valor de absorção de água com a respectiva profundidade na margem esquerda, para os terrenos do Pré-Câmbrico e Paleozóico Inferior.**



**Figura 5.15** Relação obtida entre o valor de absorção de água com a respectiva profundidade na margem direita, para os terrenos do Pré-Câmbrico e Paleozóico Inferior



**Figura 5.16** Relação obtida entre o valor de absorção de água com a respectiva profundidade na central e órgãos hidráulicos, para os terrenos do Pré-Câmbrico e Paleozóico Inferior

### 5.3.3 DISCUSSÃO

Da análise das Tabelas 5.3 e 5.4 com os resultados dos ensaios de penetração dinâmica, afere-se que:

- i. A realização dos ensaios em cada local de estudo só verificou a presença de uma única litologia, para a margem direita e margem esquerda. Na margem esquerda verificou-se a presença de uma areia de granulometria variada com cascalheira de base,  $Q_{i1}$ , na margem direita verificou-se areia fina a média silto-argilosa castanha amarelada,  $Ca_1$ .
- ii. A realização de um único ensaio SPT na margem esquerda (SME2) reflecte a existência de uma areia compacta a 1,5 m de profundidade.
- iii. A realização do ensaio SPT nas sondagens SMD4 a SMD1, margem direita, permite constatar uma diferença de comportamentos em cada sondagem. No único ensaio realizado a 1,5 m na SMD4 verifica-se  $N_{(SPT)} > 60$  porém, nas sondagens seguintes regista-se um decréscimo nos valores de cravação obtidos a 1,5 m de profundidade: SMD3 ( $N_{(SPT)} > 43$ ); SMD2 ( $N_{(SPT)} > 5$ ), SMD1 ( $N_{(SPT)} > 20$ ); aquela diferença pode ser explicada pela presença de um nível de seixos.
- iv. No geral, os primeiros 1,5 m na M.D. caracterizam-se por uma passagem gradual de areia compacta a medianamente solta. Dos ensaios realizados na M.D. assume-se um valor crescente em profundidade dos valores de  $N_{(SPT)}$  obtidos.

Os valores de  $N_{(SPT)}$  obtidos no local da central e órgãos hidráulicos permitem aferir a existência de uma areia compacta,  $N_{(SPT)} > 60$ .

Da análise conjunta da Tabela 5.6, da Figura 5.14 e o Anexo VI, correspondente à realização do ensaio de absorção de água sob pressão na M.E, assume-se que:

- i. A maioria dos resultados de  $Lu > 1$ , correspondentes a um maciço muito impermeável, verificam-se desde a profundidade média do primeiro trecho ensaiado (3,5 m) até à profundidade máxima alcançada pela sondagem, 30,0 m.
- ii. Regista-se um aumento dos valores  $Lu$  que está conotado com a aproximação das sondagens de furação mecânica, onde se realizaram os ensaios de absorção, ao curso de água. Embora a maioria dos resultados, com excepção de um, situam-se entre  $0 < Lu < 2$ .
- iii. A sondagem SME4, com 30,0 m de comprimento, regista um valor de 10,5  $Lu$  no primeiro trecho ensaiado (2,0 – 5,0). O trecho ensaiado intersecta um grés quartzítico. Assume-se a existência de uma fracturação significativa no trecho devido ao valor obtido.

- iv. No geral o M.R. da M.E. apresenta uma absorção muito baixa a baixa, com descontinuidades muito fechadas a fechadas e uma permeabilidade a variar entre muito impermeável a praticamente impermeável. O comportamento do M.R. relativamente ao escoamento caracteriza-se por um comportamento variado desde colmatação de fracturas, passando por absorções reduzidas até lavagem de fracturas. De igual modo registam-se, de forma pontual, regimes turbulentos ou laminares.

Da análise conjunta das Tabelas 5.6, a Figura 5.15 e do Anexo VI, correspondente à realização do ensaio de permeabilidade do tipo Lugeon na M.D, estima-se que:

- i. A maioria dos resultados de  $Lu > 1$ , correspondentes a um maciço muito impermeável, verificam-se desde a profundidade média do primeiro trecho ensaiado (3,5 m) até a profundidade máxima alcançada pela sondagem, 30,0 m.
- ii. A sondagem SFV2 foi executada com maior proximidade ao rio, no sopé da M.D. Esta apresenta valores de  $Lu$  que correspondem a um M.R. impermeável ( $1 < Lu < 3$ ) no primeiro trecho ensaiado; porém entre 7,5 e 12,5 m de profundidade, o M.R. apresenta-se como permeável. Seguidamente os valores decrescem para  $Lu < 1$  até a profundidade máxima alcançada pela sondagem, 30,0 m. Esta diferença de comportamento do M.R. deve-se ao grau de fracturação, entre F3 e F5, do grés quartzítico e grés de grão fino interceptado pela sondagem.
- iii. Regista-se um decréscimo nos valores de  $Lu$  que está relacionado com o afastamento das sondagens de furação mecânica, onde se executaram os ensaios, ao curso de água. Porém verifica-se um aumento daqueles valores nos primeiros trechos ensaiados de SMD4 e SMD5. Os valores registados são superiores a 10.
- iv. No geral o M.R. da M.D. apresenta uma absorção muito baixa a baixa, com descontinuidades muito fechadas a fechadas e uma permeabilidade a variar entre muito impermeável e praticamente impermeável. O comportamento do M.R. relativamente ao escoamento caracteriza-se por um comportamento variado desde colmatação de fracturas, a absorções reduzidas até à lavagem de fracturas. A absorção muito alta, descontinuidades muito abertas e registo de M.R. permeável a muito permeável conotam-se aos valores mencionados nos pontos anteriores. Predomina um tipo de escoamento laminar, Darcy e turbulento, respectivamente.

Da análise conjunta da Tabela 5.6, a Figura 5.16 e o Anexo VI, correspondente à realização dos ensaios de permeabilidade do tipo Lugeon na zona da central e órgãos hidráulicos, assume-se:

- i. A totalidade dos resultados obtidos são inferiores a 1,5 Lu, correspondentes a um maciço muito impermeável a praticamente impermeável. Os valores verificam-se desde a profundidade média do primeiro trecho ensaiado (3,5 m) até a profundidade média do último trecho ensaiado, 22,5 m.
- ii. A absorção do M.R. varia de baixa a muito baixa e apresenta descontinuidades fechadas a muito fechadas. A sua permeabilidade classifica-se como permeável a praticamente impermeável. Os regimes de escoamento predominante são o de Darcy e o turbulento.

## 5.4 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

### 5.4.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS

Com o intuito de caracterizar os materiais terrosos e rochosos ocorrentes na zona interessada pelo futuro Aproveitamento Hidroeléctrico de Chicapa II, e respectiva albufeira, foram executados ensaios de laboratório sobre amostras remexidas e indeformadas obtidas nos poços e sondagens de furação à rotação, respectivamente.

Os ensaios de laboratório sobre amostras de rocha englobaram a realização de análises petrográficas em lâminas delgadas, a determinação da massa volúmica/porosidade e absorção de água, a realização do ensaio de resistência à fragmentação e de Los Angeles. Similarmente, previam-se e realizaram-se análises químicas (carbonatos, sulfatos e cloretos), o ensaio de reactividade ao alcális e o ensaio de compressão uniaxial. Tendo sido realizados estes dois últimos ensaios em provetes secos e saturados. Durante a elaboração da dissertação evidenciou-se a inexistência e/ou atraso na recepção de determinados ensaios de laboratório realizados em material rochoso. Este atraso deveu-se a motivos alheios ao Projectista, COBA Group e COBAngola.

No âmbito do estudo da dissertação apenas serão abordados os ensaios de identificação (massa volúmica, porosidade e absorção de água) e o ensaio de resistência à compressão uniaxial.

As amostras rochosas obtidas, entre 3,0 e 20,6 m, apresentam uma descrição litológica bastante semelhante. Esta baseia-se no reconhecimento de quartzito ou grés quartzítico. A

litologia verificada apresenta-se mais ou menos compacta, com fracturação evidente, superfícies de oxidação com existência, ou não, de preenchimento argiloso.

#### 5.4.2 ENSAIOS DE IDENTIFICAÇÃO E DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL

Na Tabela 5.6 apresentam-se os resultados dos provetes submetidos aos ensaios de resistência à compressão uniaxial, determinação do peso volúmico, da porosidade e da absorção de água. Os valores do peso volúmico, porosidade e absorção de água referem-se a valores indicativos dos diferentes tarolos. Igualmente apresentam-se os valores do IQ (equação 3.2), Tabela 5.7.

**Tabela 5.6 Resultados dos ensaios de identificação dos provetes ensaiados e respectivo estado de alteração**

Amostra	Profund. (m)	Litologia	W <sub>n</sub>	ρ <sub>d</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	n (%)	Abs. (%)
SME 2	4,6-6,4	Quartzito	W <sub>2</sub>	26,6	0,2	0,07
SME 3_1	4,5-6,0		W <sub>2</sub>	26,65	0,3	0,11
SME 3_2	6,75-7,50		W <sub>2</sub>	26,58	0,2	0,08
SME 4_2	7,5-9,0	Grés quartzítico	W <sub>3</sub> e W <sub>2</sub>	26,57	0,4	0,14
SFV 1_1	3,0-4,5		W <sub>3</sub> e W <sub>4</sub>	26,18	1,6	0,5
SFV 1_2	12,0-15,0		W <sub>2</sub>	26,48	0,4	0,18
SFV 2_1	12,0-15,0		W <sub>3</sub> e W <sub>2</sub>	26,68	0,4	0,13
SFV 2_2	15,0-18,0		W <sub>2</sub> e W <sub>3</sub>	26,61	0,3	0,1
SMD 2	6,0-7,5	Grés quartzítico	W <sub>3</sub>	26,27	1,3	0,51
SMD 3	9,0-12,0		W <sub>2</sub>	26,4	0,8	0,37
SMD 4	19,1-20,6		W <sub>2</sub>	26,01	2,3	0,75
SMD 5	9,0-12,0		W <sub>2</sub> e W <sub>3</sub>	25,98	1,3	0,58
SC 1	6,25-15,0		W <sub>2</sub> e W <sub>3</sub>	26,58	0,5	0,26
SC 2	6,85-15,0		W <sub>3</sub> e W <sub>2</sub>	26,6	0,4	0,15
SC 3_1	1,5-9,0		W <sub>3</sub> , W <sub>2</sub> e W <sub>4</sub>	26,23	1,4	0,43
SC 3_2	9,0-18,0		W <sub>2</sub> e W <sub>3</sub>	26,73	0,6	0,23

**Legenda** - SME: Sondagem margem esquerda; SMD: Sondagem margem direita; SFV: Sondagem fundo do vale; SC: Sondagem central; Profund: profundidade de recolha da amostra; W<sub>n</sub>: estado de alteração; ρ<sub>d</sub>: peso volúmico seco; n: porosidade; Abs: absorção

Com os valores obtidos no ensaio à compressão uniaxial, em material rochoso, obtiveram-se os respectivos valores de resistência. Os valores calculados relacionam-se com a resistência à

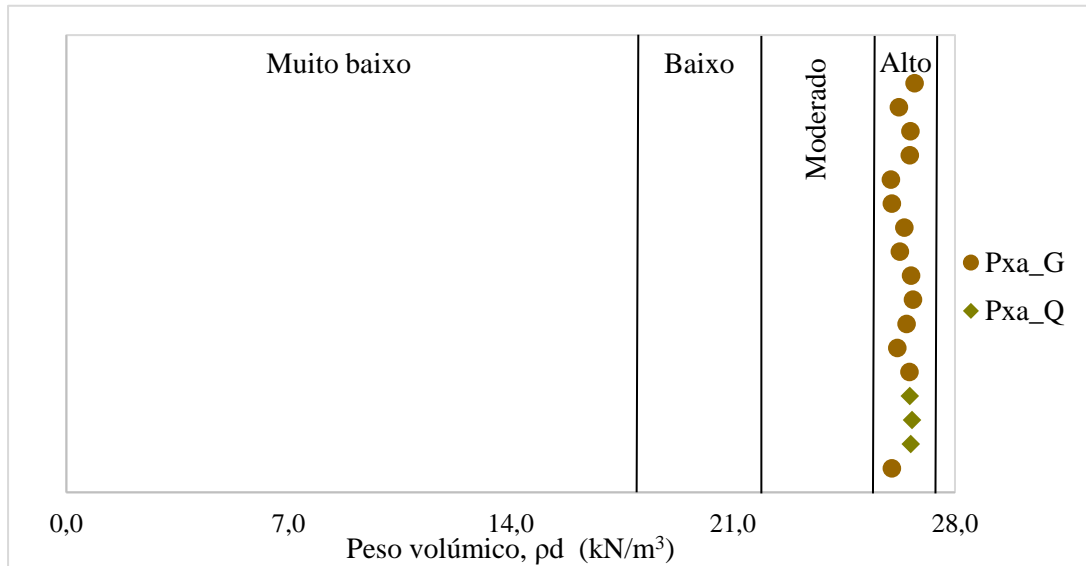
compressão, peso volúmico e percentagem de absorção de um maciço rochoso “fresco” sendo assim utilizados como padrão de comparação.

**Tabela 5.7 Resultados do ensaio de resistência à compressão uniaxial dos provetes ensaiados**

Litologia	Am.	Prof. (m)	RCU por provete $\sigma$ (MPa)	$\rho_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	n (%)	Abs. (%)	IQ (%)
Grés quartzito	SME 1	9,45 – 9,65	84,35	26,01	1,3	0,43	97,92
		8,25 – 8,50	50,94 (*)				
Quartzito	SME 2	4,60 – 4,90	36,77	26,6	0,2	0,07	99,68
		5,80 – 6,00	47,07 (*)				
Grés quartzito	SME 4	7,80 – 8,00	32,17	26,657	0,4	0,14	99,36
	SFV 1	3,00 – 4,50	91,74 (*)	26,218	1,6	0,5	97,44
	SFV 2	12,00 – 15,00	38,79	26,68	0,4	0,13	99,36
		12,00 – 15,00	71,20 (*)				
	SMD 3	9,00 – 12,00	62,71	26,4	0,8	0,37	98,72
	SMD 4	20,10 – 20,40	49,61 (*)	26,01	2,3	0,75	96,32
	SMD 5	10,30 – 10,45	51,74	25,98	1,3	0,58	97,92
		11,00 – 11,25	44,04 (*)				
	SC 1	7,10 – 7,40	27,21	26,58	0,5	0,26	99,2
	SC 2	8,30 – 8,50	53,63 (*)	26,6	0,4	0,15	99,36
	SC 3	3,50 – 3,70	32,04 (*)	26,23	1,4	0,43	97,76
	SC 3	18,60 – 18,80	62,73	26,73	0,6	0,23	99,04

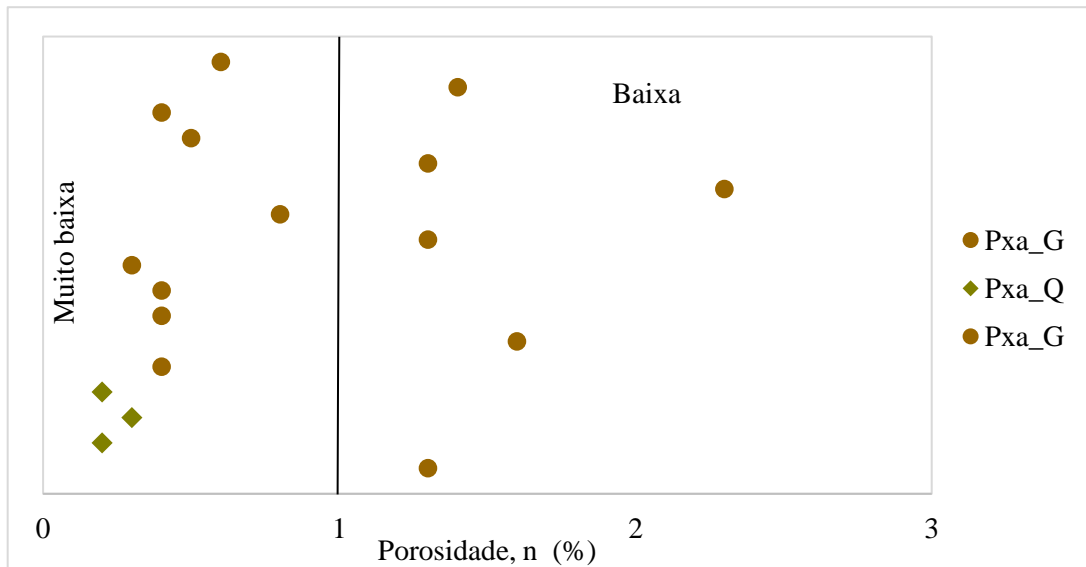
**Legenda** - SME: Sondagem margem esquerda; SMD: Sondagem margem direita; SFV: Sondagem fundo do vale; SC: Sondagem central; Am: amostra Prof: profundidade de recolha da amostra;  $\rho_d$ : peso volúmico seco; n: porosidade; Abs: absorção; IQ: índice de qualidade  
(\*) Valor obtido com provete saturado;

Nas Figuras 5.17 a 5.19 apresenta-se a determinação da classe dos corpos rochosos consoante o peso volúmico, porosidade e IQ, respectivamente.



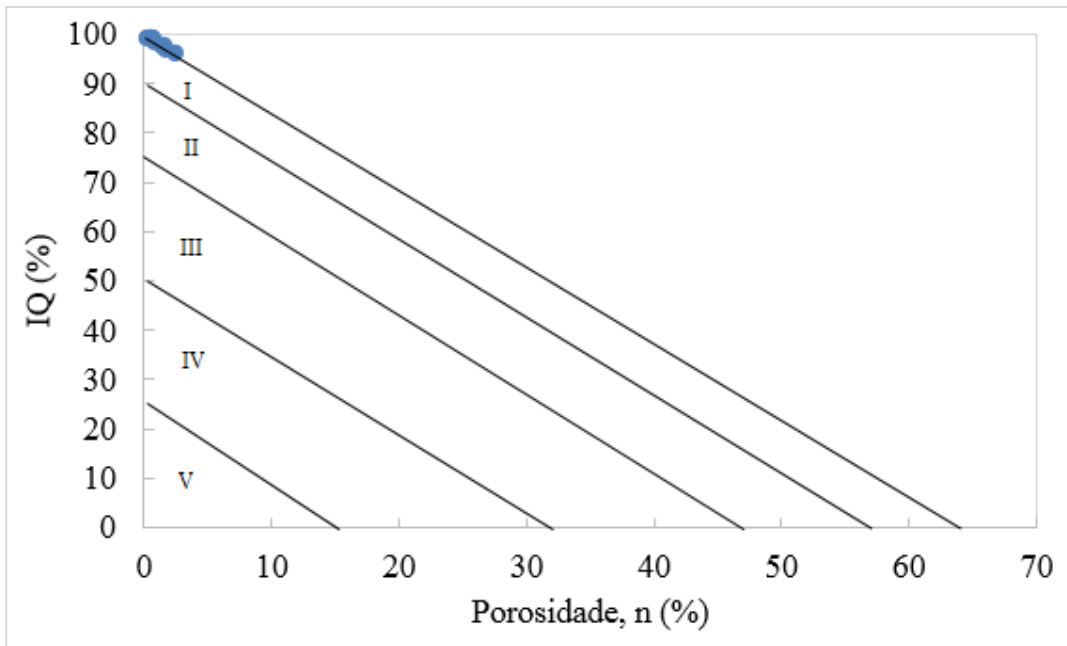
Geologia: PRÉ-CÂMBRICO E PALEOZÓICO INFERIOR: Pxa\_G - Grés quartzítico; Pxa\_Q - Quartzito

Figura 5.17 Determinação da classe dos corpos rochosos tendo em conta o peso volúmico



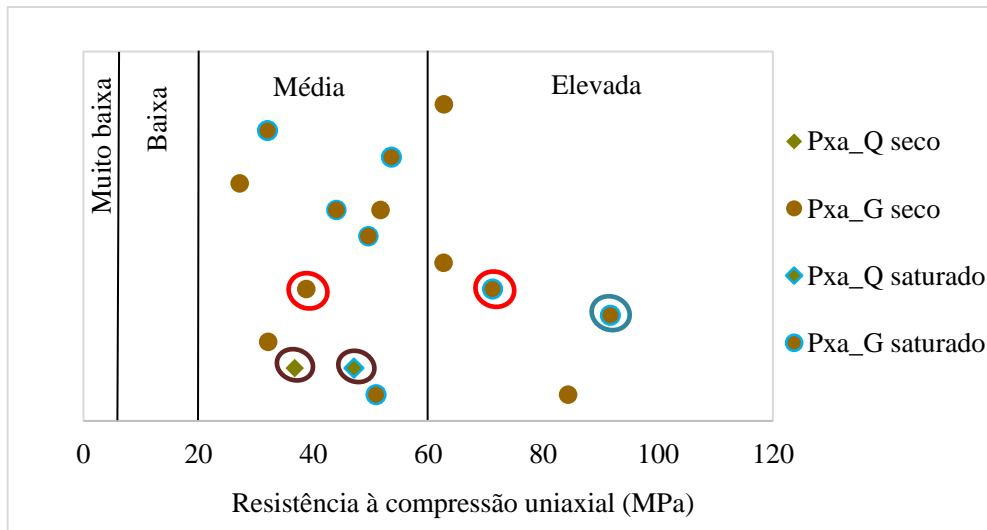
Geologia: PRÉ-CÂMBRICO E PALEOZÓICO INFERIOR: Pxa\_G - Grés quartzítico; Pxa\_Q - Quartzito

Figura 5.18 Determinação da classe dos corpos rochosos tendo em conta a porosidade



**Figura 5.19** Determinação do estado de meteorização do maciço tendo em conta o índice de qualidade e a porosidade

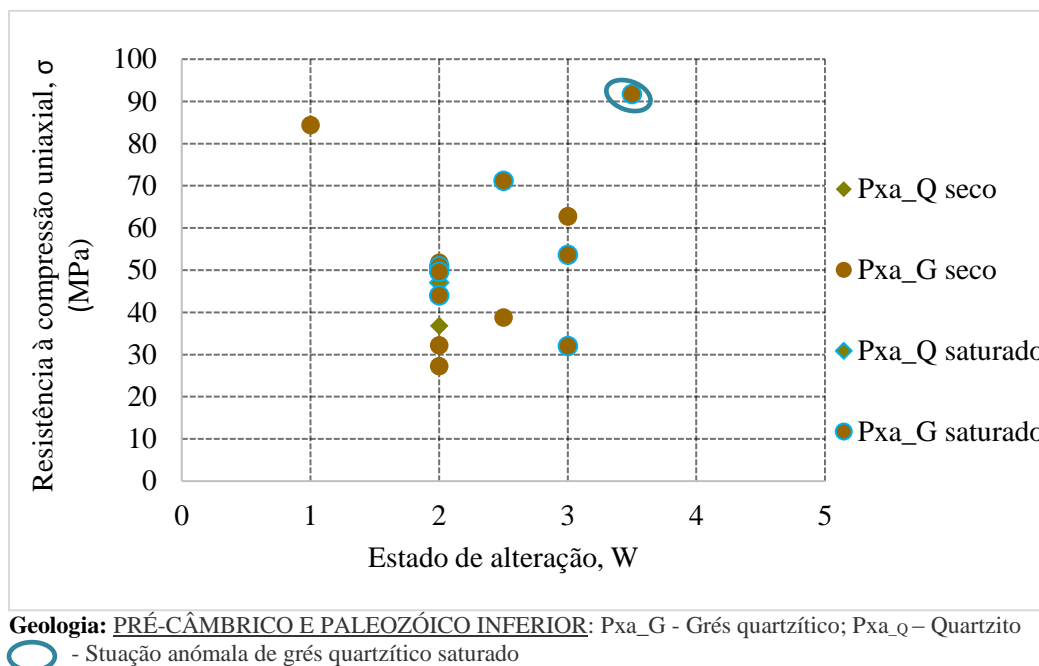
Na Figura 5.20 apresentam-se os valores obtidos no ensaio de resistência à compressão uniaxial e respectiva classificação consoante a BGD. Os valores obtidos deste método classificativo representam o valor médio da resistência do local amostrado.



**Geologia:** PRÉ-CÂMBRICO E PALEOZÓICO INFERIOR: Pxa\_G - Grés quartzítico; Pxa\_Q - Quartzito;  
 ○ - Situação anômala de grés quartzítico saturado; ○ - Situação anômala de grés quartzítico;  
 ○ - Situação anômala de RCU em quartzito

**Figura 5.20** Classificação do maciço rochoso tendo em conta o valor de resistência à compressão uniaxial

Na Figura 5.21 apresenta-se uma correlação entre os valores de RCU e o estado de alteração de cada provete ensaiado.



**Figura 5.21** Correlação entre o valor de resistência à compressão uniaxial com o estado de alteração de cada provete ensaiado

### 5.4.3 DISCUSSÃO

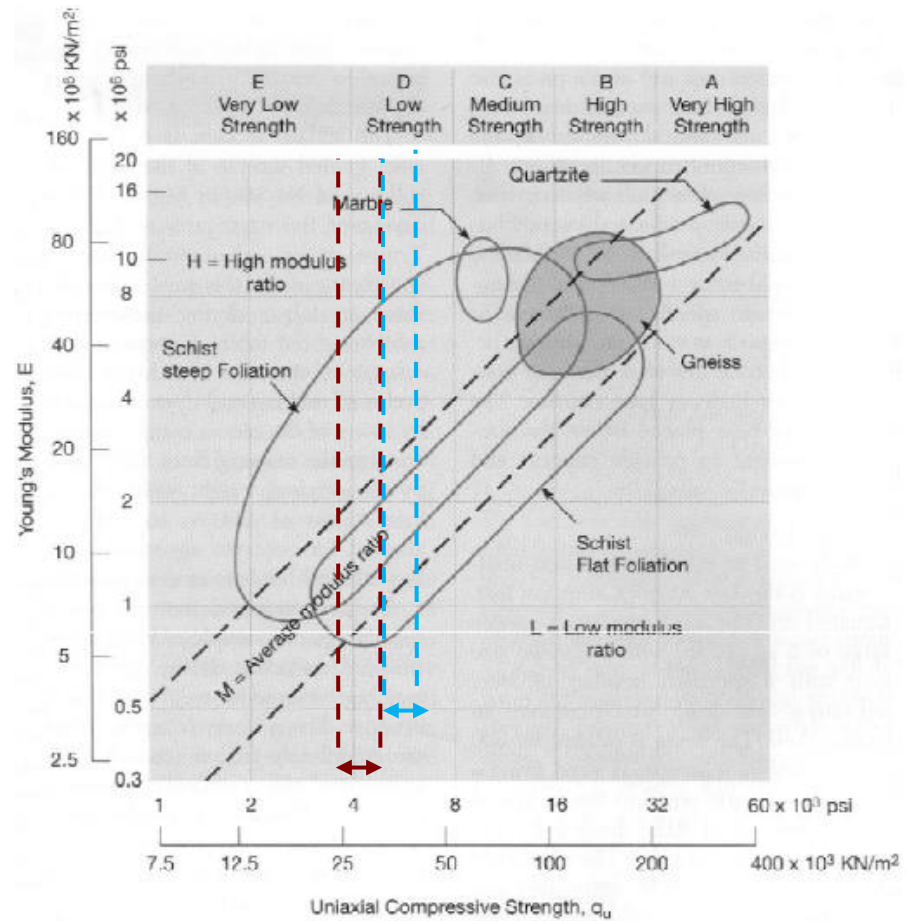
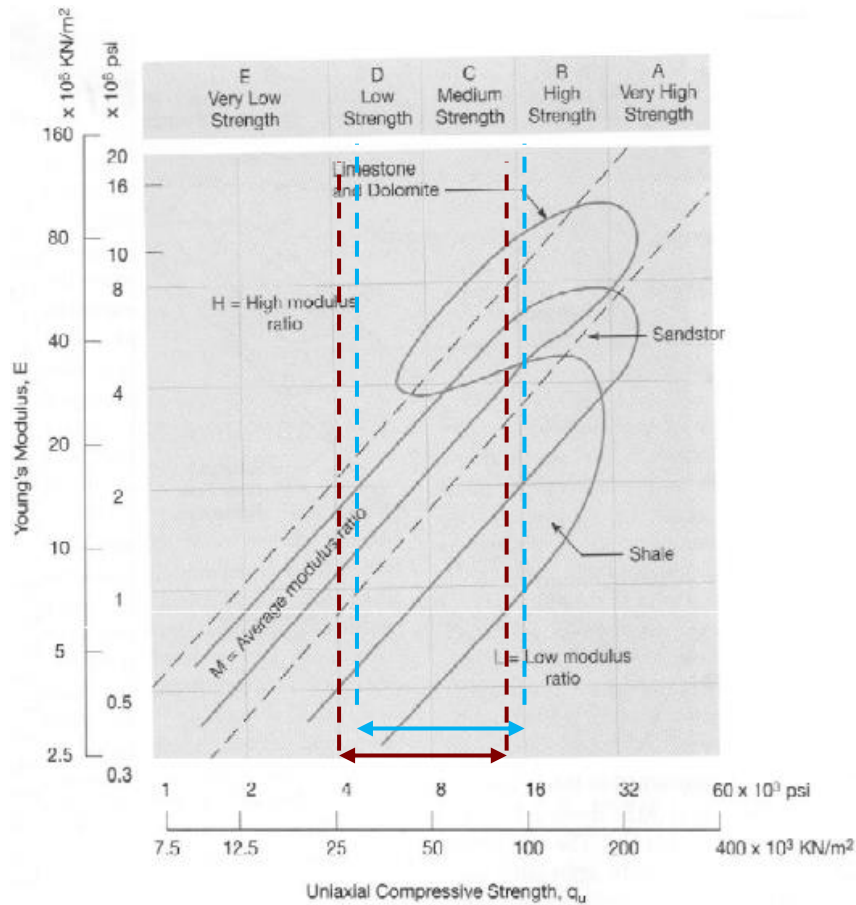
A análise dos resultados obtidos nos ensaios de identificação permite concluir que:

- i. Todas as amostras submetidas ao ensaio de determinação do peso volúmico apresentam valores elevados, acima de  $25,0 \text{ kN/m}^3$ . Desta forma, afere-se que todas as amostras de grés quartzítico e quartzito possuem um peso volúmico elevado. Este valor é típico de um material rochoso denso e apresenta-se, tendencialmente, como sendo inversamente proporcional à porosidade.
- ii. Verifica-se que a maioria dos valores obtidos no ensaio de determinação da porosidade são muito baixos. Sendo esta situação concordante com os valores mencionados no ponto anterior.
- iii. Com a aplicação da Equação 3.2, para determinação de IQ, todas as amostras encontram-se associadas a maciços rochosos praticamente não meteorizados (grau I de meteorização).
- iv. A interpretação dos resultados do ensaio de resistência à compressão uniaxial – RCU, nos diferentes provetes teve em conta a BGD. Da interpretação destes resultados identifica-se uma situação anômala. Os valores de RCU obtidos em provetes saturados de quartzito da SME2 e de grés quartzítico da SFV2, não apresentam um

comportamento habitual, já que são superiores aos valores de RCU em provetes secos, sugerindo algum problema de preenchimento dos boletins de registo no laboratório. Através da Figura 5.23, constata-se que os valores de RCU obtidos em provetes de quartzito não se encontram no intervalo estabelecido na bibliografia como valores típicos desta litologia. Desta forma, assume-se que SME2 intercepta um quartzito com um determinado grau de meteorização ou a rocha está eventualmente designada de forma incorrecta.

- v. Da correlação obtida entre RCU e o estado de alteração, Figura 5.21, reconhece-se que o provete, de grés quartzítico com RCU elevado apresenta um grau menor de alteração. Porém, refere-se a existência de um provete saturado de grés quartzítico de SFV1\_1 (M.D.), com estado de alteração  $W_{3,4}$  com RCU elevado ( $RCU > 60$  MPa). Admite-se que poderá existir algum problema de denominação da rocha (possivelmente metagrés) e admite-se que o grau de meteorização poderá também ser menor.
- vi. Na presente secção comentam-se as propriedades apresentadas na literatura para quartzitos. Com a análise da Figura 5.20 e 5.21, assume-se que os provetes de quartzito ensaiados poderão apresentar um certo grau de meteorização, face aos valores de RCU obtidos, serem reduzidos que o de rochas sãs.

As Figuras 5.22 e 5.23 esboçam a relação entre a resistência à compressão e o módulo de deformabilidade para diversas rochas, incluindo as areníticas e quartzíticas, respectivamente. Através das Figuras mencionadas observa-se a não correspondência dos intervalos de valores obtidos, para provete seco e saturado, da litologia identificada, neste caso o quartzito.



**Legenda:** ↔ - intervalo de valores obtidos em provetes de grés quartzítico seco; ↔ - intervalo de valores obtidos em provetes de grés quartzítico saturado

**Figura 5.22 e Figura 5.23** Esboço da relação entre a resistência à compressão e o módulo de deformabilidade de rochas sedimentares (grés quartzítico) e metamórficas (quartzito), respectivamente (Retirado de [26])

Globalmente, assume-se que os provetes ensaiados reflectem um maciço de resistência média, ou seja, apresentam valores de resistência entre 20 e 60 MPa. Igualmente ostentam valores de peso volúmico elevados e porosidades reduzidas.

## 5.5 PROPOSTA DE ZONAMENTO

Com base nos resultados obtidos com o reconhecimento de campo, a prospecção geofísica e mecânica e os ensaios de campo - ensaio de absorção de água do tipo Lugeon, e de laboratório - determinação de propriedades índices e mecânicas em amostras rochosas, proporcionou-se a elaboração de uma proposta de zonamento geotécnico, que integra a presente seção. Nela produz-se uma breve descrição do zonamento identificado para o local do futuro AH, que considera a definição de unidades consideradas como homogéneas através da selecção, sobreposição e transformação da informação existente.

Com base nas seções 5.1 a 5.4 é possível aferir que o maciço destinado à fundação do aproveitamento hidroeléctrico caracteriza-se por integrar formações rochosas medianamente e pouco alteradas ou mesmo sãs, encobertas localmente por material terroso, correspondente a solos residuais e depósitos sedimentares ou aluvionares. Com base na análise dos valores obtidos para o índice  $Q$  e a sua distribuição em profundidade, considera-se a delimitação das seguintes zonas no terreno a afectar pelo eixo da futura barragem e localização dos órgãos anexos:

- i. Na margem esquerda, com base na informação do PSE1 ao PSE3, identificam-se as duas profundidades distintas com presença de índice  $Q < 1$ , indicadora da presença de fracturação e preenchimento com material argiloso. Desta forma, assume-se uma zona fraturada até cerca dos 6,0 m na envolvente ao PSE1; na proximidade ao PSE2 esta profundidade estende-se até cerca dos 9,5 m.
- ii. Na margem direita regista-se um aumento dessa profundidade, tida como linha de diferenciação geotécnica. A profundidade de  $Q < 1$  do PSD3 não é idêntica à do PSE1, realizada alguns metros antes, o que sugere a presença de um eventual acidente tectónico, já que o PSD3 realizou-se junto à margem do rio, no sopé do vale. De acordo com este facto, considera-se uma profundidade de 15,0 m para a delimitação da zona de preenchimento das fracturas. Esta profundidade reduz-se para os 10,0 m à medida que se aproxima do ponto de tiro directo de PSD2 e aumenta para 14,0 m no ponto de tiro directo de PSD1. No local do tiro inverso do mesmo perfil, a profundidade de delimitação decresce para os 11,0 m.

- iii. No local previsto para a implantação da central e dos órgãos hidráulicos registam-se profundidades menores para delimitar essa mesma zona geotécnica. O PSC1 é acompanhado por uma profundidade entre 8,0 e 6,0 m, no T<sub>D</sub> e no T<sub>I</sub>, respectivamente. O PSC2 regista um decréscimo de profundidade, em que para o Índice  $Q < 1$ , com direcção Oeste – Este. Transversalmente ao PSC2 encontra-se o PSC3, que regista uma profundidade de 6,0 m, valor constante entre o T<sub>D</sub> e T<sub>I</sub>.

Igualmente observou-se o decréscimo de valores de absorção de água, determinados pelo ensaio de injeção do tipo Lugeon, em profundidade. Semelhante a este comportamento conota-se o aumento das ondas de velocidade longitudinal,  $V_p$ . A diminuição dos valores de absorção ( $Lu$ ) e o aumento de  $V_p$ , em profundidade, conota-se ao fecho/preenchimento de fracturas, do grau de fracturação e à diminuição do estado de alteração. Igualmente, os valores obtidos através dos ensaios de laboratório acima analisados condizem com um maciço competente.

A estes resultados acrescentaram-se os resultados obtidos pelo ensaio de determinação da resistência à compressão uniaxial. Os valores de resistência possibilitaram a classificação do maciço, onde a amostra foi retirada, tendo por os valores de resistência à compressão com base na classificação da BGD como sendo um material de resistência média.

Porém, a este maciço competente destaca-se a margem direita, devido às suas propriedades com valores mais reduzidos, nomeadamente de velocidades  $V_p$  e de absorções superiores a 3  $Lu$ , indicando a existência de uma área com maior meteorização e, desta forma, não tão competente.



## 6 CONCLUSÕES, ANÁLISE CRÍTICA E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

A dissertação apresentada teve como principal objectivo o reconhecimento e aplicação de metodologias para o estudo da fundação de uma barragem de aterro em clima tropical.

Para o efeito, o estudo consistiu numa revisão bibliográfica sobre as etapas de meteorização de um maciço rochoso até ao seu estado de alteração e desagregação total em clima tropical, solos alterados, e sobre o caso de estudo. A análise bibliográfica do caso de estudo, o futuro Aproveitamento Hidroeléctrico (AH) de Chicapa II, recaiu nas condicionantes geológicas e geotécnicas do local, desde a geologia da região à tectónica e estrutura do mesmo. Posteriormente, seleccionou-se como ponto de partida para a caracterização do maciço rochoso os resultados obtidos na campanha de prospecção e de ensaios, no campo e em laboratório, delineada pela COBA S.A. no âmbito dos estudos geotécnicos para a fase de concurso da barragem.

A prospecção geotécnica contemplou meios geofísicos, perfis de refacção sísmica, meios mecânicos e ensaios de absorção de água do tipo Lugeon. Estudou-se o comportamento das velocidades de propagação das ondas sísmicas longitudinais,  $V_p$ , registadas em diferentes perfis ao longo do eixo de estruturas do futuro AH, definindo-se diferentes horizontes sísmicos em profundidade. Aos valores de  $V_p$  obtidos aplicou-se a equação para estimar o respectivo índice  $Q$  de qualidade do maciço rochoso. Esta aplicação possibilitou obter, indirectamente, a caracterização da frequência das descontinuidades e uma aproximação ao perfil das mesmas em profundidade e subdividir o maciço estudado em duas zonas – em função de valores de  $Q$  maiores ou inferiores a 1.

A execução de ensaios de absorção de água sob pressão do tipo Lugeon proporcionou: a aferição do comportamento do maciço rochoso relativamente ao regime de escoamento, a quantificação da absorção do maciço rochoso (em unidade Lugeon, Lu) e a caracterização do comportamento das suas descontinuidades. Transversalmente, sobrepueram-se os valores obtidos em ambas prospecções, geofísica e mecânica, para conjugação dos valores mínimos e máximos de  $V_p$  e de Lu. Na Tabela 6.1 apresentam-se os parâmetros considerados para a execução do zonamento geotécnico. Estes foram escolhidos tendo em conta os resultados dos trabalhos de prospecção e ensaios e conclusões inferidas. O zonamento que agora se propõe tem carácter meramente indicativo.

**Tabela 6.1 Parâmetros considerados para a execução do zonamento geotécnico**

ZG	Prof. média (m)	RQD (%)	F	W	Lu	V <sub>p</sub> (m/s)	Índice Q V <sub>(Q&gt;1)</sub>
ZG1	7,5 – 16,0	> 70	F <sub>4</sub> a F <sub>1</sub>	W <sub>1-2</sub> com passagens W <sub>3</sub>	< 1	> 2700	> 1
ZG2	0,8 – 16,0	40 - 70	F <sub>5</sub> a F <sub>1</sub>	Maciço menos alterado (W <sub>2</sub> e W <sub>3</sub> ) com passagens W <sub>4-5</sub>	1 - 3	1000 - 2700	< 1
ZG3	≤ 1,7	< 40	F <sub>5</sub> a F <sub>3</sub>	W <sub>4-5</sub> com passagens menos alteradas (W <sub>2</sub> e W <sub>3</sub> )	> 3	< 1000	< 1

**Legenda:** ZG – zona geotécnica; RQD – *Rock quality designation*; F- grau de fracturação; W - estado de alteração; Lu - unidade Lugeon; V<sub>p</sub> - velocidade de propagação das ondas sísmicas longitudinais

Num zonamento preliminar, Figura 6.1 e 6.2, prevê-se:

- i. Na margem esquerda a análise com direcção SW – NE permite considerar um maciço rochoso ZG3 da superfície até 1,7 m, a ZG2 entre a 1,7 e 7,5 m de profundidade. O maciço ZG1 encontra-se a partir de 7,5 m de profundidade.
- ii. Da análise na margem direita com direcção SW – NE afere-se um maciço ZG3 entre a superfície e 0,8 m, a ZG2 entre 0,8 e 16,0 m de profundidade. O maciço ZG1 encontra-se a partir de 16,0 m de profundidade.
- iii. A análise no local da central realizou-se nas direcções SE – NW e SW-NE. O local em questão apresenta a ZG3 entre a superfície e 0,8 m. Da sua análise afere-se um ZG2, na direcção SE – NW, desde 0,8 a 8,0 m. O maciço ZG1 encontra-se a partir de 8,0 m de profundidade. Na direcção SW –NE identifica-se um maciço ZG2 desde 0,8 a 7,0 m. O maciço ZG1 encontra-se a partir de 7,0 m de profundidade.

Evidencia-se a importância de um zonamento hidráulico. Tendo em conta os valores de absorção em Lugeon obtidos, possibilita-se o reconhecimento de locais mais ou menos permeáveis, com melhores ou piores características para a implantação da fundação da barragem. Assume-se um maciço praticamente impermeável a muito impermeável. Contudo, identificam-se sondagens que registaram  $2 < Lu < 3$ . Estas localizam-se nas proximidades do curso de água, sopé de ambas as margens. Identificam-se as seguintes sondagens e respectivas profundidades, onde se regista  $2 < Lu < 3$ : SME4, até 10,0 m; SFV2, até 25,0; SMD5, até 25,0; SMD4, até 20,0 m.

Para complementar a investigação agora encetada, aconselha-se, com os tarolos provenientes das sondagens referidas, a execução de ensaios de laboratório mais detalhados para

determinação das propriedades físicas do presente material. Estes englobam ensaios de determinação da velocidade de propagação de ultra-sons e análises petrográficas. Realça-se que, no âmbito do projecto para concurso, estes ensaios não estavam previstos nas referidas sondagens.

Salienta-se que a delimitação de ZG3 nas áreas de estudo foi aferida com base na presença de matéria orgânica, solo de cobertura e valores de  $N_{(SPT)}$  nas sondagens realizadas. Durante a identificação do zonamento geotécnico sentiram-se dificuldades acrescidas no tratamento dos parâmetros acima indicados. Estas deveram-se ao extenso coroamento da barragem, ao espaçamento médio, comumente acima de 300 m, entre as sondagens. Porém, verifica-se que o índice  $Q$ , baseado na prospecção geofísica, permitiu individualizar, de forma consistente, as diferentes zonas geotécnicas.

Da análise dos ensaios realizados, por omissão de determinados parâmetros, não foram aplicados coeficientes de meteorização para qualificação do grau de meteorização do maciço. Desta forma, sugere-se uma segunda fase de ensaios de laboratório em que sejam cumpridos os requisitos das diferentes normas aplicadas, apresentadas no Capítulo 5.

Assim, para optimização da quantificação do estado de meteorização, sugere-se a concretização de uma segunda campanha de ensaios de laboratório, em que sejam realizados ensaios de ultra-sons. Estes permitiriam a aferição de parâmetros resistentes do material possibilitando uma pertinente sobreposição com os resultados já adquiridos. Igualmente, sugere-se um aperfeiçoamento dos ensaios de laboratórios para determinação de características químicas. O aprimoramento dos ensaios de laboratório, acima referidos, possibilitará a aplicação de índices de meteorização químicos e geotécnicos apresentados nesta dissertação (referidos no Capítulo 3 e Anexo II).

Conclui-se que a ZG3 não apresenta características para a fundação da barragem, prevendo-se o seu total saneamento ao longo do eixo da barragem. Admite-se que ZG2 seja susceptível a trabalhos de melhoramento a nível de permeabilidade, selagem e fracturação para diminuição da deformabilidade do maciço.



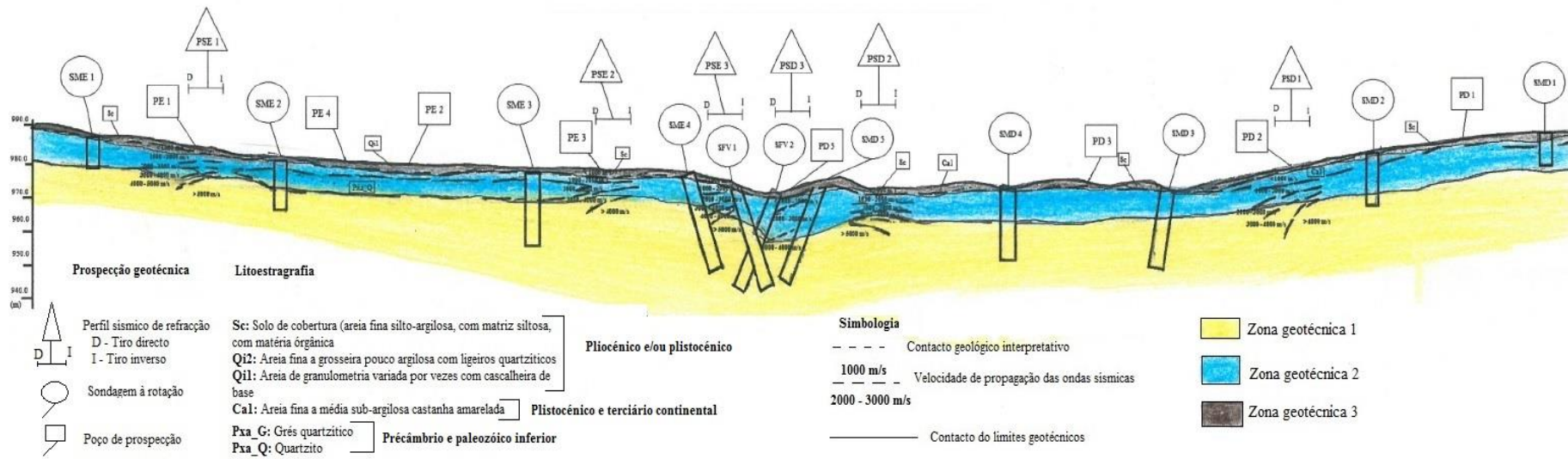


Figura 6.1 Esboço do perfil geotécnico longitudinal pelo eixo da barragem (Escala V: 1/250, H: 1/2.500)

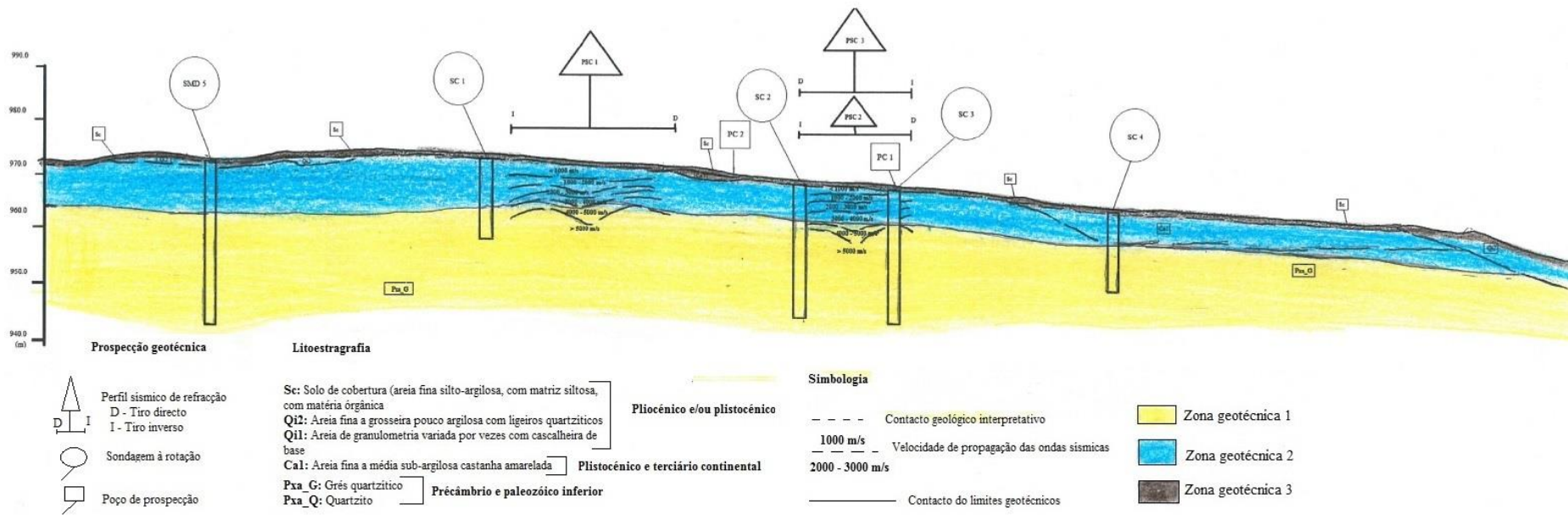


Figura 6.2 Perfil geotécnico longitudinal pela central e órgãos hidráulicos (Escala V: 1/250, H: 1/500)

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Vallejo, Luis I. González; Ferrer, Mercedes; Ortuño, Luis; Oteo, Carlos - Ingeniería Geológica. Pearson, Prentice Hall, 2002
- [2] ICOLD – International Commission On Large Dams
- [3] Hydria Project <http://www.hydraproject.net/en/egypt-sadd-al-kafara-dam/relevance9>, acedido em 23 de Fevereiro de 2016
- [4] Silva, P. F. da – Barragens e Obras Subterrâneas, Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2014
- [5] Wiltshire, L. Richard - 100 Years of Embankment Dam, Design and Construction. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 2010
- [6] Robin F.; MacGregor; D. S. – Geotechnical Engineering of Embankments Dams. 1<sup>st</sup> Edition, Taylor & Francis Group, 1992
- [7] Matos, R. – Resumos de geologia de engenharia, obras subterrâneas, Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2014
- [8] Marto, A. J. D. – Estudos geológicos e geotécnicos para a Barragem de Samuela – Angola. Relatório de estágio curricular, Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2007.
- [9] Heitor, A. P. – Estudos Geológicos e Geotécnicos no âmbito do projecto de execução de duas barragens de aterro, Dissertação de Mestrado. Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2004
- [10] Farmer, I.W. – Engineering Behaviour of Rocks, 2<sup>nd</sup> edition. Chapman and Hall Ltd, 1983
- [11] Earth Manual Part 1, 3<sup>rd</sup> edition. United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 1998
- [12] Silvério, C. – Tecnologia de Fundações, Edições EPGE, Amadora, 1996
- [13] Bell, F.G– Engineering properties of soils and rocks, 3<sup>rd</sup> edition. Butterworth-Heinemann Ltd, 1992
- [14] Marques, B. – Petrologia, Sedimentação e Sedimentologia, Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2009
- [15] Dutra, S.V. – Estado da arte sobre a utilização de solos lateríticos em pavimentos rodoviários, Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2014
- [16] Gidigasú, M.D– Laterite Soil Engineering: Pedogenesis and Engineering Principles. Elsevier Scientific Publishing Company, 1976
- [17] Cruz, N. B. – Modelling geomechanics of residual soil with DMT tests, Dissertação de Doutoramento. Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010

- [18] Bastos, A. P. – Caracterização geotécnica de maciços rochosos de baixa resistência: O flysch do baixo Alentejo. Dissertação de Doutoramento. Departamento de Geociências da Universidade de Évora, 2003
- [19] Bell, F.G. – Engineering in rock Masses. Butterworth-Heinemann, 1992
- [21] Barton, N. – Rock quality, seismic velocity, attenuation and anisotropy. Taylor & Francis Group, 2007
- [20] FEUP, Apontamentos de Geologia de Engenharia. Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
- [22] COBA S.A. – Estudo de Viabilidade Técnico-Económico e Ambiental, Fase de Concurso do Aproveitamento de Chicapa II, Angola, 2014
- [23] Minuto Ligado <http://minutoligado.com.br/mapas/mapa-angola/#>, acedido a 29 de Fevereiro de 2016
- [24] Duncan, N. – Engineering geology and rock mechanics, Volume 1. L. Hill, 1969
- [25] Lamas, P – Geologia de Engenharia, Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2013
- [26] Silva, P. F. da – Mecânica das Rochas, Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2014

## **ANEXOS**



## ANEXO I – TABELAS PARA APLICAÇÃO DA BGD

Usual structure		BEDDED									
Composition		Grains of rock, quartz, feldspar and clay minerals			At least 50% of grains are of carbonate		At least 50% of grains are of fine-grained igneous rock				
GRAIN SIZE (mm)	60	Very coarse-grained	RUDACEOUS	Grains are of rock fragments			CARBONATE GRAVEL	CALCI-RUDITE	Rounded grains AGGLOMERATE	SALINE ROCKS Halite Anhydrite	
	2			BOULDERS COBBLES	Rounded grains: CONGLOMERATE						VOLCANIC BRECCIA LAPILLI TUFF
		Coarse-grained	GRAVEL	Angular grains: BRECCIA		SANDSTONE: Grains are mainly mineral fragments QUARTZ ARENITE: 95% quartz, voids empty or cemented ARKOSE: 75% quartz, up to 25% feldspar: voids empty or cemented GREYWACKE: 75% quartz, 15% fine detrital material: rock and feldspar fragments	CARBONATE SAND	CALC-ARENITE	TUFF	VOLCANIC ASH	
		Medium-grained	SAND								SILTSTONE: 50% fine-grained particles
	0.06	Fine-grained	ARGILLACEOUS or LUTACEOUS	SILT			MUDSTONE SHALE: fissile mudstone	CARBONATE MUD	CALCI-LUTITE	Very fine-grained TUFF	
0.002	Very fine-grained		CLAY	CLAYSTONE: 50% very fine grained particles							
GLASSY AMORPHOUS											
METAMORPHIC			IGNEOUS					GENETIC GROUP			
FOLIATED			MASSIVE					Usual structure			
Quartz, feldspars, micas, acicular dark minerals			Light coloured minerals are quartz, feldspar, mica		Dark and light minerals		Dark minerals		Composition		
			Acid rocks		Intermediate		Basic rocks				Ultrabasic
GNEISS (ortho-, para-, alternate layers of granular and flaky minerals)			PEGMATITE		PYROXENITE and PERIDOTITE		SERPENTINITE		Very coarse-grained		GRAIN SIZE (mm)
			GRANULITE		DIORITE		GABBRO		Coarse-grained		
MIGMATITE			MICROGRANITE		MICRODIORITE		DOLERITE		Medium-grained		
SCHIST			QUARTZITE		RHYOLITE		ANDESITE		Fine-grained		
PHYLLITE			HORNFELS		BASALT				0.06		
SLATE			AMPHIBOLITE		OBSIDIAN and PITCHSTONE		TACHYLITE		Very fine-grained		
MYLONITE					VOLCANIC GLASSES				0.002		
									GLASSY AMORPHOUS		

Classificação de material rochoso/ terroso (Retirado de [20])

<b>Simbologia</b>	<b>Designações</b>	<b>Características do M.R.</b>
W <sub>1</sub>	São	Sem quaisquer sinais de alteração
W <sub>2</sub>	Pouco alterado	Sinais de alteração apenas nas imediações das descontinuidades
W <sub>3</sub>	Medianamente alterado	Alteração visível em todo o maciço rochoso mas a rocha não é friável
W <sub>4</sub>	Muito alterado	Alteração visível em todo o maciço e a rocha é parcialmente friável
W <sub>5</sub>	Decomposto (saibro)	O maciço apresenta-se completamente friável e com comportamento de solo

Classificação quanto ao estado de alteração (Retirado de [20])

<b>Simbologia</b>	<b>Espessura da camada (cm)</b>	<b>Designação</b>
L <sub>1</sub>	> 200	Muito espessas
L <sub>2</sub>	60 - 200	Espessas
L <sub>3</sub>	20 - 60	Espessura mediana
L <sub>4</sub>	6 - 20	Delgadas
L <sub>5</sub>	< 6	Muito delgadas

Classificação quanto à espessura da camada (Retirado de [20])

<b>Resistência à compressão uniaxial (MPa)</b>	<b>Simbologia</b>	<b>Designação</b>	<b>Simbologia</b>	<b>Ângulo de atrito</b>	<b>Designação</b>
> 200	S <sub>1</sub>	Muito elevada	A <sub>1</sub>	> 45°	Muito elevado
60 - 200	S <sub>2</sub>	Elevada	A <sub>2</sub>	35° - 45°	Elevado
20 - 60	S <sub>3</sub>	Moderada	A <sub>3</sub>	25° - 35°	Médio
6 - 20	S <sub>4</sub>	Baixa	A <sub>4</sub>	15° - 25°	Baixo
< 6	S <sub>5</sub>	Muito baixa	A <sub>5</sub>	< 15°	Muito baixo

Classificação em relação à resistência à compressão uniaxial e ao ângulo de atrito (Adaptado de [20])



## ANEXO II – ÍNDICES DE METEORIZAÇÃO

Nome/ Autor	Índice
Índice potencial de alteração (WPI), Índice de Produto (IP) / Reiche (1943)	$WPI = \frac{[K2O + Na2O + CaO + MgO - H2O] * 100}{[SiO2 + Al2O3 + Fe2O3 + FeO + TiO2 + CaO + MgO + NaO]}$ $PI = \frac{SiO2 * 100}{[SiO2 + Al2O3 + Fe2O3 + FeO + TiO2]}$
Rácio Sílica – Alumina/ Ruxton (1968)	$R\acute{a}c\acute{i}o\ Sílica - Alumina = \frac{SiO2}{Al2O3}$
Índice de Parker (WP) / Parker (1970)	$WP = \left[ \frac{2Na2O}{0,35} + \frac{MgO}{0,9} + \frac{2K2O}{0,25} + \frac{CaO}{0,7} \right]$
Índice de Miura (MI) / Miura (1973)	$MI = \frac{MnO + FeO + CaO + MgO + Na2O + K2O}{[Fe2O3 + Al2O3 + 3H2O]}$
Índice de lixiviação ( $\beta'$ ) / Rocha-Filho et al. (1985)	$\beta' = \frac{A_{weathered}}{A_{fresh} + CaO/MgO}$ $A = \frac{KaO + Na2O}{Al2O3}$
Índice de Sílica – Titania (SI-TI) / Jayavérdena & Izawa (1994)	$SI - TI = \frac{SiO2/TiO2}{\left[ \left( \frac{SiO2}{TiO2} \right) + \left( \frac{SiO2}{Al2O3} \right) + \left( \frac{Al2O3}{TiO2} \right) \right]}$
Índice mobilidade ( $I_{Mob}$ ) / Irfan (1996)	$IMob = (Mob_{Fresh} - Mob_{Weathered})$

**Legenda:** K<sub>2</sub>O – Óxido de potássio; Na<sub>2</sub>O – Óxido de sódio; CaO – Óxido de cálcio; MgO – Óxido de magnésio; H<sub>2</sub>O – Água; SiO<sub>2</sub> – Óxido de sílica; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Óxido de alumínio; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Óxido de ferro; FeO – Óxido de ferro; TiO<sub>2</sub> – Dióxido de titânio; MnO - Óxido de magnésio; Mob<sub>Fresh</sub> - total de K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O+CaO em rocha não alterada; Mob<sub>Weathered</sub> – total de K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O+CaO em rocha alterada

Índices de Meteorização químicos (Adaptado de [19])

Nome/ Autor	Índice
Grau de composição (Xd) / Lumb (1962)	$Xd = \frac{(Nq - Nq0)}{(1 - Nq0)}$
Índice de qualidade micropetrográfico (ki) / Mendes et al. (1966)	$ki = \Sigma \frac{\text{Sound minerals}(\%)}{(\text{Unsound minerals} + \text{voids} + \text{fissures})(\%)}$
Índice de densidade de microfracturas ( $\rho_{cr}$ ) / Dixon (1969); Onodera et.al (1974)	$\rho_{cr} = 100 * \left( \frac{\text{total width of cracks}}{\text{length of measured line}} \right)$
Índice micropetrográfico (IP) / Irfan & Dearman (1978)	$IP = \frac{SC (\%)}{UC (\%)}$
Índice de mineral secundário ( $R_{sm}$ ) / Cole & Sandy (1980)	$Rsm = \Sigma [(P.M)]TR$

**Legenda:** Nq – rácio do peso de quartzo e feldspato no solo; Nq0 – rácio do peso de quartzo e feldspato em rocha sã; Sound minerals – produto da percentagem de minerais que possui uma favorável influência no comportamento mecânico do maciço pela; Unsound minerals – ; SC – Minerais inalterados do granito; UC – Minerais secundários (moscovite ou óxido de ferro), microfracturas e vazios resultantes da alteração; P – Percentagem de minerais secundários; M – Classificação da estabilidade mineralógica; TR – Classificação granulometria

**Índices mineralógicos e petroquímicos (Adaptado de [19])**

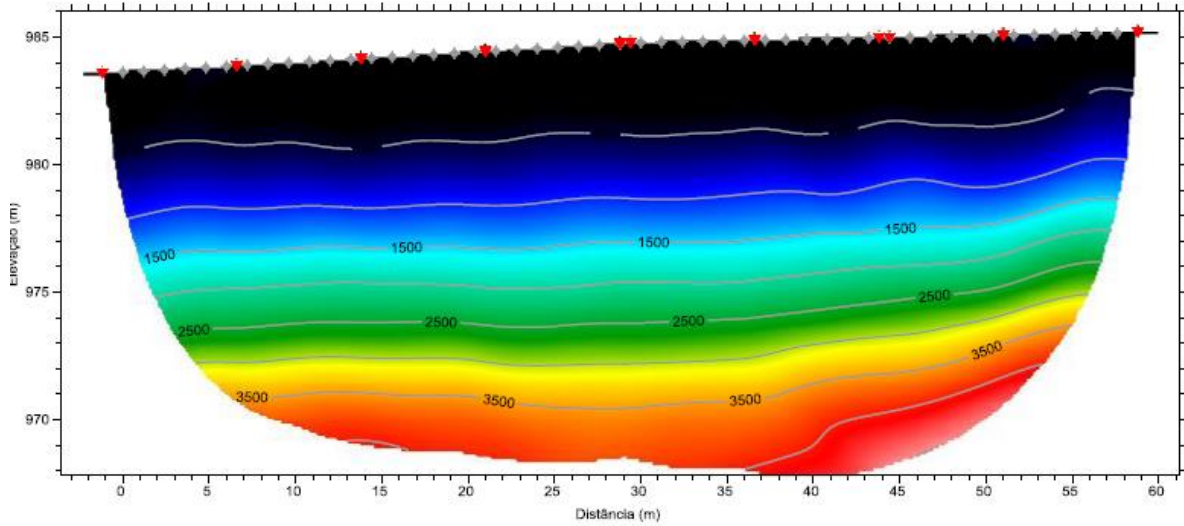
Nome/ Autor	Índice/descrição
Quick Absorption Index (QAI) Hamrol/ (1912)	Proposto por Hamrol (1961) para o estudo da meteorização em granitos e xistos. Este coeficiente apresenta uma boa correlação com as diferentes etapas de meteorização
Coeficiente de meteorização (K) / Illiev/ (1966)	Baseia-a na relação valores obtidos de ultras-sons de um corpo maciço inalterado com um meteorizado em rochas graníticas. $K = \frac{V_0 - V_w}{V_0}$
Índice de desgaste em meio húmido (Sd)/ Franklin & Chandra (1972);	Relaciona a durabilidade ou o potencial de meteorização de uma rocha sedimentar clástica (de preferência em rochas com um teor argiloso significativo). Posteriormente, Sydney Basin conotou este índice a incremento do estado de meteorização em outras rochas sedimentares (sandstone, shale e claystone). Este facto deve-se à silificação do corpo rochoso sendo unicamente aplicável objectivos gerais de classificação (Beavis).
Strength Retention Ratio (Rs) /	Relaciona o valor da compressão uniaxial de uma rocha meteorizada ( $\sigma_{CW}$ ) e a resistência à compressão de um maciço rochoso “fresco” ( $\sigma_{CF}$ ) $RS = \frac{\sigma_{CW}}{\sigma_{CF}} * 100$

**Legenda-:** K – Coeficiente de meteorização;  $V_0$  – Velocidade obtida do ultra-som em corpo rochoso inalterado;  $V_w$  – Velocidade obtida do ultra-som em corpo rochoso; RS – Strength Retention Ratio;  $\sigma_{CW}$  – Resistência à compressão uniaxial de uma rocha meteorizada;  $\sigma_{CF}$  – Resistência à compressão uniaxial de uma rocha não meteorizada

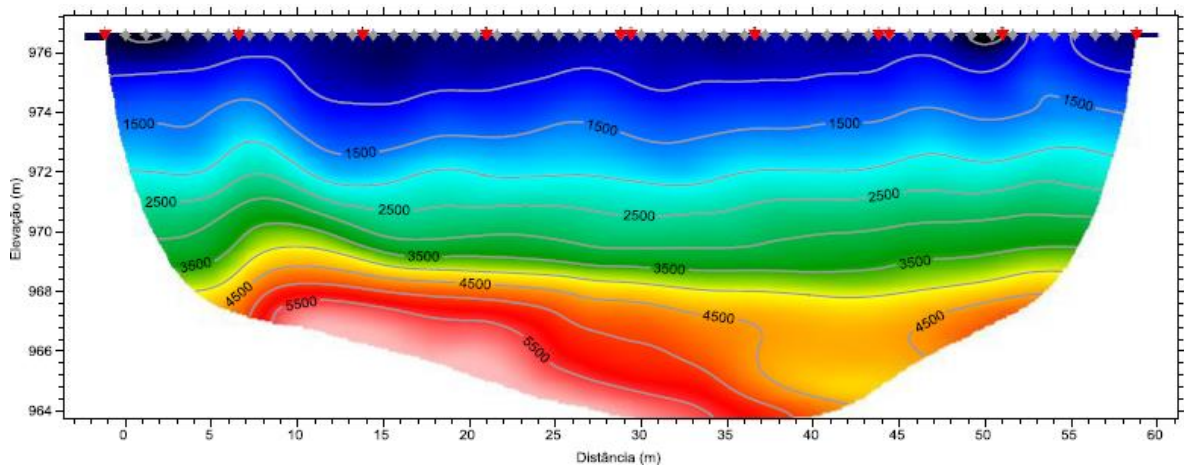
**Índices geotécnicos (Adaptado de [19])**



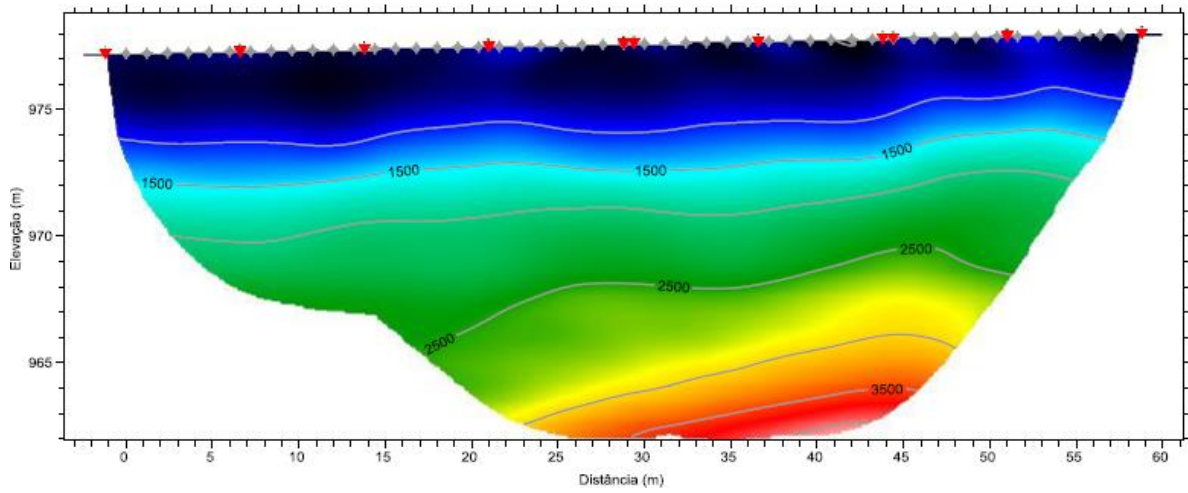
## ANEXO III – PERFÍS SÍSMICOS DE REFRACÇÃO



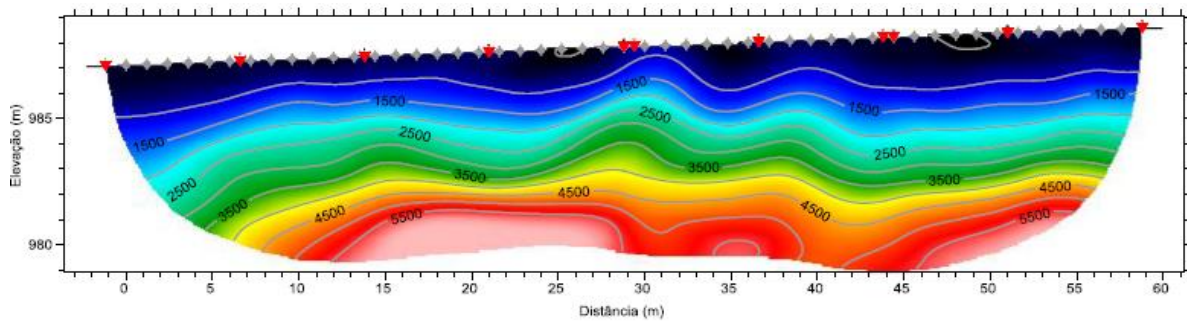
Esboço do perfil sísmico, PSD1



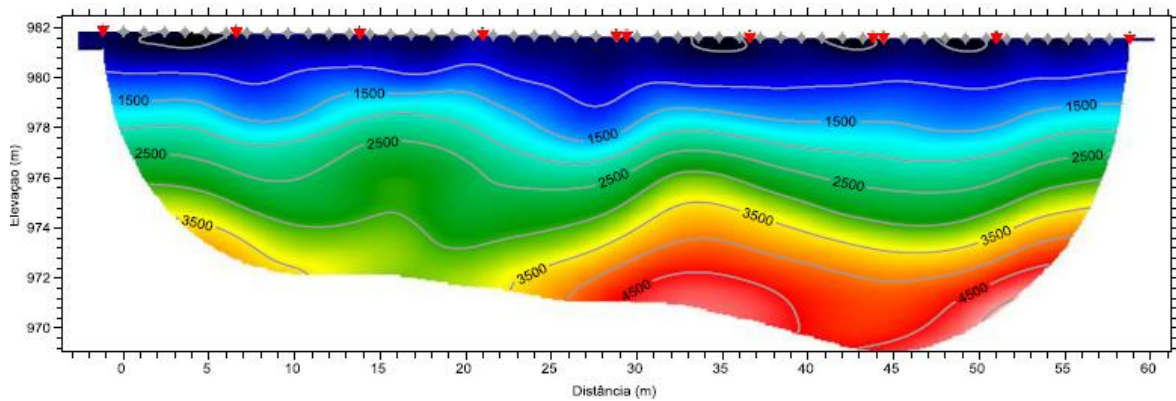
Esboço do perfil sísmico, PSD2



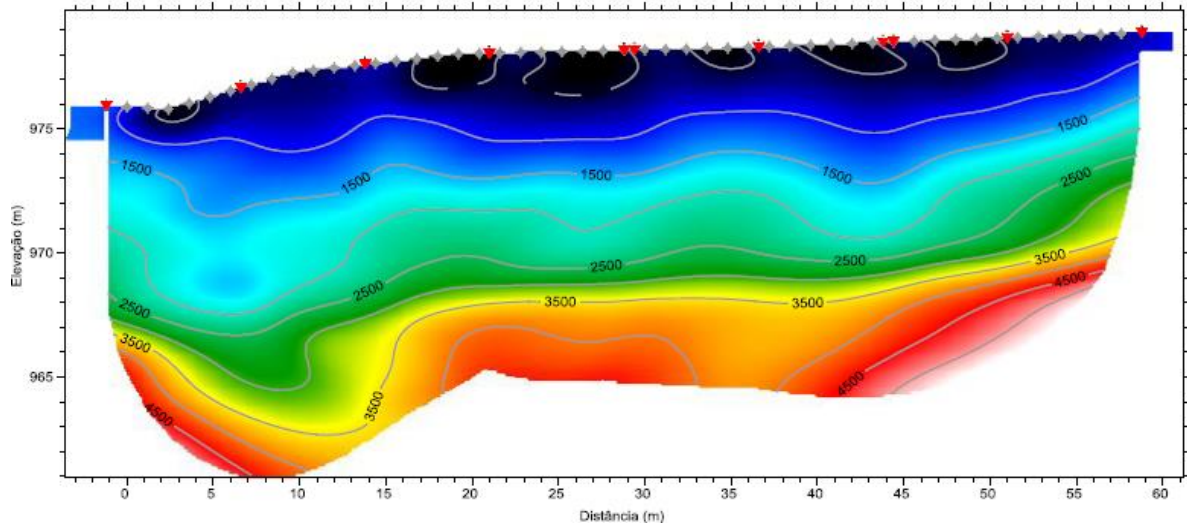
**Esboço do perfil sísmico, PSD3**



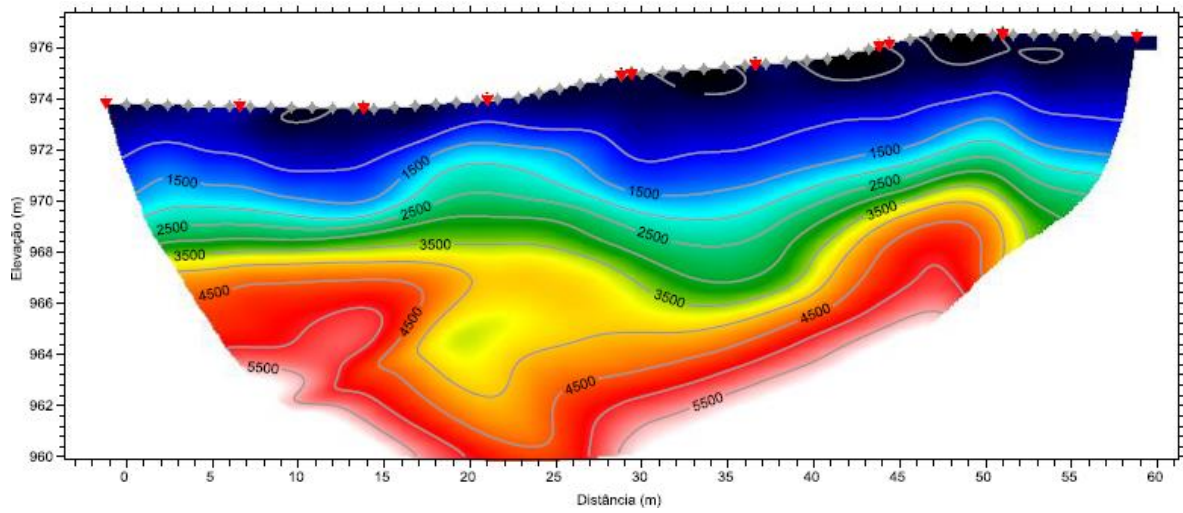
**Esboço do perfil sísmico, PSE1**



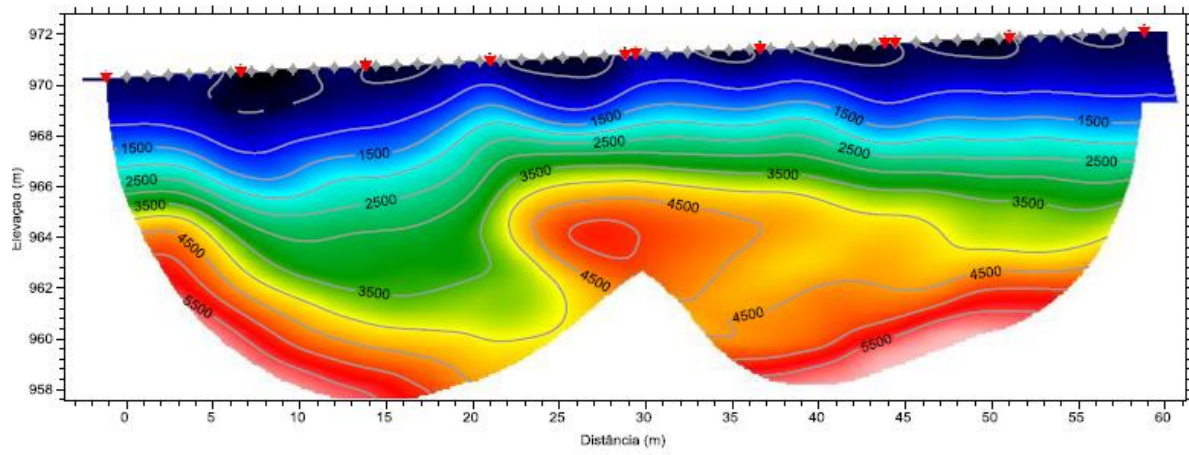
**Esboço do perfil sísmico, PSE2**



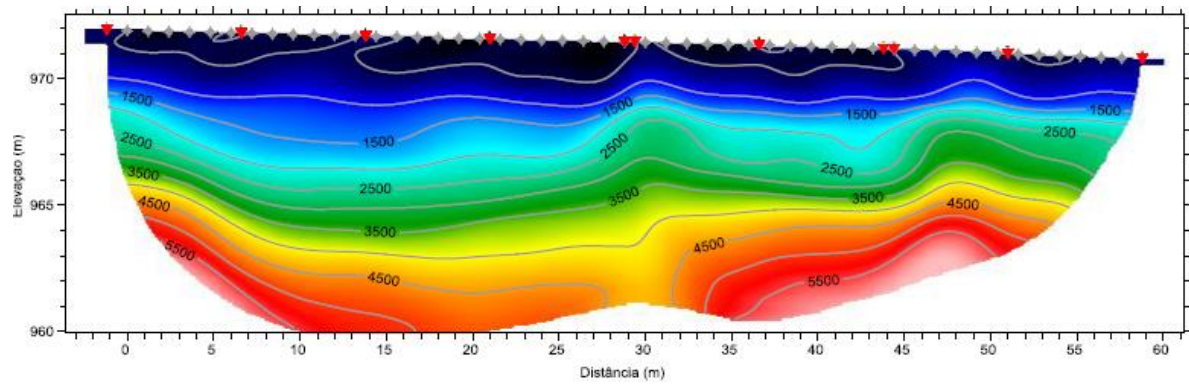
Esboço do perfil sísmico, PSE3



Esboço do perfil sísmico, PSC1



**Esboço do perfil sísmico, PSC2**



**Esboço do perfil sísmico, PSC3**

## ANEXO IV –RESUMO PERFÍS SÍSMICOS

Perfil de refração sísmica nº	Formação geológica	V <sub>p</sub> média (m/s)	Profundidades médias de ocorrência (m) (Tiro directo - Tiro inverso)
PSE1	Sc	< 1000	< 2,0 - 3,5
	Pxa_G	1000 - 2000	2,0 a 4,5 - 3,5 a 5,5
	Pxa_Q   Pxa_G	>2000	> 4,5 - 5,5
PSE2	Sc	<1000	< 1,5 - 1,5
	Pxa_G	1000 - 2000	1,5 a 4,0 - 1,5 a 4,0
	Pxa_Q   Pxa_G	>2000	> 4,0 - 4,0
PSE3	Sc	<1000	< 2,0 - 1,5
	Pxa_G	1000 - 2000	2,0 a 3,5 - 1,5 a 3,0
		>2000	> 3,5 - 3,0
PSD1	Sc   Ca <sub>1</sub>	<1000	< 5,5 - 5,0
	Pxa_G	1000 - 2000	5,5 a 9,0 - 5,0 a 8,0
		>2000	> 9,0 - 8,0
PSD2	Sc   At	<1000	< 1,5 - 1,5
	Pxa_G	1000 - 2000	1,5 a 5,5 - 1,5 a 5,0
		>2000	> 5,5 - 5,0
PSD3	Sc   Q <sub>12</sub>	<1000	< 3,5 - 2,5
	Pxa_G	1000 - 2000	3,5 a 7,0 - 2,5 a 6,0
		>2000	> 7,0 - 6,0
PSC1	Sc   Pxa_G	<1000	< 2,0 - 3,0
	Pxa_G	1000 - 2000	2,0 a 4,5 - 3,0 a 5,5
		>2000	> 4,5 - 5,5
PSC2	Sc   Pxa_G	<1000	< 1,5 - 2,5
	Pxa_G	1000 - 2000	1,5 a 3,5 - 2,5 a 4,0
		>2000	> 3,5 - 4,0
PSC3	Sc   Pxa_G	<1000	< 2,0 - 1,5
	Pxa_G	1000 - 2000	2,0 a 3,0 - 1,5 a 2,5
		>2000	> 3,0 - 2,5



## ANEXO V – DESCRIÇÃO DAS SONDAGENS DE ROTAÇÃO À FURAÇÃO

Sond. n°	Profund. atingida pela sondagem (m)	Nível de água (m)	Espessura de solo de cobertura (m)	Resumo das características dos terrenos atravessados nas sondagens		
				Profund. (m)	Formação geológica	Descrição, resultados de ensaios SPT ( $N_{SPT}$ ), estado de alteração ( $W_n$ ), afastamento entre fracturas ( $F_n$ ), % de recuperação e RQD (%) da rocha
SME1	10,00	0,6	0,9	0,0 - 0,9	Sc	Areia fina, siltosa, com matéria orgânica: solo de cobertura.
				0,9 - 6,7	Pxa_G	Grés quartzítico, essencialmente medianamente alterado ( $W_3$ ) e pouco alterado ( $W_2$ ) e muito fracturado ( $F_4$ ) e medianamente fracturado ( $F_3$ ), por vezes com oxidação e preenchimento argiloso das fractura. A % de recuperação varia entre 80 e 100% e o RQD entre 35 e 75%. Cerca dos 4,8 - 5,0m ocorre preenchimento argiloso das superfície de fractura.
				6,7 - 7,4	Pxa_G	Grés quartzítico, pouco alterado ( $W_2$ ) e fracturado ( $F_4$ ), com 100% de recuperação e 60% de RQD.
				7,4 - 10,0	Pxa_G	Grés quartzítico, essencialmente pouco alterado ( $W_2$ ) e medianamente fracturado ( $F_3$ ), por vezes com oxidação e preenchimento argiloso das fractura. A % de recuperação é de 100% e o RQD de cerca de 90%.
SME2	15,00	0,9	0,6	0,0 - 0,6	Sc	Areia fina, siltosa, com matéria orgânica: solo de cobertura.
				0,6 - 1,7	Q <sub>il</sub>	Areia fina a média, siltosa, muito compacta, com valores de SPT correspondentes à "nega" ( $N_{SPT} \geq 60$ ).
				1,7 - 4,0	Pxa_G	Grés quartzítico, com intercalações decimétricas gresosas decimétricas, essencialmente medianamente alterado ( $W_3$ ) e muito e intensamente fracturado ( $F_{4-5}$ e $F_5$ ), por vezes com oxidação das fracturas. A % de recuperação varia entre 90 e 100% e o RQD entre cerca de 65 e 85%.
				4,0 - 6,6	Pxa_Q	Quartzito com textura vítrea, essencialmente pouco alterado ( $W_2$ ) e medianamente fracturado ( $F_3$ ), por vezes com oxidação das fracturas. A % de recuperação varia entre 90 e 100% e o RQD entre cerca de 80 e 95%.
				6,6 - 9,4	Pxa_Q	Quartzito com textura vítrea, essencialmente pouco alterado ( $W_2$ ) e muito fracturado ( $F_{4-5}$ e $F_4$ ) e com intensa oxidação das fracturas. A % de recuperação varia entre 90 e 95% e o RQD entre cerca de 65 e 80%.
				9,4 - 10,0	Pxa_G	Grés quartzítico, com intercalações decimétricas gresosas, essencialmente pouco alterado ( $W_2$ ) e medianamente fracturado ( $F_3$ ). A % de recuperação é de 100% e o RQD de cerca de 75%.
				10,0 - 15,0	Pxa_G	Grés quartzítico, com intercalações decimétricas gresosas, essencialmente pouco alterado ( $W_2$ ) e medianamente ( $F_3$ ) a pouco fracturado ( $F_2$ ), com oxidação das fracturas entre os 13,0 -14,1 m. A % de recuperação varia entre 90 e 100% e o RQD entre cerca de 75 e 95%.

Sond. n°	Profund. atingida pela sondagem (m)	Nível de água (m)	Espessura de solo de cobertura (m)	Resumo das características dos terrenos atravessados nas sondagens		
				Profund. (m)	Formação geológica	Descrição, resultados de ensaios SPT (N <sub>SPT</sub> ), estado de alteração (W <sub>n</sub> ), afastamento entre fracturas (F <sub>n</sub> ), % de recuperação e RQD (%) da rocha
SME4	30,00	2,3	0,5	0,0 - 0,5	Sc	Areia fina, siltosa, com matéria orgânica: solo de cobertura.
				0,5 - 3,0	Pxa_G	Grés quartzítico, essencialmente medianamente alterado (W <sub>3</sub> ) e muito fracturado (F <sub>5</sub> e F <sub>4</sub> ), com alguma oxidação e preenchimento argiloso das fracturas. A % de recuperação varia entre 80 e 100% e o RQD entre cerca de 10 e 50%.
				3,0 - 18,0	Pxa_G	Grés quartzítico, essencialmente medianamente alterado (W <sub>3</sub> ) e medianamente (F <sub>3</sub> ) a muito fracturado (F <sub>4</sub> ), com alguma oxidação das fracturas. A % de recuperação varia entre 80 e 100% e o RQD entre cerca de 45 e 90%.
				18,0 - 30,0	Pxa_G	Grés quartzítico, essencialmente pouco alterado (W <sub>2</sub> ) a são (W <sub>1-2</sub> ) e medianamente (F <sub>3</sub> ) a muito fracturado (F <sub>4</sub> ), com alguma oxidação das fracturas. A % de recuperação é de 100% e o RQD entre cerca de 50 e 95%.
SFV1	30,00	2,1	0,4	0,0 - 0,4	Sc	Areia fina, silto-argilosa, com matéria orgânica: solo de cobertura.
				0,4 - 0,9	Q <sub>i2</sub>	Areia fina a média, silto-argilosa.
				0,9 - 1,5	Pxa_G	Grés quartzítico, essencialmente muito alterado (W <sub>4</sub> ) e intensamente fracturado (F <sub>5</sub> e F <sub>4.5</sub> ). A % de recuperação é de 80% e o RQD de 40%.
				1,5 - 3,9	Pxa_G	Grés quartzítico, com intercalações decimétricas gresosas, essencialmente medianamente alterado (W <sub>3</sub> ) e medianamente fracturado (F <sub>3</sub> ), com oxidação das fracturas. A % de recuperação varia entre 90 e 100% e o RQD entre cerca de 70 e 95%.
				3,9 - 6,4	Pxa_G	Grés quartzítico, com intercalações decimétricas gresosas, essencialmente medianamente alterado (W <sub>3</sub> ) e intensamente fracturado (F <sub>5</sub> ), com oxidação das fracturas e preenchimento argiloso entre os 3,9 e 5,7 m. A % de recuperação é de 90% e o RQD varia entre cerca de 35 e 70%.
				6,4 - 24,0	Pxa_G	Grés quartzítico, com intercalações decimétricas gresosas, essencialmente medianamente (W <sub>3</sub> ) a pouco alterado (W <sub>2</sub> ) e medianamente (F <sub>3</sub> ) a muito fracturado (F <sub>4</sub> e F <sub>4.5</sub> ), com oxidação das fracturas e preenchimento argiloso aos 9,9 m, 12,65 m e 20,65 m. A % de recuperação varia entre 90 e 100% e o RQD entre cerca de 60 e 95%.
				24,0 - 26,2	Pxa_G	Grés quartzítico, compacto, com intercalações vítreas centimétricas, essencialmente medianamente alterado (W <sub>3</sub> ) e fracturado (F <sub>3</sub> ). A % de recuperação é de 100% e o RQD de cerca de 95%.
				26,2 - 28,6	Pxa_G	Grés quartzítico, essencialmente pouco alterado (W <sub>2</sub> ) e medianamente fracturado (F <sub>3</sub> ), com alguma oxidação das fracturas. A % de recuperação é de 100% e o RQD é de cerca de 95%.
				28,6 - 30,0	Pxa_G	Grés quartzítico, com intercalações vítreas decimétricas, essencialmente pouco alterado a são (W <sub>1-2</sub> ) e medianamente (F <sub>3</sub> ). A % de recuperação é de 100% e o RQD de cerca de 90%.

Sond. nº	Profund. atingida pela sondagem (m)	Nível de água (m)	Espessura de solo de cobertura (m)	Resumo das características dos terrenos atravessados nas sondagens		
				Profund. (m)	Formação geológica	Descrição, resultados de ensaios SPT ( $N_{SPT}$ ), estado de alteração ( $W_n$ ), afastamento entre fracturas ( $F_n$ ), % de recuperação e RQD (%) da rocha
SFV2	30,00	1,8	0,4	0,0 - 0,4	Sc	Areia fina a média, silto-argilosa: solo de cobertura.
				0,4 - 1,2	Pxa_G	Grés quartzítico, essencialmente muito alterado ( $W_4$ ) e intensamente fracturado ( $F_5$ ). A % de recuperação é de 80% e o RQD é de 45%.
				1,2 - 9,2	Pxa_G	Grés quartzítico, com intercalações decimétricas gresosas, essencialmente medianamente alterado ( $W_3$ ) e medianamente ( $F_3$ ) a muito fracturado ( $F_4$ e $F_{4.5}$ ), com oxidação das fracturas a cerca dos 6,0 m. A % de recuperação varia entre 80 e 90% e o RQD entre 45 e 85%.
				9,2 - 10,7	Pxa_G	Grés de grão fino a médio, essencialmente medianamente alterado ( $W_3$ ) e muito fracturado ( $F_{4.5}$ ). A % de recuperação é de 95% e o RQD é de 60%.
				10,7 - 21,0	Pxa_G	Grés quartzítico, com intercalações decimétricas gresosas, essencialmente medianamente ( $W_3$ ) a pouco alterado ( $W_2$ ) e medianamente ( $F_3$ ) a muito fracturado ( $F_4$ e $F_{4.5}$ ), com alguma oxidação das fracturas. A % de recuperação varia entre 90 e 95% e o RQD entre 60 e 90%.
				21,0 - 21,6	Pxa_G	Grés quartzítico com fenocristais de quartzo, essencialmente muito alterado ( $W_4$ ) e intensamente fracturado ( $F_5$ ). A % de recuperação é de 90% e o RQD é de 75%.
				21,6 - 30,0	Pxa_G	Grés quartzítico, compacto, com intercalações vítreas centimétricas, essencialmente pouco alterado ( $W_2$ ) e medianamente fracturado ( $F_3$ ). A % de recuperação varia entre 90 e 100% e o RQD entre cerca de 75 e 95%.
SMD1	10,65	4,5	0,6	0,0 - 0,6	Sc	Areia fina, silto-argilosa, com matéria orgânica: solo de cobertura.
				0,6 - 1,8	Ca <sub>1</sub>	Areia fina a média, silto-argilosa, medianamente compacta ( $N_{SPT} = 20$ ).
				1,8 - 4,8	Ca <sub>1</sub>	Areia fina a média, argilosa, compacta ( $36 \leq N_{SPT} \leq 39$ ), com seixo de quartzito entre os 3,1 e 3,2 m de profundidade.
				4,8 - 10,65	Pxa_G	Grés quartzítico, com intercalações decimétricas gresosas, essencialmente medianamente alterado ( $W_3$ ) e medianamente ( $F_3$ ) a muito fracturado ( $F_4$ e $F_{4.5}$ ), com algum preenchimento argiloso das fracturas. A % de recuperação é de 100% e o RQD varia entre cerca de 70 e 85%.

Sond. n°	Profund. atingida pela sondagem (m)	Nível de água (m)	Espessura de solo de cobertura (m)	Resumo das características dos terrenos atravessados nas sondagens		
				Profund. (m)	Formação geológica	Descrição, resultados de ensaios SPT ( $N_{SPT}$ ), estado de alteração ( $W_n$ ), afastamento entre fracturas ( $F_n$ ), % de recuperação e RQD (%) da rocha
SMD2	15,30	4,5	0,7	0,0 - 0,7	Sc	Areia fina a média, argilo-siltosa, com vestígios de matéria orgânica: solo de cobertura.
				0,7 - 2,3	Ca <sub>1</sub>	Areia fina a média, argilo-siltosa, muito solta a solta ( $N_{SPT} = 5$ ).
				2,3 - 4,7	Ca <sub>1</sub>	Areia fina a média, argilo-siltosa, compacta ( $32 \leq N_{SPT} \leq 47$ ).
				4,7 - 10,2	Pxa_G	Grés de grão fino a médio, essencialmente medianamente alterado ( $W_3$ ), com intercalações muito alteradas ( $W_4$ ) e medianamente ( $F_3$ ) a muito fracturado ( $F_4$ e $F_{4-5}$ ), com algum preenchimento argiloso das fracturas. A % de recuperação varia entre 90 e 100% e o RQD entre cerca de 70 e 75%.
				10,2 - 15,3	Pxa_G	Grés quartzítico, com intercalações decimétricas gresosas, essencialmente medianamente alterado ( $W_3$ ) e medianamente ( $F_3$ ), com algum preenchimento argiloso das fracturas. A % de recuperação varia entre 90 e 100% e o RQD entre cerca de 70 e 100%.
SMD3	25,40	0,5	0,7	0,0 - 0,7	Sc	Areia fina, argilosa, com matéria orgânica: solo de cobertura.
				0,7 - 1,9	Ca <sub>1</sub>	Areia fina a média, silto-argilosa, compacta ( $N_{SPT} \leq 43$ ).
				1,9 - 3,9	Pxa_G	Grés de grão fino a médio, com intercalações centimétricas de quartzito, essencialmente muito alterado ( $W_4$ ) e muito fracturado ( $F_4$ e $F_{4-5}$ ), com oxidação e preenchimento argiloso das fracturas. A % de recuperação varia entre 90 e 95% e o RQD entre cerca de 50 e 75%.
				3,9 - 15,0	Pxa_G	Grés quartzítico, com intercalações decimétricas gresosas, essencialmente medianamente alterado ( $W_3$ ) e medianamente fracturado ( $F_3$ ), com passagens muito fracturadas ( $F_4$ ) e pouco fracturadas ( $F_2$ ). Verifica-se oxidação e preenchimento argiloso das fracturas. A % de recuperação varia entre 85 e 95% e o RQD entre cerca de 45 e 95%.
				15,0 - 25,4	Pxa_G	Grés quartzítico, essencialmente pouco alterado ( $W_2$ ) e medianamente ( $F_3$ ) a pouco fracturado ( $F_2$ ), com oxidação das fracturas. A % de recuperação varia entre 90 e 95% e o RQD entre cerca de 85 e 90%.

Sond. nº	Profund. atingida pela sondagem (m)	Nível de água (m)	Espessura de solo de cobertura (m)	Resumo das características dos terrenos atravessados nas sondagens		
				Profund. (m)	Formação geológica	Descrição, resultados de ensaios SPT ( $N_{SPT}$ ), estado de alteração ( $W_n$ ), afastamento entre fracturas ( $F_n$ ), % de recuperação e RQD (%) da rocha
SMD5	30,00	2,7	0,5	0,0 - 0,5	Sc	Areia fina a média, silto-argilosa, com matéria orgânica: solo de cobertura.
				0,5 - 1,5	Q <sub>12</sub>	Areia fina a média, silto-argilosa, com pedras e calhaus de quartzito gresoso, sub-angulosos.
				1,5 - 7,4	Pxa_G	Grés quartzítico, essencialmente medianamente ( $W_3$ ) a muito alterado ( $W_4$ ) e intensamente ( $F_5$ ) a muito fracturado ( $F_4$ ), com oxidação das fracturas até cerca dos 3,6 m. A % de recuperação varia entre 60 e 65% e o RQD entre cerca de 15 e 40%.
				7,4 - 27,7	Pxa_G	Grés quartzítico, essencialmente pouco ( $W_2$ ) a medianamente alterado ( $W_3$ ) e medianamente ( $F_3$ ) a muito fracturado ( $F_4$ ), com alguma oxidação e preenchimento argiloso das fracturas. A % de recuperação varia entre 65 e 100% e o RQD entre cerca de 40 e 85%.
				27,7 - 30,0	Pxa_G	Grés quartzítico, essencialmente pouco ( $W_2$ ) a medianamente alterado ( $W_3$ ) e medianamente ( $F_3$ ) a muito fracturado ( $F_4$ ), com oxidação das fracturas. A % de recuperação é de 100% e o RQD é de cerca de 85%.
SC1	15,00	1,8	0,4	0,0 - 0,4	Sc	Areia fina, argilo-siltosa, com matéria orgânica: solo de cobertura.
				0,4 - 6,9	Pxa_G	Grés quartzítico, com intercalações centimétricas a decimétricas gresosas, essencialmente medianamente alterado ( $W_3$ ) e medianamente ( $F_3$ ) a muito fracturado ( $F_4$ ), com alguma oxidação e preenchimento argiloso das fracturas. A % de recuperação varia entre 85 e 100% e o RQD entre cerca de 60 e 95%.
				6,9 - 8,5	Pxa_G	Grés quartzítico, com textura vítrea, essencialmente pouco alterado ( $W_2$ ) e medianamente ( $F_3$ ) a muito fracturado ( $F_4$ ), com oxidação e preenchimento argiloso das fracturas aos 7,8 m. A % de recuperação é de 90% e o RQD é de cerca de 60%.
				8,5 - 15,0	Pxa_G	Grés quartzítico, essencialmente pouco alterado ( $W_2$ ) e medianamente ( $F_3$ ) a muito fracturado ( $F_4$ ), com oxidação das fracturas. A % de recuperação varia entre 90 e 95% e o RQD entre cerca de 60 e 75%.

Sond. n°	Profund. atingida pela sondagem (m)	Nível de água (m)	Espessura de solo de cobertura (m)	Resumo das características dos terrenos atravessados nas sondagens		
				Profund. (m)	Formação geológica	Descrição, resultados de ensaios SPT ( $N_{SPT}$ ), estado de alteração ( $W_n$ ), afastamento entre fracturas ( $F_n$ ), % de recuperação e RQD (%) da rocha
SC2	25,00	1,5	0,4	0,0 - 0,4	Sc	Areia fina a média, silto-argilosa, com matéria orgânica: solo de cobertura.
				0,4 - 4,5	Pxa_G	Grés de grão fino a médio, com intercalações centimétricas de grés quartzítico, essencialmente medianamente ( $W_3$ ) a muito alterado ( $W_4$ ) e intensamente ( $F_5$ ) a muito fracturado ( $F_4$ ), com oxidação e preenchimento argiloso das fracturas. A % de recuperação varia entre 65 e 95% e o RQD entre cerca de 10 e 80%.
				4,5 - 10,3	Pxa_G	Grés quartzítico, essencialmente medianamente ( $W_3$ ) a pouco alterado ( $W_2$ ) e medianamente fracturado ( $F_3$ ), com oxidação e preenchimento argiloso de algumas fracturas. A % de recuperação varia entre 90 e 95% e o RQD entre cerca de 60 e 75%.
				10,3 - 25,0	Pxa_G	Grés quartzítico, essencialmente medianamente ( $W_3$ ) a pouco alterado ( $W_2$ e $W_{1-2}$ ) e medianamente ( $F_3$ ) a pouco fracturado ( $F_2$ ), mas com passagens muito fracturadas ( $F_4$ ) e com oxidação das fracturas. A % de recuperação varia entre 95 e 100% e o RQD entre cerca de 75 e 95%.
SC3	25,00	0,3	0,4	0,0 - 0,4	Sc	Areia fina, silto-argilosa, com matéria orgânica: solo de cobertura.
				0,4 - 1,1	Ca1	Areia de grão fino a médio, silto-argilosa.
				1,1 - 1,5	Pxa_G	Grés quartzítico, essencialmente muito alterado ( $W_4$ ) e intensamente fracturado ( $F_5$ ). A % de recuperação é de 30% e sem RQD.
				1,5 - 6,3	Pxa_G	Grés quartzítico, com intercalações centimétricas gresosas, essencialmente medianamente alterado ( $W_3$ ) e muito a intensamente fracturado ( $F_4$ e $F_{4-5}$ ), com oxidação das fracturas. A % de recuperação varia entre 75 e 100% e o RQD entre cerca de 40 e 50%.
				6,3 - 7,4	Pxa_G	Grés quartzítico, com vestígios de carsificação, essencialmente medianamente alterado ( $W_3$ ) e muito a intensamente fracturado ( $F_4$ e $F_{4-5}$ ), com oxidação e alguma preenchimento argiloso das fracturas. A % de recuperação é de 100% e o RQD é de cerca de 50%.
				7,4 - 19,1	Pxa_G	Grés quartzítico, essencialmente pouco ( $W_2$ ) a medianamente alterado ( $W_3$ ) e medianamente fracturado ( $F_3$ ), mas com passagens muito fracturadas ( $F_4$ e $F_{4-5}$ ) e oxidação das fracturas. A % de recuperação varia entre 95 e 100% e o RQD entre cerca de 50 e 90%.
				19,1 - 25,0	Pxa_G	Grés quartzítico, com vestígios de carsificação, essencialmente medianamente ( $W_3$ ) a pouco alterado ( $W_2$ ) e muito ( $F_4$ e $F_{4-5}$ ) a medianamente fracturado ( $F_3$ ), com oxidação das fracturas. A % de recuperação varia entre 90 e 100% e o RQD entre cerca de 55 e 90%.

Sond. n°	Profund. atingida pela sondagem (m)	Nível de água (m)	Espessura de solo de cobertura (m)	Resumo das características dos terrenos atravessados nas sondagens		
				Profund. (m)	Formação geológica	Descrição, resultados de ensaios SPT (N <sub>SPT</sub> ), estado de alteração (W <sub>n</sub> ), afastamento entre fracturas (F <sub>n</sub> ), % de recuperação e RQD (%) da rocha
SC4	15,00	2,1	0,8	0,0 - 0,8	Sc	Areia fina, argilo-siltosa, com matéria orgânica: solo de cobertura.
				0,8 - 3,2	Ca <sub>1</sub>	Areia fina a média, argilo-siltosa, muito compacta, com valores de SPT correspondentes à "nega" (N <sub>SPT</sub> ≥ 60).
				3,2 - 4,8	Pxa <sub>G</sub>	Grés quartzítico, essencialmente muito alterado (W <sub>4-5</sub> ) e intensamente fracturado (F <sub>4</sub> e F <sub>4-5</sub> ), com valores de SPT correspondentes à "nega" (N <sub>SPT</sub> ≥ 60).
				4,8 - 6,2	Pxa <sub>G</sub>	Areia fina a média, argilo-siltosa que resultou da alteração do grés quartzítico, apresentando-se o maciço rochoso completamente friável, com comportamento de solo e valores de SPT correspondentes à "nega" (N <sub>SPT</sub> ≥ 60).
				6,2 - 11,5	Pxa <sub>G</sub>	Grés quartzítico, essencialmente muito (W <sub>4</sub> ) a medianamente alterado (W <sub>3</sub> ) e intensamente fracturado (F <sub>5</sub> e F <sub>4-5</sub> ), com oxidação e preenchimento argiloso das fracturas. A % de recuperação é de 85% e o RQD é praticamente nulo.
				11,5 - 15,0	Pxa <sub>G</sub>	Grés quartzítico, essencialmente medianamente alterado (W <sub>3</sub> ) e intensamente fracturado (F <sub>5</sub> e F <sub>4-5</sub> ), com oxidação e algum preenchimento argiloso das fracturas. A % de recuperação varia entre 85 e 90% e o RQD entre cerca de 5 e 10%.

**Geologia:** PLIOCÉNICO SUPERIOR, PLISTOCÉNICO E TERCIÁRIO CONTINENTAL: At - Areia argilo-siltosa, vermelha a alaranjada, mal calibrada com materiais detríticos de calibre variado (escombreira); Sc - Areia fina, silto-argilosa, com matéria orgânica castanha escura (solo de cobertura); Q<sub>12</sub> - Areia fina a grosseira pouco argilosa, com fragmentos quartzíticos; Q<sub>11</sub> - Areia de granulometria variada, por vezes com cascalheira de base; Ca<sub>1</sub> - Areia fina a média silto-argilosa, amarelada. PRÉ-CÂMBRICO E PALEOZOÍCO INFERIOR: Pxa<sub>G</sub> - Grés quartzítico; Pxa<sub>Q</sub> - Quartzito



## ANEXO VI – RESULTADOS DA PROSPECÇÃO MECÂNICA

Sond. nº	Prof (m)	Litologia	Ensaio de absorção de água tipo “Lugeon”						
			Trecho ensaiado (m)	Fracturação registada (F)	Absorção (Lu)	Comportamento do M.R. relativamente ao escoamento	Absorção do M.R.	Condições das descontinuidades do M.R.	Permeabilidade do M.R.
SME1	10,0	Grés quartzítico	2,0 - 5,0	F <sub>3</sub> , F <sub>4</sub> , F <sub>4-5</sub> , F <sub>5</sub>	< 1	Preenchimento ou colmatação de fracturas.	Muito baixa	Muito fechadas	Muito impermeável
			5,0 - 10,0	F <sub>2</sub> , F <sub>3</sub> , F <sub>4</sub> , F <sub>5</sub>	< 1	Preenchimento ou colmatação de fracturas.	Muito baixa	Muito fechadas	Muito impermeável
SME2	15,0	Grés quartzítico	2,0 - 5,0	F <sub>3</sub> , F <sub>4</sub> , F <sub>4-5</sub>	< 1	Sem absorções	Muito baixa	Muito fechadas	Muito impermeável
		Quartzito	5,0 - 10,0	F <sub>2</sub> , F <sub>3</sub> , F <sub>4</sub> , F <sub>4-5</sub> , F <sub>5</sub>	< 1	Sem absorções	Muito baixa	Muito fechadas	Muito impermeável
		Grés quartzítico	10,0 - 15,0	F <sub>2</sub> , F <sub>3</sub> , F <sub>4</sub>	< 1	Sem absorções	Muito baixa	Muito fechadas	Muito impermeável
SME3	23,4	Grés quartzítico	2,0 - 5,0	F <sub>2</sub> , F <sub>3</sub> , F <sub>4</sub> , F <sub>4-5</sub>	< 1	Preenchimento ou colmatação de fracturas.	Muito baixa	Muito fechadas	Muito impermeável
		Quartzito	5,0 - 10,0	F <sub>2</sub> , F <sub>3</sub> , F <sub>4</sub> , F <sub>4-5</sub> , F <sub>5</sub>	< 1	Regime laminar com preenchimento ou colmatação de fracturas.	Muito baixa	Muito fechadas	Muito impermeável
		Grés quartzítico	10,0 - 15,0	F <sub>2</sub> , F <sub>3</sub> , F <sub>4</sub>	< 1	Regime laminar com abertura de fracturas sobre pressão.	Muito baixa	Muito fechadas	Muito impermeável
			15,0 - 20,0	F <sub>2</sub> , F <sub>3</sub> , F <sub>4</sub> , F <sub>4-5</sub> , F <sub>5</sub>	1	Regime laminar com preenchimento ou colmatação de fracturas.	Baixa	Fechadas	Praticamente impermeável
			18,4 - 23,4	F <sub>2</sub> , F <sub>3</sub> , F <sub>4</sub>	1	Regime laminar com lavagem ou desobstrução das fracturas.	Baixa	Fechadas	Praticamente impermeável
SME4	30,0	Grés quartzítico	2,0 - 5,0	F <sub>3</sub> , F <sub>4</sub>	11	Regime turbulento com preenchimento ou colmatação de fracturas.	Moderada	Algumas parcialmente abertas	Muito permeável
			5,0 - 10,0	F <sub>3</sub> , F <sub>4</sub> , F <sub>5</sub>	3	Regime turbulento com preenchimento ou colmatação de fracturas.	Baixa	Fechadas	Praticamente impermeável
			10,0 - 15,0	F <sub>3</sub> , F <sub>4</sub>	< 1	Abertura de fracturas sobre pressão.	Muito baixa	Muito fechadas	Muito impermeável
			15,0 - 20,0	F <sub>3</sub> , F <sub>4</sub> , F <sub>5</sub>	< 1	Abertura de fracturas sobre pressão.	Muito baixa	Muito fechadas	Muito impermeável
			20,0 - 25,0	F <sub>3</sub> , F <sub>4</sub>	< 1	Sem absorções	Muito baixa	Muito fechadas	Muito impermeável
			25,0 - 30,0	F <sub>3</sub> , F <sub>4</sub> , F <sub>5</sub>	< 1	Sem absorções	Muito baixa	Muito fechadas	Muito impermeável

Sond. nº	Prof (m)	Litologia	Ensaio de absorção de água tipo "Lugeon"							
			Trecho ensaiado (m)	Fracturação registada (F)	Absorção (Lu)	Comportamento do M.R. relativamente ao escoamento	Absorção do M.R.	Condições das descontinuidades do M.R.	Permeabilidade do M.R.	
SFV1	30,0	Grés quartzítico	2,0 - 5,0	F3, F4, F5	2	Regime turbulento com preenchimento ou colmatção de fracturas.	Baixa	Fechadas	Praticamente impermeável	
			5,0 - 10,0	F3, F4, F4-5	1	Regime turbulento com preenchimento ou colmatção de fracturas.	Baixa	Fechadas	Praticamente impermeável	
			10,0 - 15,0	F3, F4, F4-5	1	Regime laminar com preenchimento ou colmatção de fracturas.	Baixa	Fechadas	Praticamente impermeável	
			15,0 - 20,0	F2, F3, F4, F5	2	Regime laminar com lavagem ou desobstrução de fracturas.	Baixa	Fechadas	Praticamente impermeável	
			20,0 - 25,0	F2, F3, F4, F4-5, F5	1	Regime turbulento. As fissuras mantêm-se constantes.	Baixa	Fechadas	Praticamente impermeável	
			25,0 - 30,0	F3, F4, F4-5	1	Regime turbulento. As fissuras mantêm-se constantes.	Baixa	Fechadas	Praticamente impermeável	
SFV2	30		Grés quartzítico	2,0 - 5,0	F3, F4, F4-5	2	Regime turbulento. As fissuras mantêm-se constantes.	Baixa	Fechadas	Praticamente impermeável
				5,0 - 10,0	F3, F4, F4-5	3	Regime laminar com lavagem ou desobstrução de fracturas.	Baixa	Fechadas	Praticamente impermeável
				10,0 - 15,0	F2, F3, F4, F4-5	3	Regime laminar com lavagem ou desobstrução de fracturas.	Baixa	Fechadas	Praticamente impermeável
				15,0 - 20,0	F2, F3, F4, F4-5	2	Prenchimento de fissuras.	Baixa	Fechadas	Praticamente impermeável
				20,0 - 25,0	F2, F3, F4, F5	2	Regime laminar com preenchimento ou colmatção de fissuras	Baixa	Fechadas	Praticamente impermeável
				25,0 - 30,0	F2, F3, F4, F4-5	1	Regime laminar com preenchimento ou colmatção de fracturas.	Baixa	Fechadas	Praticamente impermeável

Sond. nº	Prof (m)	Litologia	Ensaio de absorção de água tipo "Lugeon"						
			Trecho ensaiado (m)	Fracturação registada (F)	Absorção (Lu)	Comportamento do M.R. relativamente ao escoamento	Absorção do M.R.	Condições das descontinuidades do M.R.	Permeabilidade do M.R.
SMD1	10,7	Grés quartizítico	5,7 - 10,7	F <sub>2</sub> , F <sub>3</sub> , F <sub>4</sub> , F <sub>4-5</sub> , F <sub>5</sub>	2	Regime laminar com lavagem ou desobstrução de fracturas.	Baixa	Fechadas	Praticamente impermeável
SMD2	15,3		5,0 - 10,0	F <sub>2</sub> , F <sub>3</sub> , F <sub>4</sub> , F <sub>4-5</sub>	< 1	Regime turbulento com preenchimento ou colmatção de fracturas.	Muito baixa	Muito fechadas	Muito impermeável
			10,0 - 15,0	F <sub>2</sub> , F <sub>3</sub> , F <sub>4</sub> , F <sub>4-5</sub>	1	Regime turbulento com preenchimento ou colmatção de fracturas.	Baixa	Fechadas	Praticamente impermeável
SMD3	25,4		2,0 - 5,0	F <sub>2</sub> , F <sub>3</sub> , F <sub>4</sub> , F <sub>4-5</sub> , F <sub>5</sub>	< 1	Sem absorções	Muito baixa	Muito fechadas	Muito impermeável
			5,0 - 10,0	F <sub>2</sub> , F <sub>3</sub> , F <sub>4</sub> , F <sub>5</sub>	< 1	Abertura de fracturas sobre pressão.	Muito baixa	Muito fechadas	Muito impermeável
			10,0 - 15,0	F <sub>2</sub> , F <sub>3</sub> , F <sub>5</sub>	< 1	Sem absorções	Muito baixa	Muito fechadas	Muito impermeável
			15,0 - 20,0	F <sub>2</sub> , F <sub>3</sub> , F <sub>4</sub> , F <sub>4-5</sub>	< 1	Regime turbulento com preenchimento ou colmatção de fracturas.	Muito baixa	Muito fechadas	Muito impermeável
			20,0 - 25,4	F <sub>3</sub> , F <sub>4</sub> , F <sub>5</sub>	< 1	Regime laminar com lavagem ou desobstrução de fracturas.	Muito baixa	Muito fechadas	Muito impermeável
			2,0 - 5,0	F <sub>3</sub> , F <sub>4</sub> , F <sub>4-5</sub>	12	Regime laminar com lavagem ou desobstrução de fracturas.	Moderada	Algumas parcialmente abertas	Muito permeável
SMD4	20		5,0 - 10,0	F <sub>3</sub> , F <sub>4</sub> , F <sub>5</sub>	50	Regime laminar com lavagem ou desobstrução de fracturas.	Alta	Algumas abertas	Muito permeável
			10,0 - 15,0	F <sub>3</sub> , F <sub>4</sub> , F <sub>4-5</sub> , F <sub>5</sub>	3	Regime turbulento com preenchimento ou colmatção de fracturas.	Baixa	Fechadas	Praticamente impermeável
			15,0 - 20,0	F <sub>3</sub> , F <sub>4</sub> , F <sub>4-5</sub> , F <sub>5</sub>	2	Preenchimento de fissuras.	Baixa	Fechadas	Praticamente impermeável

Sond. nº	Prof (m)	Litologia	Ensaio de absorção de água tipo "Lugeon"						
			Trecho ensaiado (m)	Fracturação registada (F)	Absorção (Lu)	Comportamento do M.R. relativamente ao escoamento	Absorção do M.R.	Condições das descontinuidades do M.R.	Permeabilidade do M.R.
SMD5	30	Grés quartzítico	2,0 - 5,0	F <sub>4</sub> , F <sub>4-5</sub> , F <sub>5</sub>	163	Regime turbulento com lavagem ou desobstrução de fracturas.	Muito alta	Muito abertas e pouco espaçadas ou com vazios	Muito permeável
			5,0 - 10,0	F <sub>3</sub> , F <sub>4</sub> , F <sub>4-5</sub> , F <sub>5</sub>	2	Regime laminar com preenchimento ou colmatação de fracturas.	Baixa	Fechadas	Praticamente impermeável
			10,0 - 15,0	F <sub>3</sub> , F <sub>4</sub> , F <sub>5</sub>	2	Regime laminar com preenchimento ou colmatação de fracturas.	Baixa	Fechadas	Praticamente impermeável
			15,0 - 20,0	F <sub>3</sub> , F <sub>4</sub> , F <sub>5</sub>	1	Regime turbulento com preenchimento ou colmatação de fracturas.	Baixa	Fechadas	Praticamente impermeável
			20,0 - 25,0	F <sub>3</sub> , F <sub>4</sub> , F <sub>4-5</sub>	2	Preenchimento ou colmatação de fracturas.	Baixa	Fechadas	Praticamente impermeável
			25,0 - 30,0	F <sub>3</sub> , F <sub>4</sub> , F <sub>5</sub>	1	Regime laminar com preenchimento ou colmatação de fracturas.	Baixa	Fechadas	Praticamente impermeável
SC1	15	Grés quartzítico	2,0 - 5,0	F <sub>2</sub> , F <sub>3</sub> , F <sub>4</sub> , F <sub>5</sub>	< 1	Absorções reduzidas com abertura de fracturas sobre pressão.	Muito baixa	Muito fechadas	Muito impermeável
			5,0 - 10,0	F <sub>3</sub> , F <sub>4</sub> , F <sub>4-5</sub>	< 1	Absorções reduzidas com abertura de fracturas sobre pressão.	Muito baixa	Muito fechadas	Muito impermeável
			10,0 - 15,0	F <sub>3</sub> , F <sub>4</sub> , F <sub>4-5</sub> , F <sub>5</sub>	< 1	Absorções reduzidas com abertura de fracturas sobre pressão.	Muito baixa	Muito fechadas	Muito impermeável

Sond. nº	Prof (m)	Litologia	Ensaio de absorção de água tipo "Lugeon"						
			Trecho ensaiado (m)	Fracturação registrada (F)	Absorção (Lu)	Comportamento do M.R. relativamente ao escoamento	Absorção do M.R	Condições das descontinuidades do M.R.	Permeabilidade do M.R.
SC2	25	Grés quartzítico	2,0 - 5,0	F2, F3, F4, F4-5, F5	2	Regime laminar ou de Darcy com abertura de fracturas sobre pressão.	Baixa	Fechadas	Praticamente impermeável
			5,0 - 10,0	F3, F4, F4-5	< 1	Absorções reduzidas com abertura de fracturas sobre pressão.	Muito baixa	Muito fechadas	Muito impermeável
			10,0 - 15,0	F3, F4, F4-5, F5	< 1	Absorções reduzidas com abertura de fracturas sobre pressão.	Muito baixa	Muito fechadas	Muito impermeável
			15,0 - 20,0	F2, F3, F4, F4-5, F5	1	Absorções reduzidas com abertura de fracturas sobre pressão.	Baixa	Fechadas	Praticamente impermeável
			20,0 - 25,0	F2, F3, F4, F4-5	1	Regime turbulento ou de Chézy com lavagem ou desobstrução de fracturas.	Baixa	Fechadas	Praticamente impermeável
SC3	25		2,0 - 5,0	F3, F4, F4-5, F5	< 1	Absorções reduzidas com abertura de fracturas sobre pressão.	Muito baixa	Muito fechadas	Muito impermeável
			5,0 - 10,0	F3, F4, F4-5	< 1	Absorções reduzidas com abertura das fissuras sobre pressão.	Muito baixa	Muito fechadas	Muito impermeável
			10,0 - 15,0	F2, F3, F4	< 1	Absorções reduzidas com abertura das fissuras sobre pressão.	Muito baixa	Muito fechadas	Muito impermeável
			15,0 - 20,0	F2, F3, F4, F4-5	1	Regime laminar ou de Darcy com preenchimento ou colmatção de fracturas.	Baixa	Fechadas	Praticamente impermeável
			20,0 - 25,0	F3, F4, F4-5	1	Regime laminar ou de Darcy com preenchimento ou colmatção de fracturas.	Baixa	Fechadas	Praticamente impermeável
SC4	15	6,2 - 10,0	F4, F5	< 1	Absorções reduzidas com abertura das fissuras sobre pressão.	Muito baixa	Muito fechadas	Muito impermeável	
		10,0 - 15,0	F4, F4-5, F5	2	Regime anormal superior a Darcy, com abertura das fissuras sobre pressão.	Baixa	Fechadas	Praticamente impermeável	

Comportamento	Estado de pressão	Padrão dos valores de Lugeon	Descrição	Valor representativo
Laminar			Todos os valores são aproximadamente iguais.	O valor representativo do ensaio é a média dos valores de todos os patamares do ensaio, arredondando ao inteiro mais próximo
Turbulento			O valor mais baixo ocorre para a pressão mais alta	O valor representativo do ensaio é o valor de Lugeon mais baixo.
Abertura elástica			O valor mais alto ocorre para pressão mais alta.	O valor representativo do ensaio corresponde à média do par de pressões com os valores de Lugeon mais baixos.
Lavagem			Há uma tendência crescente dos valores de Lugeon.	O valor representativo do ensaio é o valor de Lugeon mais elevado.
Colmatação			Há uma tendência decrescente dos valores de Lugeon	O valor representativo corresponde ao valor de Lugeon mais reduzido.

Análise do ensaio de absorção de água do tipo Lugeon (Adaptado de [25])

