



UNIVERSIDADE AGOSTINHO NETO
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE MINAS



TRABALHO DO FINAL DO CURSO PARA O GRAU DE LICENCIATURA

**CONSTRUÇÃO SUBTERRÂNEA DE UMA ESCAVAÇÃO PARA O TRANSPORTE
E MANUTENÇÃO NA OBRA DA BARRAGEM DE LAÚCA**

Estudante: Adriano Bernardo Neves - Nº 108811

Orientadora: Yuneisy Gularte Matos; PhD.

Co-Orientador: António Manuel Pedro Alexandre; PhD.

LUANDA 2021/2022



UNIVERSIDADE AGOSTINHO NETO
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE MINAS



TRABALHO DO FINAL DO CURSO PARA O GRAU DE LICENCIATURA

**CONSTRUÇÃO SUBTERRÂNEA DE UMA ESCAVAÇÃO PARA O TRANSPORTE
E MANUTENÇÃO NA OBRA DA BARRAGEM DE LAÚCA**

Estudante: Adriano Bernardo Neves - Nº 108811

Orientadora: Yuneisy Gularte Matos; PhD.

Co-Orientador: António Manuel Pedro Alexandre; PhD.

Tese apresentada para o grau de Licenciatura em Engenharia Mina, do Departamento de Minas da Faculdade de Engenharia da Universidade Agostinho Neto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Licenciado em Engenharia Mina

LUANDA 2021/2022

AGRADECIMENTO

Agradeço a Deus todo-poderoso, ao Pai Mayamona e ao Mister Arcanjo pela força e capacidade que me concedem dia pós dia. Agradeço aos meus pais, a minha noiva e aos meus irmãos pelo amor incondicional e por serem a minha base. Agradeço aos meus Professores pelos ensinamentos, em particular a Dr. Yuneisy Matos pela compreensão, orientação e toda a ajuda na construção desse trabalho. Finalmente agradeço a todos os meus colegas e amigos.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos os
estudantes do curso de Minas.

RESUMO

Uma obra subterrânea distingue-se pela importância que o maciço envolvente assume no seu comportamento e, conseqüentemente, no dimensionamento estrutural. Este trabalho terá como principais objectivos ilustrar a importância da caracterização geomecânica da área da obra do Laúca e a avaliação comportamental do maciço envolvente e conseqüentemente a selecção da forma de secção transversal da escavação para um dimensionamento adequado para manutenção e transporte dos equipamentos e quer o transporte do pessoal. A importância da obra subterrânea depende fundamentalmente das suas dimensões, das coberturas, da envolvente superficial da obra e das características geológico-geotécnicas dos terrenos em que esta está inserida. O presente trabalho aborda os aspectos geotécnicos e dimensionais da escavação das obras subterrâneas do aproveitamento hidroeléctrico de Laúca, localizado a Sul da província do Kwanza Norte, em Angola. Este que é caracterizado por uma barragem de gravidade em betão compactado com 132 m de altura máxima e um circuito hidráulico totalmente subterrâneo. Entre as obras subterrâneas de maior envergadura destaca-se a central principal que alberga seis grupos Francis de 344 MW cada, localizada numa caverna de grandes dimensões. Os túneis de acesso, seis no total, um para cada grupo gerador, têm uma secção de cerca de 139 m², sendo, em geral, revestidos com betão projectado.

Palavras-chave: construção subterrânea, escavação e dimensionamento.

ABSTRAT

An underground work is distinguished by the importance that the surrounding massif assumes in its behaviour and, consequently, in the structural design. This work will have as main objectives to illustrate the importance of the geomechanical characterization of the Laúca work area and behavioral evaluation of the surrounding massif and consequently the selection of the cross-section shape of the excavation for an adequate dimensioning for the transport of personnel, equipment and maintenance either equipment, system, etc. the importance of the underground work fundamentally depends on its dimensions, the coverings, the surface environment of the work and the geological-geotechnical characteristics of the land in which it is located. The present work deals with the geotechnical and dimensional aspects of the excavation of the underground works of the hydroelectric plant of Laúca, located in the south of the province of Kwanza Norte, in Angola. This is characterized by a compacted concrete gravity dam with a maximum height of 132 m and a fully underground hydraulic circuit. Among the largest underground works, the main power station which houses six Francis groups of 344 MW each generator set, have a section of about 102 m² and are generally lined with shotcrete except in fault areas where the coating is in molded concrete.

Keywords: underground, excavation and sizing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Usina Hidroelétrica Típica (PCH, Paracambi, 2019)	5
Figura 2	Vertedouro com comportas e em tulipa (UHE, TAKATO DAN, 2019 e MONTICELLO, 2019)	7
Figura 3	Representação 3D da barragem de Ribeiraldo	8
Figura 4	Representação 3D da barragem de Ermida	8
Figura 5	Escavadeira em túnel de teste em Heathrow (Jersey City, USA, 2002)	11
Figura 6	Túnel da auto-estrada A27-Ponte de Lima a) A execução da perfuração com Jumbo, b) O carregamento dos explosivos nos furos, c) A detonação da pega de fogo, d) A remoção do escombro	15
Figura 7	Procedimento para cálculo do RQD (DEERE, 1989).	18
Figura 8	Figura 8 – Explosivo tipo granulado Anfomax (BRITANITE, 2012).	28
Figura 9	Figura 9 – Dinamite tipo 1"X24"	29
Figura 10	Extracto do Mapa de localização do empreendimento (Odebrecht 2012)	31
Figura 11	Vista da encosta da margem direita	32
Figura 12	Aspecto da escosta na área da central principal	33
Figura 13	Extracto do Mapa Geológico do AH-Laúca (Intertechene 2014)	34
Figura 14	Extracto do Mapa do Enquadramento Geológico Regional (escala 1:1.000.000, Pereira et al., 2013)	36
Figura 15	Extracto da carta geológica de Angola na escala 1/1.000.000 (Araujo e Guimarães, coord 1992)	37
Figura 16	Esquema interpretativo das diferentes litologias mapeadas entre as elevações aproximadas 825 a 740m	38
Figura 17	Desvio do Rio (Intertechene 2013)	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Classe do maciço rochoso segundo a classificação RMR (BIENIAWSKI,1989)	19
Tabela 2	Significado prático das classes de maciço (BIENIAWSKI,1989)	20
Tabela 3	Qualidade do Maciço Rochoso	22-23
Tabela 4	Tipos de aberturas em minas subterrâneas e outras actividades.	26
Tabela 5	Leitura dos medidores do Nível de água	39
Tabela 6	Resultado das propriedades Físicas do Gnaisse (Arquivo Técnico de Laúca, 2012)	42
Tabela 7	Equipamentos de Carga e Transporte	45-46

LISTA DE NOTAÇÕES, SIMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

A	largura do caminhão
AH	aproveitamento Hidroeléctrico
AHL	aproveitamentohidroeléctrico da Laúca
B	largura da escavação fortificada
Bp	largura do projecto
C	Carbono
CHO	Nacrônimo memônico
Cl	Cloro
ClO3	Clorato
ClO4	Perclorato
CT	capacidade de trabalho
Ct	capacidade de trabalho de padrão SE amonite
d_{cop}	distância entre os furos pelo piso
d_{col}	distância entre os furos na lateral
d_{cot}	distância entre os furos no tecto
Dc	diâmetro do cartucho
E	coeficiente que relaciona a capacidade de trabalho
F	fortaleza da rocha segundo Protodiakonov
Fo	coeficiente de fricção entre o aço e a rocha
Fc	capacidade portadora dos pernos
Gv	despesas de SE por metro cúbico de rocha a arrancar
H	Hidrogénio
HMX	octogeno (ciclotetrametileno-tetranitramina)
H μ	profundidade por meio a penetração do perno
HI	altura da parede de escavação
Hb	altura da abobada da escavação
Hu	altura da escavação
Hp	altura da parede util da escavação
Jn	número de famílias de descontinuidades
Jr	índice de rugosidade das descontinuidades
Já	índice de alteração das descontinuidades
Jw	factor de redução de presença de água
K	coeficiente que depende do tipo de rocha
Km ²	kilómetros quadrados
Kw	Kilowatt
M	coeficiente de reserva
Mw	Megawatts
N	espaço para a passagem do pessoal
Nc	número de cartuchos (corte)
Na	número de cartuchos (arranque)

Nco	número de cartuchos (contorno)
N	número de furos
Ncol	número de furos de contorno lateral
Ncot	número de furos através do telhado
Ndl	despesas de detonadores por metro de avanço
Ndv	despesas de detonadores por metro cubicos de rochas a arrancar
Nc	furos de corte
Na	furos de arranque
Nco	furos de contorno
NGI	Norwegian Geological Institute
N	Nitrogénio
La	longitude dos parafusos
l_1	parte do parafuso saliente na escavação
l_2	espessura da capa da rocha fracturada
l_3	longitude do fechamento
O	Oxigénio
P	espaço entre as vias
P	Peso
P´	Profundidade
Pe	Perimetro
PCH	pequena central hidroeléctrica
Q	custo de substância
q_o	grau de fragmentação da rocha
q_a	massa de carga dos furos de arranque
q_c	massa de carga dos furos de corte
q_{co}	massa de carga dos furos de contorno
q_m	massa média da carga no grupo
Q	gasto de SE por ciclo
Q_r	despesas reais de materia explosiva
r	raio lateral
R	raio central da abobada
R_f	resistência de fixação fechamento
RMR	Rock Mass Rating
RQD	Rock Quality Designation
RDX	ciclonita (ciclotrimetilenotrinitramina)
R_{cis}	resistência a cisalhamento
R_c	resistência a compressão
SP	área da secção transversal
SE	substância Explosivo
S_u	área útil da escvação
S_p	área do projecto
S_c	área de contacto do perno da rocha
SRF	estado de tensão no maciço rochoso

SR	Sondagem Rotativa
TNT	Trinitrotolueno
V_r	metro cúbicos de rochas a arrancar no maciço
V_{rc}	despesas do material de enchimento
Wi	Somatório dos 5 parâmetros relativos ao maciço rochoso
γ	taxa de ocupação dos buracos
γ_e	coeficiente de enchimentos
ρ	densidade da substância explosivas nos cartuchos
σ_R	limite de resistência da rocha
σ_c	resistência a campo

Índice

INTRODUÇÃO	1
Tema.....	2
Problema.....	2
Objecto de estudo	2
Objectivo	2
Objectivo geral.....	2
Objectivos específicos.....	2
Hipótese	2
Justificativa.....	3
Metodologia Científica.....	3
CAPITULO I: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
1.1. Generalidades sobre centrais hidroelectricas.....	4
1.2. Conceitos e definições.....	6
1.3. Classificação das centrais hidroelectricas.....	9
1.3.1.Vantagens e desvantagens de uma central.....	10
1.4. Generalidade sobre escavação subterrânea.....	10
1.4.1.Tipos de Escavações e suas Aplicações.....	12
1.4.2. Métodos de Escavações Subterrâneas.....	14
1.4.3.Vantagens e Desvantagens das Escavações Subterrâneas.....	15
1.5. Caracterização e classificação geomecânica do maciço.....	16
1.5.1.Caracterização geomecânica.....	16
1.5.2.Classificação Geomecânica.....	17
1.6. Dimensionamento de uma escavação subterrânea	23
1.6.1. Dimensionamento de reforço utilizando RQD.....	24
1.6.2. Dimensionamento de reforço, segundo RMR.....	25
1.6.3. Dimensionamento de suporte/reforço, segundo Q- BARTON	25
1.7.Desmonte de rochas com explosivos	26
1.7.1. Classificação dos explosivos	27
1.7.2. Tipos de Explosivos e acessórios.....	28
CAPITULO II – CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	31
2.1. Localização da área de estudo do AH-Laúca	31
2.1.1. Aspectos Geográficos do Local.....	32

2.1.2. Caracterização geológica e geomorfológica.....	33
2.1.3. Caracterização Geológica Regional do AH-Laúca	35
2.1.4. Lito-estratigrafia e Litologia da AH- Laúca.....	38
2.1.5. Caracterização do maciço rochoso de AH-Laúca.....	41
2.1.6. Propriedades Físicas do Maciço Rochoso	43
CAPITULO III – ANALISES E RESULTADOS	44
3.1. Avaliação geomecânica do maciço rochoso da área de estudo.....	44
3.2. Seleção e dimensionamento da secção transversal do túnel de acesso.....	45
3.3.1. Ciclo de Escavação	46
3.3.2. Dimensionamento da escavação	47
3.3.3.Cálculo dos parâmetros da fragmentação de rocha com explosivo.	51
3.4. Sustimento ou fortificação das escavações.....	60
3.4.1. Cálculo da fortificação	61
CONCLUSÃO.....	64
CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	66
Anexos.....	67

1. INTRODUÇÃO

O aproveitamento hidroelétrico de Laúca localiza-se a Sul da província do Kwanza Norte, em Angola. Irá acrescentar 2070 MW à potência instalada no país. Consta de uma barragem de gravidade em betão compactado com cilindro, com 132 m de altura máxima e um circuito hidráulico totalmente subterrâneo, composto por uma tomada de água com seis poços circulares, seis túneis de adução com comprimento médio de cerca de 1900 m cada um e uma central principal subterrânea, projectada para seis grupos geradores. Para além do circuito hidráulico principal. O dimensionamento de escavações subterrâneas foi por muitos anos considerado muito complexo, mantendo-se como arte empírica, repetindo técnicas que tinham obtido êxitos em condições similares no passado. Esta similaridade basea-se em vários sistemas de classificação geotécnica: sistema RMR, de Bieniaeski, proposto em 1973; sistema Q de Barton et al. (1974) etc.

O presente trabalho aborda os aspectos geotécnicos da escavação e estabilização das obras subterrâneas, o dimensionamento da secção transversal dos túneis de acesso que é o principal objectivo do estudo, observação dos parâmetros necessário para a construção da escavação subterrânea (túnel) para o transporte e manutenção.

2. Tema

Construção subterrânea de uma escavação para o transporte e manutenção da barragem de Laúca.

3. Problema

Necessidade do Projecto de Construção para escavação subterrânea em Laúca para o transporte e manutenção da obra.

4. Objecto de estudo

Maciço rochoso da Barragem do Laúca.

5. Objectivo

5.1. Objectivo geral

Construir uma uma escavação subterrânea para transporte e manutenção da barragem de Laúca.

5.2. Objectivos específicos

- ✓ Caracterizar a área de estudo;
- ✓ Avaliar o comportamento geomecânico do maciço rochoso;
- ✓ Seleccionar a formada sessão transversal da escavação;
- ✓ Dimensionar a escavação subterrânea para o transporte e manutenção na obra de Laúca.

6. Hipótese

Com o levantamento geomecânica da obra e a caracterização do objecto (maciço) é possível fazer uma avaliação detalhada da descontinuidade e observar a qualidade do maciço com base no conhecimento das propriedades físicas-mecânicas das rochas e assim pode-se definir a forma da sessão transversal da escavação a projectar e dimensionar a mesma em dependência dos equipamentos a utilizar na obra de Laúca.

7. Justificativa

O processo de uma escavação subterrânea, tem como um dos principais objectivos o acesso a frente de trabalho ou a instalação de um determinado equipamento. O transporte e a manutenção são factores importante no dimensionamento de uma escavação subterrânea. E para abrimos uma cavidade é necessário conhecer as características geomecânica do maciço, o estudo de classificação das rochas são factores de extrema importância para que o trabalho de dimensionamento seja feito com eficiência, por isso a necessidade do projecto de construção para uma escavação subterrânea da Barragem do Laúca.

8. Metodologia Científica

Descreve-se a metodologia utilizada, comportando as fases de coleta e análise dos dados existentes e procedimentos adoptados para a análise global dos resultados. O presente trabalho esta fundamentado em artigos, livros, entrevistas feitas a profissionais na área e teses publicados. O estudo começa com a necessidade cada vez de fazer se um trabalho preliminar de uma escavação para o transporte e manutenção na obra subterrânea da barragem de Laúca. Diante dessa demanda e complexidade do tema foi realizado uma fundamentação teórica, onde abordamos de maneira resumida alguns estudos pertinentes ao presente trabalho descritos nos capítulos abaixo. Para o desenvolvimento dos trabalhos são utilizados dados provenientes de pesquisa bibliográfica e coleta de dados da barragem do Laúca. Segue um resumo das etapas que são desenvolvidas.

- ✓ Pesquisa bibliográfica referente ao estudo (Revisão de modelos matemáticos científicos);
- ✓ Coletas de dados utilizando equipamentos específicos para medição (ou fórmulas empíricas para estimação/determinação)
- ✓ Caracterização do maciço rochoso, observando o tipo de rocha;
- ✓ Análise e interpretação de resultados;

CAPITULO I: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1.1. GENERALIDADES SOBRE CENTRAIS HIDROELECTRICAS

A primeira central hidroelectrica do mundo foi construída no final do século XIX – quando o carvão era o principal combustível e as pesquisas sobre petróleo ainda engatinhavam – junto às quedas d’água das Cataratas do Niágara. Até então, a energia hidráulica da região tinha sido utilizada apenas para a produção de energia mecânica. Para produzir a energia hidroelectrica é necessário integrar a vazão do rio, a quantidade de água disponível em determinado período de tempo e os desníveis do relevo, sejam eles naturais, como as quedas d’água, ou criados artificialmente. Já a estrutura da usina é composta, basicamente, por barragem, sistema de captação e adução de água, casa de força e vertedouro, que funcionam em conjunto e de maneira integrada. A barragem tem por objetivo interromper o curso normal do rio e permitir a formação do reservatório. Além de “estocar” a água, esses reservatórios têm outras funções:

- ✓ permitem a formação do desnível necessário para a configuração da energia hidráulica;
- ✓ a captação da água em volume adequado e a regularização da vazão dos rios em períodos de chuva ou estiagem.

Algumas centrais hidroeléctricas são chamadas “a fio d’água”, ou seja, próximas à superfície e utilizam turbinas que aproveitam a velocidade do rio para gerar energia. Essa usina fia d’água reduz as áreas de alagamento e não formam reservatórios para estocar a água ou seja, a ausência de reservatório diminui a capacidade de armazenamento de água, única maneira de poupar energia elétrica para os períodos de seca. Os sistemas de captação e adução são formados por túneis, canais ou condutos metálicos que têm a função de levar a água até a casa de força. É nesta instalação que estão as turbinas, formadas por uma série de pás ligadas a um eixo conectado ao gerador. Durante o seu movimento giratório, as turbinas convertem a energia cinética (do movimento da água) em energia elétrica por meio dos geradores que produzirão a eletricidade. Depois de passar pela turbina, a água é restituída ao leito natural do rio pelo canal de fuga. Os principais tipos de turbinas hidráulicas são:

Pelton, Kaplan, Francis e Bulbo. Cada turbina é adaptada para funcionar em usinas com determinada faixa de altura de queda e vazão. A turbina tipo Bulbo é usada nas usinas fio d'água por ser indicada para baixas quedas e altas vazões, não exigindo grandes reservatórios. Por último, há o vertedouro. Sua função é permitir a saída da água sempre que os níveis do reservatório ultrapassam os limites recomendados. Uma das razões para a sua abertura é o excesso de vazão ou de chuva. Outra é a existência de água em quantidade maior que é necessária para o armazenamento ou a geração de energia. Em períodos de chuva, o processo de abertura de vertedouros busca evitar enchentes na região de entorno da usina.

Define - se central hidroeléctrica como sendo um conjunto de obras e equipamentos cuja finalidade é a geração de energia eléctrica através de aproveitamento do potencial hidráulico existente em um rio. O potencial hidráulico é proporcionado pela vazão hidráulica e concentração dos desníveis existentes ao longo do rio (ELETROBRÁS, 2019).

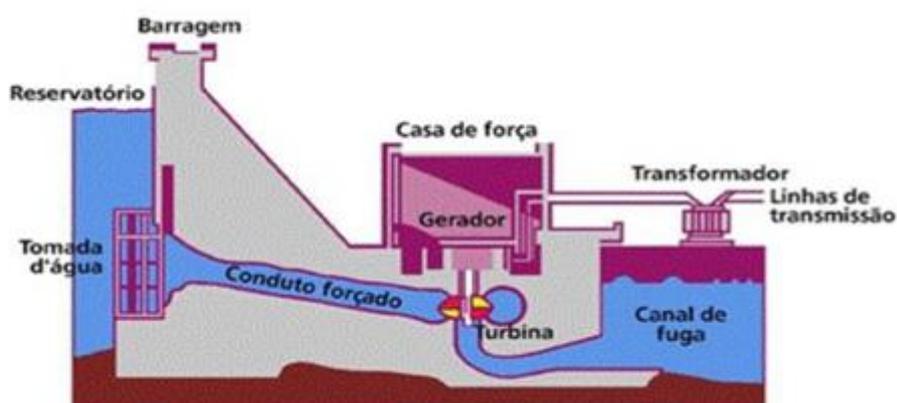


Figura 1 - composição de uma central hidroeléctrica
Fonte: (PCH Paracambi,2019)

1.2. CONCEITOS E DEFINIÇÕES

É a energia que vem do movimento das águas, usando o potencial hidráulico de um rio de níveis naturais, queda d'água ou artificiais. Essa energia é a segunda maior fonte de eletricidade do mundo. Frequentemente constroem-se represas que reprimem o curso da água, fazendo com que ela se acumule em um reservatório denominado barragem. Toda a energia elétrica gerada dessa maneira é levada por cabos, dos terminais do gerador até o transformador elevador. A energia hidroeléctrica apresenta certos problemas, como consequências socioambientais de alagamentos de grandes áreas.

O termo hidroeléctrico(a) qualifica aquilo que pertence ou que é relativo á hidro electricidade. Este termo esta relacionado com a electricidade obtida através da energia hidráulica, que é o tipo de energia gerada pelo movimento da água.

A energia hidráulica ou hídrica, por conseguinte, aproveita a energia cinética e potencial das quedas de água, dos mares e das correntes de água, no âmbito das energias renováveis, uma vez que não se esgotam com o uso. Dá-se o nome de central hidroeléctrica a qualquer infra- estrutura que utiliza a energia hidráulica para produzir energia eléctrica.

Barragem é uma barreira artificial, feita em cursos de água para a retenção de grandes quantidades de água.É um elemento estrutural, construído de forma transversal à direção de escoamento do curso d'água. Tem como principais objetivos armazenar energia potencial para o aproveitamento hidreléctrico, regularizar as vazões, além do controle de inundações, abastecimento doméstico e irrigação. É o ponto inicial da produção de energia eléctrica.

Barramentos referem-se as superfícies mais ou menos verticais que limitam o corpo da barragem: o barramento de montante, em contacto com a água, e o barramento de jusante.Descarregador de fundo é um órgão hidráulico para esvaziamento da albufeira ou manutenção do caudal ecológico a jusante da barragem.

Comportas - órgão hidráulico que regula a entrada e saída de água entre a montante e a jusante da barragem e permite à navegação fluvial vencer o desnível imposto pela barragem.



Figura 2 - Vertedouro com comportas e em Tulipa
Fonte: (UHE TAKATO DAN, 2019 E MONTICELLO)

Entende-se por Tomadas d'água, as estruturas hidráulicas projectadas para retirar água de cursos d'água (rios, canais), lagos ou reservatórios. A sua finalidade é de captar e conduzir a água aos órgãos adutores, regular a vazão e impedir a entrada de corpos flutuantes indesejáveis.

A captação deve ser feita dentro de certos padrões de qualidade, que dependendo do tipo de aproveitamento podem ser destinadas a: Irrigação, Abastecimento público, geração de energia, navegação, recreação, preservação da fauna e flora, diluição de esgoto.

Bate choco: é a actividade realizada após as detonações para retirada do material rochoso que não desagregou com a detonação.

Blaster ou encarregado de fogo: é o profissional habilitado e competente para executar a actividade e as operações com explosivos.

Cambota: são utilizados como sistema de suporte em túneis. As cambotas são constituídas por elementos metálicos, construídos em seguimentos aparafusados ou soldados de forma a se amoldarem às paredes da escavação. Apresentam geralmente o formato de um arco, acompanhando a abóbada do túnel e as paredes.

Concreto projectado: é uma mistura porosa de água, cimento e areia, podendo conter aditivos, projectada com um jato de alta velocidade, por bombas especiais, formando uma camada de concreto sobre a superfície.



Figura 3 – Representação 3D da barragem de Ribeirão
(Fonte: EDP)

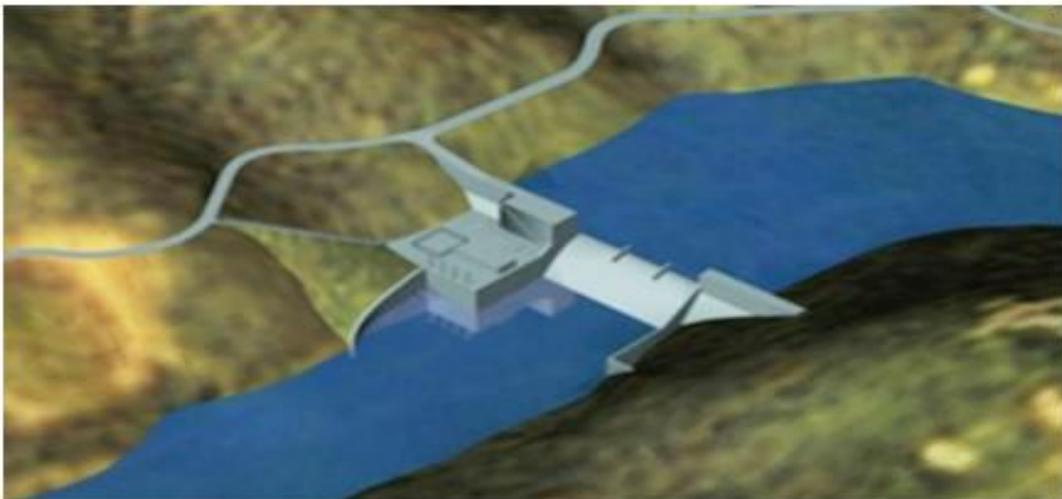


Figura 4 – Representação 3D da barragem de Ermida
(Fonte: EDP)

1.3. CLASSIFICAÇÃO DAS CENTRAIS HIDROELECTRICAS

Mais recentemente, através da Resolução Normativa Nº 673, a ANEEL modificou o limite inferior da potência de uma PCH, passando de 1.000 kW para 3.000kW, como descrito abaixo, (ANEEL, 2015):

Serão considerados empreendimentos com características de PCH aqueles destinados a autoprodução ou produção independente de energia eléctrica, cuja potência seja superior a 3.000 kW e igual ou inferior a 30.000 kW e com área de reservatório de até 13 km², excluindo a calha do leito regular do rio.

Alguns factores importantes classificam as usinas, são eles:

Quanto ao uso das vazões naturais (PEREIRA, 2015):

Centrais a fio d'água: são usinas sem reservatórios de regularização, cujo nível de água operativo não varia ou varia muito pouco.

Centrais de acumulação: são usinas com reservatório de acumulação e regularização, cujos níveis de água operativos variam bastante em função dos períodos de seca e de estiagem.

Centrais reversíveis: são usinas com mais de um reservatório, onde a água é bombeada para o reservatório mais elevado nas horas de menor demanda para utilização nas horas de pico.

Quanto à potência (ANEEL, 2008):

Centrais Geradoras Hidrelétricas: aproveitamentos com até 3 MW de potência instalada.

Pequenas Centrais Hidrelétricas: aproveitamentos com potência instalada entre 3,1 MW e 30 MW.

Usina Hidrelétrica de Energia: aproveitamentos com mais de 30 MW de potência instalada.

Quanto à altura de queda d'água (COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS, 2016):

Baixa altura de queda: alturas de queda inferiores a 15 metros.

Média altura de queda: alturas de quedas entre 15 metros e 150 metros.

Alta altura de queda: alturas de queda superiores a 150 metros.

1.3.1. *Vantagens e desvantagens de uma central*

- ✓ A parte estética. Onde cabos, postes e transformadores são enterrados e a aparência da rua fica muito melhor, além disso; a parte da manutenção diminui sensivelmente, pois os equipamentos são de grande durabilidade.
- ✓ a parte operacional e é mais interessante do que o sistema aéreo, porque é toda automatizada.
- ✓ com relação a segurança das pessoas. Para região com um alto índice de colisão de veículos em postes, neste caso, esses acidentes não aconteceriam mais, o que traria uma segurança muito maior às pessoas.

Desvantagem

- ✓ ponto de vista viável, a única desvantagem do sistema de centrais de aproveitamento subterrâneo, seria o alto custo de instalação e de equipamentos. Ele é em média três vezes mais caro do que uma rede aérea.

1.4. *GENERALIDADE SOBRE ESCAVAÇÃO SUBTERRÂNEA*

Os túneis, galerias, cavernas e poços vêm cada vez mais adquirindo importância, tanto em minas quanto nas áreas urbanas de obras civis. Com o passar do tempo, a partir do ambiente das minas subterrâneas, deu-se início à evolução de técnicas de vários métodos de escavações. Apesar dos custos associados a esses métodos serem elevados devido à complexidade técnica das estruturas, as vantagens são inúmeras. De acordo com Bastos (1998): Os túneis subterrâneos possuem diversas finalidades tais como: vias de comunicação (estradas, caminhos de ferro, passagens pedonais); vias de condução hidráulica (adutores de água, de saneamento, de gás,

aproveitamentos hidroelétricos); galerias mineiras; acessos a instalações subterrâneas militares; depósitos de carburantes; armazenamento de resíduos; etc.

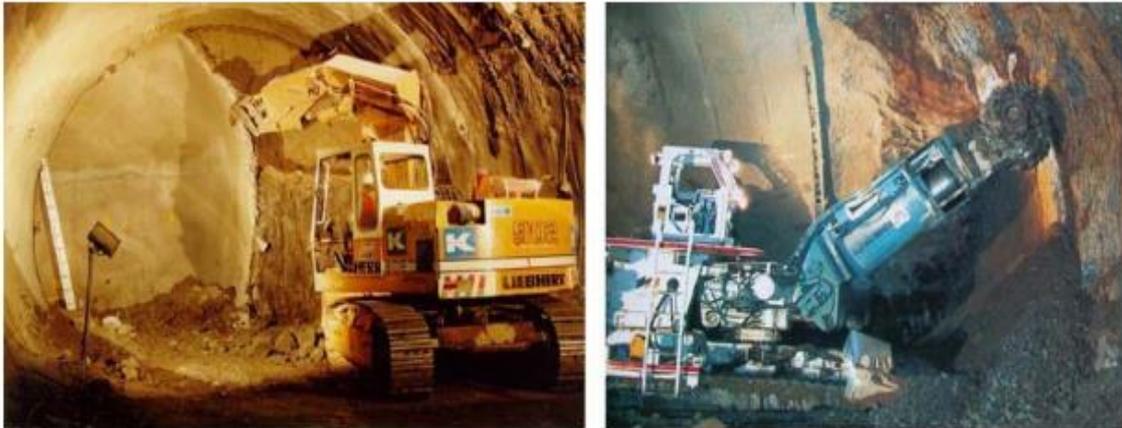


Figura 5: Escavadeira em Túnel de Teste em Heathrow - London, UK 1994
Escavação com Fresa na Estação Subterrânea - Jersey City, NJ 2002

Existe uma dicotomia na execução de túneis civis e escavações de uso da lavra subterrânea. A abertura de túneis pode ser vista como um desenvolvimento de face simples, que permanece com uso em longa duração e, na maior parte das vezes, com alto investimento de sustentação (contenção). Já a mineração envolve geralmente múltiplas aberturas, que se mantêm abertas por um período de tempo relativamente mais curto, em que o engenheiro de minas realiza a proteção durante a escavação e controla deformações no maciço rochoso.

As fases finais de planejamento e execução de túnel ou galeria são elaboradas basicamente a partir das fases iniciais de reconhecimento preliminar, prospecção e caracterização geológico-geotécnica dos terrenos, a fim de, prever as soluções mais viáveis e facilitar na tomada de decisão ao definir qual método mais adequado de construção nas condições existentes. São serviços indispensáveis nas mais diferentes áreas quer na mineração, civil etc. desde a construção de edifícios. no caso de subsolos enterrados, construção de barragens e abertura de cavidades.

Assim, as escavações são executadas em obras como: edifícios, adutoras d'água, coletores de esgoto, metros, rodovias e ferrovias, aeroportos, canais, barragens, aterros sanitários, etc. Fica claro que devemos estudar os serviços de escavação em

função dos aspectos técnicos neles envolvidos, e não pelo porte ou tipo da obra a que se destinam.

Denomina-se escavações ou desmonte de rochas ao conjunto de metodologias, técnicas de escavação mecânica ou com o auxílio de explosivos, instrumentações e serviços auxiliares necessários para escavar, desmontar, fragmentar ou cortar maciços e blocos rochosos, atendendo a projectos de obras civis ou minérios para fins industriais. A escavação é tida/ definida como um conjunto de processos envolvidos e interligados que consistem na remoção de terra em torno de uma determinada área, neste caso, a área a ser escavada. A mesma consiste em um conjunto de tarefas destinadas a confecção de túneis, e minas subterrâneas.

Existem alguns factores que influenciam directamente na aplicação do método de desmonte, estes factores podem ser:

- ✓ a forma;
- ✓ o tamanho;
- ✓ a regularidade;
- ✓ os custos (disponibilidade financeira);
- ✓ as características físicas entre outros.

1.4.1. *Tipos de Escavações e suas Aplicações*

Existem 3 tipos de escavações, que são distinguidas por:

- ✓ Escavação a céu aberto;
- ✓ Escavação subterrânea;
- ✓ Escavação Subaquática

Escavação a céu aberto - é aquela em que os trabalhos de escavações são realizados em contacto com a superfície (ar livre). É aplicada em Desmonte em bancadas e de blocos, aberturas de cortes e trincheiras em rochas e abertura de cavas de fundação.

Escavação subterrânea - é aquela em que os trabalhos são realizados em contacto com o maciço rochoso, ou seja rodeado pelos terrenos do subsolo. A mesma aplica-se para abertura de galerias, túneis, cavernas, poços verticais. Este tipo de escavação é o foco deste trabalho.

No caso de um túnel, o objectivo principal é criar um vazio na escavação. Contudo, também tem de estar sempre presente que a operação de desmonte está intimamente interligada com as operações a jusante que dependem do método de escavação tais como a operação de remoção do escombros, o dimensionamento e instalação de suportes (primários e secundários), as actividades acessórias (ventilação, drenagem, iluminação) e com as condições de segurança e higiene no trabalho. O faseamento e a velocidade de avanço estão intimamente ligadas aos tipos de suporte aplicados, pelo que condiciona o ciclo de desmonte. A escavação de túneis recorre a métodos distintos em função da tipologia dos terrenos atravessados pelo traçado da obra. Em maciços brandos aplica-se escavação mecanizada, e em maciços rochosos competentes é utilizada a técnica dos explosivos. Para definir o método adequado de desmonte do maciço recorre-se aos critérios de escavabilidade existentes e definidos por vários autores.

Escavação Subaquática -é aplicada em derrocagens para aumento de calado em portos, passagem de dutos sob leito de rios, remoção de ensecadeiras.

De acordo com a nossa base de investigação abordaremos apenas sobre as escavações subterrâneas. Segundo Geraldi (2011), nas décadas de 1960 surgiram as modernas metodologias para escavação subterrânea e tratamento do maciço rochoso, baseados em novas teorias, conceitos e parâmetros geológicos-geotécnicos. As novas metodologias se baseiam na preservação e na manutenção da estabilidade dos maciços em escavação, através da aplicação imediata de tratamentos e revestimentos primários, promovendo a maior segurança para as escavações em andamento e, conseqüentemente, uma maior produtividade nas frentes de trabalho.

1.4.2. Métodos de Escavações Subterrâneas

Método de escavação é definido como o conjunto de processos utilizados para proceder a uma determinada operação subterrânea no maciço rochoso. O método de escavação em materiais duros (Rochas) pode ser classificados como:

✓ Método Tradicional

Para túneis escavados em rochas, a não ser nos casos daqueles extremamente curtos (cerca de 200m de comprimento), são normalmente estabelecidas, para a construção, duas ou mais frentes de escavação. Genericamente, as seguintes operações são necessárias:

- a) Perfuração da frente de escavação com martelotes;
- b) Carregamento da frente de escavação com martelotes;
- c) Detonação dos explosivos;
- d) Ventilação e remoção dos detritos e da poeira;
- e) Remoção da água de infiltração, se necessário;
- f) Colocação do escoramento para o teto e paredes laterais, se necessário;
- g) Colocação do revestimento, se necessário.

Segundo os tópicos em Geotecnia e Obras de Terra Prof. M. Marangon (2009), as operações (a, b, c, d) se referem ao avanço do túnel.

✓ Métodos de Avanço

- a) Túneis desenvolvidos em rochas podem apresentar diferentes métodos de avanço, sendo os mais comuns;
- b) Escavação Total, onde toda a frente é perfurada e dinamitada. Túneis pequenos, cerca de 3m de diâmetro, são assim escavados, embora os de maiores diâmetros também o possam ser;
- c) Escavação por Galeria Frontal e Bancada, esse método envolve o avanço da parte superior do túnel, sempre adiante da parte inferior;
- d) Escavação com Galerias;

- e) Em túneis bastante largos, pode ser vantajoso desenvolver um túnel menor, chamado galeria, antes da escavação total da frente. De acordo com sua posição, a galeria é chamada de galeria principal, galeria de auxílio, galerias de fuga.

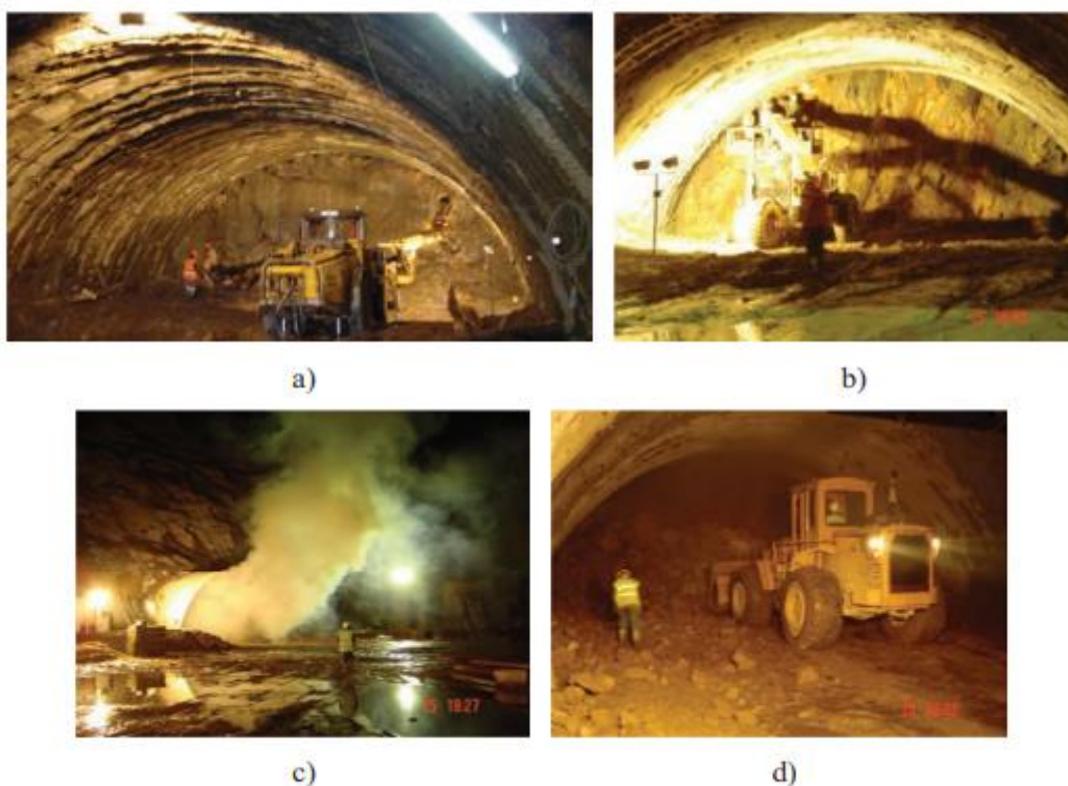


Figura 6 – Túnel da auto-estrada A27-Ponte de Lima a) A execução da perfuração com Jumbo, b) O carregamento dos explosivos nos furos, c) A detonação da pega de fogo, d) A remoção do escombro

1.4.3. *Vantagens e Desvantagens das Escavações Subterrâneas*

As obras da fiação eléctrica subterrânea trouxeram diversos benefícios á sociedade. Actualmente já existe lugares que funcionam neste novo modelo, sem postes e fiação aérea, das quais apresentam vantagens consideráveis. De acordo com Jânio Canela (2018), engenheiro e gerente da divisão técnica de Celes, existem mais benefícios do que desvantagens nessa técnica.

✓ Vantagens

- a) Independência das condições climáticas;
- b) Pequenos volumes de material removido;
- c) Pouca afectação ao meio ambiente

✓ Desvantagem

- a) Menor segurança, pelo facto de estar a trabalhar no subsolo e possível risco de desabamento.

1.5. CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA DO MACIÇO.

1.5.1. Caracterização geomecânica

A caracterização geomecânica é uma etapa importante em projectos de engenharia que envolvam escavações de rochas, tanto a céu aberto, quanto subterrânea, e visa principalmente garantir a segurança das actividades através da aplicação de metodologias para definição do grau de qualidade do maciço rochoso, que por sua vez, dará subsídios para definição das metodologias de escavação, dimensões, estruturas de suporte e contenção (ZINGANO, 2002).

A caracterização geomecânica tem papel de destaque entre as fases de um projecto, pois é determinante desde a concepção até o monitoramento, já com a obra construída, para verificação e possíveis ajustes nos elementos do túnel. Com base nela é possível definir o perfil do subsolo. Determinar as propriedades e características do maciço rochoso, definir condições hidrogeológicas, identificar riscos, etc.

As propriedades mecânicas do maciço rochoso são diferentes das propriedades mecânicas da rocha intacta que constitui o próprio maciço rochoso, pois o mesmo pode ser definido como um meio heterogéneo e descontínuo, formado por diferentes litologias e cortado por descontinuidades. A resistência mecânica do maciço rochoso é menor que a resistência da rocha intacta. A rocha intacta é uma porção da rocha desprovida de qualquer descontinuidade (HOEK e BROWN, 1997).

A diminuição da resistência do maciço rochoso está directamente relacionada com a presença das descontinuidades, estruturas naturais que comprometem a integridade da rocha. Além das descontinuidades, a presença de água no interior do maciço rochoso também pode contribuir para a diminuição da sua resistência, ou seja, maciços rochosos altamente fracturados tendem a ter resistências menores que maciços rochosos pouco fracturados (ZINGANO, 2002; BRADY e BROWN, 2004). A caracterização geomecânica do maciço rochoso é realizada via coleta de dados em campo e de ensaios laboratoriais, de onde são obtidas informações sobre as características das descontinuidades, resistência da rocha intacta, estado de tensões do maciço rochoso e presença de água.

1.5.2. *Classificação Geomecânica*

A classificação geomecânica é a base de muitas formulações empíricas para o dimensionamento de túneis, galerias subterrâneas e seus respectivos sistemas de suporte/reforço e tem como objectivo definir uma nota ou qualidade ao maciço rochoso através de parâmetros geológicos, geomecânicos e geotécnicos. Há mais de 100 anos são desenvolvidas técnicas para classificação geomecânica, iniciando com a Tentativa de Ritter (1879, apud HOEK, 2006) em padronizar projetos de túneis e requisitos de suporte. Terzaghi (1946) criou a primeira metodologia de classificação para estimar o peso de carregamento no teto da escavação em função do tipo de maciço, quanto maior o grau de fraturamento do maciço, maior a carga de carregamento.

As metodologias do Rock Quality Designation (RQD), de Deere (1963), classificação RMR – Rock Mass Rating de Bieniawski (1973) e o Sistema-Q de Barton et al. (1974) são as classificações geomecânicas mais utilizadas em obras de engenharia. As metodologias do RMR e o Sistema Q utilizam o RDQ em suas formulações para a obtenção de seus índices de qualidade.

✓ *Índice de qualidade de rochas (RQD)*

O índice RQD é uma técnica desenvolvida por Deere (1963), cujo objectivo é definir a qualidade do maciço rochoso, por meio da estimativa, seu do grau de fraturamento. Este índice é bastante utilizado como critério básico nas obras de engenharia, entretanto, realiza somente uma análise quantitativa, sem considerar parâmetros qualitativos das discontinuidades como alteração, preenchimento e rugosidade das estruturas.

O RQD é obtido como a porcentagem determinada pelo quociente entre o somatório dos fragmentos de amostra com comprimento superior a 10 cm e o comprimento total do testemunho de sondagem recuperados em cada manobra, conforme demonstrado na Figura 7.

1. Originalmente, os procedimentos para determinação do RQD foram desenvolvidos para serem utilizados em testemunhos de sondagem com diâmetro mínimo de 54,7 mm (DEERE, 1963).

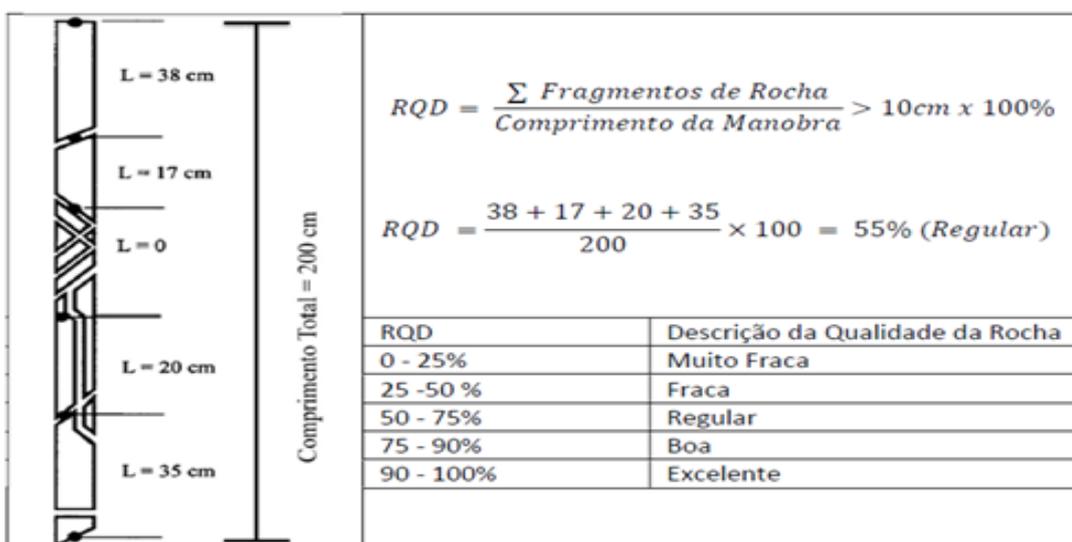


Figura 7 – Procedimento para cálculo do RQD.
Fonte: Adaptado de (DEERE, 1989).

Pode-se dizer que para rochas sãs e pouco intemperizadas o RQD pode ser utilizado sem nenhuma restrição. Para as rochas moderadamente intemperizada o

RQD deve ser utilizado com ressalvas e para as rochas altamente imtemperizadas e para os solos residuais o RQD não deve ser empregado.

✓ *Sistema RMR – Rock Mass Rating (Bieniawski)*

A classificação RMR foi desenvolvida por Bieniawski entre os anos de 1972 e 1973, com as últimas modificações e actualizações em 1989 (BIENIAWSKI, 1989). Essa classificação consiste na análise e somatório de seis parâmetros relativos ao maciço rochoso e a escavação, conforme apresentado na Equação.

$$RMR = \sum_{i=1}^5 W_i + ajuste$$

Onde: w_i representa o somatório dos 5 parâmetros relativos ao maciço rochoso.

Estes parâmetros incluem:

- b) a resistência à compressão uniaxial (q_u),
- c) o grau de fraturamento do maciço (RQD),
- d) o espaçamento das descontinuidades,
- e) a condição das descontinuidades
- f) a condição de água subterrânea.

O Sistema RMR é aplicável em diversos projetos de engenharia como túneis, taludes, fundações e minas, sendo a maioria das aplicações em escavações subterrâneas. Por essa diversidade de aplicações esse sistema ainda é utilizado. Observa-se na Tabela 1 as classes de maciços rochosos segundo os resultados do somatório dos cinco parâmetros.

Tabela 1- classe de maciço rochoso segundo a classificação RMR

Classe de maciço rochoso determinada pela somatória dos pesos RMR					
Somatória dos pesos	100-81	80-61	60-41	40-21	<20
Classe nº	I	II	III	IV	V
Descrição	Muito bom	Bom	Regular	Pobre	Muito Pobre

E por fim a Tabela 2 representa o significado prático das classes de maciços rochosos em termos de tempo de autosuporte da escavação, coesão e ângulo de atrito do maciço rochoso.

Significado das classes de Maciços					
Classe nº	I	II	III	IV	V
Tempo de Auto suporte Médio	20 anos pra abertura de 15m	1 ano para abertura de 10 m	1 semana para abertura de 5 m	10 horas para abertura de 2,5 m	30 minutos para abertura de 1m
Coesão do maciço rochoso (kpa)	> 400	300-400	200-300	100-200	<100
Ângulo de atrito	>45	35-45	25-35	15-25	<100

✓ *Sistema Q (Barton)*

O Sistema Q de classificação de maciços rochosos foi desenvolvido por Barton, Lien e Lunde em 1974 no Norwegian Geological Institute - NGI. Sua elaboração foi obtida com base em uma análise de dados referentes a 212 túneis executados na Escandinávia. O Sistema Q representa uma grande contribuição no campo da classificação de maciços rochosos, pois além de ser um sistema quantitativo de classificação, também é um sistema de engenharia facilitador de dimensionamento de suportes de túneis e escavações subterrâneas (BARTON et al., 1974). O Sistema Q fundamenta-se no indicador de qualidade “Q”, adquirido dos seis parâmetros que descrevem uma série de particularidades do maciço rochoso. O valor numérico do índice Q é determinado pela Equação:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

Os parâmetros analisados na metodologia de Barton et al. (1974) incluem:

- ✓ o grau de fraturamento do maciço (RQD);
- ✓ o número de Famílias de Descontinuidades (J_n);
- ✓ o índice de Rugosidade das Descontinuidades (J_r);
- ✓ o índice de Alteração das Descontinuidades (J_a);
- ✓ o factor de Redução de Presença de Água (J_w);
- ✓ o estado de tensão no maciço rochoso (SRF).

A partir da avaliação dos intervalos nos quais variam os parâmetros em que o método de classificação se baseia, o intervalo que o índice “Q” varia, abrange de 0,001 até 1000 em uma escala logarítmica de qualidade do maciço rochoso

Sistema de classificação de Barton et al. (1974), é utilizado para verificar a necessidade de utilização de suporte, e havendo necessidade, qual o melhor tipo de suporte a ser implementado com base nas dimensões da escavação pretendida e no valor Q obtido.

O quociente da equação (RQD/J_n) representa o grau de fraturamento do maciço rochoso ou o tamanho relativo do bloco no maciço rochoso, obtido da divisão do RQD pelo índice de famílias de descontinuidades. Sendo esta relação útil para definir o tamanho e o formato real dos blocos, bem como a frequência de família de descontinuidades, representando assim, o grau de liberdade do bloco.

O quociente (J_r/J_a) representa a resistência da movimentação dos blocos, ou seja, o atrito entre as paredes das descontinuidades, obtido através da divisão do índice de rugosidade das descontinuidades e pelo grau de alteração das descontinuidades.

Segundo Barton et al. (1974), a função $\tan^{-1}(J_r/J_a)$ é uma aproximação justa do ângulo de atrito que pode ser encontrado pelas várias combinações de rugosidade da parede e material de preenchimento. A categoria “a” do J_a é a que garante maior estabilidade para escavação, devido a rugosidade, ondulação e não alteração das paredes, proporcionando assim um maior atrito ao escorregamento do bloco, em razão do contato rocha/rocha. Conforme ocorrem alterações nas paredes e/ou preenchimento das fracturas com materiais arenosos e/ou argilosos, a estabilidade da escavação é prejudicada, devido a diminuição do atrito de escorregamento dos blocos. Essa situação é verificada nas categorias “b” e “c” do J_a .

Além do atrito de escorregamento, a resistência ao escorregamento depende da tensão efectiva ou tensão in situ do maciço rochoso. Regiões sujeitas a baixas tensões possibilitam a ocorrência de desprendimento e escorregamento de blocos.

Em regiões de grandes tensões esse fenómeno não é observado, por causa das tensões que comprimem e imobilizam o bloco de rocha, impedindo a sua movimentação, mas favorecendo o processo de lasqueamento e ruptura.

O quociente da equação (J_w/SRF) representa a tensão efectiva, obtido da divisão do fator de redução da presença de água pelo factor de redução de tensão. O J_w representa a penalização da presença de água no maciço rochoso, pois a percolação de água nas fracturas pode amolecer ou carrear o preenchimento mineral reduzindo assim o atrito nos planos das descontinuidades, além reduzir as tensões nas paredes da descontinuidade devido a pressão hidrostática, facilitando o escorregamento de blocos.

O SRF, fator de redução da tensão, representa a relação entre a tensão in situ e a resistência da rocha no entorno de uma escavação subterrânea. O SRF pode ser calculado a partir da relação entre a resistência à compressão uniaxial da rocha (q_u) e tensão principal maior (σ_1) ou a relação entre a tensão tangencial máxima σ_θ e o q_u da rocha intacta. Pois, dependendo do nível de tensões e da resistência da rocha, os efeitos da redistribuição de tensões e acomodação do material escavado podem ser variados, tais como, lasqueamento, lajeamento, esmagamento, dilatação e queda de blocos.

Com a multiplicação dos três quocientes, obtém-se o valor do índice "Q". Barton et al. (1974) dividem os maciços rochosos em nove categorias de qualidade, variando de Excepcionalmente Bom até Excepcionalmente Fraco. Esta divisão fornece informações preliminares de como o maciço pode se comportar dependendo das dimensões da escavação (Tabela 3).

Tabela 3 – Qualidade do Maciço Rochoso

Qualidade do Maciço Rochoso	
Intervalo de Q	Qualidade
400-1000	Excepcionalmente Bom
100-400	Extremamente Bom
40-100	Muito Bom
10-40	Bom
4-10	Regular
1-4	Fraco
0,1-1	Muito Fraco

0,01-0,1	Extremamente Fraco
0,001-0,01	Excepcionalmente Fraco

Fonte: Adaptado de (BARTON et al., 1974)

1.6. DIMENSIONAMENTO DE UMA ESCAVAÇÃO SUBTERRÂNEA

A realização de escavações de galerias subterrâneas é uma operação bastante complexa pois envolve alguns riscos, tais como: má condição de ventilação, inundações, quedas de blocos e até colapsos generalizados. A escavação de um maciço rochoso, naturalmente estável, ocasiona uma redistribuição das tensões verticais e/ou horizontais, que associadas ao peso das rochas sobrejacentes à escavação, mais as tensões tectónicas locais, podem gerar áreas de instabilidade que devem ser tratadas usando-se procedimentos e materiais para melhorar a estabilidade e capacidade de carga da rocha durante a escavação, chamados de suportes e reforços (RENÓ et al., 2014).

O dimensionamento de escavações subterrâneas foi por muitos anos considerado muito complexo, mantendo-se como arte empírica, repetindo técnicas que tinham obtido êxitos em condições similares no passado. Esta similaridade basea-se em vários sistemas de classificação geotécnica: sistema RMR, de Bieniaeski, proposto em 1973; sistema Q de Barton et al. (1974) etc.

O com o avanço da técnica de análise numérica, o dimensionamento de escavações subterrâneas é comumente feito por via numérica, principalmente em análise tridimensionais, com o método dos elementos finitos, sendo assim possível considerar a interação entre o maciço e o sistema de suporte; o comportamento geológico do maciço e do suporte; a interação entre a obra subterrânea e estrutura superficiais; a simulação das diferentes fases construtivas etc. Entretanto, dados geotécnicos insuficientes e a indefinição no processo construtivo (ALMEIDA& SOUSA, 1998) ainda simplificam algumas análises subterrâneas, tornando prescindíveis nesses casos, as análises numéricas.

As principais metodologias de dimensionamento de uma escavação subterrânea de sistema de reforço/suporte são formulações empíricas proveniente da experiência

adquirida em escavações experimentais ou nos estágios iniciais de abertura de túneis e galerias em uma área específica (BRADY e BROWN, 2004). Estas formulações podem ser de sistemas de classificação geomecânica, tais como RQD – Rock Quality Designation de Deere (1963), classificação RMR – Rock Mass Rating de Bieniawski (1973) e o Sistema-Q de Barton et al. (1974), ou métodos empíricos de cálculo do comprimento e espaçamento dos parafusos de ancoragem (e.g. PANEK, 1964; COATES e COCHRANE, 1970; LANG, 1961; SCHACH et al., 1979; FARMER E SHELTON, 1980; CRAWFORD et al., 1985).

1.6.1. Dimensionamento de reforço utilizando RQD

O sistema de classificação de maciços rochosos desenvolvido por Deere (1963), RQD, foi um método empírico simples e pioneiro na previsão das condições do maciço rochoso e seleção do tipo de suporte/reforço de túnel. Este sistema dimensiona a aplicação de elementos metálicos (arco, tela e strap), concreto projectado e parafusos de ancoragem. Em 1970 Deere e Deere publicaram as directrizes para a seleção de sistemas de suporte/reforço de túneis baseados no RQD para escavações circulares com diâmetro entre 6,0 m e 12,0 m, dimensões comuns de túneis de obras civis (DEERE e DEERE, 1989). A Tabela 5 (anexo) apresenta as directrizes, com base no valor calculado do RQD e no método de escavação, em que verifica a necessidade ou não do uso de suporte, e se necessário, qual(is) tipo(s).

O RQD como único valor de classificação de maciços rochosos e dimensionamento de suporte/reforço de escavações subterrâneas não é mais utilizado, em razão de suas limitações referentes à não consideração do estado de tensões, características das descontinuidades, condições de água e grau de resistência da rocha. Em razão do surgimento de metodologias mais abrangentes tais como RMR e Sistema Q, que utilizam o RDQ em suas formulações. Contudo, o RDQ é um índice importante no sistema classificação e dimensionamento de reforço/suporte, mas não isoladamente, e sim em conjunto com outros factores/parâmetros.

1.6.2. Dimensionamento de reforço, segundo RMR

O objectivo principal do RMR é fornecer estimativas de tempo de autosuporte para escavações subterrâneas, podendo ser, também, utilizado como uma ferramenta analítica para dimensionamento de sistemas de suporte e reforço de escavações subterrâneas. A Tabela 5 (anexo) apresenta as directrizes para o dimensionamento de reforço de um maciço rochoso. Um ponto de destaque nesta tabela é a sugestão do método de escavação com taxa de avanço e distância para instalação do reforço ou suporte. As directrizes propostas nesta tabela são para túneis com formato de ferradura, largura de 10 m, tensão vertical inferior a 25 MPa, escavado por meio de perfuração e desmonte com explosivo.

Qualquer alteração nestes padrões implica revisão no dimensionamento dos tipos de reforço e suporte. Da mesma forma que RQD, o RMR não é aplicado isoladamente como ferramenta para dimensionamento de suporte, mas sim para prever o tempo de autosuporte e qualidade do maciço rochoso, objecto principal da sua formulação. O tempo de autosuporte é importante, pois fornece o tempo máximo em que o suporte/reforço deverá ser instalado e desta forma tem influência directa no planeamento e operação de lavra de subterrânea.

1.6.3. Dimensionamento de suporte/reforço, segundo Q- BARTON

Para o dimensionamento de reforço/suporte segundo a metodologia de Q-Barton, além da qualidade do maciço rochoso calculado por meio dos seis parâmetros descritos anteriormente é necessário conhecer a dimensão equivalente da escavação. Essa dimensão equivalente é quociente do vão livre ou altura da parede pelo requisito de segurança adoptado para esta escavação (ESR), equação (3).

$$\frac{\text{Vão livre ou altura em m}}{ESR} = \text{Dimensão equivalente}$$

Para expressar os requisitos de segurança para uma escavação subterrânea é utilizado um factor chamado Excavation Support Ratio (ESR). O Fator ESR representa o grau de segurança para esta escavação, por exemplo, um túnel

rodoviário ou uma casa de força subterrânea precisará de um nível de segurança mais alto do que um túnel de água ou uma escavação temporária em uma mina (BARTON, 2013). Os valores de ESR variam em intervalo entre 0,5 e 5,0, um valor de ESR baixo representa a necessidade de um alto nível de segurança, já um valor de ESR alto, representa a necessidade de um baixo nível de segurança. A Tabela 4 apresenta os tipos de aberturas para minas subterrâneas e seus respectivos valores de ESR.

Tabela 4 – Tipos de aberturas em minas subterrâneas e outras actividades.

Tipo de escavação		SR
A	Abertura/galerias temporárias de minas subterrâneas	3- 5
B	<ul style="list-style-type: none"> • Poços Verticais • Secções circulares • Seção rectangular/quadrada 	2,5
	Dependente do propósito. Pode ser menor que os valores fornecidos.	2,0
C	Aberturas de minas permanentes, túneis de água para energia hidráulica (excluindo alta pressão peneiras), túneis de abastecimento de água, túneis-piloto, desvios e cabeceiras para grandes aberturas.	1,6
D	Pequenos túneis rodoviários e ferroviários, túneis de acesso, túneis de esgoto, etc	1,3
E	Casas de força, armazéns, estações de tratamento de água, grandes túneis rodoviários e ferroviários, câmaras de defesa civil, portais, cruzamentos, etc..	1,0
F	Centrais nucleares subterrâneas, estações ferroviárias, instalações públicas, fábricas, etc.	0,8
G	Aberturas subterrâneas muito importantes com uma longa vida útil, \approx 100 anos, ou sem acesso para manutenção.	0,5

Fonte: Adaptado de (BARTON, 2013).

1.7. *Desmonte de rochas com explosivos*

O desmonte de rochas com explosivo acaba sendo uma das operações que constitui as principais causas responsáveis pelos custos de lavras tanto subterrâneas como a céu aberto. Além das características principais, tal como: redução granulométrica, volume de rocha desmontada, a detonação deverá produzir o mínimo de riscos e incómodos possíveis. O desmonte a explosivo para esses casos, se torna muitas vezes a opção melhor, sendo mais económica e rápida. Para aberturas de galerias, túneis e poços são utilizados os chamados fogos de pilão, quando não existem faces livres suficientes. Nesta técnica, as faces livres são criadas através de furos estrategicamente posicionados e não carregados. Os desmontes de rochas podem

ser classificados de diversas maneiras. Considerando-se a técnica aplicada podem se definir dois tipos principais que são:

- ✓ Desmonte de rocha á frio ou mecânico;
- ✓ Desmonte de rocha á fogo.

Desmonte de rochas á frio ou mecânico: são realizadas com processos mecânicos e/ou com auxílio de materiais expansivos.

Explosivos são substâncias ou misturas em qualquer estado físico que, quando submetidas a uma causa térmica ou mecânica suficientemente enérgica (calor, atrito, impacto etc.), se transformam, total ou parcialmente, em gases, tendo como consequência um aumento repentino da pressão, em um intervalo de tempo muito curto, desprendendo uma considerável quantidade de calor.

Desmonte de rochas á fogo: tipo de desmonte que utiliza material explosivo. Este tipo de desmonte é o foco deste trabalho. A primeira actividade do processo de desmonte com explosivos é a perfuração da frente, que tem a finalidade de abrir os furos onde irão ser introduzidos os explosivos. Esta operação de perfuração é realizada por equipamentos hidráulicos automatizados denominados Jumbos.

Os Jumbos são equipamentos de perfuração com 2 a 5 braços dotados de martelos, perfuradores hidráulicos, que permitem que as operações de furação sejam computadorizadas, efectuando a máquina de forma automática a implantação do plano de fogo para a seção.

1.7.1. Classificação dos explosivos

Explosivos são substâncias ou misturas de substâncias capazes de se transformar quimicamente em gases, com extraordinária rapidez e desenvolvimento de calor, produzindo elevadas pressões e considerável trabalho. Os principais elementos químicos de um explosivo industrial são: Carbono (C), Hidrogénio (H), Oxigénio (O) e Nitrogénio (N). Os Explosivos podem ser classificados quanto á:

- ✓ Aplicação;
- ✓ Desempenho;

- ✓ Composição;
- ✓ Consistência;
- ✓ Velocidade da detonação;
- ✓ Expansão gasosa;
- ✓ Toxidez;
- ✓ Sensibilidade;
- ✓ Resistência a água.

1.7.2. Tipos de Explosivos e acessórios.

A composição básica de quase todos os explosivos químicos industriais pode ser resumida nos elementos que formam a sigla CHON (carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio), também, o Cl contribui com os radicais cloratos (ClO_3) e percloratos (ClO_4) que são altamente explosivos. Os tipos de explosivos mais usados são:

1. Explosivos granulados industriais: composições explosivas, que além de nitrato de amônio e óleo combustível, são constituídas de aditivos, tais como serragem, casca de arroz e alumínio em pó, para correção de densidade, balanço de oxigênio, sensibilidade e potencial energético; também são conhecidos comercialmente como granulados, pulverulentos, derramáveis ou nitrocarbonitratos;



Figura 8 – Explosivo tipo granulado Anfomax (BRITANITE, 2012).

2. Explosivo tipo EMULSÃO: são misturas de nitrato de amônio, diluído em água, e óleos combustíveis, obtidas por meio de um agente emulsificante; contém micro bolhas dispersas no interior de sua massa, responsáveis por sua sensibilização; normalmente são sensíveis à espoleta comum nº 8, sendo eventualmente necessário o uso de um reforçador para sua iniciação; podem ser de dois tipos:

a) *Explosivo tipo EMULSÃO BOMBEADA*: são explosivos tipo Emulsão, a granel, bombeados e sensibilizados directamente no local de emprego, por meio de unidades móveis, de fabricação ou bombeamento;

b) *Explosivo tipo EMULSÃO ENCARTUCHADA*: são explosivos tipo Emulsão, embalados em cartuchos cilíndricos, normalmente de filme plástico;



Figura 9 – Dinamite tipo 1"X24"

Fonte - Dinadrill

3. *Espoleta comum*: tubo de alumínio, contendo, em geral, uma carga de nitropenta, e um misto de azida e estifinato de chumbo, destinado à iniciação de explosivos, sendo o tipo mais utilizado a espoleta comum nº 8; também é conhecida como espoleta não eléctrica ou pirotécnica;

4. *Cordel detonante*: tubo flexível preenchido com nitropenta, RDX ou HMX, destinado a transmitir a detonação do ponto de iniciação até à carga explosiva; seu tipo mais comum é o NP 10, ou seja, que possui 10 g de nitropenta/RDX por metro linear;

5. *Sistema iniciador não eléctrico*: conjunto de espoleta de retardo e tubo flexível oco com revestimento interno de película de mistura explosiva ou pirotécnica, suficiente para transmitir a onda de choque ou de calor, sem danificar o tubo;

6. *Sistema iniciador eléctrico*: conjunto de espoleta acoplada a um circuito eléctrico com o mesmo efeito de uma espoleta comum, mas accionado por corrente eléctrica;

7. Sistema iniciador electrónico: conjunto de espoleta acoplada a um circuito electrónico que permite a programação dos retardos e accionado por conjunto de equipamentos de programação e detonação específicos para esse fim;
8. Reforçadores: são acessórios explosivos destinados a amplificar a onda de choque, para permitir a iniciação de explosivos em geral não sensíveis à espoleta comum nº 8 ou cordel detonante; normalmente são tipos específicos de cargas moldadas de TNT, nitropenta ou pentolite;
9. Retardos: são dispositivos semelhantes a espoletas comuns, normalmente com revestimento de corpo plástico, que proporcionam atraso controlado na propagação da onda de choque; são empregados para a montagem de malhas em que se precisa de uma desfasagem na iniciação do explosivo em diferentes pontos, ou mesmo para detonações isoladas, proporcionando maior segurança à operação;
10. Estopins: são tubos flexíveis preenchidos com pólvora negra destinados a transmitir chama para iniciação de espoletas; quando comercializados em pedaços, acoplados a uma espoleta, são denominados "espoletados"; podem ser hidráulicos ou comuns, conforme sejam capazes ou não, respectivamente, de transmitir chama dentro d'água;
11. Acessórios iniciadores: constituem-se de espoleta eléctrica, espoleta pirotécnica, espoleta electrónica, estopim, elemento de retardo, acendedor de fricção, detonador não eléctrico, espoleta pirotécnica montada com estopim, e conjunto iniciador montado, constituído de espoleta pirotécnica acoplada a tubo transmissor de onda de choque ou de calor.

CAPITULO II – CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

2.1. Localização da área de estudo do AH-Laúca

O aproveitamento hidroeléctrico de Laúca, localiza-se na província de Malanje, em Angola, no troço do médio Kwanza entre o AH- Capanda e o AH- Cambambe. A sua construção iniciou-se em 2012 e, é tida como a maior barragem de Angola, com uma produção potencial máxima de 2070 MW. O mesmo encontra-se sobre as coordenadas geográficas de 9°44'37'' a Sul (S) e 15°07'16'' a Este (E). Sua base de operações está na vila de Laúca, no município de Cacuso, em Malanje.



Figura 10 - Extracto do Mapa de localização do empreendimento
Fonte- Odebrecht 2012

As responsabilidades contratuais do empreendimento envolvem 3 empresas. O dono da obra, a fiscalização que representa os interesses do dono da obra e o empreiteiro que tem como seu escopo contratual a elaboração do Projecto e Construção de Obras Civis, Fornecimento e Montagem dos Equipamentos Electromecânicos, Formação e Operação Assistida. O projecto encontra-se sob a coordenação do GAMEK, e a sua construção está a cargo da Odebrecht Engenharia e Construção Internacional.

É necessário realçar que antes da construção da obra foi feito o estudo do impacto ambiental onde fez-se um levantamento pré eliminar da área, bem como recorrer as autoridades competentes para autorização da implementação do mesmo; isto resultou num processo de obtenção de licenças que permitiram a execução sem

qualquer tipo de impedimento. Foi concedida ao projecto licenças ambientais, com as respectivas medidas de mitigação, licença de instalação onde incluiu a licença de desvio do rio, construção da obra, licenças de permissão e de operação.

2.1.1. Aspectos Geográficos do Local

Malanje limita-se ao norte pela província do Uíge, ao leste pelo Congo-Quinxassa, Lunda Norte e Lunda Sul, ao Sul e Sudoeste pela província do Bie e, ao oeste pelas províncias do Cuanza Sul e Cuanza Norte.

✓ *Relevo*

O trecho médio do rio Cuanza encontra-se no Planalto de Malanje, onde as altitudes médias ficam entre 1.000 e 1250m, e na sua parte ocidental, as cotas variam entre 600 e 950m, o que caracteriza um relevo mais acentuado. É nesses locais, principalmente junto ao rio Cuanza, que o desniveis do relevo são mais abruptos, de 100 a 150m, o que propicia a existência de cachoeiras e corredeiras.



Figura 11- Vista da encosta da margem direita (fluxo para a esquerda).
Fonte: (Araújo & Guimarães - 1992)

✓ *Hidrografia*

As duas maiores bacias hidrográficas que irrigam a província são: a Bacia do Cuanza, assentada no rio Cuanza e a Bacia do Cuango, assentada no rio Cuango e uma sub-bacia do rio Congo. A bacia hidrográfica do Médio Cuanza possui uma área aproximada de 25.000 km² e desenvolve-se desde quedas do Condo, á Sul da cidade de Malanje, até a base dos Rápidos de Cambambe. A altitude da bacia varia de 160 a 1.000 metros.



Figura 12 - Aspecto da encosta na área da central principal.
Fonte – (Araújo & Guimarães 1992)

✓ *Clima*

O clima da bacia do Médio Cuanza é tropical com estação seca de inverno. Tem uma temperatura média mensal superior á 18°C e pelo menos um dos meses do ano tem precipitação média total inferior para cada a 60mm. O bioma típico das regiões com este tipo de clima é a savana.

2.1.2. Caracterização geológica e geomorfológica

De acordo com a Intertechene Consultores S.A (2014), A geologia da área estudada é constituída por: unidades litológicas Pré-Cambrianas, compostas essencialmente por gnaisses. Na área do AH- Laúca é predominante o tipo de rocha gnaisse, isto

quanto a sua lito-estratigrafia sequencial (solo residual, arenito siltite e predominantemente Gnaisse).

As formações geológicas ocorrentes no local da obra são essencialmente de carácter rochoso, sendo caracterizadas nas suas cotas superiores por um maciço sedimentar constituído por rochas areníticas e siltíticas, desenvolvendo-se, subjacentemente ao complexo anterior, um maciço cristalino cratónico, constituído por rochas gnaissicas no qual estão situadas grande maioria das escavações subterrâneas.

As formações paleozoicas de rochas metassedimentares, foram depositadas em discordância erosiva subhorizontal sobre um embasamento gnaissico pré-cambriano, com aproximadamente 100m de espessura. O conjunto sedimentar é composto por metarenitos, metarcoses, metassiltitos e brechas conglomeráticas. Na região da barragem, em ambas as margens do rio, há escarpas de rochas metassedimentares formando paredões subverticais de até 100 m de altura. Na região da barragem, poucos metros acima do leito do rio, aproximadamente na cota 750 m, afloram os gnaisses pré-cambrianos subjacentes às rochas metassedimentares. Praticamente todo o complexo de túneis e caverna da central principal está posicionado integralmente no maciço gnaissico cristalino. (Ver Figura 13).

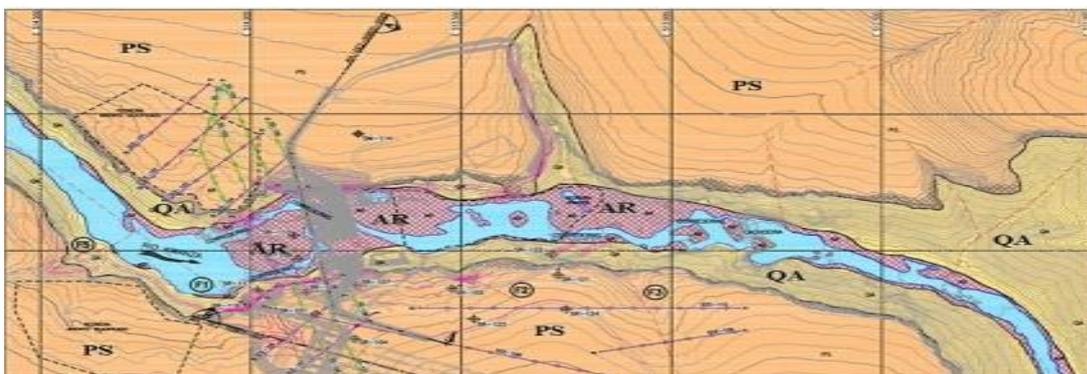
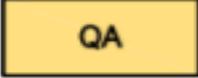
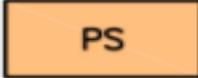
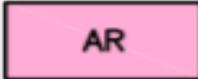


Figura 13 - Extracto do Mapa Geológico do AH-Laúca
Fonte - Intertechene 2014

LEGENDA:

	Depósito de tálus e coluvionares superficiais.
	Metarenitos, metassiltito e metaconglomerados.
	Gnaíse anfibolitos e intrusões graníticas.
	Afloramento rochoso.

2.1.3. Caracterização Geológica Regional do AH-Laúca

Do ponto de vista morfoestrutural o AH Laúca se localiza na unidade denominada Planalto Central de Angola, apresentando relevo mesetiforme com altitudes máximas que variam entre 1100 e 1200 m. A divisão tectônica foi baseada nas características específicas dos complexos litológicos-estruturais do Precâmbrico e Fanerozóico. Em Angola destacam-se dois andares estruturais, o inferior que é correspondente ao soco cristalino formado pelos complexos lito-estruturais do Arqueano e do Proterozóico precoce, e o superior corresponde a cobertura da plataforma, formada pelos complexos sedimentares depositados desde o Proterozóico tardio até o Cenozóico.

Os materiais do soco se agrupam em escudos sendo o escudo de Angola onde está localizada a obra. Ao norte do escudo de Angola se dispõe o Horst do Kwanza, ambos separados pela falha profunda Maiombe com direção geral NW-SE que logo torce para direção E-W no Horst do Kwanza. Os materiais de cobertura de Plataforma na região da obra correspondem, aos depósitos metasedimentares não dobrados, subhorizontais, da denominada Placa Precámbrica do Congo (Proterozóico Tardio). Sobrepõem-se às rochas do soco, mediante uma discordância erosiva regional. Na Carta Geológica de Angola a escala 1:1.000.000, se identificam na região da obra a unidade denominada AR1 (Arcaico inferior) formada por plagiognaisse de idade Arcaico superior/Proterozoico inferior (~ 3500 m.a), a unidade R3-vxg (vaques e xistos gresosos) formado por metaarcosas, metagrauvaques, grés e conglomerados do Grupo Xisto-Gresoso, de idade

Proterozoico Superior (Rifteano superior/Vendiano), a unidade R2-3(xc) do Grupo Xisto-Calcário formado por dolomitas, calcários estromatólicos, xistos argilosos e argilo-calcários de idade Proterozóica Superior (Rifteano médio a superior) e intrusões graníticas a sienodioríticas do Complexo Quibala de idade Proterozóica Superior. (Ver Figura 14).

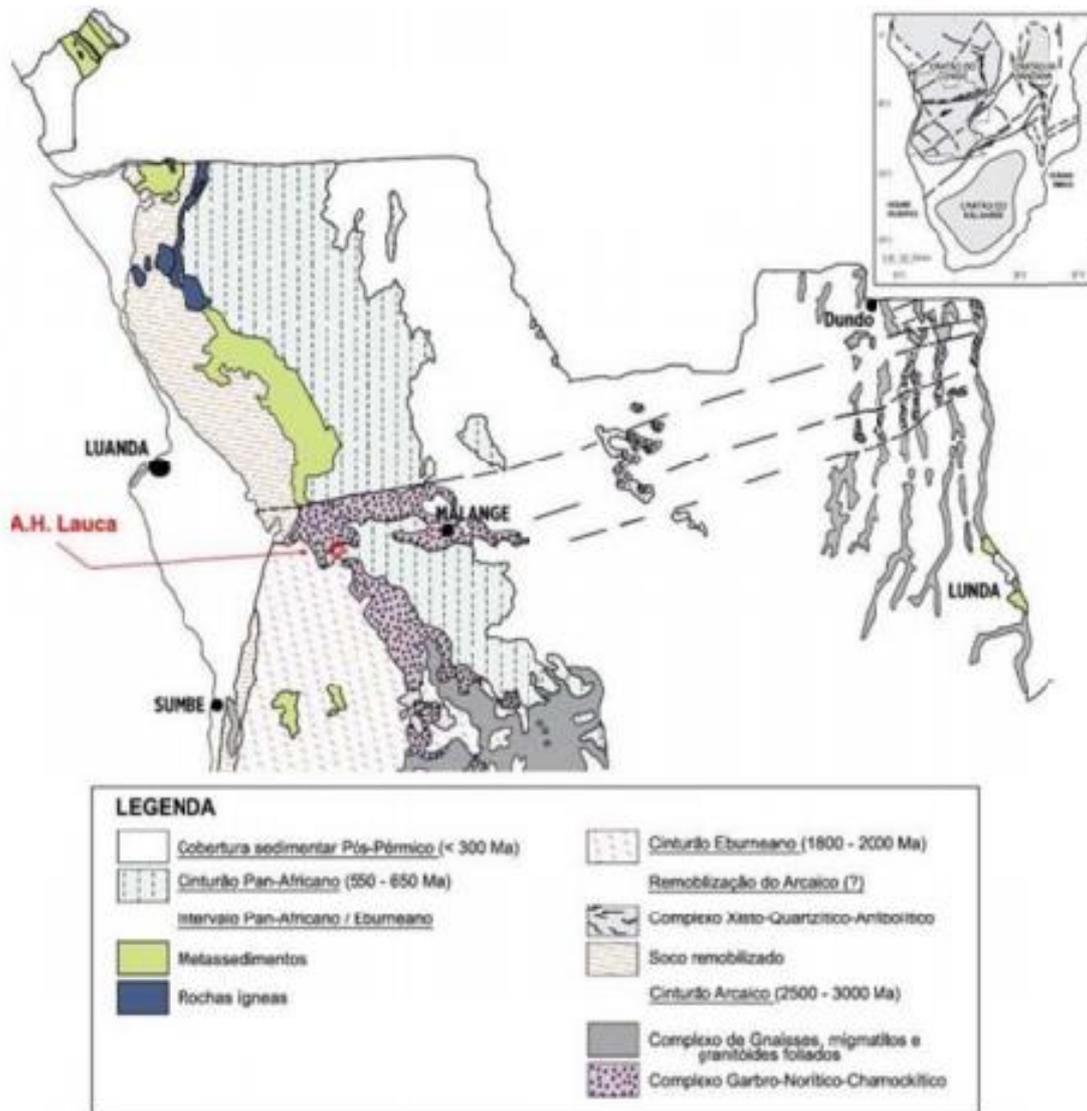


Figura 14 - Extracto do Mapa do Enquadramento Geológico Regional (escala 1:1.000.000).

Fonte- Adaptado de Pereira et al., 2013.

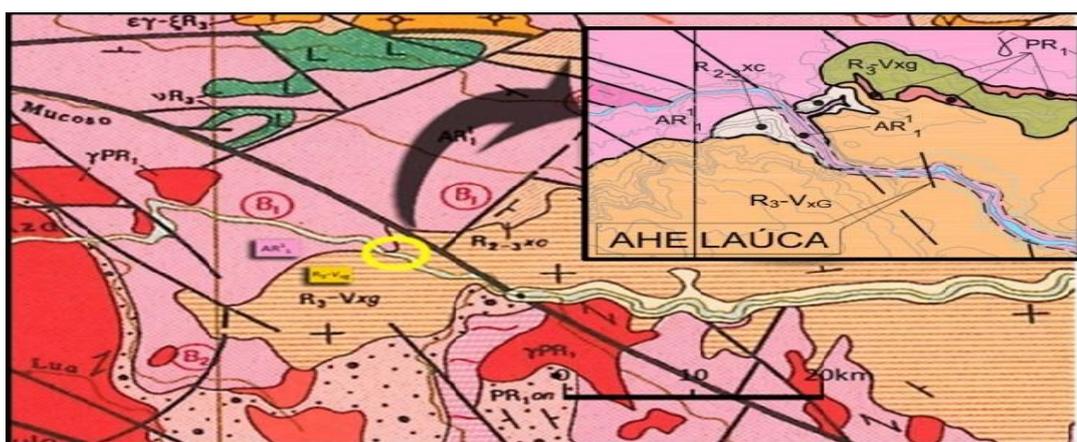
✓ Geologia Local

No local do empreendimento AH Laúca, foram identificadas três unidades geológicas, conforme se observa no detalhe da carta geológica (exposta no extracto do mapa 4), discriminado abaixo:

a) Depósitos de Tálus (Idade Quaternária) (tQIV): sedimentos inconsolidados depositados no pé das encostas do vale do Rio Kwanza, formados por blocos centimétricos a decimétricos de arenitos e gnaisses imersos em uma matriz areno-siltosa avermelhada, com espessura métrica;

b) Rochas Metassedimentares estratificadas (Idade Proterozóico superior) (R3-Vxg): formado por uma sucessão de arenitos silificados, siltitos e brecha conglomerática basal. Apoia-se discordantemente sobre o Complexo do embasamento;

c) Complexo Gnáissico do Embasamento (Idade Arqueano) (AR1): formado por gnaisses, anfibolitos e intrusões graníticas. No local do aproveitamento predominam fácies gnáissicas. O contacto com a sequência sedimentar é discordante e praticamente sub-horizontal. No contacto com a sequência metassedimentar, o gnaisse apresenta-se muito fracturada e alterada e também permeável. Em profundidade o gnaisse forma um maciço muito competente e medianamente fracturado. (Ver figura15).



gura 15 - Extracto da carta geológica de Angola na escala 1/1.000.000 (Araujo e Guimarães, coord 1992) com a inserção de uma ampliação local da obra (quadrado preto, de acordo com o desenho do projecto executivo).

Fonte - Arquivo técnico de AH-Laúca (AHL-DE4-00B05- 0001).

2.1.4. Lito-estratigrafia e Litologia da ÁH- Laúca

Litologicamente, a escavação atravessou um maciço formado pelo pacote de rochas metassedimentares desde a superfície do terreno até a cota aproximada 745m. Abaixo desta cota, foram interceptadas as rochas gnáissicas até a base da escavação (figura 16).



Figura 16 - Esquema interpretativo das diferentes litologias mapeadas entre as elevações aproximadas 825 a 740m.
Fonte-Relatório técnico de Laúca, 2014

O pacote de rochas metassedimentares apresenta as seguintes características:

Metarenito silicificado (MAS): este tipo de arenito se desenvolve desde a superfície (elevação aproximada 825m) até à elevação 770m. Ocorrem, por vezes, intercalações de metassiltitos e arenito poroso. A rocha apresenta-se pouco alterada, coerente e pouco fracturada. Localmente são observadas zonas onde o grau de fracturação o é mais intenso.

Metarenito poroso (MAP): esta litologia encontra-se intercalada com o arenito descrito anteriormente entre as elevações 780m a 776m e entre 770m a 765m. Apresenta-se, maioritariamente, medianamente a pouco alterado, coerente e medianamente fracturado.

Metasiltitos (MS): foram interceptados entre as elevações 815m a 810m e novamente entre as elevações 765m a 747m. Nas cotas superiores apresenta-se maioritariamente pouco alterado, coerente e pouco fracturado. Nas cotas inferiores verifica-se que sofre uma redução de qualidade, apresentando-se medianamente a muito alterado, pouco coerente e medianamente fracturado.

Metaconglomerados (MC): este tipo litológico foi interceptado entre as elevações aproximadas 750m a 745m, apresentando-se alterado a muito alterado, pouco coerente e fracturado.

Subjacente às litologias descritas anteriormente foi interceptada a rocha gnáissica, sensivelmente à cota 745m até a base da escavação. Este tipo de rocha apresenta-se na sua generalidade sã a pouco alterada, coerente e ocasionalmente fracturadas. Por abaixo do contacto com a sequência metassedimentar o gnaiss se mostra medianamente alterado. Com base nos mapeamentos realizados o maciço foi dividido em 5 zonas geotécnicas com diferentes características geológico-geotécnicas.

De maneira geral verifica-se que o maciço desde as cotas 825 a 760m, apresenta-se maioritariamente entre as Classes I e II, ou seja, maciço Muito Bom a Bom. No entanto verificam-se ainda zonas onde a qualidade do maciço piora para Classe III (Maciço Razoável). Nos trechos onde foi calculado o RMR (Resistência do Maciço Rochoso), verifica-se que o talude apresenta-se como sendo de Classe II (Maciço Bom).

✓ Hidrogeologia de AH-Laúca

A circulação da água subterrânea está fortemente condicionada às condições litológicas e estruturais presentes no local. Para medir o nível freático, instalaram-se cinco medidores de nível de água e um piezómetro. Ver Figura 17.



Figura 17 - Desvio do Rio
Fonte- Intertechene 2013.

As leituras dos medidores de nível de água nos furos das sondagens rotativas (SR-101, 104 e 108) e do piezômetro (SR-216) na região da Tomada de Água e da ombreira direita são os seguintes: (ver tabela 5)

Tabela 5 - Leitura dos medidores do Nível de água

SONDAGEM	ELEVAÇÃO
SR -101	761,5
SR-104	761
SR-108	763
SR-206	760,1

Fonte- Arquivo Técnico de Laúca, 2012

Observou-se que o nível freático na ombreira direita está relacionado com a camada de metassiltito e metaconglomerado próximo ao contacto com o gnaisse do embasamento, e varia entre as elevações 760 m e 763 m. O piezômetro instalado no furo da sondagem SR-206 (tabela 7) mostra que ao longo do tempo o nível freático diminuiu desde cota 761.5 m até cota 760,1 m em pouco mais de um ano de leitura contínua. Destaca-se a baixa resposta dos valores piezométricos com relação à precipitação pluviométrica local.

Durante as escavações dos taludes dos canais de entrada/saída para o desvio do rio e da ombreira direita se constatou que não existe um nível freático contínuo ao longo do maciço rochoso. Nas elevações correspondentes com os afloramentos do metassiltito, metaconglomerado e gnaisse, se observou a presença de pequenos surgimentos de água, de vazão muito baixa (gotejamentos) localizadas e aumento significativo da humidade na camada de metassiltito.

Nas escavações subterrâneas do desvio do rio, a água subterrânea se manifestou esporadicamente na forma de gotejamentos mais ou menos persistentes. Foi rara a presença de fluxos contínuos localizados. As leituras de nível freático na região da central principal são indicadas nas sondagens SR-104 e SR-120. Da mesma forma que as escavações subterrâneas para o desvio do rio, na região da central principal

a água subterrânea tem se manifestado como gotejamentos localizados esporádicos relacionados a fracturas e/ou falhas geológicas.

2.1.5. Caracterização do maciço rochoso de AH-Laúca

De acordo com a Intertechenne Consultores S.A (2014), a região do aproveitamento hidroelétrico de Laúca é composta por rochas metassedimentares derivadas de arenitos, siltitos e rochas cristalinas mais antigas, predominantemente gneisses. Devido ao baixo grau metamórfico das rochas metasedimentares, que preservou a estrutura original, estas serão referidas no texto pelos nomes de seus equivalentes sedimentares: arenitos, siltitos e brechas conglomeráticas.

Na área da barragem, as ombreiras são compostas pelas rochas metassedimentares, com os níveis de arenitos silicificados na porção superior e intercalações de siltitos e arenitos na porção inferior. No sopé das escarpas, ocorrem depósitos de talus e colúvios quaternários que encobrem em grande parte o contacto do gnaíse com os metasedimentos. Tais depósitos apresentam espessuras de ordem de até 5,0 m. No leito, o rio é composto por rochas gnaíssicas em toda a sua extensão. Ocorrem zonas de falhas onde a erosão é mais intensa, orientando o fluxo de água do rio.

O depósito metasedimentar superior, acente sobre o gnaíse, é constituído por uma brecha conglomerática basal, pouco friável e bem cimentada, com seixos angulosos de 10 cm a 50 cm de diâmetro e de espessura entre 0,5m á 3,0m, seguido por horizonte lenticular de cerca de 2m de arenito esbranquiçado, brando e friável, feldspático e com níveis delgados de pelito arroxeadado intercalado. Com base nos dados dos mapeamentos efetuados e das sondagens disponíveis, pode-se observar a seguinte sequência estratigráfica do topo para a base das encostas:

Unidade 1- Arenitos silicificados: possuem granulometria variável, compactos duros, pouco alterados e de elevada resistência (espessura média de 25,0 m). São rochas com forte estratificação e eventualmente sinais de estratificações cruzadas de grande porte. A cobertura de solo varia entre 2,0 m á 4,0 m;

Unidade 2 - Arenitos porosos: são rochas mais brandas que os arenitos silicificados, pouco feldspática e predominantemente porosas. A espessura média é de 35,0 m. Estes dois primeiros pacotes rochosos ocorrem intercalados;

Unidade 3 - Intercalações de siltitos com arenitos: fina estratificação de arenitos e argilitos, com predominância dos termos mais finos e espessura média de 10,0 m;

Unidade 4 - Siltitos: apresentam estratificação plano-paralela centimétrica bem marcada. Espessura do pacote em torno de 12,0 m;

Unidade 5 - Brecha conglomerática basal: compostas por blocos angulosos do embasamento gnaissico envoltos em uma matriz fina e homogênea, composta essencialmente por material argiloso litificado, com espessura de até 3,0m. Conforme observado nos testemunhos de sondagens dos furos, esta unidade apresenta-se bastante compacta e maciça, indicando condições de baixa permeabilidade do maciço no contacto entre os sedimentos e o gnaisse;

Unidade 6 - Embasamento gnaissico: Rocha sã, com baixo grau de fraturamento e permeabilidade muito baixa.

Esta sequência ocorre na área da barragem, em ambas as margens, sem grandes alterações, com a estratificação sub-horizontal bem destacada. Na área da central principal, as unidades 3 e 4 não ocorrem, e a unidade 5 apresenta espessuras maiores, da ordem de 15,0m. Essa alteração na sequência de rochas ocorre provavelmente por causa de um afinamento gradual da camada de siltito em direção à área da central, acompanhando a elevação suave observada no contato com o gnaisse.

2.1.6. Propriedades Físicas do Maciço Rochoso

As propriedades físicas do maciço de Laúca (Gnaisse) que se utiliza neste trabalho, foram obtidas do relatório de Laúca, obras subterrâneas. Foram ainda considerados alguns parâmetros médios para o maciço gnaissico, utilizados nas análises estruturais das grandes escavações.

Na tabela 6 apresentamos os resultados das propriedades físico-mecânicas das rochas de Laúca, bem como os seus respectivos horizontes e o seu grau de fortaleza.

Tabela 6- Resultado das propriedades Físicas do Gnaisse

ρ (Kg/m ³)	γ_v (Kg/m ³)	P (%)	R_c (MPa)	R_t (MPa)	R_{cis} (MPa)	VI^m (m /s)
2640	2660	0,91	71,1	7,5	13,3	5380

Fonte- Arquivo Técnico de Laúca, 2012

CAPITULO III – ANALISES E RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos para realização da construção subterrânea do AH-Laúca para o transporte e manutenção, dentre os diferentes critérios seguidos como os tipos de escavação, a caracterização e classificação do maciço rochoso e a definição da secção transversal a dimensionar tendo em contas os diferentes métodos.

3.1. AVALIAÇÃO GEOMECÂNICA DO MACIÇO ROCHOSO DA ÁREA DE ESTUDO

A caracterização geomecânica tem papel de destaque entre as fases de um projecto, pois é determinante desde a concepção até o monitoramento, já com a obra construída, para verificação e possíveis ajustes nos elementos do túnel.

Com base nela é possível definir o perfil do subsolo, determinar as propriedades e características do maciço rochoso, definir condições hidrogeológicas, identificar riscos, etc.

De acordo com a Intertechenne Consultores S.A (2014), a região do aproveitamento hidroelétrico de Laúca é composta por rochas metassedimentares derivadas de arenitos, siltitos e rochas cristalinas mais antigas, predominantemente gnaisses. Devido ao baixo grau metamórfico das rochas metasedimentares, que preservou a estrutura original.

Observando os resultados dos ensaios realizados em amostras de rocha, nota-se uma variação coerente nos valores de resistência à compressão uniaxial nas diferentes unidades litológicas. Os gnaisses e arenitos silicificados são as rochas de maior resistência, enquanto os siltitos e arenitos porosos apresentam valores menores. Os resultados de módulo de deformação estático e do coeficiente de Poisson estão apresentados para as taxas de aplicação de 30% e 50% da carga de ruptura dos corpos de prova.

3.2. SELECÇÃO E DIMENSIONAMENTO DA SECÇÃO TRANSVERSAL DO TÚNEL DE ACESSO.

A forma da secção transversal de uma escavação horizontal, se estabelece tendo em conta uma série de factores, tais como:

- As propriedades físico-mecânicas;
- Estabilidade das rochas;
- Magnitude e direcção da pressão

Para este projecto, determinou-se utilizar como secção transversal para a escavação de paredes rectas e teto abobadado de três centros, considerando a dimensão que terá a escavação e aproximação com abobada de equilíbrio natural, correspondente a alteração do estado tensional do maciço a variante de forma mais segura.

Para o dimensionamento de uma escavação há que ter em conta uma série de factores entre os quais estão:

- Destino da escavação
- Dimensões dos equipamentos a utilizar
- Forma em que se prevê que transite o pessoal por ela
- Quantidade de ar que por ela deve passar, segundo os requisitos estabelecidos pelas regras de segurança.

As Dimensões da secção transversal das escavações podem determinar-se tanto por métodos gráficos como analíticos:

A essência do método gráfico consiste em representar um papel as dimensões dos equipamentos de transporte que se vão a utilizar, os espaços de segurança entre eles e os contornos das escavações, tendo em conta os espaços para o passo do pessoal previstos pela regra de segurança com o que se obtêm a secção útil da escavação.

No caso do método analítico as dimensões determinam-se mediante o cálculo, tendo em conta os parâmetros das locomotoras e vagões, assim como o espaço de segurança recomendados sobre a base dos materiais de fortificação utilizados.

Os trabalhos de escavação subterrânea, em particular do projecto AH-Laúca, nos requisitos de segurança, produtividade, bem como o conceito técnico para execução das escavações (equipes, equipamentos, metodologia) tem como um dos principais aliados/ objetivos a segurança e qualidade da mesma. Para a execução dos trabalhos de escavações subterrâneas, Laúca faz o uso dos seguintes equipamentos de carga e transporte. **(Ver tabela 7)**

3.3.1. *Ciclo de Escavação*

A escavação do Túnel de acesso foi realizada por desmonte com uso de explosivos, cujo ciclo básico de avanço é constituído, de uma forma geral e simplificada, pelas seguintes fases:

- Marcação topográfica do plano de fogo;
- Perfuração;
- Carregamento dos furos,
- Ligação e detonação;
- Ventilação e iluminação;
- Carga e transporte de escombros resultante da escavação;
- Limpeza das paredes e abóboda da frente detonada, com jato de ar e água,
- Bate-choco;
- Carregamento
- Mapeamento geológico e classificação geomecânica do maciço rochoso;
- Aplicação dos tratamentos indicados;
- Revisão sistemática de chocos formados em trechos já escavados e sua retirada.

Tabela 7- Equipamentos de Carga e Transporte

EQUIPAMENTO	CARACTERISTIICAS TECNICAS	ACTIVIDADES
Jumbo	Profundidade máxima: 5.0 m, Diâmetro: 32 – 65 (mm), Quantidade de braços:3 ou mais unids ,Altura máxima de perfuração: 7.895 m	Perfurar todos os furos previstos no plano de fogo
Escavadeira Giratória	Peso operacional de 811 toneladas e capacidade de 45m ³ nacaçamba suporta até 75t em uma única caçambada	Utilizadas para fazer escavações
Retroescavadeira	Volvo 6 cilindros em linha, motor a diesel de 4 tempos turbo-alimentado	Utilizado para terraplanagem
Perfuratriz	Profundidade máxima: 5.0 m, Diâmetro: 32 – 65 (mm), Quantidade de braços:3Und,Altura máxima de perfuração: 5.895 m	Realiza perfurações em solos ou rochas, com objectivo de produzir um furo ou poço até uma certa profundidade.
Rompedor Hidraulico	Potencia bruta de 123,4 hp e peso operacional de 1.771kg.	Utilizada para perfurar, demolir ou compactar
Camihão Dumper	Volume da caçamba: 29.6 m ³ . Altura no lugar de descarga: 9798 mm,Motor: diesel	Transporte dos materiais desmontados
Pá carregadeira	Altura máxima de descarga: 4910 mm, Capacidade da colher: 4.5 m ³	Retirar o material desmontado para p caminhão

3.3.2. Dimensionamento da escavação

Dados do projecto para o dimensionamento da escavação:

- Largura: 10 m
- Altura: 12 m
- Forma da abobada com paredes rectas e de três (3) centros
- Longitude da escavação: 100 m
- Material de fortificação: Betão projectado

a) *Determinação da largura da escavação fortificada*

$$B = m + Z \times A + p + n$$

$$B = 0,5 + 2 \times 3,5 + 1,3 + 0,8$$

$$B = 9,6 \text{ m}$$

Onde:

B - largura da escavação fortificada

Z - número de vias (2)

m - espaço entre as paredes e os caminhões (0.5)

A - largura do caminhão (3.5)

n - espaço para a passagem do pessoal (0.8)

p - espaço entre as vias (1,3)

b) *Altura da abobada da escavação em (m)*

$$h_b = \frac{B}{3} = \frac{9,6}{3} = 3,2 \text{ m}$$

Onde:

h_b – Altura da abobada

c) *Altura útil da parede da escavação (h_1)*

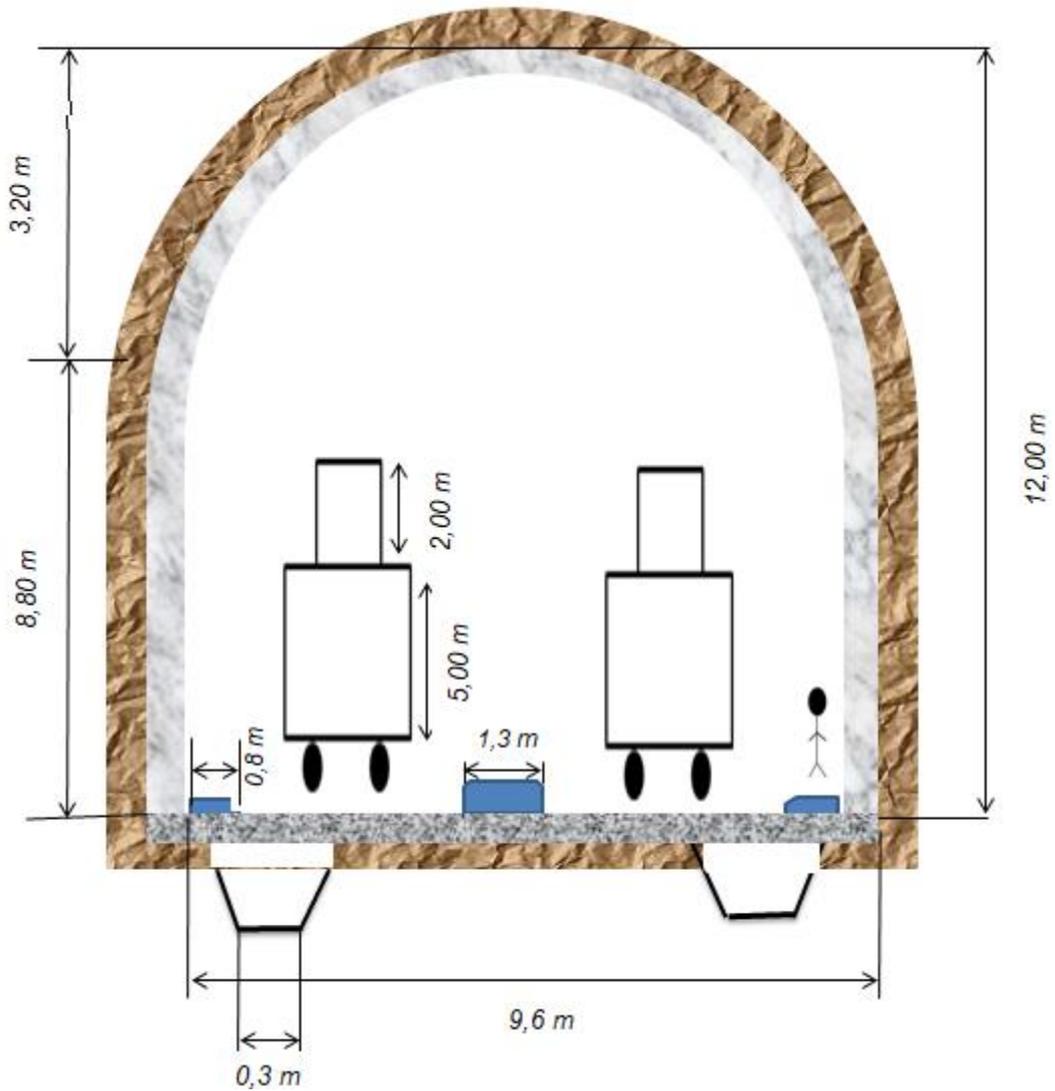
h_p – altura da parede da escavação

$$h_p = h_u - h_b$$

$$h_p = 12 - 3,2$$

$$h_p = 8,80 \text{ m}$$

Ilustração da escavação a dimensionar



Tendo em conta, número de vias, a largura dos equipamentos, o espaço do pessoal a escavação a construir terá as dimensões acima apresentado e a figura a ilustrar ver em anexos 1.

d) *Área útil da escavação (m²)*

$$S_u = B(h + 0,26 \times B)$$

$$S_u = 9,6 \times (12 + 0,26 \times 9,6)$$

$$S_u = 139,16m^2$$

- *Cálculo dos raios da abóbada.*

a. Raio central

$$R = 0,692 \times B \rightarrow R = 0,692 \times 9,6$$

$$R = 6,643 \text{ m}$$

b. Raio lateral.

$$r = 0,262 \times B \rightarrow r = 0,262 \times 9,6$$

$$r = 2,52 \text{ m}$$

- *Largura do projecto (B_p).*

$B_p = B$ - Já que a fortificação se encontra no teto da escavação

$$B_p = 10 \text{ m}$$

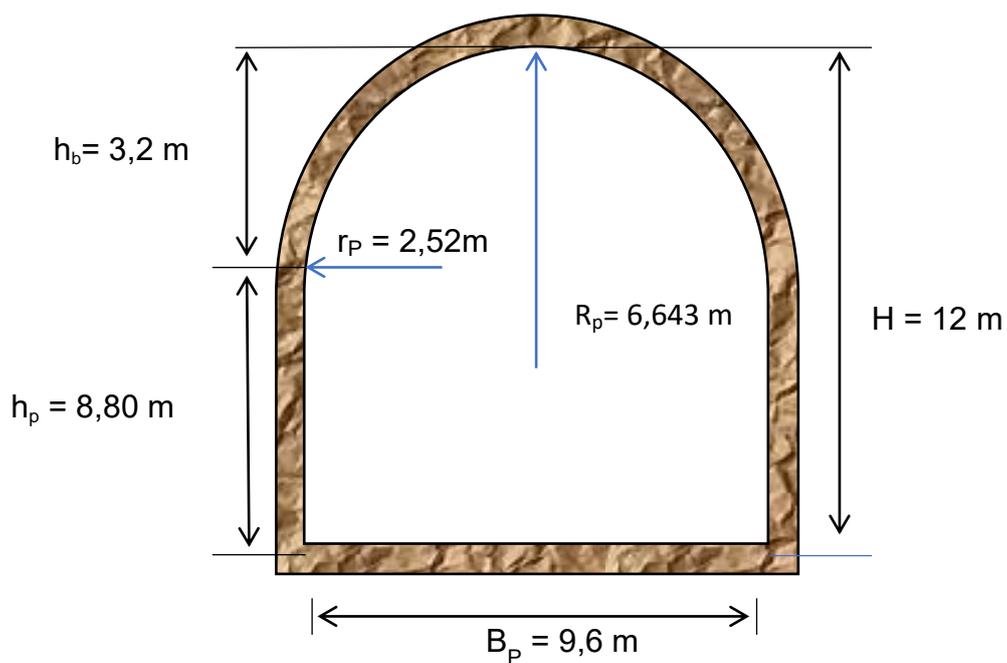
- *Área do projecto (m^2)*

$$S_p = B_p(h_p + 0,26 \times B_p)$$

$$S_p = 9,6 \times (12 + 0,26 \times 10)$$

$$S_p = 140,16 \text{ m}^2$$

Ilustração do dimensionamento da escavação projectada



Obs: a escavação a construir terá as dimensões final acima referenciada isto tendo em conta as dimensões ora apresentada em relação aos equipamentos, número de vias e espaço do pessoal etc., ver o anexo 2.

3.3.3.Cálculo dos parâmetros da fragmentação de rocha com explosivo.

- Calculo do Perímetro

$$P_e = 2,33 \times B + 2 \times h$$

$$P_e = 2,33 \times B + 2(h - 0,2)$$

$$P_e = 2,33 \times 9,6 + 2(12 - 0,2)$$

$$P_e = 45,97 \text{ m}$$

a) *Eleição da substancia explosiva Riogel Kupula*

Para a eleição do tipo da substância explosiva e os meios de explosão levou-se em conta a dimensão do projecto, de acordo com o pó e os gases, fortaleza da rocha e o agretamento (fissuras) das rochas o método de explosão, bem como o fluxo de água na escavação.

- Cartuchos de 64 mm de diâmetro.
- 600 mm de comprimento
- Cartucho Peso 2273 g
- Densidade 1,2g/cm³
- Velocidade de detonação 4200m - 4800 m/seg.
- Capacidade de trabalho (Ct) de 450 cm³
- Determinação do número de furos na frente.

b) Cálculo do coeficiente que relaciona a capacidade de trabalho (e).

$$e = \frac{C_T}{C_{tp}} = \frac{450}{360}$$

$$e = 1,25$$

Onde:

C_{tp} : capacidade de trabalho do padrão de substância explosiva Amonite (360 - 380 cm^3).

C_t : capacidade de trabalho da substância com a qual estamos a trabalhar (450 cm^3)

c) *Determinação do custo de materia explosiva (q)*

$$q = q_o \times e \rightarrow q = 1,6 \times 1,25 = 2\text{kg}/\text{m}^3$$

d) *Determinação da quantidade de furos na frente*

$$N = 12,7 \frac{q \times S_p}{\gamma \times (d_c)^2 \times \rho}$$

$$N = 12,7 \frac{1,6 \times 140,16}{0,6 \times (6,4)^2 \times 1,2}$$

$$N = 96,57 \approx 97 \text{ furos}$$

Onde:

q: Gasto específica da SE (1,6 kg/m^3)

S_p : área da secção transversal (140,16 m^2)

γ : coeficiente de enchimento dos furos com SE tabela 8.6 (0,6)

d_c : Diâmetro Cartuchos (64mm)

ρ : Densidade da substância explosiva nos cartuchos (1,2 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)

e) *A determinação do tipo de corte e o número de furos em cada grupo*

Tendo em conta a fortaleza da rocha (8 – 10), tomando 8 e as características do maciço utilizaremos o tipo de corte cunha vertical segundo o livro de texto fragmentação de rochas com explosivos.

Tomamos a relação 1:0.5:2

Onde:

$$m = 1 + a + b$$

$$m = 1 + 0,5 + 2$$

$$m = 3,5$$

Furos de corte (N_c)

$$N_c = \frac{N \times 1}{m} = \frac{97 \times 1}{3,5} = 27,71 \text{ furos}$$

Furos de arranque (N_a)

$$N_a = \frac{N \times a}{m} = \frac{97 \times 0,5}{3,5} = 13,86 \text{ furos}$$

Furos de contorno (N_{co})

$$N_{co} = \frac{N \times b}{m} = \frac{97 \times 2}{3,5} = 55,43 \text{ furos}$$

Reajuste:

$$N_c = 28 \text{ furos}$$

$$N_a = 14 \text{ furos}$$

$$N_{co} = 55 \text{ furos}$$

f) *A escolha do tipo de corte e profundidade dos furos.*

Para a perfuração será tomada em conta os furos corte cunha vertical com uma perfuração (profundidade) de 2,5 m em função da máquina perfuradora a ser usada. Pois ela determina-se em dependência da fortaleza e da explosibilidade das rochas, a área da secção transversal, a potencia da maquina perfuradora e a substância explosiva.

$$P^1 = 2,5 \text{ m}$$

g) *Determinação do gasto de SE por ciclo ou consumo (Q).*

$$Q = q \times S_p \times P^1 = 1,6 \times 140,16 \times 2,5 = 560,64 \text{ kg}$$

P¹: Profundidade do conjunto de orifícios.

h) *Determinação da massa média da carga no furo (q_m).*

$$q_m = \frac{Q}{N} = \frac{560,64}{97} = 5,78kg$$

i) *Cálculo da massa de carga dos furos de cada grupo.*

$$q_c = (1,1 - 1,2) \times q_m$$

$$q_c = 1,2 \times 5,78 = 6,94kg$$

$$q_a = q_m = 5,78kg$$

$$q_{co} = (0,85 - 0,95) \times q_m$$

$$q_{co} = 0,95 \times 5,78 = 5,49kg$$

j) *Número de cartuchos*

$$n_c = \frac{q_c}{q'} = \frac{6,94}{2,273} = 3,05 \approx 3 \text{ cartuchos}$$

$$n_a = \frac{q_a}{q'} = \frac{5,78}{2,273} = 2,53 \approx 3 \text{ cartuchos}$$

$$n_{co} = \frac{q_{co}}{q'} = \frac{5,49}{2,273} = 2,42 \approx 2 \text{ cartuchos}$$

q' - Massa dos cartuchos utilizados

• *Novo cálculo da massa de carregamento*

$$q_c = q' \times n_c = 2,273 \times 3 = 6,81kg$$

$$q_a = q' \times n_a = 2,273 \times 3 = 6,81kg$$

$$q_{co} = q' \times n_{co} = 2,273 \times 2 = 4,54kg$$

k) *Determinação do gasto real de matéria explosiva*

$$Q_r = q_c \times N_c + q_a \times N_a + q_{co}(N_{co} - 1) + q_c$$

$$Q_r = 6,81 \times 28 + 6,81 \times 14 + 4,54(55 - 1) + 6,81$$

$$Q_r = 537,99 \text{ Kg}$$

l) Determinação do coeficiente real de enchimento dos furos de cada grupo.

Furos de corte:

$$l_c = \frac{P}{\text{sen}90^\circ} = 2,5$$

$$\gamma_c = \frac{L \times n_c}{l_c} = \frac{0,6 \times 3}{2,5} = 0,72$$

Furos de arranque:

$$l_a = P' = 2,5$$

$$\gamma_a = \frac{L \times n_a}{l_a} = \frac{0,6 \times 3}{2,5} = 0,72$$

Furos de contorno:

$$\gamma_{co} = \frac{L \times n_{co}}{l_{co}} = \frac{0,6 \times 2}{2,5} = 0,48$$

$$\tan \alpha^1 = \frac{P'}{0,2 + 0,1} = \frac{2,5}{0,3} = 8,33$$

$$\alpha^1 = \tan^{-1}8,33$$

$$\alpha^{-1} = 83,15^\circ$$

$$l_{co} = \frac{P'}{\text{sen}83,15^\circ} = \frac{2,5}{0,99} = 2,5$$

l_c, l_a, l_{co} : longitude dos furos de corte, arranque e contorno respectivamente;

L : longitude dos cartuchos

m) Distribuição dos furos na secção transversal da escavação

- Cálculo da distância média entre os furos de contorno.

$$d_m = \frac{P_e}{N_{co}} = \frac{45,97}{55} = 0,84 \text{ m}$$

P_e – perímetro da escavação, m.

- Determinação dos número furos no piso.

$$N_{cop} = \frac{B - 0,4}{dm} + 1 = \frac{9,6 - 0,4}{0,84} + 1 = 11,95 \approx 12 \text{ furos}$$

- Recalcular a distância do dcop.

$$dcop = \frac{B - 0,4}{N_{cop} - 1} = \frac{9,6 - 0,4}{11,95 - 1} = 0,84 \text{ m}$$

- Determinação do número de furos na lateral

$$N_{col} = \frac{h - 0,4}{dm} = \frac{12 - 0,4}{0,84} = 13,80 \approx 14 \text{ furos}$$

- Recalcular a distância entre os furos na lateral.

$$d_{col} = \frac{h - 0,4}{N_{col}} = \frac{12 - 0,4}{14} = 0,82 \text{ m}$$

- Determinação de números de furos através do tecto

$$N_{cot} = N_{co} - N_{cop} - 2N_{col}$$

$$N_{cot} = 55 - 12 - 2 \times 14 = 15 \text{ furos}$$

- Distância de furos no tecto

$$d_{cot} = \frac{1,33(B - 0,4)}{N_{cot} + 1} = \frac{1,33 \times 9,20}{15 + 1} = 0,76 \text{ m}$$

Quanto ao esquema de detonação optamos por usar os detonadores não eléctricos.

OBS: o esquema de distribuição de furos calculado encontram-se em anexo 3.

n) Determinação dos índices técnicos- económicos

Avanço por ciclo

$$I = P' \times \delta = 2,5 \times 0,9 = 2,25 \text{ m}$$

Sendo: δ – coeficiente de utilização dos furos (0,9)

P' - profundidade

- Metros cúbicos de rocha a arrancar no maciço

$$V_r = S \times I = 139,5 \times 2,25 = 313,87 \text{ m}^3$$

I – avanço de ciclo

- Quantidade total de metros de perfuração

$$L_p = l_c \times N_c + l_a \times N_a + l_{co}(N_{co} - 1) + 1 \times l_{coz}$$

$$L_p = 2,5 \times 28 + 2,5 \times 14 + 2,5 (53) + 1 \times 2,5$$

$$L_p = 240 \text{ m}$$

$$\tan B = \frac{P^1}{(0,2 + 0,25)} = \frac{2,5}{0,45} = 5,55$$

$$B = \tan^{-1} 5,55$$

$$B = 79,78^\circ$$

$$\text{sen}B = \frac{P^1}{l_{coz}}$$

$$l_{coz} = \frac{P^1}{\text{sen}B} = \frac{2,5}{0,98} = 2,55 \text{ m}$$

- Metros de perfuração por metro de avanço em um ciclo.

$$Lp' = \frac{Lp}{I} = \frac{240}{2,25} = 106,66 \text{ m / metros de avanço}$$

- Metros de perfuração por metros cúbicos de rochas a arrancar.

$$Lp' = \frac{Lp}{Vr} = \frac{240}{317,87} = 0,75m^3$$

Vr – metros cúbicos de rochas a arrancar no maciço

- Despesas de substância explosiva por metros cúbicos de rocha a arrancar.

$$Gv = \frac{Qr}{Vr} = \frac{537,99}{317,87} = 1,69kg / m^3$$

Qr – gastos real de matéria explosiva

- Gastos de detonadores por metro de avanço.

$$Ndl = \frac{N}{I} = \frac{96}{2,25} = 42,6 \approx 43 \text{ detonadores/m}$$

- Gastos de detonadores por metros cúbicos de rochas a arrancar.

$$Ndv = \frac{N}{Vr} = \frac{96}{317,87} = 0,38 \text{ Detonadores /m}^3, \text{ assumiremos 1 detonador /m}^3$$

Utilizaremos como material de enchimento a areia, a qual apresenta uma densidade de $(2.7 - 3) \text{ kg/dm}^3$.

- Gasto do material de enchimento.

Gasto do material de enchimento para corte

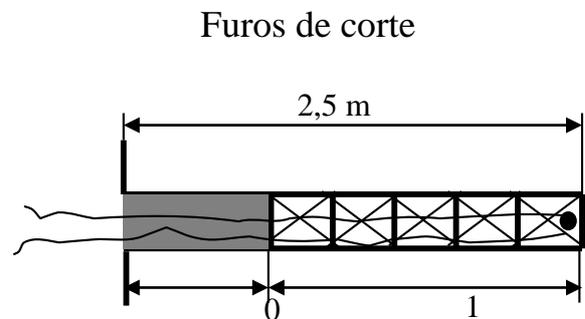
$$Vrc = S \times l = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 \times lr$$

$$Vrc = 3,14 \left(\frac{0,064}{2}\right)^2 \times 0,7$$

$$Vrc = 0,0022m^3$$

$$Vrc = 0,0022m^3 \times Nc$$

$$Vrc = 0,0022m^3 \times 28$$



$$V_{rc} = 0,06m^3$$

$$l_{carga} = C_{cartucho} \times N_c$$

$$l_{carga} = 0,6 \times 3 = 1,8 m$$

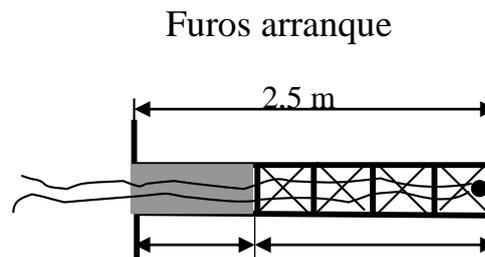
Gasto do material de enchimento para arranque

$$V_{rc} = 0,0022m^3 \times N_a$$

$$V_{rc} = 0,0022m^3 \times 14$$

$$V_{rc} = 0,03m^3$$

$$l_{carga} = 0,6 \times 3 = 1,8 m$$



- Gasto do material de enchimento para contorno

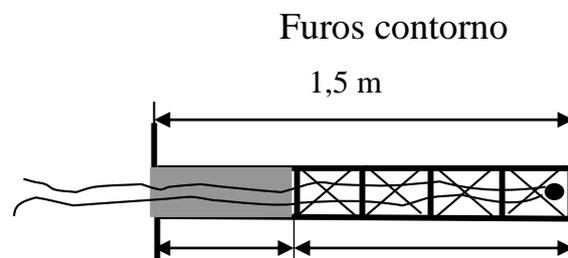
$$V_{rc} = 0,0022m^3$$

$$V_{rc} = 0,0022m^3 \times N_{co}$$

$$V_{rc} = 0,0022m^3 \times 55$$

$$V_{rc} = 0,12m^3$$

$$l_{carga} = 0,6 \times 2 = 1,2 m$$



- Gasto total do material de enchimento

$$V_t = V_{rc} + V_{ra} + V_{rco} = 0.0616 + 0.0308 + 0.1188$$

$$V_t = 0.2112m^3 = 21,12dm^3$$

$$V_t = 21,12dm^3 * 2.7kg / dm^3$$

$$V_t = 57,02kg$$

3.4. SUSTIMENTO OU FORTIFICAÇÃO DAS ESCAVAÇÕES

A fortificação é uma das tarefas fundamentais ao projectar uma escavação, ela deve cumprir com uma série de exigências tanto técnicas, produtivas como económicas por exemplo:

- Sua resistência deve permitir a assimilação da carga que atua sobre ela dentro de determinados limites;
- Deve ser estável, conservando sua forma inicial abaixo da acção de cargas;
- Sua localização não deve dificultar os processos produtivos;
- Na escavação, a fortificação deve ocupar o menor espaço possível;
- Os gastos de construção e manutenção da fortificação devem ser mínimos.

Factores que influenciam na eleição de um ou outro tipo de fortificação:

1. Vida de serviço
2. Magnitude do projecto
3. Forma e dimensão da secção da escavação.
4. Condições geológicas
5. Destino da escavação

Também temos de ter em conta aos custos económicos quando elegemos o tipo de fortificação, o tempo de vida útil ou de serviço, o tipo de rochas, sua fortaleza e estabilidade do maciço.

- Material de fortificação e tipo de fortificação elegido

Neste caso que nos ocupa, tivemos em conta a zona de construção de um túnel de adução, que servirá como passagem de água para produção de energia eléctrica, considerando que a rocha é muito estável fortificou-se com betão projectado. Para calcular a pressão na nossa escavação determinamos usar a hipóteses de Protodiakonov. Ao qual prevê que sobre a escavação se forma uma abobada de

equilíbrio natural que descarrega no tecto da escavação da carga produzida pela rocha que se encontra por cima da dita abobada.

3.4.1. Cálculo da fortificação

- Cálculo da longitude dos parafusos:

$$l_a = l_1 + l_2 + l_3 \text{ (m)}$$

$$l_a = 0,08 + 0,54 + 0,4 = 1,02 \approx 1 \text{ m}$$

$$l_2 = \frac{2 \times a}{f} \rightarrow l_2 = \frac{2 \times 2,19}{8} = 0,54 \text{ m}$$

l_1 : parte do parafuso saliente na escavação (se toma de 4 a 10cm).

l_2 : espessura da capa da rocha fracturada que se quer fortificar, m.

l_3 : longitude do fechamento (oscila de 30 a 40cm).

- Cálculo da área de contacto dos pernos com a rocha:

$$S_c = \frac{1}{2} K \times l_r = \frac{1}{2} \times 0,035 \times 0,15 = 0,0026 \text{ m}^2 \times 10^4 = 26 \text{ m}^2$$

- Resistencia de fixação do fechamento:

$$R_f = K \times S_c \times f \times \sqrt[3]{h_u(\text{sen}\alpha + f \times \text{cos}\alpha)}$$

Onde:

K: coeficiente que depende do tipo de rocha (1)

f: fortaleza da rocha segundo M. M. Protodiakonov (8)

h_u : profundidade por meio de penetração dos extremos dos pernos;

$$h_u = \frac{l_{MAX}}{2} = \frac{0,15}{2} = 0,075 \text{ m}$$

α : ângulo máximo entre o cono e o eixo do perno = $5,54^\circ$

$$R_f = 1 \times 0,0026 \times 10 \times \sqrt[3]{0,075(\text{sen}5,54^\circ + 10 \times \text{cos}5,54^\circ)}$$

$$R_f = 0,023t$$

- Cálculo da força normal que atua na superfície dos pernos:

$$N_o = \frac{S_c \times \sigma_R}{2 \times m} \times l_r = \frac{26 \times 5,06}{2 \times 2} \times 0,15 = 4,9t/m$$

$$\sigma_R = 7 \times \sigma_c = 7 \times 0,724 = 5,06t/cm^2$$

Onde:

σ_R → limite de resistência da rocha durante a pressão de torque, é determinado em condições de laboratoriais, ou pode tomar-se orientativamente como 7 vezes o valor da resistência a compressão linear; $\sigma_R = 7 \sigma_c$

σ_c : Resistência a compressão linear = $724,77 \text{ kg/cm}^2 \times 10^{-3} = 0,724 \text{ t/cm}^2$

m: Coeficiente de reserva (2 – 3);

S_c : Área de contacto do perno na rocha: 17 cm^2

- Cálculo da capacidade portadora dos pernos:

$$F_c = 2 \times N_o(\text{sen}\alpha + f_0 \times \text{cos}\alpha)$$

$$F_c = 2 \times 4,3(\text{sen}5,54^\circ + 0,6 \times \text{cos}5,54^\circ) = 5,84t/m$$

Onde:

f_0 : coeficiente de fricção entre o aço e a rocha (0,30 – 0,60);

- Distancia entre pernos.

$$a = \sqrt{\frac{F_c}{1,2 \times l_2 \times \gamma_v}} = \sqrt{\frac{5,84}{12 \times 0,54 \times 2,66}} = 1,84 \text{ m} \approx 2 \text{ m}$$

Onde:

γ_v : masa volumétrica da rocha = $2,66 \text{ t/m}^3$

$l_2 = 54 \text{ cm} = 0,54 \text{ m}$

- Cálculo da densidade dos pernos ou parafusos.

$$Na = \frac{L}{Da} \times 3 = \frac{100}{2} \times 3 = 150 \text{ parafusos}$$

Onde:

L: Longitude da escavação: 100 m

Da: Distancia entre os pernos: 2 m

CONCLUSÃO

O presente trabalho descreveu os princípios necessários para a construção subterrânea de uma escavação, com destaque nos parâmetros necessários para o dimensionamento de secção transversal. Além disso, destacamos os princípios e conceitos sobre dimensionamento de uma escavação subterrânea.

A barragem de Laúca foi apresentada, destacando as suas características geológicas-geotécnicas. Os parâmetros utilizados para abertura de uma cavidade para a construção de túnel foram determinadas e mostrados como:

- Durante o processo da construção subterrânea, parâmetros como a caracterização geológica e geomorfológica feita pela Intertechene Consultores determinou que a área em estudo é constituída por unidades litológicas Pré-Cambrianas, compostas essencialmente por gnaisses. A área apresenta formações paleozoicas de rochas metassedimentares que foram depositadas em discordância erosiva subhorizontal sobre um embasamento gnaissico pré-cambriano, com aproximadamente 100 m de espessura.
- Para este projecto, determinou-se utilizar como secção transversal para a escavação de paredes rectas e teto abobadado de três centros, considerando a dimensão que terá a escavação e aproximação com abobada de equilíbrio natural, correspondente a alteração do estado tensional do maciço a variante de forma mais segura.
- A escavação do Túnel de Adução foi realizada por desmonte com uso de explosivos, as dimensões estabelecida são aproximadamente 10 de largura, 12 de comprimento e 100 metros de longitude da escavação.

Tendo o conhecimento das características geológicas-geotécnicas da área em questão, permitiu dar início no processo de dimensionamento da secção transversal, sendo estabelecido a forma de secção transversal para a escavação, paredes rectas e teto abobada de três centros, levando em conta a dimensão que tem a escavação.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objectivo da caracterização da qualidade do maciço rochoso é determinar as diferentes características e qualidade ao longo do modelo do maciço rochoso, principalmente, nas regiões com maiores descontinuidades e falhas. Por essa razão, para garantir uma maior preservação e representatividade dos dados iniciais presentes, fez-se necessário adoptar estratégias de busca e definição dos parâmetros para o dimensionamento da secção transversal definida. A sobre estimativa do RMR, ou Sistema Q pode acarretar alteração da classe do maciço rochoso e trazer riscos às operações em subsolo.

Assim, conhecendo-se a finalidade do túnel, as características do maciço na qual ocorrerá a escavação, sua profundidade, a ocupação da superfície sobre o túnel, suas directrizes geométricas, sua extensão, a taxa de avanço requerida e a modalidade contratual a ser adoptada, é possível avaliar cada metodologia construtiva. Em havendo mais do que uma alternativa viável, procede-se uma selecção viável da secção transversal. É necessário citar, porém, que, para um único túnel, as variáveis intervenientes na escolha do método construtivo são de extrema importância para uma correcta escolha do tipo selecção.

Para estudos futuros que tratem da construção de túneis subterrânea de uma barragem e não só, deve procurar fazer um estudo bem detalhados e ter a informações geológicas-geotecnicas correctas do maciço rochoso para uma construção correcta da escavação subterranea, pois que dados errados do maciço podem causar danos irreversíveis quer material e financeiros.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CHOQUET, P., HADJIGEORGIOU, J. "Design of support for Underground Excavations", JA Hudson (ed.), v. 4, p. 313–348, 1993. .

COATES, D. F., COCHRANE, T. S. Development of design specifications for rock bolting from research in Canadian mines. [S.l.], Information Canada, 1970. v. 224

Cai, M.; Kaiser, P. K.; Tasaka, Y.; Minami, M. (2007) "Determination of residual strength parameters of jointed rock masses using the GSI system". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 44, 247-265.

Grimstad, E y N. Barton, (1993). "Updating of the Q-System for NMT". Proc. of the International Symposium on Sprayed Concrete – Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support, Fagernes. Oslo: Norwegian Concrete Assn.

Hoek, E., Carranza-Torres, C. and Corkum, B. (2002). "Hoek-Brown criterion – 2002 edition". Proc. NARMS-TAC Conference, Toronto, 2002, 1, 267-273.

Hoek, E.& M. S.Diederichs (2005). Empirical Estimation of Rock Mass Modulus. Bull. Eng. Geol. Env. 65/2.

Serafim, L. e P. Pereira (1983). Considerations on the geomechanical classification of Bieniawski. Int. Symp. on Eng. Geology and Underground Construction. Lisboa.

Outros elementos consultados:

Especificações Técnicas de Auscultação. Intertechne, Fevereiro 2015. Nota Técnica de Obra – OP072 – Leituras de instrumentação anormais e aparecimento de fissuras no betão projectado, entre as progressivas 0+100 e 0+145 na parede de jusante da caverna da Casa de Força. Intertechne. Outubro 2014.

Nota Técnica de Obra – OP235 – Metodologia para aplicação do tratamento para as cunhas críticas definidas no projecto de tratamento dos Túneis de Adução fora do ciclo de produção. Intertechne. Março 2016.

Nota Técnica de Obra – OP236 – Metodologia para determinação dos drenos a proteger com tela de nylon. Intertechne. Março 2016. Relatório final da execução das obras subterrâneas. Coba/Lahmeyer. Fevereiro 2016.