

TRATAMENTO DA FUNDAÇÃO DA BARRAGEM DE PEQUENOS LIBOMBOS*

Foundation treatment of Pequenos Libombos dam

por

E. MARANHA DAS NEVES**

A. S. COSTA PEREIRA***

J. T. VEIGA FRADE****

RESUMO — Localizada no rio Umbeluzi, a barragem dos Pequenos Libombos destina-se ao abastecimento de água à cidade de Maputo, ao regadio de 16 000 ha e ao controlo das cheias. Trata-se duma barragem de terra e betão com 46 m de altura e um desenvolvimento do coroamento de cerca de 1500 m. A capacidade útil da albufeira será de 350 hm³. Actualmente a barragem está em construção, tendo-se iniciado o desvio do rio em Maio de 1983.

Do ponto de vista geológico a fundação da barragem desenvolve-se, nas margens, em riolito e no vale em aluviões areno-siltosos sobrejacentes a basaltos.

Disseminados nestes últimos ocorrem tufo vulcânicos muito alterados a medianamente alterados, com espessura variando entre duas dezenas de cm a cerca de 2 m. Estas «camadas» de tufo apresentam-se bastante descontínuas.

Na margem esquerda foi detectada uma bolsada de solo bentonítico resultante da alteração de riolito.

Dada a existência das aluviões permeáveis que podem atingir os 20 m de possança houve que estudar o controlo da percolação na fundação. A opção final foi entre a realização duma parede moldada conjugada com um corta-águas parcial ou a execução dum corta-águas total; analisam-se assim as razões que permitiram decidir pela última solução tendo em linha de conta as múltiplas variáveis de natureza geotécnica em jogo: localização, nível freático, permeabilidade e deformabilidade das aluviões, eventual localização de blocos junto ao bedrock, etc.

Apontam-se os detalhes da solução, quer do tipo executivo quer os relacionados com a adequada transição entre o sistema de tratamento na fundação aluvionar (corta-águas com tratamentos muito localizados por injeção das aluviões) e na fundação rochosa (tapete de injeção, «laje» em betão e cortina de injeção profunda).

O descarregador está fundado em basalto são e face às características geotécnicas desse maciço apresentam-se as soluções do tratamento da fundação tendo em consideração os aspectos de estanqueidade e estabilidade.

* Comunicação apresentada ao XV Congresso Internacional das Grandes Barragens, Lausanne, 1985.

** Engenheiro Consultor, Investigador Coordenador e Chefe do Departamento de Geotecnia, LNEC.

*** Geólogo de Engenharia Consultor, Cêgé, Consultores para Estudos de Geologia de Engenharia, Lda.

**** Engenheiro Consultor, Hidroprojecto, Consultores de Hidráulica e Salubridade, SARL.

SYNOPSIS — The Pequenos Libombos dam located on the Umbeluzi river is intended for water supply to Maputo, for irrigation of an area of 16 000 ha and for flood control. It is a composite earth and concrete dam, 46 m high, with a crest length of about 1600 m. Its effective reservoir capacity will amount to $350 \times 10^6 \text{ m}^3$. The dam is now being constructed, for wich river diversion began in May 1983.

From the geological point of view, the foundation of the dam consist of rhyolites in the banks and of silt-sand alluvia overlying basalts in the valley.

Interbedded with the basalts there are considerably weathered to moderately weathered volcanic tuffs whose thickness varies from two tens of centimeters to about 2 m. These tuff «layers» do not display lateral continuity.

In the left bank a bentonitic pocket was detected which resulted from alteration of the rhyolite.

Due to the permeable alluvia which may reach 20 m in thickness, control of seepage in the foundation had to be studied. At last a final decision had to be taken: either to perform a diaphragm wall associated with a partial cut off, or to perform a total cut off. The reasons behind the choice of the second alternative are analysed taking into account the multiple geotechnical variables at stake: location, water table level, permeability and deformability of alluvia, possible occurrence of blocks near the bedrock, etc.

The solution chosen is dealt with in detail both as regards execution and a suitable transition between the grouting system of the alluvia foundation (cut off with localized grouting of alluvia) and of the bedrock (grout blanket, concrete slab and deep grout curtain).

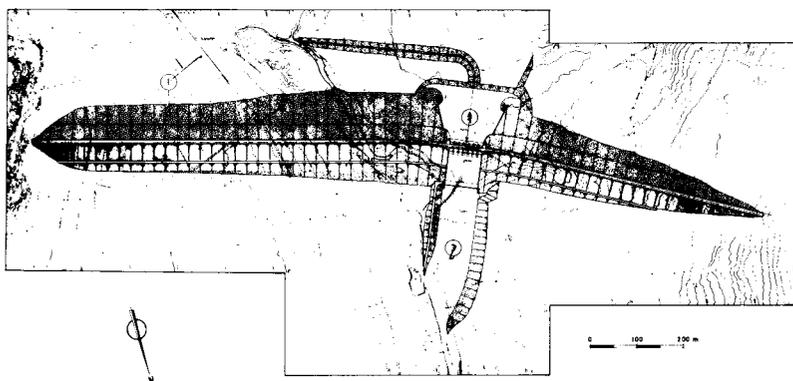
The spillway is founded on sound basalt. Taking into account watertightening and stability, foundation treatment solutions, fit for the geotechnical characteristics of this rock mass, where addopted, which are presented in this paper.

1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

Localizada no Rio Umbeluzi, a cerca de 35 km de Maputo, capital da República Popular de Moçambique, a Barragem dos Pequenos Libombos pertence a um aproveitamento de fins múltiplos, destinado ao abastecimento de água daquela cidade ($7\,000\text{ m}^3/\text{h}$), rega duma área com aptidão agrícola de $16\,000\text{ ha}$ e controle de cheias.

A construção da barragem começou em princípios de 1983. Trata-se duma barragem mista de terra ($3 \times 10^6\text{ m}^3$) e betão ($0,2 \times 10^6\text{ m}^3$), com um desenvolvimento total de $1\,600\text{ m}$ e uma altura máxima sobre a fundação de 46 metros (Fig. 1), criando uma albufeira com uma capacidade de $350 \times 10^6\text{ m}^3$. O trecho em betão é composto dum descarregador de cheias principal e dum de emergência, com uma capacidade total de descarga de $6\,300\text{ m}^3/\text{s}$.

A secção da barragem domina uma bacia hidrográfica de $3\,900\text{ km}^2$, dos quais $3\,100\text{ km}^2$ se localizam na vizinha Suazilândia. O escoamento anual atinge $350 \times 10^6\text{ m}^3$.



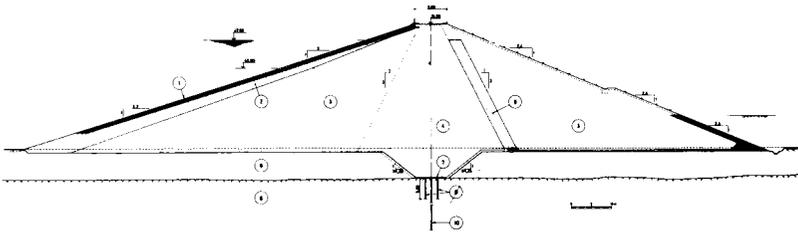
1 — Descarregador de cheias

2 — Canal de fuga

Fig. 1 — Implantação da barragem.

Os estudos da barragem começaram com um programa de exploração geológica subsuperficial em 1967. Na sua primeira versão o projecto, elaborado em 1974, previa a construção em duas fases. Posteriormente (1981) foi decidido construir numa só fase tendo-se recommçado os reconhecimentos geológicos. A concepção final trouxe algumas modificações à solução encarada em 1974, nomeadamente o deslocamento da estrutura do descarregador de cerca de 120 m para a margem esquerda, para assegurar melhores condições de fundação, assim como para reduzir os custos do desvio provisório. Além disso adoptou-se uma vala corta-águas como solução para o controlo da percolação na fundação da barragem de terra.

O perfil transversal tipo da barragem de terra (Fig. 2) é composto de material predominantemente argiloso, à excepção duma zona a montante, onde se prevê a utilização dum material arenoso. Nos aterros argilosos foi definido um «zonamento» do ponto de vista da quantidade de água para a colocação dos solos: numa zona central, formando um «núcleo» com paramentos inclinados 1H:2V, serão colocados solos com um teor em água de +1% relativamente ao teor óptimo do ensaio de compactação Proctor Normal. Este desvio, nos outros solos argilosos colocados fora deste «núcleo», será de -1%, isto, é do lado seco. Entre o talude de jusante do «núcleo» e o aterro de jusante, existe um filtro subvertical em contacto com um tapete drenante.



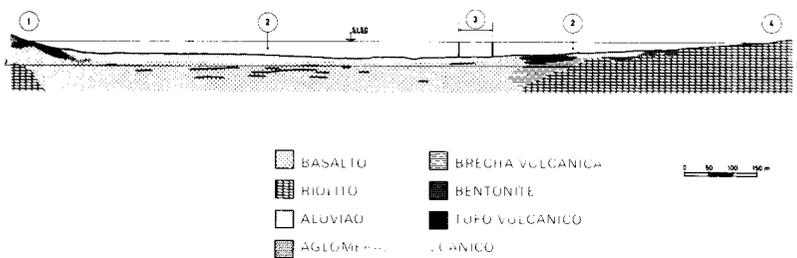
- | | |
|---------------------------|-------------------------|
| 1 – Enrocamento (rip-rap) | 6 – Tapete drenante |
| 2 – Transição | 7 – Aluvião |
| 3 – Maciço estabilizador | 8 – Betão |
| 4 – Núcleo | 9 – Rocha de fundação |
| 5 – Filtro | 10 – Cortina de injeção |

Fig. 2 — Perfil transversal tipo de barragem de terra

2 – CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS REGIONAIS E LOCAIS

À excepção de cerca de um terço da bacia hidrográfica localizada a montante, na Suazilândia, onde ocorrem formações metamórficas antigas anteriores ao sistema Pré-Câmbrico, a maior parte da bacia do Rio Umbeluzi é composta de uma rocha cristalina do tipo granitóide (granito antigo e gneisse) e de formações do sistema do Karoo.

Estas duas formações podem ser agrupadas em duas unidades litológicas principais, uma localizada para Oeste com rochas areníticas, xistosas e carbonatadas pertencendo às séries do ECCA; a outra consiste em formações vulcânicas da série Stormberg (basaltos e riolitos). Estas últimas formações constituem a rocha de fundação da barragem dos Pequenos Libombos (Fig. 3).



- 1 – Margem direita
- 2 – Barragem de terra
- 3 – Descarregador de cheias
- 4 – Margem esquerda

Fig. 3 — Perfil geológico da fundação da barragem

Assim o substrato rochoso do fundo do vale é composto por basaltos muito escuros, compactos e algumas vezes vacuolares, geralmente inalterados, com uma estrutura sub-horizontal. Embebido nos basaltos aparece um material avermelhado, variando entre pouco e muito alterado, sem continuidade lateral, correspondente a diferentes fases da erupção do magma. Trata-se de tufos basálticos.

As margens do rio consistem em formações riolíticas, mais antigas que os basaltos, de grão fino e cor avermelhada, apresentando por vezes um aspecto homogéneo e porfiróide na margem direita e uma estrutura fluída e vesicular na margem esquerda. Nalguns pontos do eixo da barragem as formações riolíticas encontram-se totalmente alteradas em bolsas argilosas do tipo bentonítico.

Ainda na margem esquerda e no contacto entre os basaltos e os riolitos ocorre uma brecha vulcânica em geral moderadamente alterada.

Sobre a rocha de fundação, no fundo do vale, ocorrem formações aluviais do Quaternário, formadas por depósitos arenosos e silto-arenosos, com espessuras de 20 m. Estas formações aluviais cobrem todo o vale à excepção das áreas mais altas das margens (acima da cota 35). À superfície da margem direita e desenvolvendo-se por baixo da aluvião, ocorre uma formação coluvial e eluvial de um aglomerado de cascalho riolítico numa matriz silto-argilosa.

No contacto entre a aluvião e a rocha de fundação pode encontrar-se uma fina camada de cascalho. Exceptua-se a base da margem direita onde, devido à presença do leito fóssil do rio Umbeluzi, a espessura do cascalho atinge cerca de 5 metros.

As formações basálticas e riolíticas apresentam uma orientação NNE-SSW, com uma inclinação de 5° a 10° para SW. A assimetria morfológica do vale, acentuada pelas escarpas da margem direita, apontava para a ocorrência duma falha na base da vertente, que não se veio a confirmar.

Se bem que a fotografia aérea mostre alguns alinhamentos, estes não foram confirmados através dos estudos de exploração subsuperficial e podem corresponder a descontinuidades sem expressão geotécnica.

Desde 1967 que a implantação da barragem sofreu várias alterações e além do reconhecimento de superfície, a investigação envolveu também diversos programas de prospecção geofísica e mecânica, bem como ensaios de laboratório e «in situ». Durante os primeiros anos os estudos destinaram-se essencialmente ao reconhecimento geológico do local. Pode dizer-se que, pelas razões indicadas no Cap. 1, a caracterização da fundação da barragem, do ponto de vista geotécnico, começou em 1981, através de diversos programas de prospecção subsuperficial e de ensaios «in situ» e em laboratório, nomeadamente a determinação da resistência e deformabilidade de aluviões arenosas, basaltos, tufos, riolitos, contactos geológicos e fracturas. Foi feita uma caracterização geotécnica das formações bentoníticas que ocorrem na fundação e foi investigada a permeabilidade da rocha de fundação, dos depósitos aluviais e do contacto entre a aluvião e a rocha de fundação.

Do ponto de vista geológico as diferentes formações da fundação (note-se que da margem direita para a esquerda a fundação da barragem é composta de riolitos compactos, depósitos de vertente, aluvião, basaltos intercalados com tufos, brecha vulcânica, solos bentoníticos e riolito vacuolar e fluido) bem como algumas formações de ocorrência pontual tais como os solos bentoníticos e os tufos, tornaram necessário um extenso programa de prospecção. Contudo, muitos problemas só poderão ser satisfatoriamente resolvidos durante a execução da obra.

Assim, antes do começo da construção da barragem foram feitos 39 furos de sondagem, num comprimento total de cerca de 1 450 metros. Depois da construção ter começado foram feitos mais 66 furos com um desenvolvimento aproximado de 2 275

metros. Na realidade só após a instalação do empreiteiro geral foi possível contornar as dificuldades resultantes da não existência em Moçambique de equipamento para uma adequada prospecção. Foram feitos ensaios de permeabilidade tipo Lugeon em quase todas as sondagens num total de cerca de 600 ensaios.

Com base nestes ensaios a rocha de fundação foi então caracterizada geologicamente em relação à alteração, fracturação e permeabilidade. Para definir as diferentes unidades geotécnicas foram executados ensaios dilatométricos, determinação do ângulo de atrito das diaclases e dos contactos tufo-basalto e resistência à compressão uniaxial em basaltos e tufos. Foram também feitos ensaios STP e CPT nos depósitos aluviais.

Para definir a permeabilidade da aluvião executaram-se alguns ensaios Lefranc e de bombagem.

Também foi efectuado um ensaio de injeção de cimento nos depósitos aluviais, mas não se obtiveram resultados significativos devido a dificuldades várias na realização dos trabalhos.

Os resultados dos trabalhos de caracterização geotécnica estão condensados no Quadro 1.

QUADRO 1
Caracterização geotécnica dos materiais de fundação

| | Permeabilidade (cm/s) | Compressão uniaxial (MPa) | Módulo dilatométrico (MPa) | Coesão (kN/m ²) | | Ângulo de atrito (graus) | | |
|-----------|------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|---|
| | | | | Tensão efectiva | Tensão total | Tensão efectiva | Tensão total | |
| Aluvião | Areia | — | — | 0 | — | 31 | — | |
| | Silte | 10 ⁻³ a 10 ⁻⁵ | — | 0 | 40 | 33 | 17 | |
| | Conglomerado vulcânico(*) | — | — | — | — | — | — | |
| Diaclases | Basalto | 20 a 50 | 8 500 a 20 000 | 1 570 | — | 60 | — | |
| | Tufo | 5 a 15 | 4 000 a 10 000 | 500 | — | 60 | — | |
| | Riolito | 50 a 80 | 10 000 | 1 500 | — | 60 | — | |
| | Bentonite(**) | < 10 ⁻⁷ | — | — | — | — | — | |
| | Basalto | — | — | — | 150 | — | 28 | — |
| | Tufo | — | — | — | 80 | — | 20 | — |

(*) ensaios ainda não concluídos.

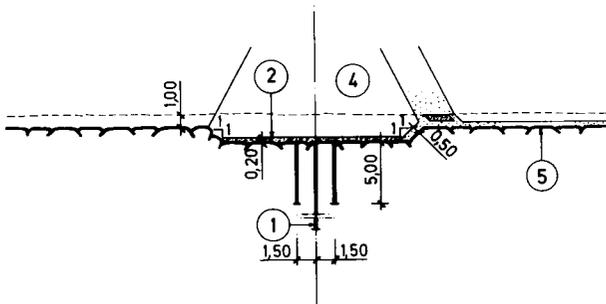
(**) resultados provisórios

3 – TRATAMENTO DA FUNDAÇÃO DA BARRAGEM DE TERRA

Dada a existência ao longo de quase todo o desenvolvimento da barragem de terra duma cobertura aluvionar com espessuras que podem atingir os 20 m foi dado particular cuidado ao tratamento da fundação do ponto de vista da permeabilidade. Como pode ver-se na Fig. 3, nas zonas dos encontros (e em maior extensão no esquerdo) a fundação do núcleo da barragem assenta directamente sobre as formações riolíticas (na margem esquerda) e sobre solos argilosos com fragmentos de riolito cobertos por um aglomerado vulcânico (na margem direita).

3. 1 – Zona de afloramento das formações rochosas

Nesta zona da margem esquerda o núcleo apoia directamente sobre as formações riolíticas. Além da limpeza muito em detalhe da superfície rochosa a que é normal proceder nestas situações, o tratamento da fundação rochosa visou dois objectivos: uma diminuição dos gradientes devidos à percolação através do maciço rochoso, executando uma cortina de injeções profunda, reforçada nos primeiros 5 m de profundidade; evitar a possibilidade de fenómenos de «piping» núcleo-fundação construindo na respectiva interface um revestimento em betão (B180) com 0,20 m de espessura. A fim de evitar a fissuração do betão, a sua colocação, só efectuada após a realização das injeções, é seguida duma humedificação permanente durante os sete dias seguintes. As primeiras camadas do núcleo (numa espessura de cerca de 1 m) são colocadas com um teor em água superior 2 a 3% relativamente ao óptimo. Na Fig. 4 mostra-se um esquema do tratamento da fundação nesta zona.



1 – Cortina de injeção
2 – Betão

4 – Núcleo
5 – Bedrock

Fig. 4 – Esquema do tratamento de fundação da barragem nas zonas de afloramento das formações rochosas.

3.2. – Zonas onde não afloram formações rochosas

Neste caso há que distinguir duas situações: zonas onde o nível freático submerge a totalidade ou parte apreciável das aluviões que cobrem o bedrock e zonas onde tal não sucede. Analisam-se estas últimas em primeiro lugar.

3.2.1. – Encontro direito

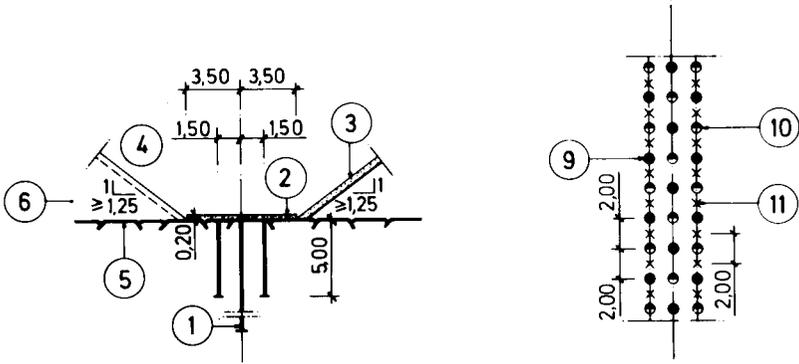
Na zona do encontro direito, com extensão reduzida (≈ 90 m), decorrem (Julho de 1984) trabalhos complementares de prospecção geotécnica visando um conhecimento mais detalhado da geologia local. A rocha não é somente coberta por aluviões. De facto ocorre superficialmente uma formação constituída por conglomerados vulcânicos a que se seguem argilas com fragmentos de riolito alterado (depósitos de vertente) que assentam sobre o basalto (em grande extensão interpõe-se uma camada de tufo de reduzida espessura). Na base da encosta que constitui o encontro direito, uma vala de prospecção assinalou uma cascalheira aluvionar sobre a formação argilosa coluvionar (possivelmente correspondendo ao leito fóssil). Esta mesma formação, a cotas sensivelmente iguais às do coroamento da barragem, passa a uma argila bentonítica. A prospecção em curso visa determinar a geologia ao longo do talude do encontro (só se conhece à cota do coroamento e na base) bem como as suas variações laterais. Em princípio o núcleo deverá ser prolongado até ao basalto por intermédio dum vala corta-águas sempre que a espessura da cascalheira aluvionar é elevada e a possança da formação argilosa com os blocos riolíticos alterados é reduzida, facto este que sucede na base do encontro (o conglomerado vulcânico sob o núcleo deverá ser sempre retirado). Neste caso o tratamento da superfície basáltica com vista ao evitar fenómenos de «*piping*» consistirá numa camada de betão com características e técnicas de construção análogas às já referidas para a margem esquerda. À medida que as cotas do terreno natural se elevam deve aumentar a espessura das argilas e diminuir a das cascalheiras. Nesse caso o núcleo apoiará nas argilas. As cascalheiras serão então injectadas (tubo à manchette) para diminuir a sua permeabilidade. A jusante serão localizados poços de alívio que interceptarão as cascalheiras.

A cortina de impermeabilização profunda (no bedrock) será igual à das restantes zonas da barragem.

3.2.2. – Encontro esquerdo

Diz respeito ao trecho compreendido entre a zona referida em 3.1 e o descarregador e também aqui o nível freático não interfere com os trabalhos de construção. O núcleo é prolongado até à rocha por intermédio dum corta-águas com talude de

1V:1,25H. Tal inclinação mostrou-se estável na fase transitória de construção e não tem implicação no comportamento estrutural da barragem face à deformabilidade do material aluvionar, a qual é sensivelmente igual ou ligeiramente maior que a do aterro do corta-águas. Na Fig. 5 mostra-se um corte típico desta zona com o tratamento da superfície rochosa do fundo do corta-águas, com vista a evitar-se fenómenos de «piping» no aterro do corta-águas e com a cortina de tratamento profundo da fundação rochosa. No talude de jusante da vala corta-águas localiza-se um filtro que é ligado ao tapete filtrante que se estende sobre todo o maciço estabilizador de jusante da barragem.

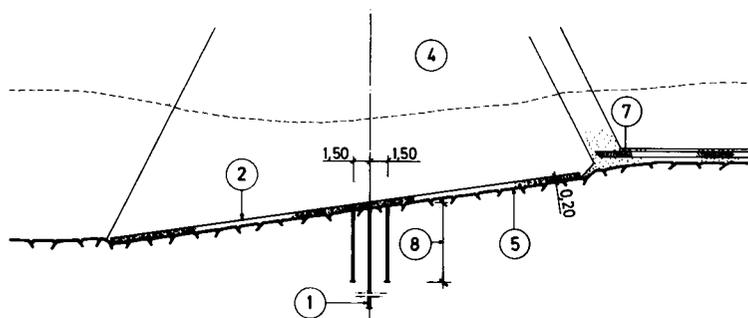


- | | |
|-------------------------|------------------------|
| 1 — Cortina de injeções | 8 — Vala corta-águas |
| 2 — Betão | 10 — Furos primários |
| 3 — Filtro | 11 — Furos secundários |
| 5 — Bedrock | 12 — Furos terciários |
| 6 — Aluvião | |

Fig. 5 — Esquema de tratamento da superfície rochosa do fundo do corta-águas

Num trecho intermédio desta zona e numa extensão de cerca de 100 m ocorrem, em bolsadas, materiais bentoníticos análogos aos referidos em 3.2.1 e que resultaram da alteração dos riolitos. Procurou-se que a vala corta-águas atingisse a rocha sã a qual se apresentou sempre muito irregular. A limpeza das bolsadas de bentonite levou a alguns tratamentos com preenchimento por apreciáveis quantidades de betão. Os materiais bentoníticos permanecerão sob os aterros estabilizadores da barragem. Uma análise do ponto de vista da estabilidade revelou não haver inconveniente em não retirar totalmente estes materiais que exibem baixa compactidade e um grau de saturação «in situ» da ordem dos 85%.

Na aproximação dos aterros ao descarregador há uma transição da vala corta-águas para um núcleo que se prolonga até à fundação mantendo as inclinações dos seus taludes (sucede o mesmo no lado oposto do descarregador, obviamente). Deste modo, o contacto do aterro do núcleo com o bedrock aumenta progressivamente de 7,25 m para 45 m nas proximidades dos muros do descarregador (Fig. 6).



- 1 — Cortina de injeções
- 2 — Betão
- 4 — Núcleo
- 5 — Bedrock
- 7 — Tapete drenante
- 9 — Variável de 5 a 12 m

Fig. 6 — Esquema do tratamento da fundação da barragem nas zonas próximas do descarregador

Numa fase inicial dos trabalhos e nesta mesma zona, o tratamento efectuado foi, no que respeita a evitar fenómenos de «piping», diferente do anteriormente descrito: geralmente foram efectuadas quatro linhas de injeção de 9 m de profundidade, duas a montante e duas a jusante da cortina profunda (sendo apenas duas obrigatórias). Mas este sistema veio a ser preterido em relação ao descrito anteriormente porque se estavam a fazer quase todos os furos terciários e a «laje» de betão, bem construída, assegura a mesma eficiência. Além disso é de mais rápida execução e, nesta barragem, o programa de tratamento da fundação constitui um caminho crítico.

Nas zonas onde ocorra material aluvionar está prevista a colocação de poços de alívio junto ao pé de jusante da barragem.

3.2.3. – Zona entre o descarregador e a margem direita

É a zona onde se localiza a maior espessura de aluviões parcialmente submersas. A primeira dezena de metros é constituída por siltes argilosos e mais em profundidade ocorrem areias com burgaus de granulometria variada. Junto ao bedrock (basalto) e conjuntamente com uma cascalheira de base ocorrem blocos soltos, tornando-se extremamente difícil saber antecipadamente se existem em grande quantidade e quais as dimensões predominantes.

Nas proximidades do leito menor do rio a espessura aluvionar diminui para cerca de uma dezena de metros constituídos fundamentalmente por materiais arenosos com burgaus e uma cascalheira de base.

Inicialmente, e com vista ao tratamento da fundação, foram estudadas com mais detalhe duas soluções: corta-águas total e corta-águas parcial (até ao nível freático) prolongado até ao bedrock por uma parede moldada (outras soluções como tapete a montante, injeções de vários tipos nas aluviões, corta-águas parcial combinado com injeções na aluvião submersa, foram postas de parte devido a factores económicos e de segurança).

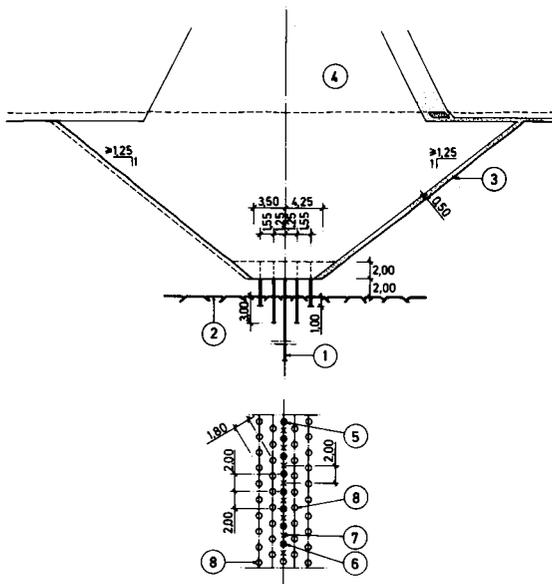
A maior incógnita relativamente ao corta-águas total consistiu na quantificação do coeficiente de permeabilidade k das formações arenosas. Na realidade, na gama das permeabilidades possíveis ($10^{-2} \geq k \geq 10^{-4}$ cm/s) um erro de uma unidade na avaliação do expoente k , tem repercursões económicas apreciáveis no que respeita à bombagem: custos já apreciáveis – devido à gama dos k em causa – a poderem variar 10 vezes.

Relativamente ao corta-águas parcial a maior incógnita era a possibilidade de ocorrência de muitos blocos junto ao bedrock, blocos cuja dimensão não permitisse a sua extracção pelo equipamento de escavações das paredes moldadas sem que fossem fragmentados: ou com trépano, durante a execução da parede (muito demorado, êxito duvidoso, começo de instabilidade das paredes), ou, previamente, através da realização de furos de sondagem com reduzido espaçamento (≈ 1 m) e recurso a explosivos (elevado custo).

Não sendo fácil levantar esta incógnita e como nas previsões mais seguras para ambas as soluções (k das aluviões = 5×10^{-2} cm/s, furos para colocação de explosivos afastados de 0,8 m e admitindo a necessidade de reescavar 15% da parede) os custos eram muito semelhantes e a decisão acabou por ser tomada com base em dois factores: negociação com o empreiteiro, à data já conhecido e o facto de a solução corta-águas total ser melhor do ponto de vista técnico.

Acabou por se adoptado um corta-águas total. Na Fig. 7 mostra-se a solução adoptada a qual corresponde ao perfil teórico da escavação e se baseou no facto de ser possível, durante a escavação, controlar o caudal resultante da percolação para a vala corta-águas. Esse controlo poderá ser efectuado através de poços drenantes e/ou «well-points» ou por métodos mais expeditos tais como revestimentos adequados da base dos taludes onde se construirão valas colectoras da água para pontos de bombagem. Presentemente a vala só está escavada até à cota do nível freático.

O tratamento da bedrock é análogo ao do encontro direito (Fig. 5). Em zonas localizadas em que possa haver um afundamento não previsto do bed-rock a escavação pode não ser levada até à rocha para não reescavar os taludes. Nesses casos a zona aluvionar (sempre de reduzida espessura) será injectada com tubos «à manchette» (Fig. 7).



- | | |
|-------------------------|---|
| 1 — Cortina de injeções | 5 — Furo primário |
| 2 — Bedrock | 6 — Furo secundário |
| 3 — Filtro | 7 — Furo terciário |
| 4 — Núcleo | 8 — Furo para injeção com tubos «à manchette» |

Fig. 7 — Esquema do tratamento da fundação da barragem na zona onde ocorrem espessas formações aluvionares.

3.3. – *Tratamento de impermeabilização profundo da fundação rochosa na zona da barragem de terra*

O tratamento de impermeabilização da barragem de terra foi assegurado por um esquema com uma cortina simples, vertical, ladeada por duas linhas, a 2,5 m da cortina, e com 5 m de profundidade (ver Figs. 4 a 7)

No que se refere à densidade de furos a cortina possui furos primários afastados de 6 m e furos intermédios secundários e terciários. Com vista a um adequado controlo de gradientes hidráulicos na fundação foram adoptados os seguintes critérios quanto à profundidade da cortina:

- a) profundidade mínima de 20 m;
- b) profundidade máxima de 1,5 h em que h, no local, é a altura de água da albufeira acima do terreno natural;
- c) entre aquelas profundidades a furação deverá parar desde que em dois ensaios de permeabilidade consecutivos, realizados nos furos primários, se obtenham valores de absorção inferiores a 5 Lugeon.

Além disso, foi ainda especificado que:

- deverão ser sempre executados os furos primários e secundários;
- após a execução da cortina deverão ser executados furos espaçados de cerca de 30 m, para medição da permeabilidade residual através de ensaios Lugeon. No caso dos resultados serem superiores a:
 - a) 1 Lugeon para profundidades inferiores a 10 m;
 - b) 3 Lugeon para profundidades entre 10 e 20 m;
 - c) 5 Lugeon para profundidades superiores a 20 m;deverão ser executados os furos terciários.

4 – TRATAMENTO DA FUNDAÇÃO DO DESCARREGADOR

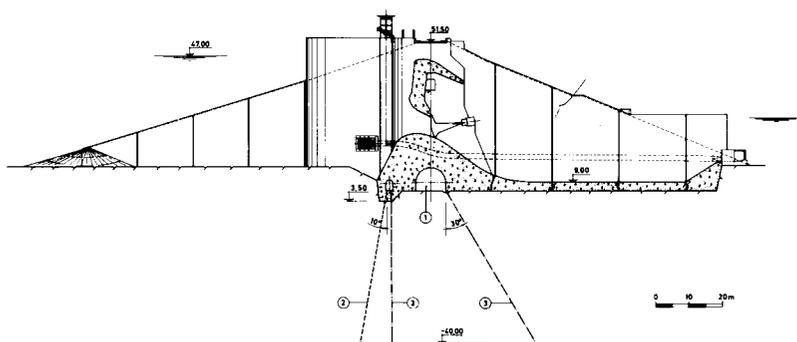
O maciço de fundação do descarregador apresenta-se no geral pouco alterado a são com fracturas medianamente afastadas, e é constituído por diversas escoadas sub-horizontais de basalto com espessuras que variam de 4 a mais de 10 m, separadas por escoadas de tufo basálticos descontínuos, com espessuras variando das dezenas de centímetros a mais de 1 m e que se apresentam desde pouco alterados a muito alterados.

A ocorrência de uma escoada de tufo muito perto da cota de fundação dos muros de ala e o facto das diferentes campanhas de prospecção terem definido que este tufo inclinava para a margem direita e desaparecia para jusante, levou a que se considerasse a possibilidade de deslocar o descarregador para a margem esquerda e para jusante, de modo que essa escoada não fosse interessada pela fundação.

Razões de ordem hidráulica, essencialmente relacionadas com as condições de escoamento no canal de restituição, só permitiram a deslocação do eixo do descarregador de 120 m e, mesmo assim, obrigaram a deslocar o encontro esquerdo cerca de 60 m pra jusante passando o eixo da barragem de uma recta para dois alinhamentos rectos com duas ligeiras curvas nas concordâncias.

Assim, na nova localização, os tufos vulcânicos não ocorrem em toda a fundação do muro de ala esquerdo. Na zona do descarregador os tufos foram retirados já que se encontravam à cota prevista para a fundação e apenas ficaram sob o muro de ala direito, já que se encontravam a cerca de 2-3 m abaixo da cota de fundação e o retirá-los obrigaria a escavações exageradas Optou-se assim, nesta zona, pelo tratamento de consolidação da fundação à custa da execução de uma malha de furos de injeção com 15 m de comprimento, espaçados numa primeira fase de 3 m. Caso a absorção nesses furos fosse superior a 20 kg de calda de cimento por metro de furo, far-se-ia um furo intermédio. As pressões de injeção utilizadas foram de 2 kg/cm² entre os 0 e 5 m e de 3,5 kg/cm² entre os 5 m e os 15 m.

Visando a diminuição das subpressões nas lajes da bacia de dissipação foi executada uma cortina de impermeabilização perimetral com um comprimento de 15 m de profundidade e com furos primários espaçados de 6 m e furos secundários intermédios. Enquanto os furos principais se fizeram antes da betonagem e com pressões idênticas às utilizadas para furos de consolidação, os furos secundários foram executados após betonagem parcial dos muros de ala e com pressões que chegaram a atingir os 7,5 kg/cm².



- 1 – Galeria de fundação
- 2 – Cortina de injeção
- 3 – Cortinas de drenagem

Fig. 8 – Esquema do tratamento da fundação do descarregador.

Para além deste trabalho e completando-o, foi concebido um sistema de drenagem constituído por furos de drenagem com comprimento variável, ligados na interface rocha-betão por meios tubos de betão ($\varnothing = 300$ mm) e ainda duas galerias laterais escavadas na rocha cerca de 2 m. No fundo dessas galerias e espaçadas cerca de 20 m, foram colocados piezómetros com 6 m de profundidade. Prevê-se ainda a execução, sob o descarregador inferior, de uma cortina de drenagem inclinada 60° para jusante e com cerca de 45 m a partir da galeria.

A cortina de impermeabilização na zona do descarregador (Fig. 8) tem características idênticas à cortina de impermeabilização do aterro, já descrita. Apenas foi inclinada cerca de 60° para montante e foi completada com uma cortina de drenagem vertical com furos espaçados 3 m e $\varnothing = 116$ mm.

Quer a cortina de impermeabilização quer a de drenagem localizadas sob o descarregador, foram executadas a partir da galeria de montante.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Unidade de Direcção de Aproveitamentos Hidráulicos da Direcção Nacional de Águas de Moçambique a possibilidade de apresentar este trabalho.