

CENTRO UNIVERSITÁRIO ATENAS

LUCAS FARIA WACHSMUTH

**CONDICIONANTES DO PROJETO GEOTÉCNIO DE BARRA-
GENS DE TERRA: estudo de caso UHE batalha**

Paracatu

2019

LUCAS FARIA WACHSMUTH

CONDICIONANTES DO PROJETO GEOTÉCNICO DE BARRAGENS DE TERRA:
estudo de caso UHE batalha

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil do Centro Universitário Atenas, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Geotecnia

Orientador: Prof. Esp. Matheus Dias Ruas

Paracatu

2019

LUCAS FARIA WACHSMUTH

CONDICIONANTES DO PROJETO GEOTÉCNICO DE BARRAGENS DE TERRA:
estudo de caso UHE batalha

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil do Centro Universitário Atenas, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Geotecnia

Orientador: Prof. Esp. Matheus Dias Ruas

Banca Examinadora:

Paracatu — MG, _____ de _____ de _____.

Prof. Esp. Matheus Dias Ruas
Centro Universitário Atenas

Prof. Msc. Altair Gomes Caixeta
Centro Universitário Atenas

Prof. Msc. Willian Soares Damasceno
Centro Universitário Atenas

Dedico a minha família, pelo estímulo, compreensão e apoio, pessoas realmente maravilhosas em minha vida, que não me negaram auxílio, amor e carinho. Nos momentos mais difíceis somaram suas experiências e me fizeram acreditar na vida, no progresso e na união.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, presença constante em minha vida. É o primeiro e melhor engenheiro de todos os tempos. Obrigado pela vida, pelos momentos felizes e conturbados desse ciclo que se encerra. A ele, a minha eterna gratidão.

A minha família, pelos ensinamentos que não se encontra em nenhum livro científico, pelas orações, pela torcida, pelo apoio incondicional. Meu amor por vocês é imensurável.

Aos amigos e a minha namorada, obrigado pelo momentos de alegria e de renovação de energias. Agradeço pelos trabalhos compartilhados, pela paciência de escutarem minhas reclamações e por não me deixarem desistir nunca.

Aos professores, que se dedicaram a arte de compartilhar conhecimentos. Obrigado pelas inspirações, estímulos, amizade, e, por me ensinarem a importância de buscar novos conhecimentos. São vocês que fornecem recursos e ferramentas para o meu crescimento profissional.

Ao longo da minha graduação tive o prazer de trabalhar com ótimos profissionais. Sem eles não seria possível eu estar aqui hoje de coração repleto de alegria. Agradeço a Concreto Construções & Engenharia, Espaço Livre Construções e Incorporações, Suesa Engenharia e Arquitetura e Scavasul Terraplenagem e Mineração. Obrigado por abrir portas para o mundo profissional.

Aos antigos e atuais colegas de trabalho, pela valiosa troca de experiência, por me ensinarem como é a Engenharia Civil na prática e por terem contribuído de forma tão significativa para o meu crescimento profissional.

Obrigado a todos que, de alguma forma me ajudaram durante a minha graduação. Que Deus lhes retribua.

Cada estrutura de uma barragem e seu sítio geotécnico, tem uma impressão digital.

Carlos Henrique Medeiros

RESUMO

O sistema hidroelétrico é o principal responsável pela geração de energia no país, sendo que o Brasil é um dos maiores construtores mundiais de barragens nas últimas décadas para utilização nas usinas hidrelétricas. O presente trabalho faz um estudo de engenharia de barragens, com foco sobre os principais aspectos geotécnicos de um projeto de barragem. Tendo como referência o estudo, são desenvolvidas as principais análises para elaboração do projeto geotécnico da barragem que compõe a usina hidrelétrica (UHE) batalha, localizada na divisa dos estados de Minas Gerais e Goiás. O trabalho contemplou o estudo análise geológica e geotécnica, bem como aspectos pertinentes a estabilidade global da estrutura, para a opção escolhida que consistiu na barragem de enrocamento com núcleo argiloso. As análises e considerações constituem parâmetros para adotar metodologias seguras, viáveis e exequíveis.

Palavras-chave: Barragem, geológico, geotécnico.

ABSTRACT

The hydroelectric system is the main responsible for the generation of energy in the country, and Brazil is one of the world's largest dam builders in the last decades for use in hydroelectric plants. The present work makes a dam study engineering with focus on the main geotechnical aspects of a dam project. Based on the study, developed the main analyzes for the elaboration of the geotechnical project of dam that compose the hydroelectric plants (UHE) batalha, located on the border of the states of Minas Gerais and Goiás. The work included geological and geotechnical analysis, as well as pertinent aspects to the overall stability of the structure, for the chosen option that consisted of the rocky dam with clayey core. Analyzes and considerations are parameters for adopting methodologies safe, viable and workable.

Keywords: *Dam, geological, geotechnical.*

LISTA DE QUADROS

FIGURA 1— Barragem de Terra

18

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 —Correlação entre a classe da rocha e o tipo de barragem	22
TABELA 2 —Classificação das rochas quanto à qualidade	30
TABELA 3 —Correlação da classificação geomecânica e horizontes geotécnicos	32
TABELA 4 —Materiais e parâmetros geotécnicos	35
TABELA 5 — Fator de Segurança barragem UHE batalha	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BEN Balança Energético Nacional

CCR Concreto Compactado a Rolo

EPA Ensaio Perda d'água sob pressão

GO Goiás

GPa Giga Pascal

MG Minas Gerais

MPa Mega Pascal

SPT Standard Penetration Test

UHE Usina Hidrelétrica

LISTA DE SÍMBOLOS

CD ou S Ensaio Triaxial Adensado Drenado (slow)

CU ou R Ensaio Triaxial Adensado Não Drenado

IP Índice de Plasticidade

k_h Coeficiente de permeabilidade Horizontal

k_v Coeficiente de permeabilidade Vertical

$l/\text{min} \times m \times \text{kgf}/\text{cm}^2$ litro / minuto x metro x kilograma força / centímetro ao quadrado

m Metro

UU ou Q Ensaio Triaxial Não Adensado Não Drenado (quick)

< Menor que

> Maior que

XX Vigésimo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA	14
1.2 HIPÓTESES OU PROPOSIÇÃO DE ESTUDO	14
1.3 OBJETIVOS	14
1.3.1 OBJETIVO GERAL	14
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
1.4 JUSTIFICATIVA	15
1.5 METODOLOGIA	15
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2 A ENGENHARIA DAS BARRAGENS DE TERRA	17
2.1 SELEÇÃO DO TIPO DE BARRAGEM	20
2.1.1 TOPOGRAFIA	20
2.1.2 MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO	21
2.1.3 CLIMA	21
2.1.4 DISPONIBILIDADE DE MATERIAL	21
2.1.5 CONDIÇÕES GEOLÓGICO – GEOTÉCNICAS DAS FUNDAÇÕES	22
2.1.6 HIDROLÓGICO – HIDRÁULICO	23
2.2 CONTROLE DE FLUXO	24
2.2 ESTABILIDADE DE TALUDES	24
2.3 ANÁLISE DE DEFORMAÇÕES	25
3 DESCRIÇÃO GERAL DA BARRAGEM	25
3.1 INVESTIGAÇÕES GEOTÉCNICAS	26
3.1.1 COERÊNCIA	28
3.1.2 ALTERAÇÃO	29
3.1.3 GRAU DE FRATURAMENTO	29
3.1.4 ROCK QUALITY DESIGNATION (RQD)	30
3.1.5 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA	30
3.2 LITOLOGIA E SECÃO GEOLÓGICA	31
3.3 ENSAIOS LABORATORIAIS	35
3.4 ASPECTOS RELEVANTES BATALHA	35
4 ESTUDO COMPARADO ENTRE O PROJETO TÉCNICO DA UHE BATALHA E AS TÉCNICAS DE ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO DE BARRAGENS	37
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	39
6 REFERÊNCIAS	40

1. INTRODUÇÃO

Devido a extrema abundância de recursos hídricos no Brasil, a preferência pela matriz elétrica brasileira é baseada em fontes renováveis sendo a fonte hidráulica com a maior parcela de contribuição, 62,5% (BEN,2018).

As barragens são estruturas artificiais de armazenamento de recursos hídricos ou outros fluidos, construídas transversalmente sob talvegue. Desde os tempos mais remotos da humanidade os reservatórios tem papel fundamental no desenvolvimento da civilização. As barragens, até o início do século XX com o advento da mecânica dos solos, eram executadas com base em conhecimentos empíricos. (MAS-SAD,2010).

A construção de barragem impõe o conhecimento das condições geológicas, geotécnicas, sedimentologia, balanço hídrico, relevo, análise de impactos ambientais, geomorfologia, arranjo da obra, logística de operações e estruturas, metodologia construtiva, cronogramas, custo, prazo, dimensionamento de estruturas auxiliares, dentre outros parâmetros.

Estudos complementares como ensaios de campo e laboratório, análises de engenharia (percolação, estabilidade, e tensão-deformação), elaboração de diagnósticos e recomendações para melhoria das condições de segurança são também desenvolvidos pela equipe responsável pelo empreendimento.

As barragens são estruturas fundamentais para o desenvolvimento do país. Tais estruturas são essenciais para armazenar água e permitir a agricultura, a geração de energia, o lazer e o abastecimento da população de forma regular, depositar a água e os resíduos gerados nos processos industriais e de beneficiamento mineral, viabilizando assim a realização dessas atividades econômicas. O desenvolvimento de qualquer país está extremamente associado a essas estruturas.

A oferta primária de energia hidráulica no Brasil passa pela construção de barragens, dessa maneira justifica-se a construção da UHE BATALHA na divisa dos municípios de Cristalina/GO e Paracatu/MG. O empreendimento tem 52,5 MW de potência instalada e uma barragem terra enrocamento com 54 metros de altura e 375 metros de comprimento da crista.

1.1. PROBLEMA DE PESQUISA

A escolha do tipo adequado de barragem pode acarretar benefícios expressivos no empreendimento, como os quesitos relacionados à segurança e custo benefício. Qual a relevância da análise dos condicionantes geotécnicos para elaboração de um projeto de barragem?

1.2. HIPÓTESES

Acredita-se que os critérios acerca da construção de grandes reservatórios de água pois impõe consideráveis solicitações no maciço de solo, provenientes de área de empréstimo, bem como nas rochas, localizadas na fundação. Estima-se que ao entender, e, prever o comportamento hidráulico-mecânico seja possível prevenir riscos associados a estrutura, bem como determinar fatores que resultem em uma estrutura exequível.

1.3. OBJETIVO

1.3.1. OBJETIVO GERAL

Evidenciar processo de elaboração do projeto geotécnico de uma barragem, comparando-as com o projeto básico da UHE batalha de Paracatu/MG.

1.3.2. OBJETIVO ESPECÍFICO

- a) apresentar as informações gerais acerca da construção de barragens.
- b) discorrer sobre as principais informações técnicas do projeto da UHE Batalha e os elementos que as compõe.
- c) ponderar as condições e parâmetros de análise de estabilidade de taludes utilizado no estudo de caso UHE Batalha em confrontação com as técnicas de construção de barragens de terra..

1.4. JUSTIFICATIVA

Assegurar a estabilidade de barragens é tarefa árdua, principalmente em um ramo que envolve diversas áreas, como por exemplo estrutural, elétrica, hidráulica, geotécnica, geológica, hidrológica, entre outros. Dessa maneira, faz-se mister conhecer os fundamentos em projetos de barragens. Em decorrência do elevado número de acidentes envolvendo as barragens brasileiras, o país encontra-se num cenário grave no que diz respeito a segurança das barreiras artificiais, construídas com o intuito de reter enormes volumes de água e resíduos. As obras especiais de engenharia civil devem cumprir importantes e rigorosos critérios de segurança para garantir seu correto desempenho estrutural desde a fase de projeto, execução e utilização para os fins da qual foi destinada.

1.5. METODOLOGIA

Este estudo se classifica como exploratório, por ter como principal finalidade aumentar, elucidar e transformar conceitos e ideias, visando à formulação de atuais problemas mais precisos ou hipóteses pesquisáveis para estudos posteriores Gil (2002). O presente estudo caracteriza-se por uma pesquisa qualitativa, aplicada, exploratório, especificamente caso barragem da UHE batalha, pois tem como objetivo abordar conceitos e técnicas que tornam um projeto de barragem exequível, seguro e viável financeiramente. Será realizado uma revisão bibliográfica, nas principais referências geotécnicas em barragens do país.

As palavras chave utilizadas nas buscas serão: barragem, geológico e geotécnico.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O primeiro capítulo apresenta-se a introdução com a contextualização do tema, formulação do problema, hipóteses, os objetivos gerais e específicos, justificativa, metodologia de estudo.

O segundo capítulo aborda a revisão bibliográfica, apresenta os parâmetros iniciais que caracterizam uma barragem de terra, modelo este utilizado na UHE Batalha, fatores relevantes para escolha do tipo de estrutura a ser adotada, caracterização

de um projeto geotécnico de barragem pela análise dos fatores relevantes quanto a percolação, análise de estabilidade global e de deformações.

O terceiro capítulo trata-se da barragem da UHE batalha onde é apresentado as principais características do empreendimento, as prospecções realizadas em diversas fases do empreendimento, a especificidade quanto a caracterização geológica e geotécnica da fundação da barragem, a complexidade do comportamento geomecânico, além da caracterização de solos mediante a ensaios, e por fim de aspectos consideráveis quanto a funcionalidade estrutural.

O quarto capítulo é composto das considerações finais do estudo em que se desenvolve acerca da importância de fatores geotécnicos e geológicos para se obter um projeto de barragem de terra plena. É relevante considerar a interdisciplinaridade dos empreendimentos, bem com a devida instrumentação e auscultação das barragens de terra.

2. A ENGEHARIA DAS BARRAGENS DE TERRA

Segundo Massad (2010), as barragens são estruturas artificiais de armazenamento de recursos hídricos ou outros fluidos, construídas transversalmente sob talvegue, usados frequentemente para fins de irrigação, fornecimento de água, energia, controle de cheias, navegação, turismo, disposição de rejeitos, regularização de vazão, entre outros.

As barragens são constituídas, de maneira geral, pelos seguintes elementos: coroamento, ombreiras, fundação, vertedouro, tomada de água, eclusa, dissipador de energia, descarregador de fundo.

De acordo com Mello (1975, *apud* Massad, 2010) uma barragem deve ser vista como uma unidade ou um todo orgânico no espaço, compreendido: a) a bacia da represa; b) os terrenos de fundação, que são como um prolongamento da barragem em sub superfície; c) as estruturas anexas ou auxiliares (vertedouros, descarregadores de fundo, tomadas d'água, galerias, tuneis, casas de força, etc.); d) os instrumentos de auscultação (piezômetros, medidores de recalques, etc.) importantes para o comportamento da obra; e) as instalações de comunicação e manutenção.

Historicamente, as civilizações mais remotas que a humanidade tem conhecimento desenvolveram-se a margens de grandes rios, sendo o recurso hídrico inerente ao progresso do ser humano. Por exemplo, a Mesopotâmia com o cultivo da agricultura próximo a rio Tigre e Eufrates. (MASSAD,2010)

A água não está disponível para todos de maneira equilibrada, dessa maneira há a necessidade de armazená-la para utilizar para um fim útil, especificamente tornar-se útil pela força eletromotriz.

Apresentam-se os vários tipos de barragem em uso; sob a perspectiva das principais características:

Devido a simplicidade do processo construtivo, é o tipo de barragem mais corriqueira no Brasil. Consoante Massad (2010) somente em meados do século XX, foram erguidas estruturas com base nos novos conhecimentos de mecânica dos solos, utilizando processos investigativos de fundações, planejamento de método construtivo, filtro de chaminé, drenagem interna, dentre outros aspectos elementares.

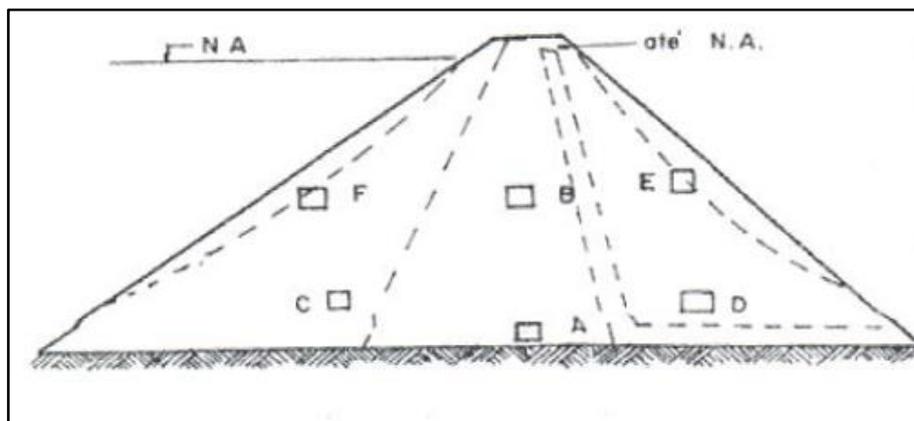
É uma estrutura que aceita níveis toleráveis de deformações em sua fundação, dessa maneira pode-se obter fundações deformáveis, quer seja solo, quer seja rocha. Outro fator importante é que barragem de terra homogênea é adequada para vales muito abertos.

A barragem de terra homogênea é constituída por um único material, em função da qualidade e quantidade de material disponível nas proximidades da obra, permeabilidade adequada para garantir percolação aceitável no maciço ou fundação. A inclinação no talude de montante, por via de regra, é estabelecida de modo a assegurar a estabilidade no final de construção, operação e no rebaixamento rápido.

No dizer de Mello (1975) as catástrofes com causas iminentemente geotécnicas estão relacionadas a percolação de água e de escorregamento de taludes. Dentre os principais apontamentos para as rupturas, com causas citadas anteriormente, pode-se perceber o aumento de tensões cisalhantes que ocorrem na vida útil da barragem (construção e no abaixamento rápido).

A redução da resistência do solo ocasionada pela saturação do solo compactado - o solo é compactado próximo ao limite de plasticidade, com umidade próxima a ótima, de maneira que ocorre a absorção da água, inchamento e saturação, dessa maneira provoca-se a uma redução de resistência ao cisalhamento para uma dada tensão. A liquefação, isto é, a queda de tensão efetiva, em maciço de areia fina saturada se liquefaz devido as poropressões no maciço. Por fim, cita-se a erosão regressiva tubular, *piping*, que caracteriza-se pelo carreamento de partículas de solo pela água, de jusante para montante, que tende a evoluir para cavidade comprometendo a estabilidade estrutural. Deve-se evitar elevados gradientes hidráulicos de saída e controlar a magnitude e direção das forças de percolação.

FIGURA 1 — Barragem de Terra.



Fonte: Mello (1975).

Conforme Mello (1975), de acordo com a FIGURA 1, convém destacar alguns comportamentos geotécnicos preferidos em barragem de terra homogênea de acordo com as áreas da secção:

a) plasticidade e aderência estanque, ou seja, a região deve apresentar o solo em estado plástico com forças na interface da região devidamente impermeável.

b) impermeabilidade, evitar $k_h \gg k_v$, plasticidade para evitar fissuras provenientes de recalques diferenciais; isto é, impedir que coeficiente de permeabilidade horizontal seja muito maior que o vertical permite que água percole de maneira homogênea na região e mitiga a possibilidade de assentamento da estrutura.

c) resistência compactada, incompressibilidade sob encharcamento (recalques súbitos); resistência após encharcamento – saturação; obter a região do aterro mais homogênea, aumentar a densidade do solo e reduzir o índice de vazios tende a torna-la mais compacta, resistente e incompressível, mesmo sob condições saturadas.

d) máxima resistência compactada a curto e longo prazo; almeja-se aumentar a intimidade entre os grãos tornando o solo mais rígido.

e) coesão, ausência de contração por secamento, mínimo de rastejo, de permeabilidade e de erodibilidade; a região tem por ideal um solo naturalmente cimentado por agentes diversos, que representa parcela coesiva de significativa relevância geotécnica.

f) coesão saturada, mínimo rastejo e erodibilidade; ausência de contração – inchamento. A secção de solo fino, coesa, em condição crítica de saturação pelo talude a montante deve resistir a condições inseguras de instabilidade como deslizamento, rastejo e erosões.

De acordo com Mello (1975), uma barragem de terra enrocamento é constituída de materiais de diferentes granulometrias em função da sua de suas características, permeabilidade, umidade e varia de acordo com a disponibilidade local da obra. A estrutura é composta por um núcleo estanque, com as adjacências compostas de materiais mais permeáveis, comparado ao núcleo, que tem a função de protegê-lo.

Segundo Massad (2010, p.179)

O núcleo dessas barragens pode ser central ou inclinado para montante. Quando a argila e o enrocamento apresentam compressibilidade comparáveis entre si, o núcleo central tem a vantagem de exercer uma pressão maior

nas fundações, além de ser mais largo na sua base, o que é benéfico em termos de controle de perda d'água. No entanto, se a argila for mais compressível do que o enrocamento, pode ocorrer o fenômeno de arqueamento, ou "efeito silo". Nessas condições, a argila tende a recalcar mais, sendo impedida pelos espaldares. Em outras palavras, o peso da argila passa a ser suportado pelo enrocamento (arqueamento), por atrito, como só acontece nos silos, podendo surgir trincas no núcleo, na direção do fluxo da água. A vantagem de se inclinar o núcleo é que não há como transferir o peso para os espaldares. Outra vantagem do núcleo inclinado é que se pode levantar grande parte do enrocamento de jusante, ganhando-se tempo, enquanto se procede o tratamento das fundações (injeções na base do núcleo)

É importante ressaltar que, em relação ao método construtivo, deve-se dispor de transição gradual de materiais – prever comportamento reológico dos materiais da transição - em termos de granulometria, entre o núcleo e o enrocamento, com a finalidade de mitigar risco de piping.

2.1. SELEÇÃO TIPO DE BARRAGEM

A escolha do tipo de barragem deve levar em conta o custo e a segurança do empreendimento. A cautela e experiência do profissional responsável é essencial para garantir melhor tomada de decisão, visto que a variável de fatores intervenientes nesse processo é grande.

2.1.1. TOPOGRAFIA

Uma análise no relevo do local escolhido é essencial para assegurar uma escolha assertiva quanto ao tipo de barragem. De acordo com Mello (1975), se o vale é fechado então pode-se inferir que a água erodiu as rochas e, portanto, trata-se, possivelmente, de rocha de boa qualidade mecânica e assim pode-se afirmar que as barragens de concreto são as mais adequadas. No caso de vales abertos é correto os depósitos sedimentares resultantes de processos de erosão, então barragens de terra ou terra enrocamento são as mais adequadas, uma vez que o gradiente hidráulico é menor.

2.1.2. MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

É de extrema importância o conhecimento, caracterização e análise de viabilidade de exploração materiais naturais de construção, além de estudar o reaproveitamento das escavações obrigatórias. Conforme notas do projeto básico UHE batalha, versão 2006, é comum a obtenção de materiais rochosos de excelente sanidade e trechos alterados, assim pode-se utilizar o ambos os materiais no corpo da barragem constituindo as denominadas zonas de random, que geralmente localizam-se nos espaldares.

No entanto, aspectos qualitativos e quantitativos dos materiais não atenderem aos aspectos mínimos pertinentes ao projeto utiliza-se as áreas de empréstimo para suprir a demanda. Aspectos relacionados a distância média de transporte, geologia, topografia, condições de explorações, acessos, volumes disponíveis, custos desapropriações e impactos ambientais devem ser parâmetros pertinentes a análise de viabilidade.

2.1.3. CLIMA

Os fatores climáticos influenciam no teor de umidade dos finos, o que provoca um aumento no prazo de construção da barragem. Dessa maneira, deve-se analisar os fatores meteorológicos do local de implantação para a análise do impacto desse fator no custo do empreendimento.

Conforme Massad (2010), pode-se citar como exemplo, um empreendimento em local com elevado índice de pluviosidade que irá colocar os trabalhos de compactação em torno da umidade ótima prejudicados pelas chuvas, afetando o prazo de construção.

2.1.4. DISPONIBILIDADE DE MATERIAL

É fundamental o conhecimento, através de ensaios, da tipologia de material disponível, volume, caracterização física, geológica e geotécnica com a finalidade de

obter os parâmetros pertinentes ao projeto e com a menor distância possível em relação a obra.

O tipo de barragem, muitas vezes, pode ser aquela cujos os materiais se encontram em quantidade suficiente dentro de uma distância de transporte razoável. A necessidade de escavações obrigatórias para a implantação de estruturas hidráulicas de concreto, ou tuneis pode ser fundamental para a escolha do tipo de barragem, obtendo a disponibilidade do material obrigatoriamente escavado.

2.1.5. CONDIÇÕES GEOLÓGICO – GEOTÉCNICAS DAS FUNDAÇÕES

Na construção de barragem é imprescindível atender-se aos fatores de empuxo hidráulico, permeabilidade, deformação e resistência da fundação. A fundação deve ser devidamente tratada com a finalidade de transformar as características de percolação adequáveis ao previsto. De acordo com Mello (1975), as obras sob maciços rochosos que tem a necessidade de melhoria quanto a percolação e rigidez é preciso que as fendas e diaclases sejam obturadas através da injeção, sob pressão, de calda de cimento.

No entanto as características mecânicas da fundação, como capacidade de suporte, deformação e compressibilidade são de difíceis intervenções. Na tabela 1 apresenta-se uma correlação entre a fundação em rocha, suas características mecânicas e o tipo de barragem mais adequado.

TABELA 1 — Correlação entre a classe da rocha e o tipo de barragem.(continua)

Classe de Rocha	Simb.	Rocha	Resistência a compressão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Tipo de barragem adequada
Muito Resistente	R1	Granitos, diabásicos, basaltos maciços, adensitos, gnaisses, migmatitos, quartzitos, calcário, metarenito, metagrauvaca. (São muito mais resistentes que o concreto)	>120	>50	Qualquer.

TABELA 1 — Correlação entre a classe da rocha e o tipo de barragem. (conclusão)

Classe de Rocha	Simb.	Rocha	Resistência a compressão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Tipo de barragem adequada
Pouco resistente	R3	Tufos soldados, brechas basálticas, micaxisto, filitos quartzosos, folhelhos silfíticos compactados e arenitos medianamente resistentes.	60 a 30	20 a 5	Não apropriadas para barragem em concreto em arco ou em contrafortes.
Branda	R4	Folhelhos argilosos, arenitos brandos, filitos grafitosos, talco-xistos, etc.	30 a 10	5 a 1	
Muito branda	R5	Argilitos e silitos brandos.	<10	<1	Estruturas de gravidade.

Fonte: MARQUES FILHO e GERALDO, 1998 *apud* SOUZA, 2013

2.1.6. HIDROLÓGICO – HIDRÁULICO

Segundo a Agência Nacional das Águas (ANA)¹, os estudos hidrológicos e hidráulicos tem por finalidade obter as vazões para o aproveitamento energético e a sua garantia conforme os meses, hidrogramas de cheia para dimensionamento de estrutura extravasor, curva de vazões no canal de fulga, determinar o volume de sedimentos afluentes para quantificar o volume de assoreamento.

Através desses estudos obtém-se a determinação da altura da barragem, a curva cota x volume, cota x área inundada e, conjuntamente com análise do vento predominante, determinar a borda livre e, dessa maneira, assegurar que as ondas que cheguem ao talude de montante sejam absorvidas por este.

¹ Disponível em < <http://www.snisb.gov.br/portal/snisb/downloads/volume-v-diretrizes-para-a-elaboracao-de-projetos-de-barragens/view>>. Acesso em 13 de junho de 2019

2.2. CONTROLE DE FLUXO

A análise de fluxo de água de uma barragem deve ser avaliada consoantes aos padrões de segurança estabelecidos em projeto básico. Para tanto, deve-se realizar-se um estudo de controle de fluxo com a finalidade de evitar o piping, reduzir gradientes de saída, perdas de água e aliviar as pressões neutras no maciço.

Consoante Massad (2010), uma das maiores preocupações dos projetistas é o piping, ou erosão regressiva tubular, no próprio maciço ou nas suas fundações. Esse fenômeno é caracterizado pela erosão de partículas de solo pela água, no sentido de jusante para montante, e tende a formar um tubo de erosão e evoluir para cavidades com aberturas cada vez maior, o que provoca a instabilidade geral da estrutura.

Segundo Massad (2010) a percolação de água no maciço é controlada através de sistemas de drenagem interna, o que mitiga a possibilidade de elevados valores de poropressão e possibilidade de ocorrência de erosões (piping).

A drenagem interna ocorre através de filtros verticais, horizontais e inclinados. Os drenos verticais possibilitam a condução de água que percola no maciço e os drenos horizontais encaminham o fluxo que provém da fundação para o pé do talude de jusante.

De acordo com MASSAD (2010), outra forma de controlar o fluxo de água nas barragens é através da percolação na fundação que ocorre através de tratamentos da fundação em que características de estanqueidade, compressibilidade e capacidade de suporte são aprimoradas para atender as solicitações impostas, com o objetivo de reduzir a permeabilidade das fundações e aumentar o caminho de percolação.

2.3. ESTABILIDADE DE TALUDES

Os métodos de análise de estabilidade de taludes não fazem parte do escopo do trabalho, sendo o princípio geral o conhecimento de forças que atuam na estrutura, a determinação das tensões de cisalhamento oriundas das forças solicitantes e a comparação com a resistência de cisalhamento do material, para obter o fator de segurança.

Segundo o Ministério da Integração Nacional secretaria de infra-estrutura hídrica (2002, p.44) “os taludes de montante e jusante da barragem e as ombreiras deveram ser estáveis sob todos os níveis dos reservatórios, bem como sob todas as condições de operação”

Dessa maneira há situações críticas em que a estrutura necessita de uma análise de estabilidade para assegurar o seu pleno funcionamento: estabilidade do talude em final de construção, estabilidade em regime permanente de operação e estabilidade do maciço no rebaixamento rápido.

2.4. ANÁLISE DE DEFORMAÇÕES

Os projetos de barragens no mundo são cada vez mais ousados, com estruturas esbeltas, e processos construtivos modernos. O cenário ideal da estrutura é minimizar prazo, custo e infiltrações não previstas, além de controlar os efeitos de deformação no maciço. O comportamento mecânico é fator crucial para o sucesso de um projeto de barragem de terra enrocamento, principalmente em grandes estruturas.

A modelagem de amostras em enrocamento é complexa e de difícil previsão, o estado anisotrópico do conjunto, o ângulo de atrito e o faturamento, que é maior na medida em que as dimensões evoluem, são alguns exemplos de entraves para determinar parâmetros assertivos aos materiais. A simulação através de ensaios laboratoriais em menor escala que tenta representar as condições de carregamento prevista em projeto. Deve-se atentar para a devida reprodução das condições de campo quanto a granulometria, grau de compactação, forma das partículas ou instrumentação do maciço, fundações e estruturas de concreto.

A solução do estudo de deformações em barragens atual passa pela modelagem numérica do método de elementos finitos (MEF). Essa solução busca resultados aproximados de equações diferenciais que definem o equilíbrio, por meio das condições de contorno do elemento.

3. DESCRIÇÃO GERAL DA BARRAGEM

Conforme o memorial descritivo UHE batalha (2006), o empreendimento para o qual foi desenvolvido o projeto da barragem no presente trabalho é a UHE Batalha que fica localizada no rio São Marcos, drena uma bacia hidrográfica de

12.140km² e está localizado entre os paralelos 16°00' e 18°15' sul e os meridianos 47° e 48° oeste, sendo um dos principais afluentes da margem direita do rio Paranaíba. O posicionamento da UHE pode ser visto no anexo A. O anexo B mostra os acessos existentes na região de inserção da UHE e a bacia hidrográfica do rio São Marcos.

Segundo memorial descritivo UHE batalha (2006), após uma visão geral, verificou-se que o local de implantação da UHE é composto por vales pouco acidentados e a vegetação densa. O levantamento topográfico, realizado com estação total, mostra área de abrangência da barragem bem como das estruturas civis que compõem a usina hidrelétrica. A seguir apresenta-se o levantamento topográfico local, bem como a batimetria realizada no rio São Marcos.

Sabe-se que uma UHE é por diversos itens que a compõe, tais como: canal de adução, vertedouro, casa de máquinas, turbinas, geradores, linha de transmissão, subestação, túnel de desvio e etc. A barragem é do tipo zonada, com núcleo central argiloso e espaldares de material randômico. A drenagem interna é constituída por filtro inclinado e tapete drenante horizontal. A barragem, nos segmentos da ombreira esquerda, leito do rio e margem / ombreira direita, possui comprimento total de 380 m e altura máxima de 54,00 m no leito do rio.

O projeto de uma barragem tem a necessidade de interação com diversas outras áreas, por exemplo biologia, cartografia, meteorologia, topografia, hidrologia, geologia, geotecnia, entre outros. O objetivo do trabalho acadêmico é a avaliação do barramento e de seus principais parâmetros, especificamente ao que concerne a grande área da engenharia civil.

3.1. INVESTIGAÇÕES GEOTÉCNICAS

Segundo memorial descritivo UHE batalha (2006), os dados levantados em campo constam no período de estudo de viabilidade inicial, em 1985, posteriormente houve a atualização e complementação dos estudos de inventário hidrelétrico da bacia do rio São Marcos, em 2002, e por fim, o estudo de viabilidade final elaborado em 2004.

Os estudos de viabilidade inicial foram realizados em duas etapas. A primeira etapa, desenvolvida entre agosto e dezembro de 1985, constou de sondagens

rotativas, sondagens a trado, poços, trincheiras e sondagens geofísicas a seguir descritas:

- Duas sondagens rotativas na margem direita, com finalidades exploratórias, num total de 73,82 metros;
- Seis sondagens rotativas na barragem e estruturas de desvio, perfazendo um total de 246,12 metros;
- Quatro sondagens rotativas com amostragem integral no local das estruturas de concreto, num total de 140,30 metros;
- Vinte e cinco sondagens a trado para material de empréstimo, com um total de 78,18 metros;
- Quatro poços de inspeção num total de 4,90 metros;
- Cinco trincheiras, com profundidade variável entre 0,5 a 2,5 metros e com 550 metros de extensão;
- Cinquenta e três sondagens sísmicas;
- Quatorze sondagens elétricas, num total de cerca de 4.650 metros levantados;
- Mapeamentos geológicos e geotécnicos do sítio e do reservatório;
- Levantamentos topográficos, para locação dos trabalhos.

Nos furos de sondagens rotativas, foram executados ensaios SPT e ensaios de perda d'água sob pressão exceto nos furos com amostragem integral.

A segunda etapa da campanha de investigações geológico-geotécnicas, desenvolvida entre janeiro e março de 1987, constou dos seguintes trabalhos:

- Três sondagens rotativas, perfazendo um total de 128,95 metros de perfurações, com boa recuperação (mais de 80%). Nos furos de sondagens rotativas, foram realizados ensaios de perda d'água sob pressão (EPA);
- Levantamentos topográficos, para locação dos furos de sondagens.

As três primeiras campanhas de sondagem serviram de embasamento para a elaboração dos estudos ao nível de Viabilidade Inicial, tendo resultado em 37 sondagens, sendo quatro delas orientadas, realizadas com a técnica de amostragem integral. As demais sondagens, sempre verticais, embora revelando a natureza dos materiais atravessados e suas características geológico-geotécnicas, não forneceram indicações sobre a orientação espacial das camadas.

Ainda em conformidade com memorial descritivo UHE batalha, partir dos dados disponíveis nos estudos anteriores de 1987, inclusive sondagens rotativas e ensaios de campo, foram realizados novos estudos na fase de Viabilidade Final para a caracterização geológico-geotécnica da área abrangida pela localização do eixo da barragem, pelas estruturas de desvio, de adução e de geração, sendo programadas novas sondagens e ensaios de campo de campo. Adicionalmente, foi feito um mapeamento geológico do local do empreendimento, utilizando-se inclusive os dados das sondagens existentes.

As investigações para determinar as condições geológico-geotécnicas das rochas nos níveis de fundação das estruturas compreenderam um total de 16 sondagens mistas com ensaios de SPT em solo, a cada metro, de infiltração em solo, principalmente ao longo do eixo da barragem e de perda d'água em rocha, normalmente a cada trecho de 3 metros perfurados. Foram realizadas ainda 15 coletas de amostras por meio de sonda rotativa, escavação para abertura de 5 trincheiras e 5 poços de inspeção.

A interpretação de boletins de sondagem é composto das seguintes informações: camadas geológicas/geotécnicas, profundidade do furo, nível de água, indicação de artesianismo, índice de resistência a penetração, classificação de rochas e/ou solos, recuperação de testemunhos (efetiva e/ou RQD), grau de fraturamento, alteração e coerência, dentre outros aspectos relevantes da prospecção. São apresentados alguns conceitos necessários a interpretação das investigações:

3.1.1. COERÊNCIA

É um índice indicativo de resistência, utilizado em rochas com resistência a compressão, inferior a 20 MPa. Consoante GUIDICINI E NIEBLE (1998 *apud* LOPES, 2006) a caracterização de coerência é empírica e baseada em alguns critérios conforme definidos abaixo:

A Rocha muito coerente, C1, tem como principais características quebra com dificuldade ao golpe de martelo e fragmento possui bordas cortantes que resistem ao corte por lâmina de aço.

A Rocha coerente, C2, tem como principais atributos a quebra com relativa facilidade ao golpe de martelo, fragmento possui bordas cortantes que podem ser abatidas pelo corte de lâmina de aço e superfície riscável por lâmina de aço.

A Rocha pouco coerente, C3, tem como aspectos mais notáveis a quebra com facilidade ao golpe de martelo, bordas de fragmentos podem ser quebradas pela pressão dos dedos e lâmina de aço provoca um sulco acentuado na superfície do fragmento.

A Rocha friável, C4, tem como particularidade o esfarelamento ao golpe de martelo e a desagregação sob pressão dos dedos.

3.1.2. ALTERAÇÃO

Segundo Guidicini e Nieble (1984), o processo de alteração conduz ao enfraquecimento gradual do meio rochoso, que é proveniente da remoção dos elementos solúveis provenientes dos minerais constituintes das rochas, ou da dissolução dos elementos em função da cimentação em solos ou rochas, ou, por fim, pelo desenvolvimento de micro fraturas em meio rochoso que não as possuía. A consequência imediata dos processos de alteração é o decaimento das propriedades mecânica das rochas.

Os graus estabelecidos para caracterizar o processo de alteração, podem ser assim expostos: A1 rocha sã, A2 rocha pouco a medianamente alterada, A3 rocha muito alterada, A4 rocha totalmente alterada.

3.1.3. GRAU DE FRATURAMENTO

Esse fator mostra o número de fraturas por metro linear ao longo de uma determinada direção. O índice mostra as fraturas naturais, isto é, são desconsideradas fraturas provenientes das prospecção.

De acordo com Costa (2012), as rochas ocasionalmente fraturadas tem-se apenas um fratura por metro de amostra, rochas pouco fraturadas apresenta entre uma e cinco fraturas por metro de amostra, rochas medianamente fraturadas é classificada com número de fraturas por metro variando de seis a dez, rochas muito fraturadas é caracterizada entre onze e vinte fraturas por metro linear de amostra, rochas extremamente fraturadas apresentam-se com número de fraturas por metro linear superior a vinte fraturas, e por fim, rocha em fragmentos é observada por torrões em tamanhos diversos de maneira dispersa na amostra.

3.1.4. ROCK QUALITY DESIGNATION (RQD)

É um índice quantitativo para descrever a qualidade do maciço rochoso, definido como a soma dos comprimentos pedaços de comprimento rocha são, maiores ou iguais a 10 cm, dividido pelo comprimento total do testemunho, em percentagem. Inicialmente utilizado em obras de túneis, tornou-se comum a sua utilização na caracterização de diversas obras. É determinado pela aferição da porcentagem de rocha intacta contida no testemunho das sondagens rotativas diamantadas conforme a tabela abaixo:

TABELA 2 — Classificação das rochas quanto à qualidade

Grau	%	Qualidade da Rocha
R1	100 - 91	Excelente
R2	90 - 76	Boa
R3	75 - 51	Regular
R4	50 - 26	Má
R5	25 - 0	Péssima

Fonte: Costa (2012).

3.1.5. CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

O conceito refere-se a capacidade da permeabilidade do escoamento do fluido em rochas ou solos, sendo obtido através do ensaio de perda d'água obtendo para cada estágio de pressão a perda d'água. Segundo Souza (2012) é descrito a classificação que determina os cinco graus de condutividade hidráulica conforme a seguir:

Rochas com grau de condutividade hidráulica muito baixa, H1, apresenta a perda específica de água, isto é, a vazão por metro de furo ensaiado a determinada pressão, de até $0,1 \text{ l/min} \times \text{m} \times \text{kgf/cm}^2$.

Rochas com grau de condutividade hidráulica baixa, H2, tem como principal atributo a perda específica de água de até $0,1$ até $1,0 \text{ l/min} \times \text{m} \times \text{kgf/cm}^2$.

Rochas com grau de condutividade hidráulica moderada, H3, tem como principal atributo a perda específica de água de até $1,0$ até $5,0 \text{ l/min} \times \text{m} \times \text{kgf/cm}^2$.

Rochas com grau de condutividade hidráulica alta, H4, tem como principal atributo a perda específica de água de até $5,0$ até $10,0 \text{ l/min} \times \text{m} \times \text{kgf/cm}^2$.

Por fim, as rochas com grau de condutividade hidráulica muito alta, H4, tem como principal atributo a perda específica de água superior a $10,0 \text{ l/min} \times \text{m} \times \text{kgf/cm}^2$.

3.2. LITOLOGIA E SEÇÃO GEOLÓGICA

Conforme o memorial descritivo de UHE batalha, O estudo especializado de rochas, classificações e processos geológicos na área da barragem de batalha estão localizados abaixo da capa superficial de solo que são filitos, filitos grafitosos e quartzitos, que se interpenetram, dando margem a associações de litotipos, não menos importantes no contexto das obras.

Para fins de identificação e classificação geomecânica, adotou-se a diferenciação em quatro categorias de materiais: filitos, filitos grafitosos, quartzito e alternâncias filito/quartzito. Todavia a resposta do maciço rochoso aos esforços impostos pelas obras resulta da interação das características dos diferentes materiais, o que impõe a análise detalhada de cada caso, separadamente. Em UHE Batalha, as alternâncias litológicas são frequentes, assim, o comportamento do maciço rochoso estará condicionado à presença simultânea de dois ou mais materiais diferentes nas superfícies de assentamento das estruturas.

O quartzito e filito, exibem comportamento diferente perante o intemperismo, sendo o primeiro mais resistente do que o segundo, dada a natureza de seus constituintes mineralógicos. Em superfície, o quartzito sustenta as formas de relevo, enquanto o filito, mais erodível, é associado às depressões.

Vale ressaltar que a implementação do projeto provavelmente foi sujeita a uma contínua verificação das condições geológicas efetivamente presentes, de modo a permitir as adaptações necessárias.

A estabilidade de maciços rochosos depende, em grande parte, da presença de descontinuidades nas rochas. As descontinuidades mais comuns, presentes no maciço Batalha, são representadas por juntas, contatos litológicos, planos de foliação, veios, além das foliações metamórficas.

Segundo notas do memorial descritivo UHE batalha (2006), uma descontinuidade é considerada como sendo um plano de fraqueza na rocha, por meio da qual o material rochoso é estruturalmente descontínuo, podendo apresentar uma resistên-

cia ao cisalhamento reduzida, dependendo da espessura, da natureza do preenchimento das descontinuidades, da abertura, da rugosidade e da sua rigidez normal e ao cisalhamento. Em função disto, é necessário levar em conta diversos fatores relativos às descontinuidades, tais como: abertura, espaçamento, orientação, rugosidade, persistência, grau de alteração, coerência e a presença/percolação de água.

A caracterização do maciço rochoso deu-se baseado pelo Sistema-Q (Barton *et al.*, 2000), procedeu-se à estimativa das classes de sistema de suporte para o caso dos túneis e de faixas de valores de parâmetros de resistência ao cisalhamento e módulos de deformabilidade do maciço rochoso, no caso de análise de estabilidade de taludes escavados a céu aberto e avaliação dos maciços das fundações das estruturas de concreto.

TABELA 3 — Correlação da classificação geomecânica e horizontes geotécnicos.

Classe Geomecânica	Sistema Q	Horizontes Geotécnicos
A	> 40,0	HG-1 (A1, C1, F1/F2)
B – C	40 - 4	HG-2 (A2, C2, F2/F3)
D-E	4 – 0,1	HG-3 (A3, C3, F3/F4)
F – G	0,1 – 0,001	HG-4 (A4, C4, F4/F5)
SOLO	< 0,001	HG - 5

Fonte: Memorial Descritivo(2006).

Consoante notas do memorial descritivo UHE batalha (2006), nos filitos e quartzitos, que são os litotipos dominantes no sítio do empreendimento, a forte anisotropia decorrente da foliação rege o comportamento mecânico do material.

O mesmo grau de variabilidade atinge praticamente todas as características geotécnicas e geomecânicas das rochas com forte anisotropia estrutural, entre as quais os filitos e quartzitos se inserem.

Assim, as propriedades do maciço rochoso, como um todo, estão fortemente vinculadas à resistência da rocha paralelamente à foliação, que contém a maioria dos planos de fraqueza estrutural, primários ou herdados ao longo da história geológica (planos de estiramento, clivagem, diaclasamento, intemperização, etc).

Segundo notas do memorial descritivo UHE batalha (2006), o horizonte geotécnico HG-1 caracteriza-se por apresentar rocha sã (A1), muito coerente (C1), quebrando com dificuldade ao golpe do martelo, muito pouco fraturada (F1) a pouco fraturada (F2).

O horizonte geotécnico HG-2 caracteriza-se por apresentar rocha pouco a medianamente alterada (A2), medianamente coerente (C2), podendo ser quebrada com certa dificuldade com a mão. Geralmente o grau de fraturamento situa-se entre o pouco fraturado (F2) e o medianamente fraturado (F3).

O horizonte geotécnico HG-3 corresponde à rocha com grau de alteração elevado (A3), pouco coerente (C3). Geralmente o grau de fraturamento situa-se entre o medianamente fraturado (F3) a muito fraturado (F4).

O horizonte geotécnico HG-4 caracteriza-se por apresentar rocha totalmente alterada (A4), incoerente (C4) e grau de fraturamento situa-se entre o muito fraturado (F4) e o extremamente fraturado (F5).

O horizonte geotécnico HG-5 é característico de solo (coluvial e/ou residual maduro/jovem), que forma um capeamento com espessura da ordem de 3 m em áreas mais elevadas da topografia, chegando aos 18 m de espessura nas partes mais baixas, correspondentes à área de emboque do túnel de desvio.

Os estudos básicos de geologia e geotecnia se concentram em: Aprofundamento do entendimento geológico-estrutural do local da implantação das obras de barramento/ adução/ vertedouro/ geração. Elaboração de modelos, quanto à geometria e determinação de parâmetros geomecânicos, para dar suporte aos projetos de escavação e tratamento das obras a céu aberto e das obras subterrâneas (túneis), bem como para os de fundação das obras de terra/enrocamento e das estruturas de concreto. No entanto o foco do trabalho é somente o estudo de condicionante geológico e geotécnicos, bem como sua previsão de comportamento na área da barragem.

As seções geológico-geotécnicas, assinalando a litologia e os horizontes geotécnicos estão apresentadas nos desenhos em anexo. Especificamente trata-se do corte longitudinal da área do barramento.

Consoante notas do memorial descritivo UHE batalha (2006), a ombreira esquerda da barragem é caracterizada por uma alternância de camadas e/ou lentes de quartzito e filitos. Esta condição faz com que o maciço seja resistente à erosão, resultando em uma encosta abrupta com topografia bem acentuada. A espessura do solo neste local alcança uma espessura máxima de 3 m, nas partes mais altas.

A ombreira esquerda apresenta um quadro geomecânico extremamente complexo, não se inserindo apenas em um horizonte geotécnico típico, mas com in-

terpenetração dos horizontes nos diversos litotipos encontrados no maciço, dificultando uma melhor compartimentação geomecânica, caracterizando um maciço bastante heterogêneo.

As condições de fundação da barragem no leito do rio merecem atenção especial, devido à possível existência de blocos soltos no fundo da calha e de fortes irregularidades das superfícies rochosas. Caso seja confirmado este cenário, será indicado remover parte destes blocos, principalmente na região do núcleo, do filtro e transições. Em decorrência, prevê-se a aplicação expressiva de concreto na região correspondente à base do núcleo argiloso e do filtro/transições de jusante. A maioria dos afloramentos apresenta-se medianamente a muito alterado (A2/A3), com alguns poucos são (A1). Quanto ao grau de fraturamento, predominam, rochas pouco a medianamente fraturadas e espaçamento entre as fraturas de 0,1 a 1,5 m. O ângulo médio de mergulho para essas rochas é de 25° para sudoeste (SW).

Consoante notas memorial descritivo UHE batalha (2006), a margem/ombreira direita da barragem é dotada de uma topografia suave, em decorrência da maior incidência de filitos, em comparação com as intercalações quartzíticas. Na área, as observações em superfície são dificultadas pela cobertura generalizada de solos de origem variada, sedimentar de terraço, coluvionar e residuais, além da vegetação de porte. Dois pequenos talwegues se desenvolvem paralelamente ao eixo da barragem, um a montante, outro do lado jusante, entalhados no horizonte superficial de solo coluvionar e residual, com paredes íngremes e pequena largura. Os solos coluvionares, constituídos de areia siltosa e pedregulhos, são de pequena expressão nas partes elevadas, podendo chegar a dois metros junto aos talwegues paralelos ao eixo. Junto à margem do rio ocorre uma mancha de solo colúvio - aluvionar, de espessura de até cinco metros, formado na superfície por areias siltosas, fofas a pouco compactas, seguidas por solo residual, em profundidade. O solo residual também é de pequena expressão, essencialmente siltoso, com espessura média de dois a quatro metros. Nesta margem, os mergulhos das camadas variam entre 15° e 45°, geralmente para SW. A espessura do solo e do maciço superficial intemperizado atinge em média cerca de 10 m, seguido, em profundidade, por um maciço rochoso com características de horizonte geotécnico HG-3 (A3, C3, F3), com intercalações de horizonte geotécnico HG-2 (A2, C2, F2).

3.3. ENSAIOS LABORATORIAIS

Consoante notas do memorial descritivo UHE batalha (2006), os ensaios laboratoriais fornecem suporte para assegurar o pleno funcionamento da estrutura mediante as solicitações impostas, de diversas ordens.

Os materiais constitutivos do maciço da barragem e seus respectivos parâmetros geotécnicos estão descritos na tabela abaixo. Nas análises para Final de Construção, foi considerado R_u , ou seja, poropressão durante a fase de construção, no valor de 0,15 para o núcleo argiloso. Vale ressaltar que tal parâmetro é determinado, de maneira convincente, pela instrumentação geotécnica em que obtém-se a razão da poropressão pelo peso específico da água.

Tabela 4 — Materiais e parâmetros geotécnicos.

Material	$\gamma(\text{KN/m}^3)$	$\gamma_{sat}(\text{KN/m}^3)$	c' (KPa)	φ' (graus)
Núcleo	19	20	20	28
Random Fino	19	20	20	27
Random Grosso (Interno)	20	21	0	38
Random Grosso (Externo)	20	21	5	38
Rip Rap	21	22	0	48
Dreno	19	20	0	40
Fundação Solo (Margem Direita)	18	19	20	30
Fundação Solo (Leito Rio)	26	27	50	32

Fonte: Memorial Descritivo(2006).

3.4. ASPECTOS RELEVANTES BARRAGEM BATALHA

Conforme notas do memorial descritivo UHE batalha (2006), o fechamento do vale do rio São Marcos é feito por uma barragem de terra/enrocamento, que tem 380m de comprimento, altura máxima de 54,00m no leito do rio e largura de crista de 8m. As seções típicas são apresentadas nos anexos.

A barragem é do tipo zonada, cujo núcleo central impermeável com taludes de 1V:0,25H é constituído por solos argilosos coluvionares e/ou residuais maduros,

provenientes de áreas de empréstimo. Os espaldares são compartimentados em duas subzonas, cujos materiais serão provenientes de horizontes de rocha com diversos graus de coerência, alteração e fraturamento, obtidas em escavações obrigatórias. A parcela destes materiais com granulometria mais fina, o rondon fino, será lançada nas zonas contíguas ao núcleo. A parcela mais graúda, o rondon grosso, será lançada nas zonas externas e intermediárias.

Conforme notas do memorial descritivo UHE batalha (2006), para a drenagem interna foi previsto um filtro adjacente à face da jusante do núcleo, constituído por areia limpa, sem finos e bem graduada, com largura de 1,00m, conectado a um tapete drenante situado sobre a fundação, tipo sanduíche, composto por camadas envolventes de areia e central de brita fina.

Além dos tratamentos superficiais convencionais das fundações, está previsto o tratamento profundo do maciço rochoso através de injeções de impermeabilização, como mostrado no anexo A.

4. ESTUDO COMPARADO ENTRE O PROJETO TÉCNICO DA UHE BATALHA E AS TÉCNICAS DE ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO DE BARRAGENS

Conforme Massad (2010), os métodos para análise de estabilidade global de taludes é baseado nos seguintes pressupostos: comportamento rígido-plástico do solo, ou seja, o mesmo rompe-se bruscamente, sem se deformar. As equações de equilíbrio estático são válidas na iminência da ruptura, apesar de o processo ser dinâmico. E, por fim, o coeficiente de segurança é constante ao longo de toda linha de ruptura, ou seja, ignora-se eventuais fenômenos de ruptura progressiva.

Segundo memorial descritivo UHE batalha (2006), as análises de estabilidade dos taludes da barragem foram feitas pelo método de equilíbrio limite de Bishop simplificado, através de potenciais superfícies de rupturas circulares, utilizando o programa computacional GeoStudio 2004 da GeoSlope. Em todas as análises foi adotada uma sobrecarga distribuída de 20 kPa na crista da barragem.

Duas seções foram analisadas, em função das características geométricas do maciço e dos materiais de fundação: uma correspondente ao leito do rio, apresenta-se com fundação em rocha, e outra à margem direita, que caracteriza-se pela fundação em solo.

A barragem batalha foi verificada a estabilidade global de sua estrutura consoante as condições críticas de carregamento, em ambos os taludes, e a tabela tem por finalidade apresentar a comparação do fator de segurança requerido no método determinado com o efetivamente calculado.

TABELA 5 — Fator de Segurança barragem UHE batalha.

Condição de Carregamento	Talude	FSmín Requerido	FSmín Obtido	
			Leito do Rio	Margem Direita
Final de Construção	Jusante	1,30	1,50	1,45
	Montante	1,30	1,56	1,51
	Jusante	1,50	1,54	1,57
	Montante	1,50	1,57	1,59
Regime Permanente	Jusante	1,50	1,54	1,48
	Montante	1,50	1,59	1,61
	Jusante	1,20	1,42	1,40
	Montante	1,20	1,32	1,34
Rebaixamento Rápido	Montante	1,20	1,23	1,24

Fonte: Memorial Descritivo (2006)

Vale ressaltar que em UHE batalha, todos os parâmetros geotécnicos foram aferidos através de ensaios laboratoriais (TABELA 4) e, posteriormente, utilizados como condições de contorno para o cálculo da estrutura (TABELA 5). Dessa maneira, pode-se entender a importância e relevância de obter parâmetros de projetos com vista a análise de estabilidade de taludes, o que mitiga a possibilidade de perdas sócio econômicas causadas pela ruína como pelos diversos aspectos geológico-geotécnico relacionados ao comportamento de solos e rochas.

O monitoramento e auscultação da barragem batalha e de suas fundações, foi prevista através da instrumentação de três seções: uma na margem direita, uma no leito do rio e outra na ombreira esquerda. Os tipos de instrumentos preconizados são: marco superficial de deslocamento; placa de recalque magnética; caixa sueca; inclinômetro; piezômetro Casagrande; medidor de vazão.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho tinha o objetivo de apontar principais parâmetros para elaborar um projeto geotécnico de barragem de terra. A princípio foi necessário o estudo de fatores condicionantes, baseado no custo de construção, para se optar pela que fosse mais econômica. Os pontos de maior relevância do projeto da barragem foram os aspectos relacionados ao dimensionamento quanto ao fluxo e condições geotécnicas. Utilizou-se o estudo de caso UHE BATALHA para o desenvolvimento do trabalho.

As sondagens mostram que, em profundidade, o topo da rocha reflete esta diversidade de comportamento e é muito irregular, com saliências e reentrâncias acentuadas. Ao longo das camadas de filito, em particular no filito grafitoso, o intemperismo pode penetrar diversas dezenas de metros a partir da superfície do terreno, enquanto o quartzito adjacente se encontra, via de regra, na mesma profundidade, em estado mais preservado.

Consoante notas do memorial descritivo UHE batalha (2006), nos filitos e quartzitos, a forte anisotropia decorrente da foliação rege o comportamento do material, a tal ponto que a determinação das características geotécnicas e geomecânicas é realizada com dificuldade, devido a esse aspecto. Assim, as propriedades do maciço rochoso, como um todo, estão fortemente vinculadas à resistência da rocha paralelamente à foliação, que contém a maioria dos planos de fraqueza estrutural, primários ou herdados ao longo da história geológica (planos de estiramento, clivagem, diaclasamento, intemperização, etc).

Para acompanhamento do comportamento do maciço compactado da barragem e de suas fundações, está prevista a instrumentação. Tais informações permitem a compatibilidade de fatores adotados em memória de cálculo com o efetivamente mensurado, através do monitoramento. Essa análise de tensões e deformações são cruciais para análise e garantia de estabilidade, uma vez que as condições de fundação, tratamentos e materiais são fatores relevantes nesse projeto.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Águas (ANA). **Diretrizes para elaboração de Projetos de Barragens**. Brasília: ANA.2016.

COSTA, Walter Duarte. **Geologia de barragens**. São Paulo: Oficina de textos.2012.

CRUZ, P.T. **100 Barragens Brasileiras: casos históricos, materiais de construção e projeto**. São Paulo: Oficina de Textos, 1996.

FURNAS. UHE BATALHA - PROJETO BÁSICO. *In: Memorial Descritivo*. [S. l.: s. n.], 2006. E-book

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GUIDICINI, G. NIEBLE, C.M. **Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavações**. São Paulo: Editora Edgard Blucher.1984. 195p.

MASSAD, Façal. **Obras de Terra: Curso básico de Geotecnia**. São Paulo: Oficina de textos.2010. 173p.-216p.

MELLO. V.F.B.de. **Maçãos e obras de terra: anotações de apoio às aulas**. São Paulo: EPUSP, 1975.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL, SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA HÍDRICA, **Manual de Segurança e Inspeção de Barragens**. Brasília: Departamento de Brasil. Projetos Hídricos – DPOH. 2002.

SOUZA, Mariana Miranda de. **Estudo para o projeto geotécnico da barragem de Alto Irani, SC**. Trabalho de Conclusão de curso – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2013.

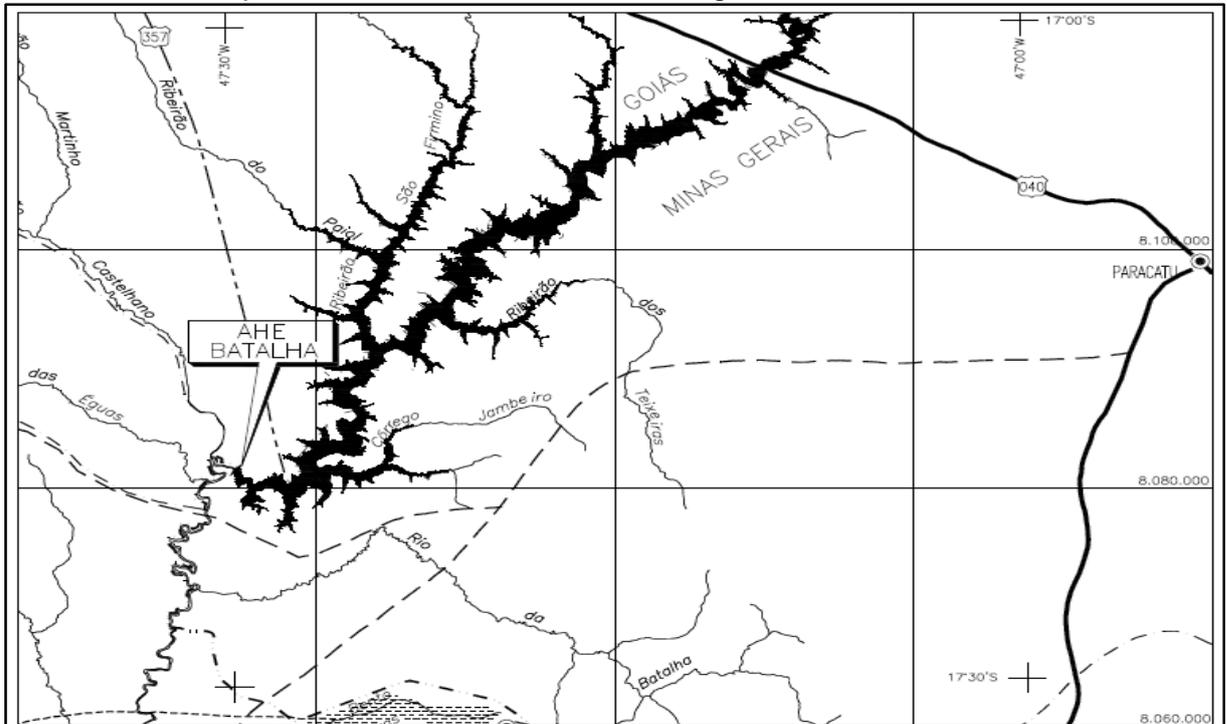
ANEXO A — Dados de projeto UHE batalha

FIGURA 2 — Mapa com localização UHE Batalha, entre estados MG/GO.



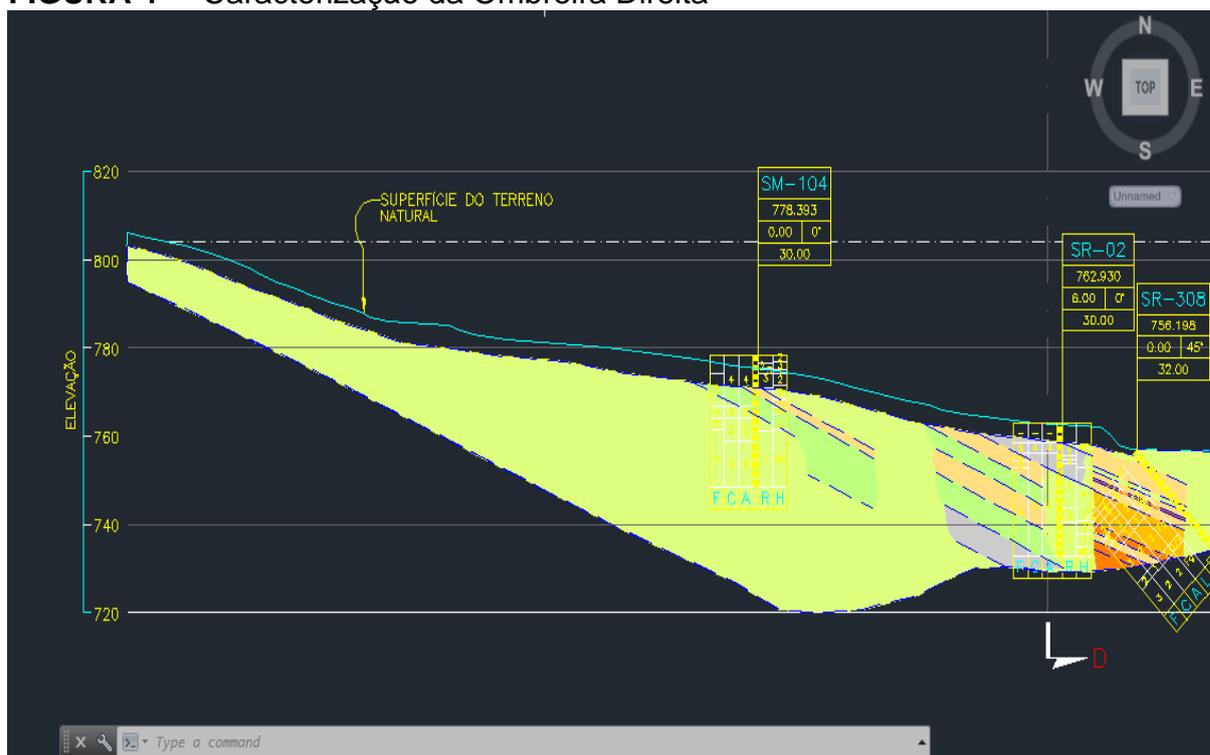
Fonte: Projeto Básico, 2006.

FIGURA 3 — Mapa com acessos existentes na região



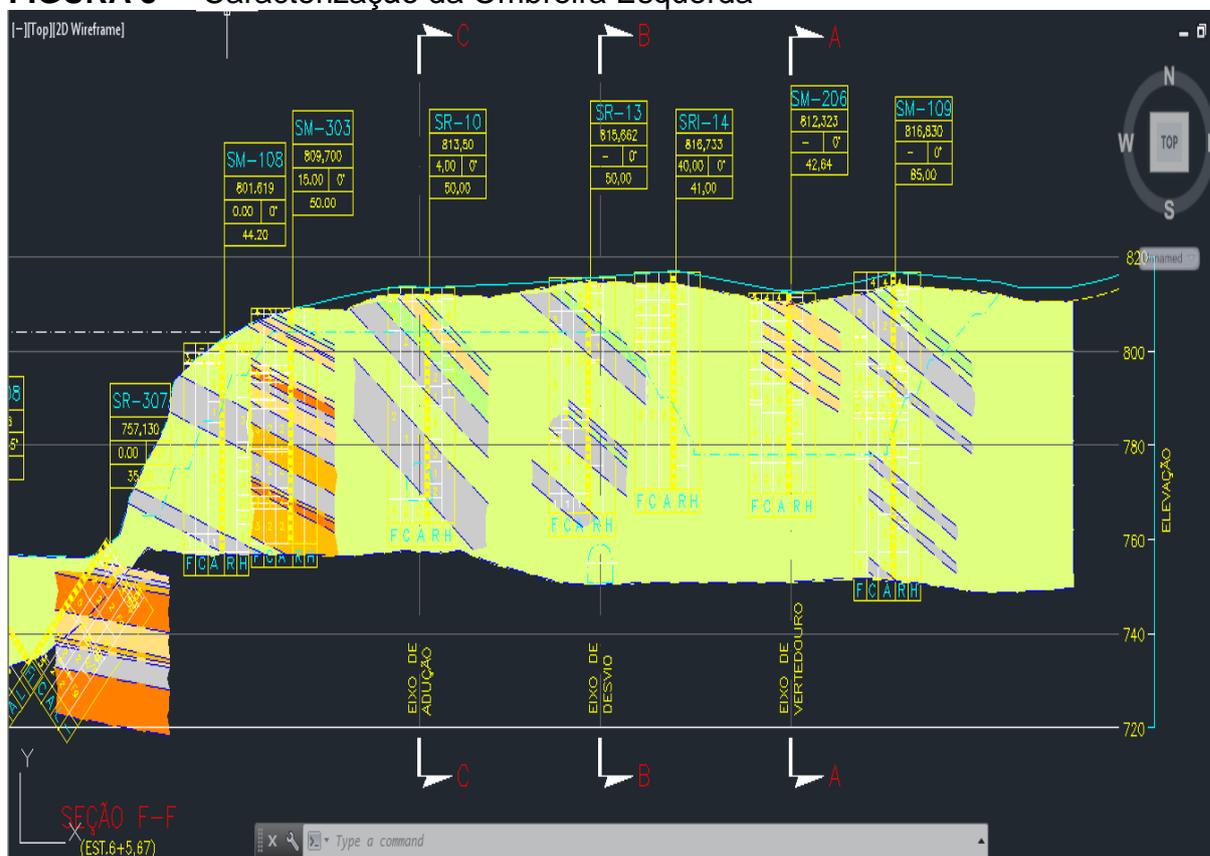
Fonte: Projeto Básico, 2006.

FIGURA 4 – Caracterização da Ombreira Direita



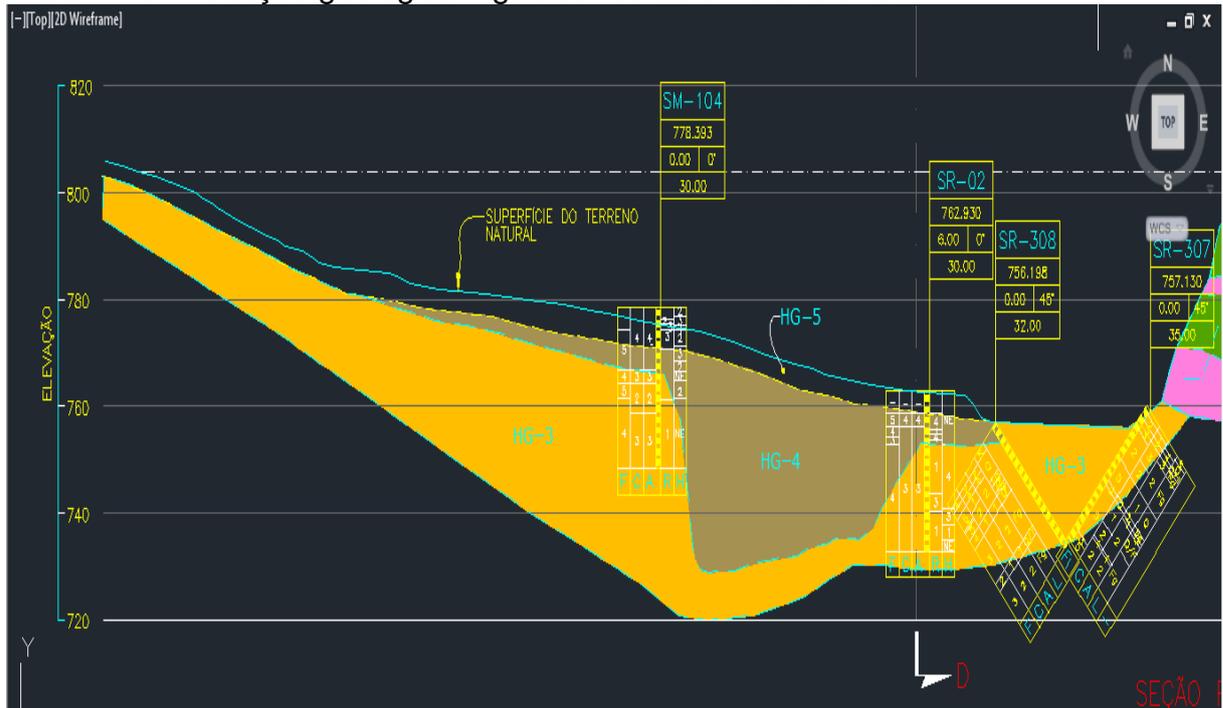
Fonte: Projeto Básico, 2006.

FIGURA 5 – Caracterização da Ombreira Esquerda



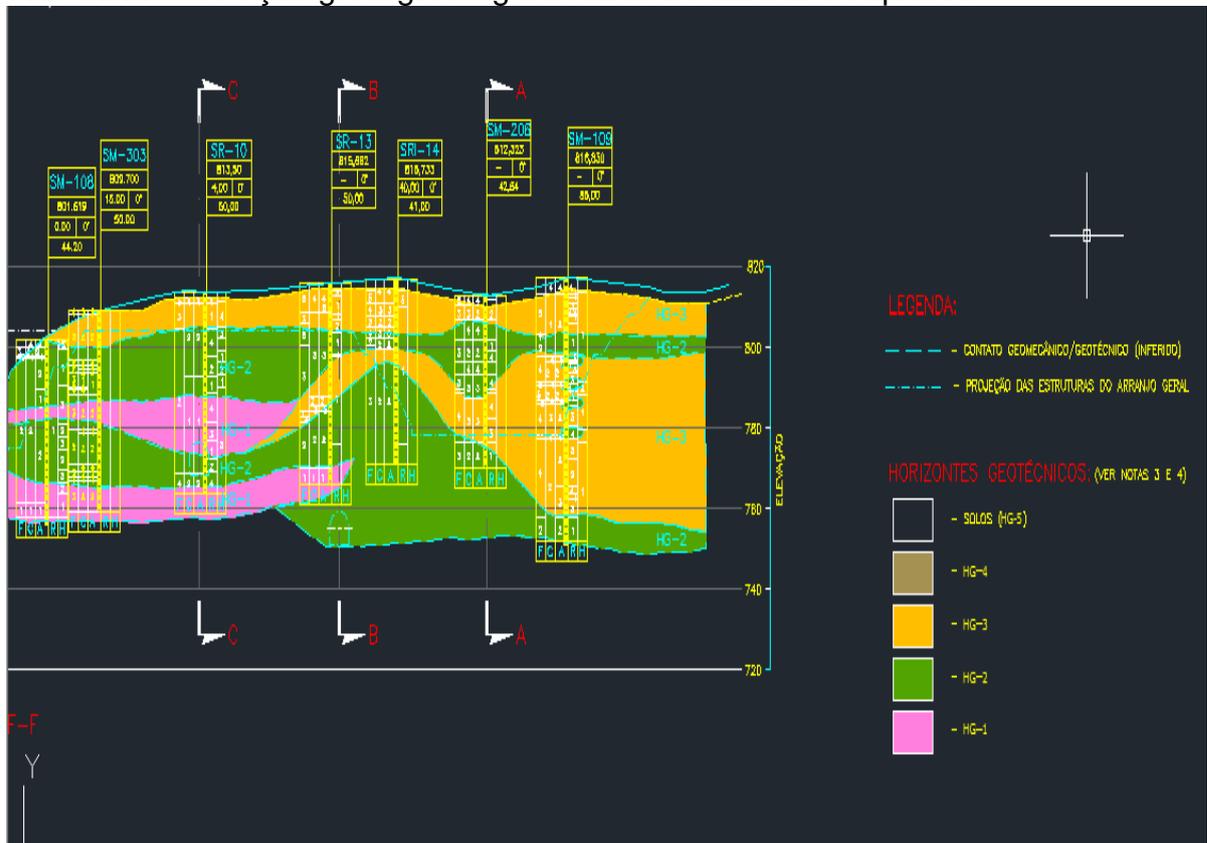
Fonte: Projeto Básico, 2006

FIGURA 6 – Secção geológico – geotécnica da ombreira direita



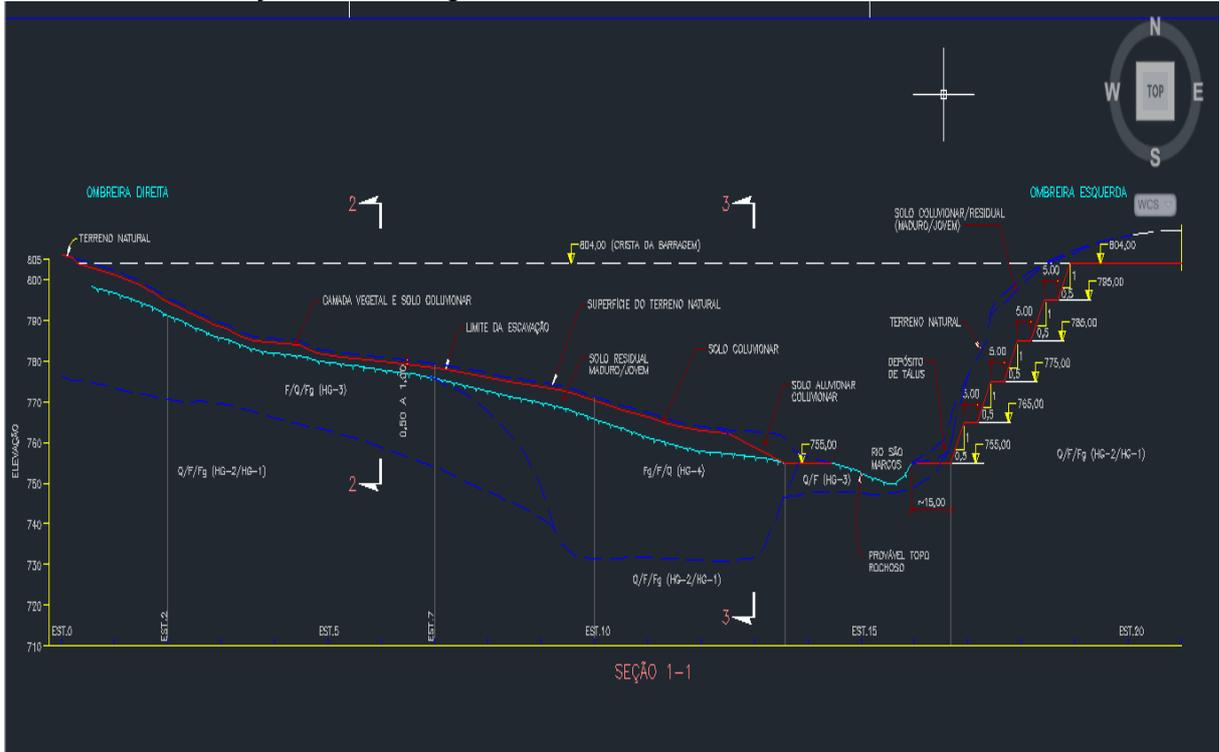
Fonte: Projeto Básico, 2006.

FIGURA 7 – Secção geológico – geotécnica da ombreira esquerda



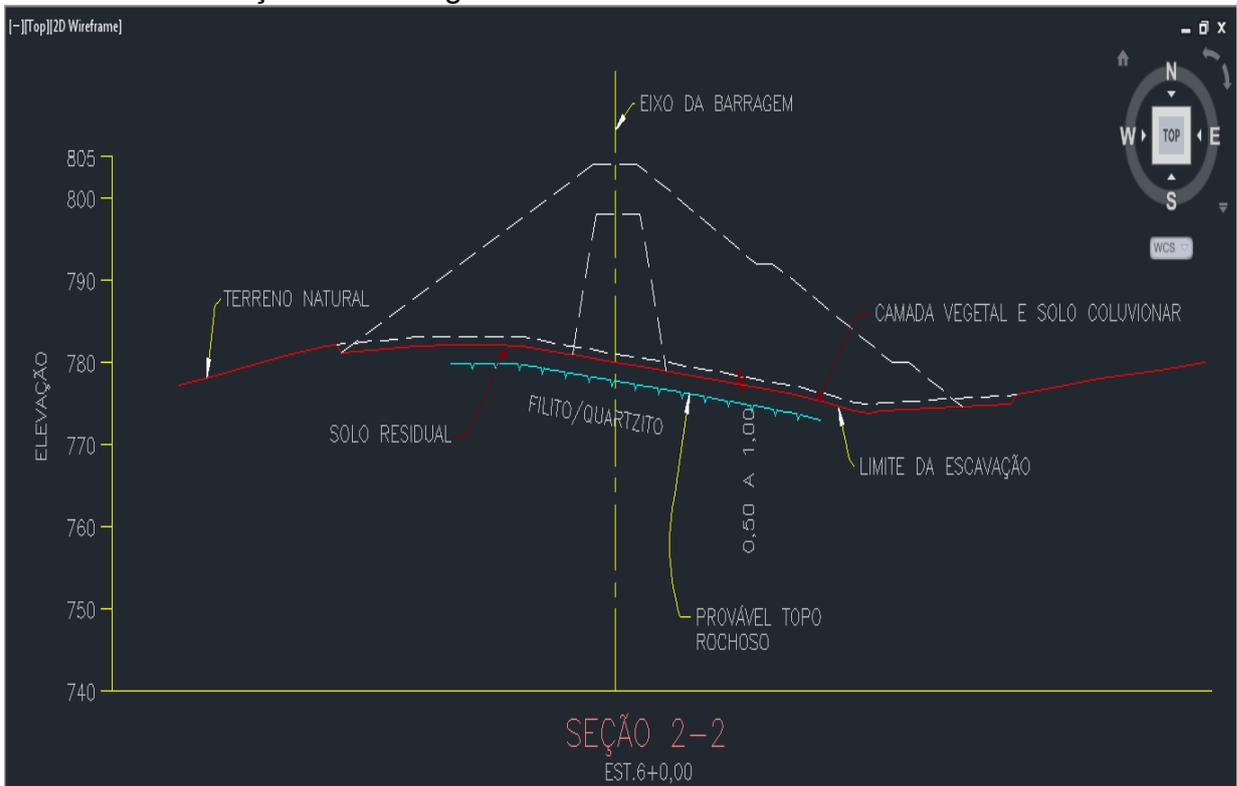
Fonte: Projeto Básico, 2006.

FIGURA 8 – Secção 1-1 barragem



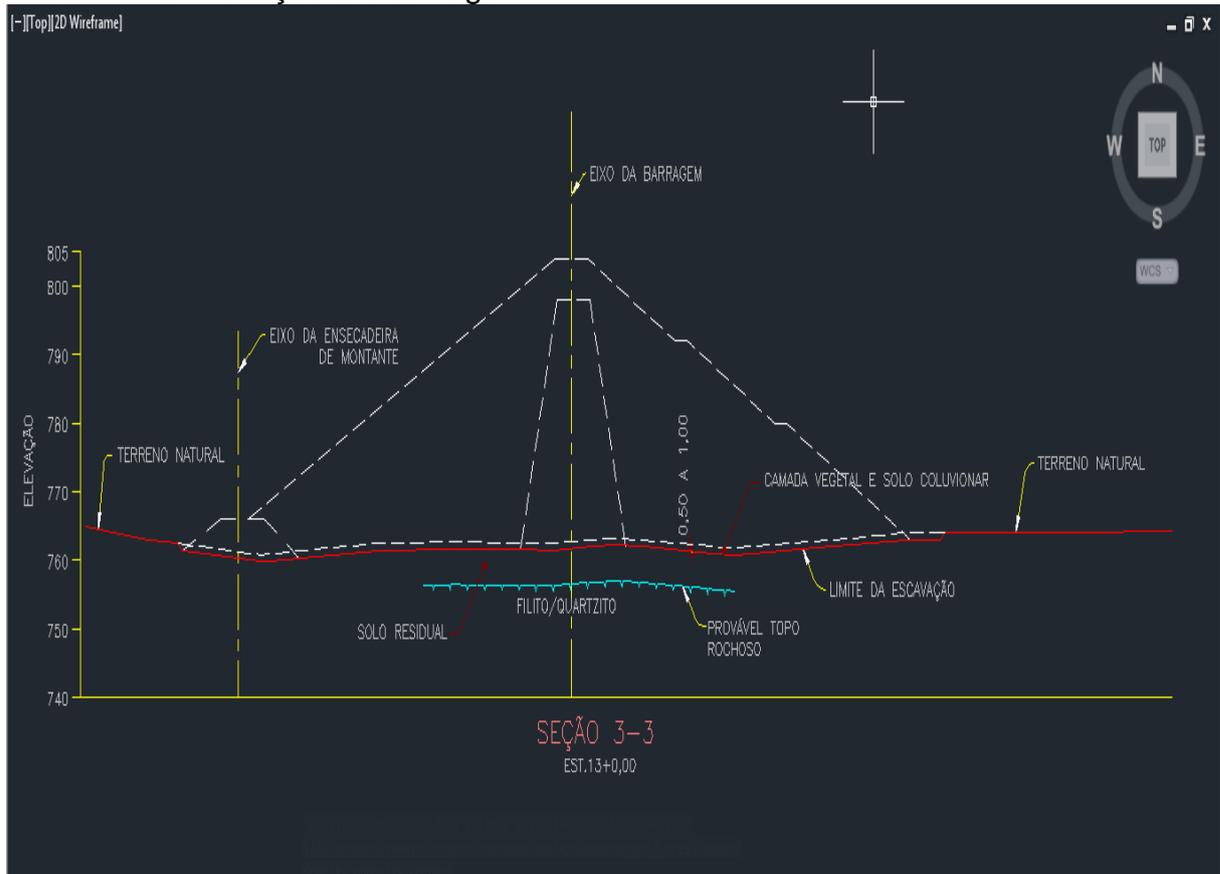
Fonte: Projeto Básico, 2006.

FIGURA 9 – Secção 2-2 barragem



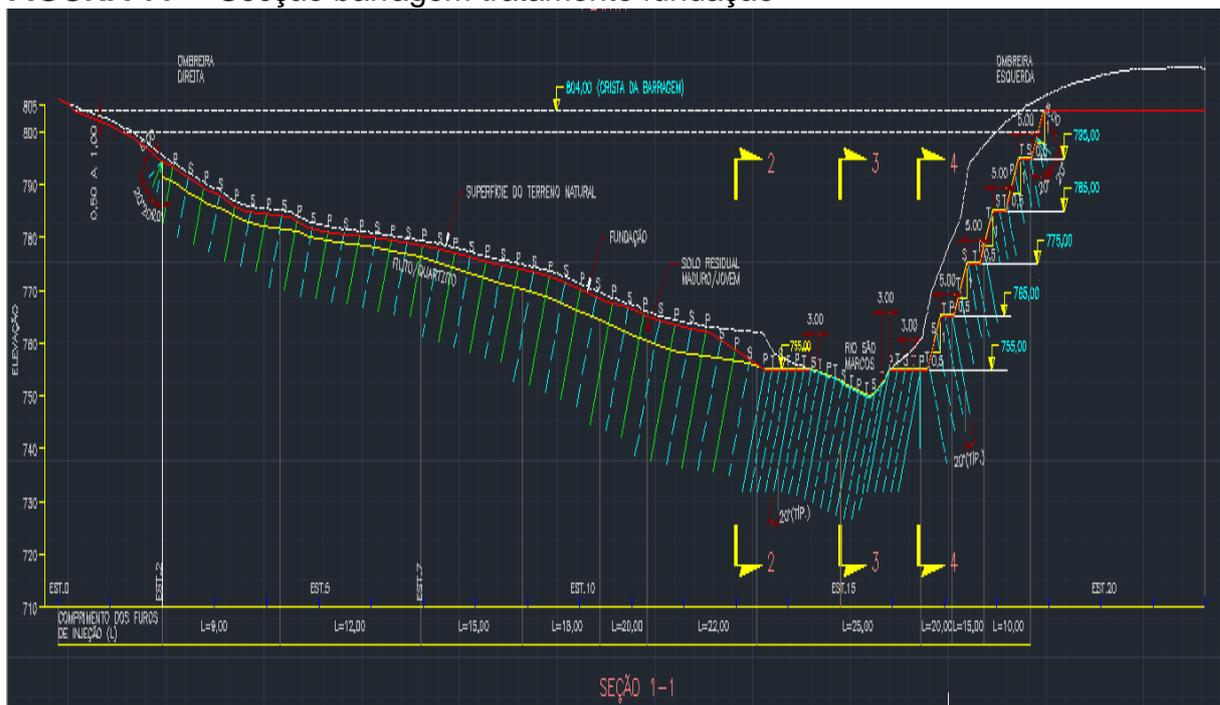
Fonte: Projeto Básico, 2006.

FIGURA 10 – Secção 3-3 barragem



Fonte: Projeto Básico, 2006.

FIGURA 11 – Secção barragem tratamento fundação



Fonte: Projeto Básico, 2006.