

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

FELIPE SOSTISSO RUBERT

**ANÁLISE DO CONTROLE DE PERCOLAÇÃO DA ÁGUA NA
BARRAGEM DE TERRA DA PCH ILHA COMPRIDA**

Florianópolis
Junho de 2016

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

FELIPE SOSTISSO RUBERT

**ANÁLISE DO CONTROLE DE PERCOLAÇÃO DA ÁGUA NA
BARRAGEM DE TERRA DA PCH ILHA COMPRIDA**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Departamento de
Engenharia Civil da Universidade
Federal de Santa Catarina para a
obtenção do Grau de Engenheiro
Civil.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Augusto
dos Reis Higashi

Florianópolis
Junho de 2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Rubert, Felipe Sostisso

Análise do Controle de Percolação da Água na Barragem de
Terra da PCH Ilha Comprida / Felipe Sostisso Rubert ;
orientador, Rafael Augusto dos Reis Higashi -
Florianópolis, SC, 2016.

103 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.
Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. Barragem. 3. Percolação. 4.
Instrumentação. 5. Estabilidade. I. Higashi, Rafael Augusto
dos Reis. II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

FELIPE SOSTISSO RUBERT

**ANÁLISE DO CONTROLE DE PERCOLAÇÃO DA ÁGUA NA
BARRAGEM DE TERRA DA PCH ILHA COMPRIDA**

Este trabalho de curso foi julgado adequado para a obtenção do título de Engenheiro Civil e aprovado em sua forma final pela comissão examinadora e pelo Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Luís Alberto Gómes
Coordenador de curso

Comissão examinadora:



Prof. Rafael Augusto dos Reis Higashi, Dr.
Orientador

Prof. Orlando Martini de Oliveira, Dr.

Eng. Edson Teixeira

AGRADECIMENTOS

Atribuo parte do mérito da realização desse trabalho aos meus pais, Roberto e Maria, e a minha irmã, Fernanda. Agradeço o apoio e incentivo de muito tempo.

À minha namorada, Carolina, pelo incondicional suporte nos momentos difíceis e pela paciência inesgotável.

Aos amigos e colegas de curso, pelos laços de amizade e companheirismo.

Ao professor Rafael Augusto dos Reis Higashi, por aceitar a orientação desse trabalho e pelo grande apoio prestado ao longo da realização do mesmo.

Ao engenheiro Rodrigo Sanchez e demais colegas, pelo imenso auxílio fornecido.

Aos membros da banca examinadora, por aceitarem o convite para participar.

Aos demais professores dessa instituição pela transmissão de conhecimento, contribuindo assim para a minha formação.

À Universidade Federal de Santa Catarina, por possibilitar minha formação como Engenheiro Civil.

Às demais pessoas, que direta ou indiretamente contribuíram para o sucesso desse trabalho.

A todos, os meus mais sinceros agradecimentos.

RESUMO

O crescimento econômico observado na últimas décadas no Brasil fez com que a demanda nacional de energia elétrica fosse ampliada de forma brusca, exigindo assim a implantação de diversas fontes geradoras, sempre dando prioridade às renováveis, como é o caso da hidrelétrica. O presente trabalho apresenta um estudo de caso na Pequena Central Hidrelétrica (PCH) de Ilha Comprida, no estado de Mato Grosso, analisando como se dá o controle de percolação da água na barragem de terra da mesma. Para isso, lança-se mão da ferramenta computacional Slide®, que permite obtenção de fatores de segurança, quanto a estabilidade dos taludes de montante e jusante, respeitando um valor mínimo de projeto para cada caso considerado. Além disso se utiliza, para análise de desempenho, dados de instrumentação, obtidos através de leituras piezométricas e de medidores de vazão, dados esses que serão posteriormente comparados com valores máximos definidos em projeto. Aliado a isso também se conduz uma inspeção visual na barragem, atentando-se para a presença de qualquer anomalia que possa vir a ser observada.

Palavras-Chave: barragem, instrumentação, percolação, inspeção, Slide®

ABSTRACT

The economic growth observed in the last decades in Brazil, caused the national demand for electrical energy to be sharply increased, and so requiring the implementation of a vast range of generation sources, always giving priority to those renewable, such as hydroelectric. This research presents a case of study of a small hydroelectric power plant (PCH) called Ilha Comprida, in the State of Mato Grosso, analyzing the water percolation control in its earth-filled dam. For this, the computational tool Slide® comes to hand, allowing the obtaining of numerous security ratios, related to the stability of slopes upstream and downstream, respecting the minimum values indicated on the project. Besides this, for performance analysis, instrumentation data, obtained through piezometers and flow meters measurements, will be further compared with maximum values indicated on the project. A visual inspection on the dam is also conducted, paying attention to any anomaly that might be observed.

Keywords: dam, instrumentation, percolation, inspection, Slide®

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|-----------|
| FIGURA 01 – NÚMERO DE GRANDES BARRAGENS NO MUNDO | 19 |
| FIGURA 02 – ESQUEMA DE BARRAGEM DE TERRA HOMOGÊNEA | 21 |
| FIGURA 03 – ESQUEMA DE BARRAGEM DE TERRA ZONEADA | 21 |
| FIGURA 04 – ESQUEMA DE BARRAGEM DE ENROCAMENTO COM NÚCLEO ARGILOSO | 22 |
| FIGURA 05 – ESQUEMA DE BARRAGEM DE ENROCAMENTO COM FACE DE CONCRETO | 23 |
| FIGURA 06 – BARRAGEM DE CONCRETO GRAVIDADE COM ESFORÇOS ATUANTES | 24 |
| FIGURA 07 – BARRAGEM DE CONTRAFORTES | 25 |
| FIGURA 08 – <i>HOOVER DAM</i> , BARRAGEM TÍPICA EM DUPLO ARCO | 25 |
| FIGURA 09 – CURVA GRANULOMÉTRICA EXEMPLIFICATIVA | 28 |
| FIGURA 10 – DRENO VERTICAL NUMA SEÇÃO DE BARRAGEM | 28 |
| FIGURA 11 – DETALHAMENTO DE UM FILTRO SANDUÍCHE | 29 |
| FIGURA 12 – FLUXOGRAMA DE FUNCIONAMENTO DO PROGRAMA SLIDE® | 31 |
| FIGURA 13 – DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS DE GEOMETRIA E DO SOLO | 32 |
| FIGURA 14 – MALHA TRIANGULAR COM TRÊS NÓS | 33 |
| FIGURA 15 – FORÇAS ATUANTES NO SOLO SEGUNDO O MÉTODO DE SPENCER | 34 |
| FIGURA 16 – MÉTODO DE SPENCER APLICADO NUM MODELO COMPUTACIONAL GENÉRICO | 34 |
| FIGURA 17 – PIEZÔMETRO DE TUBO ABERTO | 36 |
| FIGURA 18 – MEDIDOR DE VAZÃO TRIANGULAR | 37 |
| FIGURA 19 – FLUXOGRAMA DO MÉTODO DO TRABALHO | 38 |
| FIGURA 20 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO | 46 |
| FIGURA 21 – PRINCIPAIS CONSTITUÍNTES DA PCH ILHA COMPRIDA | 47 |
| FIGURA 22 – MODELO GEOMECÂNICO DE UMA SEÇÃO GENÉRICA DA BARRAGEM DE TERRA DE ILHA COMPRIDA | 52 |
| FIGURA 23 – EST. 7+10,00m – ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO TALUDE DE JUSANTE – REGIME PERMANENTE | 55 |

| | |
|---|-----------|
| FIGURA 24 – EST. 7+10,00m – ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO TALUDE DE MONTANTE – FINAL DE CONSTRUÇÃO | 56 |
| FIGURA 25 – EST. 7+10,00m – ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO TALUDE DE JUSANTE – FINAL DE CONSTRUÇÃO | 57 |
| FIGURA 26 – EST. 7+10,00m – ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO TALUDE DE JUSANTE – REGIME PERMANENTE – AÇÕES SÍSMICAS | 58 |
| FIGURA 27 – EST. 7+10,00m – ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO TALUDE DE MONTANTE – FINAL DE CONSTRUÇÃO – AÇÕES SÍSMICAS | 59 |
| FIGURA 28 – EST. 7+10,00m – ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO TALUDE DE JUSANTE – FINAL DE CONSTRUÇÃO – AÇÕES SÍSMICAS | 60 |
| FIGURA 29 – PLANTA DE INSTRUMENTAÇÃO DA MARGEM DIREITA | 61 |
| FIGURA 30 – SEÇÃO BB – EST. 5+00m | 62 |
| FIGURA 31 – SEÇÃO CC – EST. 7+10,00m | 63 |
| FIGURA 32 – SEÇÃO DD – EST. 10+00m | 64 |
| FIGURA 33 – SEÇÃO EE – EST. 12+6,00m | 66 |
| FIGURA 34 – TUBOS DE DESÁGUE DA BARRAGEM NA MARGEM DIREITA | 67 |
| FIGURA 35 – PLANTA DE INSTRUMENTAÇÃO DA MARGEM ESQUERDA | 68 |
| FIGURA 36 – SEÇÃO FF – EST. 18+00m | 68 |
| FIGURA 37 – SEÇÃO GG – EST. 21+00m | 69 |
| FIGURA 38 – MEDIDOR DE VAZÃO MV-01 | 71 |
| FIGURA 39 – CRISTA DA BARRAGEM | 72 |
| FIGURA 40 – DETALHE DO TALUDE DE MONTANTE COM O SOLO-CIMENTO SUBMERSO | 73 |
| FIGURA 41 – TALUDE DE JUSANTE COM COBERTURA VEGETAL | 74 |
| FIGURA 42 – INFILTRAÇÕES NA OMBREIRA DIREITA | 74 |

ÍNDICE DE QUADROS E TABELAS

| | |
|---|-----------|
| QUADRO 01 – REGISTRO DAS PRIMEIRAS BARRAGENS BRASILEIRAS | 18 |
| QUADRO 02 – DEFINIÇÕES DO TERMO BARRAGEM | 20 |
| QUADRO 03 – VALORES MÉDIOS DE TAXA DE PERCOLAÇÃO | 27 |
| QUADRO 04 – BARRAGENS DE REFERÊNCIA PARA ESSE TRABALHO | 40 |
| QUADRO 05 – PARÂMETROS GEOTÉCNICOS UTILIZADOS | 44 |
| QUADRO 06 – SONDAgens NA REGIÃO DE IMPLANTAÇÃO DA BARRAGEM DE TERRA DA PCH ILHA COMPRIDA | 48 |
| QUADRO 07 – COEFICIENTES DE PERMEABILIDADE DOS MATERIAIS DA FUNDAÇÃO DA BARRAGEM DE TERRA DA PCH ILHA COMPRIDA | 49 |
| QUADRO 08 – COEFICIENTES DE PERMEABILIDADE DO MATERIAL ARGILOSO DA JAZIDA “CELITO 1” | 50 |
| QUADRO 09 – COEFICIENTES DE PERMEABILIDADE DA AREIA UTILIZADA NO SISTEMA DE DRENAGEM INTERNA | 50 |
| QUADRO 10 – COEFICIENTES DE PERMEABILIDADE DEFINIDOS PARA OS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO DA BARRAGEM DE TERRA DA PCH ILHA COMPRIDA | 51 |
| QUADRO 11 – RESULTADOS DAS ANÁLISES DE ESTABILIDADE | 54 |
| QUADRO 12 – LEITURAS PIEZOMÉTRICAS NA SEÇÃO BB – EST. 5+00m | 63 |
| QUADRO 13 – LEITURAS PIEZOMÉTRICAS NA SEÇÃO CC – EST. 7+10,00m | 64 |
| QUADRO 14 – LEITURAS PIEZOMÉTRICAS NA SEÇÃO DD – EST. 10+00m | 65 |
| QUADRO 15 – LEITURAS PIEZOMÉTRICAS NA SEÇÃO EE – EST. 12+6,00m | 66 |
| QUADRO 16 – LEITURAS PIEZOMÉTRICAS NA SEÇÃO FF – EST. 18+00m | 69 |
| QUADRO 17 – LEITURAS PIEZOMÉTRICAS NA SEÇÃO GG – EST. 21+00m | 70 |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 15 |
| 1.1. Objetivo Geral | 16 |
| 1.2. Objetivos Específicos | 16 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 17 |
| 2.1. Abordagem Histórica | 18 |
| 2.2. Definições e Tipos de Barragens | 19 |
| 2.2.1. Barragens de Terra | 20 |
| 2.2.2. Barragens de Enrocamento | 22 |
| 2.2.3. Barragens de Concreto | 23 |
| 2.3. Controle da Percolação de Água | 26 |
| 2.3.1. Dreno Vertical e Inclinado | 28 |
| 2.3.2. Dreno Horizontal | 29 |
| 2.4. Análise de Estabilidade | 30 |
| 2.4.1. Modelo Computacional | 30 |
| 2.4.1.1. Geometria e Parâmetros do Solo | 31 |
| 2.4.1.2. Elementos Finitos | 32 |
| 2.4.1.3. Adoção do Método de Análise | 33 |
| 2.5. Dados de Instrumentação | 35 |
| 2.5.1. Piezômetro Casagrande | 35 |
| 2.5.2. Medidor de Vazão | 36 |
| 3. MÉTODO | 38 |
| 3.1. Levantamento do Material Existente | 39 |
| 3.2. Diagnóstico da Percolação da Água em Barragens | 40 |
| 3.3. Caracterização das Barragens de Terra | 41 |
| 3.4. Estudo de Caso | 42 |
| 3.5. Análise de Dados | 42 |

| | |
|--|----|
| 3.5.1. Modelo Computacional | 43 |
| 3.5.2. Análise de Dados de Instrumentação | 44 |
| 3.5.3. Inspeção Visual | 45 |
| 3.6. Conclusões | 45 |
| | |
| 4. ÁREA DE ESTUDO | 46 |
| | |
| 5. RESULTADOS – PCH ILHA COMPRIDA | 53 |
| | |
| 5.1. Análises Computacionais de Estabilidade | 53 |
| 5.2. Dados de Instrumentação | 61 |
| 5.2.1. Piezometria da Margem Direita | 61 |
| 5.2.1.1. Seção BB na Estaca 5+00m | 62 |
| 5.2.1.2. Seção CC na Estaca 7+10,00m | 63 |
| 5.2.1.3. Seção DD na Estaca 10+00m | 64 |
| 5.2.1.4. Seção EE na Estaca 12+6,00m | 65 |
| 5.2.1.5 Medidor de Vazão | 66 |
| 5.2.2. Piezometria da Margem Esquerda | 67 |
| 5.2.2.1. Seção FF na estaca 18+00m | 68 |
| 5.2.2.2. Seção GG na estaca 21+00m | 69 |
| 5.2.2.3 Medidor de Vazão | 70 |
| 5.3 Inspeção Visual | 71 |
| 5.3.1. Crista da Barragem | 71 |
| 5.3.2. Talude de Montante da Barragem | 72 |
| 5.3.3. Talude de Jusante da Barragem | 73 |
| 5.3.4. Infiltrações na Ombreira Direita | 74 |
| | |
| 6. CONCLUSÕES | 76 |
| | |
| 7. SUGESTÕES | 78 |
| | |
| REFERÊNCIAS | 79 |
| | |
| APÊNDICES | 83 |

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a mais antiga barragem que se tem notícia foi construída onde hoje é a atual área urbana de Recife, no final do século XVI (CBDB, 2011). Do início do século XX em diante, houveram grandes investimentos na construção de barragens, com intuito de aproveitar-se do enorme potencial hídrico presente no país, para a geração de energia elétrica.

Para empreendimentos hidráulicos, o tipo de material que constitui a mesma é de fundamental importância, refletindo aspectos de segurança, custos e fatores físicos do local. Aqueles preferencialmente adotados são:

- De Terra com seção homogênea;
- De Enrocamento (com ou sem face impermeabilizada);
- De Concreto, do tipo gravidade.

Com o aumento do número de barragens de usinas hidrelétricas no país, chegando a quase 1400 (ANEEL, 2015), estima-se que 40 destas estejam operando em situação crítica, com presença de soerguimentos notáveis a olho nu e de deslizamento de taludes, sendo que na maioria dos casos o problema é direta ou indiretamente relacionado ao mau controle de percolação da água (CRUZ, FREITAS e PASTORE, 2015). Mesmo com notados avanços no conhecimento em relação ao mecanismo de ação da água em tal obra civil, ainda há muito receio por parte de executores e gestores quanto à realização de empreendimentos hidrelétricos quando os mesmos estão expostos à intensa ação da água.

Os problemas oriundos em obras desta natureza, quando ocasionados pelo controle inadequado do fluxo de água no núcleo e na face inferior da barragem, são da mais vasta gama, variando de trincas e deslocamentos de terra localizados, que comprometem pouco mais que a estética do empreendimento, até em situações em que há uma condição iminente de ruína, colocando não só o empreendimento em risco como também a vida de pessoas e, em alguns casos, de comunidades inteiras.

Para realizar o controle de percolação de água, deve-se lançar mão de soluções das mais variadas. Tais práticas são baseadas em experiências prévias e modelos empíricos, cabendo posterior análise para checar se tal escolha é cabível na barragem pretendida. Em última instância, compete ao responsável pela obra

adequá-las a sua realidade específica, caso a solução não se apresente totalmente satisfatória.

No presente trabalho, após uma abordagem teórica sobre certos conceitos relevantes ao tema proposto, será conduzido um estudo de caso em uma barragem de terra, localizada entre os municípios de Sapezal e Campos de Júlio, no estado de Mato Grosso.

1.1. Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é estudar como se dá o controle da percolação de água em uma barragem de terra, utilizando para tal um estudo de caso da hidrelétrica de Ilha Comprida, buscando obter, através de cálculos computacionais, os fatores de segurança quanto à estabilidade dos taludes de montante e jusante da mesma.

1.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos na realização desse trabalho são:

- Criar modelo geomecânico da barragem;
- Analisar os fatores de segurança a montante e jusante da barragem em diferentes condições;
- Coletar e interpretar dados de auscultação;
- Analisar a barragem visualmente para checagem de seu desempenho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Barragens são estruturas que possuem um amplo leque de finalidades que justificam seu uso, como por exemplo empreendimentos hidrelétricos, contenção de cheias, contenção de resíduos sólidos, dentre outros.

A concepção de uma barragem passa, geralmente, por quatro etapas fundamentais: projeto, construção, exploração e a observação/manutenção. Na fase de projeto é definido, após estudos detalhados do local de implantação e de custos, o tipo de barramento a ser construído, usualmente em termos de seu material e de sua geometria.

É imprescindível que, ao se elaborar um projeto de tal natureza, o ambiente de entorno à mesma seja cuidadosamente estudado, no sentido de analisar as influências diretas e indiretas que tal local possui sobre fatores como a estabilidade, tensões, deformações e percolação de água pelo maciço. Para a análise do comportamento da barragem, em relação aos fatores citados, é importante que se conheça os materiais constituintes da mesma e, para tal caracterização, devem ser realizados ensaios geotécnicos de laboratório e ensaios *in situ* para determinar as propriedades granulométricas de resistência, de escoamento e de deformação, ou ainda, através de instrumentação implantada em todo seu complexo (BORINELLI, 2012).

Projetos de barragens possuem uma abordagem predominantemente empírica, sendo que aquelas já executadas e com arranjo em situação similar à pretendida, servem de modelo para a elaboração de parâmetros construtivos. Por tal motivo, é importante a presença de uma bibliografia que cubra aspectos executivos das barragens que esteja em plena aplicação de seu uso.

Nesse capítulo serão tratados os fundamentos teóricos, objetivando o claro entendimento do assunto abordado no trabalho.

Os assuntos serão divididos em uma sequência lógica, expondo cada metodologia para que os resultados apresentados sejam compreendidos de forma clara e concisa.

2.1. Abordagem Histórica

Os primeiros registros sobre construção de barragens encontram-se no Egito, ao longo do Rio Nilo, quando pequenos barramentos foram utilizados para amenizar os efeitos da seca. No século XX, foram empreendidas obras para atender à demanda crescente de água e ao mesmo tempo suprir as necessidades das atividades relacionadas à mineração por diferentes partes do mundo, tanto que, nas décadas de 1930 e 1970, as construções de barragens estavam aliadas ao conceito de desenvolvimento e progresso econômico. O apogeu brasileiro de obras envolvendo barragens aconteceu entre os anos de 1950 e 1970, com a crescente valorização de pequenos e médios empreendimentos envolvendo a irrigação, o abastecimento de água e a mineração, tudo isso atrelado ao surgimento de novas formas de gestão dessas obras (SAYÃO, 2009).

Em termos de Brasil, conforme expõe o quadro 1, tem-se a primeira barragem executada em 1883, a barragem de Ribeirão do Inferno, construída no estado de Minas Gerais e cuja finalidade era a geração de energia hidroelétrica (MINISTÉRIO DO INTERIOR, 1972).

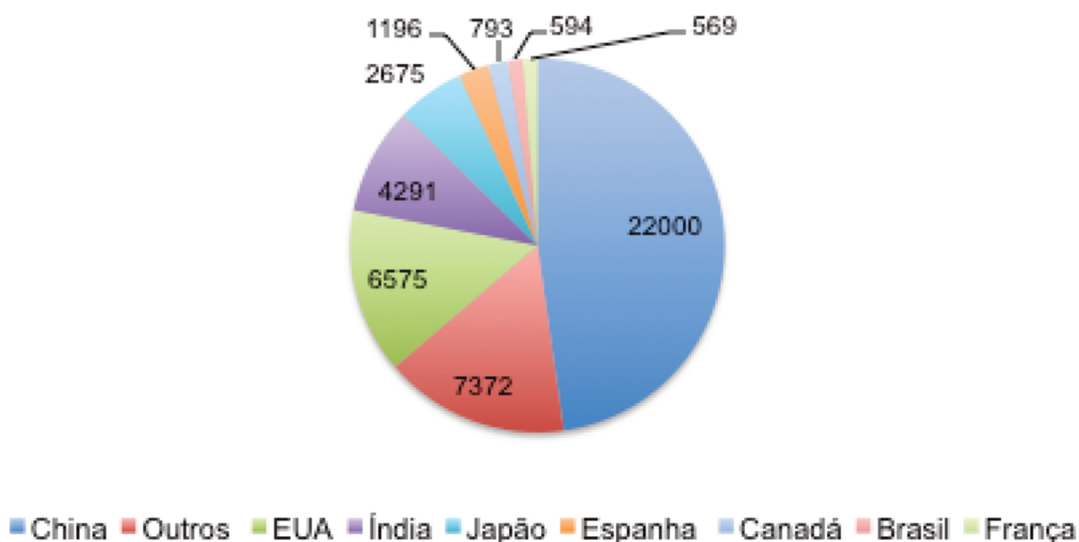
Quadro 1 – Registro das primeiras barragens brasileiras

| Barragem | Ano de Conclusão | Localização | Tipo | Finalidade |
|---------------------|-------------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| Ribeirão do Inferno | 1883 | MG | Terra | Hidrelétricas |
| Salão | 1918 | CE | Terra | Combate às secas |
| Rio do Peixe | 1922 | BA | Terra | Abastecimento d'água |
| Rio das Pedras | 1927 | MG | Terra | Hidrelétrica |
| Rio Grande | 1928 | SP | Terra | Hidrelétrica |
| Rio Novo | 1932 | SP | Concreto Gravidade | Hidrelétrica |
| Rio do Cobre | 1933 | BA | Concreto Gravidade | Abastecimento d'água |
| Saco I | 1936 | PE | Alvenaria de Pedra | Abastecimento d'água |

Fonte: Modificado de Ministério da Integração Nacional (2002)

O Brasil é um dos países com maior disponibilidade hídrica no cenário mundial, fato esse que aumenta ainda mais a responsabilidade na gerência desses recursos. A Figura 1 coloca em perspectiva a participação do país no cenário global de grandes barragens.

Figura 1 – Número de grandes barragens no mundo



Fonte: World Commission on Dams (2000)

2.2. Definições e Tipos de Barragens

A Norma Brasileira ABNT 13028, define como barragem a estrutura que forma uma parede de contenção para rejeitos, para sedimentos e/ou para formação de reservatório de água que acondicione rejeitos no interior do reservatório da barragem, de maneira adequadamente planejada, projetada e controlada. Nesta definição, foram incluídos, em nota, os termos barragens, barramento, dique ou similar. Conforme apresenta o quadro 2, diversas são as definições encontradas para o termo “barragem”

Quadro 2 – Definições do termo barragem

| Fonte | Definição |
|------------------------------|--|
| MI (2002) | Estrutura construída transversalmente a um rio ou talvegue com a finalidade de obter elevação do seu nível d'água e/ou criar um reservatório de acumulação de água seja de regularização das vazões do rio, seja de outro fluido. |
| Silveira (2006) | Estrutura, componente de um aproveitamento hídrico, construída transversalmente à direção do escoamento de um rio, destinada a criar um reservatório artificial de acumulação de água e um desnível hidráulico localizado para uso específico e múltiplo com a devida segurança. |
| Cirilo (2003) | Obras hidráulicas destinadas a efetuar o represamento de um curso d'água, objetivando a utilização mais racional dos recursos hídricos relativos a este. |
| Câmara dos Deputados (2003) | Qualquer obstrução em um curso permanente ou temporário de água, ou talvegue, para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou misturas de líquidos e sólidos, compreendendo a estrutura do barramento, suas estruturas associadas e o reservatório formado pela acumulação |
| Bureau of Reclamation (1987) | Construção destinada ao estoque de água para diversos usos e que oferece risco a segurança pública |

Fonte: Modificado de adaptação citada por ABNT/NBR 13028 (2006)

2.2.1 Barragens de Terra

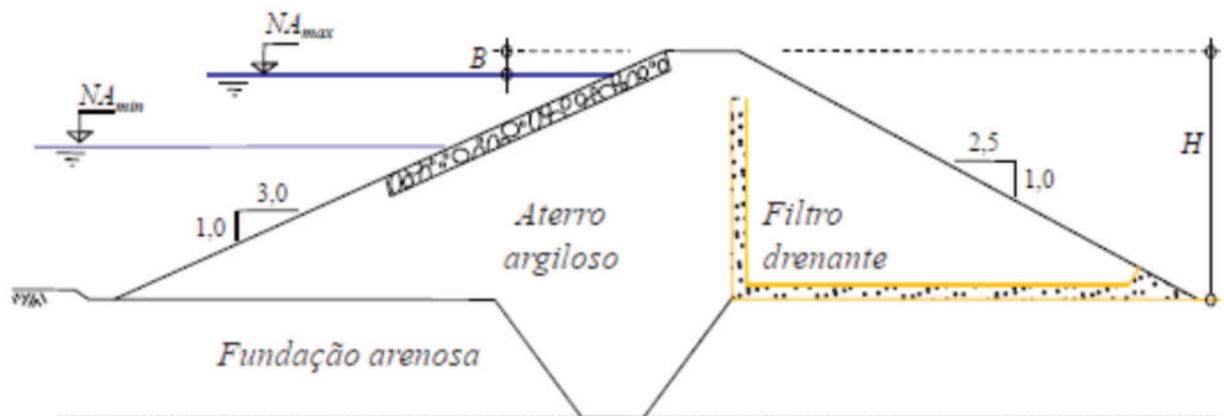
As barragens de terra possuem boa aceitação técnica caso haja disponibilidade de solos em abundância nos entornos do local de obra, bem como suas propriedades geotécnicas sejam adequadas, facilitando a adaptação perfeita aos terrenos de fundação.

Nestas barragens, quando os critérios condicionantes de material disponível no ambiente de construção são satisfeitos, costumam ser a de uso mais comum. Pelo fato dessas barragens geralmente possuírem um custo mais competitivo, dadas as condições brasileiras atuais, em que se privilegia obras de menor impacto ambiental e conseqüentemente mais enxutas, seu uso se torna bastante frequente.

É importante frisar que em médias e grandes obras, por exemplo, esta técnica não é tão atrativa, pois, do ponto de vista financeiro, demandaria mais tempo de construção e conseqüentemente maior custo, considerando-se os grandes volumes de aterro necessários e as especificações técnicas voltadas para sua compactação (SILVEIRA, 2006).

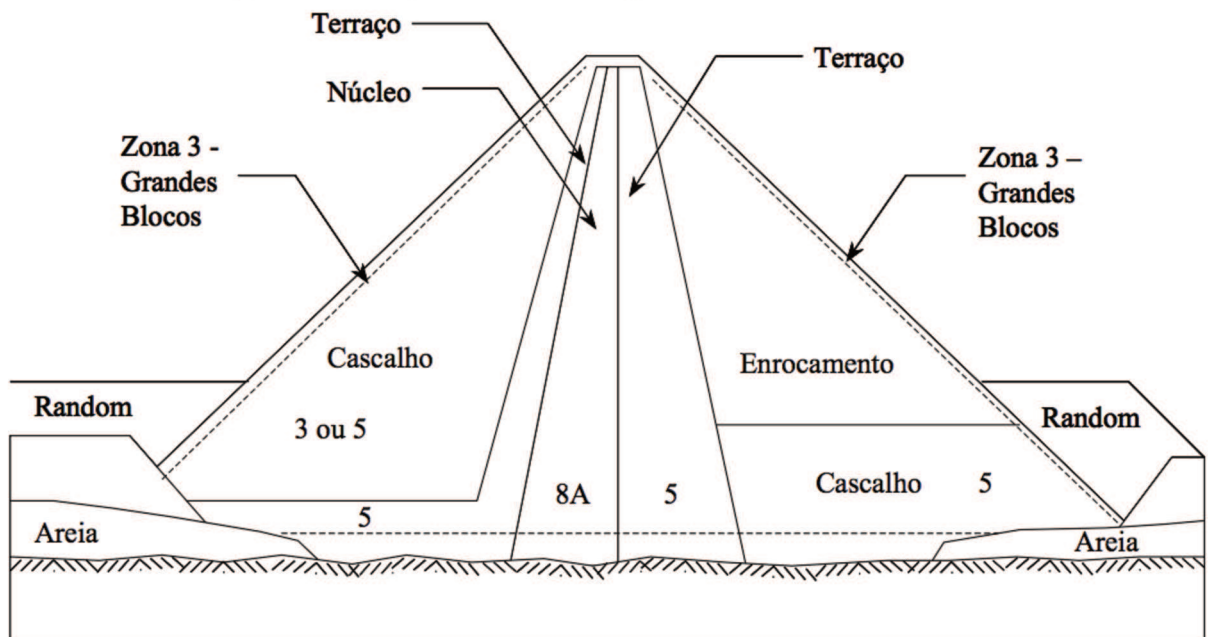
As barragens de terra podem ser homogêneas (solo argiloso) ou zoneadas. Barragem zoneada é uma variação da barragem de terra homogênea constituída de diferentes tipos de solo ou o mesmo solo compactado em condições diferentes para otimização da seção ou em função da disponibilidade de materiais. Exemplos dos dois tipos de barragens de terra citados anteriormente são mostrados nas Figuras 2 e 3.

Figura 2 – Esquema de barragem de terra homogênea



Fonte: SAYÃO (2009)

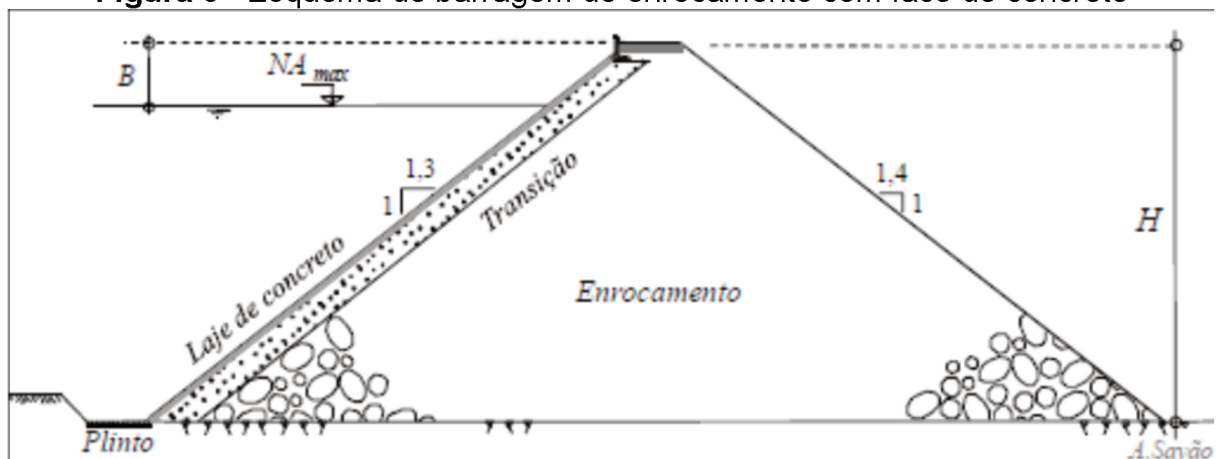
Figura 3 – Esquema de barragem de terra zoneada



Fonte: ASSIS (2003)

Algumas vantagens desse tipo de barragem são: construção mais rápida, pois pode ser construída independentemente do clima; taludes mais íngremes, o que proporciona menores volumes de material e maior altura da estrutura. É ideal para regiões com pouca disponibilidade de argila e areia, e com períodos prolongados de chuva. Uma das desvantagens é que a fundação deve ser em rocha sã, pois a estrutura não pode sofrer muitos recalques excessivos (DE SOUZA, 2013).

Figura 5– Esquema de barragem de enrocamento com face de concreto

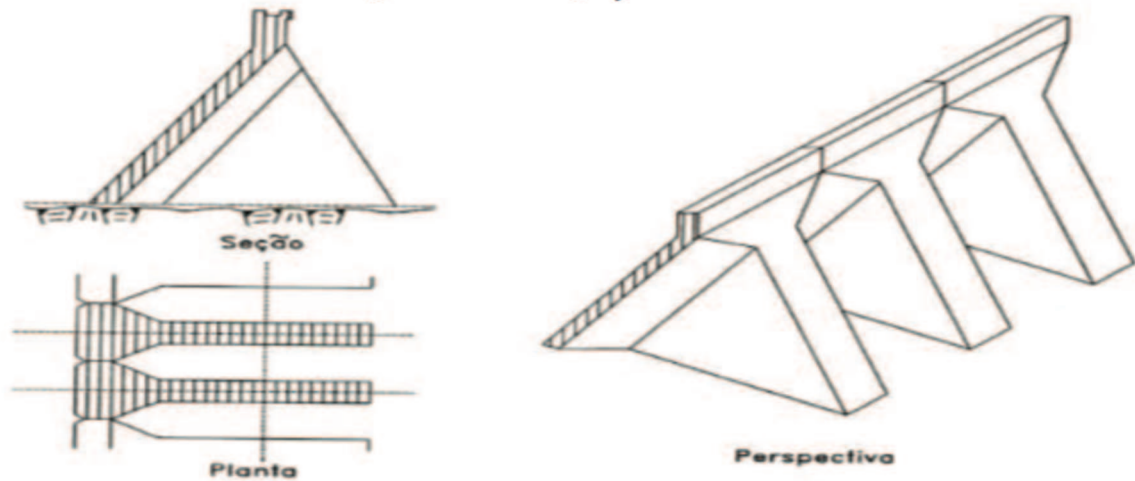


Fonte: SAYÃO (2009)

2.2.3. Barragens de Concreto

As barragens de concreto mais comuns, segundo MASSAD (2010) são as de gravidade, que funcionam em função do seu peso, as de concreto estrutural com contrafortes, constituídas de lajes ou abóbadas inclinadas apoiadas em contrafortes, e, ainda, as de arco em dupla curvatura, fazendo o concreto trabalhar em compressão.

Barragens de concreto gravidade podem ser maciças ou vazadas, para resistir ao empuxo horizontal de água. Os materiais mais comumente utilizados neste tipo de barragem são: concreto massa, ciclópico ou CCR. Este tipo de barragem possui a vantagem de suportar galgamentos sem sofrer danos.

Figura 7– Barragem de contrafortes

Fonte: OLIVEIRA E BRITO (2009)

As barragens em arco de dupla curvatura são estruturas que possuem um pequeno volume e onde o empuxo da água é transmitido para as ombreiras. As pressões identificadas na sua fundação são excessivas e, portanto, tanto as ombreiras como a sua base devem ser em rocha sã com alta resistência e rigidez, maior que nos outros tipos de barragens (SAYÃO, 2009).

Essas barragens são indicadas para regiões com vales estreitos e profundos, onde há o “encaixe” da mesma nestes locais, conforme mostra a figura 8.

Figura 8– Hoover Dam, barragem típica em duplo arco

Fonte: History Channel Website (2015)

2.3. Controle de Percolação de Água

A compreensão adequada dos mecanismos de fluxo em meios porosos contínuos e descontínuos representa um dos campos que exige principal atenção quando se está lidando com uma barragem.

Em projetos de barragem, o controle de fluxo pelo maciço, fundação e ombreiras constitui um dos requisitos fundamentais à segurança da obra. É quase enfadonho frisar incisivamente que na esmagadora maioria das estatísticas de acidentes e rupturas de barragens a causa majoritária foi a falta de um sistema eficiente de controle da percolação da água (ASSIS, 2003)

A permeabilidade de um meio poroso pode ser interpretada como a facilidade que o meio oferece para a passagem de um fluido pelos seus poros ou vazios. Um meio pouco permeável é um meio que oferece grande dificuldade para a passagem de determinado fluido (CRUZ, 1996)

A condutividade é um termo adotado para descrever a facilidade que um meio confinado oferece ao fluxo, como é o caso de fissuras ou fraturas rochosas (ASSIS, 2003)

Apesar das duas definições apresentarem uma diferença conceitual, o termo “percolação” é comumente empregado indistintamente pela engenharia de barragens.

Na referida engenharia, a percolação é medida através de furos de sondagens, em que se mensura a quantidade de água acumulada nos mesmos ao longo de um certo período de tempo, estabelecendo-se então uma taxa para cada furo, sendo feita então uma média entre os mesmos. Ao final desse processo, obtém-se uma taxa de percolação média para a área em questão.

No quadro 3 é possível observar a taxa de percolação média (k) medida no maciço argiloso de 6 barragens de terra. Tais valores foram obtidos por meio de ensaios e sondagens realizados em obra.

Quadro 3 – Valores médios de taxa de percolação

| Barragem | Valor médio de k | Ano de medição |
|-----------------|---------------------------|-----------------------|
| Três Irmãos | $4,9 \times 10^{-4}$ cm/s | 1981 |
| Porto Colômbia | $4,5 \times 10^{-5}$ cm/s | 1975 |
| Jurumirim | $5,0 \times 10^{-4}$ cm/s | 1962 |
| Rosana | $1,2 \times 10^{-5}$ cm/s | 1987 |
| Ibitinga | $1,2 \times 10^{-6}$ cm/s | 1970 |
| Nova Anhandava | $8,8 \times 10^{-4}$ cm/s | 1984 |

Fonte: Adaptado de Mano (1987)

Para combater os efeitos que o fluxo de água pode vir a acarretar numa barragem, foram desenvolvidos diversos mecanismos de mitigação, sendo que em se tratando de barragens de terra, os mais usados são o dreno vertical (por vezes chamado de filtro vertical) e o dreno horizontal (tapete drenante)

Os sistemas de filtragem (ou drenagem) obedecem dois critérios estabelecidos por Terzaghi (1936) e confirmados experimentalmente por Sherard *et Al.* (1984):

- O primeiro critério estabelece que o filtro deve ser mais permeável que o material que constitui o barramento, conforme expressão [1]

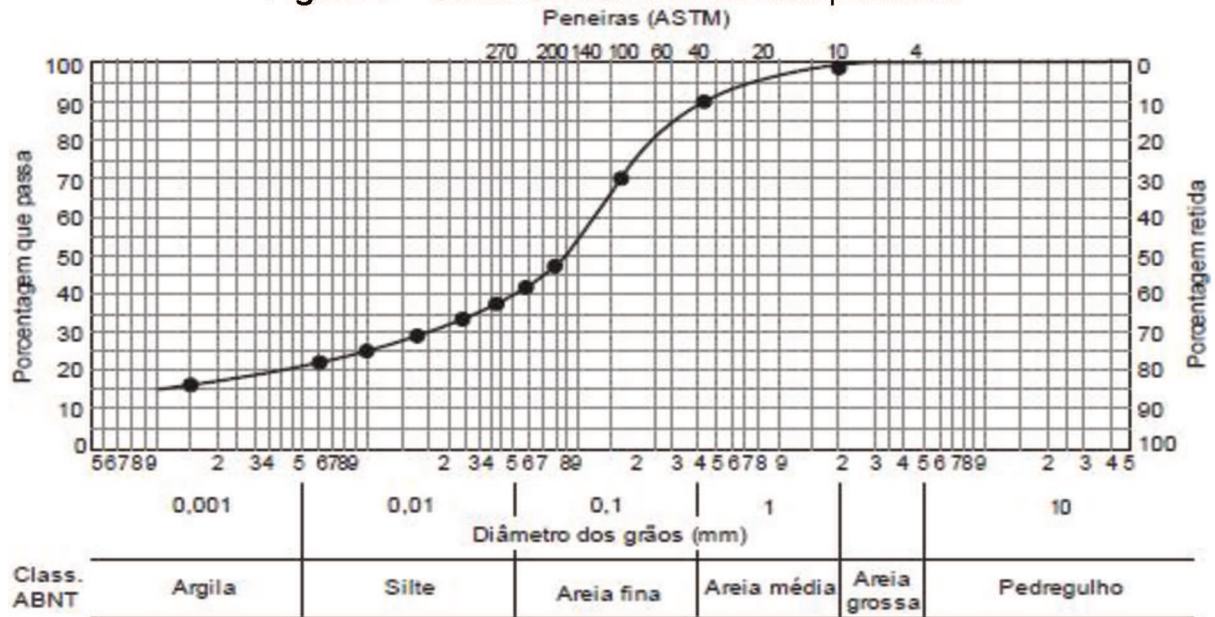
$$D_{15}(\text{filtro}) > 5 \times D_{15}(\text{solo}) \quad [1]$$

- O segundo critério cria limitante para o tamanho dos vazios do filtro, de forma que não se permita passagem dos grãos do solo através do mesmo, conforme expressão [2]

$$D_{15}(\text{filtro}) > 5 \times D_{85}(\text{solo}) \quad [2]$$

Onde D_{15} (D quinze) é o diâmetro do grão que na curva granulométrica corresponde a 15% do passante e D_{85} (D oitenta e cinco) é o diâmetro abaixo do qual se situam 85% em peso das partículas. Na figura 9 é possível observar um modelo de curva granulométrica, em que no eixo Y tem-se a porcentagem dos passantes e no eixo X o diâmetro dos grãos do material.

Figura 9 - Curva Granulométrica exemplificativa



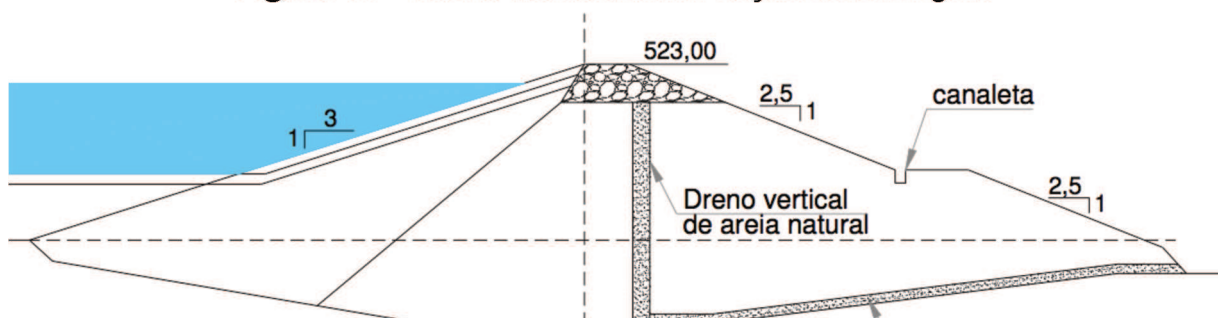
Fonte: CBDB (2011)

2.3.1. Dreno Vertical e Inclinado

A função básica desse componente é evitar que, em face de fluxo de água no maciço terroso com sentido de montante para jusante, ocorra o carreamento de material. Sua capacidade de vazão deve ser muito superior à vazão percolada, devendo ser projetado obedecendo sempre às larguras mínimas de projeto (ROSA *et al.*, 1983).

É importante notar que esses componentes são compostos por materiais arenosos e, segundo Cruz (1996), devem ser levados sempre à altura do Nível de Água máximo, não sendo indicados para barramentos com altura de maciço superior a 30 metros. Na figura 10 é possível ver esse tipo de filtro numa seção de barragem.

Figura 10 - Dreno Vertical numa seção de barragem



Fonte: CBDB (2011)

2.3.2. Dreno Horizontal

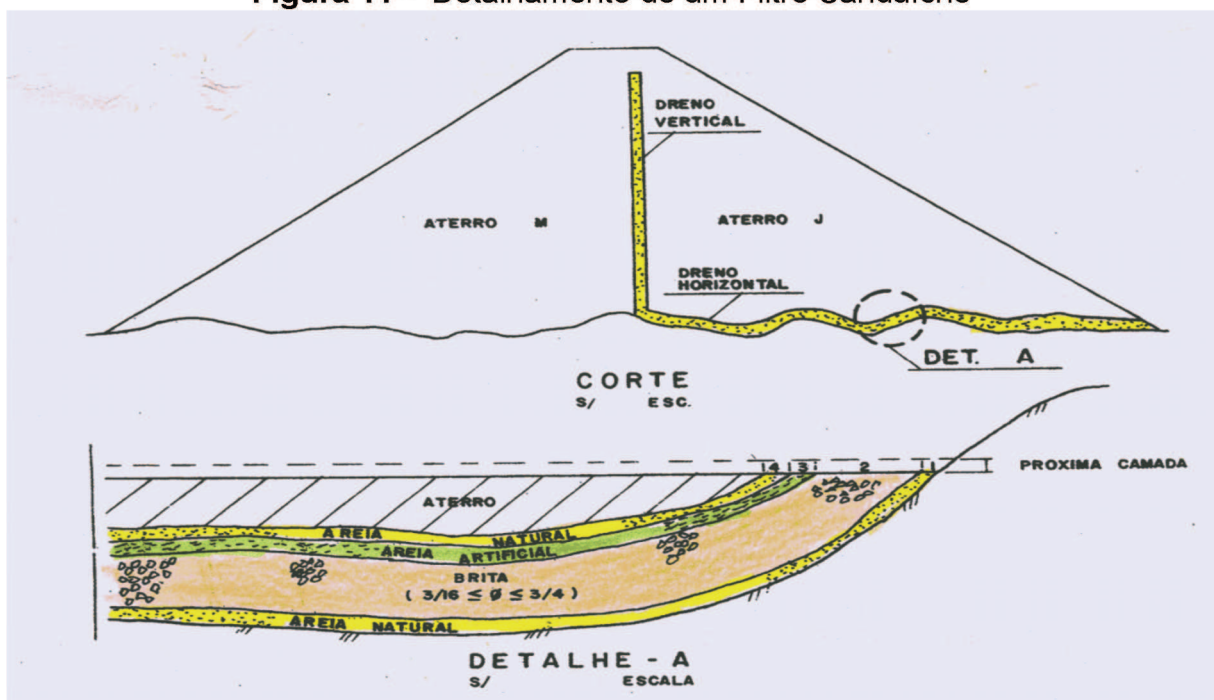
Enquanto o dreno vertical tem a função de dar vazão à água que percola pelo maciço da barragem, o dreno horizontal tem como principal propósito controlar o fluxo de parte da água oriunda da fundação.

Os drenos horizontais devem ser contínuos e revestir toda a área de fundação à jusante, estando sempre conectado com o dreno vertical.

Existem casos específicos em que se faz necessária a introdução de uma ou mais camadas de materiais drenantes distintos. A isso dá-se o nome de filtro sanduíche.

O filtro sanduíche, sendo um caso específico dentro de drenos horizontais, é necessário quando há uma grande contribuição de água por parte da fundação, o que inicialmente faria com que o dimensionamento do dreno horizontal resultasse numa espessura excessivamente grande. Normalmente o filtro sanduíche é composto por camadas mais externas de areia (menor permeabilidade) e núcleo interno de pedriscos (maior permeabilidade). A figura 11 mostra uma seção de barragem com detalhamento do filtro sanduíche.

Figura 11 - Detalhamento de um Filtro Sanduíche



Fonte: ROSA *et al.*, 1983

2.4. Análise de Estabilidade

Nas análises de estabilidade de um projeto de barramento, segundo Massad (2010), deve-se considerar a estabilidade de taludes e a estabilidade entre barragem e fundação.

No caso de estabilidade de taludes, é imprescindível estabelecer todos os mecanismos potenciais de ruptura e posteriormente analisá-los, um a um separadamente. Rupturas circulares, planares e uma combinação dos mesmos devem ser pesquisadas. Estabelecida aquela que mais se adequa à realidade do empreendimento, pode-se recorrer ao cálculo através de programas computacionais, tomando sempre o cuidado de verificar as hipóteses adotadas.

Além disso, é importante diferenciar, em termos de coeficiente de segurança, cada caso de solicitação, que se dividem em: final de construção, regime permanente e ações sísmicas.

Os valores de fator de segurança seguem o critério estabelecido pela Eletrobrás (2003), no qual os mesmos variam de 1,30 a 1,50, dependendo do caso de solicitação.

Tais fatores são resultados de uma relação entre forças, conforme segue na expressão [3]

$$FS = \frac{\sum \text{Forças Resistentes}}{\sum \text{Forças Atuantes}} \quad [3]$$

Onde as Forças Resistentes são expressas pela resistência ao cisalhamento disponível e as Forças Atuantes pela resistência mobilizada.

De forma a obter tais forças em um ambiente de geometria não usual e na presença de materiais heterogêneos, é fundamental o uso de recurso computacional (CRUZ, 1996)

2.4.1. Modelo Computacional

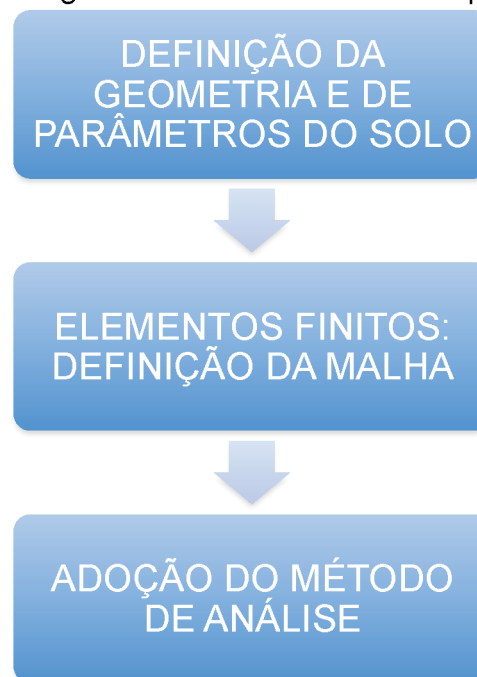
Conforme discutido, ao se deparar com um elemento composto por materiais heterogêneos e de geometria de certa complexidade, se torna imperativo o uso de

um *software* para cálculo de fatores de segurança quanto à estabilidade de taludes de barramentos.

Diversos estudos bem estabelecidos utilizam-se de programas computacionais consagrados pela boa prática, como é o caso do programa Slide®, da empresa Rocscience, para cálculo dos fatores de segurança.

A maneira pela qual os programas geralmente operam, pode ser subdividida conforme fluxograma da figura 12.

Figura 12 – Fluxograma de funcionamento do programa Slide®



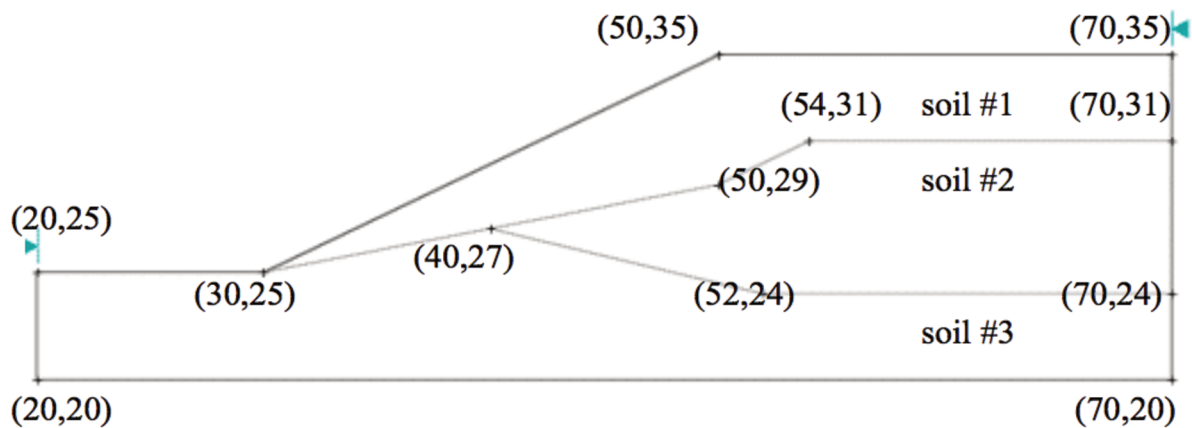
Fonte: do autor

2.4.1.1. Geometria e Parâmetros do solo

É primordial, no caso do Slide®, para uma análise eficiente, que se definam bem os parâmetros geométricos e do solo. Na figura 13 é possível observar um exemplo genérico de como se dá essa definição (ROCSCIENCE, 2015)

Figura 13 – Definição de parâmetros de geometria e do solo

| | c' (kN/m ²) | ϕ' (deg.) | γ (kN/m ³) |
|---------|---------------------------|----------------|-------------------------------|
| Soil #1 | 0.0 | 38.0 | 19.5 |
| Soil #2 | 5.3 | 23.0 | 19.5 |
| Soil #3 | 7.2 | 20.0 | 19.5 |



Fonte: Modificado de Rocscience (2015)

É importante salientar que cada ponto corresponde a uma coordenada de inflexão, atribuída conforme a necessidade de se mudar de direção.

Os parâmetros de solo correspondem a coesão efetiva (c'), ângulo de atrito efetivo (ϕ') e peso específico (γ).

Finda esta etapa, é preciso definir de que maneira o programa executará a análise, sendo que o mesmo aborda o problema utilizando-se a ferramenta dos elementos finitos em associação com algum critério de estabilidade, sendo eles: Spencer, Método das fatias, Fellenius, Bishop e Janbu.

2.4.1.2. Elementos Finitos

Todos os modelos rodados pelo programa são discretizados utilizando-se o método dos elementos finitos (MEF), portanto cabe ao usuário definir o tipo de malha a ser utilizada.

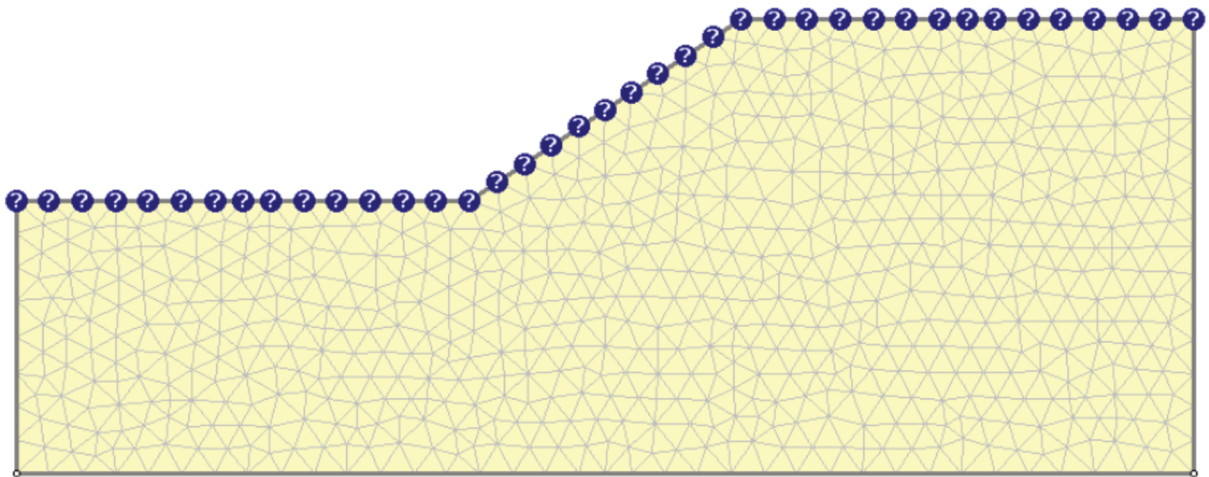
A precisão do resultado vai depender, basicamente, da quantidade de nós e do tamanho e tipo dos elementos presentes na malha. Um dos aspectos importantes do MEF diz respeito a sua convergência.

Em uma malha consistente, a medida do tamanho dos elementos finitos tende a zero e, conseqüentemente, a quantidade de nós tende a infinito, podendo constatar assim que a solução obtida converge para a solução exata desse problema.

Nessa etapa também é imperativo definir as condições de contorno do sistema.

Segue na figura 14, um modelo de malha adotado, que nesse caso é triangular e com três nós.

Figura 14 – Malha Triangular com três nós



Fonte: Modificado de Rocscience (2015)

2.4.1.3. Adoção do Método de Análise

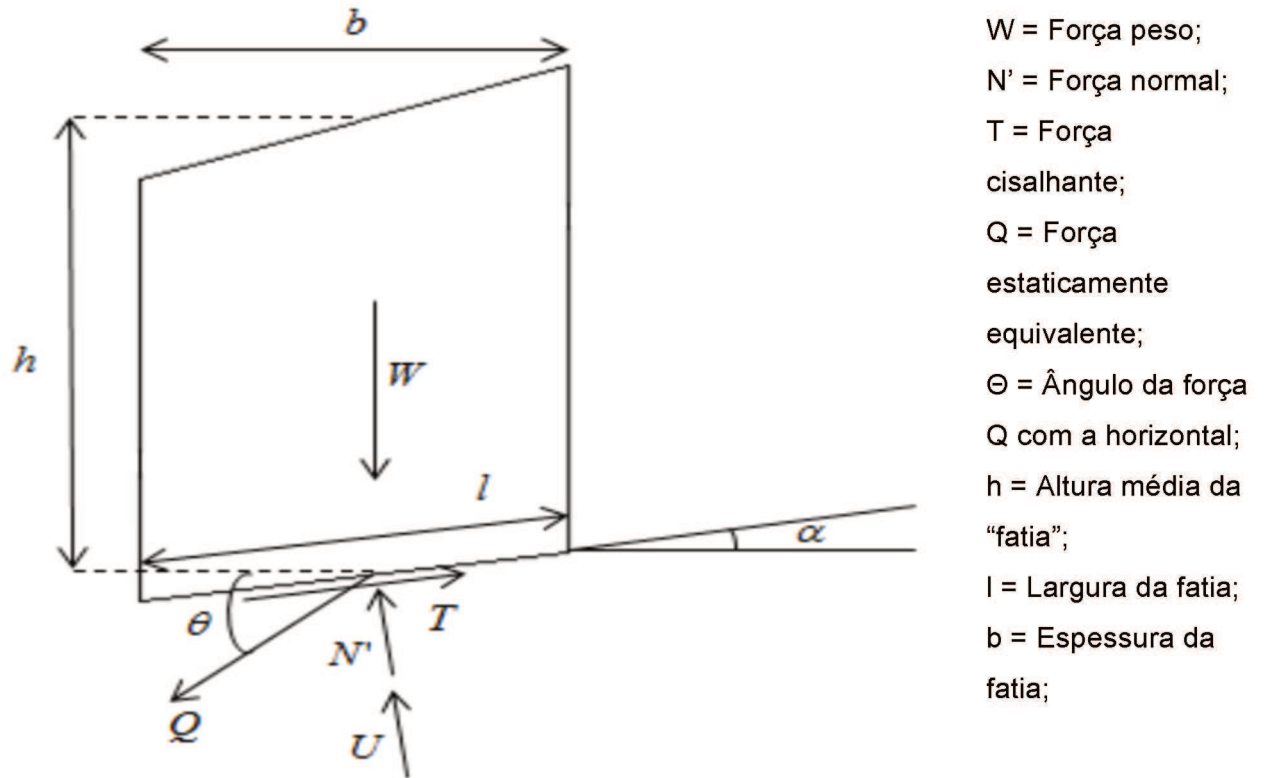
Estando bem estabelecidas as definições geométricas e de solo, bem como as condições da malha e de contorno, é preciso definir qual o método de análise da estabilidade.

No tocante a essa etapa, será descrito em mais detalhes o método de Spencer, que toma o equilíbrio não só de momentos, em sua ruptura circular, mas também de forças verticais e horizontais.

O método funciona, inicialmente, substituindo em cada “fatia” analisada as forças de interação por uma resultante estaticamente equivalente Q , inclinada em um ângulo θ com a horizontal. Satisfazendo o equilíbrio de momentos, essa força Q deve passar pelo ponto de interseção das forças peso (W), cisalhante (T) e normal (N), ou seja, pelo ponto médio da base da fatia (FERREIRA, 2012).

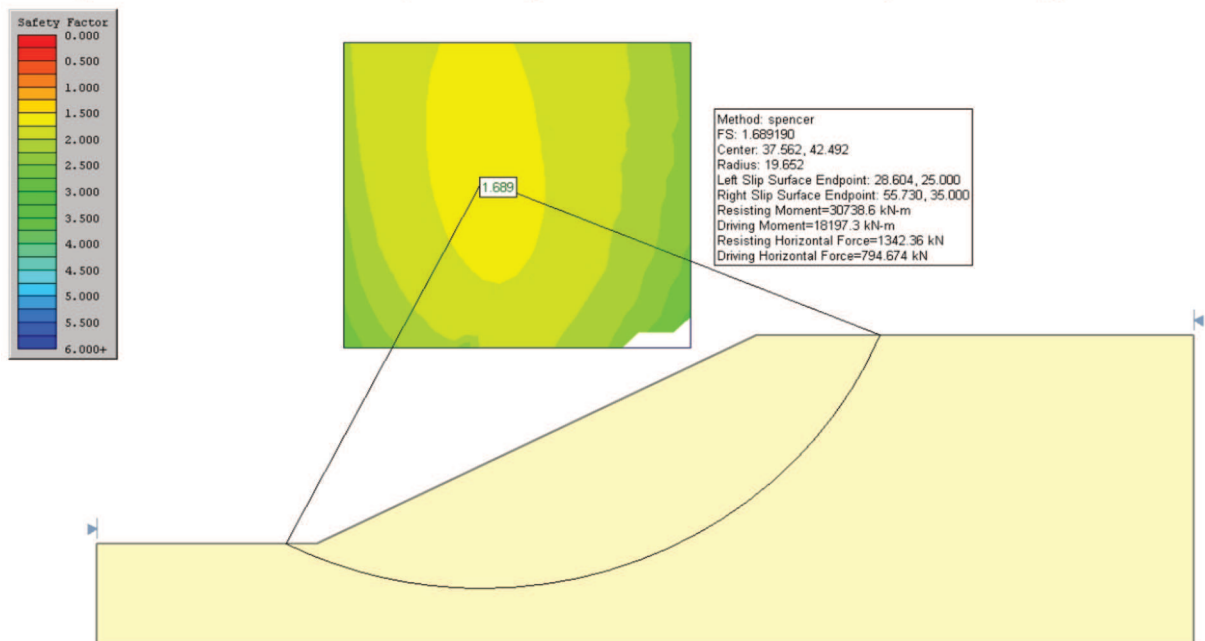
A figura 15 ilustra as hipóteses de Spencer para uma fatia genérica e a figura 16 mostra como se dá a aplicação dessas hipóteses no programa.

Figura 15 – Forças atuantes no solo segundo o método de Spencer



Fonte: Spencer (1967)

Figura 16 - Método de Spencer aplicado num modelo computacional genérico



Fonte: Modificado de Rocscience (2015)

2.5. Dados de Instrumentação

Segundo Silveira (2006), os instrumentos de auscultação constituem um dos principais meios para avaliar a segurança de um empreendimento ao longo de sua “vida útil”.

Apesar da instrumentação não se apresentar como a solução de todos os problemas, sua utilidade é de grande valor se bem projetada, instalada e interpretada, não só para a segurança como um todo, mas também com o objetivo de checar critérios de projeto, podendo tornar a obra mais econômica.

Existem diversos tipos de medidores, como piezômetros, células de recalque, eletrônicas, medidores de vazão, marcos superficiais. Todos esses elementos são utilizados, seja para medir nível da água, pressão neutra, deslocamentos e tensão total, em barramentos convencionais.

Será dado enfoque em dois desses medidores, sendo eles o Piezômetro do tipo Casagrande, que fornece dados sobre a pressão neutra, e o medidor de vazão.

2.5.1. Piezômetro Casagrande

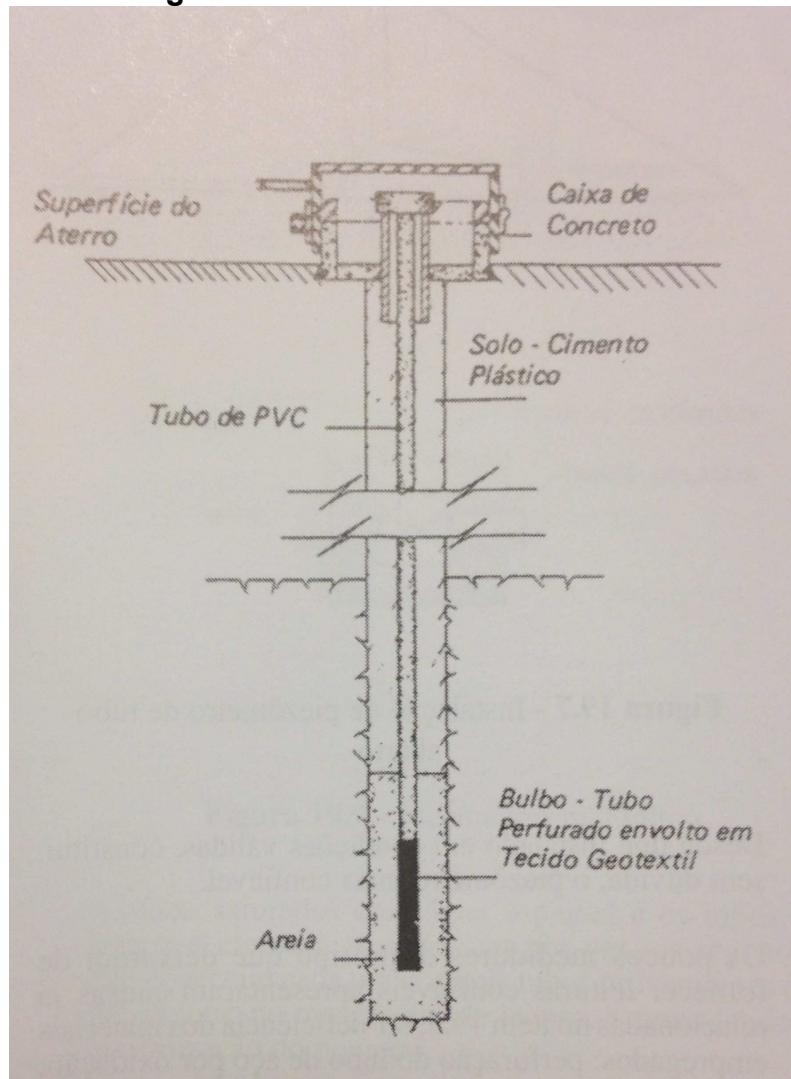
Também conhecido como piezômetro de tubo aberto, é utilizado com grande frequência em barragens de terra, pelo seu alto nível de confiabilidade e ao mesmo tempo simplicidade de funcionamento e leitura (DE MELLO, 1975).

Ele é normalmente instalado num furo já aberto (normalmente em virtude de sondagens realizadas). Para evitar colapso das paredes do furo, ele é protegido por um cano de PVC perfurado, para que a água adentre no mesmo, e envolto em uma manta geotêxtil, impedindo entrada de solo. A leitura dos dados é efetuada através de um cabo elétrico com dois condutores, graduado de metro em metro, em cuja extremidade há um sensor constituído por dois eletrodos dispostos concêntricamente e isolados entre si. O sensor é então introduzido no tubo do instrumento e ao atingir o nível da água, a mesma fecha o circuito formado pelo conjunto sensor/cabo/galvanômetro/bateria. A condição de leitura é então percebida pelo deslocamento do ponteiro do galvanômetro. A leitura é referida à extremidade superior do tubo de PVC e é obtida através de medida com trena.

Os valores medidos, correspondentes a medição de pressão neutra, devem ser comparados com os níveis máximos de atenção e alerta, conforme definido pelo projetista com base em experiências bem sucedidas.

A figura 17 mostra um piezômetro de tubo aberto (Casagrande), conforme descrito.

Figura 17 – Piezômetro de Tubo Aberto



Fonte: CRUZ (1996)

2.5.2. Medidor de Vazão

Objetivam determinar as vazões individuais de drenos ou somatórios ao longo dos trechos ou da totalidade da estrutura, e determinar vazões de percolação pelo maciço de terra (CRUZ, 1996).

Os tipos mais utilizados são: vertedor triangular e o Parshall

Os triangulares são, segundo Silveira (2006) confiáveis e duráveis, podendo ser lidos de forma simples e precisa através de um dispositivo constituído por parafuso micrométrico introduzido dentro de um tubo tranquilizador, sendo um indicador elétrico, tal qual o do piezômetro, usado para indicar o momento da leitura, feito então com paquímetro.

Os do tipo Parshall também são duráveis e confiáveis, sendo medidos da mesma forma que o medidor triangular (CRUZ, 1996)

As leituras, em ambos os casos, pode ser feitas com vasilhame e cronômetro, desde que o tempo de enchimento não seja inferior a 30 segundos. (SILVEIRA, 2006).

Na figura 18 é possível observar um medidor triangular típico de um barramento.

Figura 18 – Medidor de Vazão Triangular

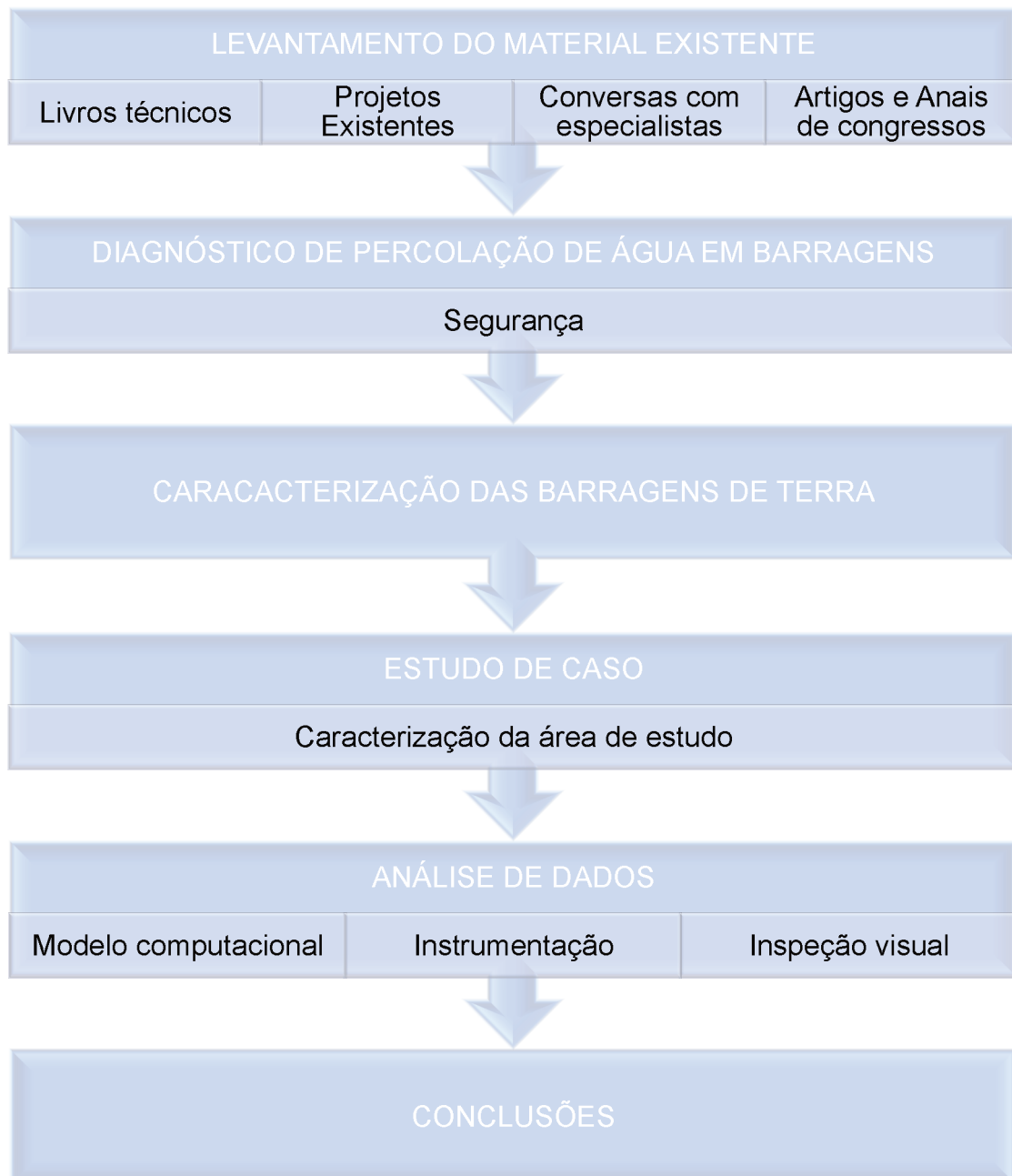


Fonte: MARTINS E DUTRA (2013)

3. MÉTODO

Como forma de ilustrar a sequência lógica adotada no presente estudo, expõe-se através da figura 19 um fluxograma indicativo, objetivando apontar os passos adotados ao se conceber o método desse trabalho.

Figura 19 – Fluxograma do método do trabalho



Fonte: Do autor.

A seguir serão descritas as etapas apresentadas no esquema.

3.1. Levantamento do material existente

Para que o presente trabalho fosse elaborado, de forma a estar pautado na realidade prática da execução construtiva de barragens, diversas ferramentas de consulta foram utilizadas, tais como: livros técnicos, artigos científicos, anais de congressos, apresentações ilustrativas, conversas com especialistas, laudos técnicos, projetos existentes e similares.

A pesquisa em livros técnicos foi útil no sentido de embasar a maior parte da teoria por trás das análises feitas com dados obtidos a partir do estudo de caso. É importante destacar, como principal norteador, o livro “100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto”, de autoria do professor Paulo Teixeira da Cruz. A partir de tal obra foram extraídas informações relevantes de algumas barragens lá apresentadas, sendo que os principais aspectos técnicos priorizados foram o comportamento dos filtros e drenos, dados de instrumentação e condições visuais ideais, utilizando tais informações como uma das bases de referenciamento quanto ao comportamento da barragem de Ilha Comprida. É importante ressaltar que a escolha dos empreendimentos de referência foi feita pelo fato dos mesmos serem similares quanto a constituição do barramento, bem como pelo fato de apresentarem fundação em situação análoga à de Ilha Comprida.

Além dos dados apresentados em livros técnicos, também tomou-se conhecimento de projeto existente na mesma região daquele aqui estudado, sendo ambos quase idênticos quanto a aspectos técnicos. A partir disso, foi possível analisar os mesmos critérios explicitados no parágrafo anterior e, da mesma forma, realizar posterior comparação.

O quadro 4 apresenta algumas barragens eleitas como referência para análise do comportamento Ilha Comprida.

Quadro 4 – Barragens de referência para esse trabalho

| Barragem | Localização | Ano de Conclusão |
|-----------------|--------------------|-------------------------|
| Jurumirim | São Paulo/Paraná | 1962 |
| Rosana | São Paulo/Paraná | 1987 |
| Segredo | Mato Grosso | 2012 |

Fonte: do autor

Como forma de complemento ao assunto tratado, alguns especialistas foram consultados, dentre os quais se destaca a figura do engenheiro consultor, Guy Bourdeaux. Também foram levantados alguns Anais e Artigos de congressos, através de sistema de busca *online*, destacando-se aqueles do CBDB, Comitê Brasileiro de Barragens.

É importante ressaltar que o projeto do empreendimento utilizado no estudo de caso, PCH Ilha comprida, abordado em mais detalhes no item 3.4, foi fornecido pelo grupo proprietário da obra.

Os materiais de estudo foram, quando pertinente, devidamente referenciados, podendo ser checados ao fim do trabalho.

3.2. Diagnóstico de percolação de água em barragens

Em se tratando de barragens, a principal preocupação, quanto a boa operação da mesma, é criar mecanismos de controle de percolação da água, impedindo que efeitos como *piping*, erosão interna, liquefação e desestabilidade dos maciços terrosos ocorram. Também é interessante citar a problemática da flutuação das estruturas de concreto, oriunda de forças de subpressão causadas pela água na interface estrutura-fundação.

Neste trabalho, a análise restringiu-se à parte de maciços terrosos, que no caso de Ilha Comprida, compreende a barragem como um todo, excetuando-se assim, a casa de força e o vertedouro, sendo ambos estruturas de concreto armado que estão sob ação de subpressão, não levadas em conta nesse estudo.

Ao se realizar o diagnóstico de percolação da água em barragens, o que foi feito em função dos vários materiais obtidos e detalhados no tópico 3.1, a principal

consideração feita foi aquela em relação a segurança da estrutura, frisando novamente a restrição do estudo apenas para maciços terrosos.

Procedendo-se à análise sob a ótica da segurança, o enfoque do presente estudo se deu para um critério de segurança apenas, sendo o mesmo o de estabilidade de taludes, tanto de montante quanto de jusante, do barramento em regime operacional permanente e final de construção, ambos considerando e não considerando ações sísmicas. Tal decisão se baseia no fato de que esse é o critério preponderante quando restrito ao estudo de barragens de terra em PCHs, conforme Eletrobrás (2003). Questões relativas ao estudo dos fatores de segurança do barramento serão discutidas de forma mais aprofundada no decorrer do capítulo 5, mais especificamente no item 5.1.

3.3. Caracterização das barragens de terra

Após análise de diferentes tipos de barragens, optou-se pelo aprofundamento do estudo em barragens de terra, consideradas as do tipo mais crítico, no que tange problema relacionados a ação da água em seu interior. A maior susceptibilidade aos problemas, decorre do fato de que o poder de comprometimento da estrutura é ampliada, em comparação com aquelas de enrocamento e de concreto, uma vez que a percolação de água na mesma pode levar a erosões internas e liquefação de material constituinte, agindo no interstício dos grãos, o que pode levar a estrutura à ruína. Tais ações, com alto poder de comprometimento da estrutura, não são observadas em barragens de enrocamento com face de concreto e tampouco em barragens de concreto.

Atendo-se a esse tipo de estrutura de barramento, foi de fundamental importância catalogar certos materiais constituintes do maciço em si, como argilas e areias, e posterior aferição das condições desejáveis de aplicabilidade dos mesmos, como taxas limites de percolação, resistência mecânica e estudo de granulometria, sendo esses dados todos fornecidos por meio de tabelas e figuras, pela empresa responsável pelo projeto da obra.

3.4. Estudo de caso

Como maneira de melhor ilustrar o controle de percolação de água, optou-se por realizar-se um estudo de caso de uma PCH já construída, analisando as soluções já adotadas na mesma e comparando-a àquelas já consagradas, utilizando-se dos empreendimentos já citados na tabela 5 da seção 3.2 para tal.

Construída sobre o rio Juruena, a PCH Ilha Comprida possui barragem com altura, na crista, de aproximadamente 22 metros. Seu reservatório possui uma área de 2,45 km², ocupando terras de dois municípios. A potência máxima instalada no empreendimento é de 18,7 MW.

A região denominada de Planalto do Chapadão dos Parecis possui, de forma geral, solo composto por latossolo argiloso vermelho e de areia. No local da obra, especificamente, nota-se presença de fundação em três níveis bem caracterizados: solo residual de arenito, arenito incoerente e arenito coerente. Tal composição de solo é conhecida pela elevada permeabilidade, o que é confirmado pelos dados de sondagem.

No capítulo 4 discutir-se-á melhor sobre o assunto, sendo apresentado um mapa de localização da área de estudo, dados de sondagem, seção transversal esquemática do barramento, dados de análise laboratorial e fotos pertinentes. Também serão detalhadas as características gerais do empreendimento, bem como a condição geológica e geotécnica do local.

3.5. Análise de dados

Nesta etapa, considerada crucial, deu-se a obtenção de dados relevantes para a análise do comportamento da estrutura, focando-se naqueles referentes aos componentes de controle da água.

Com a intenção de deixar a leitura mais fluida, auxiliando assim na compreensão dos resultados, optou-se por dividir a análise de dados em três frentes:

- Modelo computacional – aqui se discute como se deu o processo de obtenção dos fatores de segurança quanto à estabilidade de taludes;

- Análise de dados da instrumentação – explica como se deu a obtenção de tais dados e o tratamento imposto aos mesmos;
- Inspeção visual – como se deu a inspeção *in loco*.

3.5.1. Modelo Computacional

As análises relacionadas à estabilidade do talude foram feitas através do *software* Slide®, da empresa Rocscience. As mesmas foram realizadas por meio de modelagem bidimensional da seção transversal do maciço, nas estacas 7+10,00m (margem direita), 10+00m (leito do rio) e 18+00m (margem esquerda), aplicando-se método dos elementos finitos.

A modelagem do problema foi feita em quatro etapas, sendo as três últimas fornecidas pela empresa responsável pelo projeto da hidrelétrica de Ilha Comprida.

- Definição da geometria do modelo;
- Discretização do domínio do problema em elementos finitos;
- Especificação e atribuição de propriedades hidráulicas aos elementos finitos;
- Especificação e aplicação das condições hidráulicas de contorno do modelo.







A geometria do modelo foi definida em 3 regiões: maciço da barragem, dispositivos de drenagem interna (filtros e drenos) e fundação. Assim, cada região foi atribuída em função de certas propriedades dos materiais.

Para fins de simplificação, todas as regiões apresentam o mesmo padrão geométrico da malha de elementos finitos e as mesmas características numéricas dos elementos finitos. Os materiais que constituem o corpo do maciço da barragem são: material argiloso (taludes de montante e jusante), areia (filtros e drenos) e pedrisco (drenos horizontais).

O *software* disponibiliza cinco modelos de análise diferentes: Brooks and Corey, Fredlung and Xing, Gardner, van Genuchten e Simple – este apenas em meio saturado -. Prezando pela simplificação, foi utilizado o modelo “Simple”, em que, além dos parâmetros geotécnicos de resistência, outro dado de entrada a ser informado são os coeficientes de permeabilidade dos materiais. Para fornecer o resultado, esse modelo admite, além do equilíbrio de momentos, também o equilíbrio entre forças horizontais e verticais, utilizando o critério de estabilidade de Spencer.

Os coeficientes de permeabilidade serão melhor discutidos ao longo do capítulo 4 desse estudo. Os parâmetros de resistência como coesão (c'), ângulo de atrito (ϕ') e o peso específico (γ) dos materiais foram extraídos dos laudos de ensaios de laboratório, conforme segue no quadro 5. O parâmetro da pressão neutra (R_u) foi estimado pela empresa projetista, com base em projetos anteriores e materiais semelhantes.

Quadro 5 – Parâmetros Geotécnicos Utilizados

| Material | Peso Específico (kN/m³) | c'(kPa) | ϕ' (°) | R_u | Cor |
|--------------------------|---|----------------|-------------------------------|----------------------|---|
| Solo Argiloso Compactado | 19 | 17 | 28 | 0,10 |  |
| Filtros e Transições | 20 | 0 | 35 | - |  |
| Enrocamento | 21 | 0 | 45 | - |  |
| Solo Residual de Arenito | 20 | 5 | 30 | - |  |
| Arenito Incoerente | 20 | 5 | 35 | - |  |
| Arenito Coerente | 20 | 5 | 35 | - |  |

Fonte: do autor

As análises foram desenvolvidas considerando as seguintes premissas:

- Final de Construção: consta da análise dos taludes de montante e jusante, considerando o parâmetro de pressão neutra (R_u) no maciço compactado da barragem de terra, sem a presença de carga hidráulica do reservatório;
- Regime Permanente: para o talude de jusante, com nível de água a montante na elevação normal de operação (363,70m), considerando-se dissipação total do excesso de pressão neutra no maciço;
- Efeito Sísmico: avaliados os taludes de montante e jusante em condições finais de construção e o talude de jusante em regime permanente com a inclusão dos parâmetros sísmicos de 0,05 na horizontal e 0,03 na vertical, conforme Eletrobrás (2003).

3.5.2. Análise de Dados da Instrumentação

Nessa segunda parte do trabalho, obtiveram-se dados de piezometria referentes a medições feitas no ano de 2015, mais especificamente nos meses de

janeiro até agosto. Essas foram as últimas medições completas ao qual esse estudo teve acesso.

Esses dados foram coletados de todos os 16 piezômetros instalados na margem direita e de 7 dos 19 inicialmente instalados na margem esquerda (12 piezômetros apresentaram defeitos anteriormente a essa coleta).

Em posse dos mesmos, elaboraram-se tabelas com as leituras dos piezômetros instalados em determinada seção. Tais tabelas indicam a leitura da cota piezométrica, a respectiva data de coleta e o nome do piezômetro. Também estão inclusos dados técnicos do instrumento, como cota de seu bocal, data de instalação e zoneamento.

Os valores medidos foram comparados então com os valores pré-fixados de nível de atenção e nível de alerta, sendo esses, critérios de projeto definidos com base na boa prática de projetos anteriores.

3.5.3. Inspeção Visual

Esta etapa consistiu de uma visita à PCH de Ilha Comprida, com objetivo de observar o barramento, em busca de indícios de problemas de desempenho no mesmo. Nessa visita, foram inspecionadas as duas margens e seus respectivos taludes de montante e jusante, bem como suas cristas. Também deu-se atenção às ombreiras.

Ao longo dessa visita técnica, foram feitos diversos registros fotográficos que serão, quando apropriado, inclusos no decorrer desse trabalho.

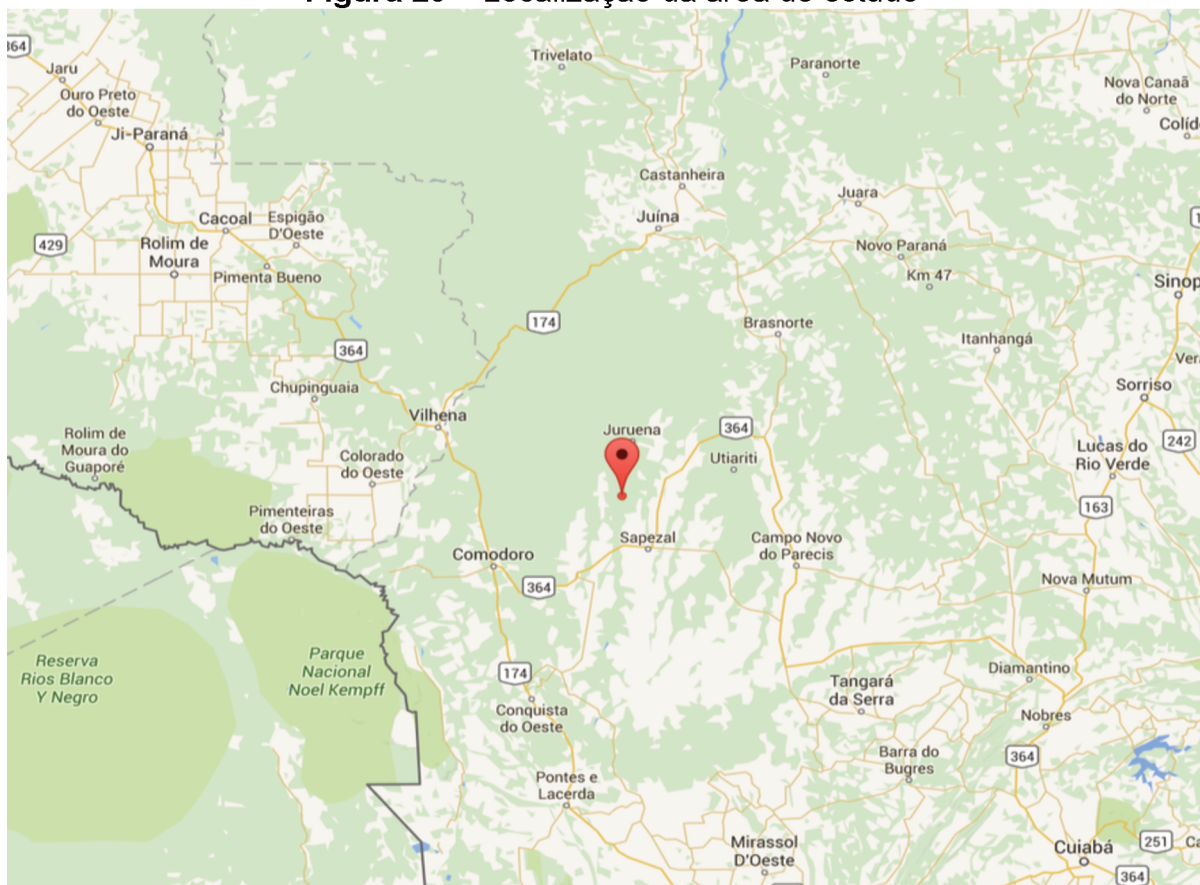
3.6. Conclusões

As conclusões serão apresentadas de forma detalhada no capítulo 6 desse trabalho.

4. ÁREA DE ESTUDO

A área analisada por esse estudo é a barragem de terra da PCH Ilha Comprida, projetada pela SPEC engenharia e operada pela Segredo Energia S/A, localizada no rio Juruena, na divisa entre os municípios de Sapezal e Campos de Júlio, ambos pertencentes ao estado de Mato Grosso. A figura 20 expõe, na forma de um mapa, a localização da mesma, a qual está marcada através do ponto vermelho.

Figura 20 – Localização da área de estudo



Fonte: <https://maps.google.com.br/>

A hidrelétrica aqui analisada faz parte de um aproveitamento energético composto por oito usinas, das quais seis (todas PCHs) já se encontram em plena operação, sendo que as mesmas operam no sistema de “cascata”, no qual o montante de um empreendimento corresponde ao jusante de um outro

imediatamente anterior. Tal sistema pressupõe certo nível de integração entre as PCHs.

Localizada no aproveitamento do rio Juruena, a PCH de Ilha Comprida, mostrada na figura 21, pode ser acessada por estrada de terra, 52 quilômetros distante de Sapezal e possui comprimento na ordem de 545 metros de barramento e crista fixada na cota de 366,20 metros. As estruturas de concreto estão posicionadas na margem direita do rio Juruena, com extensão da ordem de 45 metros e constituídas por um circuito gerador (casa de força) de três unidades (1) e um vertedouro que abrange três vãos equipados com comportas e três adufas para desvio do rio (2); há uma barragem de terra na margem esquerda e dentro do leito do rio, com 280 metros de extensão e com altura máxima de 22 metros, entre o vertedouro e a ombreira direita (3); e uma barragem de terra de 190 metros de extensão entre a tomada de água e a ombreira direita (4). A montante tem-se o reservatório, cuja capacidade total é de, quando na situação de nível d'água máximo, 15,78 milhões de m³ (5); e a jusante observa-se o rio Juruena, fluindo no sentido norte (6);

Figura 21 – Principais Constituintes da PCH Ilha Comprida



Fonte: Segredo Energia S/A (2012).

Ilha Comprida foi construída a aproximadamente 84,00 quilômetros da confluência do rio Juruena com o rio Juína, sendo o empreendimento localizado na bacia Amazônica e sub-bacia Juruena. Tal sistema hidrográfico é considerado de excelente aproveitabilidade, uma vez que o regime hidrológico favorece um bom percentual de geração - comparado com o máximo instalado – ao longo do ano inteiro.

Na região de implantação da barragem de terra, foram realizadas investigações geotécnicas complementares que consistiram em quatro sondagens à percussão (SP) e quatro sondagens mistas (SM), conforme apresentado no quadro 6. Esta campanha de sondagens consolidou os estudos para elaboração das seções de projeto do empreendimento.

Quadro 6 – Sondagens na região de implantação da barragem de terra da PCH Ilha Comprida

| Sondagens Executadas | | | | |
|-----------------------------|----------------------------|------------|-----------------|-------------------------|
| Sondagens | Coordenadas UTM (m) | | Cota (m) | Profundidade (m) |
| | N | E | | |
| SP 05 | 8.540.170,00 | 284.858,00 | 357,898 | 7,10 |
| SP 07 | 8.540.116,00 | 285.048,00 | 353,036 | 6,50 |
| SP 08 | 8.540.136,00 | 285.132,00 | 358,851 | 7,00 |
| SP 09 | 8.540.154,00 | 285.200,00 | 370,002 | 15,00 |
| SM 01 | 8.540.159,06 | 285.143,30 | 360,903 | 16,50 |
| SM 34 | 8.540.170,09 | 284.042,10 | 352,681 | 14,00 |
| SM 107 | 8.540.210,00 | 285.023,00 | 352,732 | 16,20 |
| SM 108 | 8.540.120,46 | 284.977,00 | 352,922 | 16,00 |

Fonte: SPEC engenharia

Os ensaios de permeabilidade *in situ*, executados através das sondagens SP, mostraram presença de solo residual de arenito de condutividade hidráulica com ordem de grandeza variando entre 10^{-3} cm/s e 10^{-4} cm/s. Através das sondagens mistas realizadas, identificou-se maciço rochoso em arenito coerente, cujo valor do coeficiente de permeabilidade é da ordem de grandeza de 10^{-4} cm/s, conforme observado no quadro 7.

Quadro 7 – Coeficientes de permeabilidade dos materiais da fundação da barragem de terra da PCH Ilha Comprida

| Sondagens | Material Ensaiado | Coeficiente de Permeabilidade, k (cm/s) | | Permeabilidade Média da camada, k_m (cm/s) |
|-----------|--------------------------|---|-----------------------|--|
| | | Limite Superior | Limite Inferior | |
| SP 05 | Solo Residual de Arenito | $1,82 \times 10^{-3}$ | $5,95 \times 10^{-4}$ | $1,21 \times 10^{-4}$ |
| SP 07 | | - | - | - |
| SP 08 | | - | - | - |
| SP 09 | | $1,24 \times 10^{-3}$ | $6,34 \times 10^{-3}$ | $9,37 \times 10^{-4}$ |
| SM 01 | Arenito Coerente | - | - | - |
| SM 34 | | $3,33 \times 10^{-4}$ | $1,67 \times 10^{-4}$ | $2,49 \times 10^{-4}$ |
| SM 107 | | $3,99 \times 10^{-6}$ | $6,34 \times 10^{-6}$ | $5,17 \times 10^{-6}$ |
| SM 108 | | - | - | - |

Fonte: SPEC engenharia

O maciço da barragem de terra, tanto na margem esquerda quanto na margem direita, são constituídos pelos seguintes elementos:

- Os espaldares de montante e jusante de material argiloso, com inclinação 1V:1,9H, foram executados com material argiloso proveniente da jazida de empréstimo “Celito 1”;
- O tapete impermeável na região de montante da barragem foi executado com 1 metro de espessura, sendo seu material argiloso compactado proveniente da jazida “Celito 1”;
- O sistema de drenagem interna é do tipo inclinado composto pelo filtro vertical, dreno horizontal superior, dreno inclinado e dreno horizontal inferior;
- Os tapetes drenantes sob o espaldar de jusante são compostos por areia e pedrisco, ao qual se dá o nome de tipo “sanduíche”;
- A proteção do talude de montante é composta por solo-cimento compactado.

Os coeficientes de permeabilidade adotados para o maciço compactado, argiloso, foram obtidos por meio dos ensaios geotécnicos de laboratório de duas empresas e foram realizados com amostras indeformadas coletadas no maciço do barramento, sendo esse material proveniente da área de empréstimo “Celito 1”. Os resultados são apresentados no quadro 8.

Quadro 8 – Coeficientes de permeabilidade do material argiloso da jazida “Celito 1”

| Empresa | Amostras | Coordenadas UTM (m) | | Cota (m) | Data do Ensaio | Permeabilidade Vertical, k (cm/s) |
|-----------------------|----------|--------------------------|---------|----------|----------------|-----------------------------------|
| | | N | E | | | |
| Holanda Engenharia | 0258/11 | 8.538.560 | 272.677 | 515,0 | 15/08/11 | $1,27 \times 10^{-5}$ |
| | 0259/11 | 8.538.492 | 272.592 | 521,0 | 15/08/11 | $5,09 \times 10^{-6}$ |
| | 0260/11 | 8.538.652 | 272.642 | 510,0 | 15/08/11 | $1,43 \times 10^{-6}$ |
| | 0261/11 | 8.538.671 | 272.775 | 503,0 | 16/08/11 | $7,55 \times 10^{-7}$ |
| Concresolo Engenharia | 4638 | Est. 18+0,00 – 3,00 (M) | | - | Nov/12 | $2,85 \times 10^{-7}$ |
| | 4639 | Est. 21+0,00 – 3,00m (M) | | - | Nov/12 | $8,29 \times 10^{-6}$ |

Fonte: SPEC engenharia

O coeficiente de permeabilidade da areia utilizada no filtro vertical e nos drenos horizontais e inclinado foi definido com base nos ensaios de permeabilidade à carga constante. Os resultados apresentados mostraram um coeficiente de permeabilidade da ordem de 10^{-2} cm/s, conforme observado no quadro 9.

Quadro 9 – Coeficientes de permeabilidade da areia utilizada no sistema de drenagem interna

| Amostras | Coordenadas UTM (m) | | Cota (m) | Data do Ensaio | Permeabilidade, k (cm/s) |
|----------|---------------------|---------|----------|----------------|--------------------------|
| | N | E | | | |
| 0268/11 | 8.534.591 | 279.681 | 380,0 | 30/07/11 | $1,67 \times 10^{-2}$ |
| 0269/11 | 8.534.578 | 279.685 | 378,0 | 30/07/11 | $1,26 \times 10^{-2}$ |
| 0302/11 | - | - | - | 31/08/11 | $2,20 \times 10^{-2}$ |
| 0001/11 | - | - | - | 24/08/11 | $1,70 \times 10^{-2}$ |

Fonte: SPEC engenharia

No quadro 10 são apresentados os valores dos coeficientes de permeabilidade dos materiais utilizados para a execução do barramento da PCH Ilha Comprida, a partir dos resultados dos ensaios de laboratório e de ensaios de campo.

Quadro 10 – Coeficientes de permeabilidade definidos para os materiais de construção da barragem de terra da PCH Ilha Comprida

| Material | k_v (m/s) | k_h (m/s) |
|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Solo argiloso compactado | $3,0 \times 10^{-8}$ | $2,7 \times 10^{-7}$ |
| Areia (filtros e drenos) | $1,0 \times 10^{-4}$ | |
| Pedrisco | $2,5 \times 10^{-2}$ | |
| Solo residual de arenito | $1,0 \times 10^{-5}$ | |
| Arenito incoerente/coerente | $5,0 \times 10^{-6}$ | |

Fonte: SPEC engenharia

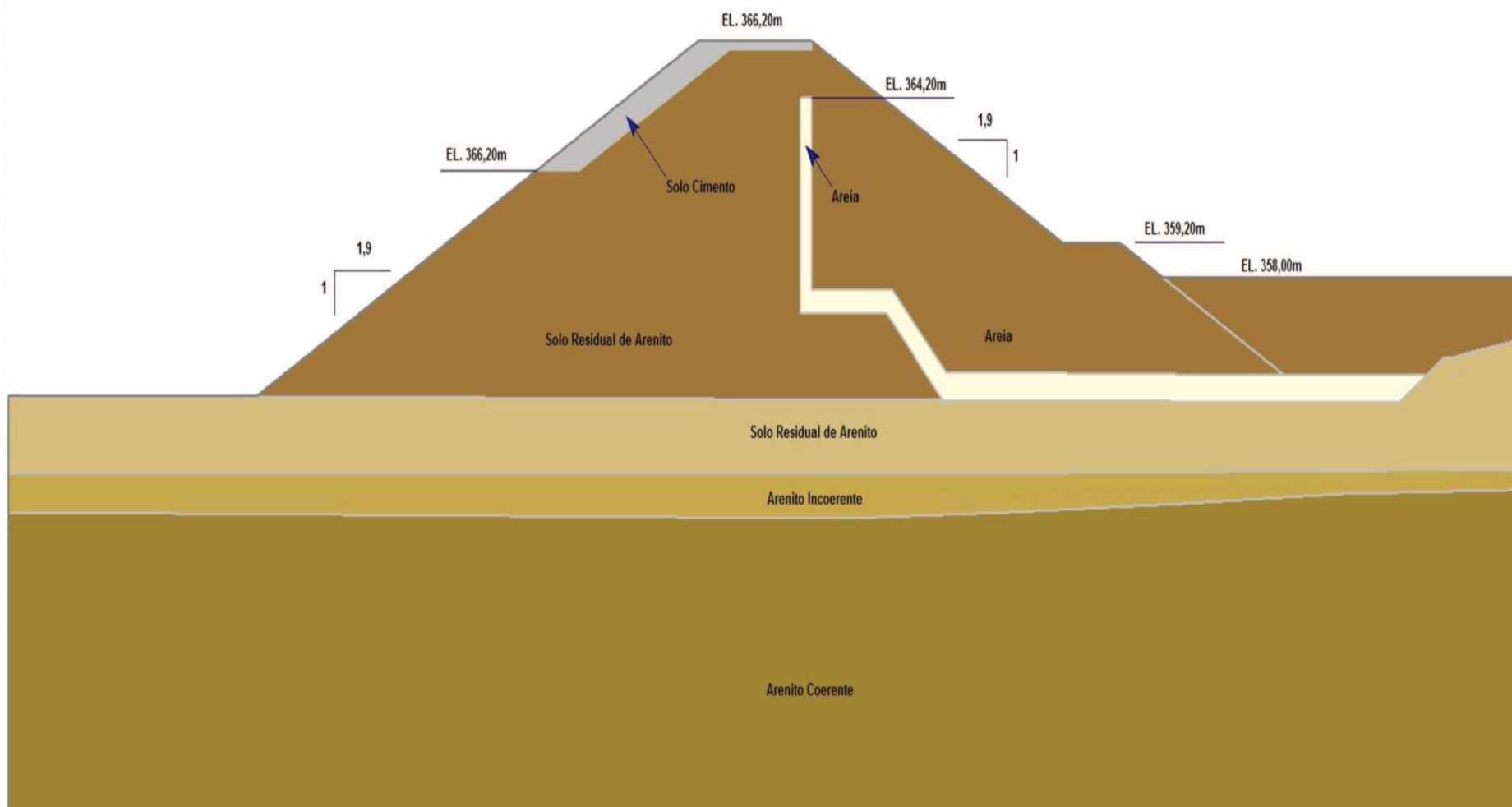
Para acompanhamento do desempenho do maciço, foram instalados alguns instrumentos ao longo de diversas seções do barramento, sendo esses:

- Margem direita: dezesseis piezômetros tipo Casa Grande e dez marcos de deslocamento vertical;
- Margem esquerda: nove piezômetros do tipo Casa Grande e quatro marcos de deslocamento vertical;
- Galeria: vinte e cinco poços de drenagem, um medidor de vazão e cinco piezômetros do tipo Casa Grande.

Os piezômetros ainda estão operantes e sendo medidos com frequência estabelecida pelo projetista, bem como os medidores de vazão. Os marcos de deslocamento vertical permaneceram operantes apenas durante a execução da obra, sendo desativados após o término da mesma.

Na figura 22 observa-se um modelo computacional, também utilizado para as análises de estabilidade do presente estudo, de uma seção típica do maciço terroso de Ilha Comprida, onde são apresentados os aparatos para controle da água percolada, bem como os constituintes da fundação.

Figura 22 – Modelo Geomecânico de uma seção genérica da barragem de terra de Ilha Comprida



Fonte: SPEC engenharia

5. RESULTADOS – PCH ILHA COMPRIDA

Os resultados obtidos ao longo desse estudo têm por objetivo analisar as condições operacionais da barragem da PCH Ilha Comprida, no que tange seus mecanismos de controle de percolação de água.

De forma a permitir a melhor compreensão dos resultados, dividiu-se a apresentação dos mesmos da seguinte maneira:

- Análises computacionais de Estabilidade – são apresentados os fatores de segurança obtidos através de método computacional;
- Dados de instrumentação – serão analisados os valores fornecidos pelos instrumentos de monitoramento da barragem;
- Inspeção visual – são analisadas as condições operacionais, através de observações dos constituintes da barragem, após visita a obra.

5.1. Análises computacionais de estabilidade

Os fatores de segurança (FS) mínimos admissíveis considerados nessa análise foram:

- FS = 1,30 para a situação de final de construção (taludes de montante e jusante);
- FS = 1,50 para situação de regime permanente (talude de jusante);
- FS = 1,00 para os efeitos sísmicos (montante e jusante – final de construção e jusante – regime permanente).

Os critérios de aceitação estabelecidos foram adotados baseados na especificação constante em Eletrobrás (2003).

Para a condição final de construção, tanto o talude de montante (FCM) quanto o talude de jusante (FCJ) apresentaram um fator de segurança (FS) superiores a 1,30.

Considerando as possíveis ações sísmicas atuantes nos taludes de montante e jusante, nota-se que o barramento também apresentou condições satisfatórias.

Para a condição de regime permanente (RP), o talude de jusante apresentou fatores de segurança (FS) superiores a 1,50, inclusive para as possíveis ações sísmicas.

No quadro 11 são apresentados os fatores de segurança para as três seções modeladas, na situação de final de construção e regime permanente, com e sem a inclusão de ações sísmicas.

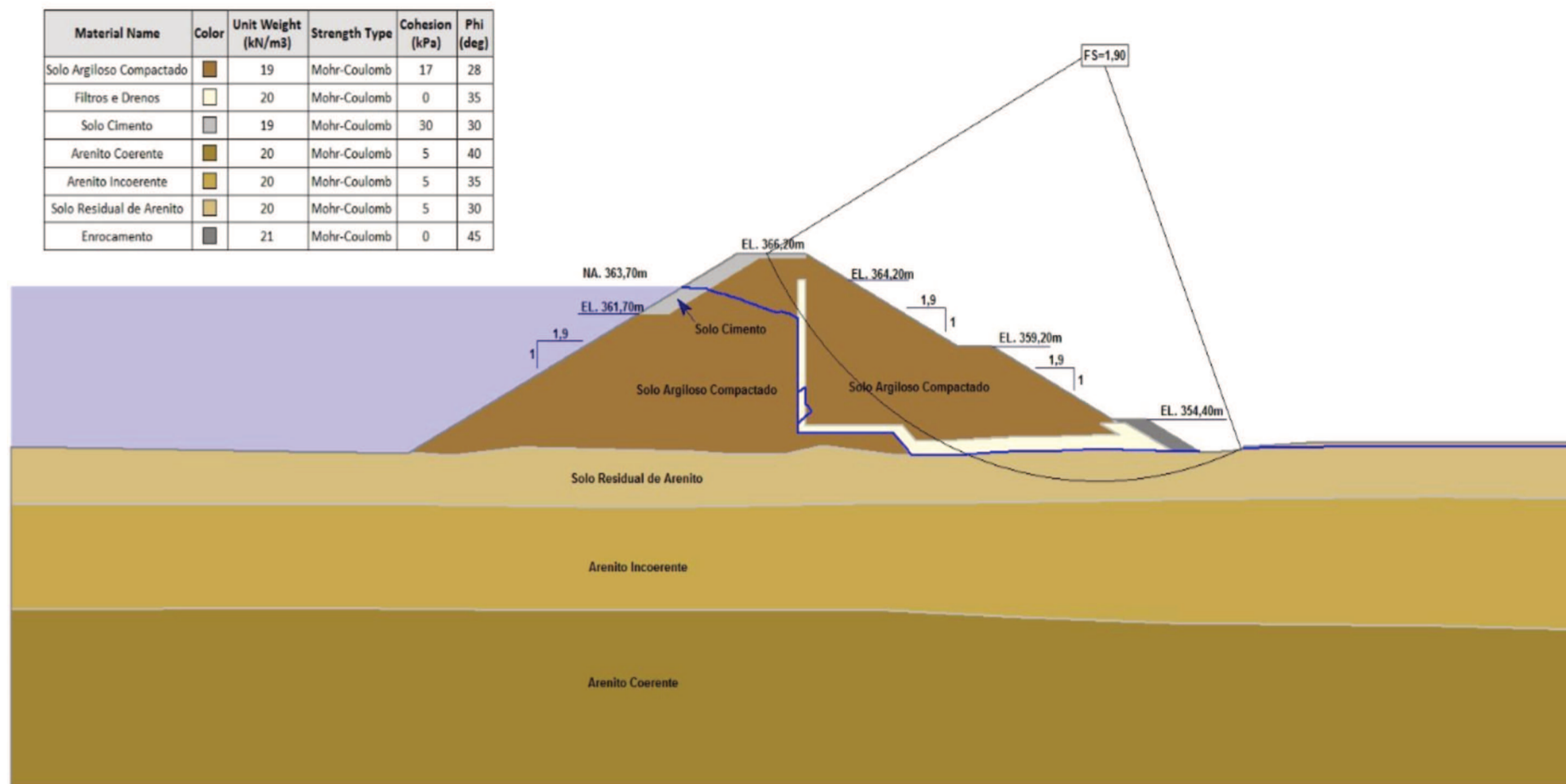
Quadro 11 – Resultados das análises de estabilidade

| Seção analisada | Condições | Condição de Análise | Fator de Segurança |
|------------------------|--------------------|----------------------------|---------------------------|
| Est. 7+10,00m | Sem ações sísmicas | RP | 1,90 |
| | | FCM | 1,59 |
| | | FCJ | 1,86 |
| | Com ações sísmicas | RP | 1,68 |
| | | FCM | 1,42 |
| | | FCJ | 1,68 |
| Est. 10+0,00m | Sem ações sísmicas | RP | 1,78 |
| | | FCM | 1,60 |
| | | FCJ | 1,93 |
| | Com ações sísmicas | RP | 1,56 |
| | | FCM | 1,43 |
| | | FCJ | 1,70 |
| Est. 18+0,00m | Sem ações sísmicas | RP | 2,39 |
| | | FCM | 1,70 |
| | | FCJ | 2,23 |
| | Com ações sísmicas | RP | 2,12 |
| | | FCM | 1,51 |
| | | FCJ | 1,99 |

Fonte: do autor

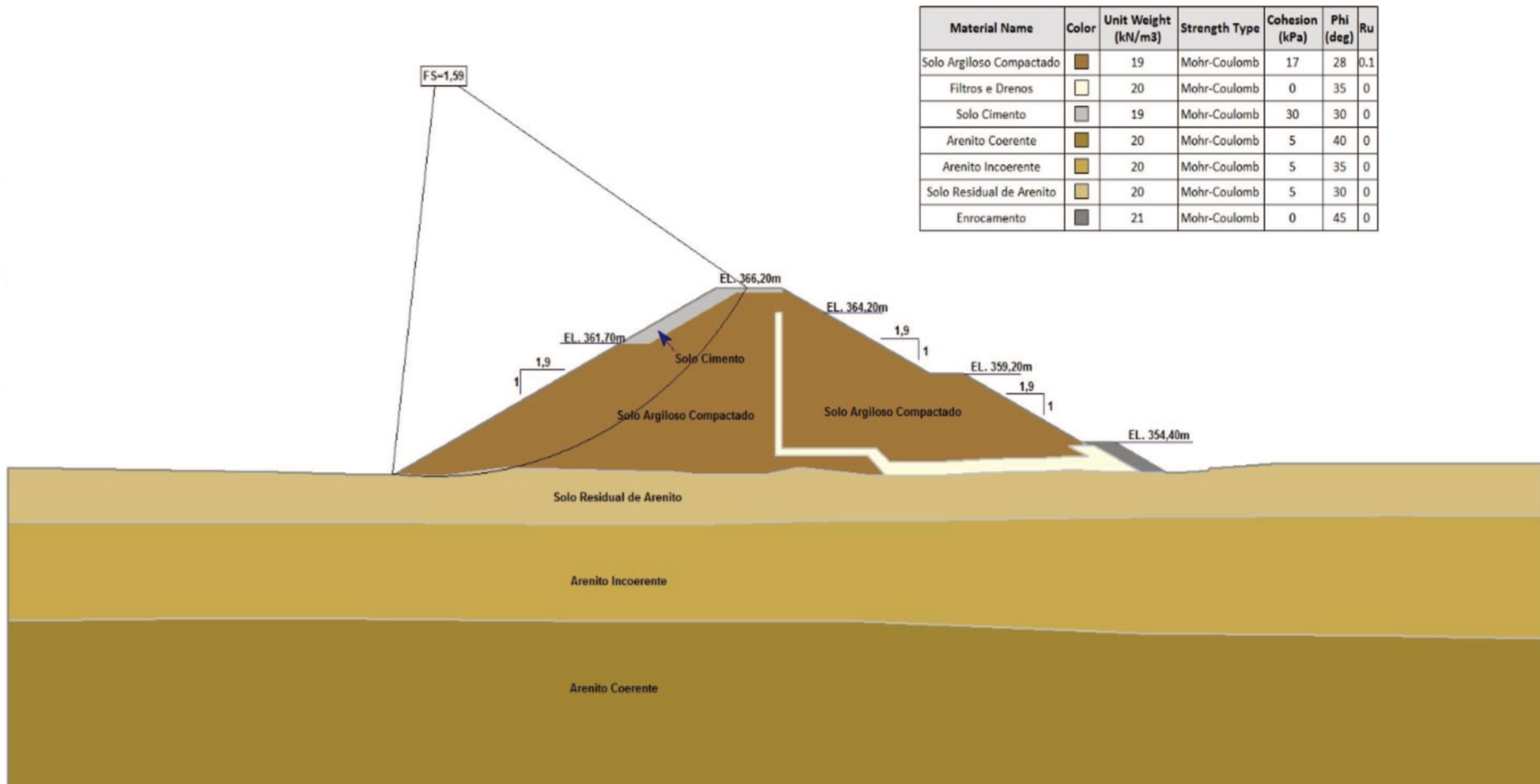
As figuras de 23 a 28 exibem os resultados através de modelo geomecânico da barragem. Aqui estarão mostrados aqueles referentes à estaca 7+10,00m, sendo que os demais poderão ser conferidos na seção “Apêndices”.

Figura 23 – Est. 7+10,00m – Análise de estabilidade do talude de jusante – Regime Permanente



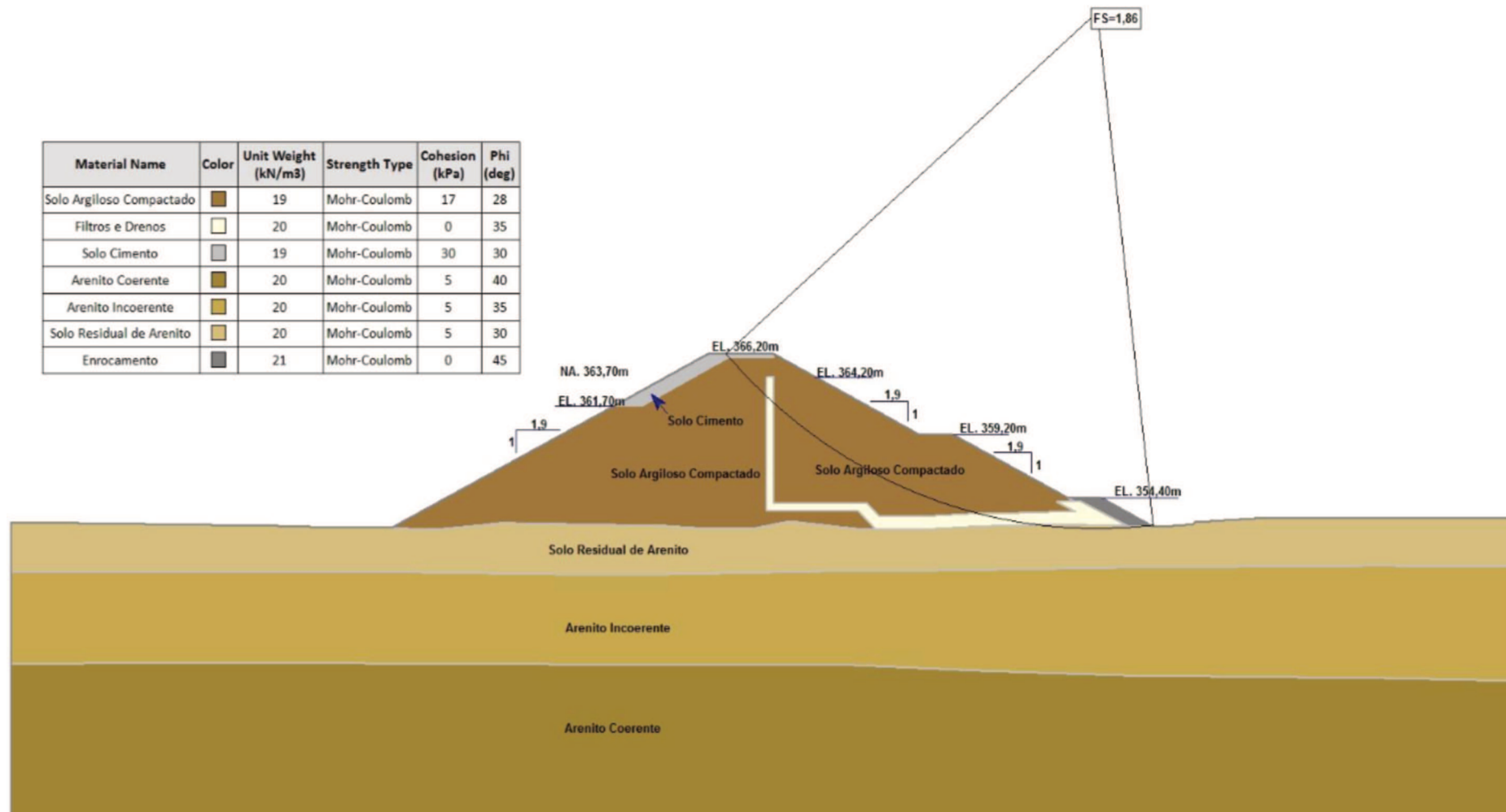
Fonte: do autor

Imagem 24 – Est. 7+10,00m – Análise de estabilidade do talude de montante – Final de Construção



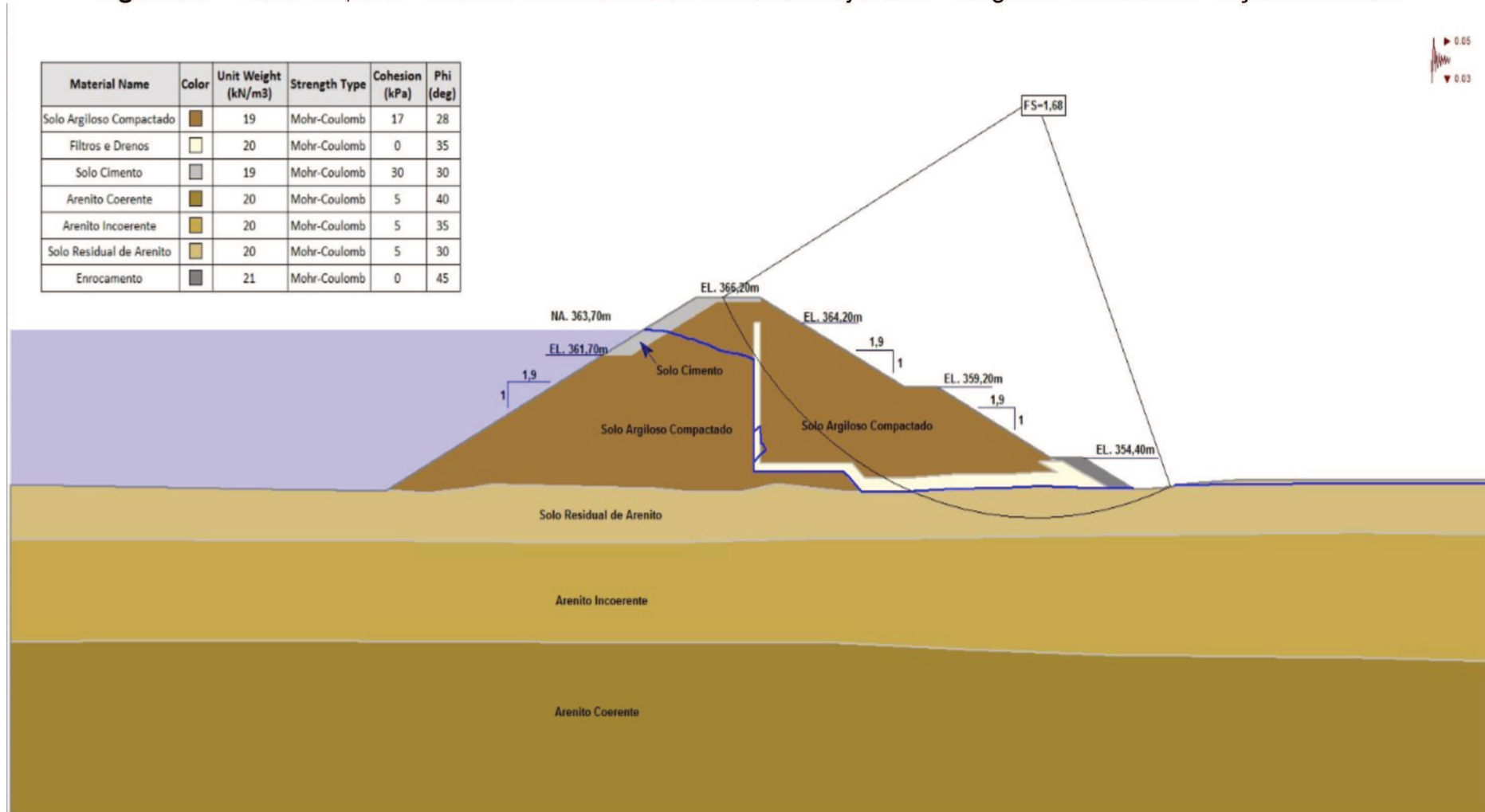
Fonte: do autor

Figura 25 – Est. 7+10,00m – Análise de estabilidade do talude de jusante – Final de Construção



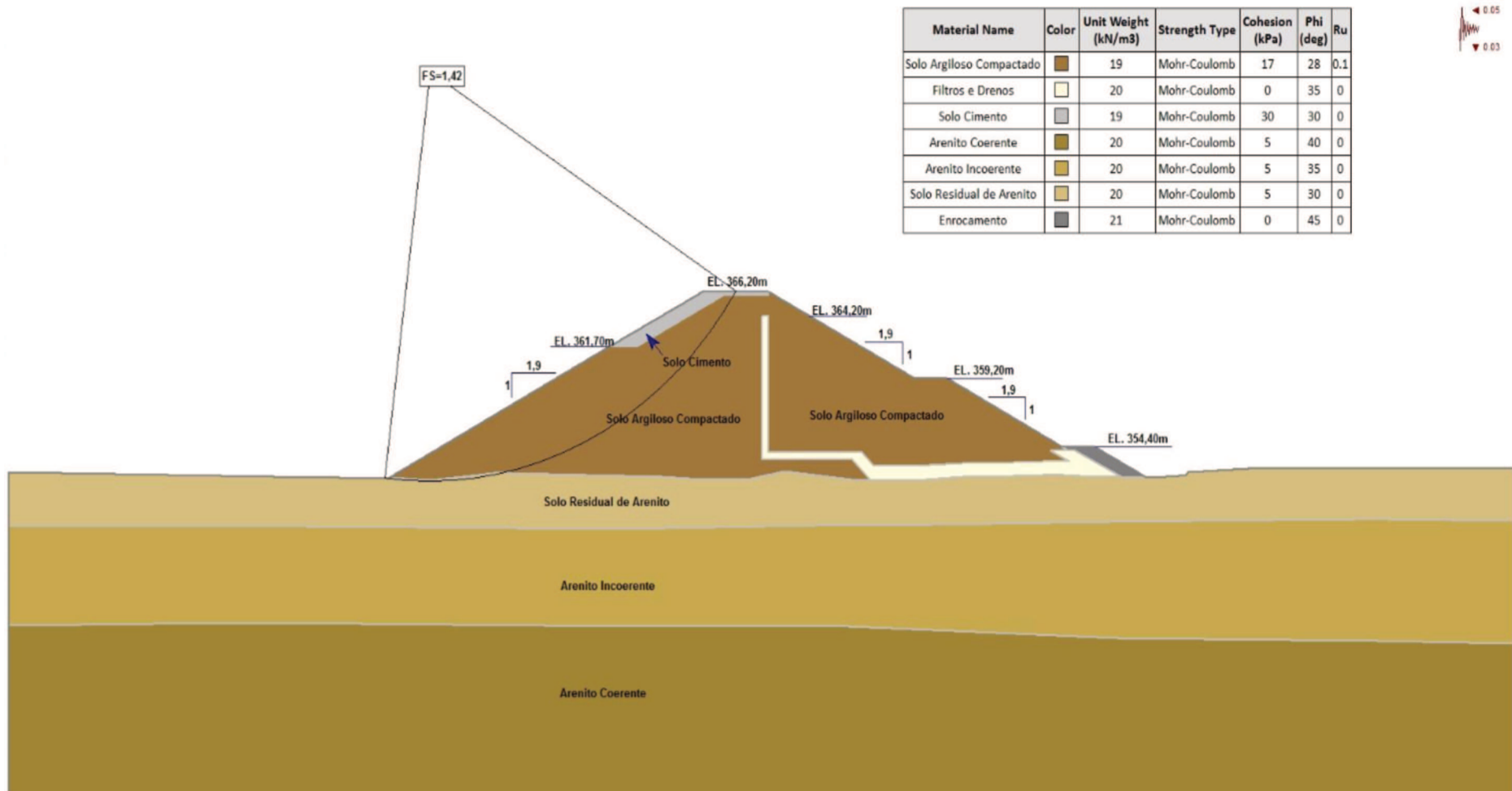
Fonte: do autor

Figura 26 – Est. 7+10,00m – Análise de estabilidade do talude de jusante – Regime Permanente – Ações Sísmicas



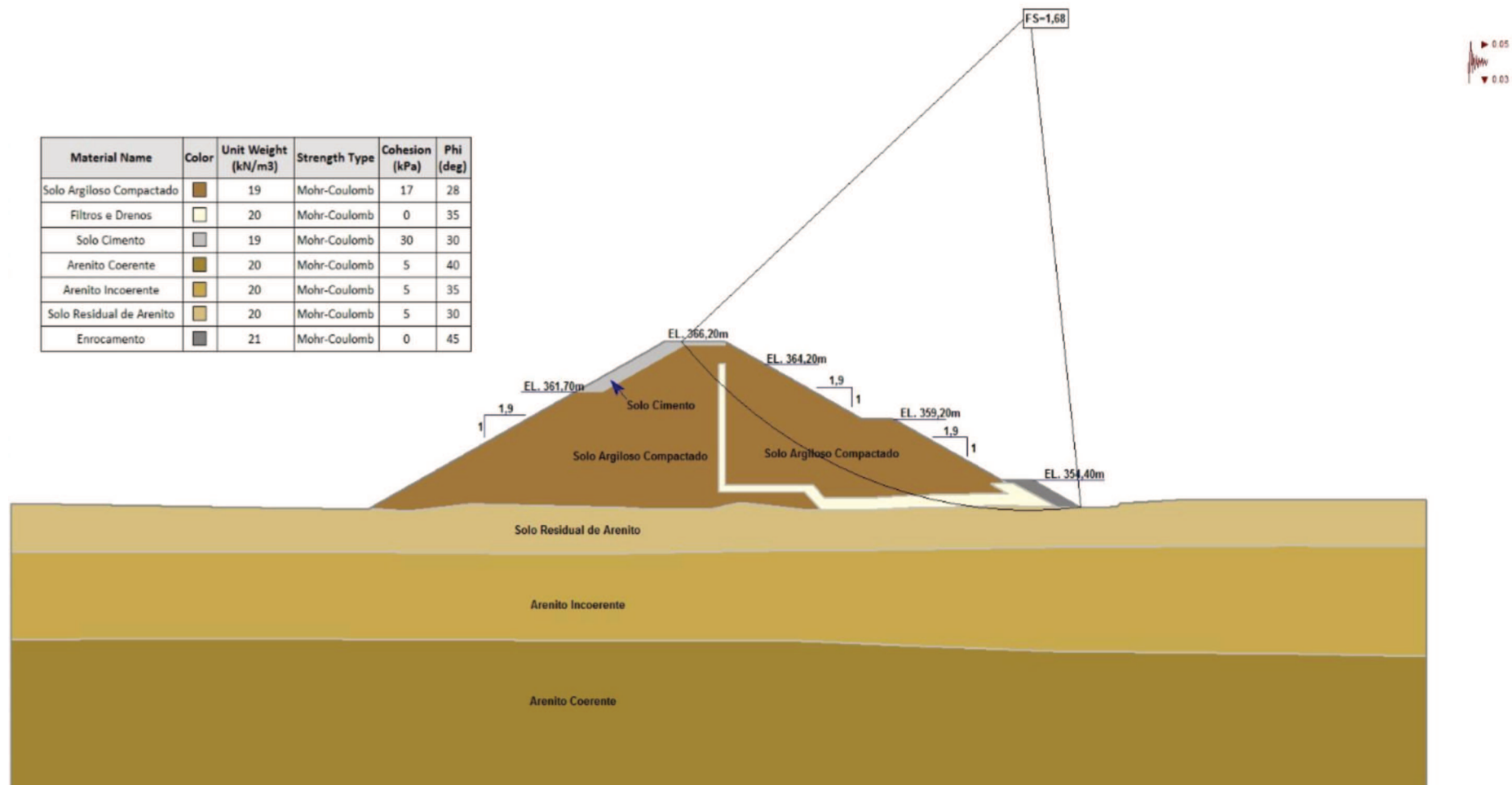
Fonte: do autor

Figura 27 – Est. 7+10,00m – Análise de estabilidade do talude de montante – Final de Construção – Ações Sísmicas



Fonte: do autor

Figura 28 – Est. 7+10,00m – Análise de estabilidade do talude de jusante – Final de Construção – Ações Sísmicas



Fonte: do autor

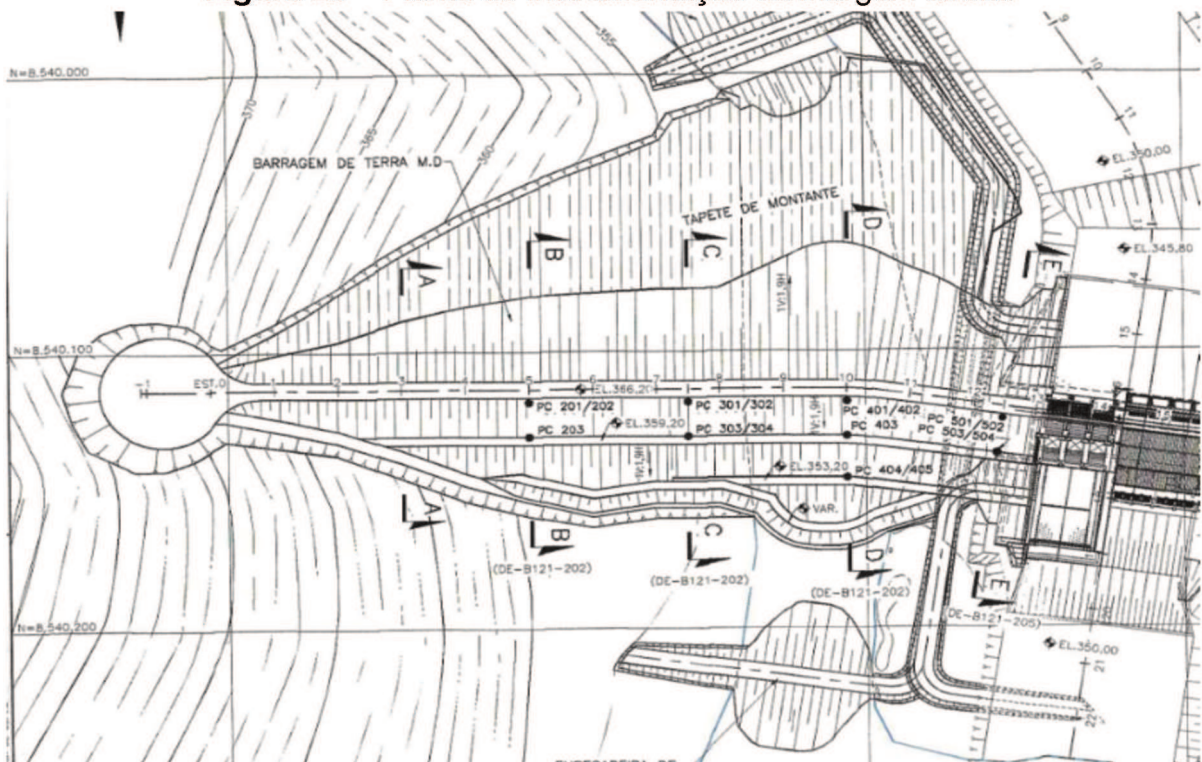
5.2. Dados de Instrumentação

A barragem de terra nas duas margens está sendo monitorada através de piezômetros e de medidores de vazão. Atentando-se à boa fluidez do presente trabalho, optou-se por dividir a apresentação dos resultados conforme a margem da barragem.

5.2.1. Piezometria da margem direita

A barragem de terra da margem direita, de aproximadamente 280 metros de extensão, foi instrumentada em cinco seções transversais (AA, BB, CC, DD e EE), conforme exposto na figura 29. Foram instalados 16 piezômetros, sendo 8 no tapete drenante e 8 na fundação de solo residual ou de arenito coerente, tendo sido instalado também um medidor de vazão. A seção AA foi instrumentada apenas na fase de construção e portanto não será abordada nesse estudo.

Figura 29 – Planta de instrumentação da margem direita



Fonte: SPEC Engenharia

Quadro 12 – Leituras Piezométricas na seção BB – Est. 5+00m.

| PCH ILHA COMPRIDA PIEZOMETRIA Seção BB na Estaca 5+ 00 na margem direita | | | | | | | |
|--|--------------------------|--------|---------------|----------------------|-----------------|------------|-----------------|
| Data | Nível de água (m) | | | Piezômetro | PC-201 | PC-202 | PC-203 |
| | Lago | | Canal de fuga | | | | |
| | N.A. Máx. Normal na cota | | | Nível Normal (m) * | 355,00 | 355,80 | 354,40 |
| | | | | Nível Atenção (m) ** | 359,60 | 358,40 | 356,40 |
| | | | | Nível Alerta (m) ** | 362,60 *** | 362,60 *** | 359,20 *** |
| | | | | Afast. do eixo (m) | 4,50 Jus. | 4,50 Jus. | 16,30 Jus. |
| | | | | Cota Instal. (m) | 354,26 | 350,36 | 352,47 |
| | | | | Cota da boca (m) | 366,89 | 366,89 | 359,87 |
| | | | | Data de instalação | 03/09/2012 | 03/09/2012 | 03/09/2012 |
| | | | | Zona | Tap. Dren. Sup. | Fundação | Tap. Dren. Inf. |
| | 363,70 m | | | | | | |
| 30/01/2015 | 363,90 | 353,52 | 352,78 | | 354,66 | 356,69 | 354,74 |
| 25/02/2015 | 363,93 | 353,35 | 352,75 | | 354,67 | 356,76 | 354,79 |
| 25/03/2015 | 363,90 | 353,40 | 352,58 | | 354,65 | 356,72 | 354,79 |
| 29/04/2015 | 363,90 | 353,40 | 353,07 | | 354,65 | 356,71 | 354,83 |
| 19/5 | 363,94 | 353,51 | 352,76 | | 354,66 | 356,68 | 354,72 |
| 24/06/2015 | 363,80 | 353,41 | 352,82 | | 354,65 | 356,67 | 354,83 |
| 07/07/2015 | 363,85 | 353,40 | 352,83 | | 354,66 | 356,73 | 354,77 |
| 17/08/2015 | 363,92 | 353,41 | 352,52 | | 354,69 | 356,57 | 354,71 |

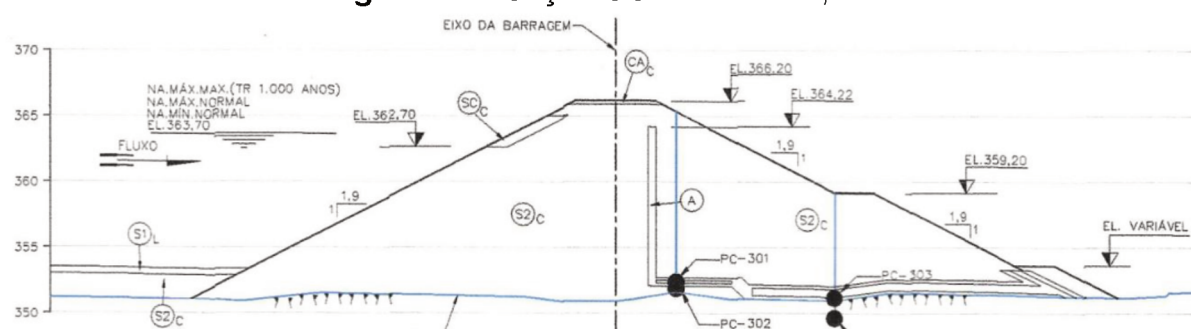
* Nível normal é o nível teórico correspondente à percolação em regime permanente
 ** Níveis de atenção e de alerta revisados pelo Relatório SPEC SPT-IC-E-MA-B-121-201 Rev. 01 de 25 de agosto de 2014
 *** Valores referentes à possível eminência de "piping"
Os valores destacados em vermelho correspondem aos valores máximos atingidos

Fonte: do autor

5.2.1.2. Seção CC na estaca 7+10,00m

A seção CC, posicionada na estaca 7+10,00m da margem direita, foi instrumentada por 4 piezômetros, de PC-301 a PC-304, conforme ilustrado na figura 31.

Figura 31 – Seção CC – Est. 7+10,00m



Fonte: SPEC Engenharia

Um resumo das leituras desses instrumentos consta no quadro 13, cuja análise permite deduzir que, com o lago ligeiramente acima do seu nível máximo

normal, os níveis piezométricos permanecem bem menores que os níveis de atenção.

Quadro 13 – Leituras Piezométricas na seção CC – Est. 7+10,00m

| PCH ILHA COMPRIDA PIEZOMETRIA Seção CC na Estaca 7 + 10 na margem direita | | | | | | | | |
|---|-------------------|----------------|---------------|----------------------|-----------------|------------|-----------------|------------|
| Data | Nível de água (m) | | | Piezômetro | PC-301 | PC-302 | PC-303 | PC-304 |
| | Lago | Lago a jusante | Canal de fuga | | | | | |
| | | | | Nível Normal (m) * | 353,60 | 356,40 | 354,60 | 354,80 |
| | | | | Nível Atenção (m) ** | 358,60 | 358,40 | 356,80 | 356,80 |
| | | | | Nível Alerta (m) ** | 359,40 | 358,80 | 357,20 | 357,20 |
| | N.A. Máx. Normal | | | Afast. do eixo (m) | 4,50 Jus. | 4,50 Jus. | 16,30 Jus. | 16,30 Jus. |
| | 363,70 m | | | Cota Instal. (m) | 352,90 | 348,80 | 352,90 | 348,29 |
| | | | | Cota da boca (m) | 366,20 | 366,20 | 359,87 | 359,78 |
| | | | | Data de instalação | 02/09/2012 | 02/09/2012 | 13/08/2012 | 13/08/2012 |
| | | | | Zona | Tap. Dren. Sup. | Fundação | Tap. Dren. Inf. | Fundação |
| 30/01/2015 | 363,90 | 353,52 | 352,78 | | 353,95 | 352,12 | 354,08 | 354,06 |
| 25/02/2015 | 363,93 | 353,35 | 352,75 | | 354,00 | 352,12 | 354,29 | 354,06 |
| 25/03/2015 | 363,90 | 353,40 | 352,58 | | 353,96 | 352,17 | 354,13 | 354,05 |
| 29/04/2015 | 363,90 | 353,40 | 353,07 | | 353,99 | 353,94 | 354,12 | 354,00 |
| 19/5 | 363,94 | 353,51 | 352,76 | | 353,98 | 353,13 | 354,08 | 353,96 |
| 24/06/2015 | 363,80 | 353,41 | 352,82 | | 353,99 | 353,98 | 354,07 | 354,03 |
| 07/07/2015 | 363,85 | 353,40 | 352,83 | | 354,02 | 353,94 | 354,12 | 354,00 |
| 17/08/2015 | 363,92 | 353,41 | 352,52 | | 354,24 | 354,00 | 353,97 | 353,93 |

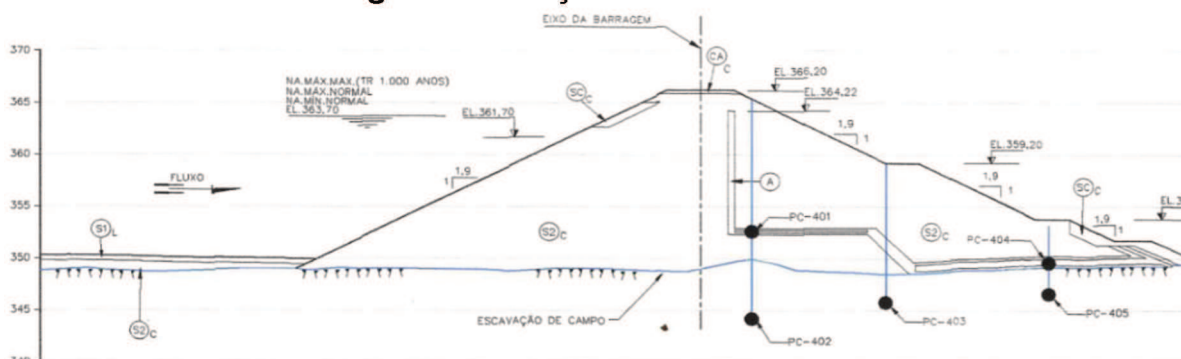
* Nível normal é o nível teórico correspondente à percolação em regime permanente
 ** Níveis de atenção e de alerta revisados pelo Relatório SPEC SPT-IC-E-MA-B-121-201 Rev. 01 de 25 de agosto de 2014
 Os valores destacados em vermelho correspondem aos valores máximos atingidos

Fonte: do autor

5.2.1.3. Seção DD na estaca 10+00m

A seção DD, posicionada na estaca 10+00m da margem direita, foi instrumentada por 5 piezômetros, de PC-401 a PC-405, conforme ilustrado na figura 32.

Figura 32 – Seção DD – Est. 10+00m



Fonte: SPEC Engenharia

Um resumo das leituras desses instrumentos consta na quadro 14, cuja análise permite deduzir que, com o lago ligeiramente acima do seu nível máximo normal, os níveis piezométricos permanecem bem menores que os níveis de atenção.

Quadro 14 – Leituras Piezométricas na seção DD – Est. 10+00m

| PCH ILHA COMPRIDA PIEZOMETRIA Seção D-D na Estaca 10 na margem direita | | | | | | | | | |
|--|-------------------|----------------|---------------|----------------------|---------------------|---------------|---------------|---------------------|---------------|
| Data | Nível de água (m) | | | Piezômetro | PC-401 | PC-402 | PC-403 | PC-404 | PC-405 |
| | Lago | Lago a jusante | Canal de fuga | | | | | | |
| N.A. Máx. Normal na cota 363,70 m | | | | Nível Normal (m) * | 353,60 | 357,20 | 355,00 | 353,80 | 354,00 |
| | | | | Nível Atenção (m) ** | 359,80 | 358,20 | 356,60 | 354,60 | 354,80 |
| | | | | Nível Alerta (m) ** | 362,20 *** | 362,20 *** | 358,10 *** | 356,00 *** | 356,00 *** |
| | | | | Afast. do eixo (m) | 4,50 Jus. | 4,50 Jus. | 18,30 Jus. | 30,70 Jus. | 30,70 Jus. |
| | | | | Cota Instal. (m) | 352,30 | 347,25 | 345,78 | 349,99 | 346,50 |
| | | | | Cota da boca (m) | 366,83 | 366,83 | 360,23 | 354,50 | 354,50 |
| | | | | Data de instalação | 02/08/2012 | 02/08/2012 | 13/08/2012 | 16/08/2012 | 16/08/2012 |
| | | | | Zona | Tap. Dren. Superior | Fundação | Fundação | Tap. Dren. Inferior | Fundação |
| 30/01/2015 | 363,90 | 353,52 | 352,78 | | 353,34 | 355,54 | 354,21 | 353,49 | 353,58 |
| 25/02/2015 | 363,93 | 353,35 | 352,75 | | 353,42 | 355,63 | 354,13 | 353,49 | 353,63 |
| 25/03/2015 | 363,90 | 353,40 | 352,58 | | 353,27 | 355,65 | 353,98 | 353,47 | 353,55 |
| 29/04/2015 | 363,90 | 353,40 | 353,07 | | 353,36 | 355,57 | 354,05 | 353,47 | 353,60 |
| 19/05/2015 | 363,94 | 353,51 | 352,76 | | 353,59 | 355,05 | 353,98 | 353,40 | 353,50 |
| 24/06/2015 | 363,80 | 353,41 | 352,82 | | 353,24 | 355,56 | 354,05 | 353,51 | 353,61 |
| 07/07/2015 | 363,85 | 353,40 | 352,83 | | 353,27 | 355,59 | 354,02 | 353,53 | 353,60 |
| 17/08/2015 | 363,92 | 353,41 | 352,52 | | 353,59 | 355,41 | 353,86 | 353,39 | 353,48 |

* Nível normal é o nível teórico correspondente à percolação em regime permanente
 ** Níveis de atenção e de alerta revisados pelo Relatório SPEC SPT-IC-E-MA-B-121-201 Rev. 01 de 25 de agosto de 2014
 *** Valores referentes à possível eminência de "piping"
Os valores destacados em vermelho correspondem aos valores máximos atingidos

Fonte: do autor

5.2.1.4. Seção EE na estaca 12+6,00m

A seção EE, posicionada na estaca 12+6,00m da barragem da margem direita, foi instrumentada por 4 piezômetros, de PC-501 a PC-504, conforme ilustrado pela figura 33.

junho de 2015 (únicos dados fornecidos), a vazão medida se manteve constante em torno de 4 l/s, permanecendo acima do valor de 3l/s, usualmente observado em barragens como as de Jurumirim e Rosana, que servem de referência para análise nesse caso.

Figura 34 – Tubos de deságue da barragem na margem direita

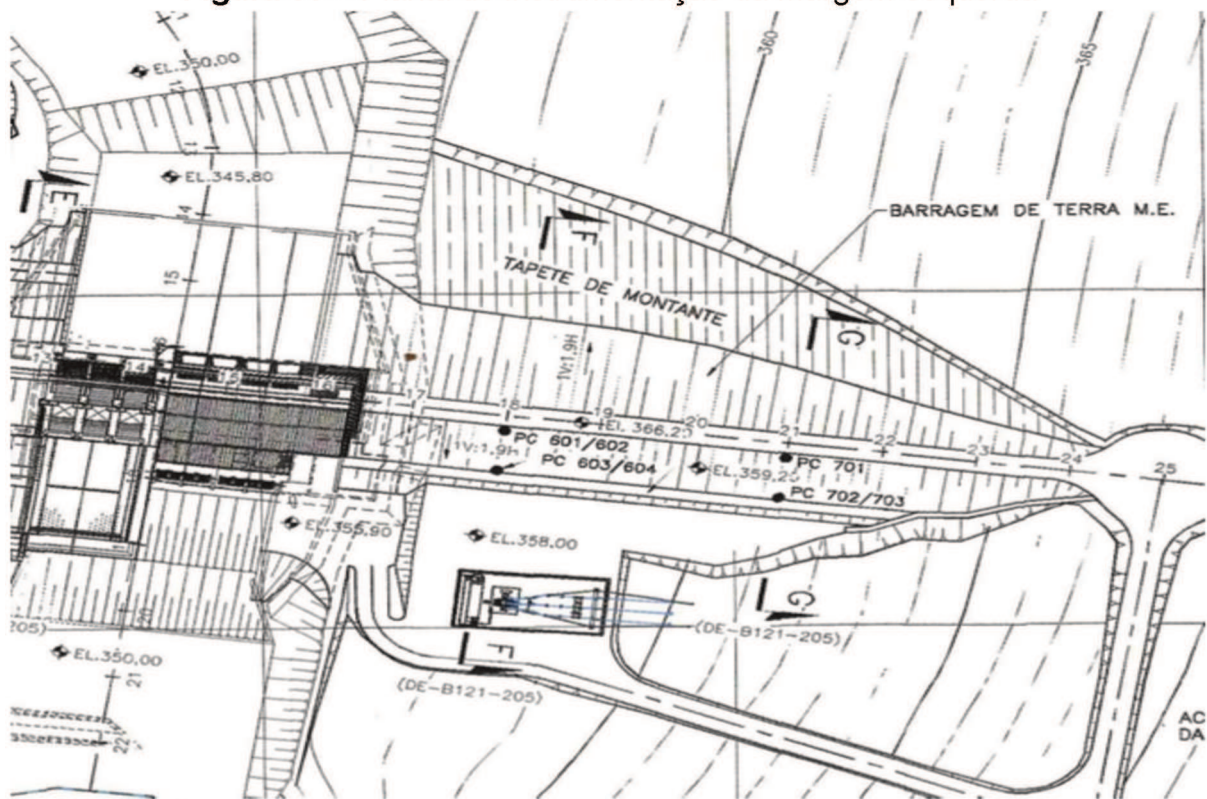


Fonte: do autor

5.2.2. Piezometria da margem esquerda

A barragem de terra da margem esquerda, de aproximadamente 190 metros de extensão, foi instrumentada em duas seções transversais (FF e GG), conforme ilustrado na figura 35. Foram instalados 19 piezômetros, sendo 9 no tapete drenante, 8 na fundação de solo residual e 2 no aterro argiloso compactado. Desses, apenas 7 piezômetros ainda estão em funcionamento.

Figura 35 – Planta de instrumentação da margem esquerda

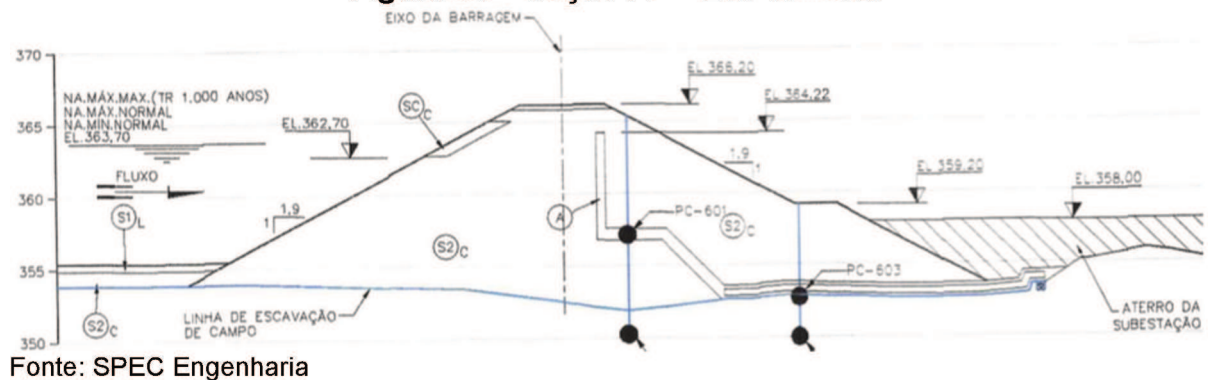


Fonte: SPEC Engenharia

5.2.2.1. Seção FF na estaca 18+00m

A seção FF, posicionada na estaca 18+00m na margem esquerda, foi instrumentada por quatro piezômetros, de PC-601 a PC-604, posicionados conforme ilustrado pela figura 36.

Figura 36 – Seção FF – Est. 18+00m



Fonte: SPEC Engenharia

Tal qual observado nas leituras feitas na margem direita, observa-se, através do quadro 16, que os níveis piezométricos permanecem bem menores que os níveis de atenção estipulados.

Quadro 16 – Leituras Piezométricas na seção FF – Est. 18+00m

| PCH ILHA COMPRIDA PIEZOMETRIA Seção FF na Estaca 18 na margem esquerda | | | | | | | | |
|--|--------------------------|----------------|---------------|------------------------|---------------------|------------------|---------------------|------------------|
| Data | Nível de água (m) | | | Piezômetro | PC-601 | PC-602 | PC-603 | PC-604 |
| | Lago | Lago a jusante | Canal de fuga | Nível Normal (m) * | 357,60 | 356,40 | 353,80 | 354,00 |
| | | | | Nível Atenção (m) ** | 360,20 | 358,80 | 356,60 | 356,60 |
| | | | | Nível de Alerta (m) ** | 362,90 | 362,90 | 359,20 | 359,20 |
| | N.A. Máx. Normal na cota | | | Afast. do eixo (m) | 4,50 Jus. | 4,50 Jus. | 16,50 Jus. | 16,50 Jus. |
| | 363,70 m | | | Cota Instal. (m) | 357,55 | 350,50 | 352,89 | 350,00 |
| | | | | Cota da boca (m) | 366,83 | 366,83 | 359,76 | 359,76 |
| | | | | Data de instalação | 26/09/2011 | 26/09/2011 | 14/05/2012 | 14/05/2012 |
| | | | | Zona | Tap. Dren. Superior | Arenito Coerente | Tap. Dren. Inferior | Arenito Coerente |
| 30/01/2015 | 363,90 | 353,52 | 352,78 | | Seco | 357,02 | 355,06 | 355,58 |
| 25/02/2015 | 363,93 | 353,35 | 352,75 | | Seco | 357,01 | Seco | 355,59 |
| 25/03/2015 | 363,90 | 353,40 | 352,58 | | Seco | 357,18 | 355,11 | 355,61 |
| 29/04/2015 | 363,90 | 353,40 | 353,07 | | Seco | ND | Seco | 355,56 |
| 19/05/2015 | 363,94 | 353,51 | 352,76 | | Seco | ND | 355,48 | 354,96 |
| 24/06/2015 | 363,80 | 353,41 | 352,82 | | Seco | 357,17 | 355,63 | 355,00 |
| 07/07/2015 | 363,85 | 353,40 | 352,83 | | Seco | 356,96 | 355,56 | 354,98 |
| 17/08/2015 | 363,92 | 353,41 | 352,52 | | Seco | 356,87 | 355,40 | 354,91 |

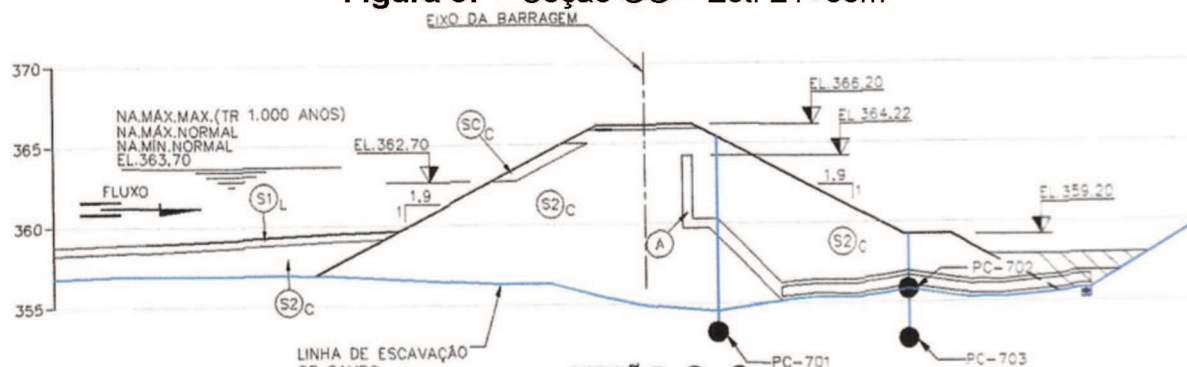
* Nível normal é o nível teórico correspondente à percolação em regime permanente
 ** Níveis de atenção e de alerta revisados pelo Relatório SPEC SPT-IC-E-MA-B-121-201 Rev. 01 de 25 de agosto de 2014
Os valores destacados em vermelho correspondem aos valores máximos atingidos

fonte: do autor

5.2.2.2. Seção GG na estaca 21+00m

A seção GG, posicionada na estaca 21+00m da barragem da margem esquerda, foi instrumentada por três piezômetros, de PC-701 a PC-703, posicionados conforme ilustrado pela figura 37.

Figura 37 – Seção GG – Est. 21+00m



Fonte: SPEC engenharia

Segue no quadro 17 um apanhado de resultados de leituras piezométricas, observando que os mesmos são substancialmente menores que o nível de atenção.

Quadro 17 – Leituras Piezométricas na seção GG – Est. 21+00m

| PCH ILHA COMPRIDA PIEZOMETRIA Seção GG na Estaca 21 na margem esquerda | | | | | | | |
|--|--------------------------|-----------------|---------------|----------------------|---------------|-----------------|---------------|
| Data | Nível de água (m) | | | Piezômetro | PC-701 | PC-702 | PC-703 |
| | Lago | Lagoa a jusante | Canal de fuga | Nível Normal (m) * | 358,20 | 356,70 | 356,70 |
| | | | | Nível Atenção (m) ** | 359,90 | | |
| | N.A. Máx. Normal na cota | | | Nível Alerta (m) ** | 362,90 *** | 359,20 *** | 359,20 *** |
| | | | | Afast. do eixo (m) | 4,50 m Jus. | 16,50 m Jus. | 16,50 m Jus. |
| | | | | Cota Instal. (m) | 353,10 | 355,82 | 352,50 |
| | | | | Cota da boca (m) | 367,00 | 360,27 | 360,27 |
| | | | | Data de instalação | 26/09/2011 | 14/05/2012 | |
| | | | | Zona | Solo Residual | Tap. Dren. Inf. | Solo Residual |
| 30/01/2015 | 363,90 | 353,52 | 352,78 | | 358,02 | 355,97 | 357,63 |
| 25/02/2015 | 363,93 | 353,35 | 352,75 | | 358,05 | 355,98 | 357,64 |
| 25/03/2015 | 363,90 | 353,40 | 352,58 | | 357,99 | Seco | 357,59 |
| 29/04/2015 | 363,90 | 353,40 | 353,07 | | 358,03 | 355,97 | 357,57 |
| 19/05/2015 | 363,94 | 353,51 | 352,76 | | 358,05 | 356,69 | 357,61 |
| 24/06/2015 | 363,80 | 353,41 | 352,82 | | 357,98 | 355,90 | 357,60 |
| 07/07/2015 | 363,85 | 353,40 | 352,83 | | 358,01 | 355,96 | 357,54 |
| 17/08/2015 | 363,92 | 353,41 | 352,52 | | 358,01 | 355,95 | 357,51 |

* Nível normal é o nível teórico correspondente à percolação em regime permanente
 ** Níveis de atenção e de alerta revisados pelo Relatório SPECT-IC-E-MA-B-121-201 Rev. 01 de 25 de agosto de 2014
 *** Valores referentes à possível eminência de "piping"
Os valores destacados em vermelho correspondem aos valores máximos atingidos

Fonte: do autor

5.2.2.3. Medidor de Vazão

Diferente do observado na margem direita, nessa margem há um medidor de vazão instalado, em conformidade com o especificado em projeto. O mesmo se localiza entre as estacas 16+10m e 24+00m. A vazão medida nos primeiros 8 meses de 2015 foi de 10 l/s, menor que a vazão de atenção de 17,5 l/s, especificada em projeto. Tal valor corresponde a uma vazão específica de 4 l/min/m (4 litros por minuto por metro linear da barragem), que é um valor elevado se comparado com o valor médio de 1 l/min/m, observado na grande maioria das barragens de terra construídas no Brasil, segundo Cruz (1996).

Entre os meses de maio e junho uma vazão extremamente elevada, da ordem de 25 l/s foi observada, estando praticamente equivalente à vazão de alerta fixada pelo projeto de 26 l/s.

A figura 38 ilustra o local onde está instalado o medidor de vazão em questão.

Figura 38 - Medidor de Vazão MV-01

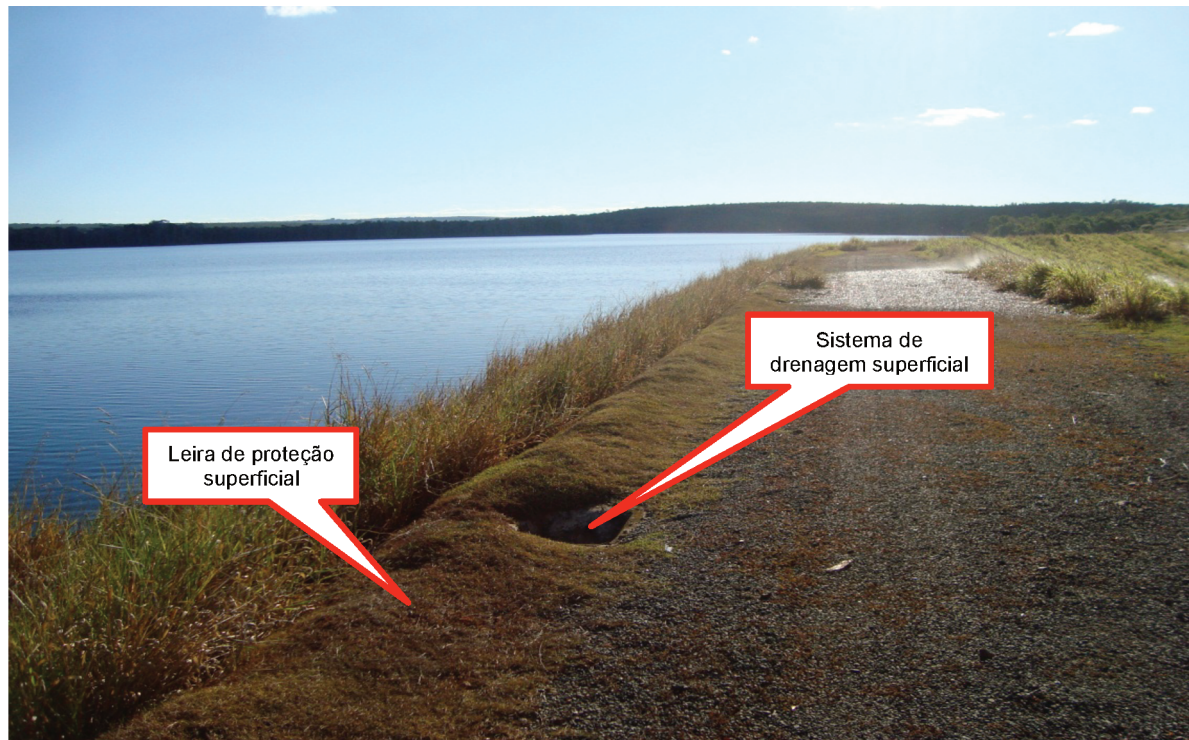
Fonte: do autor

5.3. Inspeção Visual

A etapa de análise visual do empreendimento é de grande importância para diagnóstico do bom funcionamento da barragem. Mesmo que a primeira vista pareça contra científico, ainda hoje esse método é considerado um dos mais importantes na aferição de aceitação da operação de um barramento.

5.3.1. Crista da Barragem

A inspeção da crista da barragem de terra (cota 366,20m), nas duas margens, permitiu observar a ausência de qualquer tipo de fissura, sendo que a superfície dessa crista apresenta uma aparência adequada e isenta de depressões, com leiras de proteção superficial bem conservadas, conforme mostrado na figura 39. A drenagem superficial é proporcionada por uma leve declividade transversal para montante, sendo que as águas pluviais são coletadas e evacuadas por tubulações plásticas.

Figura 39 – Crista da Barragem

Fonte: do autor

5.3.2. Talude de Montante da Barragem

Quase 4 anos após o fim do primeiro represamento, o talude de montante encontra-se em excelente estado de conservação, sem presença de fissuras ou erosões. Isso se deve ao fato de que o solo cimento, presente entre as cotas de 362,70m e 365,20m, apresenta-se em boas condições, bem como o revestimento vegetal, presente no metro superior. Tais constatações podem ser observadas na figura 40.

Figura 40 – Detalhe do talude de montante com o solo-cimento submerso



Fonte: do autor

5.3.3. Talude de Jusante da Barragem

Tal qual o talude de montante, nenhuma fissura ou depressão foi identificada. A vegetação da mesma encontra-se em bom estado de conservação. Tais constatações podem ser observadas na figura 41.

Figura 41 – Talude de Jusante com cobertura vegetal.



Fonte: do autor

5.3.4. Infiltrações na Ombreira Direita

Existem infiltrações notáveis ao longo da base da ombreira direita, conforme ilustrado pela figura 42.

Figura 42 – Infiltrações na base da ombreira direita



Fonte: do autor

Essas infiltrações estão ocorrendo nas proximidades da Estaca 5+00m, sendo que em leitura recente do piezômetro PC-203, o valor medido foi bem abaixo do nível de atenção (cerca de 2,0 metro menor), indicando que a segurança da barragem não é afetada.

6. CONCLUSÕES

De forma geral, é plausível afirmar que os objetivos, pretendidos ao elaborar esse trabalho, foram atingidos de forma satisfatória.

Foi possível, ainda que de forma resumida, descrever uma barragem de terra e seus mecanismos de controle da percolação de água, fazendo uso de um estudo de caso da PCH Ilha Comprida.

Através do *software* Slide®, da empresa Rocscience, foi possível modelar geomecanicamente a barragem de Ilha Comprida, bem como sua fundação, lançando-se mão, para isso, de estudos de sondagens e ensaios laboratoriais realizados pela empresa projetista, os quais permitiram a obtenção dos dados de entrada necessários (Peso específico, ângulo de atrito, coesão, etc.) para a análise computacional dos fatores de segurança desse barramento.

Os fatores de segurança obtidos foram considerados satisfatórios, pelo fato de se apresentarem sempre superior ao limite mínimo indicado por Eletrobrás (2003), mesmo no caso mais crítico, em que eventos sísmicos são considerados.

A interpretação dos dados de auscultação também constitui parte fundamental para se avaliar a segurança de uma barragem de terra, sendo imprescindível que o monitoramento dos instrumentos seja feito de forma ininterrupta ao longo da vida útil do empreendimento.

Os dados de monitoramento das duas margens da barragem de Ilha Comprida, compostos pela leitura de piezômetros e medidores de vazão, permitem concluir que a mesma possui desempenho plenamente satisfatório.

As leituras piezométricas todas bem abaixo dos níveis de atenção e alerta.

As vazões de percolação são bastante elevadas, se comparado com os dados de outras barragens de terra, mas a ausência de soerguimentos na fundação - ausência essa indicada pela inspeção visual - representa um elemento favorável à estabilidade dos taludes da barragem.

A inspeção visual é de importância ímpar para que o bom desempenho de uma barragem possa ser aferido, possuindo extrema importância no controle pós-obra de um barramento.

Durante visita à PCH de Ilha Comprida, observou-se que, de maneira geral, as estruturas de terra, tanto na margem direita quanto na margem esquerda,

apresentam boas condições aparentes. Não foram identificadas trincas, erosões, soerguimentos, depressões e a vegetação encobre ambos os taludes de forma satisfatória. Há, no entanto, a presença de infiltrações moderadas, numa área superior a 100 m², no pé do talude e que merecem especial atenção, embora não indiquem (utilizando-se de leituras piezométricas do local) ser parte de um prognóstico mais sério.

Por fim, é possível concluir que o desempenho da barragem de terra da PCH Ilha Comprida é bem satisfatório, conforme atestado pelo relatório da ANEEL (2012) em anexo, não apresentando, ao longo dos 3 anos desde o término das obras, nenhuma condição que inspirasse grandes preocupações. As leituras da instrumentação a qual esse estudo teve acesso, bem como a inspeção visual *in loco*, sustentam essa conclusão.

7. SUGESTÕES

Para que o presente trabalho seja aprimorado no futuro, são apresentadas as seguintes sugestões para estudos vindouros:

- Fazer a análise computacional considerando outros planos de rupturas e/ou um conjunto dos mesmos;
- Utilizar outros modelos de cálculo, que não o “Simple”;
- Instalar medidor de vazão na fundação do barramento, permitindo assim saber quanto cada parte contribui para a vazão total;
- Analisar os critérios de dimensionamento adotados para escolha do sistema de drenagem aqui apresentado;
- Incluir as estruturas de concreto, como vertedouro e casa de força, na análise de desempenho;
- Buscar dados mais recentes de leitura piezométrica e de medição de vazão.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Capacidade de Geração do Brasil**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm> Acesso em 28 de out. 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Relatório de Inspeção da PCH Ilha Comprida**. Brasília. 2012. pg 5-11

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13028: Mineração - Elaboração e Apresentação de Projeto de Barragens para Disposição de Rejeitos, Contenção de Sedimentos e Reservação de Água**. Rio de Janeiro, 2006. 6 p.

ASSIS, A. P. **Apostilas de Barragens**. Brasília: Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2003.

BORINELLI, J, B. **Análise de Desempenho da Barragem de Enrocamento com Face de Concreto da UHE Barra Grande**. 2012. 111 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2012.

CBDB – COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. **A história das barragens no Brasil, Séculos XIX, XX e XXI: cinquenta anos do Comitê Brasileiro de Barragens**. Rio de Janeiro: CBDB, 2011. 524p.

CRUZ, P. T. **100 Barragens Brasileiras: Casos históricos, materiais de construção e projeto**. Oficina de Textos, São Paulo, 1996. 648p.

CRUZ, P. T.; FREITAS JR, M. S.; PASTORE, E. L. **Fundações de Barragens e Estruturas em Arenitos: Natureza dos Maciços e Controle de Fluxo e Erosões.** In: XXX SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 2015.

DE MELLO, V. F. B. **Some Lessons from unsuspected, real and fictitious problems in Earth dams engineering in Brazil,** In: SIXTH REGIONAL CONFERENCE FOR AFRICA ON SOIL MECHANICS & FOUNDATIONS ENGINEERING DURBAN, South Africa, 1975.

ELETROBRÁS – CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS S.A. **Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas.** Brasília, 2003. 279f.

FERREIRA, A. J. M. **Codes for Finite Elements Analysis.** 2012. Porto, Portugal.

HISTORY CHANNEL. **Hoover Dam - Facts.** Disponível em: <<http://www.history.com/topics/hoover-dam>> Acesso em 26 de out. 2015.

MASSAD, F. **Obras de Terra: Curso Básico de Geotecnia.** São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 216 p.

MANO, V. G. T. **Estudos Geológicos e geotécnicos das discontinuidades rochosas, “pillow lavas” e paleocanal nos basaltos de fundação da barragem de Nova Avanhandava, rio Tietê (SP).** 1987. 96f. Dissertação (Mestrado em Geologia – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

MARTINS, W. C.; DUTRA, E. **Vertedores.** 2013. 12f. Belo Horizonte: Grupo Vertedor – Pontifícia Universidade de Minas Gerais.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL (ex: Ministério do Interior, 1972a). **Manual de Segurança e Inspeção de Barragens.** Brasília, 2002. 148 p.

OLIVEIRA, A. M. D. S.; BRITO, S. N. A. **Geologia de Engenharia.** São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 2009. 587 p.

PASTORE, E. L.; FORTES, R.M. **Caracterização e classificação de solos**. In: Oliveira, A.M.& Brito, S. Geologia de Engenharia. ABGE. São Paulo, 1998.

ROCSCIENCE. **Slope Stability. Verification Manual**. 2015. Disponível em: <https://www.rocscience.com/help/slide/webhelp/pdf_files/verification/Slide_SlopeStabilityVerification_Part1.pdf> Acesso em 18 de maio de 2016.

ROSA, A. A. C.; HENDERSON, R. C. e ANDERS, C. E. **Construção de Drenos e Transições**. Simpósio Sobre a Geotecnia da Bacia do Alto Paraná. 1983. fls. 95-112.

SAYÃO, A. **Notas de aula da disciplina de Barragens de Terra e Enrocamento**. Curso de Mestrado da PUC -RJ, Rio de Janeiro, 2009.

SEGREDO ENERGIA S/A. **Relatório Fotográfico – PCH Ilha Comprida**. Cuiabá, 2012. 52p.

SHERARD, J. L. **Sinkholes in Dams of Coarse, Broadly Graded Soils**, ICOLD, 13º. New Delhi. India, 1979.

SHERARD, J. L., DUNNIGAN, L. P. & TALBOT, J.R. **Basic properties of sand and gravel filters**. 1984a. J. Geot. Eng. 110(6): 684-700.

SILVEIRA, J. F. A. **Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e Enrocamento**. São Paulo: Oficina de Textos. 2006.

SOUZA, L. N. **Avaliação do Comportamento da Fundação de Barragens em Rocha Arenítica – Estudo de casos da Barragem Jaburu I – FTZ- 2013**.

DE SOUZA, M, M. **Estudo para Projeto Geotécnico da Barragem de Alto Irani, SC**. 2013. 1129 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2013.

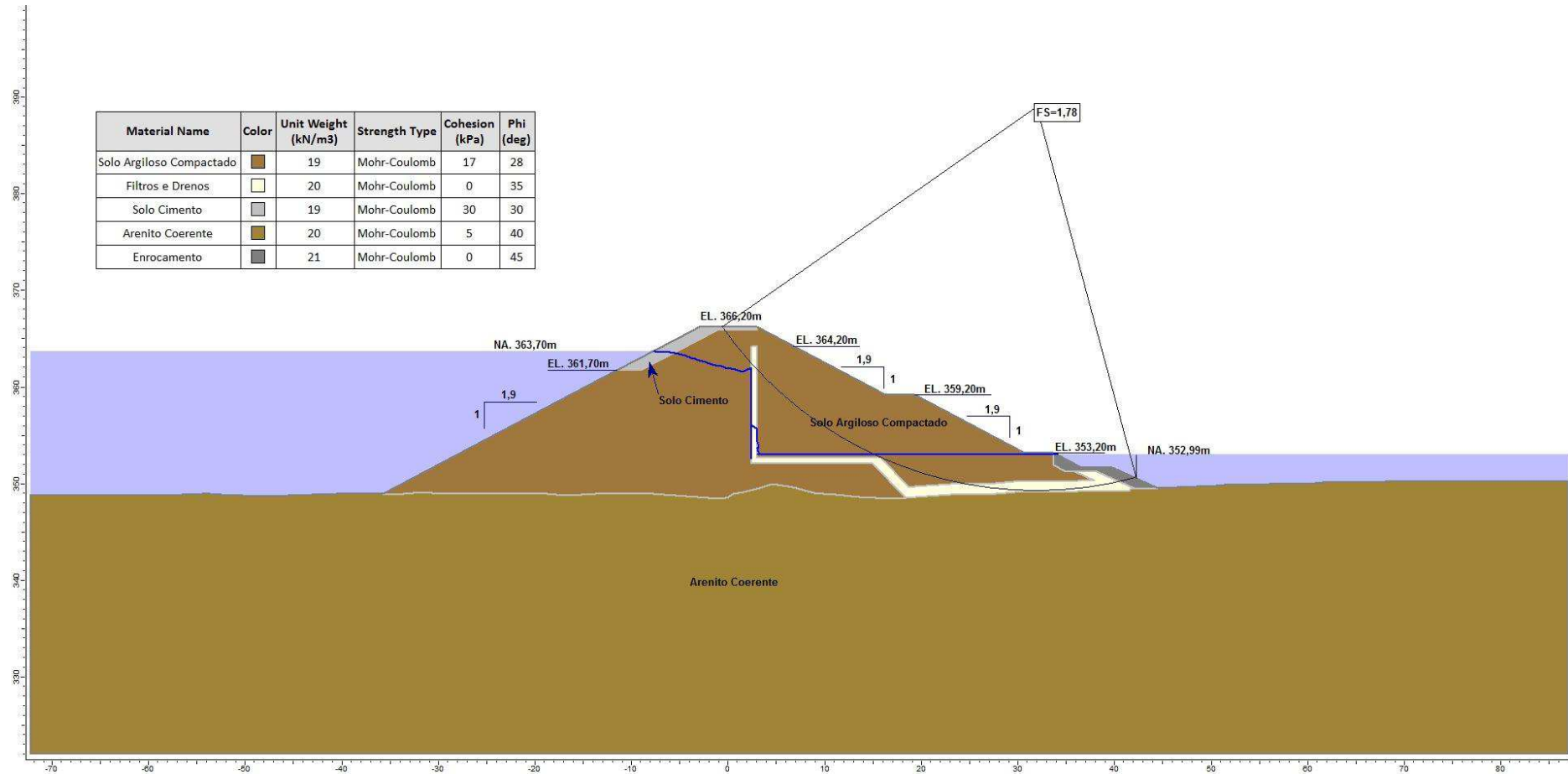
SPEC ENGENHARIA. **Barragem de Terra – Dimensionamento do Sistema de Drenagem Interna e Estudos de Estabilidade dos Taludes**. Belo Horizonte, 2013. 52f.

SPENCER, E. **A Method of Analysis of the Stability of Embankments Assuming Parallel Inter-Slice Forces**. 1967. Géotechnique, Vol. 17. p 11-26.

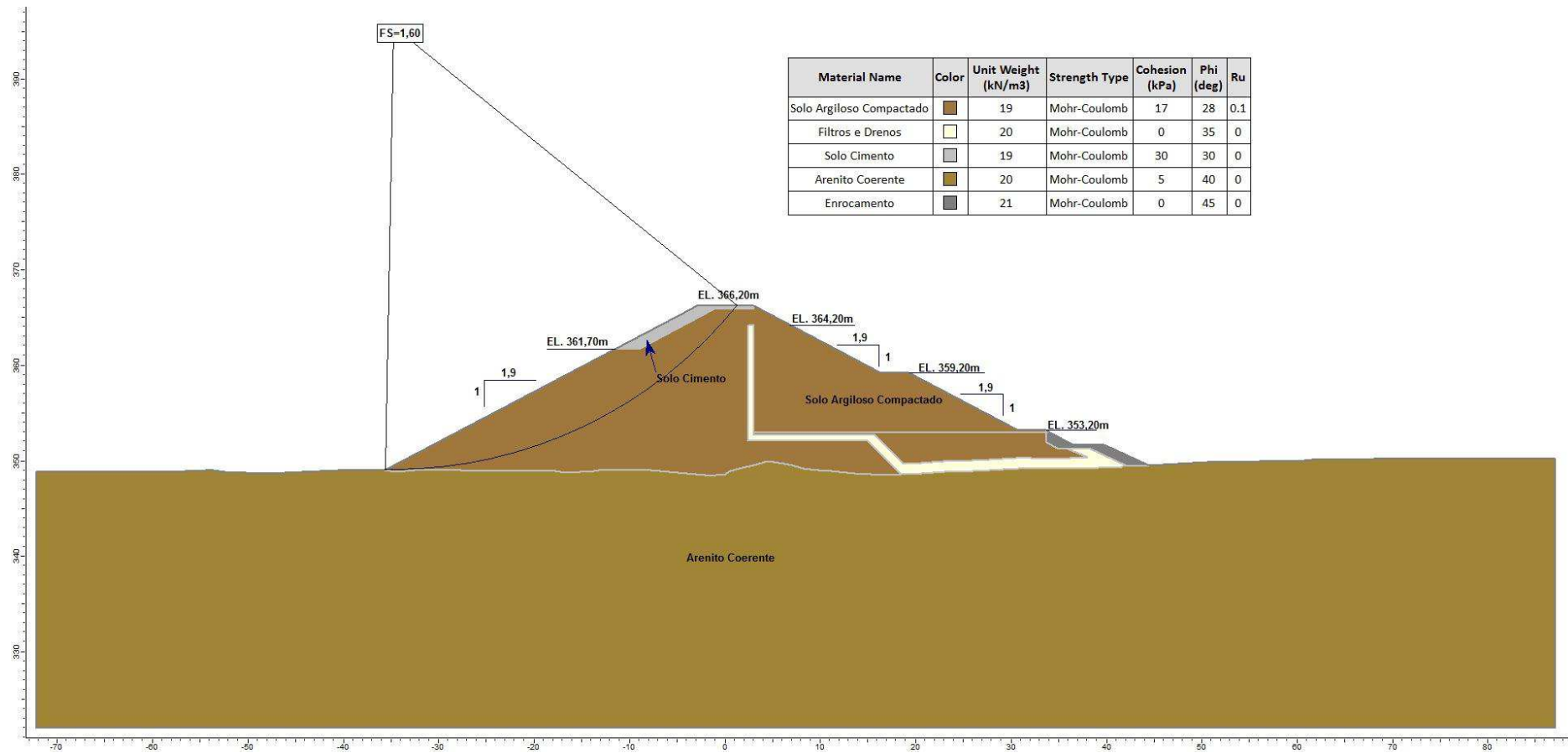
TERZAGHI, K. & FRÖHLICH, O.K. **Theorie der Setzungen von Tonschichten: Eine Einführung in die analytische Tonmechanik**. 1936. Deuticke, Leipzig.

WORLD COMISSION ON DAMS (WCD). 2000. **Dams and Development – A New Framework for Decision-Making**. Disponível em: <http://www.unep.org/dams/WCD/report/WCD_DAMS%20report.pdf> Acesso em 29 de out. 2015.

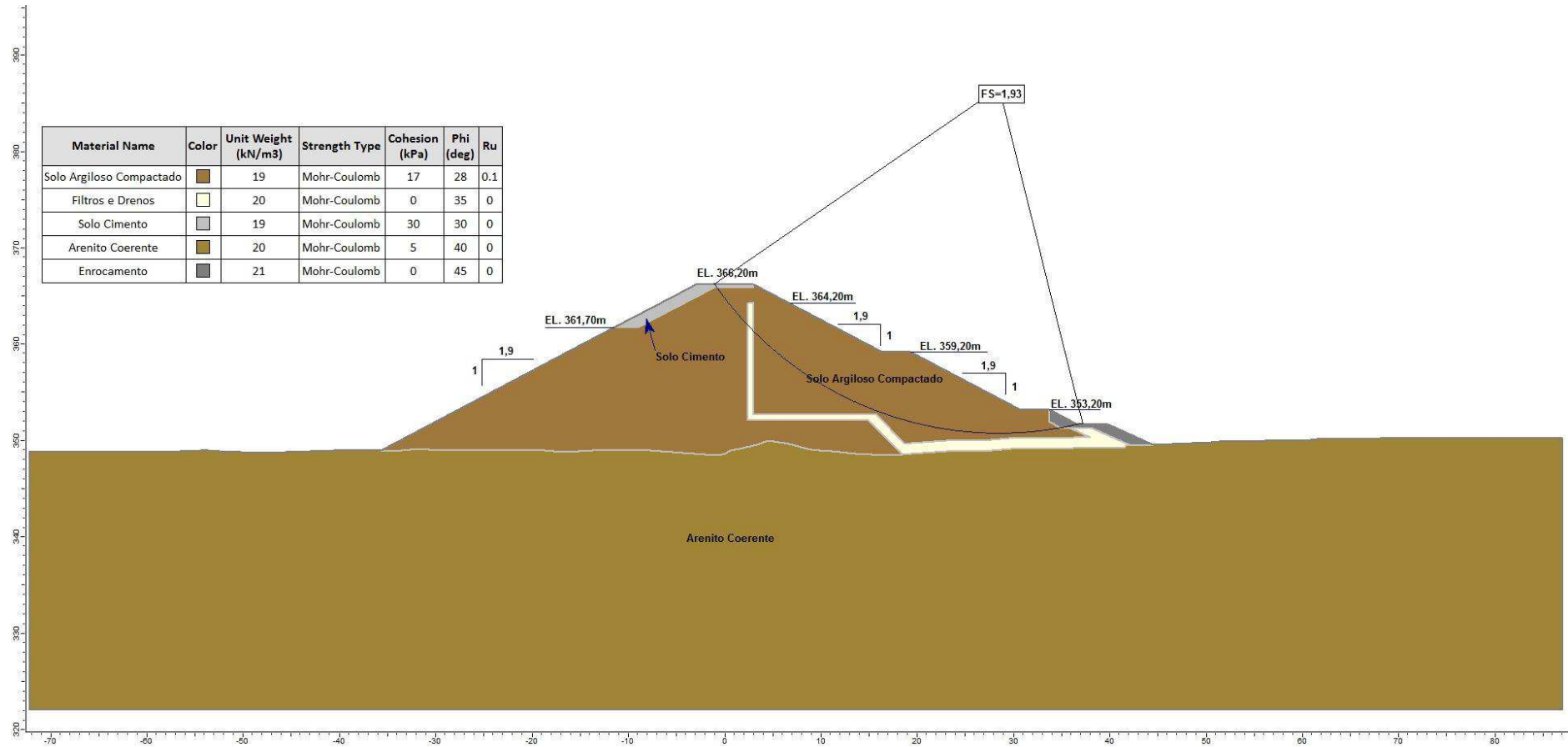
APÊNDICES



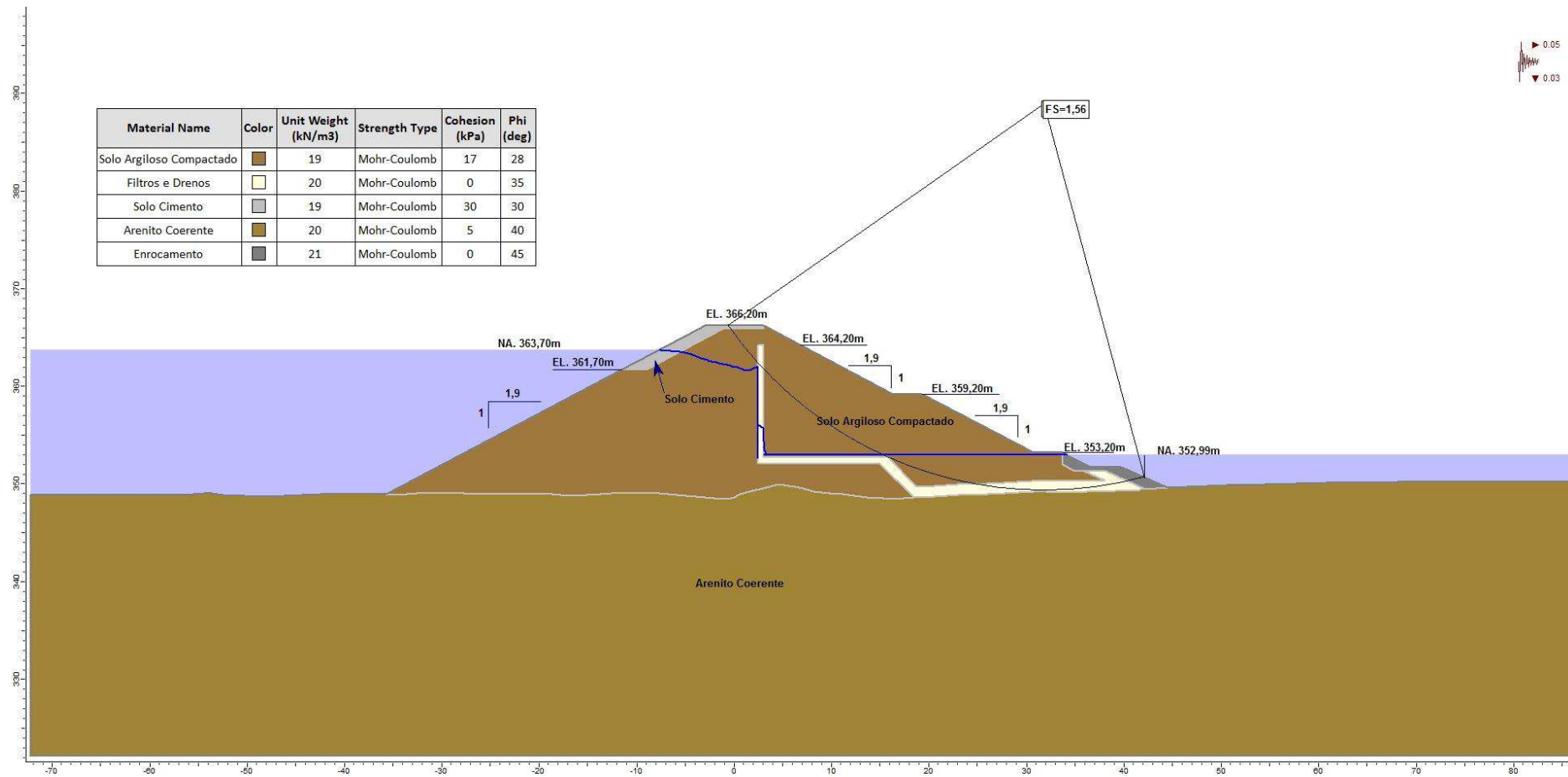
Est. 10+0,00m – Análise de estabilidade do talude de jusante – regime permanente



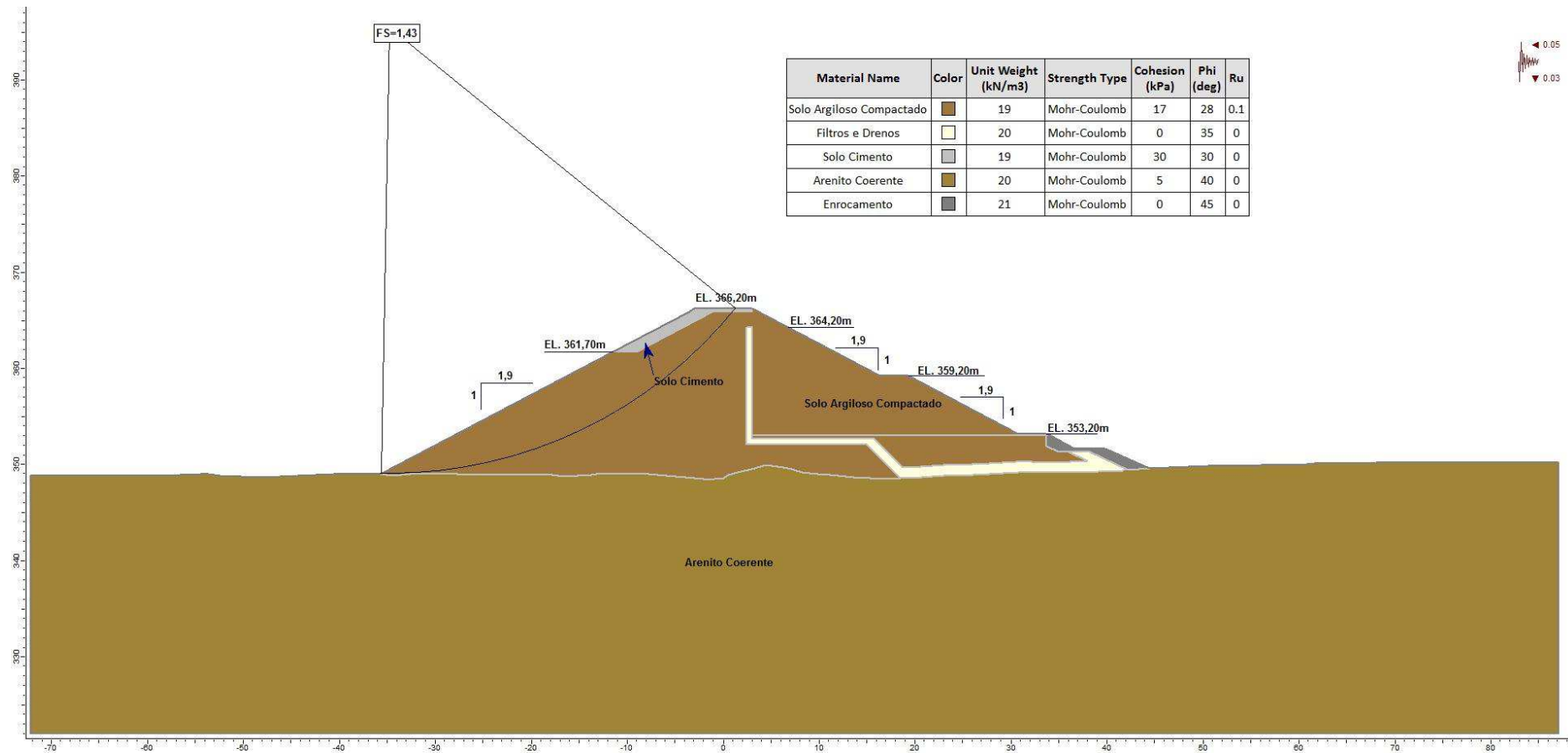
Est. 10+0,00m – Análise de estabilidade do talude de montante – final de construção



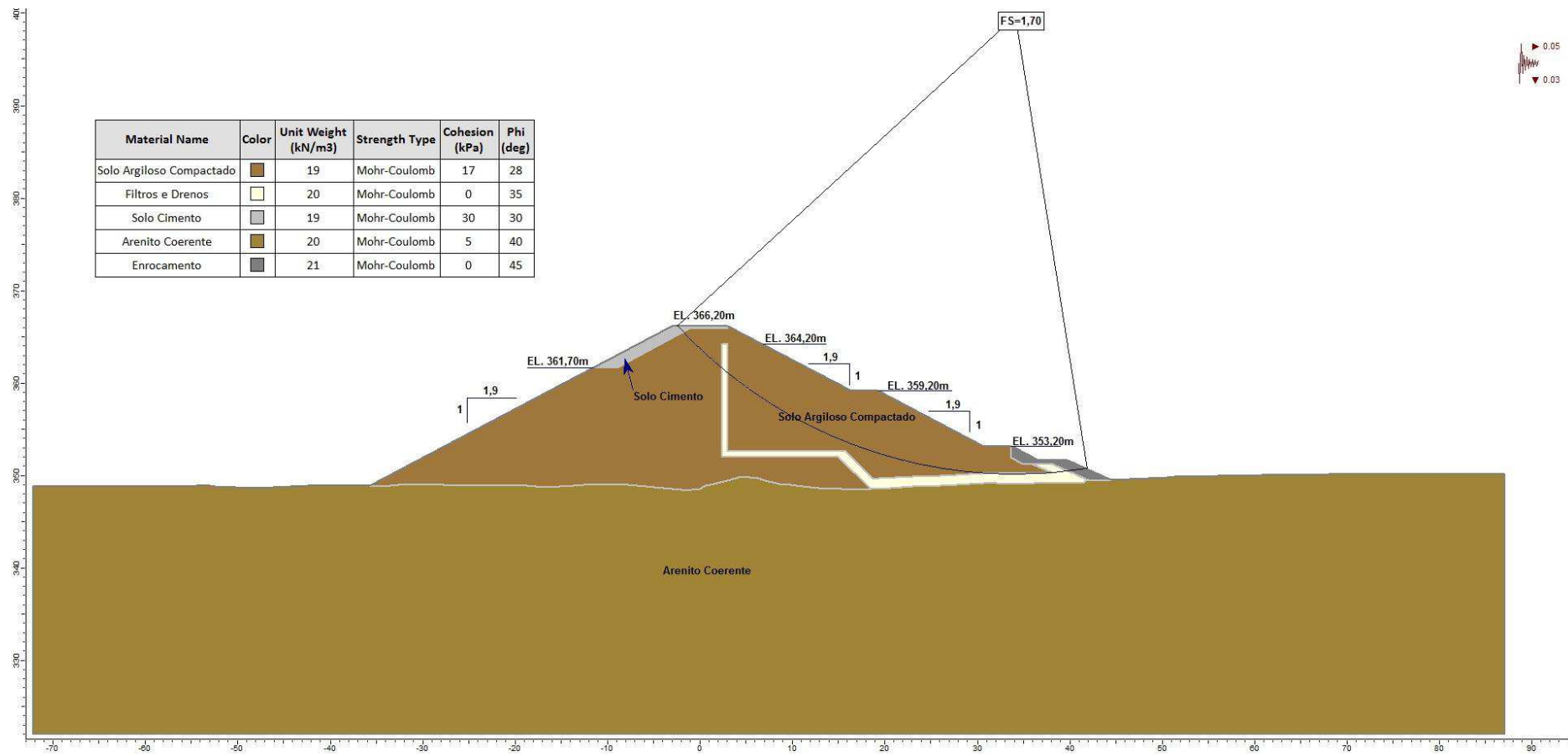
Est. 10+0,00m – Análise de estabilidade do talude de jusante – final de construção



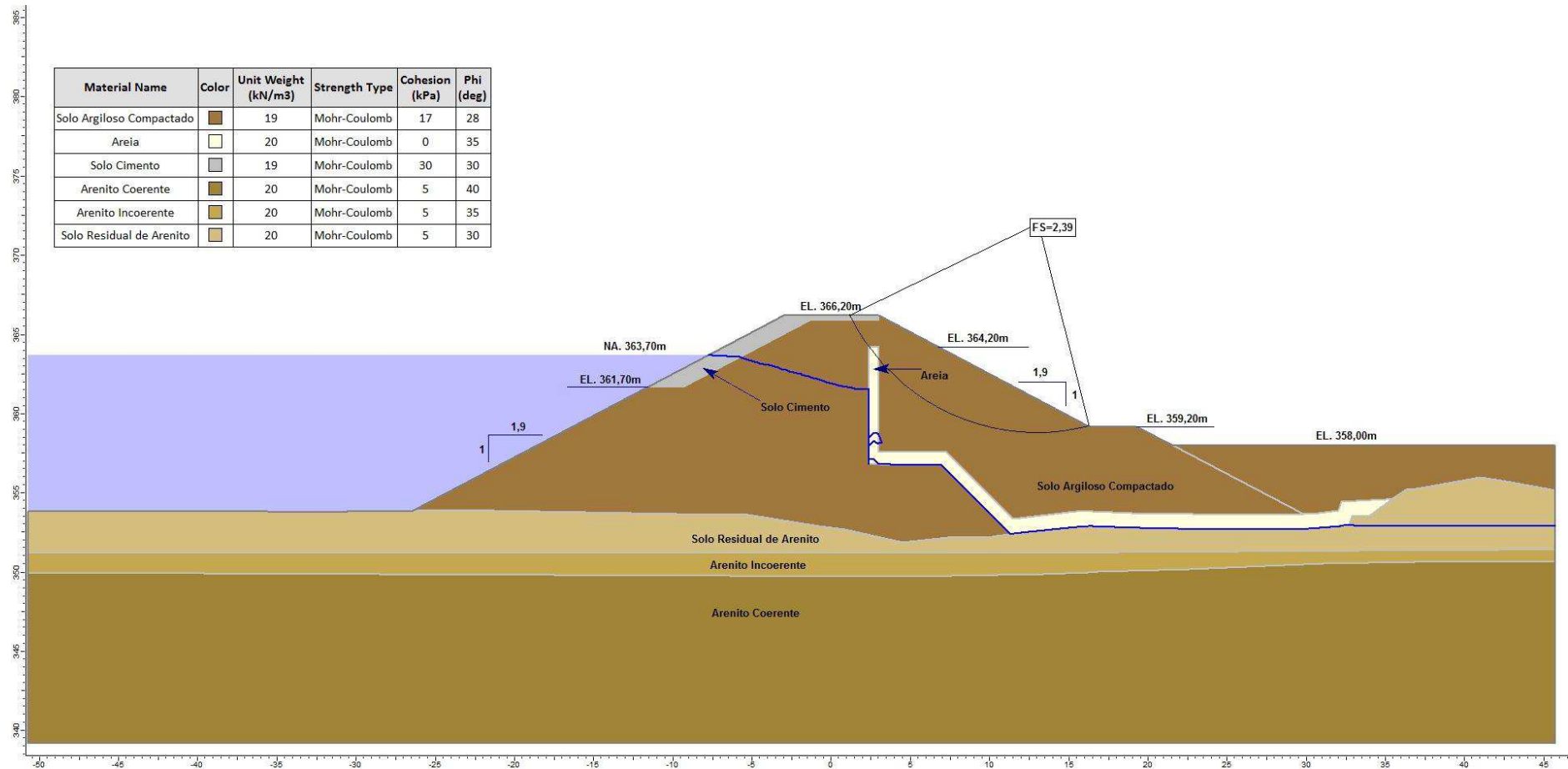
Est. 10+0,00m – Análise de estabilidade do talude de jusante – regime permanente – ações sísmicas



Est. 10+0,00m – Análise de estabilidade do talude de montante – final de construção – ações sísmicas

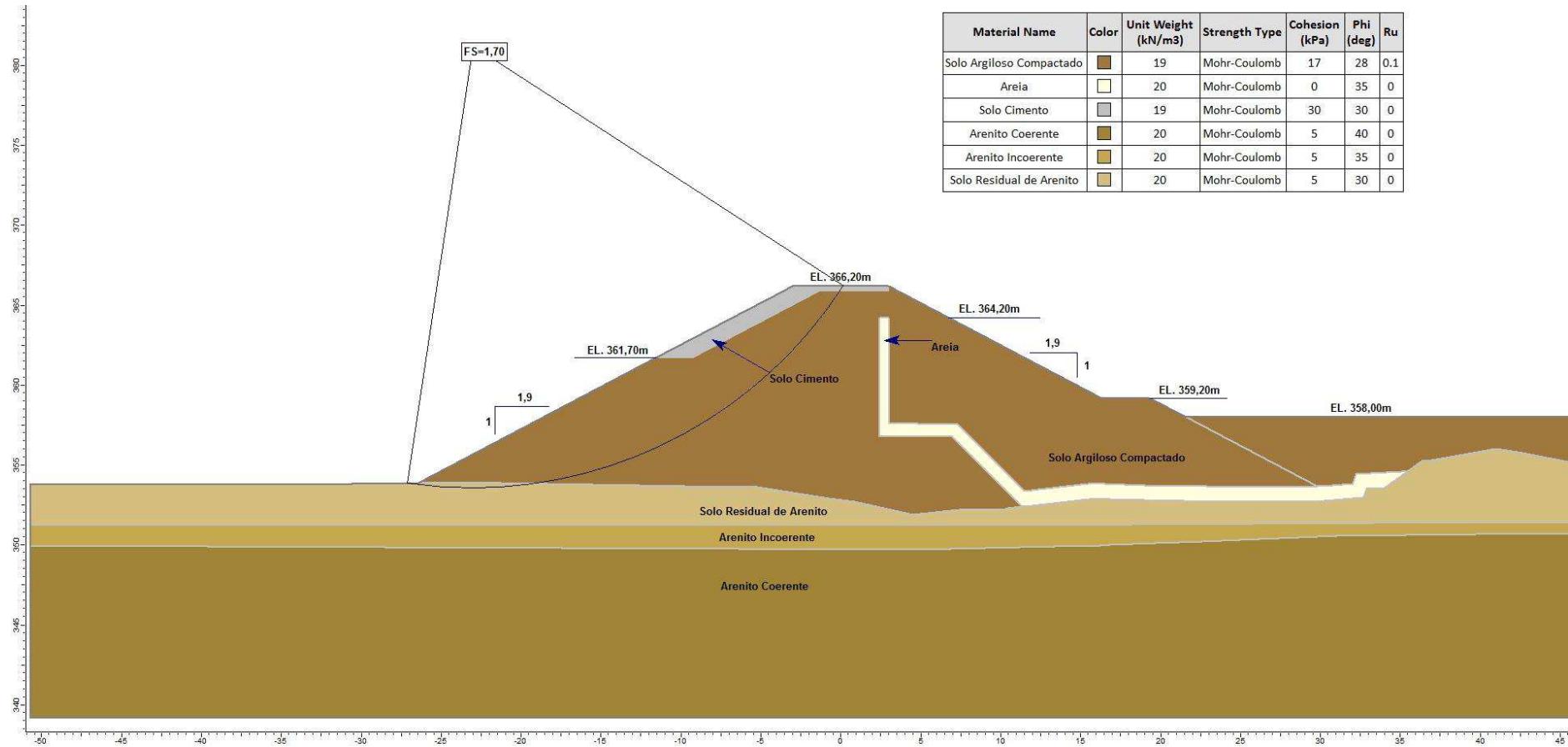


Est. 10+0,00m – Análise de estabilidade do talude de jusante – final de construção – ações sísmicas



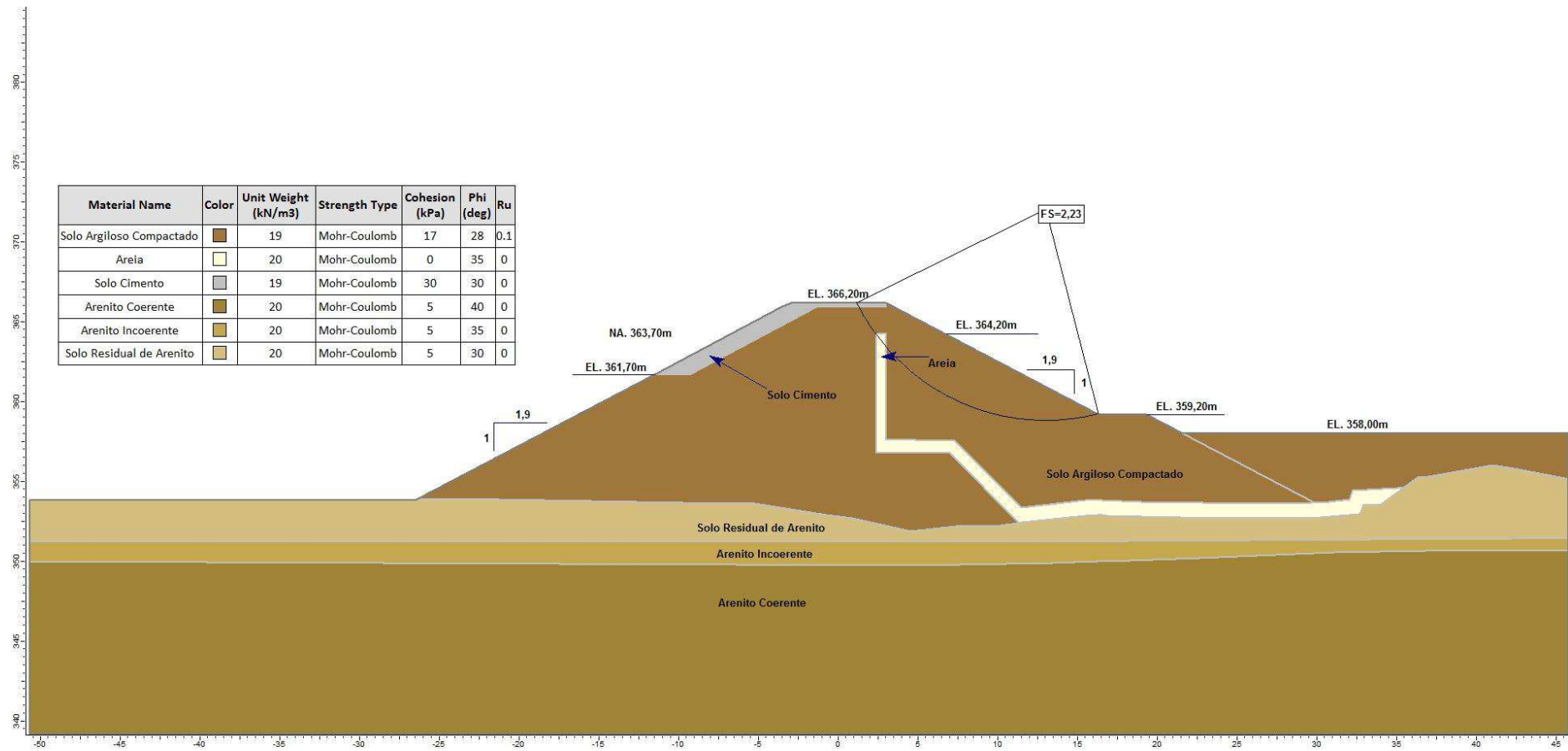
| Material Name | Color | Unit Weight (kN/m ³) | Strength Type | Cohesion (kPa) | Phi (deg) |
|--------------------------|-------|----------------------------------|---------------|----------------|-----------|
| Solo Argiloso Compactado | ■ | 19 | Mohr-Coulomb | 17 | 28 |
| Areia | □ | 20 | Mohr-Coulomb | 0 | 35 |
| Solo Cimento | ■ | 19 | Mohr-Coulomb | 30 | 30 |
| Arenito Coerente | ■ | 20 | Mohr-Coulomb | 5 | 40 |
| Arenito Incoerente | ■ | 20 | Mohr-Coulomb | 5 | 35 |
| Solo Residual de Arenito | ■ | 20 | Mohr-Coulomb | 5 | 30 |

Est. 18+0,00m – Análise de estabilidade do talude de jusante – regime permanente

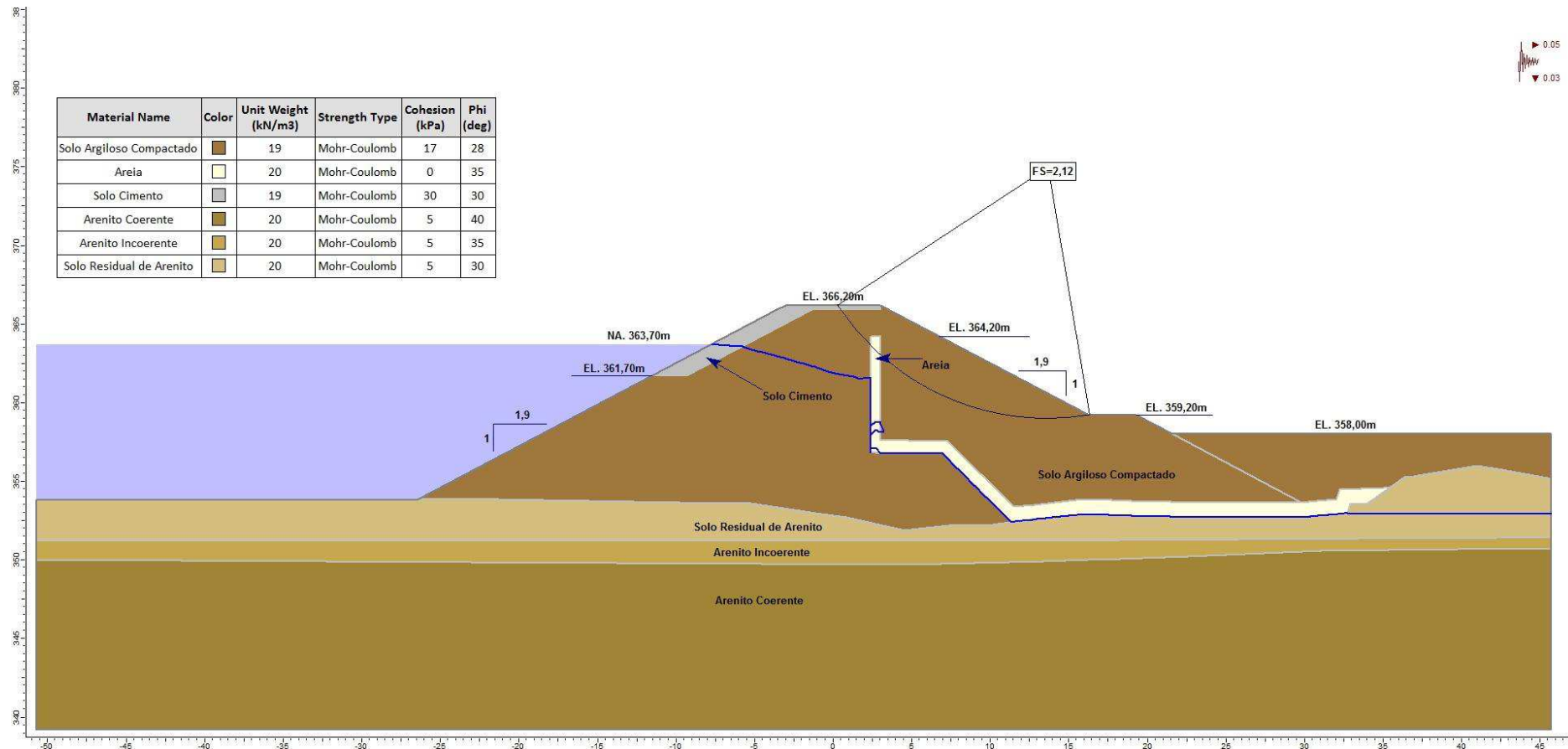


| Material Name | Color | Unit Weight (kN/m ³) | Strength Type | Cohesion (kPa) | Phi (deg) | Ru |
|--------------------------|-------|----------------------------------|---------------|----------------|-----------|-----|
| Solo Argiloso Compactado | ■ | 19 | Mohr-Coulomb | 17 | 28 | 0.1 |
| Areia | □ | 20 | Mohr-Coulomb | 0 | 35 | 0 |
| Solo Cimento | ■ | 19 | Mohr-Coulomb | 30 | 30 | 0 |
| Arenito Coerente | ■ | 20 | Mohr-Coulomb | 5 | 40 | 0 |
| Arenito Incoerente | ■ | 20 | Mohr-Coulomb | 5 | 35 | 0 |
| Solo Residual de Arenito | ■ | 20 | Mohr-Coulomb | 5 | 30 | 0 |

Est. 18+0,00m – Análise de estabilidade do talude de montante – final de construção

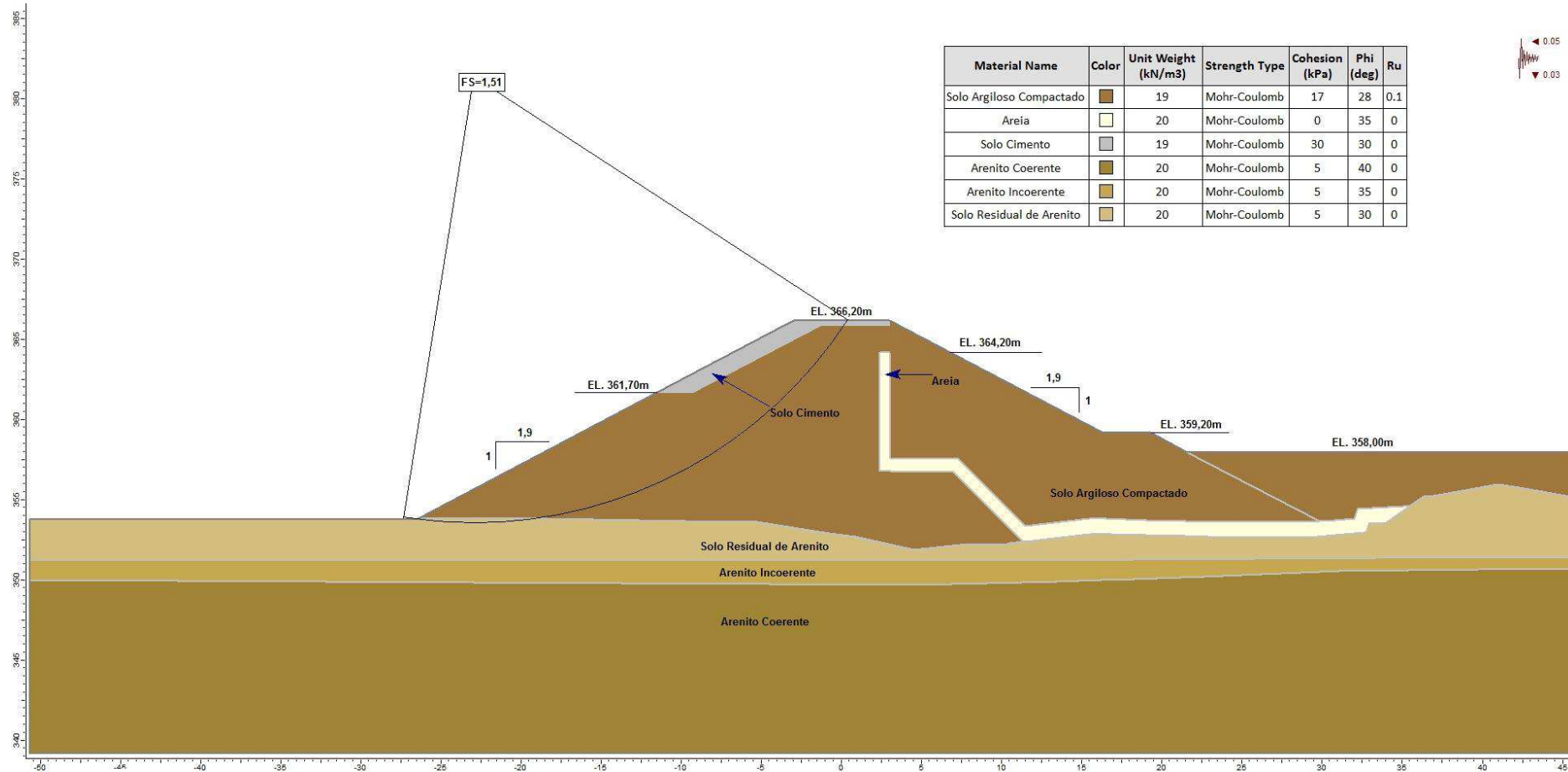


Est. 18+0,00m – Análise de estabilidade do talude de jusante – final de construção



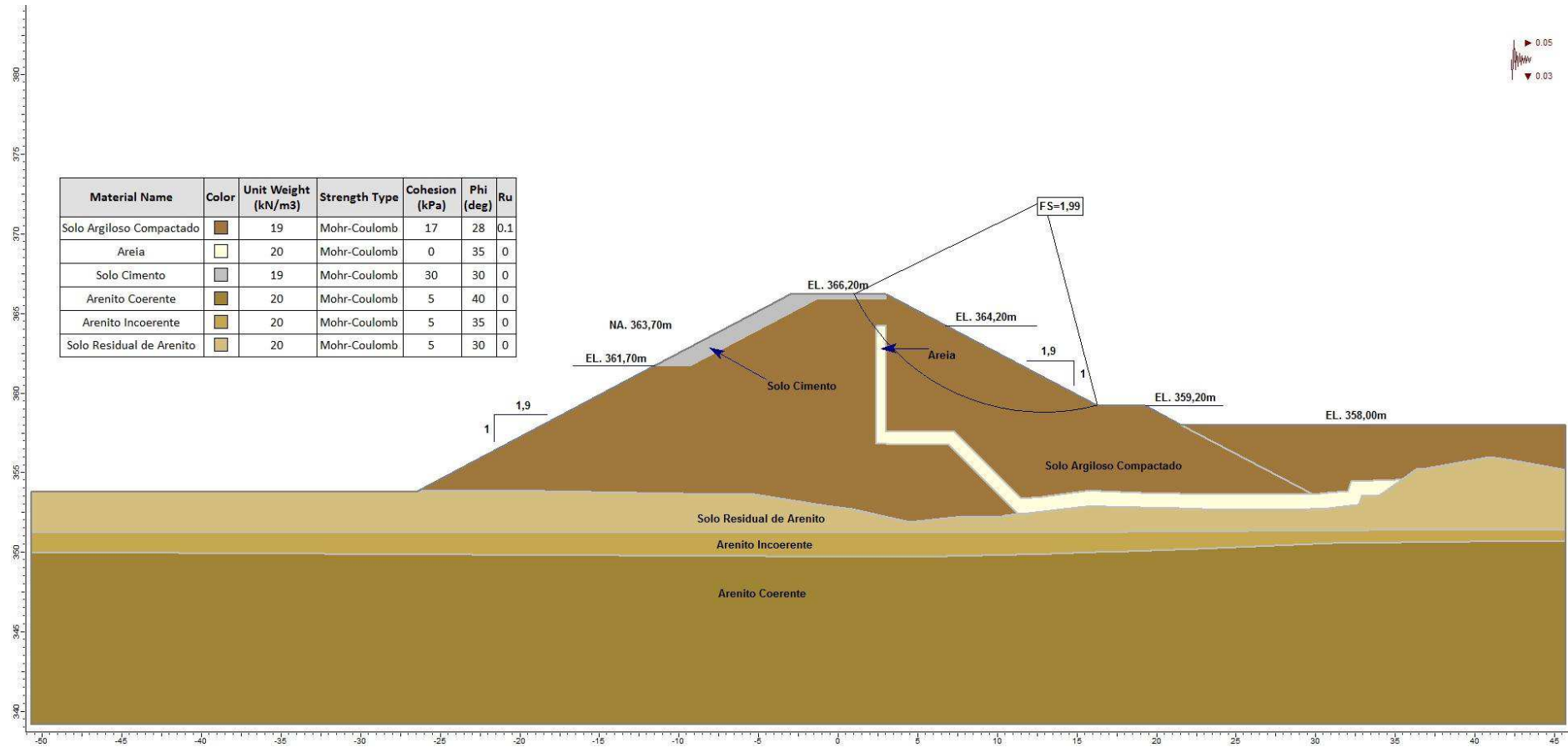
| Material Name | Color | Unit Weight (kN/m3) | Strength Type | Cohesion (kPa) | Phi (deg) |
|--------------------------|-------|---------------------|---------------|----------------|-----------|
| Solo Argiloso Compactado | ■ | 19 | Mohr-Coulomb | 17 | 28 |
| Areia | □ | 20 | Mohr-Coulomb | 0 | 35 |
| Solo Cimento | ■ | 19 | Mohr-Coulomb | 30 | 30 |
| Arenito Coerente | ■ | 20 | Mohr-Coulomb | 5 | 40 |
| Arenito Incoerente | ■ | 20 | Mohr-Coulomb | 5 | 35 |
| Solo Residual de Arenito | ■ | 20 | Mohr-Coulomb | 5 | 30 |

Est. 18+0,00m – Análise de estabilidade do talude de jusante – regime permanente – ações sísmicas



| Material Name | Color | Unit Weight (kN/m ³) | Strength Type | Cohesion (kPa) | Phi (deg) | Ru |
|--------------------------|-------|----------------------------------|---------------|----------------|-----------|-----|
| Solo Argiloso Compactado | ■ | 19 | Mohr-Coulomb | 17 | 28 | 0.1 |
| Areia | □ | 20 | Mohr-Coulomb | 0 | 35 | 0 |
| Solo Cimento | ■ | 19 | Mohr-Coulomb | 30 | 30 | 0 |
| Arenito Coerente | ■ | 20 | Mohr-Coulomb | 5 | 40 | 0 |
| Arenito Incoerente | ■ | 20 | Mohr-Coulomb | 5 | 35 | 0 |
| Solo Residual de Arenito | ■ | 20 | Mohr-Coulomb | 5 | 30 | 0 |

Est. 18+0,00m – Análise de estabilidade do talude de montante – final de construção – ações sísmicas



Est. 18+0,00m – Análise de estabilidade do talude de jusante – final de construção – ações sísmicas

ANEXOS

III - estrutura organizacional e qualificação técnica dos profissionais da equipe de segurança da barragem

Caso positivo, explicitar a qualificação técnica de cada membro da equipe. Caso negativo, descrever ações e cronograma para sua incorporação no organograma da empresa.

| | | |
|---|--|--|
| <input checked="" type="checkbox"/> Sim | Nome: Leo Scabeni - Gerente Geral Rodrigo Tenuta Sanchez - Coordenador de planejamento Diego Pivetta - Coordenador de campo | Qualificação: Eng. Eletricista CREA - 1207808059 Eng. Civil - CREA 120040120 RN Eng. Civil - Leitura de piezômetros na fase construtiva |
| <input type="checkbox"/> Não | Ações e cronograma para implementação: | |

Parte II: Plano Específico

IV - manuais de procedimentos dos roteiros de inspeções de segurança e de monitoramento e relatórios de segurança da barragem.

Caso inexistentes, descrever ações e cronograma para sua implantação.

| | | |
|------------------------------|---|--|
| <input type="checkbox"/> Sim | <input checked="" type="checkbox"/> Não | Ações e cronograma para implementação: os piezômetros estão sendo instalados e as leituras diárias iniciaram em junho de 2012. A projetista SPEC esta providenciando o manual de procedimentos e roteiro para fevereiro de 2013. |
|------------------------------|---|--|

V - regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem.

Caso aplicável, descrever a regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem. Caso inexistente, explicitar ações e cronograma para sua implantação.

| | | | |
|------------|---|------------------------------|---|
| Aplicável? | <input checked="" type="checkbox"/> Sim | <input type="checkbox"/> Não | Descrever: comporta tipo segmento. A regra operacional será consolidada em conjunto com os demais aproveitamentos a jusante, quando do termino da construção em 2013. |
| Existente? | <input type="checkbox"/> Sim | <input type="checkbox"/> Não | Ações e cronograma para implementação: |

VI - indicação da área do entorno das instalações e seus respectivos acessos, a serem resguardados de quaisquer usos ou ocupações permanentes, exceto aqueles indispensáveis à manutenção e à operação da barragem.

Descrever. Não tem estradas de acesso no entorno

VII - Plano de Ação de Emergência (PAE).

Caso inexistente, descrever ações e cronograma para sua implantação.

| | | |
|---|------------------------------|--|
| <input checked="" type="checkbox"/> Sim | <input type="checkbox"/> Não | Ações e cronograma para implementação: |
|---|------------------------------|--|

VIII - relatórios das inspeções de segurança.

Caso inexistente, descrever ações e cronograma para sua implantação.

| | | |
|------------------------------|---|--|
| <input type="checkbox"/> Sim | <input checked="" type="checkbox"/> Não | Ações e cronograma para implementação: Esta sendo contratado funcionário para executar a inspeção visual, a leitura dos piezômetros, dos sensores de deslocamento e da vazão dos drenos, com implantação do cronograma a partir de fevereiro de 2013 |
|------------------------------|---|--|

IX - revisões periódicas de segurança.

Caso inexistentes, descrever ações e cronograma para sua implantação.

| | | |
|------------------------------|---|---|
| <input type="checkbox"/> Sim | <input checked="" type="checkbox"/> Não | Ações e cronograma para implementação: O comportamento das estruturas será observado por meio de inspeção visual que será semanal e executada com diretrizes que permitem um controle dos principais problemas que ocorrem em superfície; e por instrumentos como piezômetros, poços de drenagens e marcadores de deslocamento. As revisões serão previstas considerando os dados de auscultação sendo o cronograma para implementação em 2013. |
| | | |

ANEXO II - MATRIZ PARA BARRAGENS DE ACUMULAÇÃO DE ÁGUA

CLASSIFICAÇÃO DA BARRAGEM QUANTO À CATEGORIA DE RISCO E DANO POTENCIAL

| | |
|-----------------------------|----------------------------------|
| NOME DA BARRAGEM | PCH ILHA COMPRIDA |
| NOME DO EMPREENDEDOR | ILHA COMPRIDA ENERGIA S/A |
| DATA: | 12/09/2012 |

| II.1 - CATEGORIA DE RISCO | | Pontos |
|---|--------------------------------------|---------------|
| 1 | Características Técnicas (CT) | 15 |
| 2 | Estado de Conservação (EC) | 0 |
| 3 | Plano de Segurança de Barragens (PS) | 14 |
| PONTUAÇÃO TOTAL (CRI) = CT + EC + PS | | 29 |

| FAIXAS DE CLASSIFICAÇÃO | CATEGORIA DE RISCO | CRI |
|--------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | ALTO | ≥ 60 ou $EC^*=8$ (*) |
| | MÉDIO | 35 a 60 |
| | BAIXO | ≤ 35 |

(*) Pontuação (8) em qualquer coluna de Estado de Conservação (EC) implica automaticamente CATEGORIA DE RISCO ALTA e necessidade de providencias imediatas pelo responsável da barragem.

| II.2 - DANO POTENCIAL ASSOCIADO | | Pontos |
|--|--------------------------------|---------------|
| | DANO POTENCIAL ASSOCIADO (DPA) | 5 |

| FAIXAS DE CLASSIFICAÇÃO | DANO POTENCIAL ASSOCIADO | DPA |
|--------------------------------|---------------------------------|----------------|
| | ALTO | ≥ 16 |
| | MÉDIO | $10 < DP < 16$ |
| | BAIXO | ≤ 10 |

RESULTADO FINAL DA AVALIAÇÃO:

| | |
|---------------------------------|-----------------------------|
| CATEGORIA DE RISCO | Alto / Médio / <u>Baixo</u> |
| DANO POTENCIAL ASSOCIADO | Alto / Médio / <u>Baixo</u> |

R

Edle T. Zolij

II.1 - MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO À CATEGORIA DE RISCO (ACUMULAÇÃO DE ÁGUA)

1 - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS - CT

| Altura (a) | Comprimento (b) | Tipo de Barragem quanto ao material de construção (c) | Tipo de fundação (d) | Idade da Barragem (e) | Vazão de Projeto (f) |
|---------------------------|---------------------------|---|--|--|--|
| Altura ≤ 15m (0) | comprimento ≤ 200m (2) | Concreto Convencional (1) | Rocha sã (1) | entre 30 e 50 anos (1) | Decamilenar ou CMP (Cheia Máxima Provável) - TR = 10.000 anos (3) |
| 15m < Altura ≤ 30m (1) | Comprimento > 200m (3) | Alvenaria de Pedra / Concreto Ciclóptico / Concreto Rolado - CCR (2) | Rocha alterada dura com tratamento (2) | entre 10 e 30 anos (2) | Milenar - TR = 1.000 anos (5) |
| 30m ≤ Altura ≤ 60m (2) | - | Terra Homogenea / Enrocamento / Terra Enrocamento (3) | Rocha alterada - sem tratamento / Rocha alterada fraturada com tratamento (3) | entre 5 e 10 anos (3) | TR = 500 anos (8) |
| Altura > 60m (3) | - | - | Rocha alterada mole / Saprolito / Solo compacto (4) | < 5 anos ou > 50 anos ou sem informação (4) | TR < 500 anos ou Desconhecida / Estudo não confiável (10) |
| - | - | - | Solo residual / aluvião (5) | - | - |

CT = Σ (a até f):

15

Observação: Para cada coluna da matriz, destacar a respectiva classificação do empreendimento.

Eda T. Ediz

AD

II.1 - MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO À CATEGORIA DE RISCO (ACUMULAÇÃO DE ÁGUA)

2 - ESTADO DE CONSERVAÇÃO - EC

| Confiabilidade das Estruturas Extravasoras (g) | Confiabilidade das Estruturas de Adução (h) | Percolação (f) | Deformações e Recalques (j) | Deterioração dos Taludes / Parâmetros (i) | Eclusa (*) (m) |
|--|--|--|---|---|---|
| Estruturas civis e eletromecânicas em pleno funcionamento / canais de aproximação ou de restituição ou vertedouro (tipo soleira livre) desobstruídos (0) | Estruturas civis e dispositivos hidroeletromecânicos em condições adequadas de manutenção e funcionamento (0) | Percolação totalmente controlada pelo sistema de drenagem (0) | Inexistente (0) | Inexistente (0) | Não possui eclusa (0) |
| Estruturas civis e eletromecânicas preparadas para a operação, mas sem fontes de suprimento de energia de emergência / canais ou vertedouro (tipo soleira livre) com erosões ou obstruções, porém sem riscos a estrutura vertical. (4) | Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletromecânicos com problemas identificados, com redução de capacidade de adução e com medidas corretivas em implantação (4) | Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras estabilizada e/ou monitorada (3) | Existência de trincas e abatimentos de pequena extensão e impacto nulo (1) | Falhas na proteção dos taludes e paramentos, presença de arbustos de pequena extensão e impacto nulo. (1) | Estruturas civis e eletromecânicas bem mantidas e funcionando (1) |
| Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletromecânicos com problemas identificados, com redução de capacidade de adução e com medidas corretivas em implantação (6) | Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletromecânicos com problemas identificados, com redução de capacidade de adução e sem medidas corretivas (6) | Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras sem tratamento ou em fase de diagnóstico (5) | Trincas e abatimentos de impacto considerável gerando necessidade de estudos adicionais ou monitoramento. (5) | Erosões superficiais, ferragem exposta, crescimento de vegetação generalizada, gerando necessidade de monitoramento ou atuação corretiva. (5) | Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletromecânicos com problemas identificados e com medidas corretivas em implantação (2) |
| Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletromecânicos com problemas identificados, com redução de capacidade de adução e sem medidas corretivas/ canais ou vertedouro (tipo soleira livre) obstruídos ou com estruturas danificadas (10) | - | Surgência nas áreas de jusante, taludes ou ombreiras com carregamento de material ou com vazão crescente. (8) | Trincas, abatimentos ou escorregamentos expressivos, com potencial de comprometimento aa segurança (8) | Depressões acentuadas nos taludes, escorregamentos, sulcos profundos de erosão, com potencial de comprometimento aa segurança. (7) | Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletromecânicos com problemas identificados e sem medidas corretivas (4) |

EC = Σ (g até m):

0

Observação: Para cada coluna da matriz, hachurar/destacar a respectiva classificação do empreendimento.

Adt. Bliz

FA

II.1 - MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO À CATEGORIA DE RISCO (ACUMULAÇÃO DE ÁGUA)

3 - PLANO DE SEGURANÇA DA BARRAGEM - PS

| Existência de documentação de projeto (n) | Estrutura organizacional e qualificação técnica dos profissionais da equipe de Segurança da Barragem (o) | Procedimentos de roteiros de inspeções de segurança e de monitoramento (p) | Regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem (q) | Relatórios de inspeção de segurança com análise e interpretação (r) |
|--|--|--|--|---|
| Projeto executivo e "como construído" (0) | Possui estrutura organizacional com técnico responsável pela segurança da barragem (0) | Possui e aplica procedimentos de inspeção e monitoramento (0) | Sim ou Vertedouro tipo soleira livre (0) | Emitte regularmente os relatórios (0) |
| Projeto executivo ou "como construído" (2) | Possui técnico responsável pela segurança da barragem (4) | Possui e aplica apenas procedimentos de inspeção (3) | Não (6) | Emitte os relatórios sem periodicidade (3) |
| Projeto básico (4) | Não possui estrutura organizacional e responsável técnico pela segurança da barragem (8) | Possui e não aplica procedimentos de inspeção e monitoramento (5) | - | Não emite os relatórios (5) |
| Anteprojeto ou Projeto conceitual (6) | - | Não possui e não aplica procedimentos para monitoramento e inspeções (6) | - | - |
| inexiste documentação de projeto (8) | - | - | - | - |

PS = \sum (n até r):

14

Observação: Para cada coluna da matriz, hachurar/destacar a respectiva classificação do empreendimento.

Felipe T. Colégio

R

II.2 - MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO DANO POTENCIAL ASSOCIADO - DPA (ACUMULAÇÃO DE ÁGUA)

| Volume Total do Reservatório para barragens de uso múltiplo ou aproveitamento energético (s) | Potencial de perdas de vidas humanas (t) | Impacto ambiental (u) | Impacto sócio-econômico (v) |
|--|--|---|---|
| Pequeno < = 5hm ³ (1) | INEXISTENTE (Não existem pessoas permanentes/residentes ou temporárias/transitando na área a jusante da barragem) (0) | SIGNIFICATIVO (quando a área afetada da barragem não representa área de interesse ambiental, áreas protegidas em legislação específica ou encontra-se totalmente descaracterizada de suas condições naturais) (3) | INEXISTENTE (Quando não existem quaisquer instalações e serviços de navegação na área afetada por acidente da barragem) (0) |
| Médio 5 a 75hm ³ (2) | POUCO FREQUENTE (Não existem pessoas ocupando permanentemente a área a jusante da barragem, mas existe estrada vicinal de uso local. (4) | MUITO SIGNIFICATIVO (quando a área afetada da barragem apresenta interesse ambiental relevante ou protegida em legislação específica) (5) | BAIXO (quando existe pequena concentração de instalações residenciais e comerciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura na área afetada da barragem) (4) |
| Grande 75 a 200hm ³ (3) | FREQUENTE (Não existem pessoas ocupando permanentemente a área a jusante da barragem, mas existe rodovia municipal ou estadual ou federal ou outro local e/ou empreendimento de permanência eventual de pessoas que poderão ser atingidas. (6) | - | ALTO (quando existe grande concentração de instalações residenciais e comerciais, agrícolas, industriais, de infraestrutura e serviços de lazer e turismo na área afetada da barragem ou instalações portuárias ou serviços de navegação) (8) |
| Muito Grande > 200hm ³ (5) | EXISTENTE (Existem pessoas ocupando permanentemente a área a jusante da barragem, portanto, vidas humanas poderão ser atingidas. (12) | - | - |

DPA = Σ (s até v): 5

Observação: Para cada coluna da matriz, hachurar/destacar a respectiva classificação do empreendimento.

akt. edo

A