

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
CURSO DE GEOLOGIA

João Pedro Canhisares

**Avaliação do Maciço Rochoso de Fundação da Barragem de São Roque (SC) Utilizando
Ferramenta de Modelagem Geológica 3D**

Florianópolis

2022

João Pedro Canhisares

**Avaliação do Maciço Rochoso de Fundação da Barragem de São Roque (SC) Utilizando
Ferramenta de Modelagem Geológica 3D**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Geologia do Centro de Filosofia e Ciências Humanas da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Geologia
Orientador: Prof. Dr. Murilo da Silva Espíndola

Florianópolis, Santa Catarina

2022

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

Canhisares, Joao Pedro

Avaliação do Maciço Rochoso de Fundação da Barragem de São Roque (SC) Utilizando Ferramenta de Modelagem Geológica 3D / Joao Pedro Canhisares ; orientador, Murilo da Silva Espíndola, 2022.

96 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Graduação em Geologia, Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Geologia. 2. maciço rochoso. 3. modelagem implícita. 4. modelo geológico-geotécnico. 5. Grupo Serra Geral. I. da Silva Espíndola, Murilo. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Geologia. III. Título.

João Pedro Canhisares

Avaliação o Maciço Rochoso de Fundação da Barragem de São Roque (SC) Utilizando Ferramenta de Modelagem Geológica 3D

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Geologia e aprovado em sua forma final pelo Curso de Geologia

Florianópolis, 15 de Dezembro de 2022.



Documento assinado digitalmente

Manoela Bettarel Ballico

Data: 07/02/2023 10:20:08-0300

CPF: ***.441.650-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Dra. Manoela Bettarel Bállico
Coordenadora do Curso

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente

Murilo da Silva Espíndola

Data: 08/02/2023 14:54:01-0300

CPF: ***.661.899-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Dr. Murilo da Silva Espíndola
Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente

Breno Leitao Waichel

Data: 06/02/2023 11:33:35-0300

CPF: ***.202.350-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Dr. Breno Leitão Waichel
Avaliador

Universidade Federal de Santa Catarina

Me. Eng. Cesar Schmidt Godoi

Avaliador

Auren Energia

AGRADECIMENTOS

Nada na vida conseguimos realizar sozinhos. Assim, apesar de levar meu nome, este trabalho foi feito por mais de duas mãos.

Primeiramente, agradeço aos meus pais por sempre terem colocado minha educação como prioridade. Me ensinaram que com os estudos e dedicação se pode chegar em qualquer lugar.

Agradeço à minha namorada Marina por me fazer companhia nas muitas noites e finais de semana de elaboração deste trabalho. Obrigado por ser minha confidente e estar presente nos momentos mais difíceis nos quais nos sentimos menos amáveis.

Me sinto grato aos colegas geólogos da Engevix, André, Eliane, Germano e Ariel pela troca de experiências no dia a dia nas quais aprendi muito sobre geologia de engenharia. Um agradecimento especial ao Roberto, que me mostrou que o apreço pela técnica é de fundamental importância em projetos de engenharia, além de todas as aulas quando eu chegava com alguma dúvida. As discussões geológicas no escritório certamente serviram de inspiração para este trabalho.

Agradeço ao professor Murilo que, além de grande professor, é um exemplo de ser humano. Seus conselhos me ajudaram a entrar no curso de geologia e seguiram me ajudando por toda a graduação. É um professor solícito, que não mede esforços para buscar o melhor aos seus alunos e ao departamento de geologia.

Grato aos amigos de turma Baesso, Rocha, Vicente, Fábio, Artur, Ana Clara, Maccari e Nikolas pela parceria em incontáveis saídas de campo, trabalhos, projetos e mesas de bar. Não teria chegado até aqui se não fosse pela amizade de vocês.

Agradeço ao pessoal da Seequent, em especial a Mayara, Ingrid e Amanda pela prontidão e dedicação quando foi necessário suporte na modelagem.

Finalmente, gostaria de agradecer à minha cachorra Luna por passar todos os momentos de escrita deste trabalho na caminha ao lado da mesa do escritório. A fidelidade só terminava quando havia algo mais interessante na cozinha...

“What I cannot create, I do not understand.” (Richard Feynman, 1988)

RESUMO

Por conta da crescente demanda em obras de infraestrutura, cada vez mais, os projetos de engenharia necessitam aliar a expertise técnica com ferramentas computacionais modernas. Estas ferramentas auxiliam o profissional permitindo maior velocidade, atualização automática com a chegada de novos dados e combinação de diferentes cenários em todas as fases de projeto. Desta forma, este trabalho propõe-se a criar um modelo geológico local e avaliar parâmetros geológicos-geotécnicos do maciço rochoso de fundação da Barragem de São Roque por meio da criação de modelo geológico-geotécnico baseado na classificação *Rock Mass Rating* (Bieniawski, 1973) adaptada. Para isso, foram utilizados os dados fornecidos por empresas envolvidas tanto no projeto quanto na construção, aliados a pesquisa bibliográfica e visita de campo. A barragem está situada sobre o Grupo Serra Geral, caracterizada pela grande presença de derrames basálticos que se estendem por quilômetros. Estes derrames basálticos são oriundos do maior evento magmático não oceânico da história do planeta o qual afetou a Bacia do Paraná no Cretáceo Inferior com intenso magmatismo fissural. Como os derrames basálticos apresentam uma morfologia típica na sequência topo para base: brecha basáltica, basalto vesicular amigdaloidal e basalto denso, os intervalos de sondagem foram usados para identificar as camadas e dispor tridimensionalmente os derrames por meio de modelagem implícita. Com as informações de parâmetros geológico-geotécnicos das sondagens, também se elaborou um modelo geológico-geotécnico para classificar o maciço rochoso em classes geomecânicas, utilizando os sólidos geológicos modelados como domínio. Em posse destes modelos foi possível realizar análises estatísticas e seções geológicas/geomecânicas longitudinais e transversais à barragem. A análise estatística evidenciou a correlação entre as notas obtidas na classificação RMR adaptada e os litotipos basálticos. Já as seções mostraram a alternância dos litotipos basálticos em 4 derrames principais e um subderrame, além da relação entre a classificação geomecânica com as informações geológico-geotécnicas contidas nas sondagens, notas técnicas de obra e outros estudos de caso. Além disso, realizou-se análise cinemática por meio de estereogramas para determinar possíveis orientação e tipos de rupturas pela fundação das estruturas de concreto. Assim, os modelos criados foram capazes de atingir o melhor entendimento do maciço rochoso e de suas condicionantes por meio da integração de todos os parâmetros pertinentes ao modelo geológico-geotécnicos em uma única interface, conferindo maior velocidade e capacidade de testar diversos cenários.

Palavras-chave: maciço rochoso; modelagem implícita; modelo geológico-geotécnico; Grupo Serra Geral

ABSTRACT

Due to the growing demand for infrastructure works, engineering projects increasingly need to combine technical expertise with modern computational tools. These tools help the professional by allowing greater speed, automatic updating with the arrival of new data and combining different scenarios in all project phases. Thus, this work proposes to create a local geological model and evaluate geological-geotechnical parameters of the foundation rock mass of the São Roque Dam by creating a geological-geotechnical model based on the adapted Rock Mass Rating (Bieniawski, 1973). To achieve this, data provided by companies involved in both the design and construction were used, combined with bibliographical research and field visit. The dam is located on the Serra Geral Group, characterized by the large presence of basaltic flows that extend for kilometers. These basaltic flows originate from the largest non-oceanic magmatic event recorded in planet's history, which affected the Paraná Basin in the Lower Cretaceous with intense fissure magmatism. As the basaltic flows show a typical morphology in the top-to-bottom sequence: basaltic breccia, vesicular amygdaloid basalt and dense basalt, the drilling intervals were used to identify the layers and three-dimensionally arrange the flows through implicit modeling. With the information of geological-geotechnical parameters from the drillings, a geological-geotechnical model was also elaborated to classify the rock mass into geomechanical classes, using the modeled geological solids as domain. With these models, it was possible to carry out statistical analyzes and longitudinal and transverse geological/geomechanical cross-sections of the dam. The statistical analysis showed a correlation between the grades obtained in the adapted RMR classification and the basaltic lithotypes. Cross-sections showed the alternation of basaltic lithotypes in 4 main flows and one sub-flow, in addition to the relationship between the geomechanical classification with the geological-geotechnical information contained in the drillings, technical notes of the work and other case studies. In addition, a kinematic analysis was carried out using stereograms to determine possible directions and types of ruptures by the foundation of concrete structures. Thus, the models created were able to achieve a better understanding of the rock mass and its constraints through the integration of all parameters relevant to the geological-geotechnical model in a single interface, providing greater speed and capacity to test different scenarios.

Keywords: rock mass; implicit modelling; geomechanical model; Serra Geral Group

LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1. Classificação sugerida para a caracterização da rugosidade das descontinuidades.....	24
Figura 3-2. Efeito de escala na medição da rugosidade. Na escala de maior detalhe mede-se a aspereza, enquanto na escala macro analisa-se a ondulação.	25
Figura 3-3. Valores de JRC estimados para cada situação de rugosidade.	26
Figura 3-4. Forma de cálculo do RQD e as classes de qualidade da rocha designadas	27
Figura 3-5. Esquema típico de uma barragem concreto gravidade	33
Figura 3-6. Esforços atuantes em uma barragem de concreto gravidade	34
Figura 3-7. Estratigrafia do ciclo Gondwana III	36
Figura 3-8. Localização da Bacia do Paraná com as porções do Grupo Serra Geral em destaque	37
Figura 3-9. Fases do mecanismo de inflação em derrames básicos	38
Figura 3-10. Morfologia típica de um derrame <i>pahoehoe</i>	39
Figura 3-11. Seção de um derrame basáltico com litoestruturas.....	40
Figura 3-12. Modelo de formação de um subderrame a partir de um derrame principal	41
Figura 3-13. Evolução dos derrames em função das diferentes velocidades de fluxo	42
Figura 3-14. Processo de alívio de tensões em função de retirada do material sobreposto ao maciço.....	43
Figura 3-15. Seção longitudinal ao leito do rio exibindo feições estruturais associadas ao alívio de tensões verticais causada pela erosão fluvial	43
Figura 3-16. Variação da permeabilidade com a profundidade em maciços fraturados. Destaque para o gráfico das efusivas básicas (basaltos).....	44
Figura 3-17. Esquema modelagem implícita com criação de isosuperfícies e atribuição de valores para domínios geológicos.....	47
Figura 3-18. Cálculo do módulo deformabilidade com base em Bieniawski (1973) e Serafim e Pereira (1983) para as fundações em questão	49
Figura 3-19. Modelo geomecânico das fundações da estrutura de tomada d'água de Cachoeira da Porteira (AM)	50

Figura 3-20. Seções verticais ao longo do barramento de Itaipu. Na figura superior o modelo de blocos com o valor de RQD e abaixo a seção geológica compartimentando os derrames.....	51
Figura 3-21. Modelo 3D de blocos geotécnicos com as informações reunidas em um bloco	52
Figura 4-1. Mapa de localização estadual da UHE São Roque.....	53
Figura 4-2. MDT com indicação da linha de centro das estruturas da barragem.....	54
Figura 4-3. Mapa litoestratigráfico da região da UHE São Roque	55
Figura 4-4. Testemunhos de sondagem com principais litotipos encontrados no local da barragem: a) brecha basáltica b) basalto vesicular amigdaloidal c) basalto denso.....	56
Figura 4-5. Contato entre brecha basáltica e basalto vesicular amigdaloidal exposto após as escavações.....	57
Figura 5-1. Fluxograma com atividades realizadas neste trabalho	60
Figura 5-2. Gráfico de correlação entre RQD e espaçamento das descontinuidades.	63
Figura 5-3. Lógica computacional utilizada para obter as classes geomecânicas RMR adaptadas	65
Figura 6-1. A) modelo geológico em perspectiva com localização da malha de seções e indicação das seções escolhidas. B) modelo geológico em planta com projeção das estruturas e aterros no terreno natural e seções selecionadas para análise.....	70
Figura 6-2. A) modelo geológico-geotécnico em perspectiva com localização da malha de seções e indicação das seções escolhidas. B) vista em planta do modelo geológico-geotécnico com projeção das estruturas de concreto e aterros no terreno natural com seções selecionadas.	71
Figura 6-3. Seção longitudinal, com exagero vertical indicado, mostrando a disposição dos 4 derrames basálticos	72
Figura 6-4. Seção geológica e geomecânica longitudinal ao longo do eixo da barragem	73
Figura 6-5. Seção geológica e geomecânica com indicação das sondagens e intervalos com descrição geológico-geotécnicas de RQD e faixas de condutividade hidráulica.	75
Figura 6-6. Estereograma das descontinuidades na fundação da barragem principal com relação ao eixo do barramento. Descontinuidades sub-verticais em laranja e sub-horizontais em azul.....	76
Figura 6-7. Planta de arranjo geral com localização das seções realizadas.	77
Figura 6-8. Seção geológica e geomecânica da ombreira direita da ombreira direita	78

Figura 6-9. Seção geológica contendo intervalos de sondagem com preenchimento de descontinuidades e geomecânica com intervalos de RQD a esquerda e intervalos de condutividade hidráulica a direita.....	80
Figura 6-10. Estereograma com polos das descontinuidades e linhas de isofrequência nas fundações da margem direita. Descontinuidades subverticais (azul) e sub-horizontais (amarelo).....	81
Figura 6-11. Planta de arranjo geral com localização das seções realizadas na ombreira esquerda.....	82
Figura 6-12. Seção geológica e geomecânica na ombreira esquerda da barragem	83
Figura 6-13. Seção auxiliar ombreira esquerda com descrição geológica das sondagens	84
Figura 6-14. Estereograma com descontinuidades na ombreira esquerda e diagrama de isofrequências. Eixo da barragem em roxo	85

LISTA DE QUADROS

Quadro 3-1. Graus de alteração dos materiais rochosos	22
Quadro 3-2. Grau de coerência de materiais rochosos	23
Quadro 3-3. Características do preenchimento das descontinuidades	23
Quadro 3-4. Classificação geomecânica RMR para maciços rochosos fraturados	30
Quadro 3-5. Fator de correção com relação à orientação das descontinuidades	31
Quadro 3-6. Compartimentação em classes de maciço conforme a nota obtida	31
Quadro 3-7. Coesão e ângulo de atrito das 5 classes de maciço	31
Quadro 3-8. Principais esforços atuantes em uma barragem de concreto	34
Quadro 3-9. Comparativo das técnicas de modelagem	48
Quadro 5-1. Classificação adaptada a partir do RMR	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1. Faixas de permeabilidade correlacionando valores de ensaio de perda d'água com condutividade hidráulica e condições das descontinuidades do maciço rochoso.	28
Tabela 3-2. Valores médios de ensaios de resistência a compressão uniaxial nos litotipos basálticos típicos.....	45
Tabela 6-1. Estatística associando os litotipos basálticos e derrames aos valores numéricos de RMR adaptado	67

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVOS	19
2.1.1	Objetivo Geral.....	19
2.1.2	Objetivos Específicos	19
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1	Caracterização e Propriedades dos Maciços Rochosos	21
3.1.1	Grau de Alteração.....	21
3.1.2	Coerência	22
3.1.3	Paredes e Preenchimento	23
3.1.4	Rugosidade	24
3.1.5	Rock Quality Designation (RQD).....	26
3.1.6	Condutividade Hidráulica	27
3.2	Classificação de Maciços Rochosos	29
3.2.1.1	<i>Rock Mass Rating (RMR)</i>	29
3.2.1.2	<i>Módulo de Deformabilidade.....</i>	31
3.3	Barragens	32
3.3.1	Barragem de Concreto	32
3.3.1.1	<i>Esforços Atuantes</i>	33
3.3.1.2	<i>Aspectos Geotécnicos em Fundações de Barragem de Concreto</i>	34
3.3.1.3	<i>Subpressões em Barragens de Concreto</i>	35
3.4	Basaltos do Grupo Serra Geral	35
3.4.1	Evolução dos Derrames de Lavas Básicas	37
3.4.2	Morfologia de Derrames Basálticos	38
3.4.3	Condutividade Hidráulica em Basaltos	44
3.4.4	Propriedades Mecânicas dos Basaltos do Grupo Serra Geral.....	45
3.5	Modelo Geológico-Geotécnico.....	46

3.5.1	Técnicas de Modelagem	46
3.5.2	Estudos de Caso	48
4	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	53
5	METODOLOGIA.....	59
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	67
6.1	Seção Longitudinal pelo Eixo da Barragem	71
6.2	Barragem Principal e Vertedouro	74
6.3	Ombreira Direita e Tomada d'água	77
6.4	Ombreira Esquerda	82
7	CONCLUSÕES.....	87
	REFERÊNCIAS.....	89

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho visa a classificação e avaliação das fundações da barragem na Usina Hidrelétrica de São Roque, localizada entre os municípios de Vargem e São José do Cerrito, Santa Catarina. O maciço rochoso é constituído por basaltos do Grupo Serra Geral acompanhados de sua típica estruturação em derrames e seus litotipos correspondentes. Para caracterizar e classificar o maciço utilizou-se ferramentas de modelagem e classificações geomecânicas.

Os basaltos do Grupo Serra Geral encontram-se no topo da Bacia do Paraná e são a marca dos grandes eventos magmáticos ocorridos durante a fragmentação do Gondwana e abertura do Atlântico Sul, no Cretáceo Inferior (MILANI *et al.* 2007). Sua morfologia é de suma importância para a geotecnia, pois a interface entre dois derrames basálticos pode gerar feições a serem consideradas nas análises de estabilidade. Ademais, a maneira que o derrame flui em superfície também condiciona a formação de descontinuidades quando diferentes taxas de efusão levam a diferentes morfologias de derrames (JERRAM, 2011).

A importância do estudo de mecânica de rochas para barragens recai em sua litologia (composição mineralógica), estado de alteração/coerência, águas subterrâneas e características dos planos de descontinuidades. Dessa forma, o maciço rochoso deve ser tratado como um meio descontínuo, ou seja, uma assembleia de blocos de rocha intactos separados por vários tipos de descontinuidades. Nas descontinuidades, deve-se frisar o espaçamento, orientação, persistência, rugosidade, percolação, abertura e preenchimento (COSTA, 2012). O RMR (*Rock Mass Rating*), desenvolvido por Bieniawski (1973) trata de agrupar todas estas propriedades em classes a fim de avaliar de forma mais assertiva e atribuir parâmetros de resistência para as diferentes zonas do maciço.

A fim de diminuir o grau de incerteza sobre o maciço rochoso em obras de engenharia são realizados modelos geológicos, geológico-geotécnicos e geomecânicos, de modo que sejam capazes de identificar condicionantes geológicas que possam interferir em qualquer fase da obra (ABGE, 2021).

Espera-se que com o fluxo de trabalho criado seja possível criar modelos tridimensionais coerentes com a geologia local e que as seções geomecânicas e análise estrutural possa auxiliar na análise de estabilidade das estruturas quanto a ruptura pela fundação.

2 OBJETIVOS

Nas seções abaixo estão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos deste Trabalho de Conclusão de Curso.

2.1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é criar um modelo geológico-geotécnico coerente que seja capaz de compartimentar o maciço rochoso em classes, de modo que seja possível sinalizar zonas com material de pior qualidade para facilitar a tomada de decisão em planos de escavação e análises de estabilidade das estruturas.

2.1.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos são colocados:

- i. Criar modelo geológico e geológico-geotécnico coerente com a geologia regional, dispondo espacialmente os derrames basálticos;
- ii. Analisar a orientação das descontinuidades com relação ao eixo do barramento;
- iii. Zonear o maciço rochoso para indicar classes geomecânicas e comparar com documentos de obra;
- iv. Analisar estatisticamente as notas de classificação geomecânica por litotipo;
- v. Discutir seções geológicas e geomecânicas, correlacionando com exigências de projetos de engenharia e outros estudos de caso.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A mecânica de rochas diferencia-se de outros campos da engenharia por tratar com um material naturalmente pré-estressado ao longo do tempo geológico. Essa ampla escala de tempo condiciona as rochas a diversos processos tectônicos, intempéricos e termais o que confere a elas alto grau de anisotropia, heterogeneidade e descontinuidade (HUDSON, 1997).

A rocha intacta é o menor elemento de bloco rochoso não cortado por nenhuma descontinuidade, formado por um agregado de minerais de ocorrência natural na crosta terrestre. Possui alta resistência a cargas e relativa baixa porosidade intersticial por se tratar de um material altamente cimentado (SINGH, GOEL; 2011).

Segundo a ISRM (1978), descontinuidades compreendem juntas, falhas, contatos e acamamentos que correspondem a quebras nos maciços rochosos. Essas feições possuem baixa ou nenhuma resistência a tração, além de permitirem a passagem de água com maior facilidade.

Como as rochas intactas, naturalmente, são materiais com alta coesão e ângulo de atrito, as propriedades do maciço rochoso irão depender principalmente em sua rede de fissuras, e não de sua formação mineralógica. O efeito de uma descontinuidade no maciço é levar a resistência à tração a praticamente zero na direção perpendicular ao plano de fratura e diminuir a resistência ao cisalhamento na direção paralela do plano de descontinuidade (MARQUES, 2022).

Desta forma, o maciço rochoso será tratado como uma assembleia de blocos de rocha intactos separados por vários tipos de descontinuidades. Torna-se evidente, pelas características citadas, que as propriedades da rocha intacta ficarão em segundo plano, quando comparadas às descontinuidades para os problemas de engenharia (BIENIAWSKI, 1989).

3.1 CARACTERIZAÇÃO E PROPRIEDADES DOS MACIÇOS ROCHOSOS

Para o melhor controle sobre os parâmetros de caracterização do maciço rochoso, é de suma importância a padronização de suas propriedades, pois gera efeitos positivos na qualidade das investigações e comunicação entre profissionais. Além disso, facilita a futura classificação e modelagem geológico-geotécnica.

3.1.1 Grau de Alteração

O grau de alteração é um indicador do estágio de modificação da rocha frente aos processos de intemperismo físico e químico. De modo geral, quanto maior o grau de alteração,

maior será a redução de resistência mecânica, maior deformabilidade, porosidade e absorção de água (Quadro 3-1) (ABGE, 2021).

Quadro 3-1. Graus de alteração dos materiais rochosos

Grau	Designação	Características
A1	Rocha Sã	Sã ou praticamente sã. Alteração mineralógica nula ou incipiente. Cor original intacta. Escavável a fogo e perfuração com rotativa
A2	Rocha Alterada Dura	Alteração mineralógica perceptível. Cores esmaecidas e pequenas transformações físico-químicas. Escavável a fogo e perfuração com rotativa.
A3	Rocha Alterada Mole	Alteração mineralógica acentuada. Cores parcialmente modificadas e intensa transformação físico-química. Escavável a picareta ou esscarificador e perfuração com trépano e lavagem.
A4	Solo de Alteração	Alteração mineralógica praticamente completa. Cores totalmente modificadas e transformação físico-química completa, exceto minerais resistentes. Escavável a enxadão e perfuração a percussão.

Fonte: Themag (2012 apud ABGE, 2021)

3.1.2 Coerência

O grau de coerência avalia a resistência da rocha por meio de esforços provocados por pressão dos dedos (friabilidade), resistência ao risco (dureza) e resistência ao impacto (tenacidade) (Quadro 3-2) (ABGE, 2021).

Quadro 3-2. Grau de coerência de materiais rochosos

Grau	Designação	Características
C1	Coerente	Quebra com relativa facilidade ao golpe de martelo em vários fragmentos com bordas que podem ser quebradas pela pressão dos dedos. A lâmina de aço provoca um sulco pouco acentuado na superfície do fragmento. Características mecânicas boas.
C2	Medianamente Coerente	Quebra com relativa facilidade ao golpe de martelo em vários fragmentos com bordas que podem ser quebradas pela pressão dos dedos. A lâmina de aço provoca um sulco pouco acentuado na superfície do fragmento. Características mecânicas boas.
C3	Pouco Coerente	Quebra facilmente ao golpe de martelo, produzindo muitos fragmentos que podem ser quebrados manualmente. A lâmina de aço produz sulcos profundos na superfície do fragmento. Características mecânicas baixas.
C4	Incoerente	Esfarela ao golpe de martelo e desagrega sob a pressão dos dedos. Pode ser cortado por lâmina de aço. Friável. Características mecânicas muito baixas.

Fonte: Themag (2012 apud ABGE, 2021)

3.1.3 Paredes e Preenchimento

O preenchimento é o termo usado para descrever um material que preenche espaço entre as paredes da descontinuidade, enquanto a resistência das paredes é medida por meio da análise do estado de alteração da rocha nas paredes das descontinuidades (Quadro 3-3).

Quadro 3-3. Características do preenchimento das descontinuidades

Sigla	Características
P1	Contato rocha-rocha. Paredes sãs.
P2	Contato rocha-rocha. Presença de material pétreo rijo, como calcita e sílica.
P3	Paredes de alteração incipiente, com sinais de percolação de água. Preenchimento ausente
P4	Paredes alteradas. Preenchimento ausente.
P5	Paredes alteradas. Com preenchimento.

Fonte: IPT (1997 apud ABGE, 2021)

A presença de preenchimentos pode ter significativos efeitos sobre a resistência das descontinuidades, de modo que é importante que elas sejam corretamente identificadas e descritas. Wyllie e Norrish (1996) dividiram os materiais de preenchimento em argilas e zonas de falha/brecha. Nas argilas as medidas de ângulo de atrito e coesão variaram de 8° a 20° e 0 a

200 kPa, respectivamente. Enquanto nos materiais brechados/falhados o ângulo de atrito variou de 25° a 45° e coesão de 0 a 100kPa.

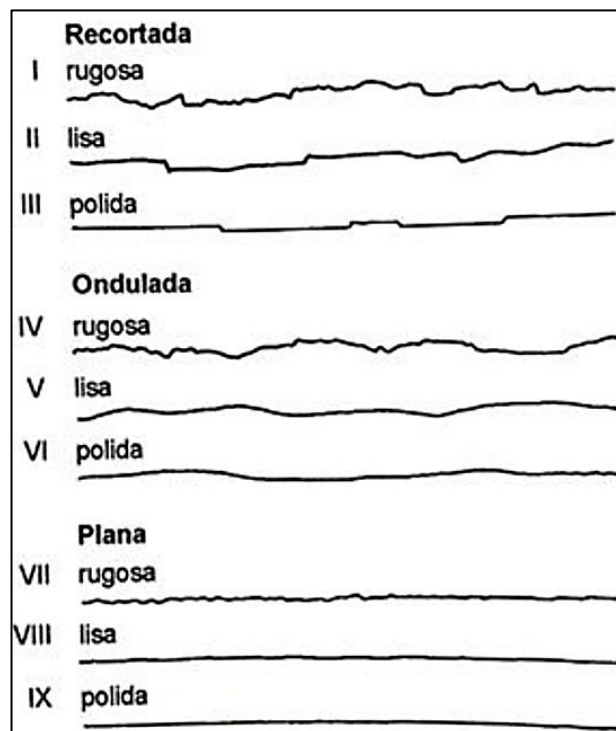
O aumento do ângulo de atrito em materiais brechados ou falhados se dá por conta das propriedades mecânicas de materiais não coesos: em ensaios drenados quanto menor o índice de vazios, maior o atrito; o aumento da angularidade da partícula também confere um acréscimo no ângulo de atrito.

3.1.4 Rugosidade

A rugosidade corresponde a morfologia das paredes das discontinuidades, sendo importante na sua resistência ao cisalhamento principalmente nos casos em que não estão preenchidas.

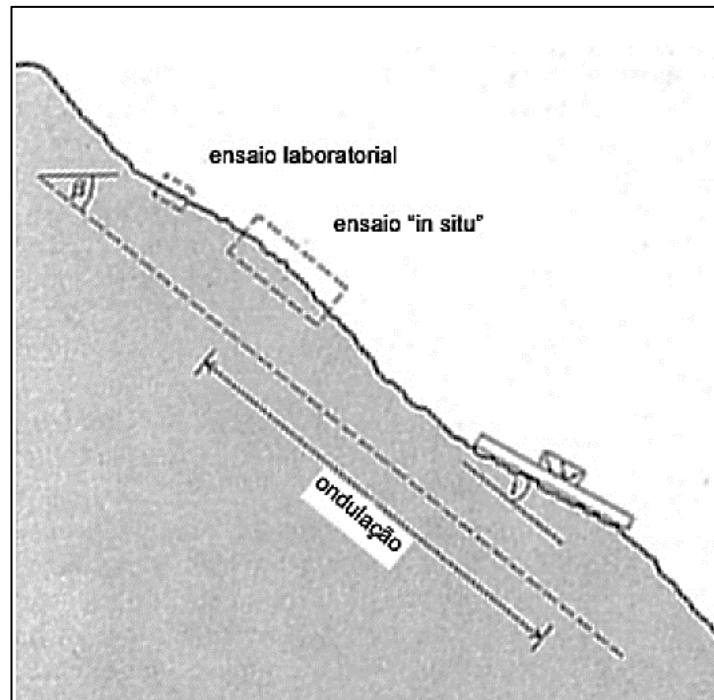
As nove categorias de rugosidade, definidas pela ISRM (1978), são caracterizadas tanto pela curvatura, quanto pela aspereza (Figura 3-1). A primeira trata de ondulações de grande escala, enquanto a segunda se refere às irregularidades da superfície em pequena escala, como mostra a Figura 3-2.

Figura 3-1. Classificação sugerida para a caracterização da rugosidade das discontinuidades



Fonte: Traduzido de ISRM (1978)

Figura 3-2. Efeito de escala na medição da rugosidade. Na escala de maior detalhe mede-se a aspereza, enquanto na escala macro analisa-se a ondulação.



Os ângulos de rugosidade efetivos contribuem para a resistência ao cisalhamento, de modo que, quanto mais ondulado e áspero maior a resistência ao cisalhamento por conta do aumento de fricção entre as paredes. Vale ressaltar que uma mesma descontinuidade pode apresentar valores distintos por conta da direção de medição, já que, ao estudar um problema de análise ao escorregamento, deve ser conhecido o provável sentido do movimento (ISRM, 1978).

Outra forma de obtenção da rugosidade é por meio da atribuição de um valor, denominado coeficiente de rugosidade (*JRC- joint roughness coefficient*), conforme Figura 3-3. Barton e Choubey (1977) sugere um método de estimativa de resistência ao cisalhamento da junta baseado no JRC, expresso por meio da equação a seguir.

$$\frac{\tau}{\sigma_n} = \tan \left[JRC \log \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right] + \phi_r$$

Na equação ϕ_r corresponde ao ângulo de atrito residual, σ_r é a tensão normal atuando na junta e JCS é a resistência à compressão simples das paredes.

Figura 3-3. Valores de JRC estimados para cada situação de rugosidade.

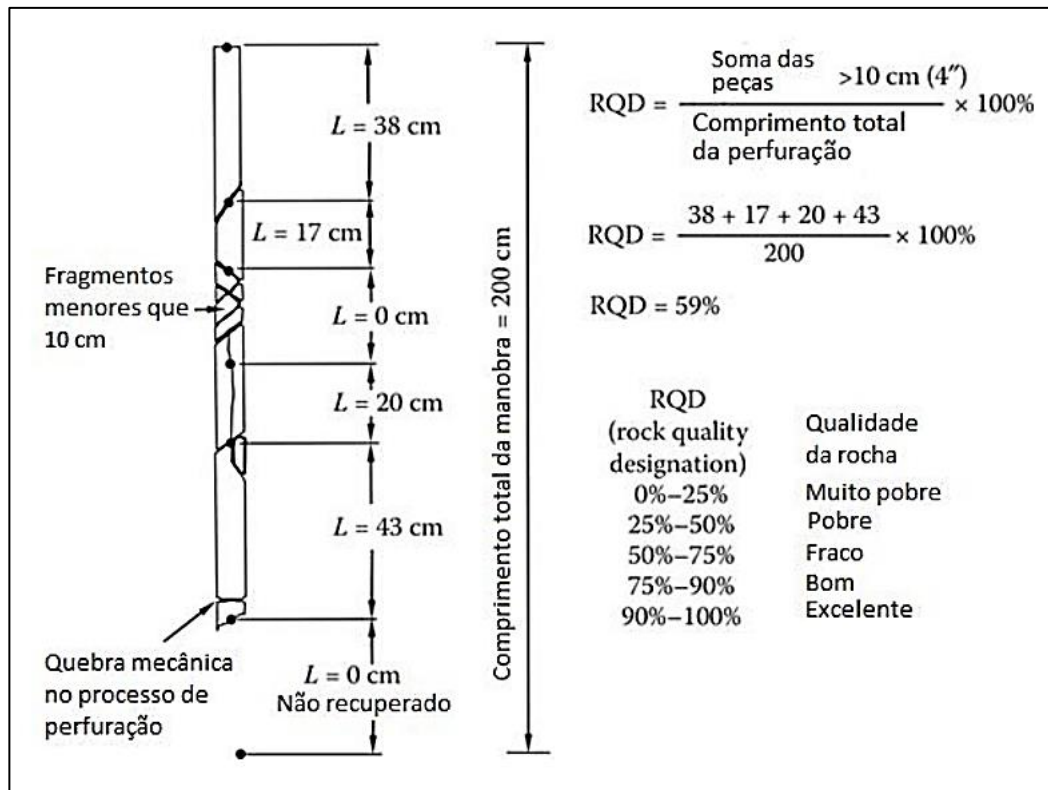
	JRC = 0-2
	JRC = 2-4
	JRC = 4-6
	JRC = 6-8
	JRC = 8-10
	JRC = 10-12
	JRC = 12-14
	JRC = 14-16
	JRC = 16-18
	JRC = 18-20

Fonte: ISRM (1978)

3.1.5 Rock Quality Designation (RQD)

O índice de qualidade da rocha (RQD - *Rock Quality Designation*) foi desenvolvido por Deere (1967) oferecendo uma avaliação quantitativa do maciço rochoso, com base no fraturamento de testemunhos de sondagens rotativas, possuindo alta correlação com grau de fraturamento. É definido como o somatório das peças maiores que 10 cm de comprimento dividido pelo comprimento do trecho amostrado (Figura 3-4).

Figura 3-4. Forma de cálculo do RQD e as classes de qualidade da rocha designadas



Fonte: Traduzido de Deere (1967)

Assim, o RQD sinaliza zonas em que a rocha está mais fraturada, indicando a necessidade de mais investigações no local. Apesar de ser um dos principais dados de entrada na classificação geomecânica, não fornece uma descrição adequada das características das discontinuidades como orientação, preenchimento e abertura, sendo importante sua integração com outras propriedades.

3.1.6 Condutividade Hidráulica

O ensaio de perda d'água (EPA) é derivado do Ensaio de Lugeon e tem como objetivo a determinação da permeabilidade do maciço rochoso frente à percolação através de suas fissuras. Segundo o manual da ABGE escrito por Oliveira *et al.* (1975), o ensaio consiste medição da quantidade de água percolada em um furo de sondagem a determinada pressão em um intervalo de tempo específico. A água é injetada em diversos estágios de pressão diferentes e cada um deles é mantido o tempo necessário para que se tenham condições de fluxo permanentes.

Usualmente, é adotada a classificação da ABGE (1983) a qual divide esses valores em cinco faixas diferentes, com base nos valores de perda d'água específica e condutividade hidráulica (Tabela 3-1).

Tabela 3-1. Faixas de permeabilidade correlacionando valores de ensaio de perda d'água com condutividade hidráulica e condições das descontinuidades do maciço rochoso.

Faixas	Perda d'água Específica (l/min/m/kgf/cm ²)	Condutividade Hidráulica (cm/s)	Permeabilidade	Condições das Descontinuidades
H1	< 0,10	$k < 1 \times 10^{-5}$	Muito Baixa	Muito fechadas
H2	0,10 - 1,00	$1 \times 10^{-5} < k < 1 \times 10^{-4}$	Baixa	Fechadas e algumas abertas
H3	1,00 - 5,00	$1 \times 10^{-4} < k < 5 \times 10^{-5}$	Média	Algumas abertas
H4	5,00 - 10,00	$5 \times 10^{-4} < k < 1 \times 10^{-3}$	Alta	Muito abertas
H5	> 10,00	$k > 1 \times 10^{-3}$	Muito Alta	Abertas e pouco espaçadas com vazios

Modificado de: ABGE (1983)

Como, frequentemente, a capacidade de carga de maciços rochosos é alta, um dos pontos fundamentais a serem analisados nos maciços rochosos para fundações de barragens de concreto é a sua condutividade hidráulica. A permeabilidade das rochas aumenta o efeito de compressão o que pode comprometer a estabilidade global da estrutura (LOPES, 2020).

Segundo Oliveira (1980), em maciços rochosos, a porosidade predominante é a de fraturas, onde as dimensões longitudinais são superiores à sua abertura. Essa porosidade, chamada de secundária, corresponde a um meio fissurado em que as fraturas são utilizadas como termo genérico, pois podem se tratar de juntas, contatos ou falhas. Essas descontinuidades tornam-se o caminho preferencial de percolação da água e a permeabilidade global do maciço rochoso corresponde à dos grupos de fraturas.

Dessa forma, Serafim (1968) apresentou uma comparação entre a porosidade primária e secundária de um arenito: a permeabilidade (em cm/s) da rocha intacta variou entre $1,6 \times 10^{-9}$ e $1,2 \times 10^{-7}$, enquanto a permeabilidade do maciço rochoso do mesmo arenito apresentou condutividade média de 10^{-4} . Ademais, Cruz (1996) afirma que a condutividade hidráulica de rochas ígneas maciças está na ordem de 10^{-12} , ao passo que a permeabilidade de uma única descontinuidade com abertura de 0,5 mm é 0,1 m/s.

Nesse contexto, o escoamento de água por dentro dos maciços rochosos ocorre preponderantemente por meio das descontinuidades principais com baixa resistência ao atrito que se opõe ao deslocamento do fluido (ANDRADE, 1988). O autor demonstra que a

interconectividade das fraturas tem pouca relevância na permeabilidade global do maciço quando comparado às vazões encontradas nas descontinuidades principais. Além disso, o grau de fraturamento não implica, necessariamente, na baixa ou alta permeabilidade do maciço, pois descontinuidades preenchidas impedem a passagem de água.

3.2 CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS

Os métodos de classificação de maciços rochosos são desenvolvidos a partir dos estudos empíricos, e têm sido usados ao redor do mundo nos mais diversos projetos de engenharia.

O primeiro método reconhecido foi o de Terzaghi (1946) o qual mostrou-se de grande valia para a abertura de túneis com suportes metálicos. A classificação de Lauffer (1958) é de grande relevância até os dias de hoje, já que introduziu o conceito de período de estabilidade para o caso de túneis e sua necessidade de suporte. Um novo método foi desenvolvido por Deere *et al.* (1967) para mensurar a quantidade de fraturas ao longo de um furo de sondagem. A partir disso, outras classificações surgiram entre elas o RMR (*Rock Mass Rating*) de Bieniawski (1973) e *Geological Strenght Index* (HOEK; BROWN, 1997).

Assim, as classificações de maciços rochosos são utilizadas para atribuir notas para os maciços rochosos por meio de um conjunto de propriedades identificadas por observação direta, ensaios *in situ* ou testemunhos de sondagem.

3.2.1.1 *Rock Mass Rating* (RMR)

Desenvolvido por Bieniawski em 1973, o RMR é um dos métodos mais aceitos e utilizados para classificação de maciços rochosos. Pode ser aplicado em diversas práticas de engenharia como abertura de túneis, estabilidade de taludes, mineração e fundações. Tem o objetivo de obter parâmetros geotécnicos e estimativas de redução de resistência nos mais diversos modelos geológicos.

O sistema leva em consideração seis parâmetros principais:

- I. Resistência uniaxial do material rochoso;
- II. RQD;
- III. Espaçamento das descontinuidades;
- IV. Condição das descontinuidades;
- V. Condição das águas subterrâneas;
- VI. Orientação das descontinuidades.

A classificação do maciço é o resultado da soma das notas dadas para cada um dos parâmetros mencionados. O valor calculado deve ser corrigido de acordo com a direção e o mergulho das famílias de descontinuidades presentes no maciço. Assim, os valores de RMR são divididos em 5 classes variando de muito pobre a muito bom em um intervalo de 0 a 100, possibilitando a estimativa de parâmetros de resistência como visto nos quadros a seguir.

Quadro 3-4. Classificação geomecânica RMR para maciços rochosos fraturados

1	Resistência do material intacto	Resistência à compressão puntiforme (MPa)	> 10	4 - 10	2 - 4	1 - 2	Para esse intervalo é preferível o ensaio de compressão uniaxial		
		Resistência à compressão uniaxial (MPa)	>250	100 - 250	50 - 100	25 - 50	5 - 25	1-5	< 1
	Nota	15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD (<i>Rock Quality Designation</i>)	90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	<25			
	Nota	20	17	13	8	3			
3	Espaçamento das Descontinuidades	>2 m	0.6 - 2 m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm			
	Nota	20	15	10	8	5			
4	Condições das Descontinuidades	Superfície muito rugosas, descontínuas, sem separação e paredes intactas	Superfície pouco rugosas e paredes pouco alteradas	Superfícies pouco rugosas com paredes muito alteradas	Superfícies com <i>slickenside</i> ou preenchimento menor que 5 mm de espessura	Preenchimento com material mole ou separação maior que 5 mm			
		Nota	30	25	20	10	0		
5	Água Subterrânea (presença de água)	Completamente Seco	Úmido	Molhado	Gotejando	Fluindo			
		Nota	15	10	7	4	0		

Fonte: modificado de Bieniawski (1989)

Quadro 3-5. Fator de correção com relação à orientação das descontinuidades

Orientação das Descontinuidades		Muito Favorável	Favorável	Regular	Desfavorável	Muito Desfavorável
Notas	Túneis e Minas	0	-2	-5	-10	-12
	Fundações	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Fonte: modificado de Bieniawski (1989)

Quadro 3-6. Compartimentação em classes de maciço conforme a nota obtida

Soma das notas	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20
Classes RMR	I	II	III	IV	V
Descrição	Rocha muito boa	Rocha boa	Rocha regular	Rocha pobre	Rocha muito pobre

Fonte: modificado de Bieniawski (1989)

Quadro 3-7. Coesão e ângulo de atrito das 5 classes de maciço

Classe RMR	I	II	III	IV	V
Coesão do maciço (kPa)	> 400	300 - 400	200 - 300	100 - 200	< 100
Ângulo de atrito do maciço	> 45°	35° - 45°	25° - 35°	15° - 25°	< 15°

Fonte: modificado de Bieniawski (1989)

3.2.1.2 Módulo de Deformabilidade

A deformabilidade é a propriedade de um sólido de alterar sua forma como reação às forças atuantes sobre ele. Sua deformação pode ser permanente ou elástica, a depender da intensidade do carregamento aplicado (Vallejo, 2002).

Em seu trabalho de 1973, Bieniawski estimou uma fórmula correlacionando o valor de RMR com o módulo de elasticidade dada por:

$$E_M = 2RMR - 100$$

No entanto, Serafim e Pereira (1983) notaram que os resultados obtidos apenas eram satisfatórios quando os valores de RMR se encontravam acima de 50. Caso contrário ($RMR < 50$), a fórmula não se aplica, pois leva a valores de módulo de deformabilidade (E_M) menores

que zero. Isto levou esses autores a formularem uma nova correlação empírica para o módulo de deformabilidade em maciços com menor qualidade:

$$E_M = 10^{(RMR-10)/40}$$

3.3 BARRAGENS

Barragens são estruturas artificiais que têm como objetivo principal a acumulação de água e a criação de um reservatório. Possuem diversas funções como: geração de energia elétrica, abastecimento de água, navegação, irrigação, controle de vazões e lazer.

Quanto ao material construtivo existem, basicamente, dois tipos de barragem: concreto e aterro. A escolha de qual tipo de barragem deve ser implementada depende dos seguintes critérios:

- Forma do vale;
- Geologia;
- Disponibilidade de material de construção;
- Condições climáticas;
- Condições hidrológicas e cheias;
- Sismicidade;

Segundo Lopes (2020), nas barragens de terra as principais preocupações são as condições de fluxo interno, estabilidade de taludes e as deformações no corpo de barragens zoneadas. Já no caso das de concreto, as atenções devem estar voltadas principalmente para a estabilidade global da estrutura, deslocamentos, resistência de massa e interface fundação barragem.

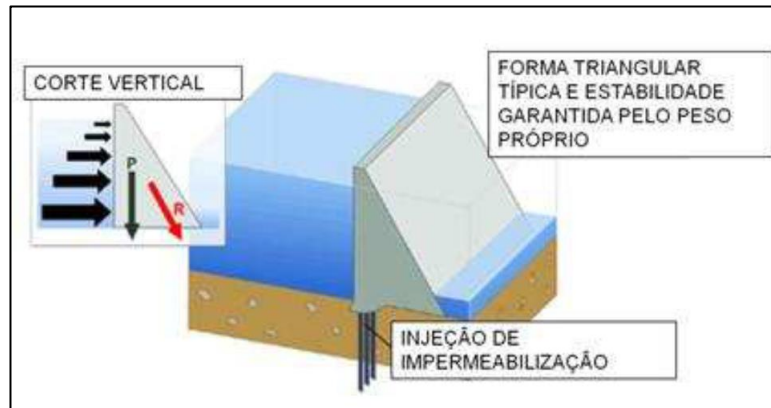
Ao contrário de túneis e atividades de mineração profundas nas quais a estabilidade é calculada com base, principalmente, nas tensões naturais do maciço, em fundações de barragens as descontinuidades próximas a superfície governam a estabilidade das estruturas (HUDSON, 1997).

3.3.1 Barragem de Concreto

As barragens de concreto podem ser compartimentadas em gravidade, contraforte e arco. Os barramentos de concreto do tipo gravidade têm geometria típica triangular com a finalidade de resistir ao empuxo de água e a sua estabilidade é garantida pelo peso próprio, como visto na Figura 3-5 (COSTA, 2012). Por se tratar de uma barragem totalmente construída em concreto são necessárias grandes escavações e alto volume de concreto, além de bom monitoramento dos recalques, pois esse material possui baixa resistência à tração. As

fundações desse tipo de barragens precisam ser competentes para receber a carga do concreto e as subpressões consistem, também, em um fator preponderante a ser analisado.

Figura 3-5. Esquema típico de uma barragem concreto gravidade



Fonte: ENGEVIX (2013)

No âmbito das barragens de concreto existem diversos sistemas construtivos, entre eles está o chamado concreto compactado a rolo (CCR). De acordo com o USBR (2006), o CCR é definido como um concreto que, em sua forma não endurecida, irá suportar um rolo enquanto está sendo compactado.

O material é compactado por meio de várias passadas dos rolos compactadores, de forma que se necessita uma praça relativamente grande para promover a compactação. Este modo de construção confere um ganho na produtividade e diminui os custos de implantação.

3.3.1.1 Esforços Atuantes

No Brasil, as condições de carregamento são definidas pelos critérios de projeto da Eletrobrás (2003) e as ações necessárias são determinadas segundo a NBR 8681 (ABNT, 2003). A estabilidade da barragem deve ser calculada para diversos casos de carregamento em diferentes fases da obra.

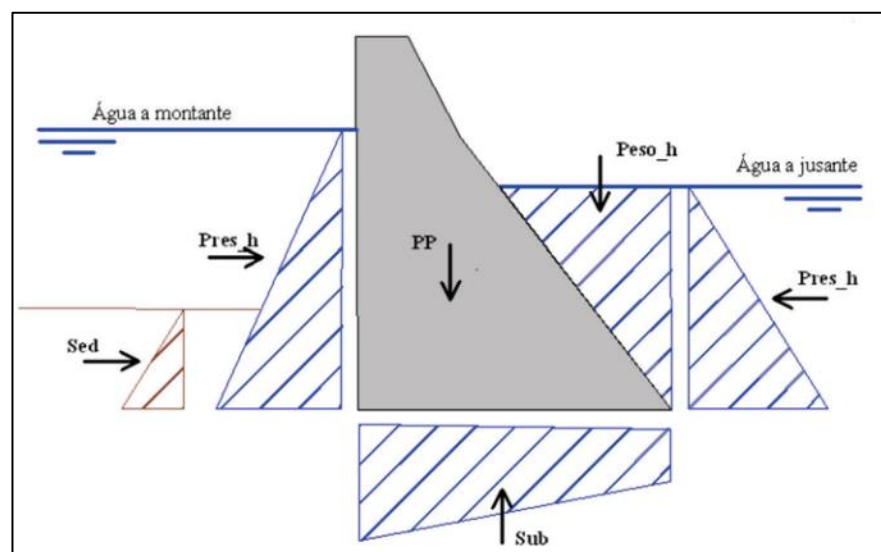
Os esforços em uma barragem de concreto podem ser divididos em verticais e horizontais, detalhados no Quadro 3-8 e indicados na Figura 3-6.

Quadro 3-8. Principais esforços atuantes em uma barragem de concreto

Esforços Verticais	Esforços Horizontais
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Peso próprio da Barragem (PP) ✓ Peso d'água (Peso_h) ✓ Pressão d'água na fundação (Sub) ✓ Pressão intersticial da água no concreto ✓ Sismos 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Empuxo d'água no reservatório (Pres_h) ✓ Esforços de onda ✓ Empuxo devido a assoreamento (Sed) ✓ Sismos

Elaborado pelo autor com base em Lopes (2020)

Figura 3-6. Esforços atuantes em uma barragem de concreto gravidade



Fonte: Modificado de Eletrobrás (2003)

Com base nos esforços que podem atuar em uma barragem, os critérios de projeto da Eletrobrás (2003) definem que as estruturas de barramento devem atender quatro condições, cada uma com seu fator de segurança específico: deslizamento, tombamento, flutuação e capacidade de carga da fundação.

3.3.1.2 Aspectos Geotécnicos em Fundações de Barragem de Concreto

Em geral, barragens de concreto estão assentadas sobre um maciço rochoso são. Essa quase exigência se dá por conta do elevado peso da estrutura do barramento e sua baixa aceitação de recalques. Por isso busca-se por fundações que possuam dois parâmetros mecânicos principais: alta capacidade de carga e módulo de elasticidade. Esses parâmetros são muito superiores em rochas sãs quando comparado a rocha alterada e solos em geral, de modo que é muito comum rebaixar-se as cotas de escavação até encontrar um topo de rocha desejável para o apoio das estruturas (LOPES, 2020).

Para a caracterização da rocha de fundação realiza-se um modelo geomecânico a fim de estimar valores de tensão admissível, módulo de deformabilidade e condições de percolação de água, bem como a possível presença de descontinuidades relevantes para a estabilidade da estrutura.

3.3.1.3 Subpressões em Barragens de Concreto

As subpressões são pressões intersticiais decorrentes da percolação de água no meio, também denominadas de pressão neutra ou poropressão. Podem ocorrer nas fundações das barragens ou no corpo de concreto.

A determinação da subpressão é fundamental para a análise de estabilidade das estruturas, uma vez que é uma das principais componentes de esforço vertical. Guimarães (1988) afirma que a subpressão atua no sentido de reduzir o peso efetivo da estrutura o que leva a perda de resistência ao cisalhamento.

Conforme Oliveira (2002), em cada ponto do terreno, estando a água em equilíbrio estático, é gerada uma pressão que atua no interior das descontinuidades rochosas equivalente a poropressão. Essa pressão é calculada pelo produto entre a massa específica da água e a altura piezométrica.

No pé de montante do barramento, a subpressão é diretamente influenciada pelo nível d'água no reservatório, correspondendo à altura de água do reservatório. À medida que a água percola pela fundação em direção a jusante da barragem, considera-se que há uma perda de energia gradual até que a subpressão se iguale ao nível d'água do reservatório de jusante (VOLKMER, 2011).

Existem diversos critérios para determinação de subpressões, eles dependem da eficácia dos drenos e cortinas de injeção, permeabilidade do maciço rochoso, nível do reservatório de montante e jusante. O mais usado no Brasil é o da Eletrobrás (2003) o qual descreve a forma de cálculo para subpressões na interface concreto-fundação.

3.4 BASALTOS DO GRUPO SERRA GERAL

A Bacia Paraná localiza-se na Plataforma Sul-Americana, abrangendo partes da Argentina, Brasil, Paraguai e Uruguai com formato alongado na direção NE-SW. Foi desenvolvida do Siluriano ao Cretáceo, sendo preenchida por rochas sedimentares e vulcânicas ao longo dos seus 1.5 milhões de km². Milani *et al.* (2007) afirma que se trata de uma bacia sedimentar flexural do tipo intracratônica com mais de 7 km de espessura.

Para Milani e Ramos (1998), a estratigrafia da Bacia do Paraná é dividida em seis unidades. Três compreendem ciclos de transgressão-regressão do Paleozoico: Rio Ivaí, Paraná e Gondwana I, enquanto os outros três correspondem a pacotes sedimentares de origem continental e rochas ígneas associadas: Gondwana II, Gondwana III e Bauru (Figura 3-7).

No ciclo Gondwana III (Neojurássico-Berriasiano) ocorrem, no registro estratigráfico, os sedimentos eólicos da Formação Botucatu e os derrames vulcânicos do Grupo Serra Geral.

Figura 3-7. Estratigrafia do ciclo Gondwana III

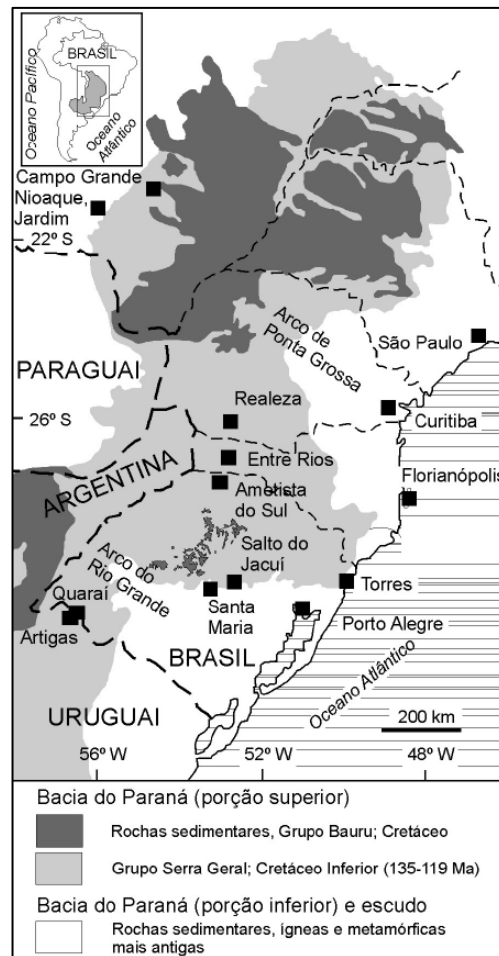


Fonte: Milani *et al.* (2007)

Segundo Milani *et al.* (2007), a Formação Botucatu é formada por arenitos médios a finos de elevada esfericidade, róseos e estratificação cruzada tangencial. Sua deposição em ambiente eólico é claramente visível por conta de sua estruturação e por, localmente, apresentar ventifactos.

Após o episódio de deposição do arenito Botucatu, a Bacia do Paraná sofreu um intenso vulcanismo fissural que constituiu uma extensa província magmática. Essa província, segundo Milani *et al.* (2007), é a maior manifestação ígnea não oceânica da história do planeta e contribuiu em larga escala para a geração de crosta continental na terra. Esse grande evento magmático é chamado de Província Vulcânica Paraná. Dentro dessa província magmática insere-se o Grupo Serra Geral, recobrendo mais de 917.000 km² da região sudeste da América do Sul com espessura máxima registrada de 1755 m (MELFI *et al.*, 1988) (Figura 3-8). Parte dessa província (aproximadamente 1%) permaneceu na África durante a abertura do oceano atlântico, e conseqüente separação do supercontinente Gondwana, sendo denominada Província Etendeka. (HARTMAN, 2014).

Figura 3-8. Localização da Bacia do Paraná com as porções do Grupo Serra Geral em destaque



Fonte: Hartman (2014)

No Grupo Serra Geral, 95% das rochas são basaltos, andesito basáltico e andesitos e 5% de rochas com composição mais ácida como riolitos e riolitos. A grande maioria dos derrames são do tipo *pahoehoe* com estrutura de crosta inferior e superior amigdaloidais ou vesiculada com núcleo maciço (WAICHEL, 2006).

Para Bellieni (1983), os derrames basálticos, frequentemente, possuem disposição sub-horizontal (com leve inclinação de até 5°) em direção ao centro da bacia. Localmente, podem existir inclinações maiores por conta da paleotopografia ou tectonismo.

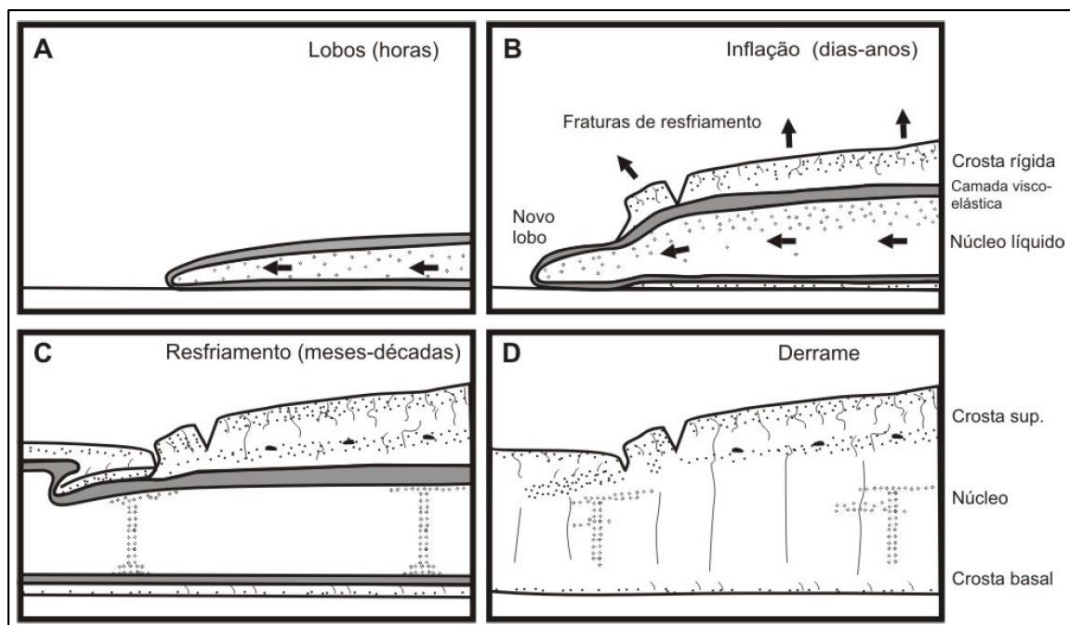
3.4.1 Evolução dos Derrames de Lavas Básicas

Os derrames de lava podem ser formados por magmas de diversas composições, conforme o teor de SiO₂ aumenta, o líquido magmático torna-se mais viscoso o que leva a menor

mobilidade do fluxo de lava. Esta diferença nas taxas de efusão do fluxo é o principal fator de controle na morfologia dos derrames (WAICHEL, 2006).

Nos derrames basálticos, menos viscosos, o mecanismo de inflação é essencial para entender como os eles se desenvolvem. Acompanhando pela Figura 3-9, a partir do início do fluxo a zona superficial da lava resfria criando uma crosta e isolando a parte inferior da lava assim, à medida que o derrame avança, a crosta superior vai se tornando mais grossa e com a lava sendo bombeado na porção inferior, o derrame como um todo vai se tornando mais espesso. Esse é o processo que permite que a lava fresca e quente alcance a parte dianteira do derrame formando lobos e percorrendo grandes distâncias (JERRAM, 2011).

Figura 3-9. Fases do mecanismo de inflação em derrames básicos



Fonte: Modificado de Self *et al.* (1998)

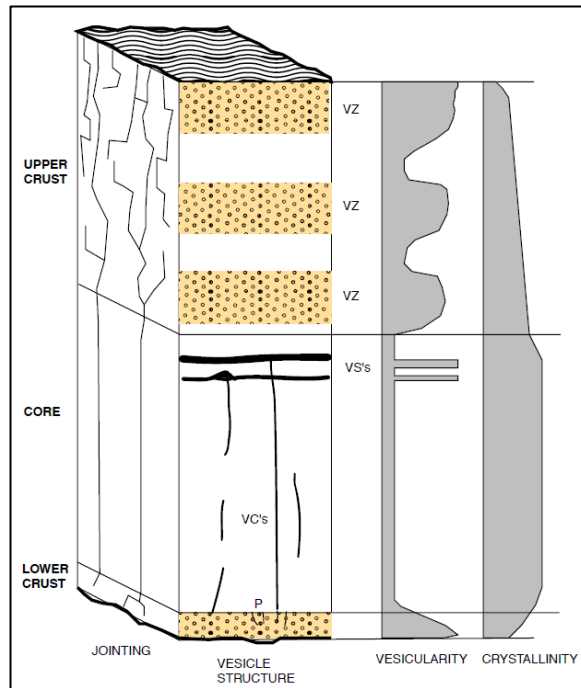
3.4.2 Morfologia de Derrames Basálticos

Segundo Macdonald (1953) os derrames podem ser divididos em *pahoehoe*, aa e lava em bloco.

Os tipos de derrame *pahoehoe* caracterizam-se por possuir estruturas em corda onde a crosta da superfície do derrame é enrugada pela lava que flui por baixo dela. Na Figura 3-10 tem-se uma seção esperada dos derrames *pahoehoe*. Nota-se a divisão em três seções, bem como o grau de vesicularidade, cristalinidade e formação de juntas. Na crosta superior do derrame encontra-se alternância de horizontes vesiculados e disjunções irregulares. Já no núcleo ocorrem poucas vesículas, porém disjunções verticalizadas. A crosta inferior possui um

horizonte altamente vesiculado, poucas disjunções e um decréscimo elevado na cristalinidade, sendo comum a presença de vidro vulcânico.

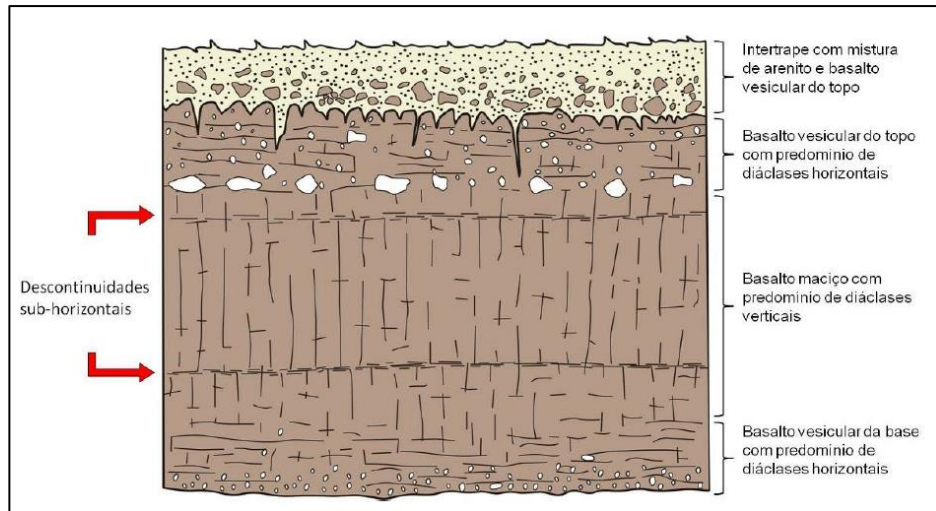
Figura 3-10. Morfologia típica de um derrame *pahoehoe*



Fonte: Self (1998)

Em suma, um derrame basáltico clássico apresenta-se com núcleo maciço caracterizado por basalto denso e disjunções colunares, delimitando o núcleo denso ocorrem basaltos vesiculares amigdaloidais, enquanto no topo, o arraste de material inconsolidado ao longo da evolução do derrame, gera uma brecha basáltica como pode ser visto na Figura 3-11.

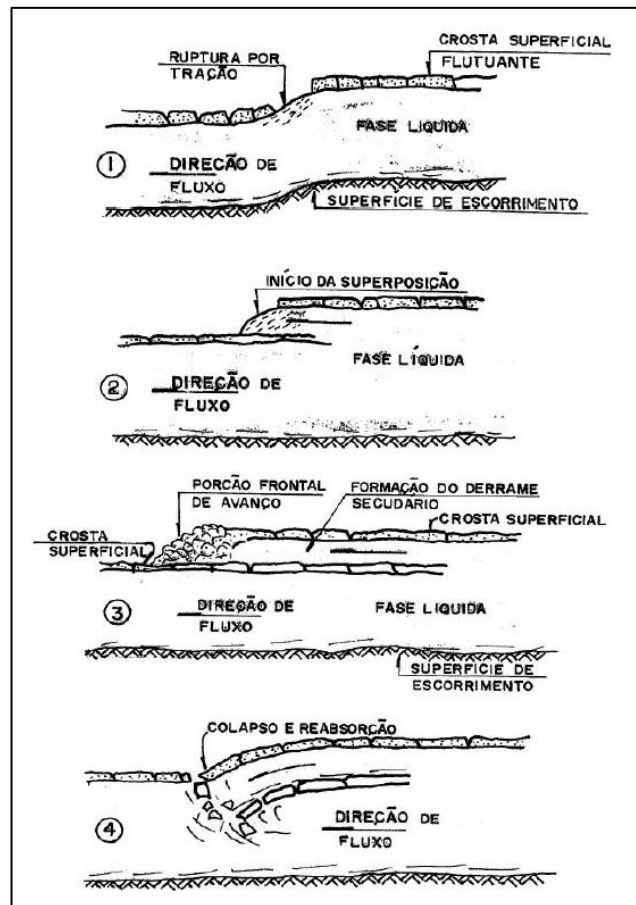
Figura 3-11. Seção de um derrame basáltico com litoestruturas.



Fonte: Curti (2011)

Além dos derrames principais, Souza Júnior (1996) afirma que podem existir derrames secundários (subderrames), com as mesmas características morfológicas do derrame primário, formados pelo extravasamento de “línguas” sobre a crosta do derrame prévio. Como pode ser visto na Figura 3-12, para a formação de um subderrame é necessário um desnível no terreno em que está fluindo o derrame principal, gerando ruptura por tração e ocasionando uma superposição entre o derrame inferior e o superior. Segundo Waichel (2006), essas feições também podem tratar se de lobos de lava pertencentes à porção mais distal da frente de avanço dos derrames.

Figura 3-12. Modelo de formação de um subderrame a partir de um derrame principal



Fonte: Souza Júnior (1996)

Oliveira, Silva e Guidicini (1976) afirmam que as principais discontinuidades que ocorrem em maciços rochosos basálticos são os contatos entre os derrames os quais exibem-se com grande extensão lateral, grande abertura relativa (0,1 mm a 10 cm) e com ou sem preenchimento argiloso.

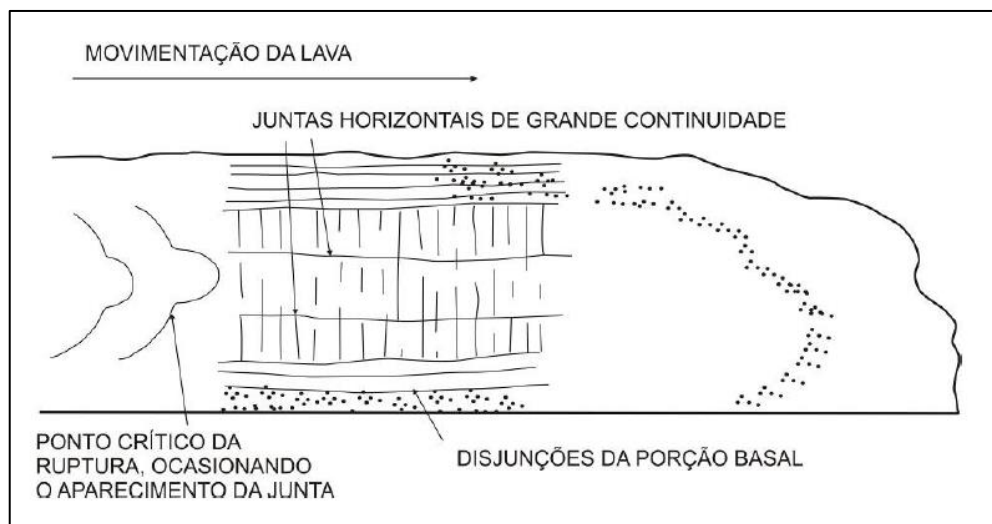
Além dos contatos, outra estrutura de suma importância são as chamadas juntas-falhas sub-horizontais nos corpos dos derrames. Estas estruturas foram amplamente investigadas por diversos autores, em função da difusão de barragens implantadas sobre os derrames basálticos do Grupo Serra Geral.

Inicialmente, Guidicini e Campos (1968) definem as juntas-falhas como feições de difícil enquadramento, já que apresentam características de ambas. De junta, pois ocorrem sem deslocamento relativo das paredes. E de falha, já que exibe material de preenchimento com deslocamento relativo das paredes. Possuem escala centimétrica e podem exibir ramificações em direção ao topo do derrame.

Seu material de preenchimento é variado e pode consistir em fragmentos de basalto, material arenoso de alteração e argila e minerais secundários como sílica e calcita.

A origem mais aceita das juntas-falha está ligada ao movimento relativo entre zonas mais e menos viscosas do derrame, haja visto que, em seu interior, a lava resfria a taxas diferentes gerando uma tensão cisalhante entre os planos das juntas de resfriamento (Figura 3-13). Descontinuidades sub-horizontais de grande porte como estas são de suma importância para fundações de barragens, uma vez que condicionam potenciais planos de ruptura (GUIDICINI; CAMPOS, 1968).

Figura 3-13. Evolução dos derrames em função das diferentes velocidades de fluxo

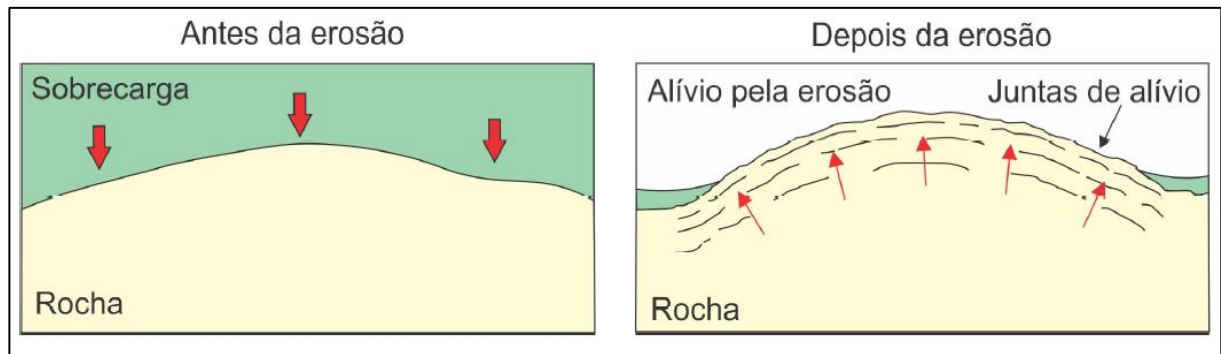


Fonte: Curti (2011)

Em 1979, Guidicini questiona o próprio modelo criado em 1968, pois observa que a movimentação da lava básica não geraria tensões internas por conta da baixa viscosidade. As juntas-falhas estariam sendo formadas como juntas durante o resfriamento da lava e, após a consolidação do derrame, esforços tectônicos compressivos gerariam feições de cisalhamento.

Outras estruturas presentes em maciços rochosos (independente da litologia) podem estar relacionadas à processos erosivos ou escavações em obras de engenharia. A retirada do peso de material sobreposto ao maciço rochoso diminui o σ_3 (tensão normal), podendo promover a abertura de novas juntas e aumentar as já existentes (Hasui *et al.*, 1978) (Figura 3-14).

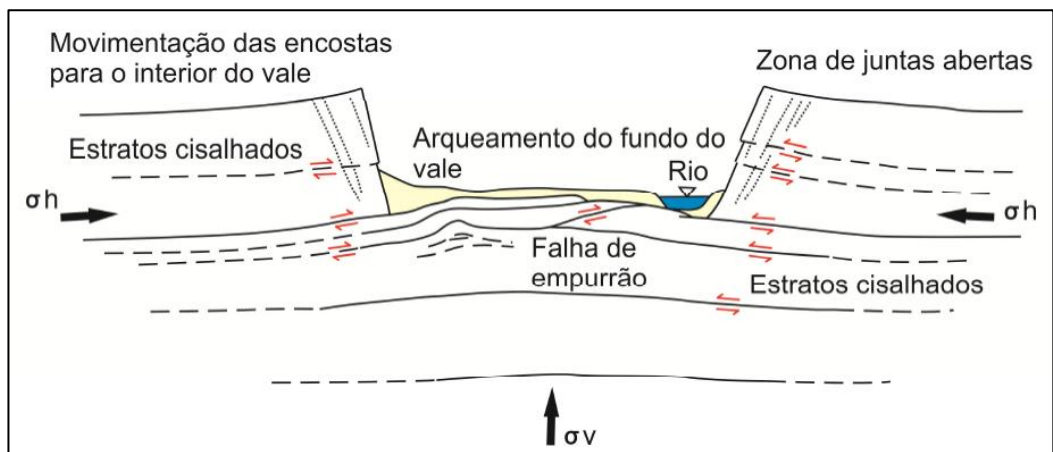
Figura 3-14. Processo de alívio de tensões em função de retirada do material sobreposto ao maciço.



Fonte: Curti (2011)

O processo de erosão em vales fluviais também pode causar deslocamento das paredes do vale, arqueamento e cisalhamento abaixo do leito do rio (Patton e Hendron, 1974). Com base neste conceito Paes de Barros e Guidicini (1981) e Marques Filho e Levis (1981) discutiram a gênese das zonas de cisalhamento encontradas abaixo da calha do rio em basaltos. Com o alívio de tensões verticais, as pressões horizontais atuam como tensões principais, de modo que a rocha sofreria um arqueamento, gerando a uma zona de cisalhamento conjugada com uma falha de empurrão (“falha em bigode” ou inversa) abaixo do leito do rio (Figura 3-15).

Figura 3-15. Seção longitudinal ao leito do rio exibindo feições estruturais associadas ao alívio de tensões verticais causada pela erosão fluvial



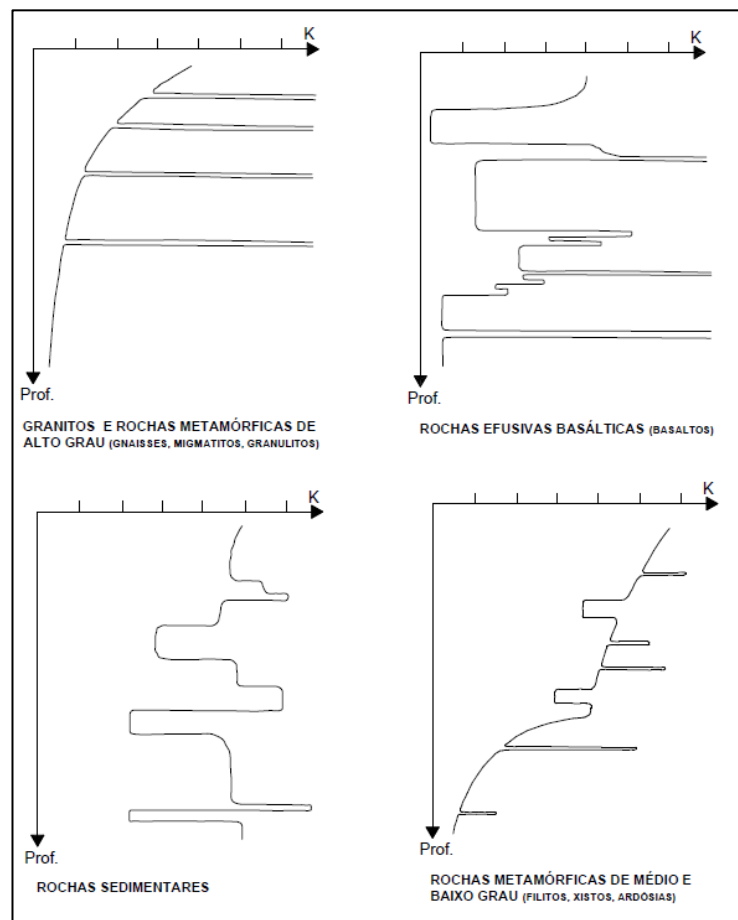
Fonte: Adaptado de Patton e Hendron (1974)

Segundo Curti (2011), zonas de cisalhamento conjugadas abaixo do leito do rio foram identificadas em diversas barragens nos derrames do Grupo Serra Geral, como Foz do Areia (PR) e Itaipu (PR).

3.4.3 Condutividade Hidráulica em Basaltos

Em terrenos basálticos a percolação de água é regida pelas discontinuidades, sendo notáveis os picos de permeabilidade com o aumento da profundidade conforme a água se depara com os contatos entre derrames e juntas-falha, de orientação sub-horizontais, como visto na Figura 3-16.

Figura 3-16. Variação da permeabilidade com a profundidade em maciços fraturados. Destaque para o gráfico das efusivas básicas (basaltos).



Fonte: Azevedo e Albuquerque Filho (1998)

Como a região da Bacia do Paraná possui altos índices pluviométricos durante todo o ano, as condicionantes climáticas não podem ser preteridas. O elevado índice pluviométrico em ambientes tropicais/subtropicais garante altas infiltrações de água durante todo o ano, o que gera um intenso intemperismo químico tornando as rochas da região alteradas próximas a superfície.

Oliveira, Silva e Guidicini (1976) afirmam que nos horizontes de solo mais superficiais o manto de intemperismo que cobre a rocha não possui baixas permeabilidades por se tratar do

solo residual do basalto, formado por argilas chamadas localmente de “terra roxa”. Na zona do contato da rocha alterada com o topo rochoso são, ocorrem permeabilidades mais altas por conta da presença de estruturas reliquias. Já no corpo do derrame, de direção sub-horizontal, têm-se juntas-falhas e faixas fraturadas com ampla percolação de água (10^{-1} a 10^{-3} cm/s), enquanto as juntas verticais têm permeabilidade inferior a 10^{-5} cm/s.

Devido à anisotropia dos maciços quanto a permeabilidade, faz-se necessário seu zoneamento para um melhor entendimento do que ocorre em subsuperfície. Assim, Oliveira, Silva e Guidicini (1976) afirmam ser necessário delimitar zonas hidrogeologicamente homogêneas o que, no caso dos basaltos, significa delimitar os contatos entre os derrames.

3.4.4 Propriedades Mecânicas dos Basaltos do Grupo Serra Geral

Apesar dos maciços rochosos serem intrinsecamente heterogêneos, anisotrópicos e descontínuos, deve-se considerar a escala de estudo do meio rochoso para definir esses parâmetros em maior ou menor grau.

Muitas obras de engenharia foram desenvolvidas sobre os basaltos do Grupo Serra Geral, tornando a literatura sobre este material vasta. Isso possibilitou que houvesse um grande volume de ensaios realizados nesta litologia, bem como seus litotipos, materiais de preenchimento e agregados (CURTI, 2011).

O ensaio de resistência a compressão uniaxial é o ensaio mais usual na determinação da resistência das rochas e é um dos parâmetros de entrada para a maioria das classificações geomecânicas (MARQUES, 2022).

Na Tabela 3-2 nota-se que os maiores valores de resistência ocorrem no basalto denso, seguido pelo basalto vesicular e brecha basáltica. Nos trabalhos referenciados, a brecha basáltica apresenta grande dispersão de valores, uma vez que se caracterizam por serem materiais heterogêneos.

Tabela 3-2. Valores médios de ensaios de resistência a compressão uniaxial nos litotipos basálticos típicos

Litologia	Resistência a Compressão Uniaxial (RCU) (MPa)			
	Melo (2010)	Gobbi (2011)	Oliveira (2012)	Goulart (2019)
Brecha Basáltica	70.00	46.53	1.80 - 94.60	57.40
Basalto Vesicular Amigdaloidal	120.00	151.12	60.00	56.76
Basalto Denso ou Maciço	190.00	135.72	190.70	168.31

3.5 MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO

A partir do levantamento detalhado das características do maciço rochoso por meio dos dados de sondagens e ensaios cria-se um modelo geológico-geotécnico, elegendo características representativas do maciço a fim de estabelecer regiões do maciço mais ou menos favoráveis para as exigências do projeto de engenharia.

O modelo geológico-geotécnico tem a capacidade de identificar condicionantes que possam interferir no projeto, construção, operação ou descomissionamento do empreendimento. A condicionante geológica, também chamada de feição geológica, é um termo de larga abrangência compreendendo elementos do meio físico que possam afetar a estabilidade e estanqueidade das estruturas. Podem ser litologias adversas, falhas, foliação, juntas, irregularidades do topo rochoso, cavidades, rochas friáveis, fluxo de água subterrânea, águas ácidas, entre outros (ABGE, 2021).

3.5.1 Técnicas de Modelagem

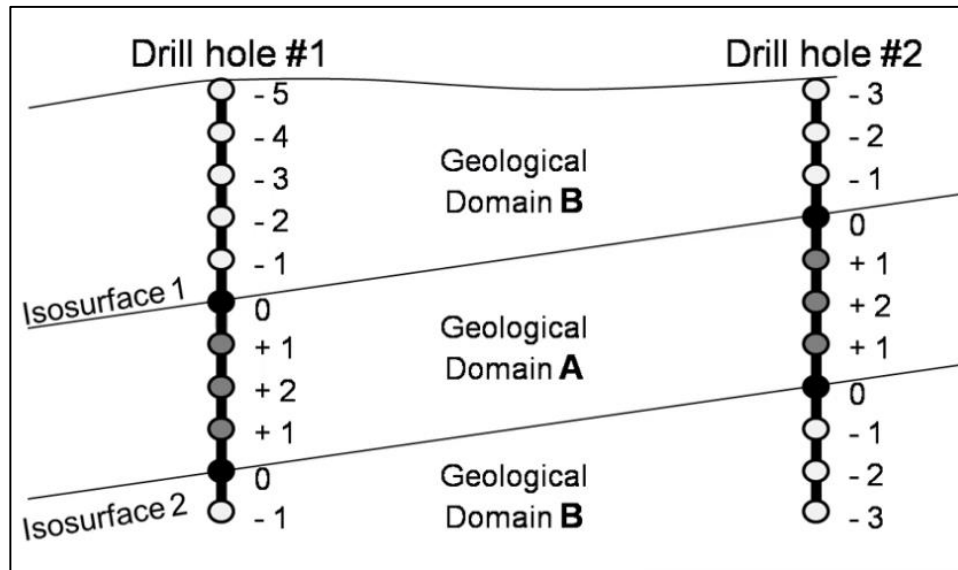
O método mais tradicional em projetos de engenharia para a criação de modelos geológicos-geotécnicos é a modelagem explícita cuja posições de contato entre uma sondagem e outra são definidas manualmente pelo modelador. Após a definição dos contatos as seções são trianguladas a fim de formar um corpo sólido em três dimensões.

Cowan (2003) afirma que, como na modelagem explícita o modelador apenas liga os contatos de forma arbitrária, não é possível incluir o viés estrutural, consome-se muito tempo na junção das linhas e a atualização do modelo com novos dados não é automatizada. Assim, a interpolação no espaço entre um ponto e outro é feita de forma facultativa, dependendo do viés do modelador.

Já a modelagem implícita é dada por uma função volume definida no espaço a partir de dados reais, de modo que não são construídas superfícies diretamente, mas por meio de aproximações finitas. Sua característica mais importante consiste na capacidade de modelar rapidamente formas geométricas mais complexas, além da capacidade de integrar diversos modelos com bases de dados distintas.

No método implícito, os pontos de contato litológico definem isosuperfícies com valor zero. Valores dentro do domínio criado possuem sinal positivo, enquanto os que estão fora do domínio sinal negativo (Figura 3-17).

Figura 3-17. Esquema modelagem implícita com criação de isosuperfícies e atribuição de valores para domínios geológicos.



Fonte: Manual Leapfrog Works

Desta maneira, têm-se os dados amostrados convertidos em valores numéricos com superfícies de contato valendo zero, permitindo que a criação dos domínios litológicos possa ser tratada como um problema de interpolação de dados no espaço tridimensional.

Para a modelagem implícita é essencial que exista um método de interpolação que construa a função de criação dos volumes. A função de base radial (RBF) é o método mais prático para a criação da função volume e cria superfícies mais suaves. Ainda segundo Cowan (2003), esta técnica é adaptável a domínios litológicos, pois não existe matemática formal que descreva como se comportam superfícies litológicas, a única regra é que os contatos necessitam ser respeitados.

Outra vantagem da modelagem em ambiente tridimensional é a possibilidade de usar funções geoestatísticas para criar modelos geológicos mais condizentes com a realidade. Em fenômenos naturais, dada uma nuvem de pontos, espera-se que quanto menor a distância de um ponto, maior será sua área de influência. A partir deste conceito nasce a geoestatística cuja principal vantagem é conseguir inferir continuidade espacial de uma variável regionalizada a partir de dois pontos amostrais.

Vale ressaltar que o método de modelagem escolhido são apenas ferramentas diferentes utilizadas para o mesmo propósito. Qualquer método exige uma base de dados coerente, conhecimento e experiência do modelador. No entanto, o método implícito oferece

maior velocidade o que lhe confere a vantagem de testar diferentes suposições e alterar parâmetros com maior dinamicidade (KENTWELL, 2019).

O Quadro 3-9 elenca as vantagens da modelagem implícita em *software* de modelagem tridimensional frente ao uso da modelagem tradicional (explícita).

Quadro 3-9. Comparativo das técnicas de modelagem

Comparativo Técnicas de Modelagem	
Explícita	Implícita
Incapaz de incluir viés estrutural na sondagem	Possibilidade usar funções geoestatísticas e interpoladoras para criar superfícies
Consumo elevado de tempo na junção manual dos pontos	Integração de todos os dados de projeto em um único ambiente
Incapacidade de atualização automática	Comparação e combinação de diferentes modelos
	Capacidade de modelar superfícies complexas
	Criação rápida de seções, sem necessidade do intermédio de um desenhista

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Cowan (2003)

Apesar de estarem em voga no meio técnico, os métodos de interpolação em três dimensões com ferramentas de modelagem implícita e geoestatística ainda são pouco utilizados em projetos de infraestrutura. Com o avanço computacional e proposições de novas metodologias a tendência é que, cada vez mais, sejam utilizadas tais ferramentas.

3.5.2 Estudos de Caso

Camargo e Jácomo (2011) estabeleceram o modelo geomecânico do maciço granítico para as estruturas de concreto na UHE Cachoeira da Porteira (AM). No estudo foi realizada a caracterização geomecânica por meio de mapeamento geológico, descrição de afloramentos e testemunhos de sondagem, ensaios de compressão puntiforme e cisalhamento direto para gerar uma análise de estabilidade dos taludes de escavações, fundações e escavações subterrâneas.

Os valores de RMR foram calculados com base nos parâmetros descritos em 3.2.1.1 para cada tipo de classe de maciço encontrada sobre as estruturas da barragem.

Os valores de módulo de deformação (E_M) foram calculados conforme elucidado em 3.2.1.2, de forma que foram compartimentadas as características do maciço em conjunto com as estruturas gerando os valores calculados vistos na Figura 3-18.

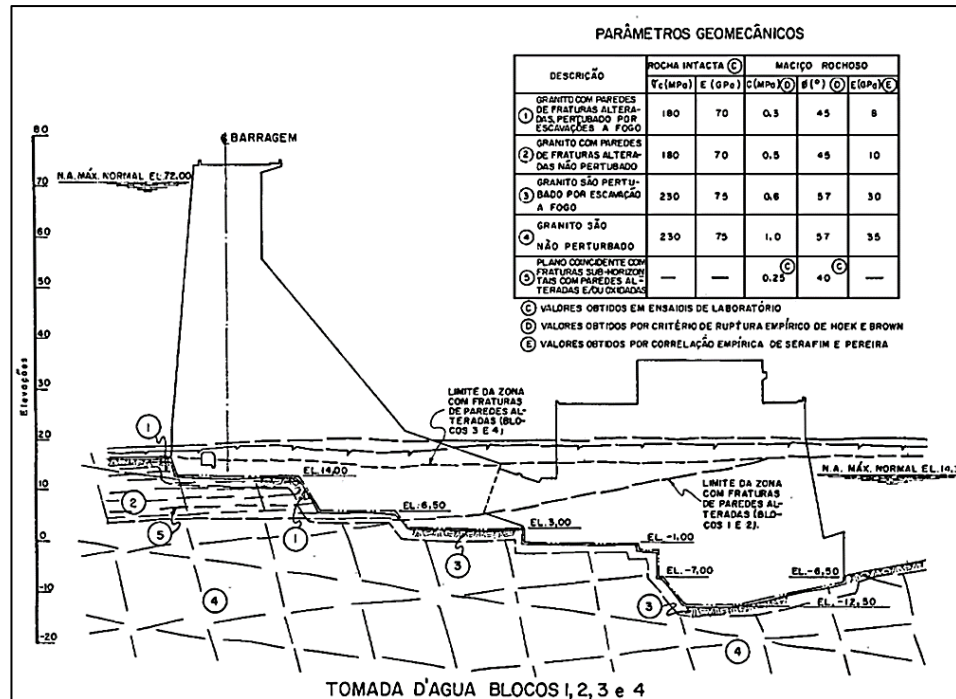
Figura 3-18. Cálculo do módulo de deformabilidade com base em Bieniawski (1973) e Serafim e Pereira (1983) para as fundações em questão

ESTRUTURA	CARACTERÍSTICA	PONTUAÇÃO (1)	O_c (MPa)	PARÂMETRO DA EQUAÇÃO (2)		C	Ø (O) (3)	E (GPa) (4)
				(m)	(s)			
Muro de transição esquerdo e tomada d'água (blocos 1 e 4)	Perturbado por escavações a fogo	54	230	0,93	0,0005	0,6	57	30
Granito são	Não perturbado		230	1,0	0,0007	1,0	57	35
Muro de transição esquerdo e tomada d'água (blocos 1 e 4)	Perturbado por escavações a fogo	31	180	0,18	0,00001	0,3	45	8
Granito com fraturas de paredes alteradas - superficial	Não perturbado		180	0,20	0,0001	0,5	45	10
Tomada d'água (blocos 2 e 3)	Perturbado por escavações a fogo	30	230	0,17	0,00001	0,2	45	8
Zona de falha	Não perturbado		230	0,19	0,00005	0,4	45	10
Vertedouro e muro de transição direito	Perturbado por escavações a fogo	50	230	0,60	0,0002	0,3	56	30
Granito são	Não perturbado		230	0,75	0,0002	0,7	56	35

Fonte: Camargo e Jácomo (2011)

A metodologia utilizada com parâmetros calculados de resistência e deformabilidade do maciço, aliada à distribuição espacial dos dados geológicos, permite situar melhor seus parâmetros geomecânicos e criar seções para avaliar com mais assertividade a estabilidade das estruturas com base na ruptura pela fundação como na seção da Figura 3-19.

Figura 3-19. Modelo geomecânico das fundações da estrutura de tomada d'água de Cachoeira da Porteira (AM)

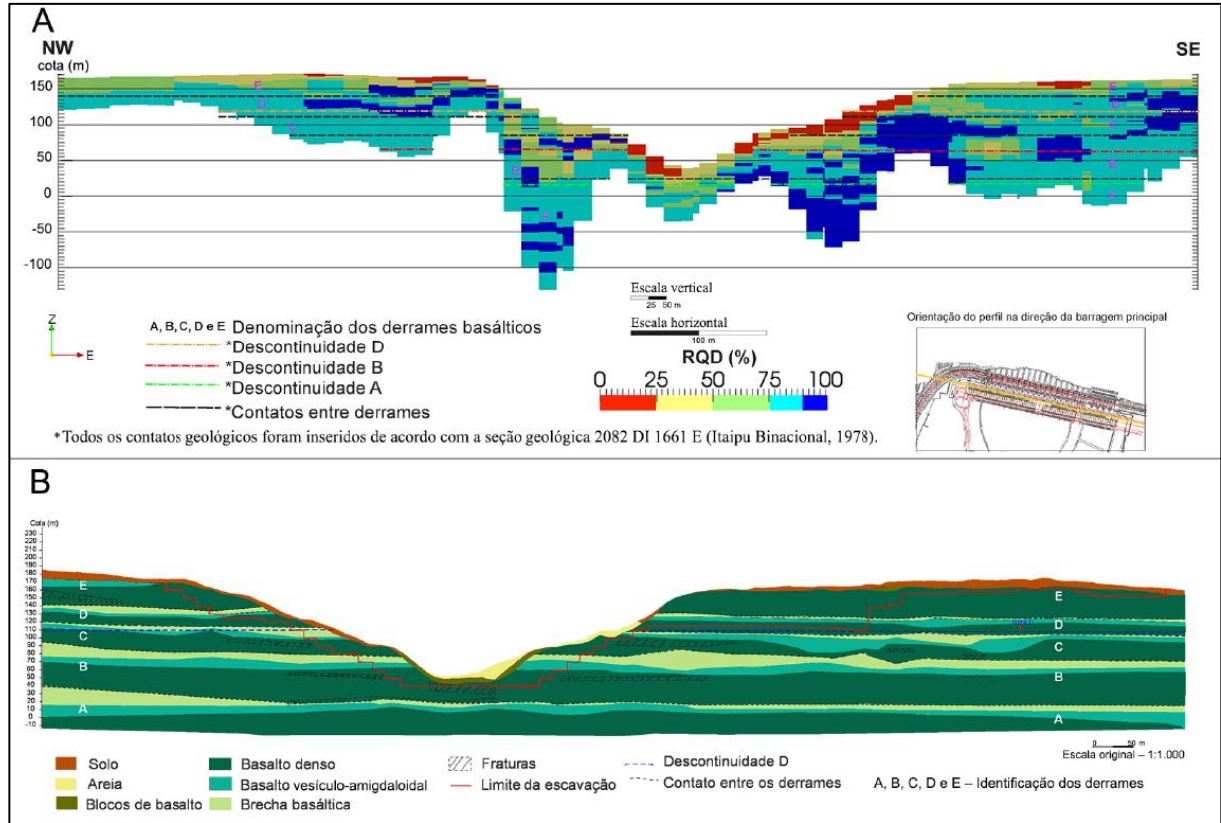


Fonte: Camargo e Jácomo (2011)

Souza Junior (1986) realiza um estudo das feições litoestruturais no maciço basáltico da Usina Hidrelétrica de Porto Primavera (SP). A análise de perfis e testemunhos de sondagens permitiu a distinção de duas sequências de derrames espessos da ordem de 20 a 30 metros com grande continuidade lateral. Associados a estes derrames ocorrem microderrames com espessuras variando de 3 a 4 metros com pequena continuidade lateral. Na obra da UHE Porto Primavera, foram estabelecidas unidades geológico-geotécnicas com base nos estudos prévios das usinas de Itaipu (PR) e Ilha Solteira (SP), ambas sobre rochas basálticas.

Em Itaipu (PR), Canello, Patias e Zuquette (2020) aplicaram métodos computacionais de interpolação, utilizando os dados de RQD de 143 sondagens rotativas, para criar um modelo tridimensional do maciço rochoso da barragem. Foram relacionados dados de *rock quality designation* com os derrames a fim de identificar porções mais ou menos fraturadas (Figura 3-20).

Figura 3-20. Seções verticais ao longo do barramento de Itaipu. Na figura superior o modelo de blocos com o valor de RQD e abaixo a seção geológica compartimentando os derrames.

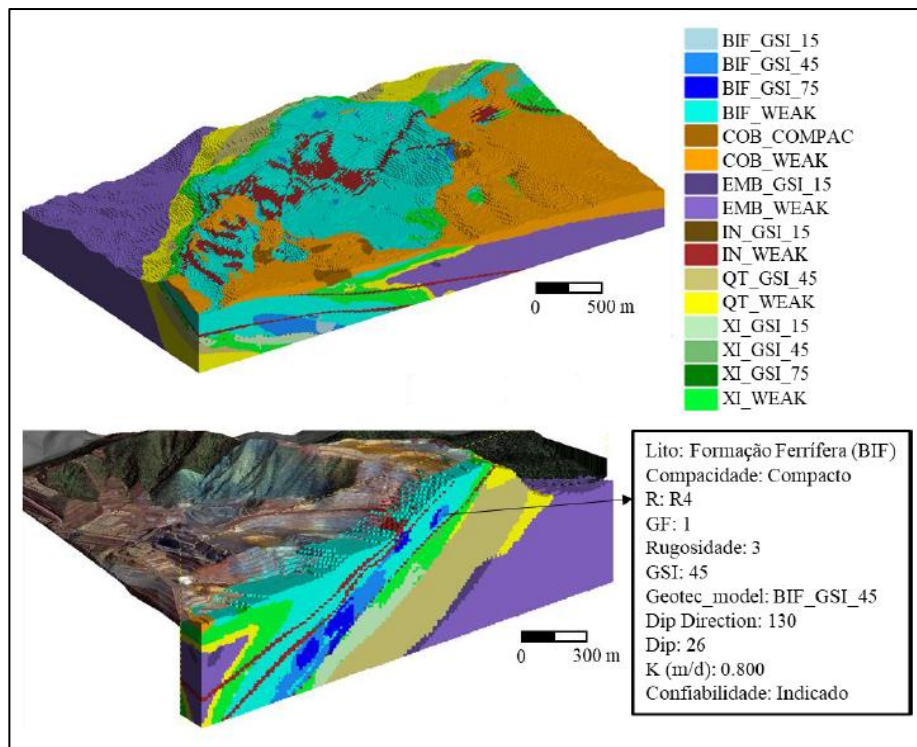


Fonte: Canello, Patias e Zuquette (2020)

Mais recentemente, Sala (2022) desenvolveu uma metodologia para construção de modelos geológico-geotécnicos em taludes de mineração a céu aberto, utilizando ferramentas de geoestatística e modelagem implícita. O autor cria domínios geológicos e os define como base para a modelagem, uma vez que o comportamento mecânico, intempérico e hidrogeológico depende, majoritariamente, do litotipo e condiciona as variáveis geotécnicas.

Após a criação dos modelos temáticos individuais, estes foram integrados gerando um modelo geotécnico de blocos, contendo informações de relevância para o projeto (Figura 3-21).

Figura 3-21. Modelo 3D de blocos geotécnicos com as informações reunidas em um bloco



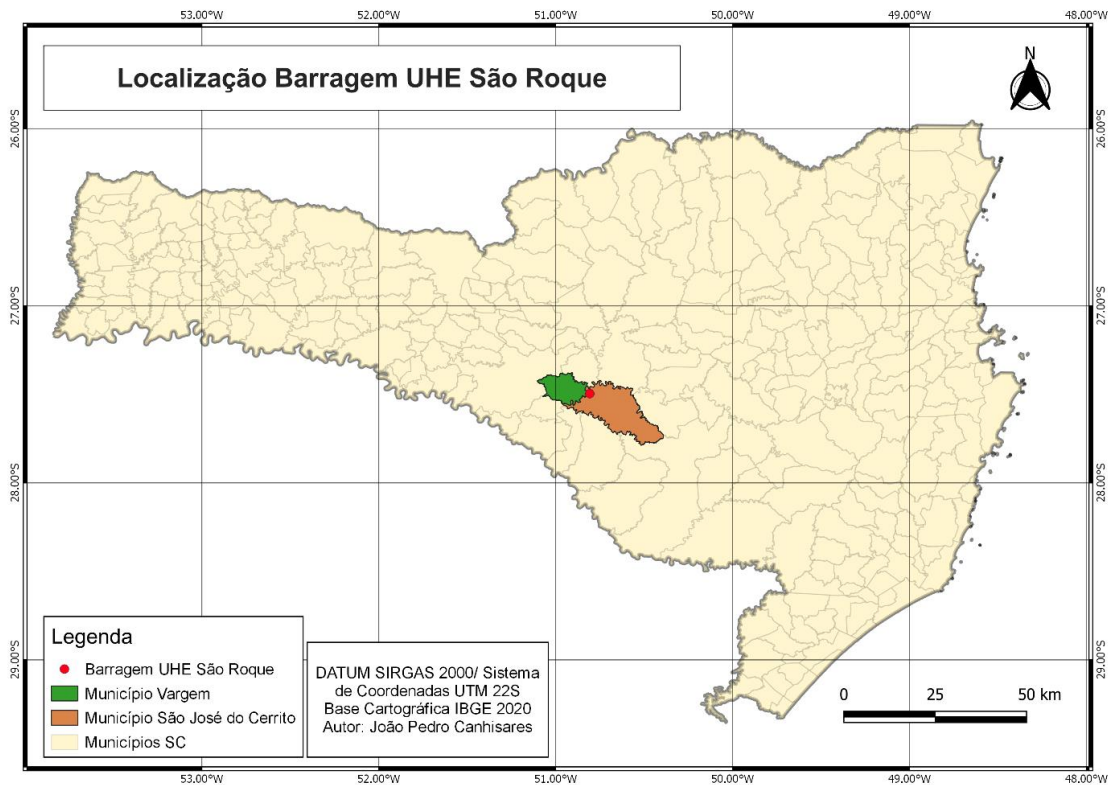
Fonte: Sala (2022)

O mesmo autor afirma que as técnicas de modelagem implícita e geostatística reduziram a subjetividade, tornando o processo mais quantitativo e permitiram o uso de variáveis geológico-geotécnicas para a construção de diversos modelos temáticos. Além disso, os modelos seriam de utilidade multidisciplinar, pois oferecem informações úteis para equipes de geologia, geotecnia, hidrogeologia, planejamento e desmonte.

4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Usina Hidrelétrica de São Roque encontra-se no meio oeste do estado de Santa Catarina, entre os municípios de Vargem e São José do Cerrito (Figura 4-1). A usina encontra-se em operação desde o início de 2022.

Figura 4-1. Mapa de localização estadual da UHE São Roque



Fonte: Elaborado pelo autor

O rio Canoas, parte integrante da bacia do rio Uruguai, possui sua nascente no município de Urubici (SC), abrangendo uma área de drenagem de 14.940 km². A sub-bacia do rio Canoas possui forma alongada na direção sudeste-noroeste, fazendo parte do planalto meridional do estado de Santa Catarina. É caracterizado como um canal meandrante, haja visto sua sinuosidade e profundidade.

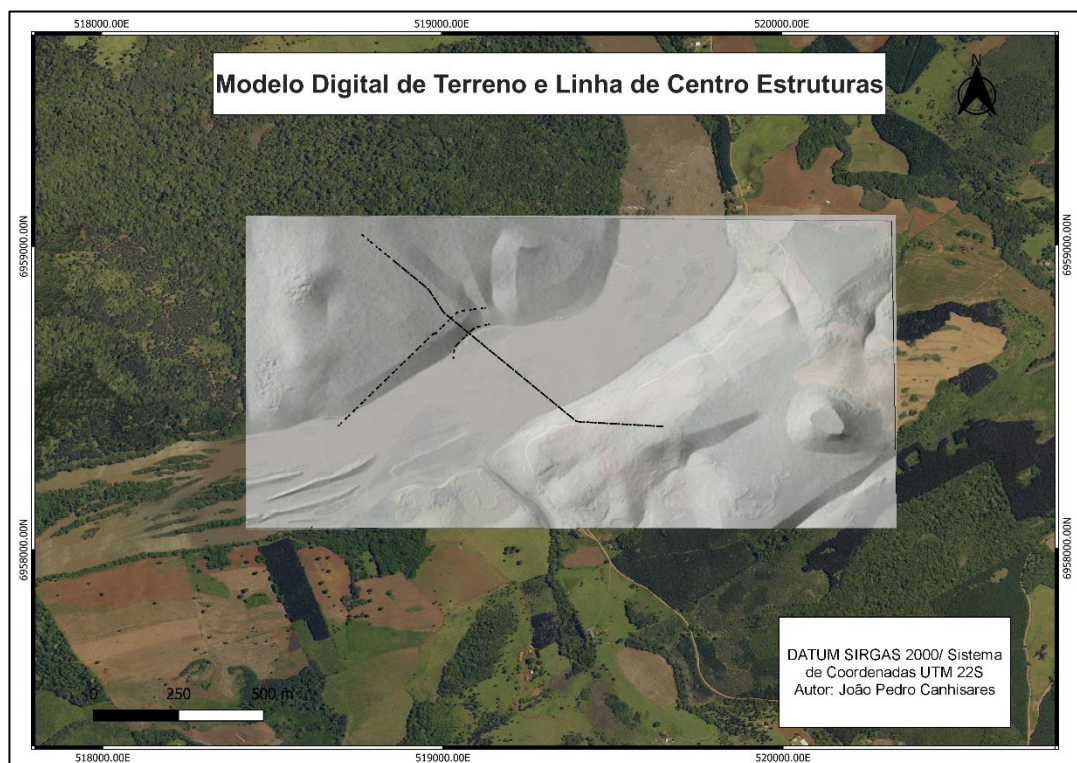
Geomorfologicamente, a região do empreendimento apresenta, predominantemente, encostas de formato convexo-côncavo acompanhadas de vales em escadaria, típicos dos derrames basálticos.

Segundo relatório do Projeto Básico, os morros circundantes fazem parte das formas de relevo orientadas fortemente pelo padrão de fraturamento com direção NE e NW. As elevações máximas presentes do no sítio do barramento variam entre 850 m e 900m. Além

disso, as elevações das ombreiras apresentam um formato em “V” aberto e com fundo chato por onde o rio Canoas se espraia em corredeiras e ilhas. Este rio flui no sentido NE-SW em leito rochoso com largura aproximada de 300 m. A margem esquerda, quando comparada com a direita, é levemente mais íngreme, possui menor espessura de solo e vegetação mais rasteira.

A Figura 4-2 mostra o modelo digital de terreno com resolução espacial e precisão altimétrica de 1 metro em conjunto com imagem de satélite da região da barragem.

Figura 4-2. MDT com indicação da linha de centro das estruturas da barragem



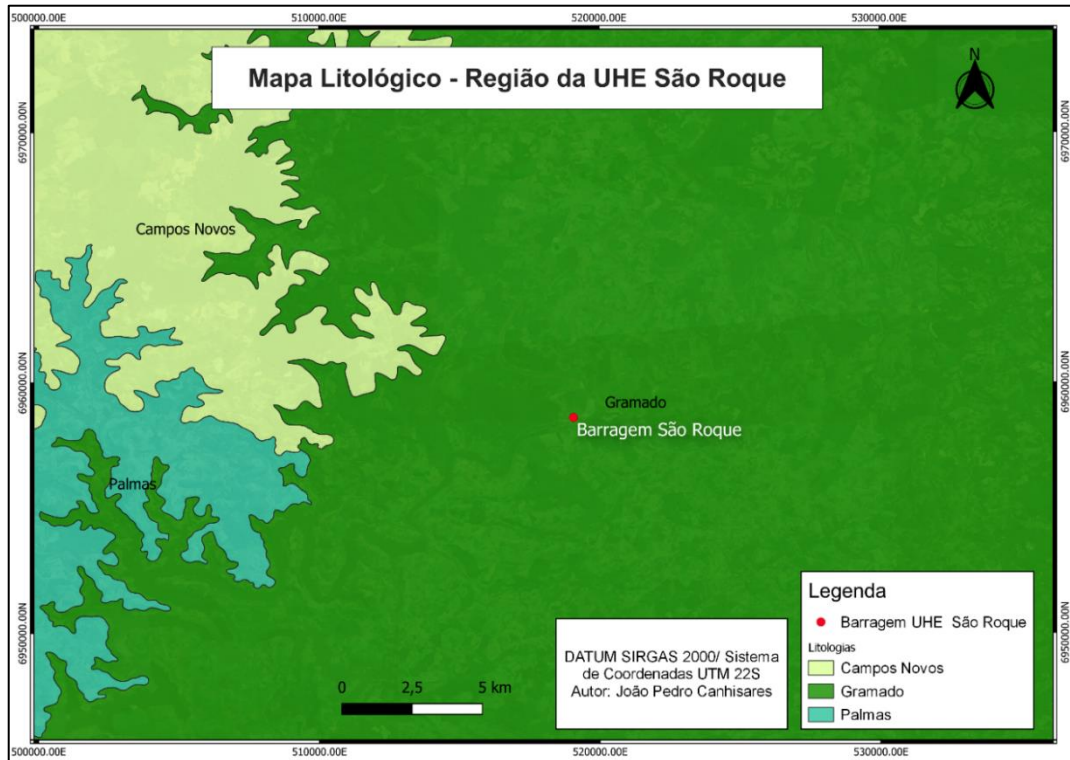
Fonte: Modificado de SIGSC

De acordo com o mapeamento da CPRM (2014) para o estado de Santa Catarina, na escala 1:500000, a barragem de São Roque encontra-se sobre a Bacia do Paraná, mais especificamente o Grupo Serra Geral. As formações encontradas na escala de mapeamento regional são as formações Palmas, Campos Novos e Gramado (Figura 4-3).

A Formação Palmas é constituída por rochas de composição intermediária a ácida, rioclitos a riolitos, mesocráticos com forte disjunção tabular no topo dos derrames e maciço na porção central. Já a Formação Campos Novos compreende basaltos microgranulares, pretos com frequente presença de vesículas. A formação em que está situada a barragem de São Roque é a Gramado a qual possui derrames basálticos com predominância forma de lobos,

melanocráticos cinza, horizontes vesiculares espesso e estruturas de fluxo *pahoehoe*. Além disso, as intercalações com as rochas sedimentares do arenito Botucatu são frequentes, formando *intertraps* (CPRM, 2014).

Figura 4-3. Mapa litoestratigráfico da região da UHE São Roque



Fonte: Elaborado pelo autor com base no mapeamento da CPRM (2014)

De acordo com informações contidas no projeto a barragem de São Roque encontra-se sobre o domínio dos derrames basálticos, não identificando ocorrência de rochas mais ácidas como riodacitos ou intercalações com os arenitos da Formação Botucatu. Além disso, podem ser identificados sedimentos jovens inconsolidados, correspondentes a depósitos de origem fluvial, aluvionar e coluvionar atuais, formados por granulometria variada desde argilas até seixos.

As investigações (levantamento geofísico e sondagens rotativas) realizadas no sítio da barragem indicam a presença de derrames basálticos dispostos sub-horizontally, apresentando três litotipos principais: brecha basáltica, basalto vesicular amigdaloidal e basalto denso (Figura 4-4).

Figura 4-4. Testemunhos de sondagem com principais litotipos encontrados no local da barragem: a) brecha basáltica b) basalto vesicular amigdaloidal c) basalto denso



Fonte: Boletins de Sondagem do Projeto

De acordo com a descrição dos boletins de sondagem realizadas no âmbito do projeto, o basalto denso é caracterizado por ser uma rocha cinza escura quando são e amarelada nas porções mais alteradas. É composta principalmente por plagioclásio e piroxênios, além de estruturação maciça com textura subfanerítica a afanítica. Segundo relatórios de obra, os horizontes de basalto denso frequentemente contém diaclasamento horizontal e alcançam espessuras de até 20 metros.

A brecha basáltica contém fragmentos de material de arrasto na parte superior do derrame, apresentando fragmentos angulosos milimétricos a centimétricos de basaltos provenientes de derrames anteriores. Tem clara estrutura de brecha com cor cinza arroxeada, amarela ou vermelha, sendo as duas últimas produtos de alteração gerando argilominerais.

Deste modo, a presença de uma camada de brecha configura-se como um forte indicativo de um topo de derrame basáltico. Caracterizam-se por serem rochas com baixa resistência e alta suscetibilidade ao intemperismo.

O basalto vesicular amigdaloidal é a camada que ocorre logo abaixo dos horizontes de brecha basáltica (Figura 4-5). De acordo com descrições dos boletins de sondagem, possui a mesma composição mineralógica do basalto denso, porém suas amígdalas são preenchidas por zeólitas, argilominerais, calcita ou cristalização de quartzo na forma de geodos. Vale ressaltar que pode haver ocorrências pontuais de basaltos vesiculares na base dos derrames, mas não configuram um critério assertivo de separação entre eles.

Figura 4-5. Contato entre brecha basáltica e basalto vesicular amigdaloidal exposto após as escavações.



Fonte: Nota Técnica de Obra

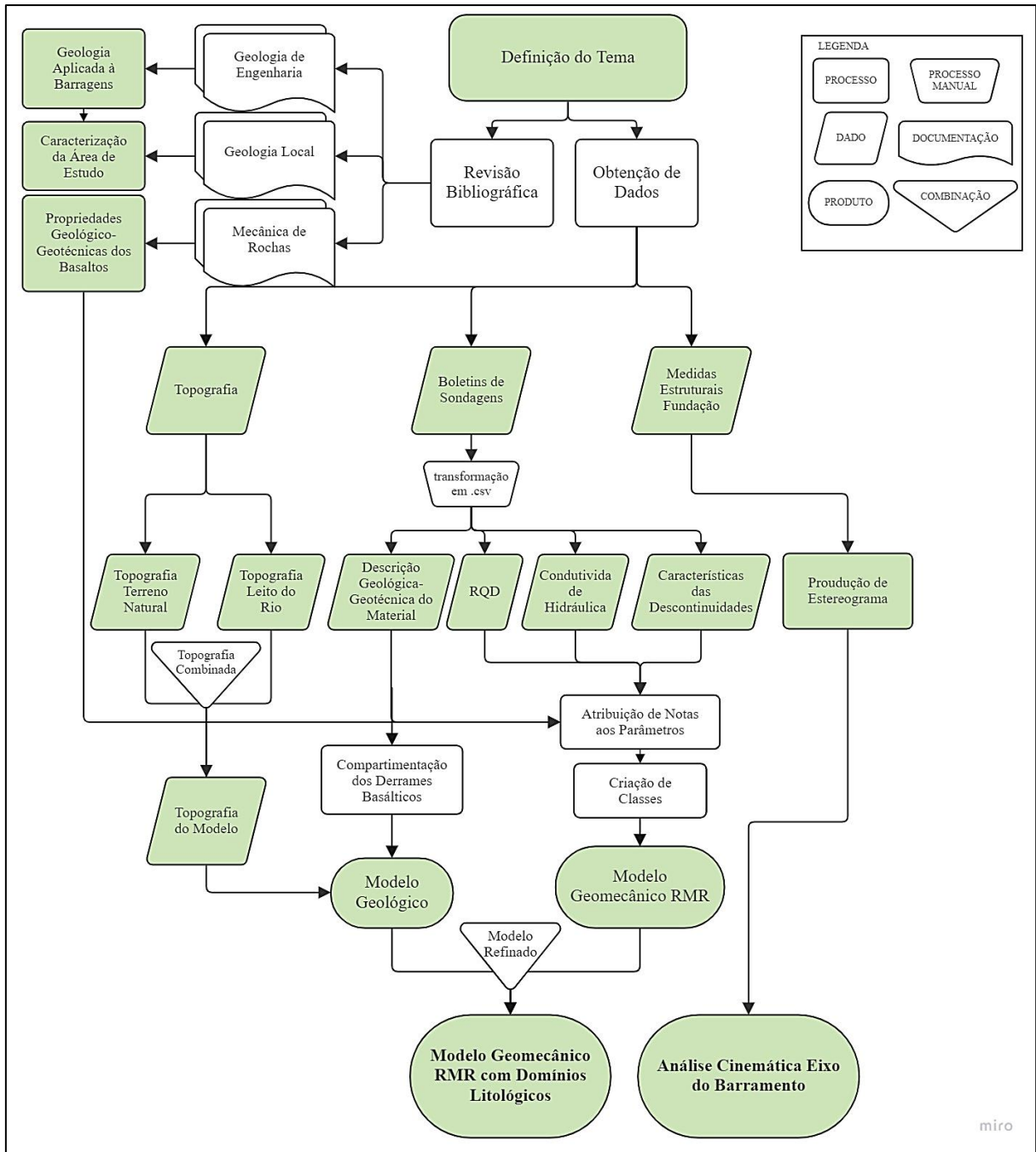
5 METODOLOGIA

Ao longo deste trabalho foram adotadas as metodologias de revisão bibliográfica, compilação de dados, etapas de campo e análise dos dados. Essas metodologias estão detalhadas ao longo desta seção e estão resumidas de acordo com o fluxograma contido na Figura 5-1. Desta maneira, toda a bibliografia coletada será na área de conhecimento de geotecnia, geologia de barragens e mecânica de rochas, além de um estudo sobre a geologia regional onde está instalada a barragem da UHE São Roque.

Todos os dados utilizados para a realização desse trabalho consistirão, predominantemente, na documentação de projeto fornecida pela Nova Engevix Engenharia e Projetos. Pôde-se ter em mãos o levantamento integral das medidas que compõem todas as etapas da construção, bem como suas representações gráficas como plantas de situação e seções transversais. Dentre as informações coletadas serão analisadas imagens aéreas, boletins de sondagens (com fotografias dos testemunhos), mapeamento geológico da fundação, ensaios de condutividade hidráulica e fotografias de obra. Foi realizada, também, visita de campo ao local da barragem para verificar o arranjo final das obras.

O software de modelagem tridimensional utilizado foi o Leapfrog Works fornecido pela Seequent, companhia pertencente a Bentley Systems. Todos os produtos gerados neste trabalho contaram com a utilização do *software* da Bentley. Copyright © Bentley Systems, Incorporated.

Figura 5-1. Fluxograma com atividades realizadas neste trabalho



Fonte: Elaborado pelo Autor

A primeira etapa para a elaboração do modelo consistiu na definição do banco de dados, o que é de suma importância para o processo de modelagem, uma vez que todos os modelos dependem da qualidade das informações obtidas. Os dados compreendem boletins de sondagem, ensaios de campo, dados topográficos, medidas estruturais do sítio da barragem, relatórios técnicos e imagens de satélite.

A principal fonte de informações deste trabalho tem origem nas descrições dos furos de sondagem. Ao todo foram disponibilizados 33 boletins de sondagem mistas/rotativas

verticais e 4 inclinadas. Ao longo do projeto, foram sendo filtrados os furos que seriam de maior utilidade para a modelagem, de forma que restaram 19 furos de sondagem totalizando 534,70 metros de testemunhos com descrição geológica e geotécnica.

Estes boletins de sondagem contemplam informações como: descrição geológica do material, alteração, coerência, RQD, características das discontinuidades e classes de condutividade hidráulica.

Os intervalos descritos estão na forma de boletins de sondagem em formato PDF, de modo que foi necessário transferir todas estas descrições para uma base de dados editável (formato .csv), tanto para facilitar a análise das informações quanto inserir no *software* de modelagem.

Após definição do banco de dados foi realizada uma análise de todas as informações disponíveis para definir qual estratégia seria adotada para a modelagem.

Com os dados previamente analisados rumou-se para a modelagem dentro do ambiente tridimensional. A fim de limitar a extensão do modelo a ser criado, foram importadas curvas de nível do terreno natural e gerada uma grade triangulada a fim de servir como topografia do projeto.

O modelo geológico foi criado com uso de modelagem implícita, seguindo os furos de sondagem, delimitando tridimensionalmente as unidades litológicas do sítio da barragem. Os intervalos dos furos de sondagem necessitaram ser reclassificados através de agrupamentos, de modo que, classificou-se os intervalos de sondagem em: brecha basáltica (BB1, BB2, BB3 e BB4), basalto vesicular amigdaloidal (BVA1, BVA2, BVA3 e BVA4) e basalto denso (BD1, BD2, BD3 e BD4). Desta forma, compartimentou-se a análise em 4 derrames principais, do mais novo para o mais antigo: Derrame 1, Derrame 2, Derrame 3 e Derrame 4. Além disso, foram identificados intervalos muito pequenos de BB, BVA e BD entre o Derrame 1 e Derrame 2, definindo estes intervalos como um subderrame originado do Derrame 2.

Como a litologia influencia diretamente no comportamento dos parâmetros geotécnicos, os volumes criados no modelo geológico servirão como domínio para a modelagem geomecânica. Ademais, por se tratar de materiais não-rochosos, as unidades quaternárias e saprolíticas não entraram no âmbito da modelagem geomecânica.

Em vista da larga utilização em obras de engenharia foi escolhida a classificação geomecânica RMR (*Rock Mass Rating*), compatibilizando a base de dados disponível aos parâmetros exigidos. Como elucidado na seção 3.2, esta classificação requer dados de resistência da rocha intacta, RQD, descrição das discontinuidades, água subterrânea e

orientação das descontinuidades, no entanto a base de dados não contemplava todos os parâmetros necessários de modo que a classificação foi adaptada, conforme Quadro 5-1.

Quadro 5-1. Classificação adaptada a partir do RMR

Parâmetro		Intervalo de Valores							
1	Resistência do material Intacto	Resistência à compressão uniaxial (MPa)	>250	100 - 250	50 - 100	25 - 50	5 - 25	1-5	< 1
		Nota	15	12	7	4	2	1	0
2	RQD e Espaçamento		90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	<25		
		Nota	40	32	24	16	8		
3	Condições das Descontinuidades	Contato rocha-rocha com paredes sãs	Contato rocha-rocha com presença de material pétreo rijo como calcita e sílica	Paredes de alteração incipiente com sinais de percolação de água e preenchimento ausente	Paredes alteradas e preenchimento ausente	Paredes alteradas com preenchimento			
		Nota	30	25	20	10	0		
4	Água Subterrânea (presença de água)	$k < 1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5} < k < 1 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4} < k < 5 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-4} < k < 1 \times 10^{-3}$	$k > 1 \times 10^{-3}$			
		Nota	15	10	7	4	0		

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Bieniawski (1973)

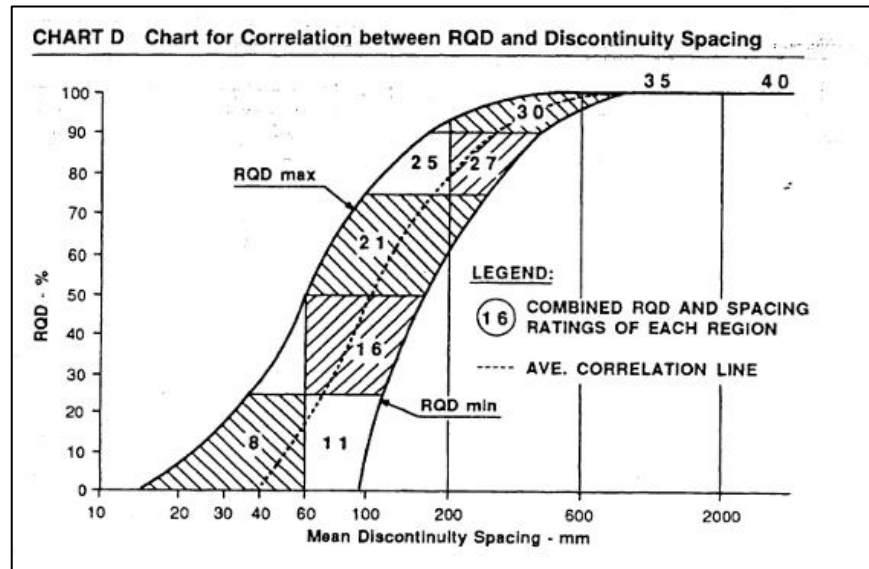
O parâmetro de resistência a compressão uniaxial foi estimado de acordo com valores obtidos em bibliografia e dados de outras obras sobre os basaltos do Grupo Serra Geral.

Como a base de dados não apresentava o espaçamento entre descontinuidades foi utilizada uma correlação entre o RQD e o espaçamento, segundo Bieniawski (1989). Nesta correlação as notas de ambos os parâmetros são combinadas de acordo com a Figura 5-2, de modo que nos cálculos, estas notas foram somadas. Além disso, não havia dados sobre as condições de água subterrânea, de maneira que foram usadas as faixas de condutividade hidráulica nos intervalos de sondagem para atribuir notas a estes parâmetros.

As descrições das descontinuidades contidas nos boletins de sondagens apresentavam descrições não padronizadas para o RMR, de modo que, foram feitas algumas adaptações incluindo separação e alteração dentro do parâmetro preenchimento. Além disso, considerou-

se, conservadoramente, uma nota para o parâmetro de persistência igual a 6, já que não é possível inferir a persistência de uma descontinuidade entre uma sondagem e outra.

Figura 5-2. Gráfico de correlação entre RQD e espaçamento das descontinuidades



Fonte: Bieniawski (1989)

Para realizar o cálculo das notas dos intervalos de sondagem foi realizada uma lógica computacional dentro do software, atribuindo notas para cada variável e calculando a nota final de cada intervalo de sondagem, o que viabilizou a definição das classes RMR (Figura 5-3). Após a definição das classes, realizou-se uma checagem dos boletins de sondagem para analisar, visualmente, se as classes criadas estavam compatíveis com os testemunhos.

Ademais, as superfícies das classes foram submetidas à aplicação de um *trend* estrutural criado com base na disposição espacial dos derrames, a fim de que estivessem coerentes com a estruturação das litologias. Quando a modelagem não foi capaz de criar sólidos condizentes com a realidade, foram feitas modificações manuais a fim de gerar volumes mais satisfatórios.

Como, neste caso, os dados de sondagem disponíveis não apresentam com precisão a direção e o mergulho dos planos de descontinuidade ao longo do furo, os dados estruturais utilizados neste modelo foram obtidos a partir de mapeamento de fundação. Foram confeccionados estereogramas a fim de analisar cinematicamente as descontinuidades e possíveis tipos de ruptura da estrutura da barragem. Deste modo, entende-se que o estudo

cinemático do eixo do barramento contempla o fator de correção da classificação RMR, não tendo sido incluído no cálculo das notas.

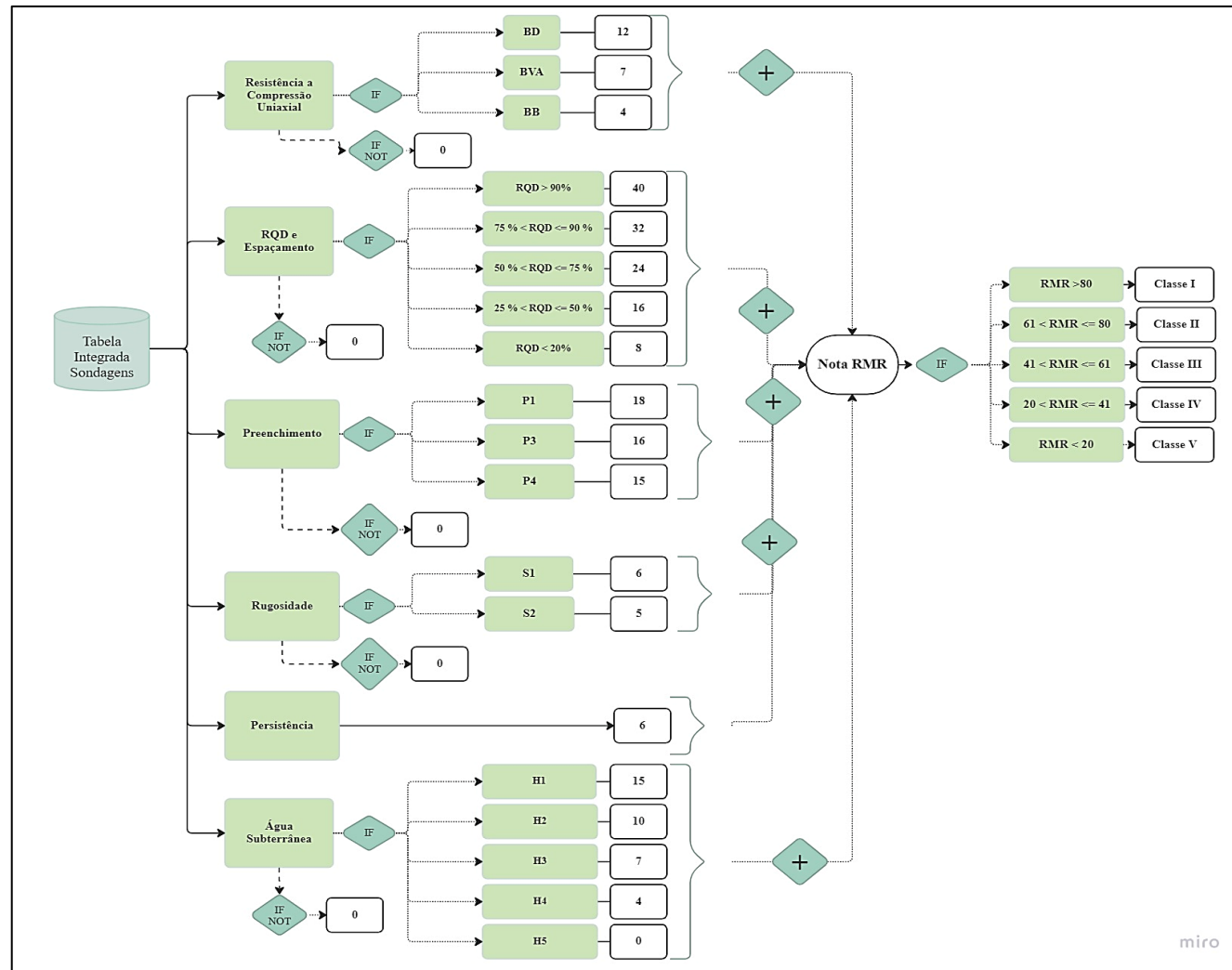
Os estereogramas foram elaborados com base em mapeamentos geológico-geotécnicos de fundação ao longo dos 23 blocos da barragem para liberação da fundação das estruturas de concreto. Ao todo são 796 medidas estruturais contendo planos de fratura retirados dos arquivos digitalizados dos mapeamentos e transformados em uma tabela para inserção e análise no *software*.

Por conta da grande quantidade de polos utilizou-se o traçado das curvas de isofrequências para determinar a distribuição dos polos e deduzir as famílias de descontinuidades com suas atitudes médias.

Este tipo de análise de estabilidade é estatística, tendo como objetivo averiguar as condições geométricas de ocorrer algum dos tipos de ruptura. Assim, não incluem os cálculos de estabilidade para o projeto final de uma obra, entretanto, indicarão a necessidade ou não de estudos posteriores.

Com a modelagem e estereogramas finalizados, foi feita uma malha de seções a fim de analisar qual seriam as mais críticas ou passíveis de análise. O espaçamento usado para a confecção das seções na barragem principal/vertedouro foi de 80 metros (transversais) e 20 metros (longitudinais). Nas regiões da ombreira esquerda, ombreira direita e tomada d'água foi confeccionada uma seção transversal para cada e, quando houve necessidade, foram criadas seções auxiliares para análise.

Figura 5-3. Lógica computacional utilizada para obter as classes geomecânicas RMR adaptadas



Fonte: Elaborado pelo Autor

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir estão apresentados os resultados obtidos a partir da metodologia e fluxo de trabalho proposto. A análise será realizada por estrutura, a partir de seções retiradas do modelo geológico e geológico-geotécnico, bem como a confecção dos estereogramas sinalizando famílias de descontinuidades na fundação.

Para facilitar o entendimento do leitor, os litotipos basálticos serão referidos como BD (basalto denso), BVA (basalto vesicular amigdaloidal) e BB (brecha basáltica), seguidos pelo número do derrame a qual ele pertence. Por exemplo: o basalto denso do Derrame 4 será chamado de BD4.

A análise de estatística indica que a média das notas de RMR recaem no intervalo entre 53,68 e 81,25, conforme Tabela 6-1.

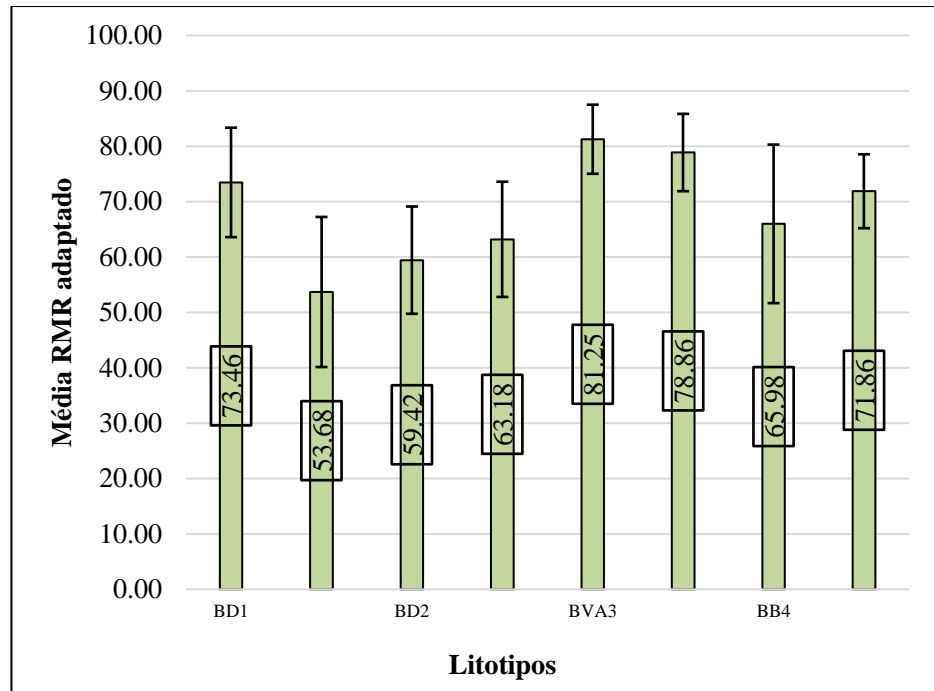
Tabela 6-1. Estatística associando os litotipos basálticos e derrames aos valores numéricos de RMR adaptado

Estatística RMR adaptado			
	Contagem	Média	Desvio Padrão
Litotipos	357	72,20	12,05
BD1	48	73,46	9,88
Subderrame	27	53,68	13,54
BD2	35	59,42	9,68
BB3	44	63,18	10,40
BVA3	53	81,25	6,24
BD3	91	78,86	6,98
BB4	15	65,98	14,31
BD4	41	71,86	6,67
Derrames	357	72,20	12,05
Derrame 1	48	73,42	9,85
Derrame 2	35	60,83	10,40
Derrame 3	188	75,96	10,26
Derrame 4	56	71,52	8,68

Fonte: Elaborado pelo autor

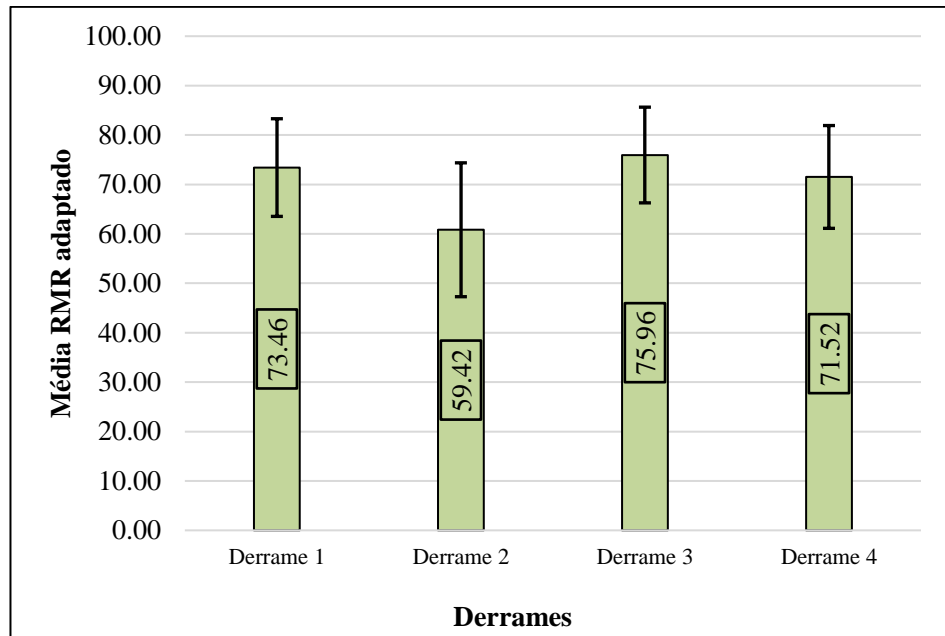
Analisando estatisticamente, as médias de cada litotipo em relação à nota de RMR evidenciaram que as notas mais baixas estão associadas aos subderrames, brechas basálticas e BD2. Enquanto a mesma análise para os derrames indicou as médias mais baixas para o Derrame 2. As médias mais altas estão associadas aos Derrames 3 e 4, com exceção do BD1, conforme Gráfico 6-1 e Gráfico 6-2.

Gráfico 6-1. Médias das notas RMR adaptado e desvio padrão dos litotipos basálticos



Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 6-2. Médias das notas RMR adaptado e desvio padrão dos derrames



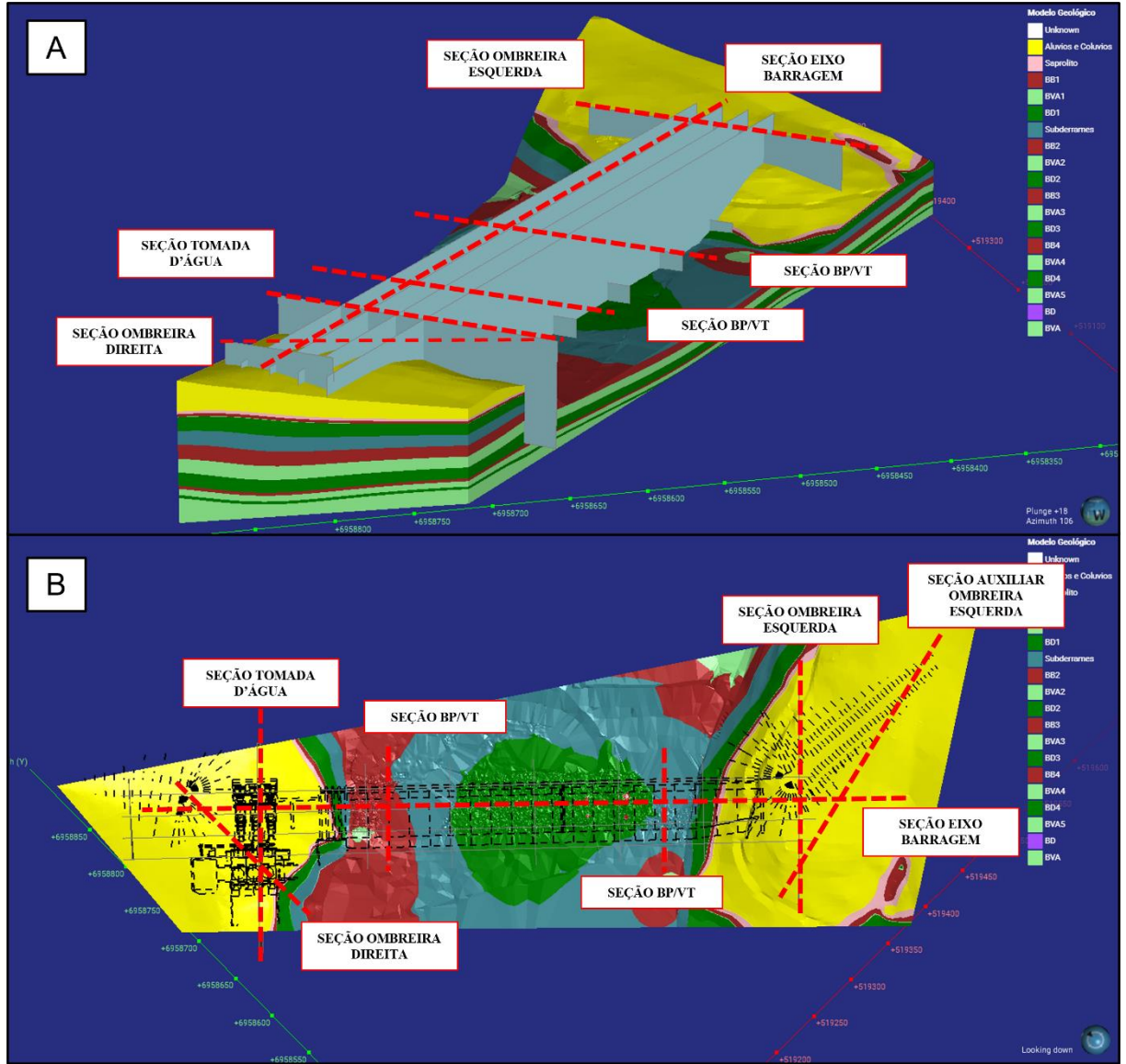
Fonte: Elaborado pelo autor

O recorte espacial utilizado para a criação do modelo compreendeu as sondagens de maior importância para a verificação das classes junto às estruturas. Desta maneira, a extensão do modelo possui uma altura de aproximadamente 90 metros, comprimento de 688 metros e

espessura média de 160 metros. Os modelos geológicos e geológico-geotécnicos são mostrados na Figura 6-1 e Figura 6-2 as quais também contém a localização das seções cujas discussões serão realizadas adiante.

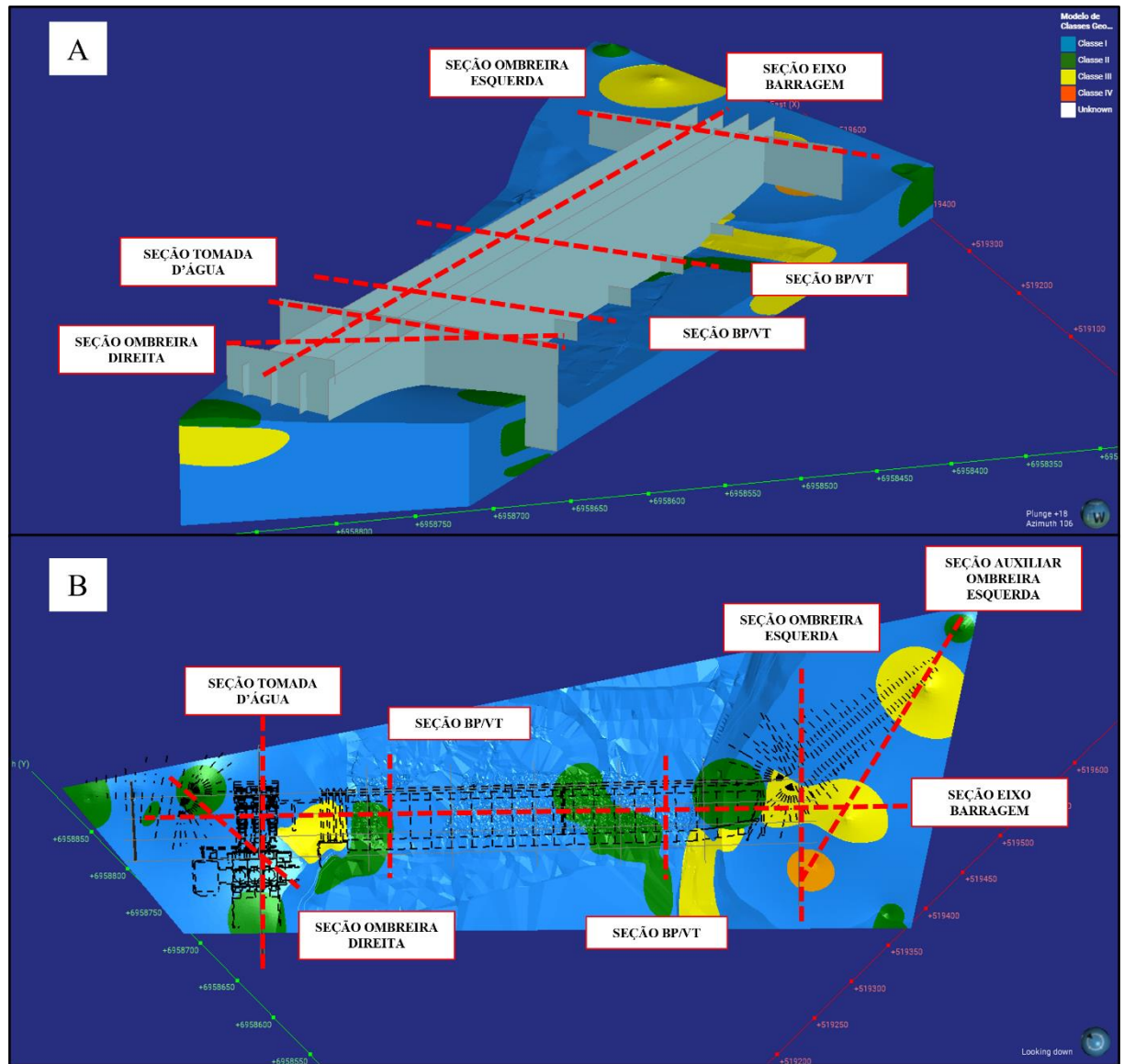
Inicialmente, é abordada a seção longitudinal por toda a barragem para, posteriormente, apresentar as seções transversais ao eixo. A superfície de escavação de projeto também será utilizada para análise, porém vale ressaltar que pode não ser a superfície final, uma vez que, posteriormente, ainda foram realizados serviços de limpeza e regularização de fundação.

Figura 6-1. A) modelo geológico em perspectiva com localização da malha de seções e indicação das seções escolhidas. B) modelo geológico em planta com projeção das estruturas e aterros no terreno natural e seções selecionadas para análise.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 6-2. A) modelo geológico-geotécnico em perspectiva com localização da malha de seções e indicação das seções escolhidas. B) vista em planta do modelo geológico-geotécnico com projeção das estruturas de concreto e aterros no terreno natural com seções selecionadas.

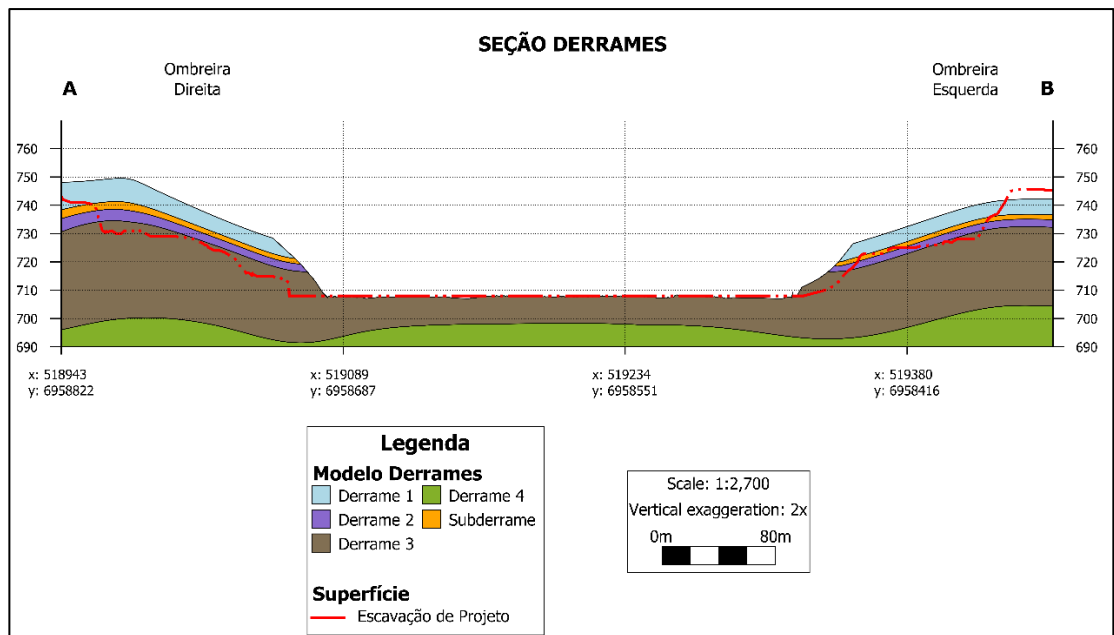


Fonte: Elaborado pelo autor

6.1 SEÇÃO LONGITUDINAL PELO EIXO DA BARRAGEM

Foi possível identificar quatro derrames principais e um subderrame originado a partir do Derrame 2. Os derrames 1 e 2 tem pequena espessura, enquanto o Derrame 3 é o mais espesso entre eles. Os três primeiros estão aflorantes enquanto o quarto derrame encontra-se totalmente confinado, conforme Figura 6-3.

Figura 6-3. Seção longitudinal, com exagero vertical indicado, mostrando a disposição dos 4 derrames basálticos

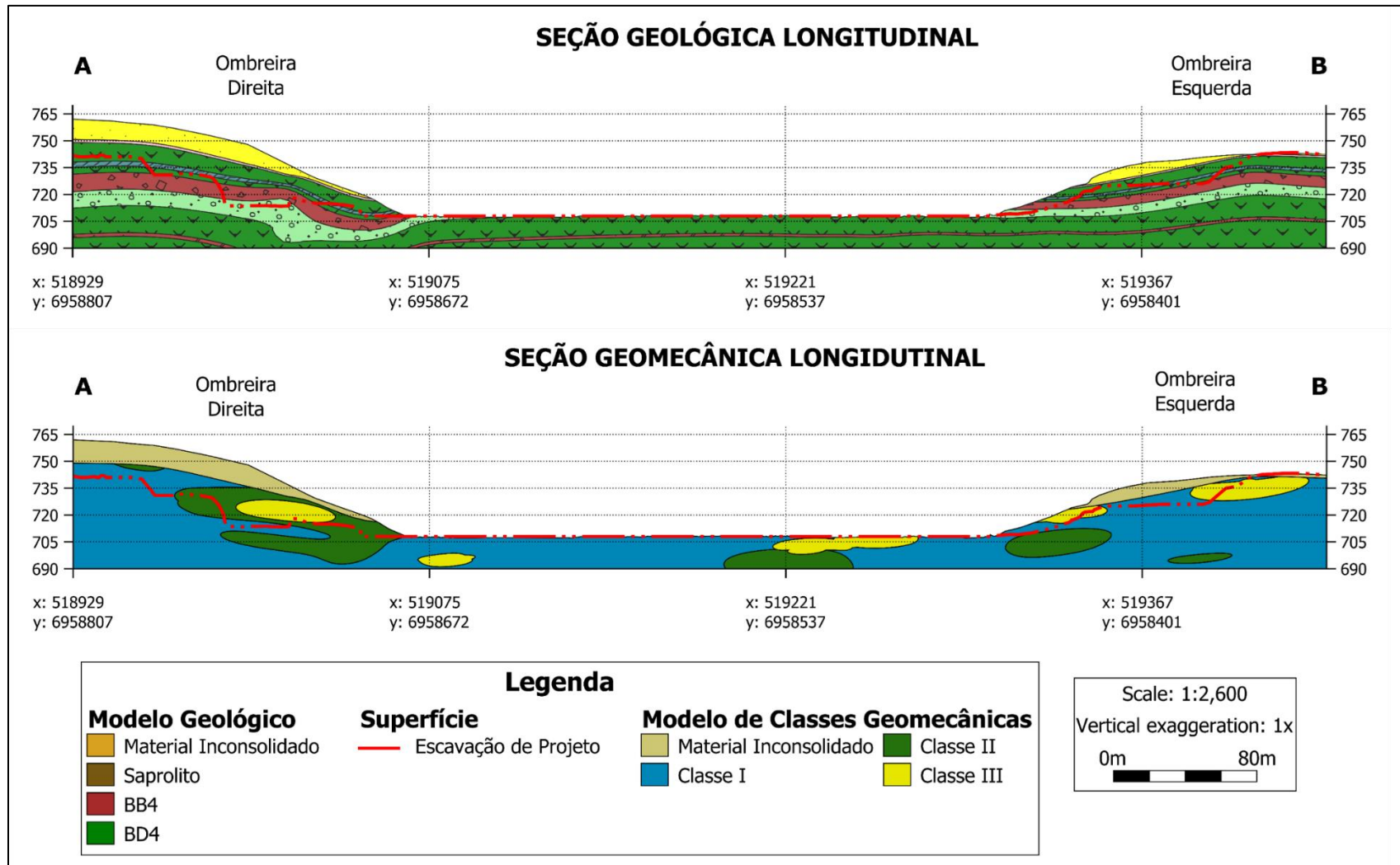


Fonte: Elaborado pelo autor

A seção geológica pelo eixo da barragem (Figura 6-4) mostra a alternância entre os litotipos basálticos indicando 4 derrames de lava, sendo 3 deles aflorantes. Os Derrames 1 e 2 apresentam apenas o litotipo basalto denso, entre estes dois domínios ocorre uma camada com subderrame originado a partir do Derrame 2. O terceiro derrame possui espessas camadas de BB3 e BVA3, principalmente na margem direita. Enquanto o quarto derrame, mesmo após as escavações não aflora no terreno e apresenta um pequeno estrato brechado. Como esperado na morfologia de derrames basálticos, os litotipos apresentam grande continuidade lateral, sendo cortados apenas pela erosão do vale fluvial, onde aflora o BD3 na calha do rio.

A classificação geomecânica indicou predomínio de maciço Classe I com lentes de Classe II e III e IV ao longo do eixo da barragem, não identificando maciços Classe V.

Figura 6-4. Seção geológica e geomecânica longitudinal ao longo do eixo da barragem



Fonte: Elaborado pelo autor

Nota-se que as litologias atuam como domínio das classes geomecânicas, de forma que as Classes II e III estão geralmente associadas a zonas de onde ocorrem os litotipos BB e BVA, denotando que se deve ter maior precaução com contatos entre os derrames. Outro fator preponderante é a proximidade com a superfície, pois causa maior alteração no maciço, bem como maior fraturamento por conta do alívio de carga sobreposta, gerando classes de pior qualidade geomecânica. Este alívio de tensões também gera queda na resistência ao cisalhamento das descontinuidades.

A exceção é feita para a lente de Classe III abaixo da calha do rio, próximo a margem direita, na cota 705 metros. Esta zona está no domínio de BD3 confinado, ainda assim, apresenta material com qualidade inferior. Os boletins de sondagem indicam um alto grau de fraturamento com alteração das paredes das descontinuidades com e sem preenchimento, podendo corresponder a uma zona de falha. Ainda abaixo da cota 705 metros ocorre outra feição com características semelhantes, porém com Classe II.

Estas feições geológicas poderiam ser interpretadas como zonas de cisalhamento abaixo do leito do rio encontradas tanto em Itaipu (PR) como Foz do Areia (PR). O desconfinamento originado pela erosão do vale fluvial alteraria a direção da tensão principal de vertical para horizontal. Este aumento da pressão horizontal na camada de basalto do leito do rio causaria um arqueamento do fundo do vale e a geraria uma zona de cisalhamento com falha de empurrão abaixo do leito do rio.

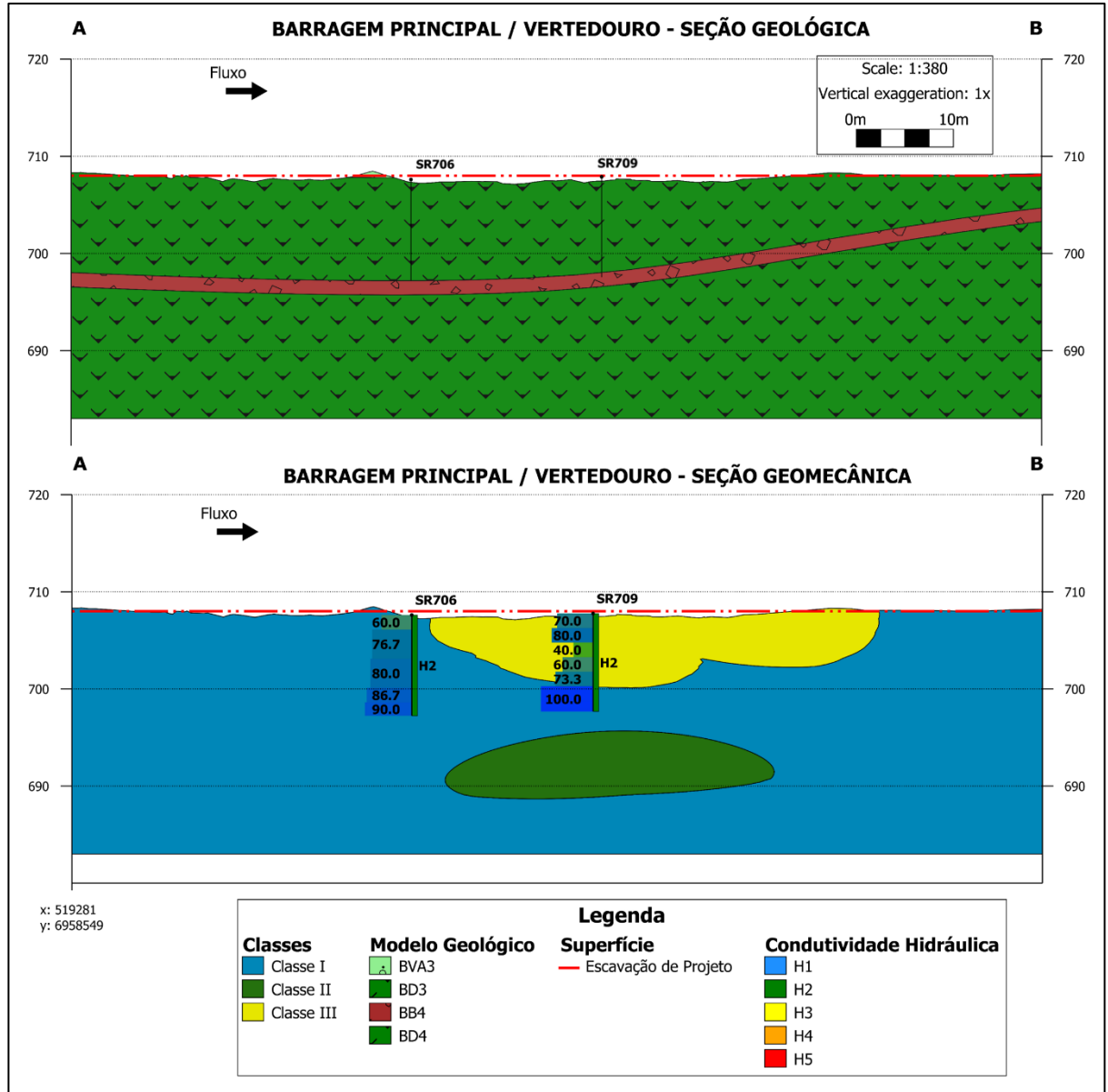
6.2 BARRAGEM PRINCIPAL E VERTEDOURO

A análise pela barragem principal e vertedouro foi realizada mediante seção transversal próximo ao meio da calha do rio.

A seção geológica indicou a presença do BD3 por toda a calha do rio com espessura de 12 metros. Abaixo do basalto denso encontra-se um horizonte de brecha com 3 metros seguido por outro basalto denso, ambos relativo ao Derrame 4. Nota-se que as sondagens não chegaram até as cotas deste último derrame basáltico, sendo essas superfícies criadas a partir de outras sondagens mais profunda (Figura 6-5).

É possível que sejam encontrados remanescentes de BB3 e BVA3 que ainda não foram erodidos pela ação fluvial, demandando uma análise com mapeamento geológico-geotécnico de fundação de maior detalhe.

Figura 6-5. Seção geológica e geomecânica com indicação das sondagens e intervalos com descrição geológico-geotécnicas de RQD e faixas de condutividade hidráulica.



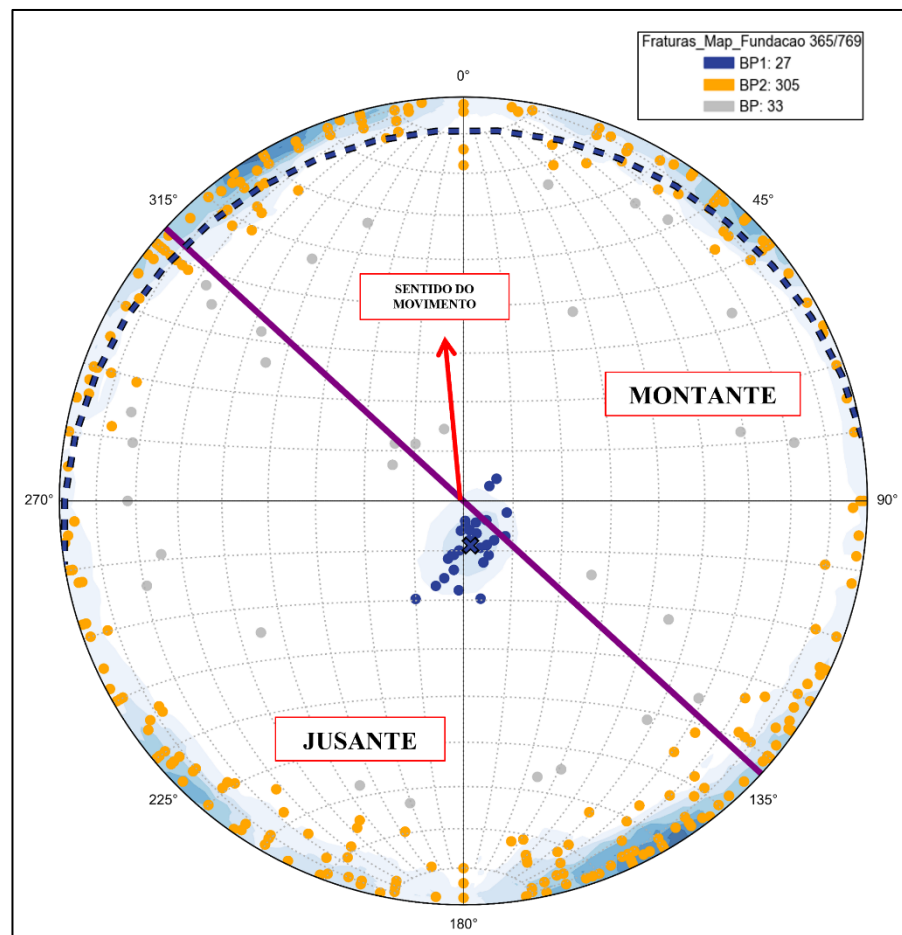
Fonte: Elaborado pelo autor

A seção geomecânica mostra que, apesar de se tratar de basalto denso, os valores de RQD no início da sondagem SR709 indicam um grau de fraturamento elevado e as condutividades hidráulicas na faixa de H2. Esse fraturamento se deve tanto ao alívio de tensões na calha do rio quanto o diaclasamento singenético aos derrames basálticos. No entanto, é possível que o último seja mais preponderante uma vez que as discontinuidades descritas nos boletins de sondagem indicam que as fraturas são fechadas com paredes sãs.

As atitudes das 365 descontinuidades da barragem principal foram plotadas no estereograma da Figura 6-6 onde observa-se que existem duas famílias principais. A família de descontinuidades sub-vertical aparece como uma nuvem de pontos ao longo das bordas do estereograma, indicando que não possui direção preferencial. Assim, interpreta-se que essas descontinuidades constituam juntas sub-verticais associadas ao resfriamento do núcleo do derrame basáltico, corroborando com a presença de BD3 na calha do rio.

Já as fraturas sub-horizontais, como comentado anteriormente, podem estar associadas tanto ao alívio de tensões do maciço, quanto ao resfriamento do derrame.

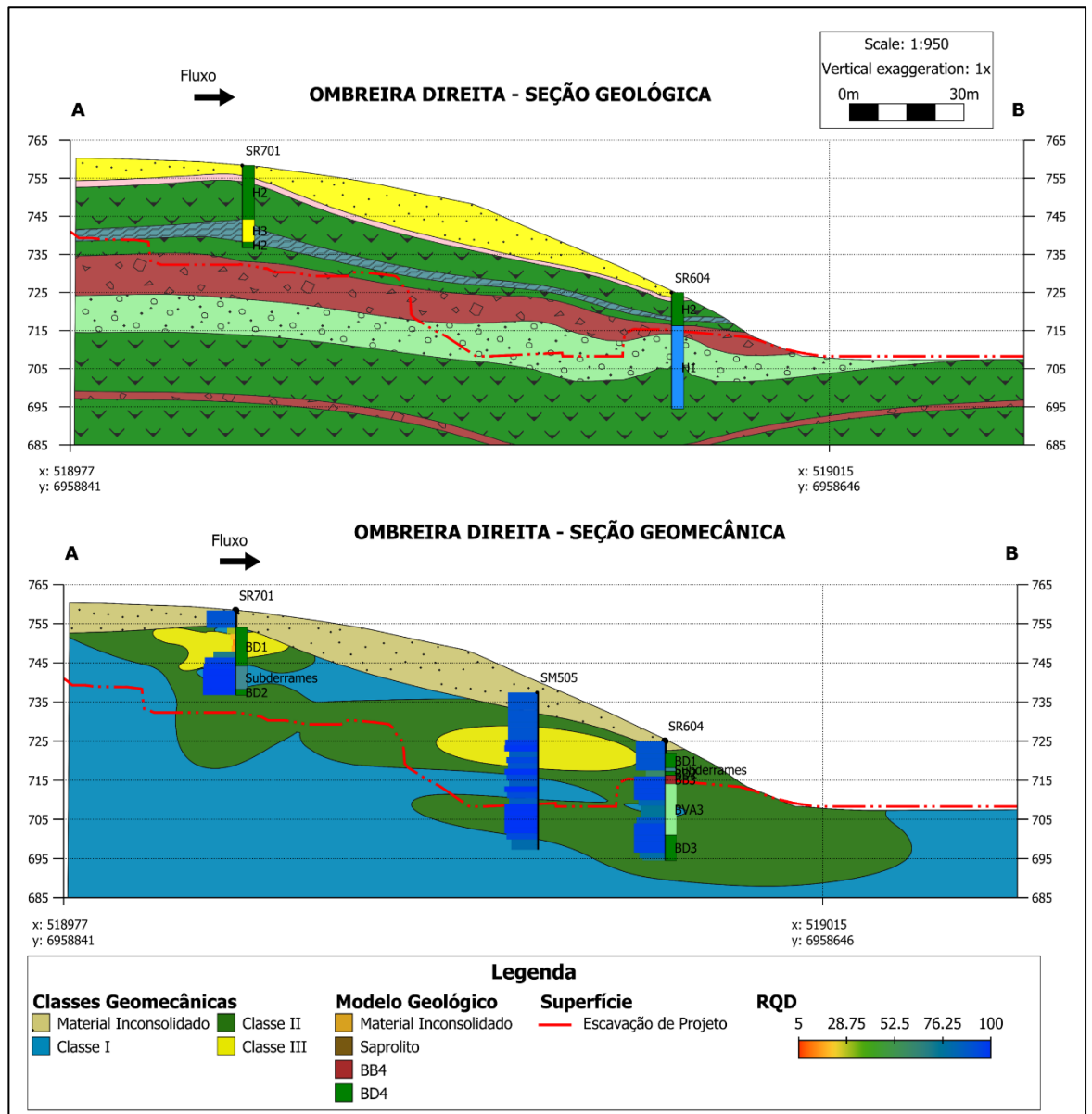
Figura 6-6. Estereograma das descontinuidades na fundação da barragem principal com relação ao eixo do barramento. Descontinuidades sub-verticais em laranja e sub-horizontais em azul



Fonte: Elaborado pelo autor

A análise cinemática combinando as duas famílias de fraturas com o eixo da barragem indicou um possível sentido de movimento para montante, condicionado principalmente pelas

Figura 6-8. Seção geológica e geomecânica da ombreira direita da ombreira direita



Fonte: Elaborado pelo autor

Já as baixas notas atribuídas no início da SR701 se dão por conta dos baixos valores de RQD nestes intervalos, corroborando com o elevado grau de alteração (A4) e baixo grau de coerência (C4) verificados nos testemunhos de sondagem.

Na seção geológica da tomada d'água (Figura 6-9) nota-se o mesmo padrão de intercalação entre os derrames com espessuras semelhantes, além disso, as linhas de escavação também atingiram as cotas do BD3. No entanto, no talude de escavação entre a cota 720 e 710 metros, possivelmente irão aflorar horizontes superiores do terceiro derrame como BB3 e

BVA3 cujos parâmetros de resistência são mais baixos e oferecem maiores condições para percolação de água (Figura 6-9).

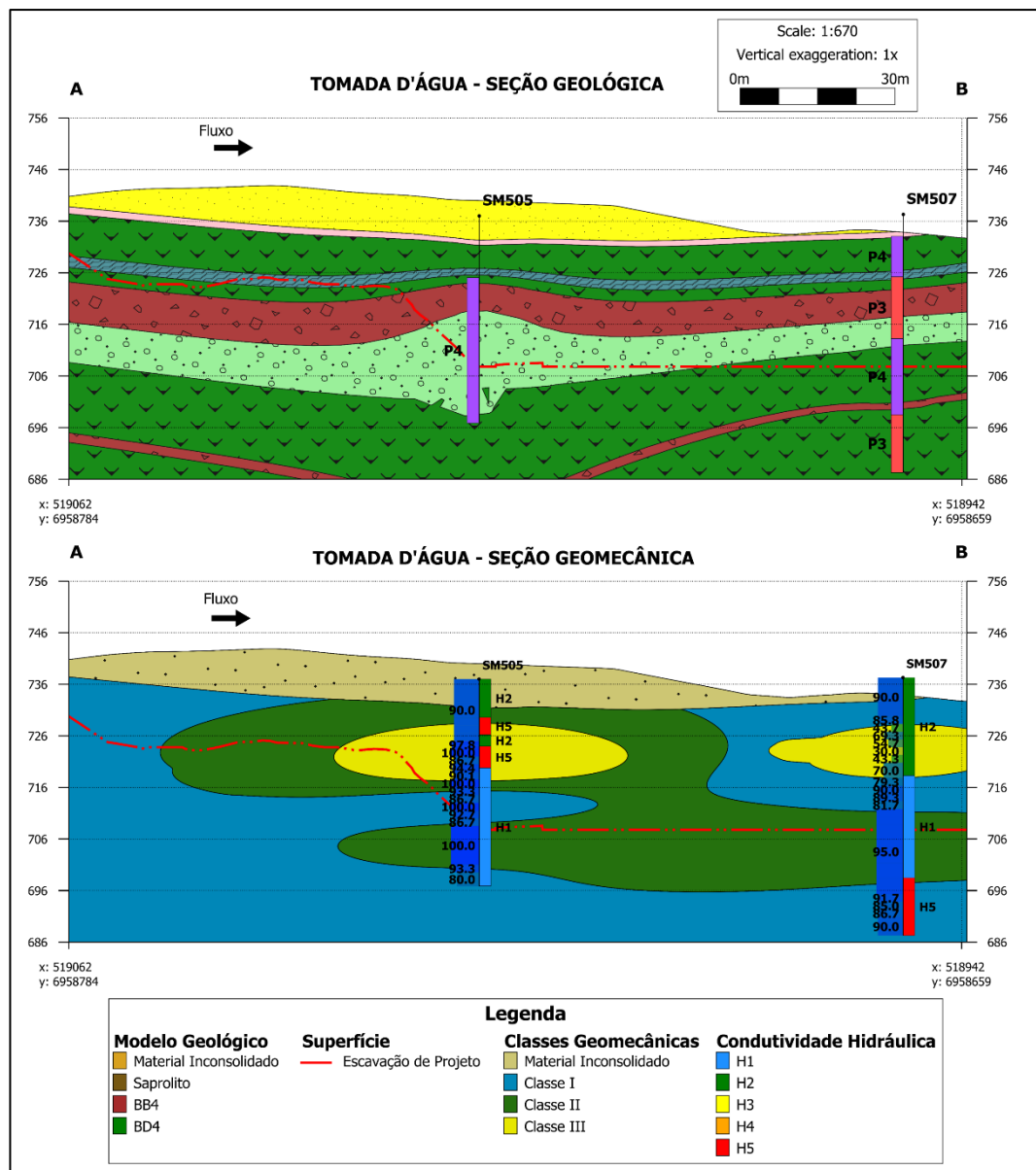
As sondagens indicaram que as descontinuidades na região da tomada d'água e casa de força são classificadas como P3 e P4, ou seja, encontram-se abertas com alteração incipiente a elevada das paredes e sinais de percolação de água.

Já na seção geomecânica (Figura 6-9), a sondagem SM505 indicou uma lente de Classe III por conta da elevada condutividade hidráulica, presença de BB3 e BVA 3 e paredes alteradas sem preenchimento (indicada na seção geológica).

Na SM507 foi identificado na cota 706 metros um horizonte com BD4 de elevada condutividade hidráulica (H5) e descontinuidades abertas (P3), abaixo da linha de escavação. Além disso, ainda ocorre o mesmo horizonte de Classe III identificado na ombreira direita (elevação 725 metros), associado a baixos valores de RQD e condutividade hidráulica H2.

As seções da tomada d'água e casa de força indicaram que o material com pior classe geomecânica foi escavado para assentar as estruturas, além de ter sido retirado boa parte da parte superior do derrame associado a BB3 e BVA3. No entanto, a sondagem SM507 indicou um horizonte no maciço rochoso que pode oferecer francos caminhos de percolação abaixo da estrutura, devendo ser levado em conta na análise de estabilidade, pois pode levar a um acréscimo na subpressão.

Figura 6-9. Seção geológica contendo intervalos de sondagem com preenchimento de descontinuidades e geomecânica com intervalos de RQD a esquerda e intervalos de condutividade hidráulica a direita.



Fonte: Elaborado pelo autor

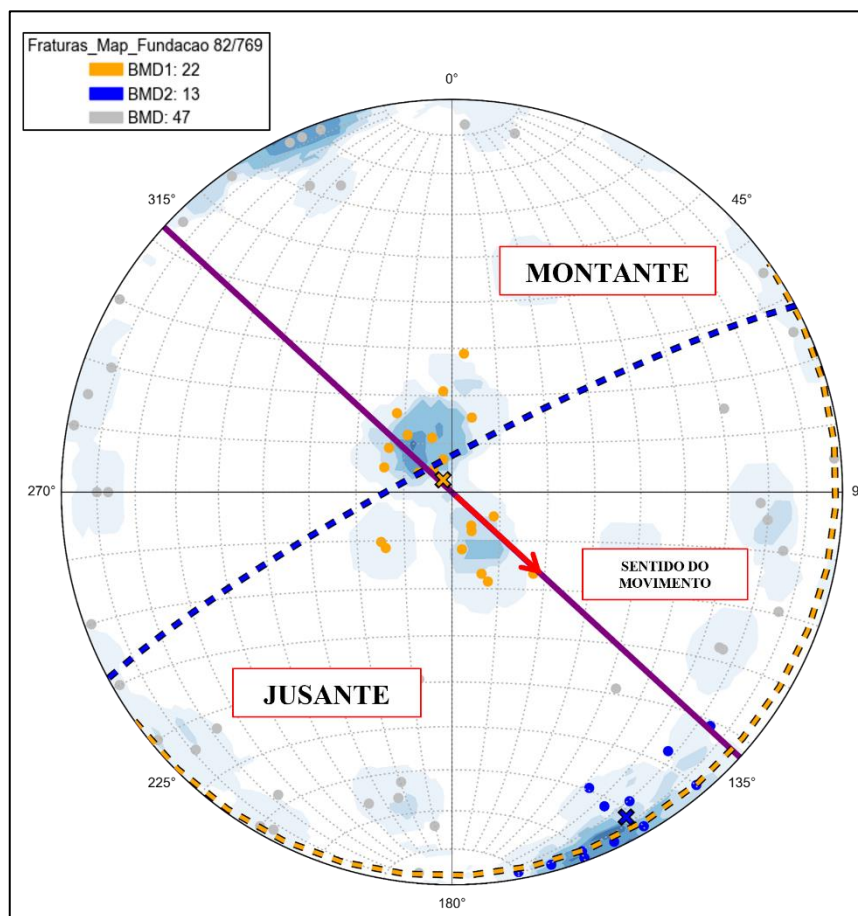
O estereograma elaborado com 82 medidas do mapeamento de fundação na margem direita indica 2 famílias principais de descontinuidades (Figura 6-10). As descontinuidades subverticais possuem atitude média $82^{\circ}/330^{\circ}$ (mergulho/direção de mergulho) enquanto as sub-horizontais têm atitude média $3^{\circ}/137^{\circ}$.

A família sub-vertical apresenta altos mergulhos em uma direção preferencial de mergulho para noroeste ou sudeste, de modo que, apesar de haver polos indicando outras descontinuidades subverticais, as linhas de isofrequências evidenciam a direção preferencial de

mergulho NW-SE. Estas discontinuidades podem estar relacionadas tanto ao diaclasamento horizontal no núcleo dos derrames basálticos quanto ao alívio de tensões nas paredes do vale.

Já a família de discontinuidades sub-horizontal mostra uma maior concentração de polos no quadrante NW, indicando um mergulho para SE. Estas fraturas possivelmente estão associadas a parte superior do derrame no espesso pacote de BB3 e BVA3, onde tipicamente ocorre intenso fraturamento horizontal.

Figura 6-10. Estereograma com polos das discontinuidades e linhas de isofrequência nas fundações da margem direita. Descontinuidades subverticais (azul) e sub-horizontais (amarelo)



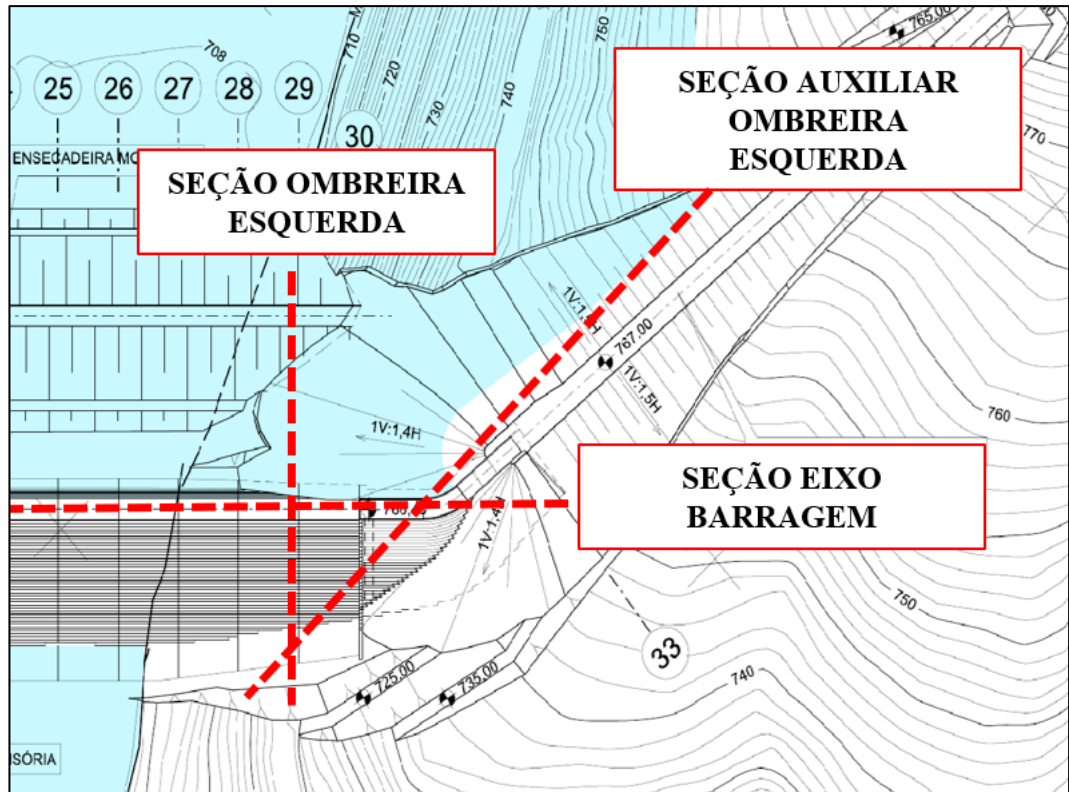
Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando cinematicamente a combinação das duas famílias de discontinuidades com o eixo do barramento, nota-se que o possível sentido de movimento para sudeste, mergulha para fora da ombreira direita em baixo ângulo. Deste modo, as discontinuidades sub-horizontais podem fornecer cinemática para o rompimento pelo maciço rochoso, devendo ser consideradas a nível no cálculo de estabilidade das estruturas.

6.4 OMBREIRA ESQUERDA

O arranjo geral do projeto indica que a ombreira esquerda serve de fechamento da barragem principal com um trecho em concreto e outro em terra. A localização das seções realizadas na ombreira esquerda encontra-se na Figura 6-11.

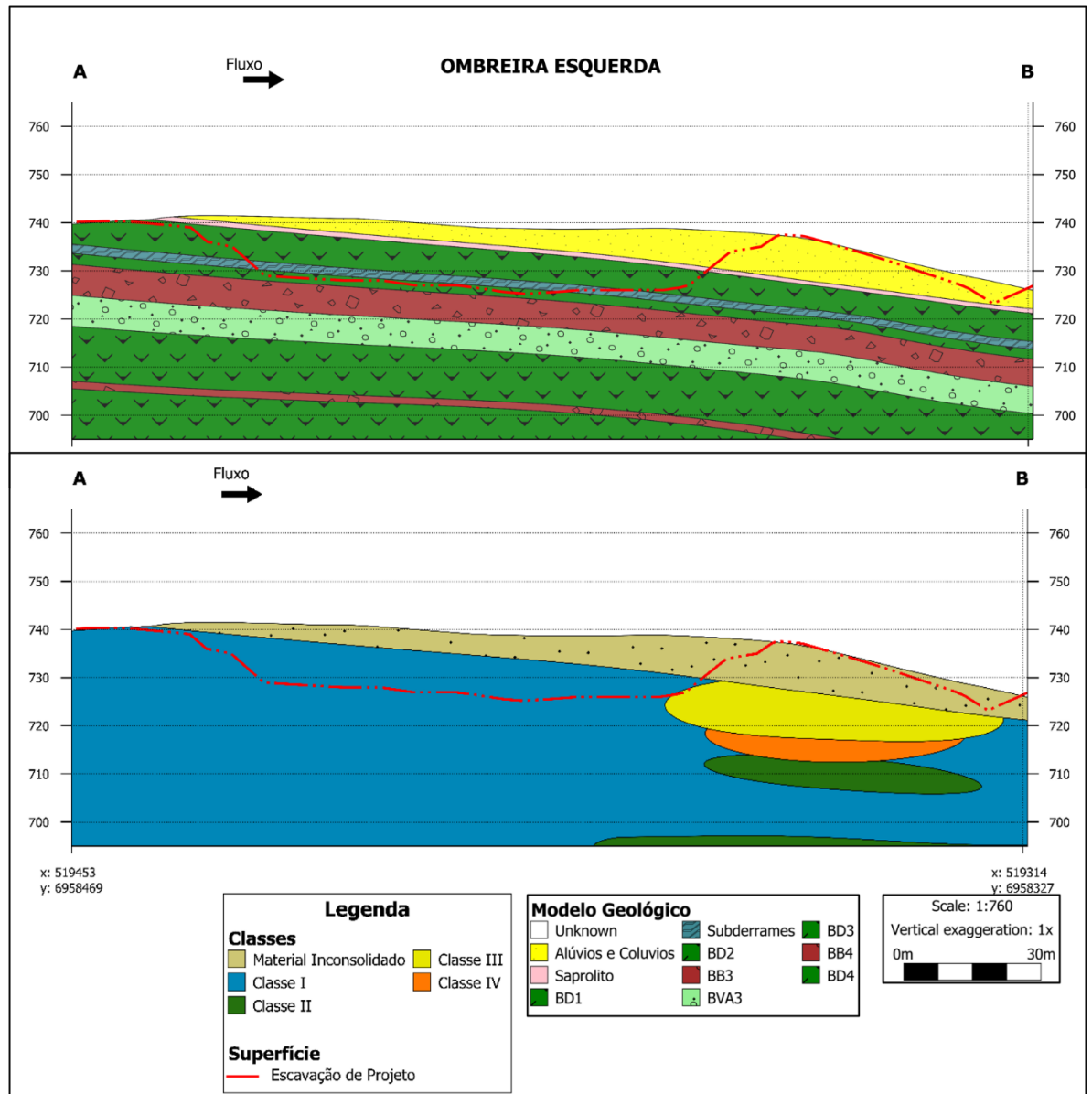
Figura 6-11. Planta de arranjo geral com localização das seções realizadas na ombreira esquerda



Fonte: Adaptado de desenho de projeto

A seção geológica mostrada na Figura 6-12 apresenta os litotipos encontrados nas fundações da ombreira esquerda, possui uma espessa camada de solo, representada pelo material inconsolidado, e logo abaixo uma fina camada de saprólito. A partir do saprólito inicia-se a intercalação entre os litotipos basálticos com disposição sub-horizontal (mergulho aproximado de 8° em direção a calha do rio). Formando o Derrame 1 encontra-se uma camada de 7 metros contendo BD1. Logo abaixo ocorre o subderrame, contendo material com intercalações finas entre os três litotipos em um estrato com 2 metros de espessura. No Derrame 2, basalto denso na ordem de 3 metros. Neste caso, as escavações realizadas atingiram até a zona de influência do Derrame 2, estando a linha de escavação alcançando sua profundidade máxima no BD2.

Figura 6-12. Seção geológica e geomecânica na ombreira esquerda da barragem



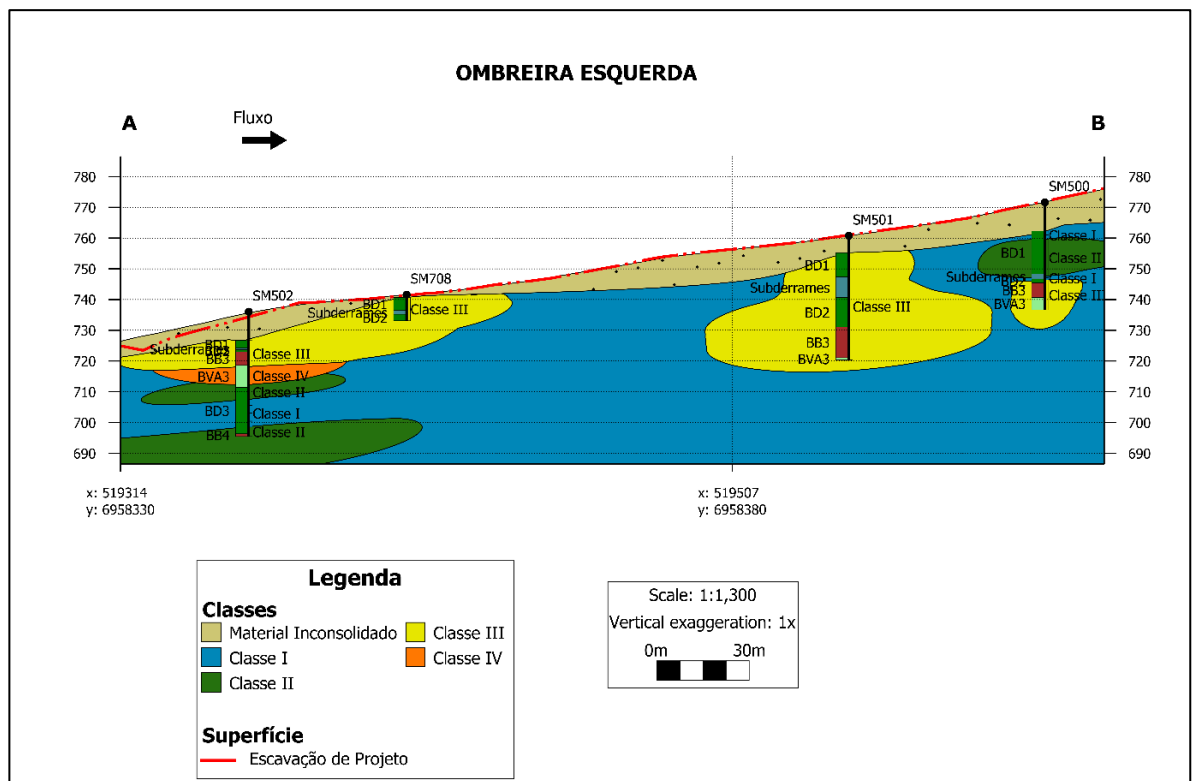
Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com a morfologia esperada dos basaltos, o modelo geológico indica que os Derrames 1 e 2 não possuem camadas vesiculares/amigdaloidais e brechas basálticas. No caso do primeiro derrame, por conta da proximidade com a superfície, estas camadas podem estar na forma de colúvios ou saprolito, pois possuem alta suscetibilidade ao intemperismo. Enquanto no Derrame 2, as camadas superiores de BB e BVA podem ter sido afetadas pela ação do subderrame fluindo pela crosta consolidada do derrame prévio, carregando este material e restando apenas o basalto denso.

A seção geomecânica (Figura 6-12) evidencia a presença de rochas com um material de melhor qualidade no sentido de montante, representado pela Classe I, por onde passa a linha de escavação de projeto. Conforme chega-se à jusante o maciço passa a classes II, III e IV intercaladas a partir da cota de 720 metros.

O maciço rochoso é classificado, de modo geral, como de boa qualidade geomecânica. As lentes com material classe II, III e IV não apresentam continuidade ao longo dos litotipos, de modo que não foi identificada nenhuma relação proeminente entre as classes e a litologia do maciço rochoso. Deste modo, elaborou-se uma seção auxiliar para averiguar a correlação entre os domínios geológicos e a classificação geomecânica, conforme Figura 6-13.

Figura 6-13. Seção auxiliar ombreira esquerda com descrição geológica das sondagens

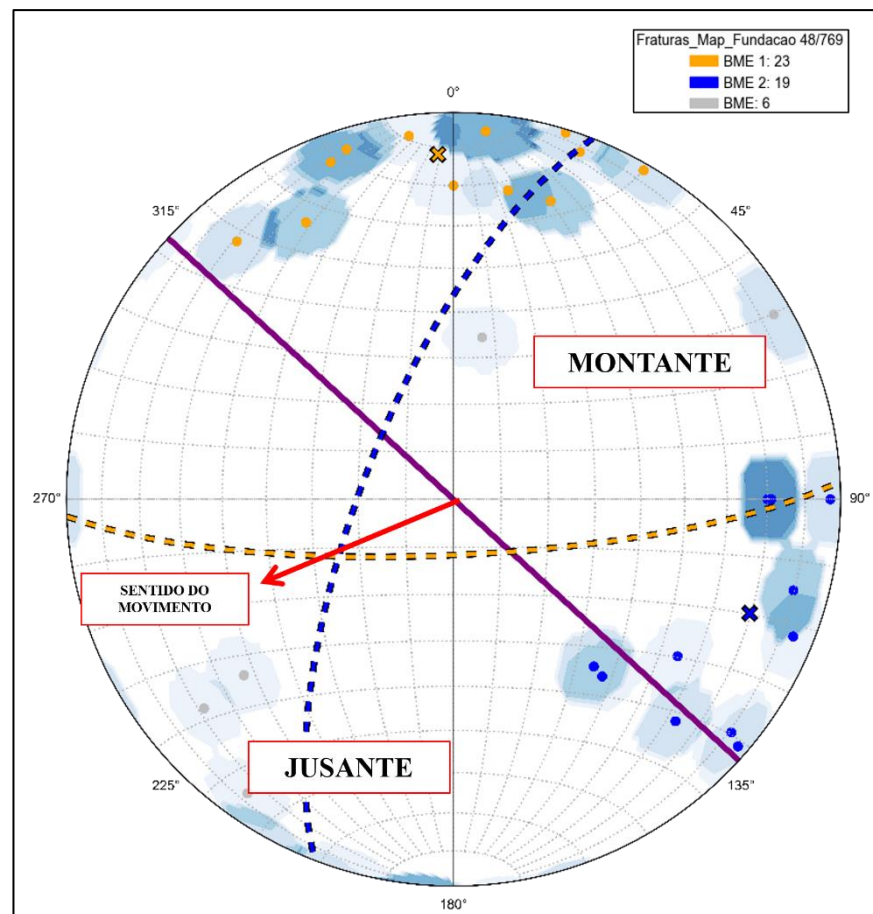


Fonte: Elaborado pelo autor

Com a seção auxiliar da ombreira esquerda pode-se notar a forte correlação entre as camadas de brecha basáltica e basalto vesicular amigdaloidal com as classes de maciço de pior qualidade. Em todas as sondagens desta seção as camadas BB3 e BVA3 estão associadas a classe de maciço III ou IV. Além disso, mesmo os basaltos densos estão classificados como Classe II e III, uma vez que as sondagens indicam que estão associados à médios e baixos valores de RQD.

O estereograma da Figura 6-14, elaborado com base em 48 medidas estruturais coletadas na margem esquerda, exibe duas famílias de descontinuidades com alto ângulo de mergulho e direções opostas, além da direção do eixo do barramento (em roxo). A primeira família (laranja) apresenta um mergulho médio de 80° com direção E-W, enquanto a segunda família (azul) tem mergulhos médios de 70° com direção NE-SW.

Figura 6-14. Estereograma com descontinuidades na ombreira esquerda e diagrama de isofrequências. Eixo da barragem em roxo



Fonte: Elaborado pelo autor

Como os planos de descontinuidade na ombreira esquerda são majoritariamente verticais, pensou-se que poderiam estar associados às fraturas de contração geradas durante o resfriamento do derrame. Porém, se este fosse o caso, o estereograma apresentaria uma distribuição de polos ao longo da borda da projeção estereográfica, pois as disjunções não teriam nenhuma direção preferencial. A presença de duas direções preferenciais indica que pode ter havido, na ombreira esquerda, algum outro tipo de controle estrutural como a presença de

uma reativação tectônica ou ao processo de erosão fluvial cujo alívio de tensões pode causar diaclasamento vertical nas paredes do vale.

Por meio de análise cinemática em relação ao eixo da barragem, nota-se que os planos e as famílias de descontinuidades se interceptam no quadrante SW da projeção estereográfica apontando um sentido de deslizamento para sudoeste, no mesmo sentido de jusante. No entanto, as descontinuidades possuem mergulho subvertical, dificultando a cinemática para o deslizamento. Ademais, a estrutura da barragem principal possui fechamento em terra na ombreira esquerda o que reduz o risco de rompimento do maciço pela rocha.

7 CONCLUSÕES

A análise estatística comprovou que BB e BVA possuem maior desvio padrão das notas de RMR o que condiz com a heterogeneidade no material e valores de resistência a compressão uniaxial. Além disso, Subderrame e Derrame 2 apresentaram as piores médias, possivelmente por estarem aflorantes e, no caso do Subderrame por possuir uma mescla dos três litotipos, lhe conferindo menores resistências.

Mesmo sendo o litotipo de maior contato com os agentes do intemperismo e erosão o BD1 frequentemente apresentou Classe I, o que denota a boa qualidade geomecânica dos basaltos densos.

As seções geológicas evidenciaram a morfologia típica dos derrames basálticos com alternância dos litotipos, camadas horizontalizadas e grande continuidade lateral. As seções geomecânicas demonstraram a correlação direta entre proximidade com a superfície e classes mais baixas de maciço, por conta do alívio de tensões. Com exceção de duas lentes com maciços classe II e III abaixo da calha do rio. Estas duas lentes podem estar associadas a zonas de cisalhamento conjugadas, como já visto em outras obras de barragens sobre os basaltos do Grupo Serra Geral.

Por meio de análise em conjunto com os parâmetros geológico-geotécnicos foi possível associar as feições típicas dos derrames basálticos com os intervalos das sondagens. Deste modo, identificou-se horizontes fraturados próximo ao topo dos derrames associados ao diaclasamento típico dos derrames basálticos nas zonas próximas ao basalto vesicular amigdaloidal e brecha basáltica.

Os estereogramas indicaram um predomínio das descontinuidades verticais, com exceção da barragem principal e tomada d'água, onde ocorre uma família de descontinuidades sub-horizontais associadas a horizontes superiores do derrame basáltico intensamente fraturados. Conclui-se que as descontinuidades sub-verticais não oferecem cinemática para o rompimento com relação as estruturas de concreto. Além disso, como a estrutura da barragem principal possui fechamento em terra, o risco de rompimento pelo maciço rochoso nas ombreiras é atenuado. Já as descontinuidades horizontais identificadas na barragem principal oferecem cinemática para o deslizamento no sentido de montante, sendo necessária análise mais minuciosa.

As principais dificuldades encontradas neste trabalho ocorreram pela não padronização da base de dados para atribuição de notas RMR o que motivou a adaptação desta

classificação. Além disso, a maior parte da base de dados em formato PDF, demandando muito tempo para transformar em dados editáveis.

Quanto ao processo de modelagem em si, percebeu-se dificuldade em encontrar juntas-falhas tanto no modelo geológico quanto geológico-geotécnico, por se tratar de feições com dimensões reduzidas e não ser possível identificar sua presença com assertividade nas sondagens. Assim, mostra-se evidente como o estudo de maciços rochosos depende da escala de trabalho, tornando imprescindível a análise de campo e mapeamento de fundações para identificar feições de maior detalhe, as quais são de difícil captação em uma escala de trabalho menor.

Os próximos passos para este trabalho seriam realizar um modelo geomecânico por bloco incluindo as estruturas de concreto, analisar as descontinuidades com mergulho aparente (principalmente as sub-horizontais) e atribuir parâmetros de resistência tanto para a rocha intacta quanto para as descontinuidades, a fim de inserir no cálculo de estabilidade da estrutura pela ruptura na fundação. Ademais, com uma base de dados mais robusta o *software* teria a capacidade de utilizar diferentes estratégias de modelagem para cada modelo e domínio litológico. Entre elas, podem ser usadas funções geoestatísticas como krigagem e análises variográficas para atingir maior continuidade espacial da interpolação entre as sondagens, produzindo um modelo mais realista.

Apesar das dificuldades, notou-se a aderência do modelo com o modelo geológico do projeto e escavações realizadas para assentar as estruturas, onde foi removido boa parte do material com pior qualidade, indicando a aproximação com o que foi feito no projeto executivo e obra.

A atualização de todo o projeto com a inserção de novos dados ou atribuição de novos parâmetros é realizada de modo automático, conferindo grande vantagem para testar diversos cenários. Combinado a isto, a capacidade de juntar todos os dados pertinentes ao modelo geológico-geotécnico em uma única interface proporciona integrar e analisar os dados com maior facilidade, bem como criar seções de forma dinâmica, sem o intermédio de um desenhista.

Assim, os modelos produzidos mostraram-se de grande valia para projetos de infraestrutura, sendo capazes de sinalizar zonas com potenciais problemas ajudando na investigação do maciço rochoso em diversas fases de projeto, diminuindo a incerteza e facilitando a tomada de decisões nos planos de escavação e análises de estabilidade.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA - ABGE. **Investigações Geológico-Geotécnicas: guia de boas práticas**. São Paulo: ABGE, 2021.

ANDRADE, Roberto Monteiro. **O controle da subpressão pela drenagem horizontal**. Rio de Janeiro: Engevix, 1983.

BARTON, N., LIEN, R., LUNDE, J., **Engineering Classification of Rock Masses for Design of Tunnel Support**. In: Rock Mechanics, Springer Verlag, v.6, p.189-236, 1974.

BARTON, N. e CHOUBEY, V. **The Shear Strength Of Rock Joints in Theory and Practice**. Rock Mechanics. Vol. 10/1-2, 1977.

BELLIENI, G.; BROTZU, P.; COMIN-CHIARAMONTI, P., ERNESTO, M.; MELFI, A.J.; PACCA, I.G.; PICCIRILO, E.M.; STOLVA, D. **Petrological and Paleomagnetic Data on the Plateau Basalts to Rhyolite sequencies of the Southern Paraná Basin (Brazil)**. Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 55, p. 355-383, 1983

BIENIAWSKI, Z. T. **Geomechanics classification of rock masses and its application in tunneling**. In: Proc. 3rd Int. Congress on Rock Mechanics. 1974.

BIENIAWSI, Z.T. **Engineering Rock Mass Classficiations: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroluem engineering**. Pensilvânia, Estados Unidos, 1989.

CANELLO, Vivian Athaydes; PATIAS, Josiele; ZUQUETTE, Lázaro Valentim. **Interpolação 3D de dados de Rock Quality Designation: barragem de Itaipu, Paraná, Brasil**. Geologia Usp. Série Científica, [S.L.], v. 20, n. 3, p. 31-46, 29 set. 2020. Universidade de Sao Paulo, Agencia USP de Gestao da Informacao Academica (AGUIA). <http://dx.doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v20-159737>.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS. **Critérios de projeto civil de usinas hidrelétricas.** ELETROBRÁS. Rio de Janeiro, 2003.

COSTA, Walter Duarte. **Geologia de Barragens.** São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 352 p.

COWAN, Jun (2003). **Practical Implicit Geological Modelling.** 5th International Mining Geology Conference.

CRUZ, Paulo T. **100 Barragens Brasileiras: Casos Históricos.** Materiais de Construção. Projeto. 2. Ed, São Paulo. Oficina de Textos, 1996.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Mapa geológico do estado de Santa Catarina.** Porto Alegre: CPRM, 2014. Escala 1:500.000.

CURTI, Daiane Katya. **Tipologia e origem das fraturas sub-horizontais em basaltos da Formação Serra Geral,** Brasil / São Paulo, 2011.

DEERE, D.U. HENDRON, A.J., PATTON, F.D. AND CORDING, E.J. (1967) **Design of Surface and Near Surface Construction in Rock** Minneapolis, Minn. Proceedings, p. 237 – 302.

ENGEVIX ENGENHARIA S.A. **Minicurso de Barragens.** 2013

GAMA, Pedro Samuel dos Santos. **Injeção de caldas de cimento em fundações rochosas de barragens: Revisão crítica de metodologias.** 2012.147 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Geológica (Geotecnia), Universidade de Nova de Lisboa, Lisboa, 2012.

SILVEIRA, Felipe Gobbi. **Estudo do comportamento geomecânico de rochas efusivas da formação serra geral e sua aplicação na modelagem numérica de túneis.** Tese

(Doutorado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2013.

GUIDICINI, G.; CAMPOS, J. O. **Notas sobre a morfogênese dos derrames basálticos.** Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia, v.17, n.1, p.15-28, 1968.

GOULART, Djonathan. **Análise e correlação de propriedades físicas e mecânicas de rochas da Formação Botucatu e Grupo Serra Geral.** Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2019.

HARTMANN, Léo Afraneo. **A história natural do grupo serra geral desde o cretáceo até o recente.** Ciência e Natura, [S.L.], v. 36, n. 3, p. 173-182, 31 out. 2014. Universidad Federal de Santa Maria.

HASUI Y., PONÇANO W.L., STEIN, D.P., MELO, M.S. 1978. **Investigação estrutural na região de Primeiro de Maio, SP e PR.** In: II Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, São Paulo, ABGE, Anais, vol.1, p. 339-352.

HOEK, E., Strength of rock and rock masses, ISRM News Journal, 2(2), p. 4-16. 1994

HUDSON, J. A.; HARRISON, J. P. **Engineering rock mechanics: an introduction to the principles.** Elsevier, 2000.

HOEK, Evert; BROWN, Edwin T. **Practical estimates of rock mass strength.** International journal of rock mechanics and mining sciences, v. 34, n. 8, p. 1165-1186, 1997.

HUDSON, John; HARRISON, John. **Engineering Rock Mechanics. An Introduction to the principles.** Imperial College of Science, Technology and edicine. University of London, 1997.

ISRM (International Society for Rock Mechanics) (1978) **Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses.** International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 15, 319-368, 1978.

JERRAM, Dougal. **Introdução à Vulcanologia**. Edimburgo e Londres: Dunedin Academic Press, 2018. 159 p.

KENTWELL, D J, 2019. **Destroying the distinction between explicit and implicit geological modelling**, in Proceedings Mining Geology 2019

LEVIS, Silvia Delattre. **Verificação da eficácia dos sistemas de vedação e drenagem em fundações de barragem de concreto**. 2006. 186 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

LOPES, Marieli Biondo. **Tratamento de Fundação para Barragens de Concreto**. Curitiba: Appris, 2020. 185p.

MACDONALD, G. A. **Pahoehoe, aa and block lava**. American Journal of Science, v.251, p. 169-191, 1953.

MARQUES, Eduardo. **Mecânica das Rochas**. Oficina de Textos, 2022.

MELO, Manolo Morales. **Caracterização e compartimentação geológica e geomecânica de maciço basáltico heterogêneo, aplicados a engenharia**. 2010. Dissertação (Mestrado em Geotectônica) - Instituto de Geociências, University of São Paulo, São Paulo, 2010. doi:10.11606/D.44.2010.tde-06052010-134405. Acesso em: 2022-11-28.

Melfi, A.J.; Piccirillo, E.M. & Nardy, A.J.R. 1988. **Geological and magmatic aspects of the Paraná Basin an introduction**. In: Piccirillo EM, Melfi AJ (Eds.) The Mesozoic Flood Volcanism of the Paraná Basin: Petrogenetic and Geophysical Aspects. São Paulo, IAG-USP. p. 1-13.

MESQUITA, João Batista de. **Maciços rochosos em projetos hidrelétricos: proposta de classificação geomecânica**. 2008. 269 f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual

Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2008. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/102926>>.

MILANI, E.J.; MELO, J. H. G. **Bacia do Paraná**. Boletim de Geociências PETROBRAS, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 265-287, 2007.

MILANI, E.J.; RAMOS, V.A. **Orogenias Paleozóicas no domínio sul-ocidental do Gondwana e os ciclos de subsidência da Bacia do Paraná**. Revista Brasileira de Geociências, v. 28 (4), p. 473-484, 1998.

OLIVEIRA, A.M.S; SILVA, R.F; GUIDICINI, G. **Comportamento Hidrogeotécnico dos Basaltos em Fundações de Barragens**. 1º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia. Rio de Janeiro, agosto de 1976.

OLIVEIRA, Antonio Manoel. **Estudo da percolação d'água em maciços rochosos para o projeto de grandes barragens**. Orientador: Jose Eduardo Siqueira Farjallat. 1981. 185 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1981.

OLIVEIRA, Antonio Manuel dos Santos; SILVA, Ricardo Fernandes da; FERREIRA, Jayme. **Ensaio de Perda D'água sob pressão – Diretrizes – Boletim 02**. São Paulo: 1975

OLIVEIRA, Frederico Fernandes de. **Análise de tensões e estabilidade global de barragens de gravidade de concreto**. 2002. xv, 169 f., il. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) — Universidade de Brasília, Brasília, 2002.

OLIVEIRA, Patricia Casarotto de. **Caracterização geológico-geotécnica de diferentes litotipos basálticos: basalto denso, basalto vesículo-amigdaloidal e brecha basáltica**. 2012. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2012. doi:10.11606/D.18.2012.tde-08112012-113103. Acesso em: 2022-11-28.

PATTON F.D, HENDRON A.J.F. **General report on mass movements**. In: II International Congress of the International Association of Engineering Geology,

São Paulo, ABGE, Proceedings, vol.2, tema 5, V-GR, 1974.

READ, John; STACEY, Peter. **Guidelines for open pit slope design**. 2009.

SALA, Leonardo Alberto. **Metodologia de construção de modelo geotécnico com uso de geoestatística**. 2022.

SELF, S.; KESZTHELYI, L.; THORDARSON, T. **The importance of pahoehoe**. Earth Planetary Science. Annual Reviews, v.26, p.81-110, 1998.

SELF, S.; THORDARSON, T.; KESZTHELYI, L. **Emplacement of continental flood basalts flows**. In: Mahoney JJ, Coffin M (eds.) Large Igneous Provinces, American Geophysical Union Monography, vol. 100, p. 381-410, 1997.

SERAFIM, Joaquim Laginha; PEREIRA, Joaquim Jorge da Costa Paulino. **Considerations of the geomechanics classification of Bieniawski**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENGINEERING GEOLOGY AND UNDERGROUND CONSTRUCTION.1983. Lisboa. Proceedings.... vol. I (II):33 –44.

SINGH, B.; GOEL, R. K. **Engineering rock mass classification: tunneling, foundations, and landslides**. Waltham, MA: Butterworth-Heinemann, 2011.

SOUZA, Marcos Daniel. **Geologia Aplicada a Fundações de barragens: a barragem Governador Eduardo Henrique Accioly Campos, um estudo de caso**. Orientador: Almany Costa Santos. 2017. 247 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

THEMAG ENGENHARIA. **Tabelas, critérios e modelos para a descrição de sondagens**. Documentos sem nota tipográfica, 2012.

VALLEJO, Luis Ignacio González de et al. **Ingeniería Geológica**. Madrid: Pearson Prentice Hall, 2002. 744 p.

VOLKMER, Mariana Vogt. **Análise de subpressão em fundações rochosas e seus efeitos na estabilidade de barragens tipo gravidade**. 2011. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia, Distrito Federal, 2011.

WAICHEL, B.L., LIMA, E.F., LUBACHESKY, R., SOMMER, C.A. **Pahoehoe flows from the central Parana continental flood basalts**. *Bulletin of Volcanology*. v. 68, p. 599-610, 2006.

WYLLIE, D.C., NORRISH N.I. **Rock strength properties and their measurement**. In *Landslides Investigation and Mitigation, Special Report 247* (eds AK Turner & R Schuster), pp. 372–390. Transportation Research Board, NRC, National Academy Press, Washington DC, 1996.

