



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

NATÁLIA MILHOMEM BALIEIRO

**CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA DE MACIÇOS ROCHOSOS PARA
IMPLANTAÇÃO DE BARRAGEM: estudo de caso da barragem Belém de São
Francisco**

Recife

2023

NATÁLIA MILHOMEM BALIEIRO

**CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA DE MACIÇOS ROCHOSOS PARA
IMPLANTAÇÃO DE BARRAGEM: estudo de caso da barragem Belém de São
Francisco**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira.

Coorientador: Prof. Dr. Almany Costa Santos.

Recife

2023

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

B186c	<p>Balieiro, Natália Milhomem. Classificação geomecânica de maciços rochosos para implantação de barragem: estudo de caso da barragem Belém de São Francisco / Natália Milhomem Balieiro. – 2023. 109 f.: il., figs., qds., tabs., abrev. e siglas.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira. Coorientador: Prof. Dr. Almany Costa Santos. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2023. Inclui Referências, Apêndice e Anexo.</p> <p>1. Engenharia civil. 2. Barragem. 3. Classificação geomecânica. 4. Maciço rochoso. 5. Fundação de barragem. I. Ferreira, Silvio Romero de Melo (Orientador). II. Santos, Almany Costa (Coorientador). III. Título.</p> <p style="text-align: right;">UFPE</p> <p>624 CDD (22. ed.) BCTG/2024-36</p>
-------	--

NATÁLIA MILHOMEM BALIEIRO

**CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA DE MACIÇOS ROCHOSOS PARA
IMPLANTAÇÃO DE BARRAGEM: estudo de caso da barragem Belém de São
Francisco**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de Concentração: Geotecnia.

Aprovada em: 31/10/2023.

BANCA EXAMINADORA

Participação por videoconferência
Prof.^a Dr.^a Leila Brunet de Sá Beserra (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

Participação por videoconferência
Prof. Dr. Joaquim Teodoro Romão de Oliveira (Examinador Externo)
Universidade Católica de Pernambuco

Participação por videoconferência
Prof. Dr. Robson Ribeiro Lima (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Ao meu Deus e Pai de onde vem a minha fé e a minha força. Que nunca me desampara nos momentos mais difíceis e sempre abençoa os meus caminhos.

Ao meu esposo, que é um meu maior referencial de dedicação, disciplina e um grande incentivador.

A minha família, em especial, a minha mãe um exemplo de mulher guerreira e aos meus avós Rita e João.

Ao meu orientador Silvio Romero, um grande mestre, que sempre tem uma palavra de incentivo, de afago para aqueles momentos que nem você acredita em você mesma.

Ao meu coorientador Almany pela prestatividade e por aceitar o desafio de desenvolvermos esse trabalho em um espaço curto de tempo.

A minha grande amiga Marianne por se meu apoio, me incentivar e ser um pedaço da minha família por aqui.

A minha amiga/mãe Evânia por sempre me colocar nas suas orações e ser uma intercessora na minha vida.

A minha parceira de turma Jeovana por ser um apoio nos momentos difíceis dessa jornada de mestranda e também vibrarmos juntas a cada conquista.

Ao Professor Robson e seus alunos Péricles, Silas e Cecília que me acolherem no laboratório de Minas para moldagem dos corpos de prova.

Ao Professor Acácio e seus alunos Igor, Victor e Tacila que me cederam o espaço do LabTag e me auxiliariam nos ensaios de resistência.

Ao laboratorista Gutemberg que sempre me auxiliou no que fosse necessário no laboratório de solos da UFPE.

Aos meus colegas de trabalhos e geólogos, Alexandre e Mayara pela parceria e a disponibilidade para sanar dúvidas geológicas para o desenvolvimento dessa pesquisa.

Ao meu ex-gestor João Silvino o idealizador do caso de obra a ser estudado.

A Techne Engenheiros Consultores e a CODEVASF por disponibilizarem os dados para a realização da pesquisa.

RESUMO

A construção de barragens existe desde a antiguidade e desempenham um papel significativo no desenvolvimento humano, sendo estruturas fundamentais em regiões semiáridas que enfrentam desafios relacionados as frequentes secas. Os estudos geológicos-geotécnicos são um dos fatores condicionantes na escolha da concepção de um barramento, sendo influenciado diretamente pelas condições de fundação. Nesse contexto, este trabalho tem a objetivo de avaliar as condições geológicas e geotécnicas do maciço rochoso da fundação onde será implantada uma barragem no sertão pernambucano. São apresentados os processos de caracterização e classificação geomecânica dos maciços rochosos com intuito de discutir a influência da fundação na escolha da alternativa tecnológica mais adequada para o projeto. Os dados utilizados foram oriundos da investigação geológica-geotécnica de campo e dos ensaios de laboratórios realizados. Foram ensaiadas amostras de Argilitos, Arenitos e Xisto identificados ao longo das investigações de campo. Os ensaios de laboratório mostram que a resistência a compressão uniaxial, tanto do argilito como o arenito, é de 6,91 MPa e 10,80 MPa, respectivamente e a resistência a tração para o argilito varia entre 0,43 e 1,44 MPa e para o arenito é de 0,49 e 1,62 MPa. Os ensaios de expansão “livre” apresentam resultados da expansão com percentuais de 0,5% de 2,5% para o xisto e o argilito, respectivamente. Os ensaios de tensão de expansão indicam uma tensão de expansão de 33 kPa para o Xisto e de 48 kPa para o Argilito. Já a porosidade do arenito apresenta o resultado de 26,27%. Adicionalmente, este trabalho classifica, individualmente, as litologias identificadas na investigação e o maciço rochoso ao longo da linha de fundação da barragem. O maciço é avaliado nas condições da sua condutividade hidráulica e classificado de acordo com valores de Rock Quality Designation – RQD e o sistema Rock Mass Rating – RMR de Bieniawski. As rochas que compõem o maciço rochoso da fundação foram classificadas, predominantemente, como rochas brandas (R4) e muito brandas (R5), mostrando-se muito fraturado e alterado. Em relação ao sistema RMR, o maciço foi classificado com qualidade muito pobre, concluindo que, o maciço da rochoso não apresenta características geológico-geotécnicas e geomecânicas adequadas para fundação de uma barragem de estrutura rígida, sendo a melhor alternativa uma barragem de gravidade.

Palavras-chave: barragem; classificação geomecânica; maciço rochoso; fundação de barragem.

ABSTRACT

The construction of dams has existed since ancient times and plays a significant role in human development, particularly in semi-arid regions that face challenges related to frequent droughts. Geological-geotechnical studies are crucial factors in determining the design of a dam, directly influenced by foundation conditions. In this context, this work aims to assess the geological and geotechnical conditions of the rocky mass of the foundation where a dam will be built in the backlands of Pernambuco. The processes of characterization and geomechanical classification of rocky masses are presented to discuss the influence of the foundation on choosing the most suitable technological alternative for the project. The data used came from field geological-geotechnical investigation and laboratory tests. Samples of argillite, sandstone, and shale identified during field investigations were tested in the laboratory. Laboratory tests show that the uniaxial compression strength for both Argillite and Sandstone is 6.91 MPa and 10.80 MPa, respectively. The tensile strength for Argillite ranges from 0.43 to 1.44 MPa, while for Sandstone, it is between 0.49 and 1.62 MPa. "Free" expansion tests reveal expansion percentages of 0.5% to 2.5% for shale and argillite, respectively. Tension expansion tests indicate an expansion tension of 33 kPa for Shale and 48 kPa for Argillite. The porosity of the sandstone presents a result of 26.27%. Additionally, this study individually classifies the lithologies identified in the investigation and the rock mass along the dam's foundation line. The mass is evaluated under its hydraulic conductivity conditions and classified according to Rock Quality Designation (RQD) values and the Bieniawski's Rock Mass Rating (RMR) system. The rocks that comprise the rock mass of the foundation were predominantly classified as soft rocks (R4) and very soft rocks (R5), showing significant fracturing and alteration. Concerning the RMR system, the rock mass was classified as having very poor quality, concluding that the rock mass does not present geological-geotechnical and geomechanical characteristics suitable for the foundation of a rigid structure dam, with the best alternative being a gravity dam.

Keywords: dam; geomechanical classification; rock mass; dam foundation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Seção típica Barragem de terra.	18
Figura 2 - Seção típica Barragem de Zonada.	18
Figura 3 - Seção típica barragem de concreto de gravidade.....	19
Figura 3 - Seção típica barragem de concreto em arco.....	20
Figura 5 - Seção geológica fundação bloco B21 na região do vertedouro da UHE Dona Francisca.	24
Figura 6 - Principais parâmetros das discontinuidades.....	30
Figura 7 - Representação da abertura das discontinuidades.	31
Figura 8 - Classificação das paredes das discontinuidades quanto à sua rugosidade.	33
Figura 9 - Classificação das paredes das discontinuidades quanto à sua rugosidade.	38
Figura 10 - Mapa com os principais domínios geológicos da Província Borborema.....	44
Figura 11 - Compartimentação geotectônica da Subprovíncia Central, com a representação dos terrenos, faixas e sistemas de dobramentos que os compõe, além das coberturas sedimentares.	45
Figura 12 - Contexto geológico da bacia hidrográfica do Eixo.....	47
Figura 13 – Localização da futura barragem Belém de São Francisco.	48
Figura 14 - Eixo da futura barragem Belém de São Francisco.....	49
Figura 15 - Metodologia executiva na investigação empregada durante a sondagem.	51
Figura 16 – Localização da coleta de amostras de solos.	54
Figura 17 – Corpos de Prova - Arenito.....	55
Figura 18 – Corpo de prova do Argilito desagregando.	55
Figura 19 – Caixa de testemunhos das sondagens SM-BSF-06, SM0-BSF-07 e SM-BSF-08.. ..	56
Figura 20 – Material desagregando na hora da moldagem dos corpos de prova.....	57
Figura 21 – (A) Corpo de prova argilito; (B) Corpo de prova arenito; (C) Ensaio de compressão simples.	57
Figura 22 – (A) Corpo de prova 50x100mm; (B) Corpo de prova 50x50mm; (C) Ensaio de compressão diametral.....	59
Figura 23 – (A) Amostras de Argilito e Xisto no anel; (B) Amostras na célula de adensamento; (C) Ensaio de Expansão.	60

Figura 24 – (A) Amostras de Xisto; (B) Amostra de Arenito; (C) Amostra de Argilito e (D) Confecção das lâminas.....	61
Figura 25 – (A) Aparelho de inspeção END por ultrassom; (B) Amostra nos transdutores.	63
Figura 26 – Tela de interface gráfica detalhada do dispositivo Pundit Lab+ de uma das amostras ensaiadas.	63
Figura 27 – Aluvião presente no leito do Riacho da Cachoeira, a jusante do Eixo.	66
Figura 28 - Camadas com maior espessura entre as sondagens SM-BSF-07 e SM-BSF-12. Em destaque, a zona de passagem do Riacho Cachoeiras.....	67
Figura 29 – Litologias identificadas nas sondagens. (A) Arenito; (B) Siltito; (C) Pedregulhos; (D) Conglomerado; (E) Xisto; (F) Migmatito; (G) Granito e (H) Sienito.....	68
Figura 30 – Perfil geológico-geotécnico da fundação da futura barragem BSF.	71
Figura 31 – Perfil geológico-geotécnico da fundação da futura barragem BSF com as sondagens realizadas ao longo do eixo.	72
Figura 32 – Perfil geológico-geotécnico da fundação da futura barragem BSF – ombreira direita.	73
Figura 33 – Perfil geológico-geotécnico da fundação da futura barragem BSF – leito do rio.	74
Figura 34 – Perfil geológico-geotécnico da fundação da futura barragem BSF – ombreira esquerda.	75
Figura 35 – Curvas granulométricas das amostras ensaiadas.....	79
Figura 36 – Curvas granulométricas dos solos finos.....	80
Figura 37 – Curvas granulométricas dos solos granulares.	80
Figura 38 – Índice de atividade das argilas.	81
Figura 39 – Análise petrográfica da amostra 4 indicando a presença de cimentação.	85
Figura 40 – Análise petrográfica da amostra 3 indicando a presença de matéria orgânica.....	86
Figura 41 – Resultado do ensaio de Difractometria de Raio X (DRX).....	87
Figura 42 – Análise petrográfica da amostra 8 indicando um Siltito laminado.	89
Figura 43 – RQD separados pela porcentagem de ocorrência no maciço Migmatito.	91
Figura 44 – RQD separados pela porcentagem de ocorrência por litologia.....	99
Figura 45 – Classe RMR de Bieniawski separados pela porcentagem de ocorrência por litologia.	100
Figura 46 – Distribuição RMR de Bieniawski de acordo com a classe.	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Correlação entre a classe da rocha e o tipo de barragem mais adequada.	22
Tabela 2 - Critérios utilizados para a determinação do grau de alteração das rochas.	28
Tabela 3 - Critérios para a determinação do grau de coerência das rochas.	28
Tabela 4 - Graus de resistência dos maciços rochosos em função de sua resistência à compressão uniaxial.	29
Tabela 5 - Critérios para a determinação do grau de fraturamento das rochas.	30
Tabela 6 - Descrição do espaçamento das descontinuidades.	31
Tabela 7 - Critérios para a classificação das aberturas das descontinuidades do maciço rochoso.	32
Tabela 8 - Critérios para a classificação da persistência das descontinuidades em um maciço rochoso.	32
Tabela 9 – Parâmetros de condutividade hidráulica.	38
Tabela 10 - Classe de qualidade do maciço rochoso a partir dos valores do RQD.	41
Tabela 11 – Correspondência entre os trechos propostos para as fundações e as estacas e furos de sondagens realizados.	50
Tabela 12 – Amostras dos ensaios de compressão simples ou uniaxial.	58
Tabela 13. Coleta de amostras para realização de ensaios, com trecho onde foram retiradas.	62
Tabela 14 – Resultados dos ensaios de infiltração.	76
Tabela 15 – Resultados dos ensaios de perda d’água da ombreira direita.	77
Tabela 16 – Resultado dos Índices físicos.	82
Tabela 17 – Resultados dos ensaios de compressão simples ou uniaxial.	83
Tabela 18 – Resultados dos ensaios de compressão diametral (tração).	84
Tabela 19 – Resultados dos ensaios de compressão diametral (tração).	85
Tabela 20 - Resultado do Ensaio de Ultrassom.	90
Tabela 21 - Índices RMR - Migmatito.	92
Tabela 22 - Índices RMR do Sienito.	93
Tabela 23 - Índices RMR do Xisto.	94
Tabela 24 - Índices RMR do Granito.	95
Tabela 25 - Índices RMR do Arenito.	97

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.2 RELEVÂNCIA DO TEMA	13
1.3 OBJETIVOS	14
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	15
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	16
2.1 BARRAGENS	16
2.1.1 Tipos de barragens	17
2.1.2 Estudos para projetos de barragens	20
2.1.3 Fundações de barragens.....	21
2.1.4 Barragens assentes sobre rochas sedimentares	22
2.2 INVESTIGAÇÃO DE CAMPO	24
2.2.1 Prospecção direta.....	24
2.2.2 Prospecção semidireta	25
2.2.3 Prospecção indireta	25
2.3 CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA DO MACIÇO ROCHOSO.....	26
2.3.1 Caracterização geológica-geotécnica dos maciços rochosos	27
2.3.1.1 Litologia	27
2.3.1.2 Grau de alteração	27
2.3.1.3 Coerência	28
2.3.1.4 Grau de resistência.....	29
2.3.1.5 Condições de descontinuidades	29
2.3.2 Ensaios de Laboratório	33
2.3.2.1 Análise petrográfica.....	34
2.3.2.2 Propriedades índices	34

2.3.2.3 Propriedades mecânicas.....	35
2.3.2.4. Propriedades hidráulicas.....	36
2.3.3 Classificação geomecânica dos maciços rochosos	38
2.3.3.1 RQD (Rock Quality Designation)	39
2.3.3.2 Sistema RMR (Rock Mass Rating)	41
3 MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1 GEOLOGIA REGIONAL	43
3.2 GEOLOGIA DA BACIA HIDROGRÁFICA DA FUTURA BARRAGEM.....	46
3.3 ÁREA DE ESTUDO	47
3.4 PROGRAMA DE INVESTIGAÇÃO GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA	50
3.4.1 Sondagens de Simples Reconhecimento com Determinação do Índice de Resistência a Penetração (Nspt)	51
3.4.2 Sondagens Rotativas (SM)	52
3.4.3 Ensaios de permeabilidade	52
3.4.4 Ensaios geotécnicos de laboratório em solos	53
3.4.5 Ensaios de geotécnicos de laboratório dos materiais rochosos.....	54
3.5 CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA DA FUNDAÇÃO	63
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
4.1 ANÁLISE DAS INVESTIGAÇÕES REALIZADAS.....	65
4.1.1 Sondagens de Simples Reconhecimento com Determinação do Índice de Resistência a Penetração	65
4.1.2 Sondagens Rotativas (SR).....	67
4.1.3 Ensaios de permeabilidade	76
4.1.4 Análises dos ensaios de laboratório dos materiais em solos	78
4.1.5 Análises dos ensaios de laboratório dos materiais rochosos	81
4.2 CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA DA FUNDAÇÃO DA FUTURA BARRAGEM BELÉM DE SÃO FRANCISCO	90
4.2.1 Caracterização geomecânica das rochas metamórficas e ígneas.....	90

4.2.2 Caracterização geomecânica das rochas sedimentares.....	95
5 CONCLUSÕES.....	102
6 SUGESTÕES	104
REFERÊNCIAS	105
APÊNDICE A - Resultados dos ensaios realizados nas amostras de solos	109
ANEXO A - Tabela de classificação geomecânica de Bieniawski – RMR	110

1 INTRODUÇÃO

A construção de barragens existe desde a antiguidade e desempenham um papel significativo no desenvolvimento humano, sendo estruturas fundamentais em regiões semiáridas que enfrentam desafios relacionados as secas frequentes. Os estudos geológicos-geotécnicos são um dos fatores condicionantes na escolha da concepção de um barramento, que é influenciado diretamente pelas condições de fundação.

As barragens podem ser construídas sobre fundações que variam desde rochas de qualidade excelente até fracas, de solos resistentes a pouco resistentes, desde que sejam adotados os cuidados adequados nas fases de projeto e construção. Em todos os casos, é necessário avaliar as necessidades individuais, levando em consideração as características específicas das alternativas escolhidas e os fatores geológicos-geotécnicos do local (OLIVEIRA E BRITO, 1998).

A importância da análise do local de implantação de uma obra sob a ótica da Geologia Aplicada ou Geologia de Engenharia atribui ao projeto maior eficiência e segurança, pois a viabilidade do empreendimento é afetada diretamente pelas características geológicas-geotécnicas do local escolhido (GAMA, 2012). Gama (op cit) ainda afirma que a escolha do local apropriado é um dos passos cruciais para a definição do eixo de uma obra de barragem e que a realização de um plano de investigações apropriado, que forneça os subsídios técnicos fundamentais para o projeto e construção dessa estrutura, é extremamente relevante.

Uma investigação geológica-geotécnica para a seleção do local de uma barragem objetiva a avaliação detalhada para determinar estruturas geológicas, estratigrafia, falhas, foliação, ombreiras, condições das águas subterrâneas na fundação da barragem e área do reservatório (BIRHANU e TESFA, 2023).

As investigações geológicas permeiam quatro condicionantes principais, sendo elas a geologia da fundação da barragem, área do reservatório e a estanqueidade da água, estabilidade dos taludes e viabilidade econômica das fontes de materiais de construção (SISSAKIAN et al., 2020). Dos quais, as condições geológicas no projeto e na construção, normalmente, desempenham uma influência significativa, pois governam o carácter das formações geológicas e a disponibilidade de materiais de construção

Assim, conforme afirma Oliveira e Brito (1998), através de metodologias específicas, o objetivo de um plano de investigações é realizar a delimitação espacial dos maciços rochosos, bem como determinar suas características e propriedades geomecânicas por meio de um conjunto de processos de investigação. Isso é feito com base no conhecimento das unidades

geológicas, nas pesquisas geológicas e nas características principais dos solos realizadas através dos métodos de investigação geológica-geotécnica.

Na fase de viabilidade do projeto são avaliadas as alternativas para a escolha daquela mais exequível considerando os aspectos geológicos-geotécnicos, topográficos, construtivos, tecnologia disponível, econômicos, além da forma de operação do reservatório durante a vida útil do empreendimento. É nessa fase que são realizados os trabalhos de mapeamento geológico básico de superfície, investigações caracterizações e classificações geológicas de subsuperfície através de métodos indiretos associados a métodos diretos, ensaios *in situ* e de laboratórios. Após essa fase, com a definição da melhor alternativa de projeto, é processada a complementação dos estudos de forma mais minuciosas, passando-se para fases posteriores, projeto básico, em seguida, de projeto executivo.

No estudo de caso desta pesquisa, durante a viabilidade do projeto, uma barragem em concreto compacto rolo (CCR) com uma geometria em arco foi escolhida como alternativa mais viável para implantação. Contudo, durante a execução das sondagens foram identificados litotipos geológicos que poderiam comprometer a alternativa escolhida inicialmente. Assim, esta pesquisa foi conduzida em torno da importância da investigação geológica-geotécnica de fundação e seu papel fundamental em projetos de barragem.

1.2 RELEVÂNCIA DO TEMA

A região semiárida é encontrada em diversas partes do mundo, em países como Austrália, Israel, México, dentre outros. Contudo, nenhuma região semiárida é tão densamente ocupada como o semiárido brasileiro. Segundo dados do último censo (IBGE, 2011), a população do semiárido apresenta quase 12% de toda população brasileira com cerca de 22 milhões de habitantes, distribuídas em 1135 municípios no norte da região Sudeste e em 9 estados da região Nordeste, sendo que 80% do território pernambucano está inserido na região semiárida.

Esta densidade populacional aliada ao fator físico-climático intensifica consideravelmente uma pressão sobre os recursos naturais, principalmente, sobre os recursos hídricos, visto que, essa região é caracterizada pelo déficit hídrico, ou seja, a evaporação é superior a precipitação provocada pelas altas temperaturas comprometendo a sustentabilidade da população devido à escassez de água.

A implantação de estruturas capazes de reter a água dos períodos chuvosos para o uso nos momentos de escassez é uma demanda frequente na região, sendo o a implantação dessas estruturas para armazenar água nos períodos de estiagem de importante para a subsistência da população. Tornando a implantação de barragens uma boa alternativa para o atendimento das demandas elementares das populações do semiárido.

Visando a mitigação dos efeitos da seca na região do semiárido pernambucano, mais precisamente, buscando atender a população rural dos municípios de Belém de São Francisco e Carnaubeira da Penha tem-se previsto a implantação de uma barragem na divisa dos municípios.

No entanto, para a viabilização e a concepção do projeto de uma barragem, os estudos geológicos-geotécnicos são essenciais, pois através deles é possível identificar o sítio de implantação e os fatores condicionantes para sua implantação e a concepção mais adequada a ser projetada. Assim, é relevante discutir os resultados do reconhecimento geológico-geotécnico de superfície e subsuperfície e a classificação geomecânica da fundação, os quais fornecerão subsídios fundamentais para a elaboração do projeto da barragem.

1.3 OBJETIVOS

A motivação da pesquisa está baseada nos objetivos gerais e específicos descritos nos tópicos a seguir.

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo é caracterizar os aspectos geológicos-geotécnicos e classificar geomecanicamente os maciços rochosos da fundação da barragem que será construída entre os municípios de Belém de São Francisco e Carnaubeira da Penha, estado de Pernambuco.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Adquirir, revisar, analisar as informações geológico-geotécnicas relacionadas aos maciços rochosos individualizados nas fundações da barragem;
- Realizar a classificação geomecânica das litologias identificadas ao longo da linha de fundação através da aplicação direta do sistema de classificação geomecânica nas sondagens disponíveis.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está dividida em seis capítulos, contendo no primeiro uma introdução de forma mais abrangente do tema, o objetivo geral e os objetivos específicos estabelecidos para o desenvolvimento da pesquisa.

O Capítulo 2 apresenta o referencial teórico, que contempla a contextualização e revisão dos temas abordados na pesquisa.

O Capítulo 3 apresenta o procedimento metodológico empregado para a realização da pesquisa, abordando informações sobre os materiais que foram utilizados, o processo de coleta, o programa experimental e os procedimentos aplicados nos laboratórios.

No Capítulo 4 são expostos os resultados e discussões relacionados ao estudo de forma detalhada.

O Capítulo 5 é realizada a conclusão onde são apresentados os resultados alcançados na pesquisa, as considerações finais.

O Capítulo 6 apresenta-se as sugestões para pesquisas futuras que possam dar continuidade e aprofundar a pesquisa.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Unindo os conhecimentos necessários para o desenvolvimento da pesquisa, o tópico abrange o referencial teórico acerca de caracterizar os aspectos geológicos-geotécnicos dos maciços rochosos da fundação em projetos de barragem.

2.1 BARRAGENS

Barragens são estruturas artificiais projetadas para reter água, líquidos diversos, rejeitos ou detritos, com a finalidade de armazenamento e/ou controle. Elas podem variar em tamanho e forma, abrangendo desde pequenos montes de terra até enormes estruturas feitas de concreto ou aterro. A construção dessas estruturas oferece uma ampla gama de benefícios, incluindo, entre os principais o fornecimento de água, irrigação, controle de inundações, regulação de fluxos de água, geração de energia elétrica, contenção de resíduos, entre outros (CBDB, 2019).

Segundo Soares (2014) as barragens podem se caracterizadas quanto ao material empregado em sua composição, podendo ser constituídas de terra, enrocamento, concreto ou mista, onde pode ser empregado mais de um tipo de material em sua seção, como por exemplo, barragem de terra e enrocamento. Além disso, as barragens também podem ser classificadas como mistas ao longo de seu traçado, quando as mesmas são formadas por mais de um tipo de material ao longo de seu corpo.

De acordo Relatório de Segurança de Barragem (RSB) do ano de 2022 no Brasil existem 23.977 barragens cadastradas no Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens - SNISB, das quais 3.504 estão na região nordeste e 502 barragens cadastradas em Pernambuco. O estado tem um grande destaque no cenário das barragens brasileiras, onde a barragem mais antiga do país foi construída na área urbana de Recife no final do século XVI e hoje é conhecida como açude Apipucos (CBDB, 2011). Além de receber uma das maiores obras hidráulicas do país, a Transposição do Rio São Francisco (PISF) que tem ao longo da obra 15 barragens construídas.

Diante da ampla gama de barragens existentes e suas finalidades distintas, a segurança dessas estruturas tem sido uma preocupação constante, principalmente no cenário atual, que segundo a Agência Nacional de Águas (ANA) no Brasil, há em média mais de três acidentes e cerca de sete incidentes com barragens por ano.

Logo, com a necessidade da construção de um instrumento legal que pudesse direcionar, fiscalizar e mitigar o aumento do imenso passivo de estruturas de barragens em condições de insegurança, foi estabelecida a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) por meio da Lei Federal nº 12.334, de 20 de setembro de 2010 (BRASIL, 2020).

Quando se discute sobre barragens e seus aspectos gerais, é relevante mencionar o projeto, a construção e à manutenção dessas barragens, todos em conjunto tem como objetivo de garantir a segurança da obra, dos quais os princípios fundamentais, de acordo com Sampaio (2014), abrangem a segurança tanto quanto a eficiência econômica e sua concepção.

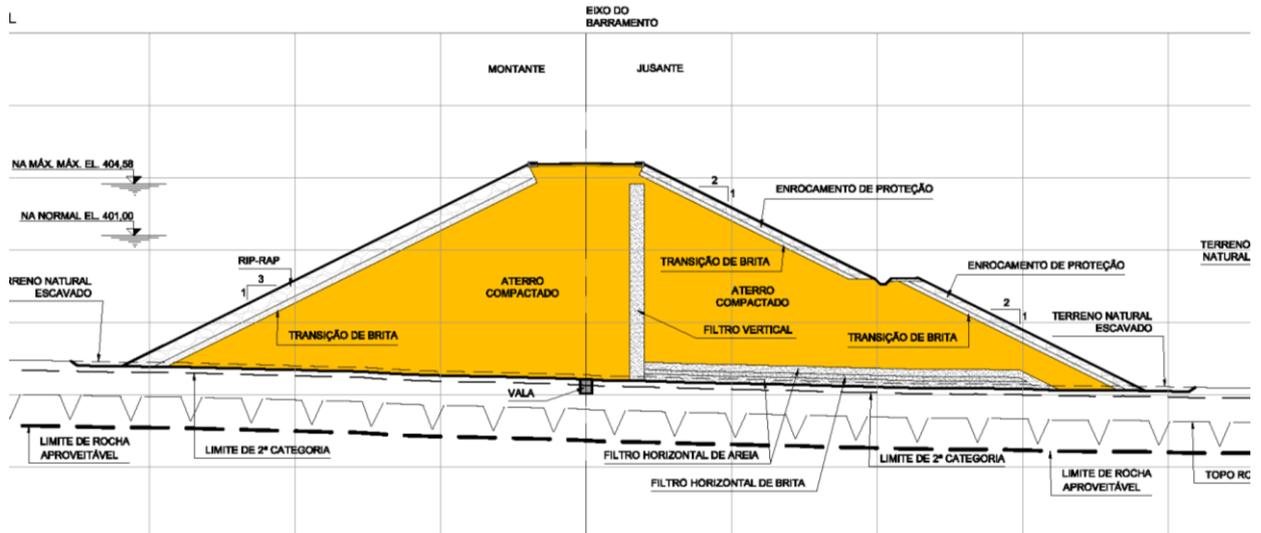
2.1.1 Tipos de barragens

De maneira concisa, as barragens podem ser definidas em três tipos principais de acordo com o material que é empregado na sua construção, sendo elas de terra, enrocamento e concreto. Cada uma apresenta características específicas como método construtivo, solicitações, exigências de fundação e os comportamentos devem ser considerados sempre que se estuda um empreendimento de tal magnitude (OLIVEIRA, 2012).

As barragens de terra são os tipos mais comuns, pois são de fácil execução, sua construção, na maioria das vezes, envolve o uso dos materiais das escavações da própria barragem e o uso de outros disponíveis no local, sendo o seu principal impeditivo a disponibilidade de grandes volumes de terra para sua construção (USB, 1987).

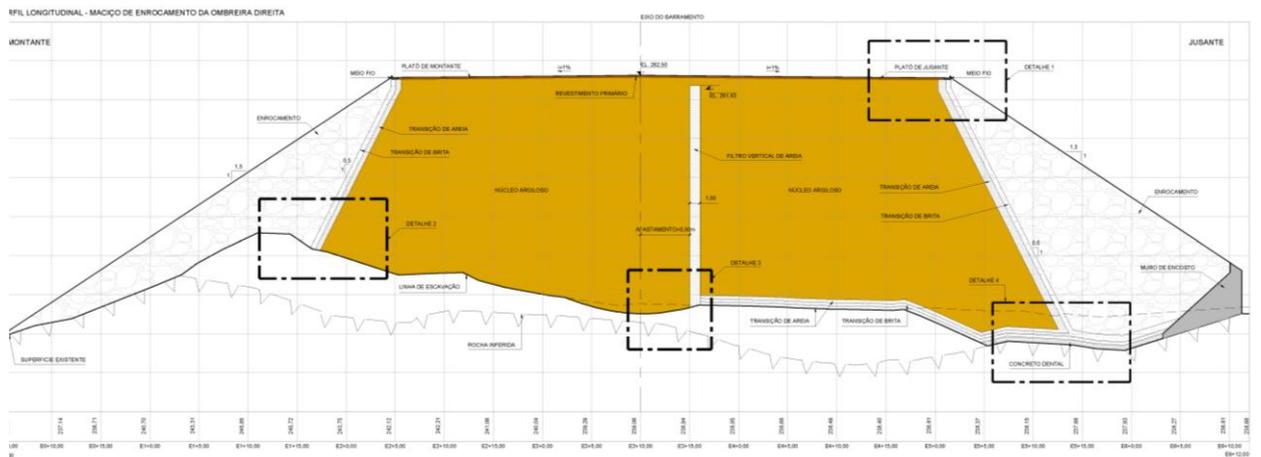
Segundo Costa (2012) as barragens de terra podem ser constituídas com a predominância de um único material, chamada de barragem de terra homogênea (Figura 1) ou ainda pode ser zonada (Figura 2), onde o maciço é construído com zoneamentos em função das características e/ou da permeabilidade do material.

Figura 1 - Seção típica Barragem de terra



Fonte: TECHNE (2023).

Figura 2 - Seção típica Barragem de Zonada



Fonte: TECHNE (2023).

Marangon (2004) define as barragens de terra como as mais elementares obras de barragens, onde, normalmente, se adequa a qualquer tipo de fundação, desde a rocha compacta, até terrenos construídos de materiais não consolidados.

As barragens de enrocamento geralmente são barragens de menor dimensão, que empregam principalmente uma estrutura de pedra, areia e cimento. Sua construção é comumente perpendicular aos cortes subterrâneos no solo a fim de reduzir a velocidade do escoamento da água através da formação de degraus que reduzem a erosão.

Em relação às fundações das barragens de terra e de enrocamento é importante fazer uma distinção entre elas, as barragens de terra apresentam um comportamento mais flexível,

transmitindo cargas relativamente baixas para o terreno. Geralmente, não são aceitáveis fundações em sedimentos coluvionares, aluvionares e argilas moles. Por outro lado, as barragens de enrocamento têm um comportamento mais rígido, transmitindo maiores tensões para as fundações.

No entanto, quando a fundação da barragem é constituída por materiais permeáveis, ou seja, materiais passíveis de permitir a circulação da água, deve ter suas características melhoradas, no intuito de cumprir as funções de suportar as cargas transmitidas pelo aterro e de diminuir a percolação da água de montante para jusante.

As barragens de concreto são divididas em três principais tipos: barragens de gravidade (Figura 3), contrafortes e em arco, podendo ser construída de concreto tradicional, concreto compactado a rolo (CCR) e o concreto ciclópico. Esse tipo de estrutura requer maciço rochoso de boa qualidade na fundação, ou seja, maciços de elevadas resistências, onde as descontinuidades ou outros fatores críticos à estabilidade tenham ângulos de atrito interno elevado e de baixa deformabilidade, de forma a evitar deformações diferenciais. O maciço também deve apresentar baixa permeabilidade ou deve ser tratado para garantir essa condição.

Figura 3 - Seção típica barragem de concreto de gravidade



Fonte: COMPESA (2023).

Figura 4 - Seção típica barragem de concreto em arco



Fonte: TECHNE (2023).

2.1.2 Estudos para projetos de barragens

Segundo Santos (2018) o planejamento de uma barragem é uma tarefa altamente complexa, devido tanto ao tamanho da obra a ser realizada quanto à sua significância e risco potencial. Por essa razão, antes mesmo de iniciar a fase de elaboração do projeto detalhado, é imperativo conduzir uma série de estudos abrangendo a área, os solos e a bacia que serão represadas.

A construção de uma barragem em um determinado corpo de água envolve uma sequência organizada de investigações, com a participação de diversas equipes de profissionais especializados, que seguem, na medida do possível, um plano de estudos e atividades. Dentre elas, têm-se os Estudos topográficos ou topografia de campo que delimita as características geográficas e topográficas do curso d'água, as seções mais adequadas para o projeto e as áreas de inundação e desapropriação.

Os estudos hidrológicos também fazem parte dos estudos de concepção de uma barragem, pois é através dele que são definidas as características do regime das águas da bacia escolhida e as variáveis hidrológicas como as vazões máximas, médias e mínimas nas seções fluviais dos cursos de água.

Complementando os estudos e principal enfoque desse trabalho, estão os estudos geológico-geotécnicos, cuja finalidade é estudar a geologia no sítio onde será implantada a

barragem, se apoiando no desenvolvimento de itens fundamentais, tais como, mapeamento geológico da área, estudo da rocha de fundação e estudo dos materiais de construção (Marangon, 2004).

De acordo com Moliterno (1995), os estudos geológico geotécnicos são desenvolvidos após os levantamentos topográficos e fotogeológicos. Nos estudos de campo são feitas sondagens de percussão e rotativas, classificação de material, ensaios de permeabilidade, pesquisas de anomalias geológicas, entre outros. Estes ensaios de campo aliados aos ensaios laboratório são responsáveis em classificar se o solo e a geologia da área, em especial, o maciço rochoso, são adequados para um projeto de barragem.

2.1.3 Fundações de barragens

De acordo com a CBDB (2010) a fundação constitui a parte do leito de um vale que está sob a estrutura de uma barragem e a sustenta, englobando todo o substrato, seja ele rochoso ou não, que fica subjacente ao barramento. Desde modo, compreende que tanto o talvegue quanto as encostas do vale a ser barrado e que ficarão abaixo do maciço, integram a fundação da barragem.

No sítio previsto para a construção de uma barragem são estudados a capa de solos de recobrimento, assim como a superfície e subsuperfície da rocha. Nos estágios iniciais dos estudos do projeto, é crucial identificar o tipo de rocha presente na área, entender os eventos tectônicos que impactaram a região, uma vez que isso pode variar a qualidade estrutural da rocha. Além disso, é fundamental avaliar o estado de alteração da rocha, determinar se há possibilidade de uma significativa permeabilidade à água, examinar o potencial de interferência da rocha sob a influência das águas represadas e considerar as chances de fugas de água através das formações locais.

De acordo Sousa (2013) é comum que alguns aspectos geológicos-geotécnicos da rocha da fundação não sejam observados durante a fase de investigações para realização do projeto e só são identificados no momento da implantação das estruturas. Consequentemente, levando a necessidade de adequações do projeto e, possivelmente, a intensificação dos tratamentos inicialmente previstos.

Segundo Souza (2013) para a escolha da concepção mais adequada de projeto é substancial a análise de resistência, deformabilidade e permeabilidade do maciço de fundação

sobre o qual a barragem será construída. Estes fatores também auxiliarão na indicação do tratamento mais adequado a ser realizado na fundação.

Marques Filho e Geraldo (1998) associaram o tipo mais adequado de barragem de acordo com a classe que a rocha de fundação é enquadrada (Tabela 1), norteando os projetistas, de forma sucinta, a melhor solução tecnológica a ser adotada de acordo com as propriedades mecânicas da fundação.

Tabela 1 - Correlação entre a classe da rocha e o tipo de barragem mais adequada

Classe da Rocha	Símb.	Rocha	Resistência à Compressão (Mpa)	Módulo de Elasticidade (Gpa)	Tipo de Barragem adequada
Muito resistente	R1	Granitos, diabásios, basaltos maciços, andesitos, gnaisses, migmatitos, quartzitos, calcáreo, metarenito, metagrauvaca (mais resistentes que o concreto).	>120	>50	Qualquer uma
Resistente	R2	Basaltos vesiculares, quartzo, anfibólio-xisto, arenito, grauvacas e siltitos (mais resistentes que o concreto).	120 a 60	50 a 20	Menos adequadas para uma barragem de concreto em arco
Pouco resistente	R3	Tufos soldados, brechas basálticas, micaxisto, filitos quartzosos, folhetos silticos compactos e arenitos medianamente resistentes.	60 a 30	20 a 5	Não apropriadas para barragem em concreto em arco ou em contrafortes
Branda	R4	Folhetos argilosos, arenitos brandos, filitos e grafitosos, talco-xistos, etc.	30 a 10	5 a 1	
Muito branda	R5	Argilitos, siltitos brandos.	<10	<1	Estruturas de gravidade

Fonte: Adaptado de Marques Filho e Geraldo (1998).

2.1.4 Barragens assentes sobre rochas sedimentares

As rochas sedimentares também são conhecidas como rochas brandas, caracterizadas por apresentarem maiores deformações e baixa resistências com comportamento geotécnico variando entre solo e rocha branda (SANTOS, 2018).

As rochas sedimentares resultam da deposição e acúmulo de sedimentos, seguidos pela consolidação subsequente, conhecida como diagênese. A diagênese compreende uma série de transformações e processos, abrangendo aspectos químicos, físicos e biológicos, que atuam sobre o depósito sedimentar após sua formação e que podem transformá-lo em uma rocha consolidada. Cerca de 70% do território brasileiro é formado por grandes bacias sedimentares originadas no final do período paleozóico e início do cenozóico com diferentes litologias, com granulometria variando de conglomerados a siltitos e argilitos (Campos et al.7, 1993 apud BORGES, 2016). Segundo Costa (2012), as rochas areníticas são as mais comuns entre as rochas sedimentares, sendo os arenitos e os siltitos os principais tipos desse grupo.

Para Santos (2018) fundações construídas sobre arenitos é comum as camadas de maciço natural não apresentam homogeneidade, devido à ocorrência de lentes de areia ou camadas de areia intercaladas com camadas de arenito competente, condição intrínseca à formação do depósito sedimentar

No cenário mundial, já ocorreram alguns acidentes em barragens assentadas em rochas sedimentares, tal como, o rompimento da barragem de Austin construída na Pensilvânia, nos Estados Unidos da América (EUA) que era apoiada em fundação de rochas sedimentares, principalmente, camadas horizontais de arenito e argila xistosa.

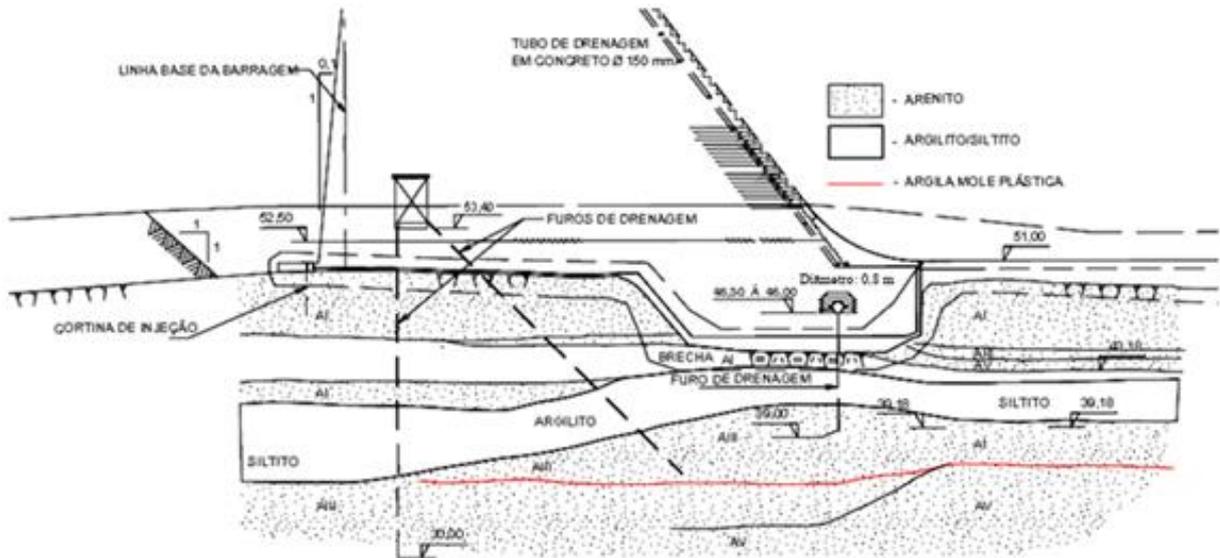
Segundo Pastore et al. (2015) o Brasil possui cerca de 40 barragens com fundação em rochas sedimentares areníticas, embora já tenham ocorrido alguns acidentes que exigiram intervenções e em um caso a perda da barragem logo após o enchimento do reservatório, na maioria dos casos, o comportamento destas barragens tem sido satisfatório.

No Brasil, a barragem/vertedouro da Usina Hidrelétrica Dona Francisca que integra o sistema Jacuí de geração de energia, localizada no Rio Jacuí, nos municípios de Agudo e Nova Palma, na região central do Estado do Rio Grande do Sul tem sua fundação apoiada sobre entremeados de arenitos da com níveis e camadas subhorizontais de pelitos, onde as brechas/conglomerados intraformacionais e siltito e argilito possuem relevante continuidade lateral. Essa obra é um dos destaques pelos estudos mais aprofundados do comportamento e propriedades dos arenitos.

Na Figura 5 apresenta-se a seção geológica da região do vertedouro (Bloco B21) da fundação da UHE Dona Francisca. Devido às condições da fundação para a construção de uma barragem em CCR houve rigorosas exigências quanto a verificação da estabilidade ao deslizamento e níveis de deformações que a fundação poderia atingir que dependiam

intrinsecamente do comportamento do maciço rochoso e suas características geomecânicas (Santos, 2018).

Figura 5 - Seção geológica fundação bloco B21 na região do vertedouro da UHE Dona Francisca



Fonte: ENGEVIX (2000b apud Costa, 2018).

2.2 INVESTIGAÇÃO DE CAMPO

A investigação geológica-geotécnica deve ser dividida em etapas de investigações de superfície através de mapeamentos geológico e geotécnico, interpretação de imagens e GPS (*Global Positioning System*) e de subsuperfície, realizado a partir de métodos de investigações diretos, semidiretos e indiretos (Costa, 2012). Essa etapa é fundamental na concepção de uma obra, influenciando todas as fases subsequentes, tanto as de projeto como as de execução, bem como, uma etapa crucial para definição das alternativas de projetos e o tipo mais apropriado de construção.

Neste trabalho, serão abordados os conceitos das investigações de subsuperfície conforme adiante.

2.2.1 Prospecção direta

A prospecção direta compreende a etapa em que o profissional tem contato com o material investigado *in situ* através de escavações de poços ou trincheiras, no qual, é possível

determinar algumas características do subsolo, tais como, perfil, presença de blocos, características dos saprólitos, atitude real das descontinuidades, características litológicas, textura e estrutura dos diferentes materiais (Costa, 2012).

2.2.2 Prospecção semidireta

Segundo Costa (2012) a prospecção semidireta o material investigado é proveniente da coleta a partir de sondagens permitindo o contato do investigador com o material, porém, não possibilitando o contato com a amostra *in situ* pois podem ser provenientes de diversas profundidades da investigação.

Na investigação geológica-geotécnica as investigações mecânicas mais adotadas são: sondagem a trado (ST), sondagem a percussão (SPT) e sondagem rotativa (SR). Por meio das sondagens mecânicas, é possível determinar com precisão as características dos materiais ao longo da linha de perfuração. Essas sondagens fornecem descrições dos testemunhos do solo e da rocha maciça, identificando variações litológicas, estruturas geológicas e as propriedades geotécnicas dos materiais (ABGE, 2018).

2.2.3 Prospecção indireta

Neste método o profissional não entra em contato com o material investigado e não ocorre a extração de amostras como nos demais métodos (COSTA, 2012). As investigações são realizadas a partir de métodos geofísicos que, em profundidade, consegue determinar os parâmetros físicos do maciço. Através de propagação de ondas elásticas ou acústicas em solos ou rochas é possível correlacioná-las com as propriedades desses materiais permitindo determinar as profundidades de ocorrência dos solos superficiais, de alteração de rocha, caminhos preferenciais de percolação, tipos litológicos, graus de alteração e de fraturamento (ABGE, 2018).

Os métodos geofísicos têm sido amplamente aplicados tanto nas fases de projeto quanto na verificação das condições de operação das barragens. Dentre esses métodos, destacam-se a eletrorresistividade, os métodos sísmicos e o GPR (Ground Penetrating Radar), que podem ser utilizados na investigação das fundações de uma barragem (SOUZA, 2017).

Esses métodos oferecem uma abordagem não intrusiva para investigar as características do subsolo, permitindo obter informações sobre a estrutura e as propriedades dos materiais presentes nas fundações da barragem.

A eletrorresistividade envolve a medição da resistividade elétrica do subsolo, fornecendo informações sobre a distribuição dos materiais e a presença de camadas com diferentes condutividades elétricas (COSTA, 2012). Essa técnica é útil para identificar zonas de alteração, falhas ou materiais com alta porosidade, que podem afetar a estabilidade da barragem.

Os métodos sísmicos exploram a propagação das ondas sísmicas no subsolo para determinar a velocidade de propagação e a reflexão das ondas, permitindo a identificação de interfaces entre diferentes camadas geológicas e estimativas das propriedades mecânicas dos materiais. Essas informações auxiliam na avaliação da estabilidade e na compreensão das condições geotécnicas das fundações da barragem.

O Radar de Penetração no Solo (GPR) utiliza pulsos eletromagnéticos para mapear as interfaces e as heterogeneidades do subsolo. Essa técnica é especialmente eficaz na identificação de camadas de solo, estruturas geológicas e potenciais falhas ou vazios no subsolo, fornecendo informações importantes para o projeto e a segurança da barragem (ABGE, 2018).

Ao combinar esses métodos geofísicos com as investigações de campo tradicionais, como sondagens e estudos geológicos, é possível obter um conhecimento mais abrangente das condições das fundações de uma barragem, contribuindo para projetos mais precisos e seguros, sendo imprescindíveis em projetos de tamanha magnitude.

2.3 CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA DO MACIÇO ROCHOSO

O maciço rochoso é caracterizado por um conjunto de blocos de rocha justapostos, limitados por descontinuidade, com sua complexidade definida a partir da evolução geológica ao qual foram submetidos. São sobretudo heterogêneos, anisotrópicos e descontínuos, contudo, o grau dessas características é validado pela escala da obra considerada (Serra Júnior e Ojima, 1998).

A caracterização e classificação geomecânica do maciço rochoso são etapas essenciais na engenharia geotécnica, que visam compreender o comportamento mecânico das rochas em relação às cargas aplicadas e aos processos geológicos.

2.3.1 Caracterização geológica-geotécnica dos maciços rochosos

A caracterização geológica-geotécnica dos maciços rochosos é um processo fundamental para compreender as propriedades e comportamento desses materiais naturais, especialmente quando são considerados em projetos de engenharia civil, mineração ou geotecnia. Essa caracterização envolve uma análise detalhada das características geológicas, geotécnicas e hidrogeológicas dos maciços rochosos, permitindo uma avaliação precisa de sua estabilidade, resistência e permeabilidade.

A caracterização geológica dos maciços rochosos abrange a identificação e descrição das diferentes formações geológicas presentes na área de estudo. Isso envolve o reconhecimento das diferentes unidades litológicas (tipos de rocha), estruturas geológicas como falhas, dobras e fraturas, bem como a identificação de possíveis descontinuidades que podem afetar a estabilidade do maciço. Além disso, são avaliadas as características mineralógicas e texturas das rochas, que influenciam suas propriedades mecânicas e hidráulicas.

2.3.1.1 Litologia

As rochas são classificadas de acordo com a sua litologia, que nada mais é do que o ramo da geologia que estuda as rochas, incluindo sua composição, textura, tamanho dos grãos, estrutura e origem. A classificação baseia-se em conceito de petrografia que avalia as características físicas e químicas das rochas que as diferenciam umas das outras. A litologia das rochas é determinada principalmente pelos minerais presentes e pela maneira como esses minerais estão organizados.

2.3.1.2 Grau de alteração

O grau de alteração de uma rocha refere-se ao nível de modificação que ocorre em sua composição e estrutura devido a processos de intemperismo e diagênese. A alteração da rocha ocorre ao longo do tempo devido à exposição aos elementos atmosféricos, como a água, o vento, a temperatura e as reações químicas. Esses processos podem resultar em mudanças físicas, químicas e biológicas na rocha original.

O grau de alteração de uma rocha pode variar de nível de acordo com o grau de intensidade da manifestação do processo, dependendo das condições ambientais e do tempo em que a rocha foi exposta a essas condições.

Segundo ABGE (2013) a caracterização do estado de alteração pode ser determinada através de análise tátil-visual em função dos critérios definidos para os graus de alteração, no qual são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Critérios utilizados para a determinação do grau de alteração das rochas

Grau	Classificação	Características da Rocha
A ₁	São	A rocha apresenta seus minerais constituintes sem decomposição. Eventualmente apresenta fraturas oxidadas.
A ₂	Pouco alterado	A rocha apresenta decomposição incipiente em sua matriz e ao longo dos planos de fraturas.
A ₃	Medianamente alterado	A rocha apresenta cerca de 1/3 de sua matriz decomposta. A decomposição ao longo das fraturas é acentuada.
A ₄	Muito alterado	A rocha apresenta de 2/3 de sua matriz ou de seus minerais totalmente decompostos. Todas as fraturas estão decompostas.
A ₅	Extremamente alterado (Alteração de Rocha)	A rocha apresenta todo o seu corpo totalmente decomposto.

Fonte: baseado em ABGE (2013).

2.3.1.3 Coerência

Assim como o grau de alteração, a coerência é caracterizada tátil-visualmente, através da verificação da resistência da rocha ao impacto do martelo e o risco com lâmina de aço e é definida, principalmente, pelas propriedades de dureza, tenacidade e friabilidade da rocha (Guidicini et al, 1972).

O grau de coerência é um importante parâmetro utilizado em rochas sedimentares, devido, muitas vezes, não ser possível identificar o grau de alteração nessas rochas. Os critérios, as dominações e suas respectivas siglas para definição do grau de coerência, encontram na

Tabela 3.

Tabela 3 - Critérios para a determinação do grau de coerência das rochas

Grau	Classificação	Características da Rocha
C ₁	Muito coerente	A rocha quebra com dificuldade ao ser golpeada por martelo, produzindo som metálico. Sua superfície é riscada pelo aço.
C ₂	Medianamente coerente	A rocha quebra relativamente fácil ao ser golpeada por martelo, produzindo som fraco. Ao ser riscada por aço, formam-se sulcos superficiais.
C ₃	Pouco coerente	A rocha quebra com facilidade ao ser golpeada por martelo, produzindo som oco e fragmentos que são quebradiços à pressão dos dedos. Ao ser riscada pelo aço, formam-se sulcos leves.
C ₄	Incoerente	A rocha quebra com muita facilidade ao ser golpeada por martelo. As bordas dos fragmentos produzidos são facilmente quebradas à mão. Ao ser riscada pelo aço, formam-se sulcos profundos.
C ₅	Sem coerência (Solo de alteração)	Ao ser golpeada pelo martelo a rocha se esfarela, desagregando-se à pressão dos dedos. Pode ser cortada com aço e riscada com a unha.

Fonte: Baseado em ABGE (2013).

2.3.1.4 Grau de resistência

Segundo Guidicini et al. (1972) *apud* Nogoseke (2009) o grau de resistência é medido a partir da resistência a compressão da rocha e são classificados de acordo com a faixa de resistência uniaxial organizadas em cinco graus de resistência, conforme demonstrado na Tabela 4.

Tabela 4 - Graus de resistência dos maciços rochosos em função de sua resistência à compressão uniaxial

Grau	Classificação	Resistência (MPa)
R1	Muito resistente	>120
R2	Resistente	120-60
R3	Pouco resistente	60-30
R4	Branda	30-10
R5	Muito branda	<10

Fonte: baseado em Guidicini et al. (1972a) *apud* Nogoseke (2009).

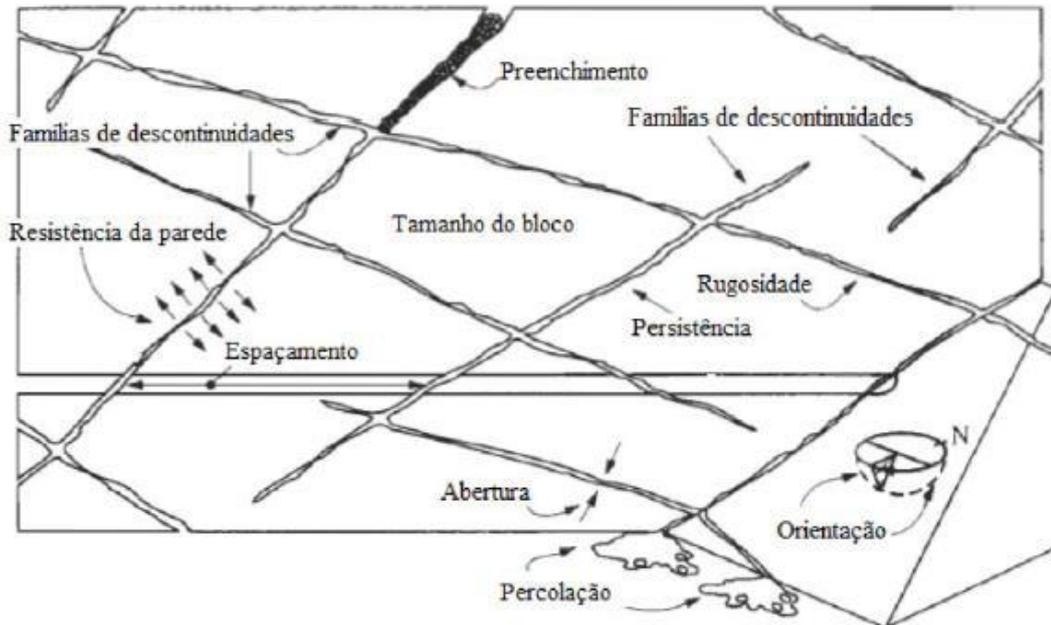
2.3.1.5 Condições de descontinuidades

O comportamento do maciço rochoso é fortemente condicionado pelas condições de descontinuidades, especialmente em relação a resistência, deformabilidade e permeabilidade, vindo a controlar toda a estabilidade do maciço rochoso (ABGE, 2018).

O termo descontinuidade é um termo coletivo para a maioria dos tipos de diáclases, planos de fraqueza da xistosidade e de acamamento, juntas, zonas de alteração ou de falhas. Pode ser compreendido como qualquer maciço rochoso que apresenta uma resistência a tração muito baixa ou simplesmente nula (ISRM, 1978).

A ISRM (1978) no intuito de padronizar o levantamento das descontinuidades sistematizou alguns parâmetros para a descrição das descontinuidades dos maciços rochosos (Figura 6). Alguns parâmetros seguem descritos adiante.

Figura 6 - Principais parâmetros das discontinuidades



Fonte: Adaptado de ISRM (1978) apud Wolpp (2018).

- Grau de fraturamento: é determinado pelo número de fraturas por metro que pelo comprimento do trecho da sondagem e a sua classificação é feita conforme critérios estabelecidos pela ABGE, 1983, conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Critérios para a determinação do grau de fraturamento das rochas

Classe	Nº de Fraturas/ metro	Classificação do Maciço
F ₁	< 1	Ocasionalmente fraturado
F ₂	1 a 5	Pouco fraturado
F ₃	6 a 10	Medianamente fraturado
F ₄	11 a 20	Muito fraturado
F ₅	> 20	Extremamente fraturado

Fonte: baseado em ABGE (2013).

- Espaçamento: É definida como a distância média entre as discontinuidades, seu inverso, a frequência e pela quantidade por metro linear, área ou volume e pode ser medido a partir critérios da Tabela 6 (ABGE, 2018).

O espaçamento é um parâmetro significativo para analisar o comportamento geomecânica dos maciços rochosos, visto que, ele tende a exprimir a quantidade e a frequência das discontinuidades.

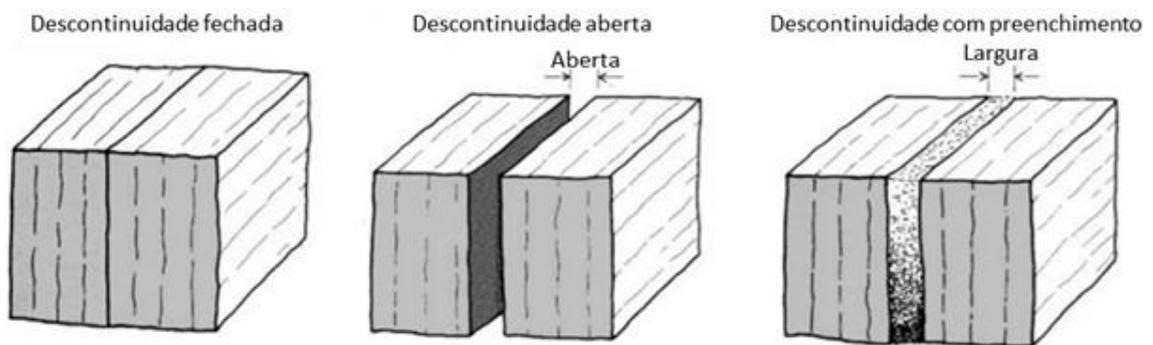
Tabela 6 - Descrição do espaçamento das descontinuidades

Descrição	Espaçamento (m)
Extremamente próximos	< 0,02
Muito próximos (F5)	0,02 – 0,06
Próximos (F4)	0,06 – 0,2
Moderadamente próximos (F3)	0,2 – 0,6
Afastadas (F2)	0,6 – 2
Muito afastadas (F1)	2 – 6
Extremamente espaçados	> 6

Fonte: ISRM (1981).

- **Abertura:** é caracterizada como um espaço vazio ou preenchido entre paredes contíguas de uma descontinuidade, cujo espaço intermediário é preenchido por ar ou água (Brady e Brown, 2004). São associadas aos deslocamentos cisalhantes, a esforço de tração, na remoção dos materiais inconsolidados carreados pela percolação da água e na dissolução de veios ao longo das paredes das descontinuidades (Figura 7).

Figura 7 - Representação da abertura das descontinuidades



Fonte: ISRM (1981).

Os critérios utilizados para sua classificação estão expostos na Tabela 7.

Tabela 7 - Critérios para a classificação das aberturas das descontinuidades do maciço rochoso

Abertura	Classificação	
<0,1 mm	Muito apertada	Fechadas
0,1-0,25 mm	Apertada	
0,25-0,5 mm	Parcialmente aberta	
0,5-2,5 mm	Aberta	Abertas
2,5-10 mm	Moderadamente larga	
>10 mm	Larga	
1-10 cm	Muito larga	Afastadas
10-100 cm	Extremamente larga	
>1 m	Cavernosa	

Fonte: baseado em ABGE (1983) apud Nogoseke (2009).

- **Preenchimento:** é entendido como a medida perpendicular entre dois planos adjacentes de descontinuidades pertencentes a uma mesma família, refletindo a distância média entre uma família de juntas.

Desempenha um papel importante, pois a depender da sua espessura pode determinar a resistência ao cisalhamento e a percolação das descontinuidades e o material que preenche a fratura condicionam o comportamento do maciço rochoso.

- **Persistência:** em rochas refere-se à capacidade de uma determinada camada ou feição rochosa em se estender ou manter sua continuidade ao longo de uma área geográfica. É um conceito amplamente utilizado na geologia para descrever a extensão horizontal de uma unidade rochosa ou de uma característica específica, como uma camada sedimentar, uma falha ou uma dobra. É um dos mais importantes parâmetros dos maciços rochoso e é classificada em função dos critérios apresentados na Tabela 8 (SERRA JUNIOR e OJIMA, 1998 apud NOGOSEKE, 2009).

Tabela 8 - Critérios para a classificação da persistência das descontinuidades em um maciço rochoso

Descrição	Persistência
Muito baixa	<1m
Baixa	1- 3m
Média	3 –10m
Alta	10- 20m
Muito alta	>20m

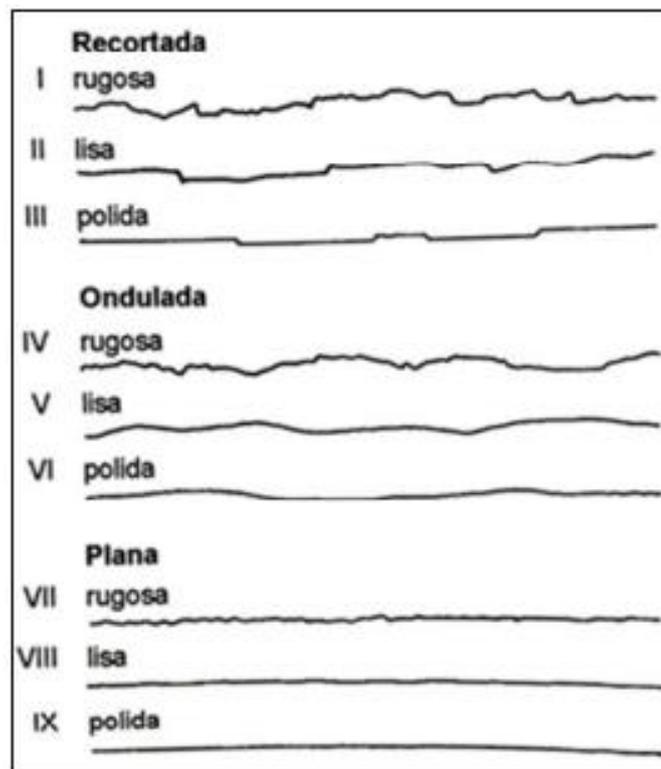
Fonte: baseado em ABGE/CBMR (1983)

- **A rugosidade:** é uma característica que se refere à aspereza ou irregularidade da superfície das descontinuidades presentes no meio rochoso e é uma propriedade importante e

influencia diversos aspectos do comportamento geomecânico do maciço. Pode variar significativamente em termos de escala e intensidade (Figura 8).

A rugosidade tem implicações diretas na resistência e na estabilidade do maciço rochoso. Em geral, superfícies de descontinuidades com rugosidades pronunciadas tendem a apresentar menor resistência e serem mais propensas a rupturas ou deslizamentos.

Figura 8 - Classificação das paredes das descontinuidades quanto à sua rugosidade



Fonte: Barton et al. (1974).

2.3.2 Ensaio de Laboratório

A caracterização geotécnica dos maciços rochosos está relacionada à determinação de propriedades físicas e mecânicas desses materiais. São realizados ensaios laboratoriais e de campo com a finalidade de caracterizar a petrografia, determinar as propriedades índices, mecânicas e a permeabilidade do maciço rochoso (ABGE, 2018).

Existem uma variabilidade de ensaios disponíveis para a caracterização dos maciços rochosos, e a seleção do ensaio adequado depende do objetivo específico da investigação geotécnica. Alguns dos ensaios mais comuns são discutidos nos subitens a seguir.

2.3.2.1 Análise petrográfica

A análise petrográfica é uma técnica utilizada para estudar a composição mineralógica, textura e estrutura de amostras de rochas em um nível microscópico. É uma ferramenta essencial para entender as características e propriedades das rochas (ABGE, 2018).

As etapas da análise petrográfica consistem na coleta das amostras das áreas representativas do maciço rochoso em estudo, preparação de lâminas delgadas, análise mineralógica é realizada usando um microscópio petrográfico para identificar e classificar com base em suas propriedades ópticas os minerais presentes. É também realizada a análise textural que envolve a observação e descrição das características estruturais das rochas. Isso inclui a identificação de diferentes tipos de grãos, sua distribuição e orientação, a presença de estruturas como fraturas, clivagem, foliação e alienação. E por fim, a análise estrutural envolve a observação e descrição de feições estruturais nas rochas, como falhas, dobras, zonas de cisalhamento e fraturas.

Com base nas etapas realizadas são feitas as observações realizadas durante a análise petrográfica, com a interpretação dos resultados, envolvendo a correlação entre as características minerais, texturais e estruturais observadas e os processos geológicos que afetaram a formação e evolução das rochas.

2.3.2.2 Propriedades índices

As propriedades índices das rochas são características físicas e mecânicas que são utilizadas para descrever e classificar os diferentes tipos de rochas. Essas propriedades são importantes para a compreensão do comportamento das rochas em diversas aplicações, como engenharia geotécnica, construção de estruturas, exploração mineral e estudos geológicos. Algumas das propriedades índices mais comuns incluem:

- Porosidade: é a proporção de espaços vazios (poros) em relação ao volume total da rocha. É uma propriedade importante que afeta várias características e comportamentos do maciço, como permeabilidade, armazenamento de água, resistência e deformabilidade.

A porosidade pode variar amplamente dependendo do tipo de rocha e de sua história geológica. Em algumas rochas sedimentares, como arenito e calcário, a porosidade pode ser significativa devido à presença de espaços vazios entre os grãos. Em rochas ígneas, como o granito, podem ter uma porosidade muito baixa devido à sua estrutura cristalina compacta.

Vários fatores podem influenciar a porosidade, incluindo a forma, tamanho e distribuição dos poros, bem como a presença de fissuras, fraturas e veios. Esses elementos estruturais podem criar caminhos preferenciais para a circulação de fluidos no maciço rochoso.

A porosidade tem implicações significativas em diversas aplicações. Por exemplo, em engenharia geotécnica, a porosidade influencia a capacidade de drenagem do maciço rochoso e sua suscetibilidade a problemas como instabilidade de taludes e movimentos de massa.

Além disso, a porosidade também está relacionada a resistência e deformabilidade do maciço rochoso. Geralmente, uma rocha com alta porosidade tende a ser menos resistente e mais suscetível à deterioração causada por ciclos de congelamento e descongelamento, bem como à penetração de água e produtos químicos.

- Massa específica
- Absorção de água: é a quantidade de água que uma rocha pode absorver em relação à sua massa. É um indicador da permeabilidade e da capacidade da rocha em reter água. Rochas altamente absorventes podem ser suscetíveis a danos causados por intemperismo e alterações físicas devido à penetração de água.

- Expansão: é um fenômeno que ocorre quando a rocha é submetida a determinados estímulos, como absorção de água, variações de temperatura ou ações químicas. Esses estímulos podem levar a um aumento no volume da rocha, causando sua expansão. Pode ser determinada a partir de ensaios de expansão e de pressão de expansão.

- Densidade aparente: é a massa da rocha por unidade de volume, incluindo os vazios. É um indicador da compactação da rocha e pode variar dependendo dos minerais constituintes e da porosidade. A densidade aparente é importante para estimar a carga que uma rocha pode suportar e sua resistência à compressão.

2.3.2.3 Propriedades mecânicas

Os ensaios que mais se referem as propriedades mecânicas das rochas quando se trata de resistência ao cisalhamento, deformabilidade e tensões para a classificação do maciço rochoso são:

- Resistência à compressão uniaxial: é a capacidade de uma rocha resistir à aplicação de cargas de compressão. É medida pela força necessária para comprimir uma amostra cilíndrica de rocha até a falha. Essa propriedade é importante para determinar a capacidade de suporte de cargas e a estabilidade de estruturas construídas em rochas.

- Resistência ao cisalhamento: é a capacidade de uma rocha resistir à deformação por cisalhamento. É uma medida da coesão e do atrito interno da rocha. A resistência ao cisalhamento é importante na estabilidade de taludes, fundações e estruturas subterrâneas.

- Resistência à compressão diametral (Ensaio brasileiro): é utilizado para determinar a resistência à tração das rochas. Normalmente, a resistência à tração das rochas seja menor do que sua resistência à compressão, esse ensaio é importante para compreender o comportamento da rocha quando submetida a forças de tração, como em situações de tensões induzidas por escavações ou processos geológicos.

No ensaio, a amostra é submetida a uma carga de compressão aplicada perpendicularmente ao eixo do corpo de prova, resultando em uma tensão de tração no plano perpendicular à carga aplicada. A carga é aumentada gradualmente até ocorrer a falha da amostra.

- Ensaio de ultrassom: é uma técnica para a avaliação das propriedades físicas e mecânicas da rocha. Oferece de maneira indireta avaliar o grau de alteração e coesão das rochas, sendo uma vantagem significativa por ser um dos poucos ensaios não destrutivos disponíveis para a verificação dessas propriedades.

Para Frascá (2003) uma das principais vantagens desse método é a capacidade de comparar as propriedades físicas entre corpos de prova de uma mesma amostra ou entre amostras com características petrograficamente semelhantes. Isso significa que é possível analisar a homogeneidade das propriedades rochosas em diferentes áreas ou amostras, contribuindo para uma compreensão mais abrangente do comportamento do material.

Ao aplicar o ensaio de ultrassom em rochas, é possível obter informações sobre a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas, o que está diretamente relacionado às propriedades elásticas da rocha.

2.3.2.4. Propriedades hidráulicas

As propriedades hidráulicas do maciço rochoso referem-se às características relacionadas ao fluxo de água através do material rochoso, sendo a determinação da permeabilidade a propriedade que mais interessa (ABGE, 2018).

A permeabilidade é a capacidade de o maciço rochoso permitir o fluxo de água através de seus poros e depende da sua conectividade e da sua dimensão. As rochas com alta permeabilidade permitem que a água flua facilmente, enquanto rochas com baixa permeabilidade têm menor capacidade de transmitir água.

A taxa na qual a água flui através do maciço rochoso sob uma diferença de pressão unitária é denominada de condutividade hidráulica. É uma medida da eficiência com que a água se move através das rochas e depende da permeabilidade, do gradiente hidráulico e da viscosidade da água.

A determinação da permeabilidade ou condutividade hidráulica do maciço rochoso é realizada através de ensaios de perda d'água executados em furos de sondagens, conforme metodologia descrita a seguir.

- Ensaio de Perda d'água

O ensaio de perda d'água sob pressão (EPA), também conhecido como Teste de Lugeon, é um ensaio geotécnico in situ com o objetivo de verificar a condutividade hidráulica dos maciços rochosos, consistindo na injeção d'água com níveis de pressão em um determinado trecho, em um furo de sondagem, isolado através de um obturador (Oliveira et al, 1975).

O ensaio tem como principal objetivo analisar o comportamento hidráulico do maciço rochoso por meio da simulação das condições de percolação. A partir de seus resultados é, então, realizada a caracterização hidrogeotécnica do maciço rochoso (Oliveira et al, 1975). O ensaio permite, ainda, uma comparação com as condições de fraturamento do maciço rochoso, uma vez que a percolação de água ocorre através de suas descontinuidades.

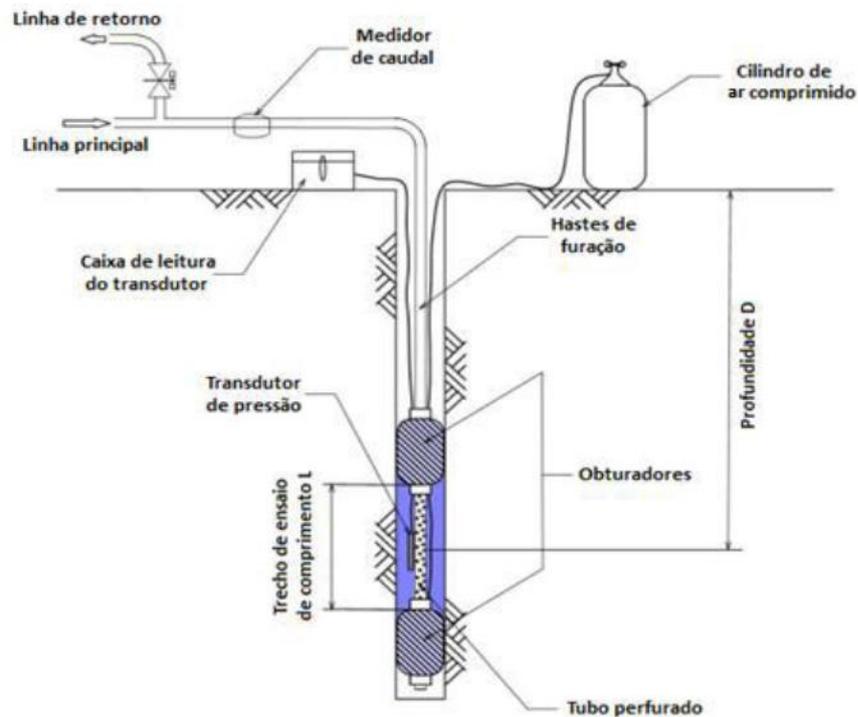
O ensaio é muito utilizado para avaliar a necessidade de tratamento nas fundações de obras geotécnicas, principalmente, em obras barragens, visto que, a permeabilidade dos maciços pode constituir um fator de risco.

Segundo Bento (2014) os objetivos do ensaio de perda d'água no maciço são:

- Estabelecer o valor da permeabilidade no maciço rochoso;
- Verificar a necessidade de intervenção no maciço rochoso; e
- Determinar o regime de escoamento, medir o grau de fraturamento e o comportamento das fraturas.

Os equipamentos utilizados na realização dos ensaios de perda d'água são comumente acoplados a sonda rotativa no momento de execução. A Figura 9 mostra os principais equipamentos utilizados no ensaio de perda d'água sob pressão.

Figura 9 - Classificação das paredes das discontinuidades quanto à sua rugosidade



Fonte: Quiñones-Rozo (2010) apud Bento (2014).

O maciço rochoso em relação a estanqueidade é definido pela condutividade hidráulica através dos ensaios perda d'água e de acordo com Costa (2012) a classificação pode ser feita de acordo com a Tabela 9.

Tabela 9 – Parâmetros de condutividade hidráulica

Classe	Denominação	Permeabilidade	Condutividade Hidráulica
H1	Muito baixa	$k < 10^{-5}$	$C.H < 0,1$
H2	Baixa	$10^{-5} < k < 5 \cdot 10^{-5}$	$0,1 < C.H < 0,5$
H3	Média	$5 \cdot 10^{-5} < k < 5 \cdot 10^{-4}$	$0,5 < C.H < 5,0$
H4	Alta	$5 \cdot 10^{-4} < k < 2,5 \cdot 10^{-3}$	$5,0 < C.H < 25,0$
H5	Muito alta	$k > 2,5 \cdot 10^{-3}$	$C.H > 25,0$

Fonte: Costa (2012).

2.3.3 Classificação geomecânica dos maciços rochosos

A classificação geomecânica busca agrupar os maciços rochosos em categorias com base em suas propriedades e características através de observações de campo, em ensaios in situ ou em amostras coletadas. Bieniawski (1989) afirma que as classificações não são a última solução para os problemas geotécnicos, mas sim o caminho para o fim deles.

Para Mesquita (2018) a caracterização geotécnica dos maciços rochosos pode ser compreendida como a categorização do maciço em classes ou grupos considerando os diferentes comportamentos de acordo com as solicitações impostas.

Segundo a ABGE (2018) a classificação geomecânica tem como principal objetivo prever o comportamento dos maciços rochosos em escavações, bem como, substanciar o estudo da estabilidade de fundações em barragens. Sendo um dos maiores benefícios do emprego da classificação geomecânica estimar a autossustentação do maciço e a geometria das seções de escavações e da sequência de desmonte.

Segundo Bieniawski (1989), a classificação geomecânica é realizada através da individualização do maciço rochoso em regiões limitadas, normalmente, pelas falhas, zonas de cisalhamento, dentre outras.

Existem diversas metodologias de classificação geomecânica disponíveis, sendo algumas amplamente utilizadas em todo o mundo. Um dos mais difundidos e conhecidos, atualmente, são o RMR (Rock Mass Rating) elaborado por Bieniawski (1973) e o sistema Q (Tunneling Quality Index) proposto por Barton et al. (1974). Além desses, algumas outras metodologias também costumam ser utilizadas, como o RQD (Rock Quality Designation) proposto por Deere (1963), e o GSI (Geological Stress Index) idealizado por Hoek et al. 1994 (HOEK, 2000).

Para Bieniawski (1989) os principais parâmetros geomecânicos do maciço, em um sistema de classificação considerados são:

- Resistência da rocha intacta;
- Resistência das descontinuidades, ou seja, juntas, planos de fraquezas estrutural do maciço;
- Orientação das descontinuidades desfavoráveis em relação as escavações,
- Densidade de compartimentação do maciço (frequências das juntas);
- Influência da água subterrânea; e
- Condições de tensão ao redor da escavação.

2.3.3.1 RQD (Rock Quality Designation)

A classificação RQD (Rock Quality Designation) é uma medida utilizada para avaliar a qualidade de um maciço rochoso com base na quantidade e no estado das descontinuidades presentes. Essa classificação foi desenvolvida pela Geological Society of America e é

amplamente utilizada na engenharia geotécnica para caracterizar a integridade e a resistência de maciços rochosos.

O grau de fraturamento e grau de alteração do maciço rochoso são propriedades interligadas ao RQD, contudo, não consideradas no seu cálculo. Sendo as rochas alteradas conter indicações nulas para o RQD (Vaz, 1982 apud Barros 2000).

O RQD é expresso como um valor percentual e é determinado através da medição e da análise de testemunhos de sondagem ou exposições em afloramentos rochosos. Ele quantifica a porcentagem total de comprimento recuperado de testemunhos de sondagem que exibem uma descontinuidade aberta maior que 10 mm.

O cálculo do RQD é realizado dividindo-se o comprimento total dos trechos de testemunho que exibem uma descontinuidade maior que 10 mm pelo comprimento total do testemunho e multiplicando o resultado por 100. O somatório dessas partes dividido pelo tamanho total é o resultado do RQD (Mesquita, 2008). Seu cálculo é dado segundo a (1). Quanto maior o valor do RQD, maior a qualidade do maciço rochoso.

$$RQD = \sum \frac{\text{porções de rocha com mais de 10 cm}}{\text{comprimento total do testemunho}} \times 100 \quad (1)$$

A interpretação do RQD é geralmente feita da seguinte forma:

- RQD acima de 75%: Maciço rochoso excelente a muito bom, com poucas descontinuidades e alta resistência;
- RQD entre 50% e 75%: Maciço rochoso bom a regular, com descontinuidades moderadas e resistência moderada;
- RQD abaixo de 50%: Maciço rochoso fraco, com muitas descontinuidades e baixa resistência.

O RQD é empregado como parâmetro básico em diversos sistemas de classificação geomecânica, dentre eles o RMR (Rock Mass Rating), proposto por Bieniawski (1973), e o Sistema-Q, proposto por Barton (1974), os quais são utilizados para estimar propriedades dos maciços rochosos.

Os maciços rochosos podem ser classificados em cinco classes de qualidade, a partir das faixas de valores do RQD, conforme demonstrado na Tabela 10.

Tabela 10 - Classe de qualidade do maciço rochoso a partir dos valores do RQD

Classe	RQD (%)	Classificação
R ₁	91-100	Excelente
R ₂	76-90	Boa
R ₃	51-75	Regular
R ₄	26-50	Pobre
R ₅	0-25	Muito pobre

Fonte: baseado em ABGE (2018)

O RQD é um parâmetro importante na engenharia geotécnica, pois está relacionado à resistência e à deformabilidade do maciço rochoso. Ele é utilizado para avaliar a estabilidade de taludes rochosos, projetar fundações em maciços rochosos, determinar a viabilidade de escavações subterrâneas e planejar a execução de túneis e minas. O RQD também é utilizado como um indicador preliminar da qualidade do maciço rochoso e pode influenciar na escolha dos métodos de escavação e suporte.

2.3.3.2 Sistema RMR (Rock Mass Rating)

A classificação geomecânica de Rocha (RMR - Rock Mass Rating) foi desenvolvida por Bieniawski (1989), considera parâmetros como resistência à compressão uniaxial, qualidade da rocha intacta, espaçamento das descontinuidades, condições de água subterrânea e orientação das descontinuidades. O RMR fornece uma estimativa da qualidade e do comportamento do maciço rochoso.

Além do RQD, segundo a ABGE (2018) o RMR baseia-se na avaliação de cinco parâmetros principais:

- Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta: Mede a resistência máxima da rocha sem considerar a influência das descontinuidades.
- Condições das descontinuidades: Avalia a condição e a persistência das descontinuidades no maciço rochoso, levando em conta fatores como rugosidade, preenchimento, espaçamento e abertura das descontinuidades.
- Espaçamento das descontinuidades: Determina a distância média entre as descontinuidades presentes no maciço rochoso. Quanto menor o espaçamento, maior a resistência do maciço.

- Ação da água subterrânea: Considera o nível de presença e o comportamento da água no maciço rochoso, pois a água pode afetar a estabilidade e a resistência da rocha. Um bom sistema de drenagem pode melhorar a estabilidade.

- Orientação das descontinuidades: Leva em conta a direção e a inclinação predominantes das descontinuidades. Dependendo da orientação das descontinuidades em relação à geometria do projeto, a estabilidade do maciço pode ser afetada.

Cada parâmetro é avaliado individualmente e recebe uma pontuação entre 0 e 100. A soma das pontuações dos cinco parâmetros resulta no RMR final, que pode variar de 0 a 100. Os pesos da classificação geomecânica são atribuídos conforme apresentadas no **Anexo A**, no qual são definidos os pesos para cada parâmetro. Quanto maior o valor do RMR, maior é a qualidade e a estabilidade do maciço rochoso.

Com base no valor do RMR, o sistema fornece orientações gerais para a estabilidade do maciço e sugere ações apropriadas de projeto e suporte. Por exemplo:

- RMR abaixo de 20: Maciço rochoso muito fraco, requerendo medidas de suporte intensivas, como ancoragens, tela atirantada ou concreto projetado.

- RMR entre 20 e 40: Maciço rochoso fraco a médio, requerendo medidas de suporte, como telas de arame, pernos de rocha ou pregagens.

- RMR entre 40 e 60: Maciço rochoso médio a bom, requerendo medidas de suporte limitadas, como suporte com chumbadores ou concreto projetado em áreas localizadas.

- RMR acima de 60: Maciço rochoso bom a excelente, com baixa necessidade de suporte adicional.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

É discorrido de maneira sucinta o contexto geológico e as unidades litoestratigráficas mapeadas em escala regional e local para a contextualização geológica de onde será construída a futura barragem Belém de São Francisco. Para tanto, recorreu a trabalhos anteriores e a campanha de investigação geológica-geotécnica realizadas para a elaboração do projeto básico e executivo do empreendimento.

São abordadas as metodologias das investigações realizadas através das sondagens, dos quais, os dados foram cedidos pela empresa TECHNE ENGENHEIROS CONSULTORES, responsável pelas investigações e elaboração do projeto. Por seguinte, são explanados os ensaios de laboratórios realizados para o desenvolvimento da pesquisa, finalizando, com o detalhamento do método utilizado para classificar o maciço rochoso da fundação.

3.1 GEOLOGIA REGIONAL

A região em estudo está inserida no contexto geológico da Província Borborema (PB), descrita por Brito Neves (1975) e Almeida et. al. (1977), como sendo constituída por maciços medianos, lineamentos e sistemas ou faixas de dobramentos, estruturados durante a Orogênese Brasileira no final do Neoproterozóico. Almeida et. al. (1997) definiram a PB como um domínio geológico-estrutural Neoproterozóico de aproximadamente 450.000 km² localizado no Nordeste Oriental do Brasil, que tem seus limites a sul pelo Cráton do São Francisco, a oeste pela Bacia do Parnaíba e a norte e leste pelas bacias sedimentares da margem costeira.

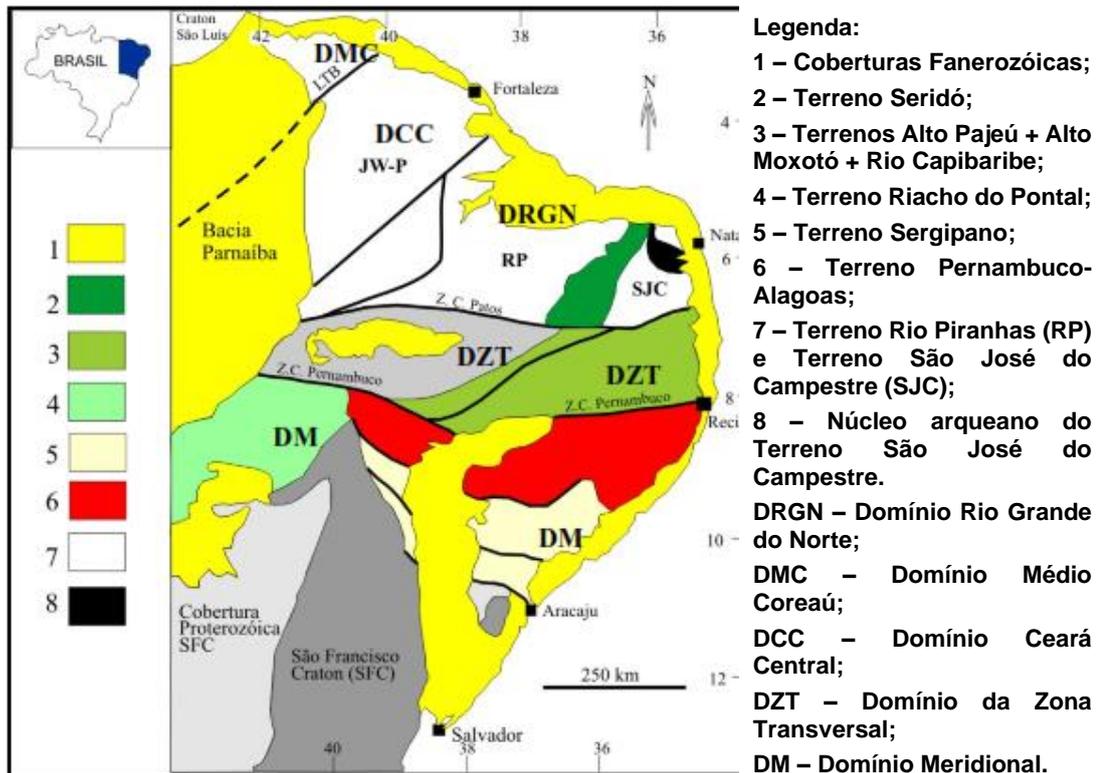
Alguns modelos evolutivos para a Província Borborema foram desenvolvidos desde então, e em Santos (2017), o autor resume os modelos propostos da seguinte maneira:

Investigações geológicas e geofísicas recentes tem demonstrado evidências sugestivas de tectônica acrescionária e colisional neoproterozóica na PB, incluindo associações de arcos magmáticos, remanescentes de crosta oceânica preservados, fases minerais de alto grau metamórfico, além da associação destes elementos com zonas de cisalhamento de caráter regional a continental (Jardim de Sá 1994; Santos 1995; Kozuch, 2003; Amaral et. al., 2011; Caxito et. al., 2014a,b; Araújo et. al., 2014a,b; Santos et. al., 2014; Lima et. al., 2015; Lages e Dantas 2016; Padilha et. al., 2016). Apesar do aparente consenso por parte dos pesquisadores, tais evidências vêm sendo sistematicamente contestadas por Neves et. al., 2003, 2006, 2015. Estes autores baseados principalmente em dados litogeoquímicos e compilações geocronológicas apontam uma série de problemas para aplicação do modelo na Província Borborema, sugerindo que a província teria sido submetida a uma orogênese intracontinental. Dentre outros aspectos, os referidos autores alegam, por exemplo, que há ausência de evidências claras de zonas de sutura, além de questionarem a natureza colisional-orogênica do evento Cariris Velhos, o qual é considerado como responsável pela

colagem de alguns dos terrenos na região (Kozuch, 2003; Santos et. al., 2010; Caxito et. al., 2014a; Padilha et. al., 2016).

Com base na compartimentação tectônica da PB revisada por Brito Neves et al (2020), a área de estudo para implantação da barragem localiza-se no segmento denominado Terreno Alto Pajeú (TAP) que integra a Subprovíncia Central ou da Zona Transversal (Figura 10).

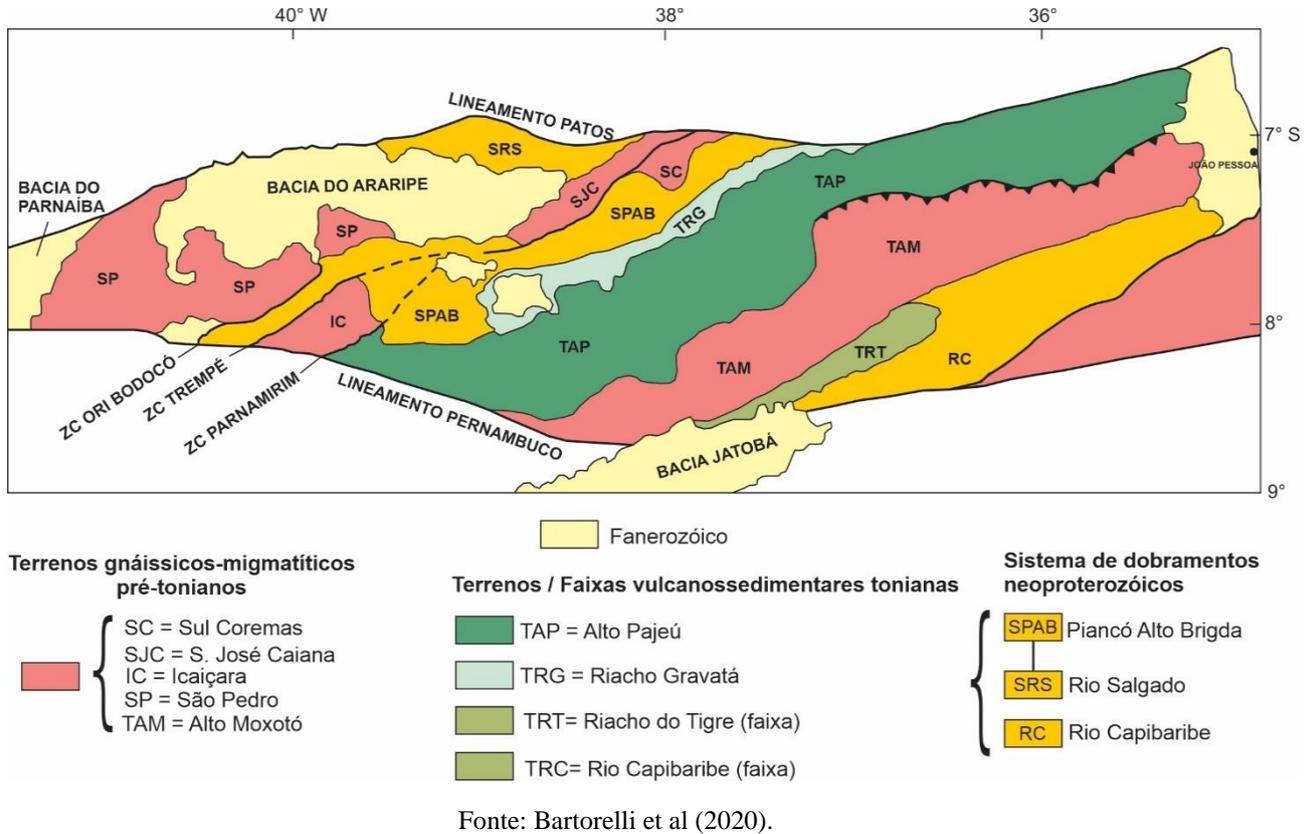
Figura 10 - Mapa com os principais domínios geológicos da Província Borborema



Fonte: Modificado de Brito Neves et. al. (2000).

A Subprovíncia Central tem uma área total de cerca de 100.000 km², e se posiciona entre dois grandes lineamentos subparalelos: o Lineamento Patos, a norte, e o Lineamento Pernambuco, a sul (Figura 11). Nela, há exposição de rochas do embasamento ao longo de praticamente toda sua extensão, e apresenta dissimilaridades expressivas de cunho geológicas, tectono-estratigráfica, geofísica e evolutiva, com relação às subprovíncias ao norte (Segmento Setentrional) e ao sul (Domínio Meridional).

Figura 11 - Compartimentação geotectônica da Subprovíncia Central, com a representação dos terrenos, faixas e sistemas de dobramentos que os compõe, além das coberturas sedimentares



Integrando a Subprovíncia Central, o Terreno Alto Pajeú (TAP) consiste numa longa faixa, estendendo-se por cerca de 530 km de extensão do norte da Paraíba ao centro-sudoeste de Pernambuco, com larguras variáveis de 10 a 60 km. Delimita-se a norte pelo Lineamento Patos e a sul pelo Lineamento Pernambuco. A leste o sistema de empurrões Serra de Jabitacá é atribuído como limite entre TAP e o TAM (Terreno Alto Moxotó), enquanto a oeste, a zona de cisalhamento Riacho do Caboclo (ZCRC) o separa do sistema de dobramentos neoproterozóicos Piancó-Alto Brígida (SPAB).

De acordo com Santos (2017) três associações litológicas caracterizam o TAP, são elas:

- Uma sequência formada por rochas metassedimentares, metavulcânicas e metaplutônicas com assinatura geoquímica de arco magmático, datadas entre 1,0 e 0,9 gigaano (Ga) relacionadas ao evento orogênico Cariris Velhos;
- Granitos cálcio-alcálinos de 0,65 a 0,52 Ga correspondentes à orogenia brasileira e;
- Exposições locais de embasamento de distribuição descontínua e idade entre 2,2 e 2,1 Ga, interpretadas como remanescentes de crosta mais antiga subjacente a algumas porções do terreno.

O terreno corresponde à região tipo do evento Cariris Velhos, atribuindo-lhe, portanto, alta relevância para o entendimento do contexto geotectônico da Província Borborema.

Dados obtidos por Brito (2014) atribuíram idade toniana (ca. 962 Megaano) ao Complexo Salgueiro, podendo sugerir que a parte oeste do SPAB pertença, na realidade, ao TAP. Brito (*op cit.*) obteve idades similares para rochas ao sul do Lineamento Pernambuco, o que amplia a influência do evento Cariris Velhos na organização da Província Borborema.

A ocorrência pontual de rochas do embasamento paleoproterozóico, e a abundância daquelas relacionadas aos arcos magmáticos neoproterozóicos, que se estendem desde o Toniano até o Ediacarano, são outras peculiaridades do TAP.

3.2 GEOLOGIA DA BACIA HIDROGRÁFICA DA FUTURA BARRAGEM

Segundo é demonstrado na carta geológica da Folha SC.24-X-A-I – Mirandiba (CPRM, 2014) o contexto geológico do sítio da futura barragem em estudo posiciona-se integralmente no contexto litológico do Complexo São Caetano (NP1sca).

O contexto geológico da bacia hidrográfica resultante da implantação do eixo em estudo (Figura 12), consiste em rochas Neoproterozóicas representadas por:

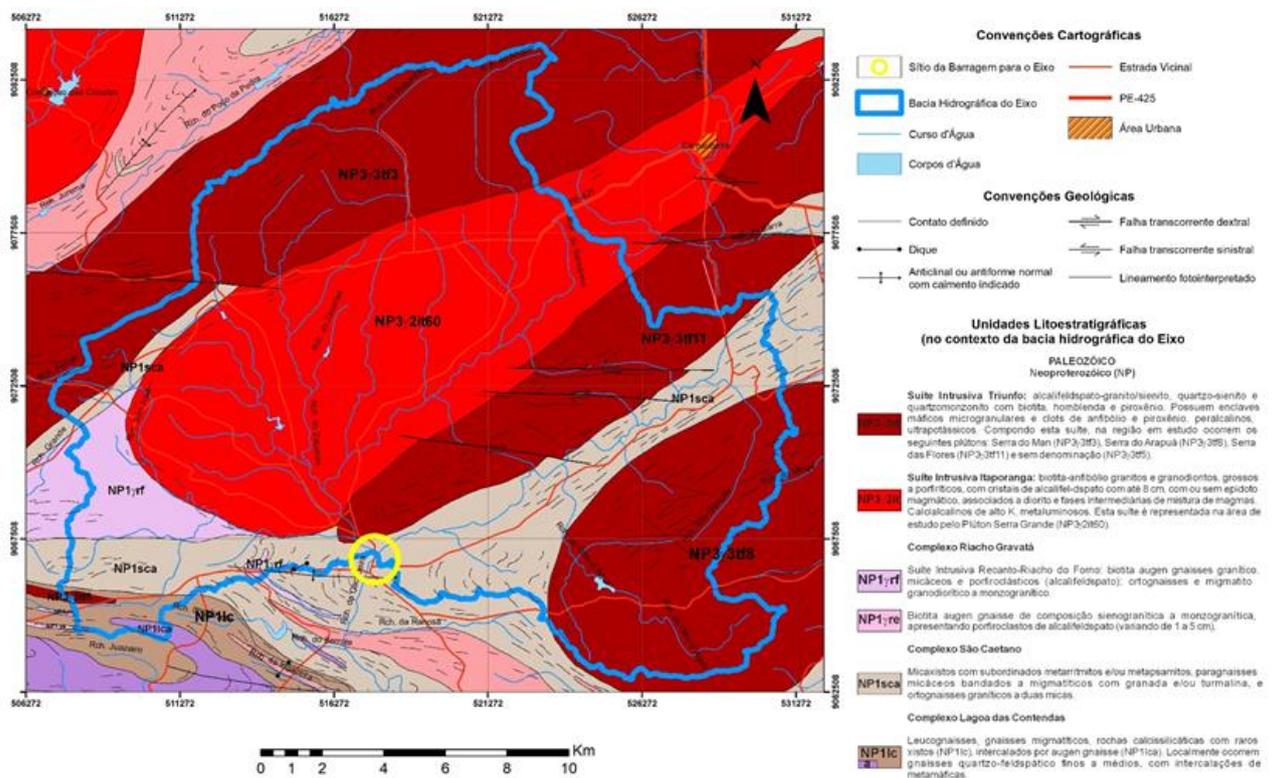
- Suíte Intrusiva Triunfo (NP3γ3tf): formada por alcalifeldspato-granito/sienito, quartzo-sienito e quartzomonzonito com biotita, hornblenda e piroxênio. Possuem enclaves máficos microgranulares e clots de anfibólio e piroxênio, peralcalinos, ultrapotássicos.
- Suíte Intrusiva Itaporanga (NP3γ2it): composta por biotita-anfibólio granitos e granodioritos, grossos a porfíricos, com cristais de alcalifeldspato com até 8 cm, com ou sem epidoto magmático, associados a diorito e fases intermediárias de mistura de magmas. Calcialcalinos de alto K, metaluminosos. Esta suíte é representada na área de estudo pelo Plúton Serra Grande (NP3γ2it60).

Complexo Riacho Gravatá, representado, nesta área, por:

- Suíte Intrusiva Recanto-Riacho do Forno (NP1γrf): biotita augen gnaisses granítico, micáceos e porfiroclásticos (alcalifeldspato); ortognaisses e migmatito granodiorítico a monzogranítico.
- NP1γre: Biotita augen gnaiss de composição sienogranítica a monzogranítica, apresentando porfiroclastos de alcalifeldspato (variando de 1 a 5 cm).

- Complexo São Caetano, nesta área representado por micaxistos com subordinados metarritmitos e/ou metapsamitos, paragneisses micáceos bandados a migmatíticos com granada e/ou turmalina, e ortogneisses graníticos a duas micas (NP1sca).
- Complexo Lagoa das Contendas, caracterizado, na área de estudo, por leucogneisses, gnaisses migmatíticos, rochas calcissilicáticas com raros xistos (NP1lc), intercalados por augen gnaise (NP1lca). Localmente ocorrem gnaisses quartzo-feldspático finos a médios, com intercalações de metamáficas.

Figura 12 - Contexto geológico da bacia hidrográfica do Eixo

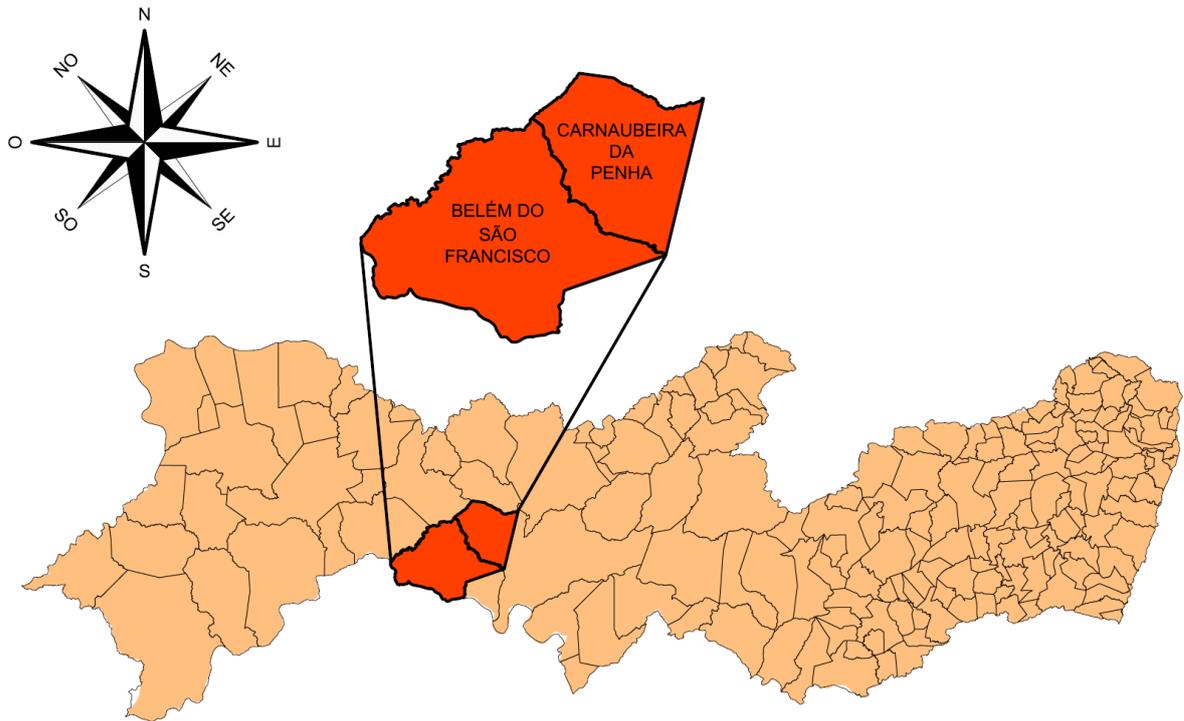


Fonte: CPRM (2014), modificada.

3.3 ÁREA DE ESTUDO

A futura barragem após os estudos prévios foi locada na calha do riacho da Cachoeira, a cerca de 330 metros a montante do Povoado da Barra do Silva nos limites dos municípios de Belém do São Francisco e Carnaubeira da Penha, ambos pertencentes à mesorregião do São Francisco Pernambucano, sertão do Estado de Pernambuco e semiárido brasileiro (Figura 13).

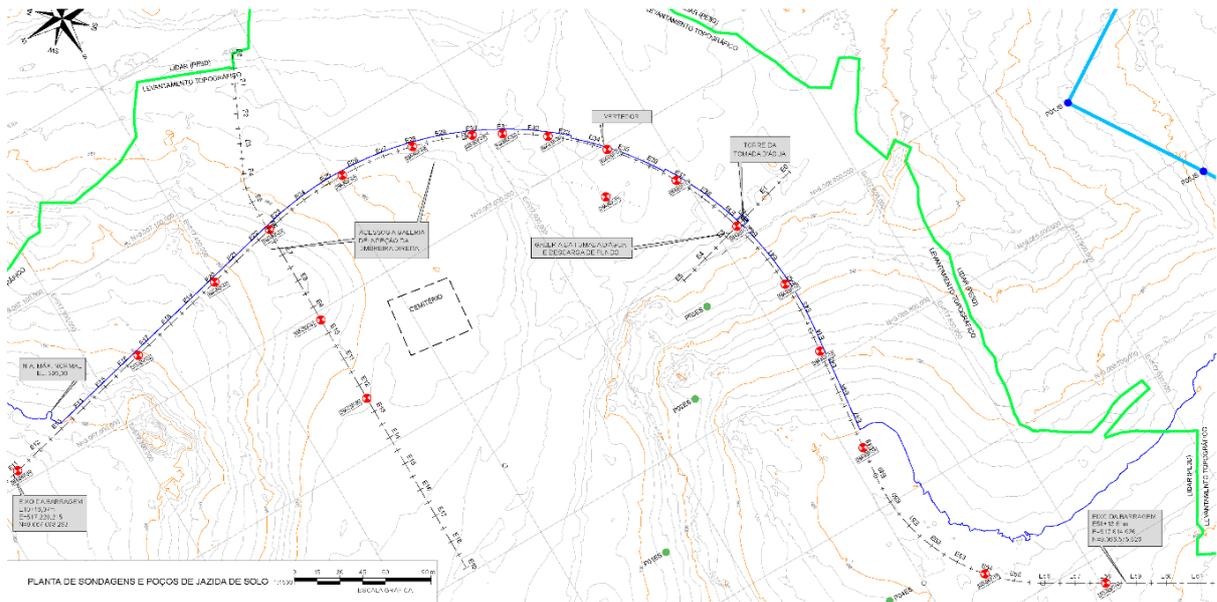
Figura 13 – Localização da futura barragem Belém de São Francisco



Fonte: TECHNE (2023).

A planimetria do eixo da barragem foi idealizada com inserção de curvas, tornando-o côncavo para jusante, permitindo o afastamento suficiente do povoado de modo a não ser atingido pelas descargas da bacia de dissipação nos eventos de sangria e evitar a inundação do cemitério da localidade. A concavidade do alinhamento também foi necessária para possibilitar um menor comprimento da barragem para ancoragem de sua estrutura nas ombreiras em condições geológicas aceitáveis (Figura 14).

Figura 14 - Eixo da futura barragem Belém de São Francisco



Fonte: TECHNE (2023).

O maciço da barragem, inicialmente, foi definido integralmente por estrutura do tipo gravidade em Concreto Compactado a Rolo (CCR), contudo no decorrer das investigações geológico-geotécnicas, foram identificados pelo menos, quatro litotipos rochosos presentes ao longo da fundação da Barragem Belém de São Francisco, são eles:

- Sequência sedimentar com predominância de Argilitos, Siltitos e Arenitos (Rocha sedimentar);
- Gnaisses migmatizados (Rocha metamórfica);
- Granito e Sienito (Rocha ígnea);
- Xistos (Rocha metamórfica).

Devido as diferentes características geomecânicas que estes litotipos apresentam, as incertezas para a sua classificação e pela abrangência de ocorrência ao longo do eixo da barragem, foram realizados ensaios complementares nos litotipos identificados, principalmente, nos maciços que apresentam maior susceptibilidade a desagregação e alteração quando em contato com a água. Neste aspecto, foram realizados a complementação da caracterização da fundação para as rochas areníticas, argilíticas e no xisto.

Em consequência a ocorrência destes materiais ao longo do eixo e das ombreiras do eixo, a concepção da barragem passou por um estudo de uma nova alternativa, passando a sua concepção para a implantação de uma barragem de terra ou mista (terra e enrocamento) e permanecendo apenas com vertedouro previsto para construção em CCR.

A obra representa o atingimento da missão institucional da CODEVASF e tem como finalidade de atender a escassez de água na região que atualmente são atendidas por carros pipas, bem como fomentará a produção de alimentos oriundos da agricultura familiar e por fim, à pequena irrigação localizada de pastagens, ao consumo dos animais (caprinos e ovinos) que é uma expertise e vocação natural da região, além de representar a principal fonte de renda destas famílias, durante boa parte do tempo.

3.4 PROGRAMA DE INVESTIGAÇÃO GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA

A discussão a seguir fundamenta-se em dados provenientes das investigações de campo, através das sondagens mistas, ensaios de laboratórios, tais como ensaios de caracterização física, petrografia, ultrassom, ensaios de expansão, resistência a compressão simples e diametral, bem como em relatórios técnicos fornecidos pela TECHNE ENGENHEIROS CONSULTORES. Além disso, foram consideradas informações dos registros fotográficos relacionados ao contexto do projeto básico e executivo da futura barragem.

Foram analisadas dezenove sondagens executadas ao longo do eixo, localizadas entre as Estacas E11 e E58, denominadas SM-BSF-02 a SM-BSF-18, incluindo o furo SM-BSF-06B, bem como, as sondagens localizadas fora do eixo, SM-BSF-11 (30,00 m a jusante do vertedouro) e SM-BSF-13A (40,00 m a jusante do vertedouro).

Na Tabela 11 é feita correspondência entre os trechos do eixo barrado com os furos de sondagens e as estacas de referência do projeto básico e executivo utilizados nesta pesquisa.

Tabela 11 – Correspondência entre os trechos propostos para as fundações e as estacas e furos de sondagens realizados.

Trecho das Fundações	Furos de sondagens	Intervalos das Estaca
Ombreira direita	SM-BSF-02, SM-BSF-03, SM-BSF-04, SM-BSF-05 e SM-BSF-06A	E16 a E28
Leito do rio	SM-BSF-06B, SM-BSF-07, SM-BSF-08, SM-BSF-09, SM-BSF-10 e SM-BSF-11	E28 a E36
Ombreira esquerda	SM-BSF-12, SM-BSF-13, SM-BSF-13A, SM-BSF-14, SM-BSF-15, SM-BSF-16, SM-BSF-17 e SM-BSF-18	E36 a E58

Fonte: A Autora (2023).

As fichas de sondagens, o registro fotográfico, os ensaios de permeabilidade e as caixas de testemunhos das sondagens SM-BSF-06, SM-BSF-07 e SM-BSF-08 foram disponibilizadas pela empresa TECHNE ENGENHEIROS CONSULTORES LTDA.

A partir desses testemunhos foram realizados os ensaios de laboratórios, tais como, os ensaios de resistência a compressão simples (uniaxial), de tração (ensaio brasileiro ou de compressão diametral), índices físicos em parceria com o Laboratório de Minas da UFPE, ensaios de expansão realizados no Laboratório de Solos e Instrumentação - UFPE e ensaios de ultrassom em parceria com o laboratório de Tecnologia dos Aglomerados - LABTAG (UFPE).

3.4.1 Sondagens de Simples Reconhecimento com Determinação do Índice de Resistência a Penetração (N_{spt})

As sondagens à percussão foram realizadas com a perfuração em solo através da sondagem SPT até atingir o impenetrável ou a camada de rocha seguindo as recomendações da norma NBR 6484/2020 - Solo — Sondagem de simples reconhecimento com SPT — Método de ensaio.

Ao todo foram executados dezenove furos ao longo do eixo, perfazendo, aproximadamente, 48 m de sondagem à percussão, onde, praticamente, todos os furos perfuraram uma parcela rasa de solo, com exceção dos furos executados na calha do rio, que chegaram a perfurar a 6 metros de profundidade.

A Figura 15 demonstra a execução das sondagens percussivas SM-BSF-06, SM-BSF-07 e SM-BSF-08, representando ilustrativamente a metodologia empregada durante a execução dos ensaios.

Figura 15 - Metodologia executiva na investigação empregada durante a sondagem



Fonte: TECHNE (2023).

3.4.2 Sondagens Rotativas (SM)

As sondagens executadas no trecho do maciço rochoso, principal objeto de pesquisa desse trabalho, seguiram o que preconiza a normativa do Boletim 03 da ABGE – Manual de Sondagens (ABGE, 2013). O equipamento utilizado, foi uma sonda rotopercussiva, modelo 920 da Maquesonda, empregando-se coroa diamantada de diâmetro NWM e barrilete duplo móvel.

A execução da sondagem rotativa foi efetuada em ciclos sucessivos de cortes e retirada de testemunhos do interior do barrilete, conhecido como manobra de sondagem rotativa. As manobras variaram de extensão, com a execução de avanços entre 1,00 e 1,50 m.

As sondagens mistas foram realizadas inicialmente com a perfuração em solo através da sondagem SPT e, ao atingir o impenetrável, ou camada de rocha, iniciou-se a perfuração com a sondagem rotativa. O avanço de cada manobra apresentou a qualidade do material coletado através dos boletins individuais de sondagem apresentando as informações da composição mineralógica, textural, cor, coerência, estruturas, grau de alteração e nível d'água.

Ao todo foram executadas, aproximadamente, 300 m de sondagem rotativa, com furo chegando em torno de 26m de profundidade. Porém, vale ressaltar, que o critério de paralisação das sondagens foi definido pela projetista (TECHNE) e que as sondagens foram paralisadas sem definir o topo rochoso da fundação.

3.4.3 Ensaios de permeabilidade

Os ensaios de infiltração foram realizados no trecho em solo nas sondagens a percussão e todos os procedimentos e cálculos para obtenção dos parâmetros utilizados seguem os procedimentos descritos no Boletim 04 - Ensaio de permeabilidade em solos orientações e uso em campo – Orientações para sua execução em campo (ABGE, 2013).

Durante a perfuração da sondagem a percussão foi realizada a limpeza da perfuração através de circulação de água por conjunto motor-bomba e utilizada peneira para retirada de material em suspensão dentro da perfuração. Após a limpeza da perfuração foi realizada a adição de água de forma constante mantendo o nível de água durante o período de dez minutos no intuito de saturar o solo, não é possível determinar se o solo está completamente saturado, mesmo apresentando constância na quantidade de água absorvida, neste intervalo de tempo. Após a saturação foi realizada leituras de quantidade (volume em ml) de água, com intervalos de um minuto, ou tempo inferior para grande capacidade de absorção, manteve-se a água

constante na composição de revestimento durante o período de 30 minutos, no caso de se atingir leituras constantes não variando mais que 20% da média o ensaio foi encerrado (TECHNE, 2021).

Os Ensaio de Perda d'água (EPA) foram realizados segundo as prerrogativas do Boletim 02 da ABGE – Ensaio de Perda D'água sob Pressão (ABGE, 2013), a cada 3 metros no trecho das sondagens rotativas, nos horizontes onde foi possível a obturação.

Ao todo foi possível realizar 13 ensaios de infiltração e 30 ensaios que foram utilizados nessa pesquisa para avaliar a condição do maciço rochoso em relação a sua condutividade hidráulica.

A permeabilidade e a condutividade hidráulica do maciço rochoso ao longo do eixo barrável, frente a percolação d'água através dos seus planos de descontinuidade, serão calculadas a partir dos ensaios padronizados de infiltração e perda d'água sob pressão realizados na fundação através dos furos de sondagens.

Os resultados dos ensaios de perda d'água sob pressão serão interpretados segundo a classificação descrita na Tabela 9 com base na Permeabilidade e na Condutividade Hidráulica.

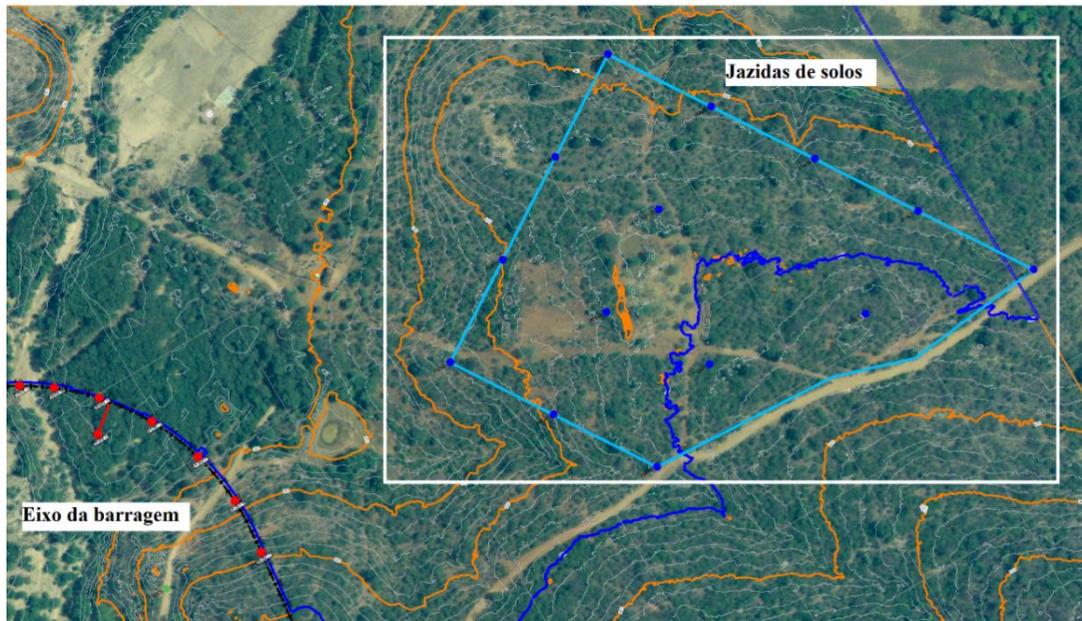
3.4.4 Ensaio geotécnicos de laboratório em solos

A análise dos ensaios realizados nas jazidas de material terroso, fornecidos pela TECHNE, teve o intuito de classificar os solos presentes na fundação do eixo do barramento e serão descritos sucintamente pois não é o foco principal da pesquisa. Ressalta-se que não foram realizados ensaios na capa terrosa distribuída ao longo do eixo.

Nos materiais terrosos, em amostras deformadas, foram realizados ensaios de caracterização física através da determinação do teor de umidade com secagem em estufa, massa específica real dos grãos, granulometria por peneiramento e sedimentação, limites de plasticidade e liquidez, além da determinação do coeficiente de permeabilidade e ensaio de compactação.

As amostras analisadas são provenientes dos poços de inspeções da área da jazida de solos com a coleta de oito amostras para submissão dos ensaios geotécnicos. A Figura 16 demonstra a localização dos poços onde foram coletadas as amostras

Figura 16 – Localização da coleta de amostras de solos



Fonte: TECHNE (2023).

A partir dos dados fornecidos, foi realizada a classificação dos solos no Sistema Unificado de Classificação dos Solos – SUCS e a elaboração da carta de plasticidade de Casagrande.

3.4.5 Ensaios de geotécnicos de laboratório dos materiais rochosos

Nas amostras coletadas a partir das sondagens rotativas, principalmente, das sondagens SM-BSF-06, SM-SBF-07 e SM-SBF-08, foram realizados os ensaios de caracterização da rocha, para determinar as propriedades índices das rochas, tais como absorção, porosidade e peso específico. Também foram executados os ensaios de tensão de expansão, expansão livre, resistência à compressão simples e diametral, análise petrográfica em algumas amostras e ensaios de ultrassom.

Os ensaios são descritos detalhadamente a seguir.

a) Ensaio de Caracterização Física

O ensaio de caracterização física das rochas foi realizado no Laboratório de Engenharia de Minas da UFPE, seguindo as recomendações da norma ABNT NBR 15845/2010 - Rochas para revestimento – Parte 2 Determinação da densidade aparente, porosidade e absorção de

água. Estes ensaios foram utilizados para caracterizar o estado físico das rochas. A Figura 20 apresenta as amostras de rocha obtida nas sondagens rotativas e utilizada neste ensaio.

Foram moldados 10 corpos de prova com diâmetro de 5,00 cm provenientes das sondagens SM06 e SM07 do material classificado como arenito (Figura 17). Não foi possível ensaiar o argilito, visto que, quando o material foi colocado em contato com a água logo começou a se desagregar (Figura 18).

Figura 17 – Corpos de Prova - Arenito



Fonte: A Autora (2023).

Figura 18 – Corpo de prova do Argilito desagregando



Fonte: A Autora (2023).

O ensaio consistiu em saturar os corpos de prova (CP's) com água destilada por 48 horas para a obtenção da massa saturada e obtenção da massa submersa a partir da imersão dos CP's em um cesto com água, pesados na balança hidrostática na sequência.

Após essa etapa, os corpos de prova foram levados à estufa à $(70\pm 5)^{\circ}\text{C}$ por, no mínimo, (24 ± 2) horas, por fim, pesadas e anotadas as massas secas. Com a obtenção das massas foram determinados os parâmetros físicos: massa específica aparente, porosidade aparente e absorção d'água.

b) Ensaio Resistência a Compressão Simples (Uniaxial)

O ensaio de compressão simples foi realizado no Laboratório de Tecnologia dos Aglomerados - LABTAG (UFPE) respeitando as metodologias da ABNT NBR 7215/2019 – Determinação da resistência à compressão simples de corpos de prova cilíndricos.

Foram ensaiados dois materiais identificados como argilito e arenito. Os corpos de provas moldados foram moldados a partir das sondagens SM-BSF-06 a SM-BSF-08, contudo, os testemunhos do material rochoso apresentavam-se muito fragmentados (Figura 19), dificultando a moldagem dos corpos de prova, inclusive no momento da retificação, pois em contato com a água era facilmente fragmentado (Figura 20).

Figura 19 – Caixa de testemunhos das sondagens SM-BSF-06, SM0-BSF-07 e SM-BSF-08



Fonte: A Autora (2023).

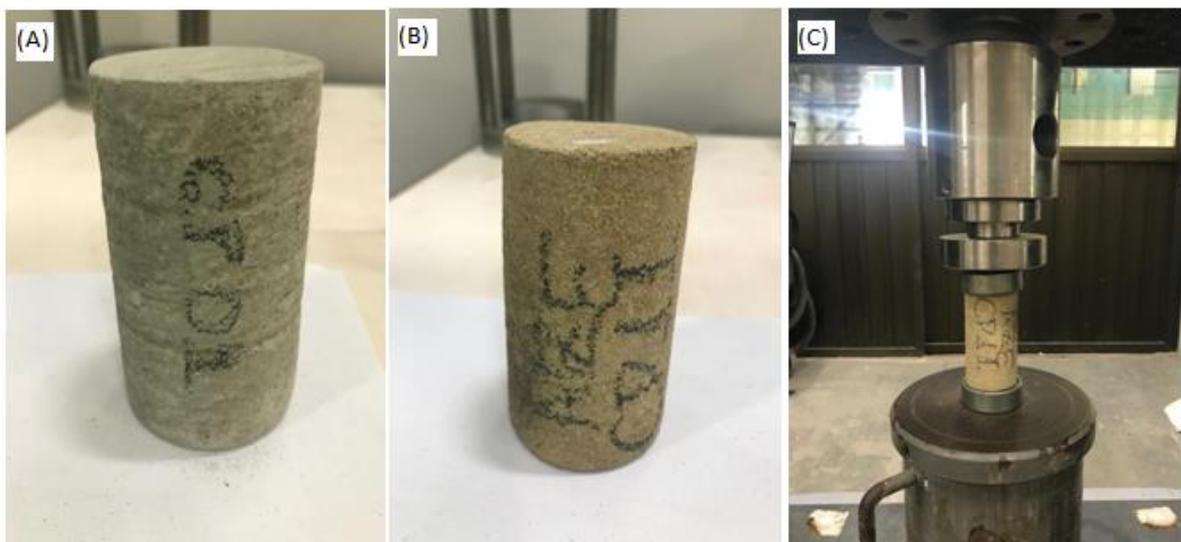
Figura 20 – Material desagregando na hora da moldagem dos corpos de prova



Fonte: A Autora (2023).

Diante do comprometimento do material, só foi possível moldar três corpos de prova de arenito e três de argilito para a realização dos ensaios. Os corpos de provas foram moldados com diâmetro de 50 mm e altura de 100mm, retificados e rompidos em uma prensa elétrica do tipo AGV-X Shimadzu com capacidade para 300kN, conforme apresentado na Figura 21. A resistência à compressão de cada rocha foi obtida através da média aritmética das amostras ensaiadas.

Figura 21 – (A) Corpo de prova argilito; (B) Corpo de prova arenito; (C) Ensaio de compressão simples



Fonte: A Autora (2023).

c) Ensaio de Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de compressão diametral também conhecido como ensaio brasileiro, tem a finalidade de analisar a resistência à tração de amostras de rochas ao serem carregadas radialmente. O ensaio não tem uma norma específica para sua realização, porém, foi realizado embasado na NBR 7222/2022 - Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.

Além das dificuldades comumente associada à realização desse ensaio, a moldagem das amostras para a realização foi dificultada devido a qualidade dos testemunhos levados ao laboratório. Não foi possível moldar as amostras em tamanho padronizadas para os ensaios de compressão diametral, pois todos os corpos de prova no tamanho de 50 mm de diâmetro e altura de 100 mm haviam sido utilizados no ensaio de compressão uniaxial.

No entanto, foi possível conseguir o material com a empresa que realizou as sondagens onde conseguiu moldar dois CP's de argilito e dois de arenito com este material. Porém, o material fornecido não se obteve informações de qual sondagem e profundidade foram retiradas.

Para aumentar a amostragem, optou-se por moldar algumas amostras no tamanho com 50 mm de altura, possibilitando, assim a discussão se o tamanho das amostras teria impacto nos resultados obtidos. A Tabela 12 demonstra os tamanhos dos corpos de provas ensaiados.

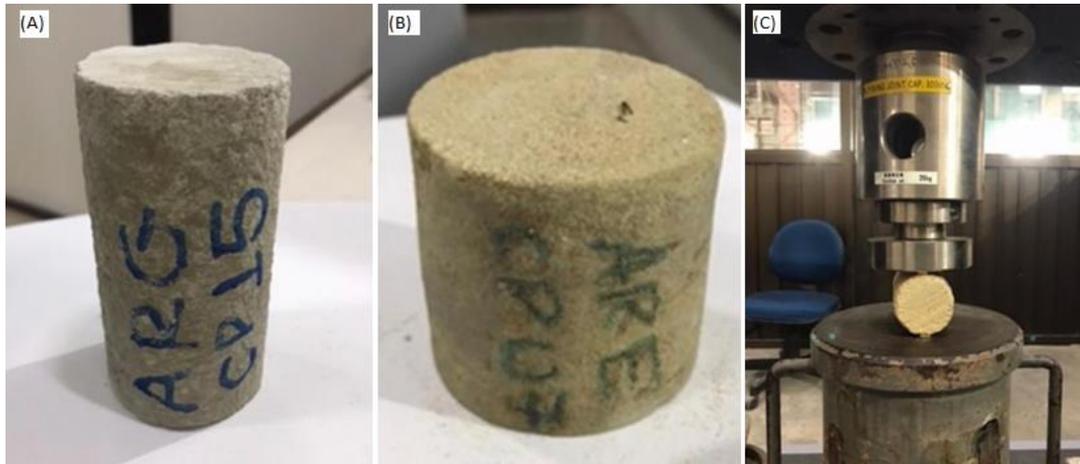
Tabela 12 – Amostras dos ensaios de compressão simples ou uniaxial

Litologia	Amostra	Tamanho da Amostra (mm)
Argilito	CP15	50 x 100
	CP16	
	CP02	50 x 50
	CP03	
	CP04	
	CP17	
	CP18	
	CP06	
Arenito	CP07	50 x 50
	CP08	
	CP09	
	CP19	
	CP12	50 x 100
	CP13	
	CP14	

Fonte: A Autora (2023).

Os corpos de prova foram moldados, retificados e colocados à prensa para execução do ensaio com velocidade de 3,00 mm/min. Na Figura 22 são demonstrados os corpos de prova nos dois tamanhos e o a montagem do ensaio na máquina de compressão.

Figura 22 – (A) Corpo de prova 50x100mm; (B) Corpo de prova 50x50mm; (C) Ensaio de compressão diametral



Fonte: A Autora (2023).

A partir do equipamento do ensaio foi obtido a carga de ruptura de cada amostra e a partir dela, foi calculada a resistência a tração do material, utilizando a Equação 2.

$$\sigma = \frac{2F}{\pi \cdot D \cdot H} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

F= Carga de ruptura em N;

D= diâmetro do corpo de prova em mm; e

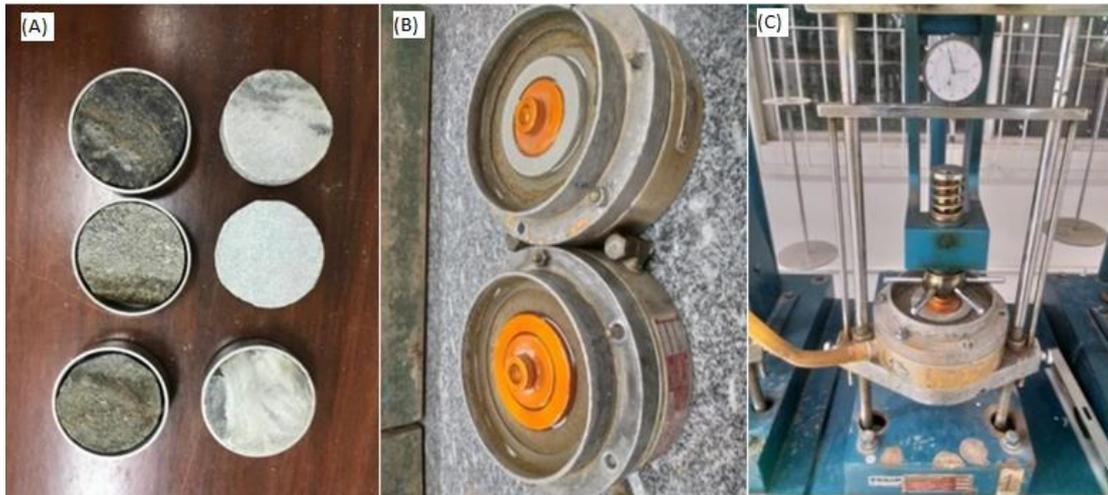
H= altura do corpo de prova (espessura) em mm.

d) Ensaio para Caracterização da Expansão

Os ensaios de caracterização da expansão foram realizados nas amostras de xisto e no argilito oriundas do testemunho da sondagem SM-BSF-03 e SM-BSF-08, respectivamente. Os ensaios foram realizados a partir de ensaios Oedométricos com células convencionais para os ensaios de expansão livre e tensão de expansão a volume constante. Por se tratar de materiais rochosos os corpos de prova foram moldados com auxílio de uma serra no Laboratório de Solos e Instrumentação - UFPE. As amostras foram moldadas em um anel cilíndrico com área de 20

cm² em seguida foi realizada a montagem da aparelhagem na base da célula de adensamento juntamente com pedra porosa inferior, papel filtro, conjunto amostra-anel, papel filtro, pedra porosa superior e cabeçote metálico (Figura 23).

Figura 23 – (A) Amostras de Argilito e Xisto no anel; (B) Amostras na célula de adensamento; (C) Ensaio de Expansão



Fonte: A Autora (2023).

No decorrer dos ensaios, as variações de altura dos corpos-de-prova foram medidas com o uso de extensômetros com sensibilidade de 0,01 mm e foram realizados de acordo com as metodologias da ABNT NBR 16853/2020 – Ensaios Oedométricos. Foram realizados dois ensaios para caracterização de expansão, um de expansão livre e um de tensão de expansão.

d.1) Ensaio de Expansão “Livre”

A execução dos ensaios de Expansão “Livre” ocorreu em células oedométricas convencionais, após a moldagem das amostras dos anéis os corpos de prova foram inundados e deixados expandir livremente deixando apenas a sobrecarga da pedra porosa, da placa de topo e do extensômetro pesando 0,03 kPa.

Os corpos de prova ficaram submersos por cinco com completa estabilização das deformações.

d.2) Ensaio de Tensão de Expansão

A tensão de expansão das amostras de xisto e argilito foi obtida através do método volume constante que consiste em inundar o corpo de prova após ser colocado na prensa de adensamento e adicionando sobrecarga à medida que apresentar expansão e variar de volume, com a finalidade inibir essa variação de volume e mantê-lo constante ao longo da realização do ensaio.

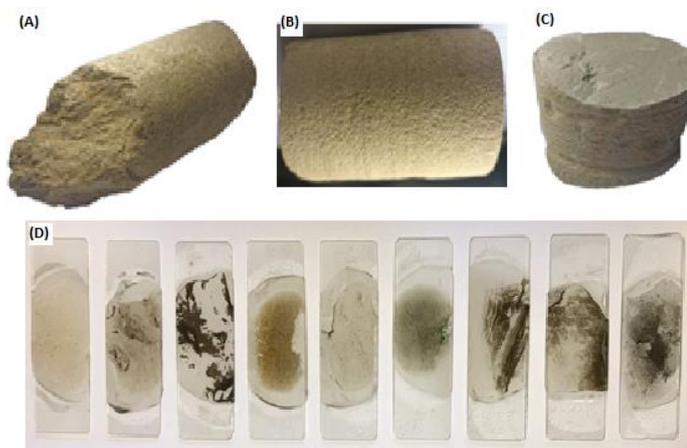
e) Análise Petrográfica

A análise petrográfica teve como objetivo principal a caracterização microscópica detalhada dos maciços sedimentares identificados nas sondagens SM-BSF-04 a SM-BSF-10 e da amostra de rocha metamórfica de xisto identificado nas sondagens SM-BSF-03, SM-BSF-17 e SM-BSF-18. Para melhor caracterizar a rocha de argilito, além do ensaio petrográfico foi realizado um ensaio de Difractometria de Raio X (DRX).

A petrografia foi realizada em doze amostras distribuídas em diversas profundidades. Uma parte das lâminas confeccionadas (amostras 1G, 6G e 7G) foram descritas pela empresa GEOLAB - Soluções em Geologia e cedidas pela TECHNE para a pesquisa. As demais lâminas (1 a 9) foram analisadas em parceria com departamento Geologia da UFPE a partir dos testemunhos das sondagens SM-BSF-06 a SM-BSF-08.

Os detalhes da coleta das amostras e da confecção das lâminas são apresentados na Figura 24 e na Tabela 13 apresenta-se as amostras a identificação das amostras analisadas.

Figura 24 – (A) Amostras de Xisto; (B) Amostra de Arenito; (C) Amostra de Argilito e (D) Confeção das lâminas



Fonte: A Autora (2023).

Tabela 13. Coleta de amostras para realização de ensaios, com trecho onde foram retiradas

Sondagem	Prof. de Extração (m)	Nº da Amostra
SM-BSF-03	7,50 - 7,90	1G
SM-BSF-06	3,5 - 17,00	1
	17,00 - 20,00	2
	19,50 - 21,00	3
	23,00 - 25,00	4
SM-BSF-07	10,50 - 12,00	5
	13,50 - 15,00	6
	13,40 - 13,60	6G
	16,50 - 16,70	7G
SM-BSF-08	11,00 - 12,50	7
	12,00 - 18,00	8
	18,00 - 21,00	9

Fonte: A Autora (2023).

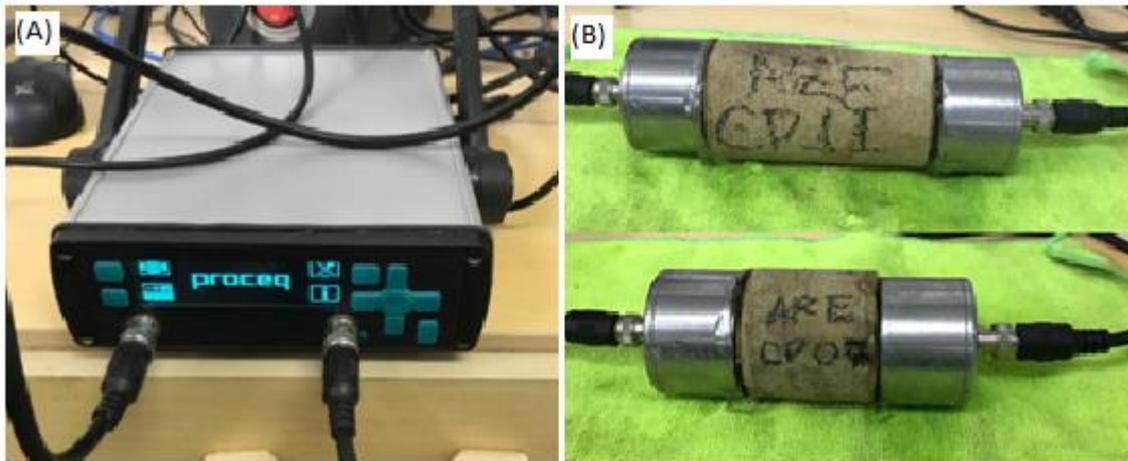
f) Ensaio de ultrassom

O Ensaio de Ultrassom foi realizado no laboratório de Tecnologia dos Aglomerados - LABTAG (UFPE), devido a ausência de norma específica para o ensaio em rocha, o ensaio foi realizado de acordo com a metodologia recomendada pela NBR 8802/2019 – Concreto endurecido – Determinação da velocidade de onda ultrassônica.

O ensaio foi executado com auxílio do aparelho de inspeção END por ultrassom por velocidade dos pulsos Pundit Lab+ com a finalidade de medir o tempo de propagação das ondas ultrassônicas através do material, entre um emissor e um receptor, chamados transdutores (Figura 25). O programa apresenta uma tela com visualização dos dados de entrada e de saída e a interface do dispositivo segue demonstrada na Figura 26.

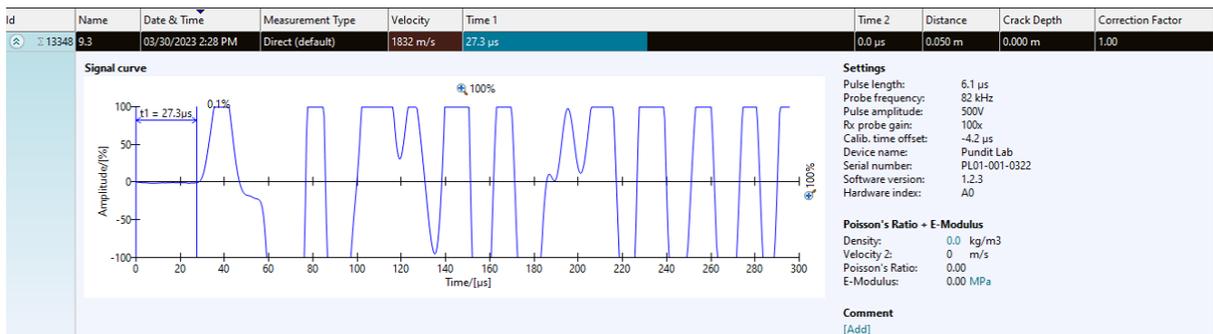
O ensaio foi realizado nas mesmas amostras utilizadas para os ensaios de compressão uniaxial e diametral, onde através da medição do tempo de propagação é obtida a velocidade média de propagação da onda ultrassônica, correlacionando-a com o grau de alteração das rochas.

Figura 25 – (A) Aparelho de inspeção END por ultrassom; (B) Amostra nos transdutores



Fonte: A Autora (2023).

Figura 26 – Tela de interface gráfica detalhada do dispositivo Pundit Lab+ de uma das amostras ensaiadas



Fonte: A Autora (2023).

Para o cálculo de Módulo de Elasticidade (E) foi atribuído os valores dos coeficientes de Poisson de 0,25 e 0,15 para o argilito e o arenito, respectivamente. Esses valores foram obtidos a partir de Legget (1962); Novik e Rzhevky (1971 apud COSTA, 2012).

3.5 CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA DA FUNDAÇÃO

Neste estudo, para classificar o maciço rochoso foram utilizados o método de classificação RMR de Bieniawski com base nos dados das sondagens realizadas ao longo do eixo da futura barragem. Para entender a complexidade geológica do local do estudo, adotou-se a classificação geomecânica da fundação a partir das litologias identificadas e, em seguida, foi avaliado o maciço como um todo.

A classificação RMR foi realizada a partir da avaliação de cinco parâmetros distintos, conforme discutido no Capítulo 2.3. Esses parâmetros incluem a resistência à compressão

uniaxial da rocha, o índice de qualidade do RQD, o espaçamento entre as descontinuidades, as condições das descontinuidades e as condições da água no maciço. Os critérios empregados para a determinação das pontuações atribuídas a cada parâmetro considerado por este sistema para cada litologia são discutidos adiante.

Os valores de RQD foram baseados a partir dos boletins de sondagens, determinados para cada manobra, podendo esta variar de furo para furo. No total foram analisadas 152 manobras das sondagens.

A resistência das rochas sedimentares foi baseada no ensaio de resistência à compressão simples e das demais rochas estimou-se a partir da Tabela 1, atribuído o peso de acordo com a qualidade da rocha registrada nos boletins de sondagem.

Os níveis de água subterrânea foram classificados a partir do nível d'água informados nos boletins de sondagens, onde os trechos abaixo do nível d'água foram classificados como umedecidos, pois nos trechos que foram realizados os ensaios de perda d'água nenhum obteve-se vazão superior a 10l/min. Os trechos localizados acima do nível d'água foram classificados como secos e nos trechos que não foi possível realizar os ensaios considerou a classificação com problemas de água (SOUZA, 2017).

O espaçamento das descontinuidades foi classificado com base nos resultados dos ensaios de perda d'água, de acordo com os critérios da

Tabela 3. As condições das fraturas foram classificadas de acordo com as informações registradas nos boletins de sondagens, nos trechos em que as informações não eram suficientes ou em que eram classificados como fragmentos de rochas, foram considerados os parâmetros nulos no quesito avaliado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O projeto básico e executivo do empreendimento foi realizado em uma fase única, onde as investigações de campo e de laboratório foram todas executadas nessa etapa. Ao início das investigações de subsuperfície do maciço da fundação onde estava programado o projeto do eixo do barramento, foram identificados litotipos geológicos que inviabilizariam a alternativa escolhida anteriormente.

Com o panorama apresentado, foram necessários estudos complementares, além do programados inicialmente em busca de uma alternativa compatível para o maciço rochoso de fundação encontrado em campo.

Neste capítulo é realizada uma discussão acerca dos resultados das investigações realizadas visando à caracterização geológica-geotécnica e em seguida e a classificação geomecânica dos maciços rochosos de fundação da Barragem Belém de São Francisco.

4.1 ANÁLISE DAS INVESTIGAÇÕES REALIZADAS

4.1.1 Sondagens de Simples Reconhecimento com Determinação do Índice de Resistência a Penetração

Os solos dispostos ao longo do eixo barrável apresentaram uma primeira camada mais madura, que se estende na linha de terreno natural, é composta por um solo residual silte argiloso, pouco arenoso com presença de pedregulhos, projeta-se em profundidades não superiores a 3,00 m. Sua maior expressão acontece nas proximidades da estaca E37, na sondagem SM-BSF-12, com intercalações de areia, fruto da deposição fluvial.

Esta camada possui N_{SPT} variável para as duas ombreiras. Na ombreira direita o N_{SPT} varia de 3 a 30/5 golpes e na ombreira esquerda, o N_{SPT} varia de 6 a 30/9 golpes.

A segunda camada, mais jovem possui matriz arenosa, com vários pedregulhos de quartzo e fragmentos da rocha classificada como solo de alteração. Ocorre na região das ombreiras entre as estacas E18 e E25 e entre E38 a E43. Essa camada possui resistência a penetração, precisando ser perfurada com equipamento rotativo, e apresenta baixa recuperação, em forma de fragmentos.

A terceira camada de solos, com maior disseminação na área, compreende as areias médias a grossas, fruto da deposição fluvial, que ocorre ao longo das estacas E29 a E36.

A calha do Riacho Cachoeira, no eixo da barragem, se estende por quase 140,00 m, com deposição arenosa variando entre 2,60 e 6,94 m (sondagem SM-BSF-11) de profundidade. A zona esquerda do leito (sentido ombreira esquerda) até à estaca E37 aproximadamente, compreende área de grande deposição sedimentar de aluvião (Figura 27). Esta camada possui N_{SPT} variando entre 1 a 6 golpes.

Figura 27 – Aluvião presente no leito do Riacho da Cachoeira, a jusante do Eixo



Fonte: TECHNE (2023).

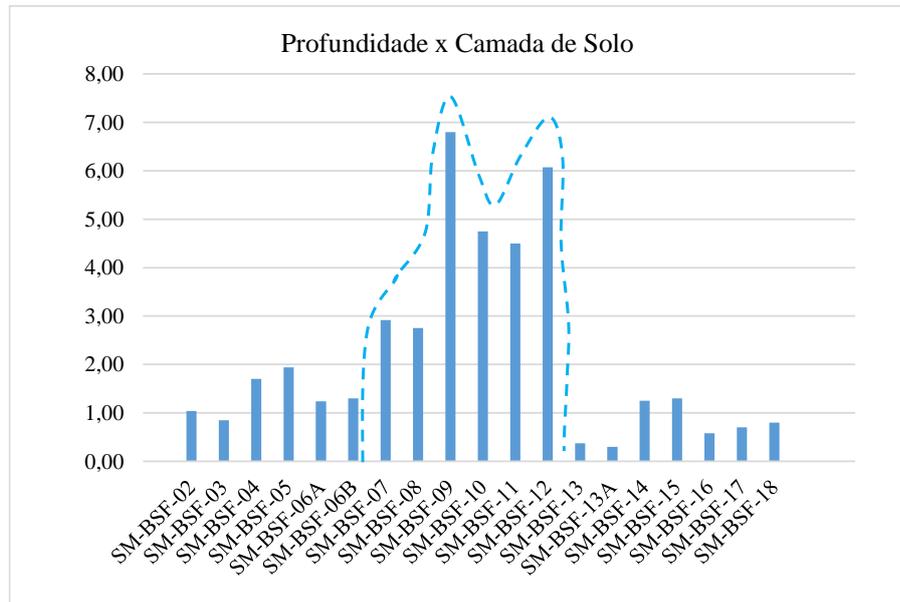
A camada do eixo se caracteriza pelos horizontes ascendentes de solos de alteração de rocha, de coloração marrom e cinza, siltes arenosos ou argilosos, compactos, de coloração marrom e areia fina, pouco siltosa, fofa de coloração marrom. Estas camadas possuem um N_{SPT} variando entre 1 e 20 golpes. Devido a erosão superficial, comumente a camada de areia não ocorre de forma contínua, ficando exposto na linha de terreno natural a camada siltosa.

De acordo com os resultados obtidos, os horizontes de solos superficiais possuem baixa espessura ao longo da zona lateral esquerda. A partir da estaca E48 em direção ascendente a ombreira esquerda, os solos ficam mais rasos, denotando proximidade da linha de maciço rochoso ao terreno natural.

As sondagens demonstram que as camadas com maior espessura se concentram na região de passagem do leito do rio, que possui canal mais delimitado entre as sondagens SM-BSF-07 e SM-BSF-12. A extensão da deposição do terraço aluvionar para o lado esquerdo em direção a sondagem SM-BSF-12 demonstra que neste setor tem-se uma grande barra de deposição do Riacho, devido a confluência dos cursos fluviais.

A Figura 28 demonstra a ocorrência de camadas com maior espessura entre as sondagens SM-BSF-07 e SM-BSF-12, em destaque, a zona de passagem do Riacho Cachoeira onde é identificado a camada aluvião.

Figura 28 - Camadas com maior espessura entre as sondagens SM-BSF-07 e SM-BSF-12. Em destaque, a zona de passagem do Riacho Cachoeiras



Fonte: A Autora (2023).

4.1.2 Sondagens Rotativas (SR)

A partir das sondagens rotativas foi identificado que linha de fundação da Barragem BSF, apresenta-se heterogênea no que concerne a exposição em profundidade de diferentes litologias (Figura 29). Desta forma, coexistem em contato discordante, os litotipos principais:

- Rochas Sedimentares: Arenitos entre as estacas E21 e E32 e uma sequência sedimentar com predominância de argilitos, arenitos e siltitos entre as estacas E27 e E35;
- Rochas Metamórficas: Migmatitos entre as estacas E11 a E18 e E35 a E51; Xistos entre as estacas E16 a E21 e E51 e E59;
- Rochas Ígneas: Granitos e Sienitos entre as estacas E11 a E20, E36 a E40 e E50 a E58.

Estas litologias ocorrem em cotas distintas e podem acontecer em associação.

Figura 29 – Litologias identificadas nas sondagens. (A) Arenito; (B) Siltito; (C) Pedregulhos; (D) Conglomerado; (E) Xisto; (F) Migmatito; (G) Granito e (H) Sienito



Fonte: TECHNE (2023).

A primeira camada perfurada com a investigação rotativa possui idade mais jovem, e fica em contato com o maciço rochoso. Possui matriz essencialmente silto arenosa, podendo conter pedregulhos de quartzo e fragmentos da rocha fonte. Esta camada, mesmo sendo resistente ao impenetrável, possui baixíssimo índice de recuperação na perfuração. Comumente, a matriz arenosa sofre processo de lavagem durante a investigação, recuperando apenas os elementos mais resistentes a ação da água. Devido as características geomecânicas desta camada, ela pode ser classificada como R5/F5. De acordo com Guidicini et al. (1972a), este

maciço seria uma rocha branda, com resistência < 10 MPa. Esta camada se estende pela fundação nos trechos de estacas E18 a E24 e da E38 a E42.

As demais camadas rochosas, de idade mais avançada, possuem gênese variada. A fundação da barragem possui uma associação de litotipos rochosos distintos. A descrição dos elementos da fundação está contida a seguir:

- Arenitos da Formação Tacaratu (SDt) – de idade Paleozóico
- Metagranitóides (Migmatitos) Tipo Recanto (My3) - pertencentes ao plutonismo sin-orogênico Cariris Velhos, de idade Mesoproterozóica;
- Granitóide Tipo Riacho do Forno (My3) - pertencentes ao plutonismo sin-orogênico Cariris Velhos, de idade Mesoproterozóica;
- Metapelitos – Complexo São Caetano (Msc) de idade Mesoproterozóica;
- Micaxistos – Complexo São Caetano (Msc) de idade Mesoproterozóica

As rochas xistosas que ocorrem na área pertencem ao Complexo São Caetano de idade Mesoproterozóica. Este complexo é caracterizado, em sua maior porção por paragnaisses e metagrauvacas, podendo ocorrer com calcários, quartzitos e rochas metavulcano-clásticas. Em menor porção, ocorre a fácies metavulcano sedimentar Poço do Salgueiro, que é formado por supracrustais metapelíticas, metagabros, metadacitos, metabasaltos, etc. Este maciço ocorre nas regiões das ombreiras direita e esquerda, entre as estacas E17+10,00 e E21 e entre E51 e E59.

Os Metapelitos, representados pelo Argilitos na área, entrariam na mesma classificação, do Complexo São Caetano, dentro da fácies metavulcano sedimentar Poço do Salgueiro. Estas litologias ocorrem entre as estacas E27 e E35.

Os Granitóides Tipo Riacho do Forno pertencem ao plutonismo sin-orogénico Cariris Velhos, de idade Mesoproterozóica, é representado por litotipos biotita-muscovita migmatito e metamozongranitos. Estes maciços ocorrem em associação com os xistos do Complexo São Caetano. Na ombreira esquerda, esta composição ocorre entre as estacas E51 e E59.

Os metagranitóides ou Gnaisses migmatizados Tipo Recante, também pertencem ao plutonismo sin-orogénico Cariris Velhos, de idade Mesoproterozóica. Neste maciço é comum a presença de augen dominante com biotita e biotita muscovita. Estes maciços são comuns em associação com rochas da fácies Poço do Salgueiro, pertencentes ao Complexo São Caetano (metapelitos, metadacitos, metarriodacitos, metabasaltos). O Gnaisse migmatizado ocorre em unicidade, entre as estacas E36 e E51.

Os Arenitos disseminados no eixo da barragem, são pertencentes a Formação Tacaratu, de idade Paleozóica. Nesta formação estão associadas camadas de conglomerados e arenitos,

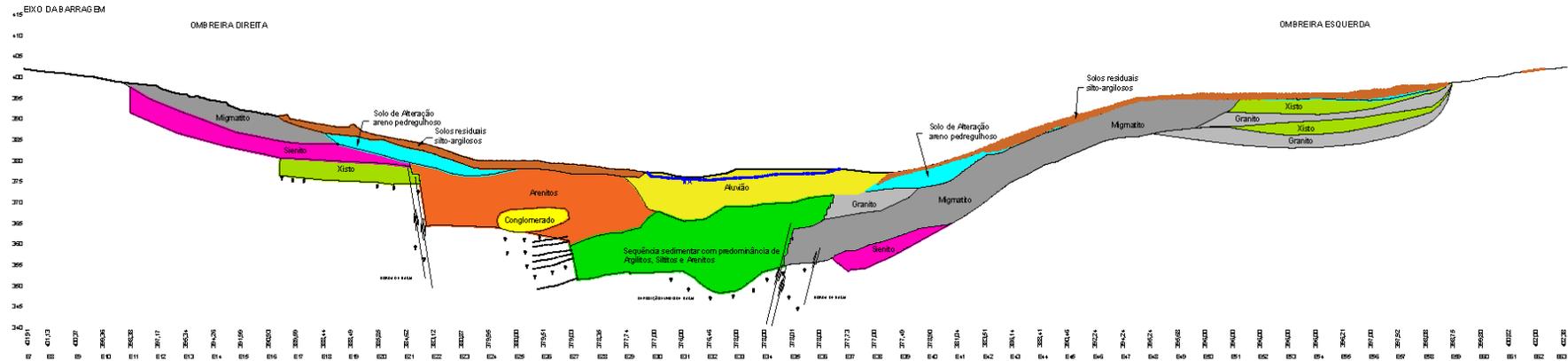
com matriz composta por grãos médios a grossos. As sondagens que perfuraram este material identificaram ainda níveis ferruginosos e esbranquiçados, localizados, na composição arenítica. Estes horizontes de rochas sedimentares ocorrem entre as estacas E21 a E35. Neste aspecto, os arenitos estão presentes em uma sequência sedimentar com o argilito e siltitos no leito do curso fluvial, entre as estacas E7 e E35.

Com esta configuração, os contatos entre estas litologias ocorrem de forma discordante, através de falhas, com formação de áreas propícias a deposição dos sedimentos areníticos sobre o arcabouço rochoso gnáissico, funcionando como fundo de bacia. Dessa forma, a zona do curso fluvial possui zona de contato estrutural-litológico, e nas proximidades da estaca E21 apresenta também provável zona de contato litológico estrutural, representando um provável contato de borda de bacia.

Sendo zonas de deposição e limitadas por estruturas móveis (falhas), é relevante observar que estas zonas compreendem pontos de fragilidade na fundação da barragem. Adicionalmente a isto, os diferentes litotipos associados, se comportam, de forma distinta, quando submetidos a uma mesma força, seja ela, vertical, horizontal ou inclinada.

O esquema a seguir (Figura 30) demonstra perfil geológico-geotécnico da fundação da futura barragem BSF modelado a partir das sondagens, a Figura 31 apresenta o perfil com a distribuição das sondagens ao longo do eixo do barramento e as Figura 32, Figura 33 e Figura 34 mostram em detalhe os perfis da ombreira esquerda, leito do rio e ombreira direita, respectivamente.

Figura 30 – Perfil geológico-geotécnico da fundação da futura barragem BSF

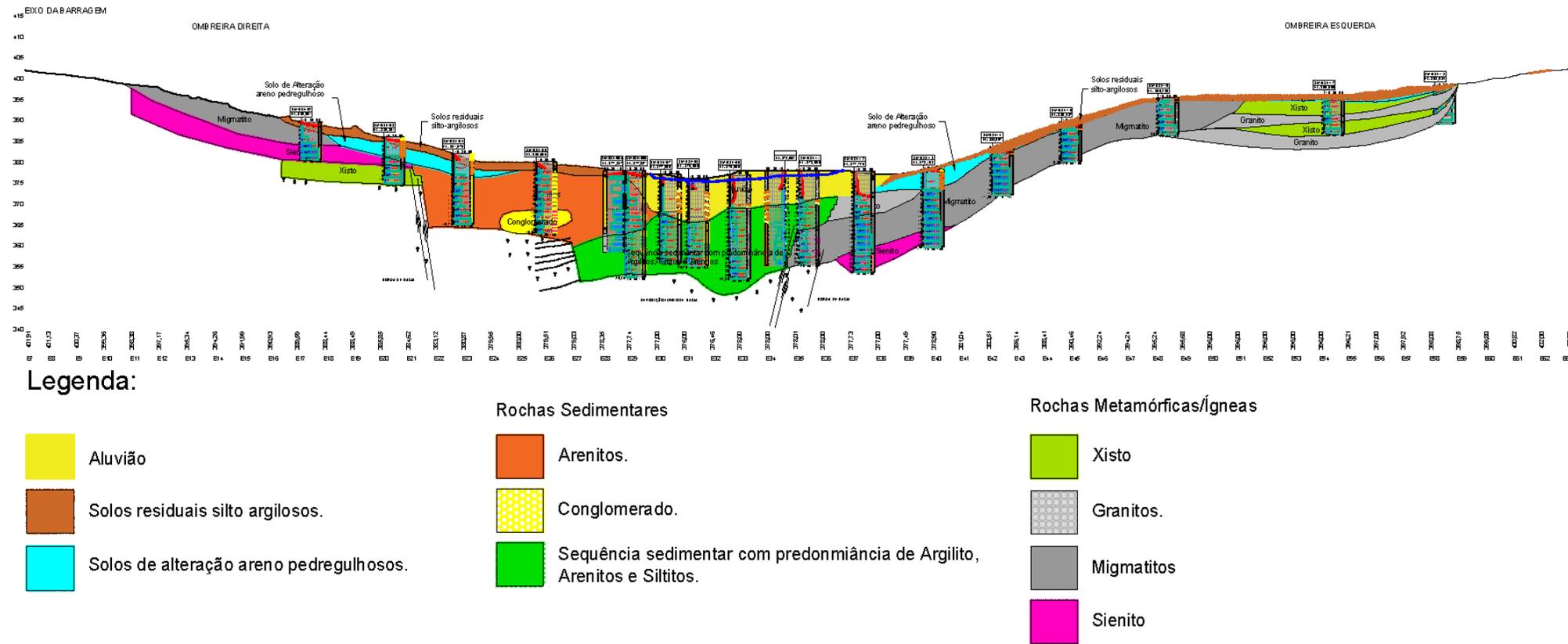


Legenda:

<ul style="list-style-type: none"> Aluvião Solos residuais silto argilosos. Solos de alteração areno pedregulhosos. 	<p>Rochas Sedimentares</p> <ul style="list-style-type: none"> Arenitos. Conglomerado. Seqüência sedimentar com predominação de Argilito, Arenitos e Siltitos. 	<ul style="list-style-type: none"> Xisto Granitos. Migmatitos Sienito
---	---	---

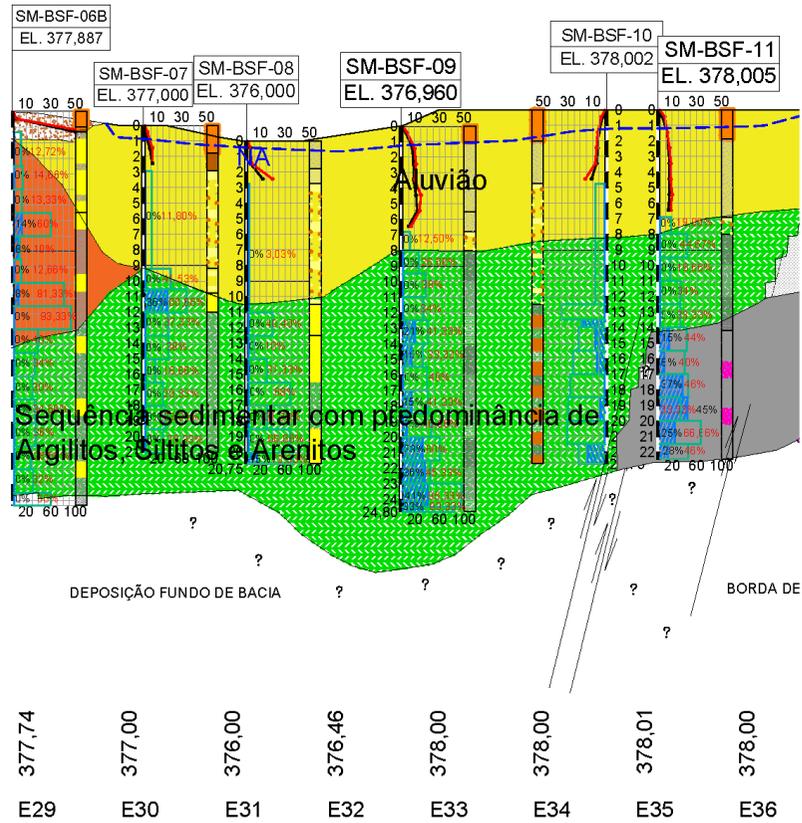
Fonte: A Autora (2023).

Figura 31 – Perfil geológico-geotécnico da fundação da futura barragem BSF com as sondagens realizadas ao longo do eixo



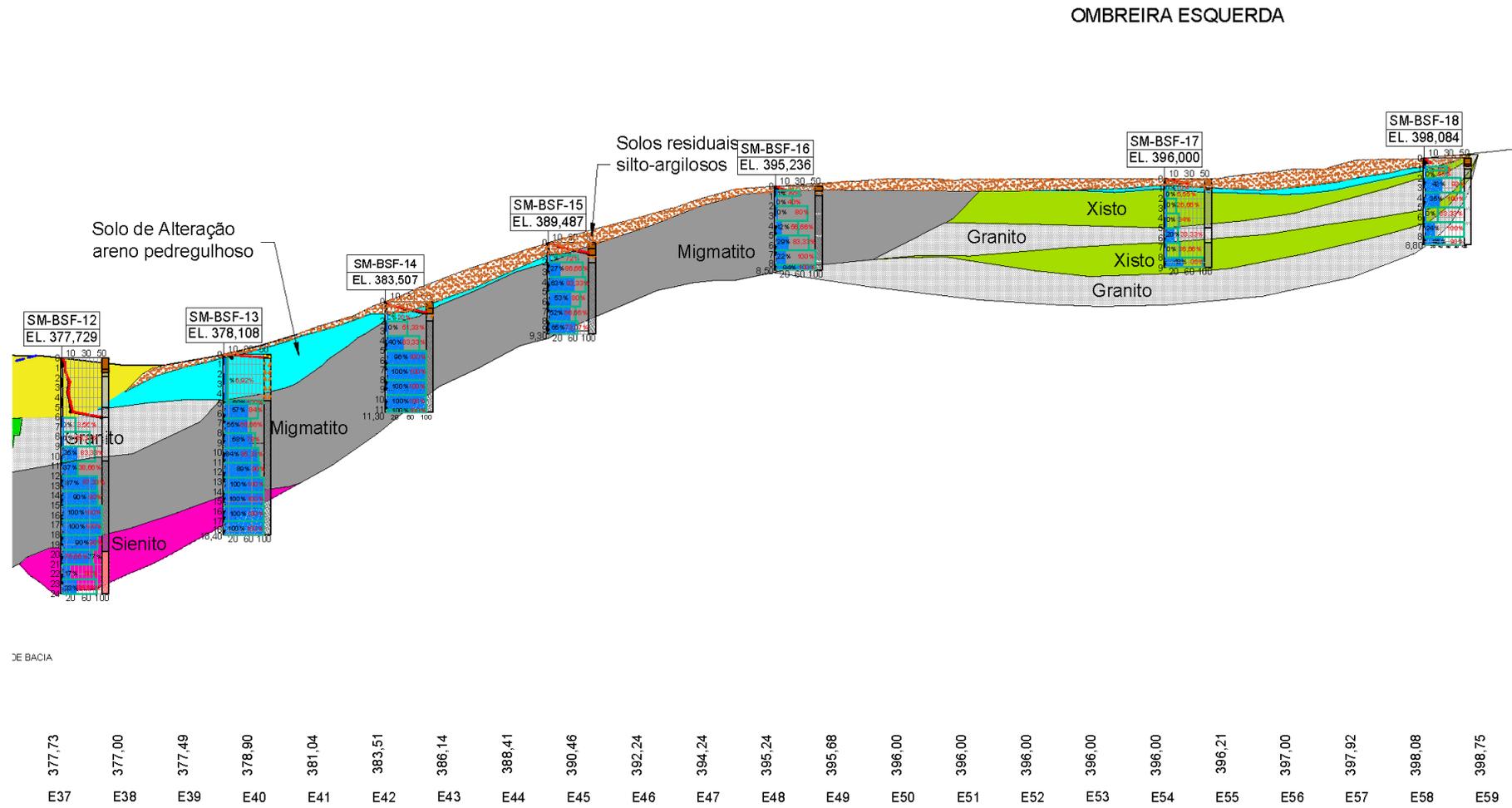
Fonte: A Autora (2023).

Figura 33 – Perfil geológico-geotécnico da fundação da futura barragem BSF – leito do rio



Fonte: A Autora (2023).

Figura 34 – Perfil geológico-geotécnico da fundação da futura barragem BSF – ombreira esquerda



Fonte: A Autora (2023).

4.1.3 Ensaios de permeabilidade

Os ensaios de infiltração não foram executados em todas as camadas de solo devido à necessidade de utilização de lama bentonítica para avanço da perfuração em alguns trechos ou devido à pouca profundidade da perfuração, inviabilizando instalação de revestimento em alguns furos. Nas camadas de solos onde foi possível executar o ensaio, conforme resumo na Tabela 14, a permeabilidade varia na ordem de 10^{-4} e 10^{-5} cm/s indicando solos de baixa permeabilidade segundo classificação de Terzaghi et al (1996).

Tabela 14 – Resultados dos ensaios de infiltração

Local	Sondagem	Trecho ensaiado	Material perfurado	Permeabilidade cm/s
OMBREIRA DIREITA	SM-BSF-02	0,00-1,04	Silte arenoso, marrom (solo residual).	$3,98 \times 10^{-4}$
	SM-BSF-03	0,50-0,85	Silte argiloso, pouco arenoso, com pedregulhos de quartzo, marrom (solo residual).	$4,58 \times 10^{-4}$
	SM-BSF-04	1,00-1,70	Silte argiloso, pouco arenoso, com pedregulhos de quartzo, marrom (solo residual).	$1,91 \times 10^{-5}$
	SM-BSF-05	1,00-1,94	Silte arenoso, pouco argiloso, marrom (solo residual).	$5,04 \times 10^{-5}$
	SM-BSF-06A	1,00-1,27	Alteração de rocha, de coloração marrom.	$3,51 \times 10^{-4}$
LEITO DO RIO	SM-BSF-07	1,00-2,00	Areia fina, pouco siltosa, de coloração marrom.	$1,78 \times 10^{-4}$
		2,00-2,92	Areia grossa, pouco siltosa, de coloração marrom.	$1,01 \times 10^{-4}$
	SM-BSF-10	1,00-2,00	Areia fina, siltosa, de coloração marrom.	$1,13 \times 10^{-4}$
	SM-BSF-11	1,00-2,00	Areia fina, siltosa, de coloração marrom.	$1,17 \times 10^{-4}$
OMBREIRA ESQUERDA	SM-BSF-14	0,60-1,25	Silte argiloso, com mica, de coloração marrom.	$3,19 \times 10^{-5}$
	SM-BSF-15	0,50-1,30	Silte argiloso, pouco arenoso, com mica, de coloração marrom.	$2,17 \times 10^{-5}$
	SM-BSF-17	0,50-0,75	Silte argiloso, pouco arenoso, de coloração marrom.	$1,45 \times 10^{-4}$
	SM-BSF-18	0,50-0,80	Alteração de rocha.	$5,87 \times 10^{-4}$

Fonte: A Autora (2023).

Para os ensaios de perda d'água no substrato rochoso foram previstos cerca de 80 ensaios, porém, no momento da execução, os maciços apresentaram-se muito fraturados e com alto índice de deteriorização em contato com a água, não sendo possível realizar a quantidade prevista, principalmente, no trecho correspondente ao leito do rio.

De acordo com a classificação de Costa (2012), os ensaios de perda d'água em todo maciço rochoso foram classificados com uma Condutividade Hidráulica (CH) muito baixa (H1)

a média (H3). Os resultados mais desfavoráveis foram identificados tanto na ombreira direita como na ombreira esquerda, principalmente, na sondagem SM-BSF-04, na camada de arenito e na extremidade da ombreira esquerda, a partir da sondagem SM-BSF-14, nas camadas de migmatito, xisto e granito que tiveram uma CH média (H3) com permeabilidades em 10^{-4} cm/s.

Na camada representada pelo arenito (E21 a E32) foram executados quatro ensaios de perda água dos quais demonstraram ser um material com transmissividade relativa de água na ordem de 10^{-4} cm/s. Os ensaios de porosidade e lâmina petrográfica discutidos adiante, atestam a quantidade de vazios nesta litologia.

Esta permeabilidade encontrada na camada sedimentar, de 10^{-4} cm/s, é praticamente uma constante em toda a linha de fundação, para os diferentes litotipos, nos primeiros 3,00 m de realização dos EPA's. Esta conjuntura pode estar diretamente associada, não só a gênese do material, mas também a condição geomecânica dos mesmos, sobretudo nas camadas ígneas e metamórficas, que apresentam maior grau de fraturamento, nessa camada inicial.

Os resultados de condutividade hidráulica da fundação para as diversas camadas rochosas seguem apresentados nas Tabela 15 correlacionando com a sondagem, a litologia, e o setor da barragem.

Tabela 15 – Resultados dos ensaios de perda d'água da ombreira direita

Local	Sondagem	Trecho ensaiado (m)	Material perfurado	Permeabilidade cm/s	C.H.	
OMBREIRA DIREITA	SM-BSF-02	6,03-9,03	Sienito	$1,30 \times 10^{-4}$	H3	
	SM-BSF-03	5,20-8,20	Sienito	$3,69 \times 10^{-4}$	H3	
		8,20-11,00	Xisto	$4,43 \times 10^{-4}$	H3	
	SM-BSF-04	2,20-5,20	Arenito	Areia grossa com seixos	$1,19 \times 10^{-4}$	H3
		5,20-8,20		$6,27 \times 10^{-4}$	H3	
		8,20-11,20		$3,01 \times 10^{-4}$	H3	
		11,20-14,20		$3,12 \times 10^{-4}$	H3	
		14,20-16,70		$1,53 \times 10^{-4}$	H3	
	OMBREIRA ESQUERDA	SM-BSF-12	9,00-12,00	Migmatito	$5,14 \times 10^{-5}$	H2
			12,00-15,00		$2,34 \times 10^{-5}$	H2
15,00-18,00			Não bebeu			
18,00-21,00			$3,98 \times 10^{-6}$		H1	
SM-BSF-13		21,00-24,00	Migmatito	Sienito	$1,91 \times 10^{-6}$	H1
		6,00-9,00		$4,54 \times 10^{-5}$	H2	
		9,00-12,00		$2,96 \times 10^{-5}$	H2	
		12,00-15,00		$4,29 \times 10^{-5}$	H2	
		15,00-18,00		$1,95 \times 10^{-6}$	H1	
SM-BSF-13A		1,00-4,00	Migmatito		$3,12 \times 10^{-4}$	H3
		4,00-7,00		$4,67 \times 10^{-4}$	H3	
		7,00-10,00		$6,78 \times 10^{-5}$	H2	
		10,00-12,00		$1,73 \times 10^{-6}$	H1	

Local	Sondagem	Trecho ensaiado (m)	Material perfurado	Permeabilidade cm/s	C.H.
SM-BSF-14		2,50-5,50	Migmatito	$4,52 \times 10^{-4}$	H3
		5,50-8,50		$5,40 \times 10^{-5}$	H2
		8,50-11,30		$1,95 \times 10^{-6}$	H1
SM-BSF-15		2,00-5,00	Migmatito	$2,25 \times 10^{-4}$	H3
		5,00-8,00		$3,76 \times 10^{-4}$	H3
SM-BSF-16		2,50-5,50	Migmatito	$4,57 \times 10^{-4}$	H3
		5,50-8,50		$5,34 \times 10^{-5}$	H2
SM-BSF-17		3,00-6,00	Granito	$2,34 \times 10^{-4}$	H3
		6,00-9,00		Xisto	$3,56 \times 10^{-4}$
SM-BSF-18		2,50-5,50	Granito	$1,87 \times 10^{-4}$	H3
		5,80-8,80		$3,24 \times 10^{-4}$	H3

Fonte: A Autora (2023).

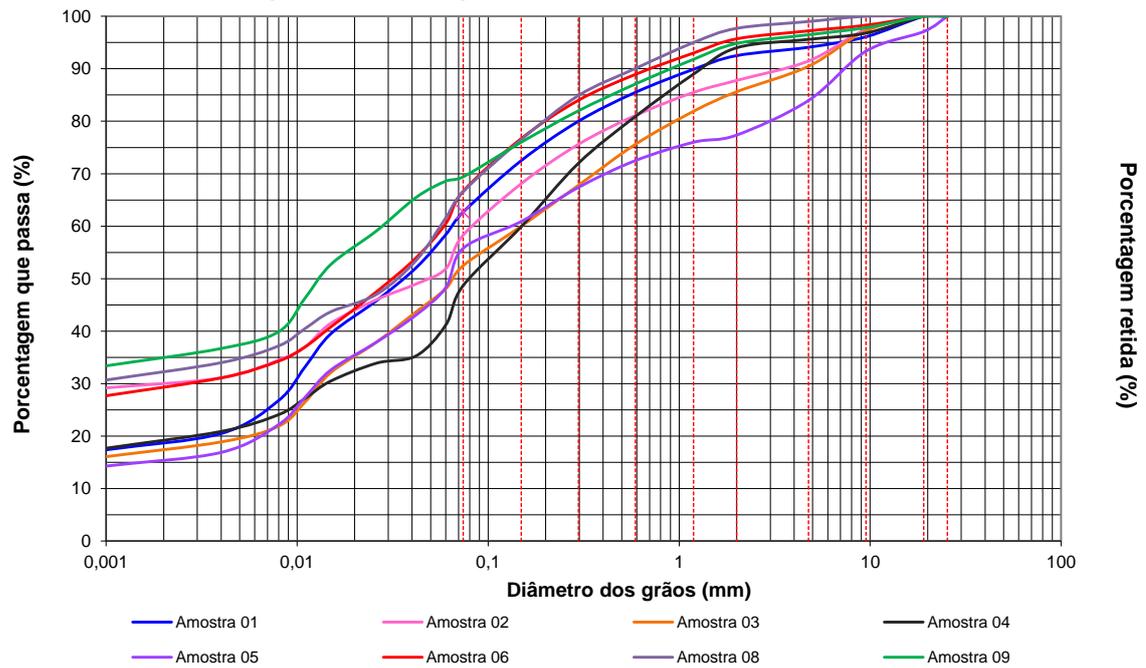
Devido à impossibilidade de execução dos EPA's na região do leito, a título de análise da permeabilidade para o arenito, pode ser adotado o resultado da sondagem SM-BSF-04, o qual perfurou esta litologia.

As rochas sedimentares, segundo Chiossi (2015), possuem maiores valores de permeabilidade, enquanto que as rochas metamórficas e ígneas apresentam menor valor nessa propriedade, o que é constatado no maciço estudado, onde o grupo compreendido em rochas sedimentares apresentou permeabilidade concordante com o esperado para esse tipo de material. Porém, no trecho do leito do rio, as condições são ainda mais desfavoráveis que devido ao alto grau de fraturamento do maciço não permitiu a realização do ensaio, não sendo possível obter a condutividade hidráulica desse trecho.

4.1.4 Análises dos ensaios de laboratório dos materiais em solos

A partir dos dados obtidos nos ensaios de granulometria por peneiramento e sedimentação, foi elaborada as curvas granulométricas das amostras. De acordo com a Figura 35 os resultados apresentaram solos com fração predominantemente de finos, como siltes e argilas.

Figura 35 – Curvas granulométricas das amostras ensaiadas

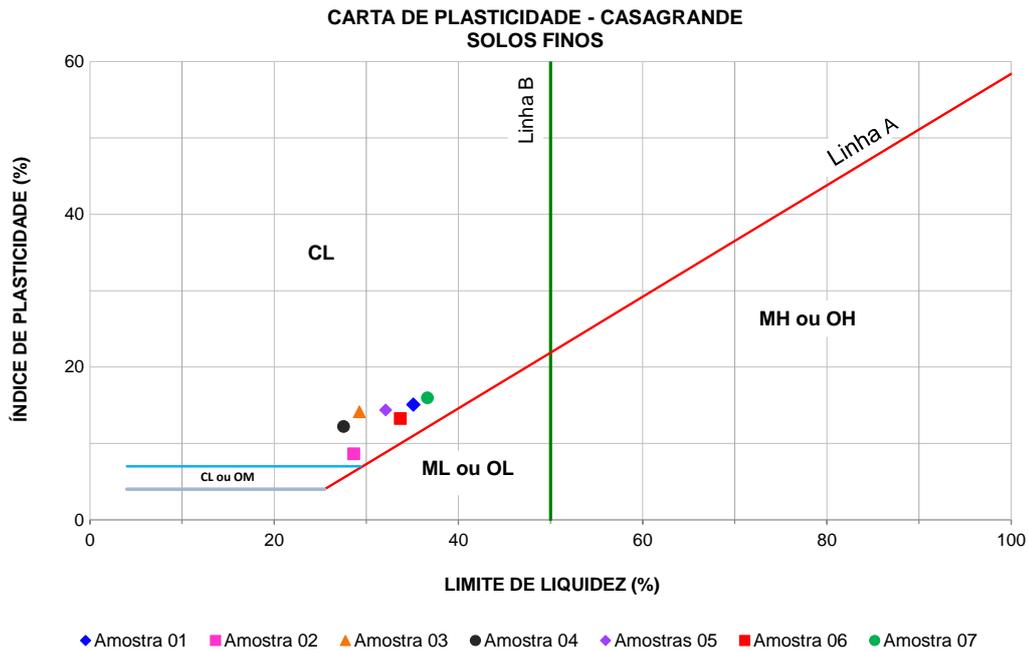


Fonte: A Autora (2023).

Após realização de ensaios de caracterização, os solos estudados foram classificados no Sistema Unificado de Classificação dos Solos – SUCS a partir da Carta de Plasticidade de Casagrande.

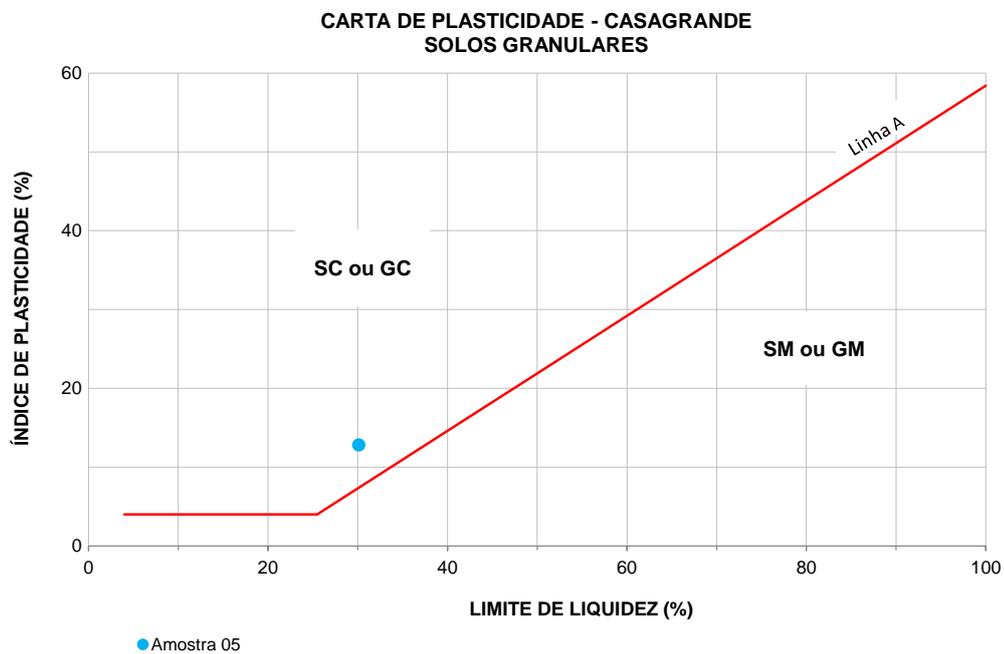
Os resultados apresentados na Figura 36 demonstram que solos são classificados quase todos na sua totalidade como solos finos, indicando uma argila de baixa plasticidade (CL). Das amostras analisadas, apenas a amostra 05 é classificada como solo granular, apontando uma areia argilosa (SC), conforme demonstra a Figura 37.

Figura 36 – Curvas granulométricas dos solos finos



Fonte: A Autora (2023).

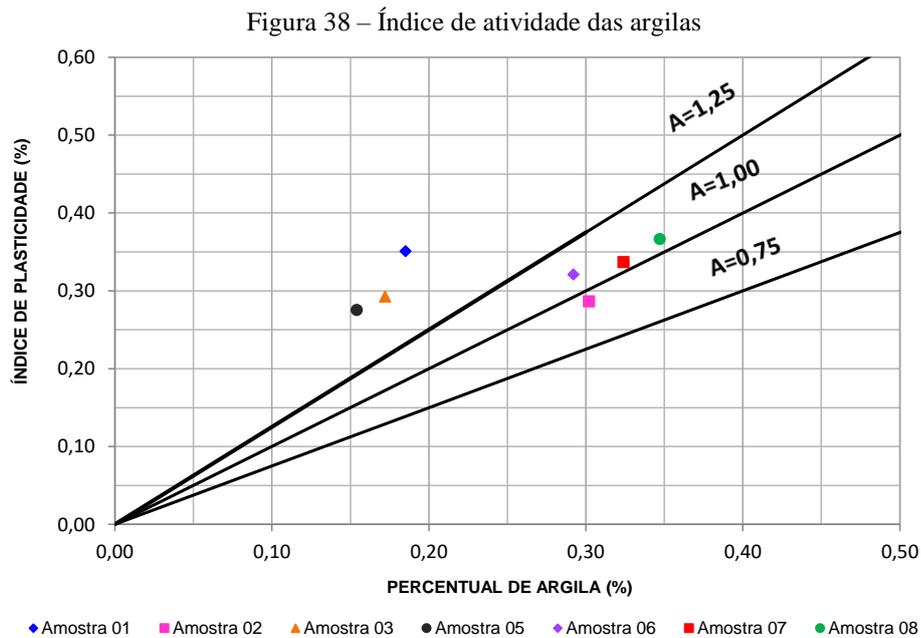
Figura 37 – Curvas granulométricas dos solos granulares



Fonte: A Autora (2023).

No intuito de verificar atividade da argila nos solos estudados plotou-se o gráfico Índice de atividade da fração argilosa delimitadas por três retas onde é possível identificar o grau que de atividade da fração argilosa ($IA = IP / \% \text{ de argila}$).

A Figura 38 apresentaram que ocorre uma grande variação na atividade da fração argilosa, onde as amostras 01, 03 e 05 apresentam alta atividade e as amostras 02, 06, 07 e 08 indica índice de atividade média, pois as amostras situadas acima da reta superior são classificadas como de alta atividade e as que se situa entre as duas retas, a argila é classificada como de atividade média ou normal.



Os ensaios de compactação (Proctor Normal) demonstram valores de umidade ótima entre 12,49 e 19,50% (média = 15,66% e Desvio padrão = 1,72) e peso específico máximo entre 1,75 e 1,88 g/cm³ (média = 1,83 g/cm³ e Desvio Padrão = 0,03).

A umidade natural média do solo é 6,20%, a massa específica dos grãos de 2,68 g/cm³ a densidade natural 1,46 g/cm³. Os valores de permeabilidade média é de $5,98 \times 10^{-07}$ cm/s, indicam solos com baixa permeabilidade.

No Anexo B apresenta-se o resumo dos resultados ensaios de caracterização das amostras necessárias à classificação dos solos.

4.1.5 Análises dos ensaios de laboratório dos materiais rochosos

a) Ensaio de Caracterização Física

O ensaio de caracterização realizado nas amostras de arenito cujo resultado para a massa específica seca média é de 18,30 KN/m³ considerado dentro do esperado, que de acordo com

Chiossi (2015), para esse tipo de rocha, fica em torno de 20,0 KN/m³. Ainda segundo o autor, a densidade da rocha depende do seu estado de alteração que é influenciado pela transformação dos minerais em menos densos ou pelo aumento de volume desses minerais. Também, depende da porosidade e da compactidade, pois rochas porosas tendem a apresentar baixa densidade em relação a rochas menos porosas.

Assim, pode-se dizer que um aumento na porosidade e uma redução no peso específico seco são indicadores do processo de alteração, logo, o aumento da porosidade favorece a percolação de água na rocha e, conseqüentemente, a sua desintegração.

A porosidade do arenito apresentou o resultado de 26,27%. Segundo Chiossi (2015), rochas com porosidade entre 10% a 30% são consideradas muito porosas, onde as rochas sedimentares como o arenito, tendem a apresentar valores de porosidade entre 10 a 20%, ou seja, o arenito estudado apresentou uma porosidade acima do esperado.

Esse resultado pode estar relacionado com o grau de cimentação que essa rocha se encontra, visto que, as rochas sedimentares tendem a possuir maior porosidade quando são fracamente cimentadas.

A Tabela 16 mostra os resultados do ensaio dos índices físicos realizados em todas as amostras.

Tabela 16 – Resultado dos Índices físicos

Furo de Sondagem	Amostras Arenito	Massa Submersa (g)	Massa Específica aparente seca (KN/m ³)	Massa Específica aparente saturada (KN/cm ³)	Porosidade aparente (%)	Absorção de Água (%)
SM-BSF-06	A01	45,00	18,70	21,20	24,98	13,39
	A02	41,12	18,20	20,90	26,21	14,37
	A03	43,8	18,50	21,10	25,57	13,82
	A04	46,37	18,80	21,40	25,73	13,66
	A05	44,71	18,20	20,90	26,82	14,75
SM-BSF-07	B01	41,99	18,10	20,80	27,14	15,00
	B02	42,25	18,30	20,90	26,14	14,29
	B03	41,03	18,30	20,90	26,09	14,23
	B04	43,48	18,10	20,80	26,62	14,67
	B05	44,68	18,00	20,80	27,41	15,22
Média			18,30	21,00	26,27	14,34
Desvio Padrão			0,03	0,02	0,75	0,59
Máximo			18,80	21,40	27,41	15,22
Mínimo			18,00	20,80	24,98	13,39

Fonte: A Autora (2023).

Quando comparados aos resultados dos ensaios realizados por Sobrinho et al. (1999) nos arenitos da fundação da UHE Dona Francisca, onde a massa específica seca ficou entre 18,00 e 20,80 KN/m³ e a porosidade entre 23,91 a 6,69%, pode-se concluir que o arenito estudado apresentou resultado similar.

b) Ensaio Resistência a Compressão Simples (Uniaxial)

A Tabela 17 apresenta os valores de resistência à compressão obtida no ensaio de compressão simples. Os materiais ensaiados, tanto o argilito como o arenito, apresentaram resultados de resistências, 6,91 MPa e 10,80 MPa, respectivamente.

De acordo Pastore (2015) como fundação de barragens ou estruturas, os arenitos são a rocha a com maior amplitude de resistência a compressão com intervalos de $\sigma_c > 100$ Mpa até $< 0,4$ MPa.

Marques Filho e Geraldo (1998) classificam que rochas como valores abaixo de 10 MPa são classificadas como rocha muito branda e para rochas com resistência a compressão entre 30 a 10 MPa são classificadas como rochas brandas, características inerentes a essas litologias. Essas rochas são caracterizadas por possuir baixa resistência, conseqüentemente, baixa capacidade de suporte, indicando que, para esse tipo de fundação, a construção mais adequada são barragens de gravidade.

Tabela 17 – Resultados dos ensaios de compressão simples ou uniaxial

Litotipo	Sondagem / Prof. de Extração	Amostra	Resistência à compressão uniaxial (MPa)	Resistência à Média (MPa)	Desvio Padrão
Argilito	SM-BSF-07 (12,0 a 15,0 m)	CP01	10,24	6,91	2,37
	Sem informação	CP17	4,90		
		CP18	5,59		
Arenito	SM-BSF-07	CP05	12,67	10,80	1,32
	SM-BSF-06 (6,50 a 9,50 m)	CP10	9,84		
		CP11	9,88		

Fonte: A Autora (2023).

c) Ensaio Resistência a Compressão diametral

A ruptura dos corpos de provas se deu no plano diametral, exceto a amostra de arenito numerada de CP08, logo, essa amostra foi descartada. A resistência a tração para o argilito variou entre 0,43 a 1,44 MPa com valor médio de 0,97 MPa. A amostra de arenito apresentou resistência a tração entre 0,49 a 1,62 MPa com valor médio de 1,10 MPa. O desvio padrão para ambos os materiais foi praticamente os mesmos, no valor de 0,36. Os resultados encontram-se sumarizados na Tabela 18.

Tabela 18 – Resultados dos ensaios de compressão diametral (tração)

Litotipo	Amostra	Tamanho da Amostra (mm)	Máx. Força (N)	Resistência à Tração (MPa)	Resistência à Tração Média das amostras (MPa)	Desvio Padrão
Argilito	CP15	50 x 100	11302,1	1,44	0,97	0,36
	CP16		3605,99	0,46		
	CP02	50 x 50	4801,7	1,22		
	CP03		3850,79	0,98		
	CP04		1704,36	0,43		
	CP23		4362,06	1,11		
	CP24		4518,08	1,15		
	CP06		4744,34	1,21		
Arenito	CP07	50 x 50	4998,35	1,27	1,03	0,32
	CP09		5568,74	1,42		
	CP12		5037,74	1,28		
	CP12	50 x 100	4670,72	0,59		
	CP13		5668,07	0,72		
	CP14		5357,93	0,68		

Fonte: A Autora (2023).

A resistência a tração tanto do argilito como do arenito apresentara valores muito baixos, resultados esperados para rochas sedimentares, pois, normalmente, não apresentam resistências elevadas. Legget (1962); Novik e Rzhevky (1971 apud COSTA, 2012) demonstram nos seus trabalhos uma resistência a tração na faixa de 4,0 a 7,0 MPa para o argilito, enquanto o arenito ficou entre 10 a 20 MPa.

Na UHE Dona Francisca foram estudadas quatro amostras de arenitos, onde as resistências a compressão no material ficaram entre 0,5 a 4,0 MPa.

d) Ensaios para Caracterização da Expansão

Os ensaios de Expansão “Livre” apresentaram resultados da expansão com percentuais de 0,5% de 2,5% para o xisto e o argilito, respectivamente. Os Ensaios de Tensão de Expansão obtiveram resultados da tensão expansão de 33 kPa para o Xisto e de 48 kPa para o Argilito. Segundo o critério proposto por Jimenez Salas (1980) que classifica os possíveis danos em estruturas de acordo com a tensão de expansão encontrada, tensões de expansão entre 20 e 50 kPa podem causar pequenas fissuras na estrutura.

e) Análise Petrográfica

Nas análises petrográficas foram confirmadas a presença dos litotipos sedimentares de Arenito, Argilito e Siltito, além de apresentar o resultado do Xisto.

A Tabela 19 demonstra as litologias identificadas em cada lâmina e adiante são discorridos os comentários acerca de cada litologia.

Tabela 19 – Resultados dos ensaios de compressão diametral (tração)

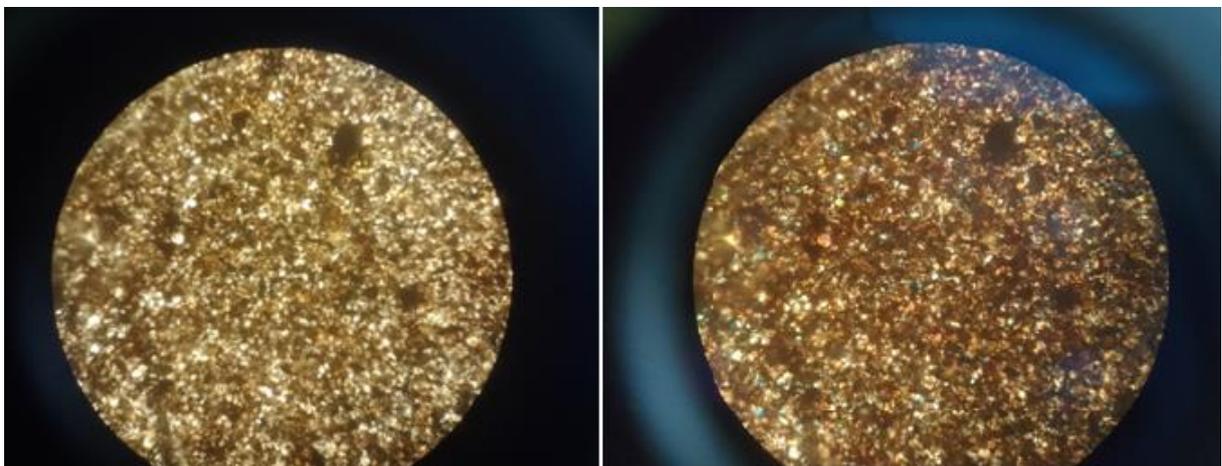
Sondagem	Prof. de Extração (m)	Nº da Amostra	Litologia
SM-BSF-03	7,50 - 7,90	1G	Xisto
	3,5 - 17,00	1	
SM-BSF-06	17,00 - 20,00	2	Arenito
	23,00 - 25,00	3	
	19,50 - 21,00	4	Agilito
	10,50 - 12,00	5	Arenito
SM-BSF-07	13,50 - 15,00	6	Siltito
	13,40 - 13,60	6G	Arenito
	16,50 - 16,70	7G	Argilito
	11,00 - 12,50	7	Siltito
SM-BSF-08	12,00 - 18,00	8	Siltito
	18,00 - 21,00	9	Arenito

Fonte: A Autora (2023).

e.2) Litotipo sedimentar – Arenito

A análise macroscópica do maciço arenito indica uma rocha equigranular, de cor amarelo claro, com granulometria fina a média, com predominância de quartzo. Microscopicamente identificada uma composição mineralógica composta por 90% de quartzo, 2% de feldspato, 3% de calcita, 5% argila. Nas amostras 2 e 4 o Arenito apresenta matéria orgânica, minerais opacos como minerais acessórios e a presença de cimentação por óxido de ferro (Figura 39).

Figura 39 – Análise petrográfica da amostra 4 indicando a presença de cimentação



Fonte: A Autora (2023).

A propriedade físico-mecânica, a rocha apresenta-se como frágil, sem alteração (rocha sã) e com estratificações.

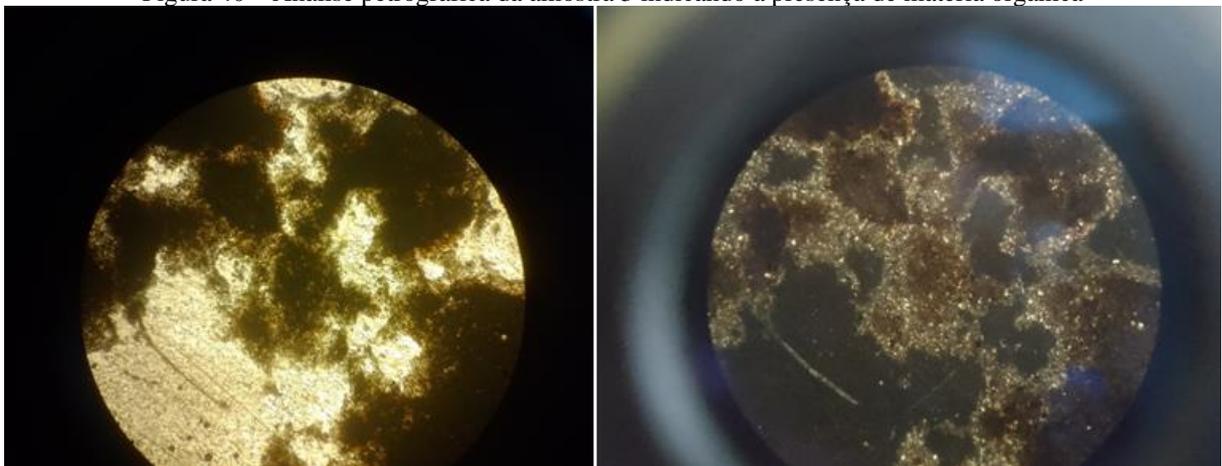
Os grãos de quartzo em algumas amostras também se apresentam cimentados com um material calcítico que reage com HCl a 10%. A presença de calcita rocha é um fator relevante, pois indica que o material entre em contato com águas ácidas pode reagir e se dissolver, precipitando em local diverso. Isso pode causar vazios na composição litológica representada pelo arenito e problemas erosivos na fundação constituída por esse material.

e.2) Litotipo sedimentar – Argilito

A análise macroscópica demonstra uma rocha equigranular, de granulação fina, e foliação bem definida pelos minerais de quartzo, feldspato e micáceos. Um bandamento composicional pela concentração de quartzo e micas também foi observado.

Microscopicamente é identificada uma composição mineralógica composta por 22% de quartzo, 3% de plagioclásio, 25% de mica, 35% de argila, 10% de minerais opacos e 5% de clorita. Assim, observa que o mineral predominante na matriz é a argila e na amostra 3 é identificado a presença de matéria orgânica (Figura 40).

Figura 40 – Análise petrográfica da amostra 3 indicando a presença de matéria orgânica

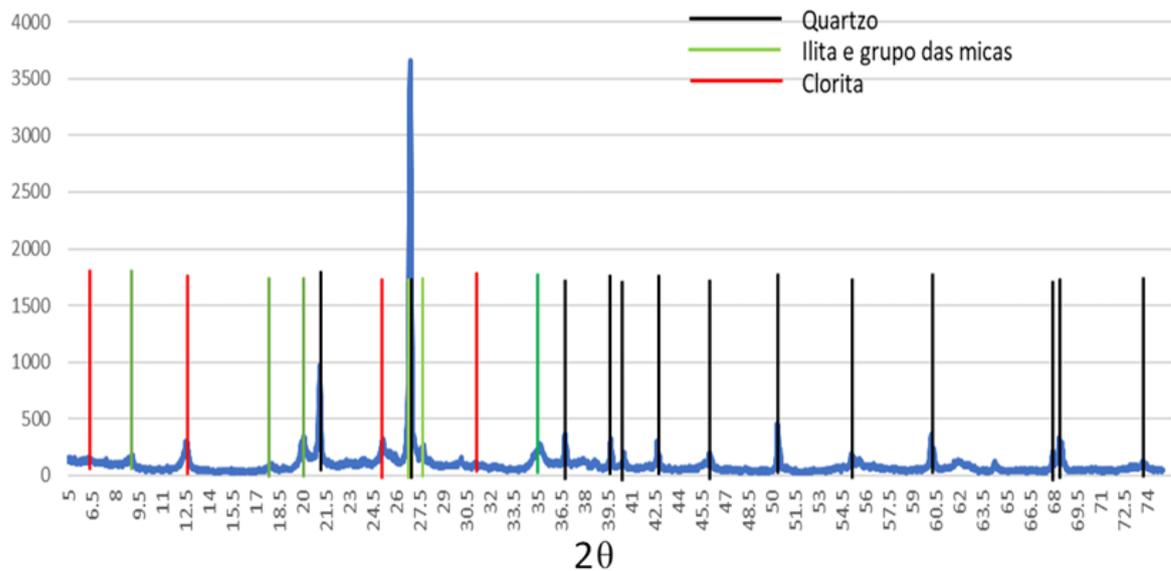


Fonte: A Autora (2023).

A partir da composição modal da mineralogia identificada na descrição petrográfica, utilizando a classificação e nomenclatura de rochas sedimentares, a rocha examinada é classificada como argilito.

O ensaio de DRX realizado na amostra 7G identifica picos de concentração de minerais de quartzo, illitas, micas e cloritas (Figura 41). Os argilominerais illitas podem ter pequeno potencial para expansividade.

Figura 41 – Resultado do ensaio de Difractometria de Raio X (DRX).



Fonte: GEOLAB (2023).

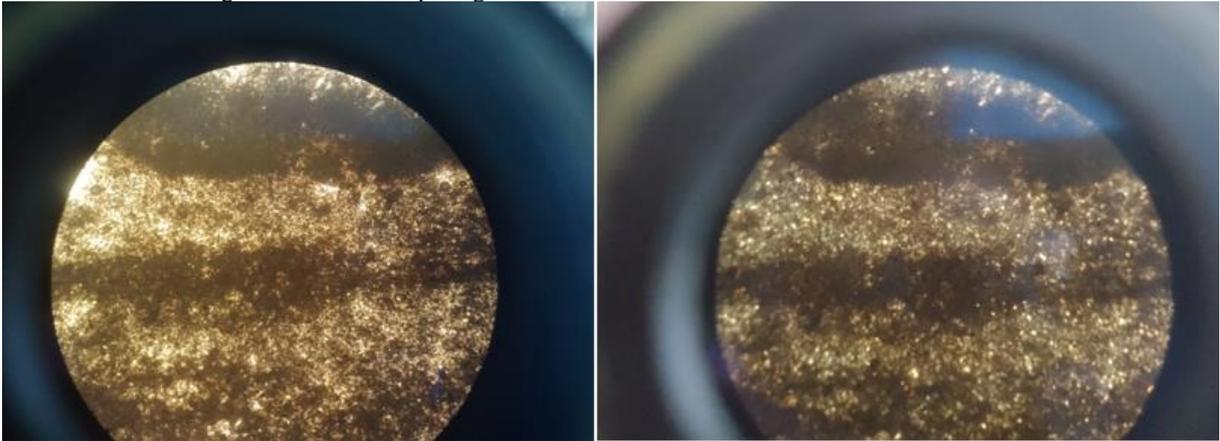
e.3) Litotipo Metamórfico - Siltito

A análise petrográfica indica uma rocha composta de forma dominante por grãos de quartzo do tamanho silte, bem selecionado, matriz composta por argilominerais com presença de minerais opacos como minerais acessórios.

A amostra 8 é classificada por um Siltito laminado com alternância de lâminas de matéria orgânica com presença de minerais opacos (

Figura 42).

Figura 42 – Análise petrográfica da amostra 8 indicando um Siltito laminado



Fonte: A Autora (2023).

O Siltito é identificado nas amostras 6, 7 e 8 dos furos SM-BSF-07 e SM-BSF-08 corroborando a presença dessa litologia na sequência sedimentar descritas durante a investigação de campo através das sondagens.

e.4) Litotipo Metamórfico - Xisto

A análise macroscópica expressa uma estrutura xistosidade bem definida, com proeminente orientação dos minerais micáceos. Possui textura inequigranular, com granulação fina a média.

Microscopicamente é identificada um bandamento composicional, com orientação de faixas de muscovita e minerais opacos com níveis enriquecidos de quartzo. Conforme a descrição, são observados porfiroblastos milimétricos de feldspato ocorrem numa matriz de quartzo e micas.

A Composição mineralógica predominante é composta por 32% de biotita, 28% de muscovita, 34% de quartzo, 3% de plagiocásico, 1% de minerais opacos, granada, turmalina. Logo, os minerais que predominam na matriz são o quartzo e a biotita.

Os minerais micáceos apresentam-se dobrados, demonstrando estrutura de crenulação. Alguns cristais de quartzo apresentam-se recristalizados e fraturados.

Estes elementos demonstram que o maciço encontra-se em constante processo de deformação em regime dúctil-rúptil.

e) Ensaio de ultrassom

O ensaio de ultrassom apresenta o resultado da velocidade da onda percorrida nos corpos de prova e a partir dela foi obtido do módulo de elasticidade dinâmico (E). Na Tabela 20, são apresentados valores médios da velocidade determinada no próprio.

Embora os resultados apresentem valores extremamente baixos, o resultado encontra-se dentro do esperado para esse tipo de rocha, corroborando que, devido as alterações químicas que essas rochas ou seus minerais estão expostos, bem como, as foliações existentes, representando seu plano de descontinuidade.

Tabela 20 - Resultado do Ensaio de Ultrassom

Litotipo	Sondagem / Prof. de Extração	Amostra	Tamanho da Amostra (cm)	Velocidade (m/s)	Velocidade Média (m/s)
Argilito	SM-BSF-07 (12,0 a 15,0 m)	CP01	5,0 x 10,0	1023	1607
		CP02	5,0 x 5,0	2513	
		CP03	5,0 x 5,0	1371	
		CP04	5,0 x 5,0	1522	
Arenito	SM-BSF-07 (12,0 a 15,0 m)	CP05	5,0 x 10,0	1767	1688
		CP06	5,0 x 5,0	1697	
		CP07	5,0 x 5,0	1216	
		CP08	5,0 x 5,0	1520	
		CP09	5,0 x 5,0	1830	
		CP10	5,0 x 10,0	1746	
		CP11	5,0 x 10,0	2044	

Fonte: A Autora (2023).

4.2 CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA DA FUNDAÇÃO DA FUTURA BARRAGEM BELÉM DE SÃO FRANCISCO

Baseado nas informações apresentadas discutidas nos capítulos anteriores, é realizada a classificação dos maciços rochosos através da aplicação direta do sistema RMR de Bieniawski nas sondagens realizadas ao longo do eixo do futuro barramento. Os critérios empregados para a determinação das pontuações atribuídas a cada parâmetro do sistema foram discutidos no subcapítulo 3.5.

4.2.1 Caracterização geomecânica das rochas metamórficas e ígneas

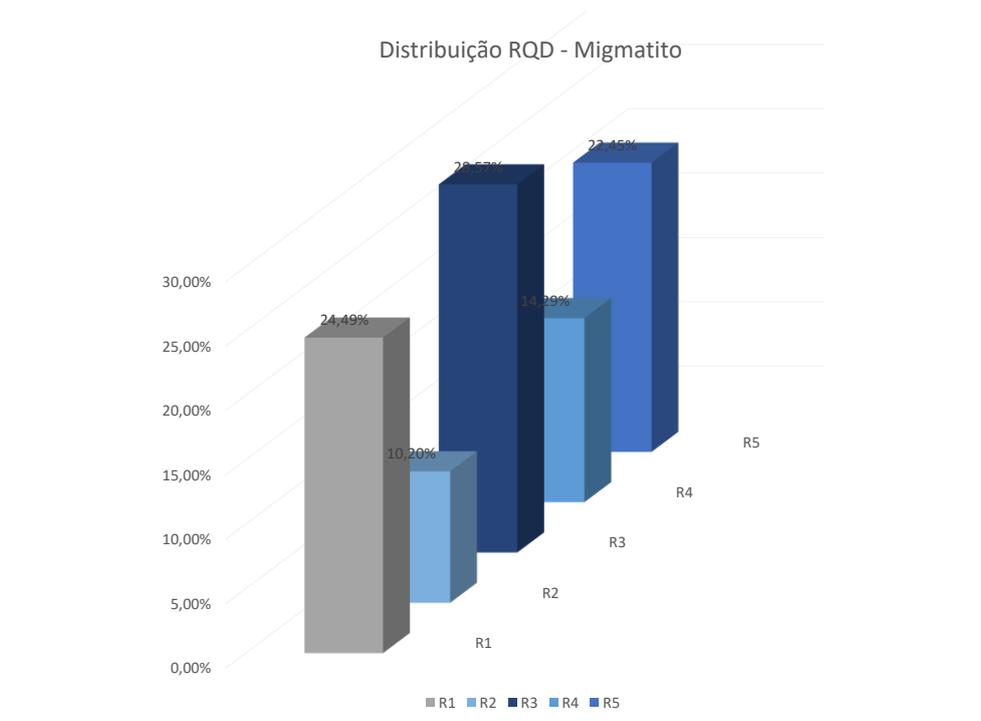
O Migmatito é identificado nas sondagens nas ombreiras direita e esquerda do eixo da barragem. Esse maciço apresenta um RQD variando de 0% a 100%, onde o pior resultado foi

na sondagem SM-BSF-02 (0%). Esse maciço rochoso apresenta-se muito fragmentado, com grau de alteração de rocha A5.

Na ombreira esquerda, o RQD no furo SM-BSF-11 variou de 8% a 45%, apresentando melhores resultados a partir dessa sondagem até o furo SM-BSF-16, com grau de alteração entre A1 e A3, com predominância de rocha sã ao longo do trecho investigado.

A Figura 43 demonstra os percentuais distribuídos por cada classe de qualidade do maciço migmatito de acordo com o percentual do RQD. A qualidade do maciço nessa litologia apresenta-se bem heterogênea, com valores variando desde qualidade muito pobre (R5) com um percentual de 22%, qualidade regular (R3) com 29% e qualidade excelente (R1) com 24% das manobras analisadas.

Figura 43 – RQD separados pela porcentagem de ocorrência no maciço Migmatito



Fonte: A Autora (2023).

Na Tabela 21 são apresentadas a classificação RMR do Migmatito para as manobras analisadas. Observou-se que na ombreira direita essa litologia é 100% classe IV, ou seja, classificada como pobre. Nas sondagens realizadas no leito do rio e na ombreira esquerda o maciço é classificado com 45% como classe II, indicando uma qualidade boa e 37% classe III, considerada uma qualidade regular.

Tabela 21 - Índices RMR - Migmatito

Local	OMDREIRA DIREITA		LEITO DO RIO						OMDREIRA ESQUERDA															
	Sondagem		SM-BSF-11						SM-BSF-12				SM-BSF-13											
	Trecho/Manobra		14,00-15,50	15,50-17,00	17,00-18,50	18,50-20,00	20,00-21,50	21,50-22,45	10,50-12,00	12,00-13,50	13,50-15,00	15,00-16,50	16,50-18,00	18,00-19,50	4,70-5,00	5,00-6,50	6,50-8,00	8,00-9,50	9,50-11,00	11,00-12,50	12,50-14,00	14,00-15,50	15,50-17,00	17,00-18,40
Resistência da rocha	12	12	12	12	7	7	12	12	7	4	4	1	1	4	4	4	4	2	1	1	1	1	1	1
RQD	3	3	3	3	8	8	8	3	8	17	20	20	20	20	13	13	13	13	17	17	20	20	20	20
Espaçamento das fraturas	0	0	0	0	15	15	15	15	15	20	20	20	20	20	15	10	15	20	20	20	20	20	20	20
Condições das fraturas	Persistência	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Abertura	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	5	5	4	4	4	5	5	6	6
	Rugosidade	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	Preenchimento	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
	Alteração	0	0	5	6	6	6	6	6	5	5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Água subterrânea	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	30	10	10	10	10	10	10	10	10
Direção e mergulho	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Índice RMR	31	31	36	37	53	53	58	53	52	63	67	64	64	67	54	75	59	63	65	64	68	68	69	69
CLASSE	IV	IV	IV	IV	III	III	III	III	III	II	II	II	II	II	III	II	III	II	II	II	II	II	II	II

Local	OMDREIRA ESQUERDA																										
	SM-BSF-13A								SM-BSF-14						SM-BSF-15						SM-BSF-16						
	0,30-1,80	1,80-3,30	3,30-4,80	4,80-6,30	6,30-7,80	7,80-9,30	9,30-10,80	10,80-12,30	12,30-13,80	13,80-15,30	15,30-16,80	16,80-18,30	18,30-19,80	19,80-21,30	21,30-22,80	22,80-24,30	24,30-25,80	25,80-27,30	27,30-28,80	28,80-30,30	30,30-31,80	31,80-33,30	33,30-34,80	34,80-36,30			
Resistência da rocha	0	7	4	4	4	4	4	12	7	1	1	1	1	1	1	7	4	4	4	2	12	12	12	7	12	1	
RQD	3	8	13	13	13	13	13	3	8	20	20	20	20	20	20	8	13	13	13	13	3	3	3	8	3	20	
Espaçamento das fraturas	0	15	15	20	20	20	20	0	8	15	20	20	20	20	20	8	8	10	15	20	0	0	0	8	8	0	
Condições das fraturas	Persistência	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Abertura	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0	4	4	4	4	4	4	
	Rugosidade	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0
	Preenchimento	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
	Alteração	6	6	6	6	6	6	6	5	5	6	6	6	6	6	6	5	5	6	6	6	3	3	5	5	5	6
Água subterrânea	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
Direção e mergulho	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Índice RMR	30	57	58	63	63	63	63	40	48	62	67	67	67	67	67	49	51	54	59	57	38	38	40	49	49	47	
CLASSE	IV	III	III	II	II	II	II	IV	III	II	II	II	II	II	III	III	III	III	III	III	IV	IV	IV	III	III	III	

Fonte: A Autora (2023).

O Sienito é identificado nas sondagens na ombreira direita com o RQD variando entre 55% e 87% na sondagem SM-BSF-02, com grau de alteração A3 e classificação, predominantemente, R1. No furo SM-BSF-03 esta litologia apresenta baixo índice de RQD, variando entre 7 e 26% de qualidade pobre a muito pobre (R4/R5) e com grau de alteração A1/A2 indicando uma rocha sã a pouco alterada.

Na ombreira esquerda o Sienito é identificado na sondagem SM-BSF-12 a partir dos 19,70m, com RQD de 77% nessa manobra. No final do furo, entre as profundidades de 21,00 e 24,00 m, ocorre uma zona de menor qualidade, com RQD entre 17% e 33%, caracterizando zona provável de fraturamento intenso do maciço. Nesse furo, o maciço representa uma rocha sã (A1), porém, com grande quantidade de fraturas e com qualidade bem distinta para cada manobra, variando entre R2 a R5.

O maciço Sienítico é classificado em 56% das situações em Classe III, indicando que possui uma qualidade regular e o percentual restante (44%) é classificado como Classe IV, ou seja, de qualidade pobre. O resultado da classificação é apresentado na Tabela 22.

Tabela 22 - Índices RMR do Sienito

Local	OMBREIRA DIREITA					OMBREIRA ESQUERDA			
	SM-BSF-02			SM-BSF-03		SM-BSF-12			SM-BSF-13A
Sondagem	5,00-6,50	6,50-8,00	8,00-9,00	4,50-5,00	5,00-6,50	19,50-21,00	21,00-22,50	22,50-24,00	11,65-12,00
Trecho/Manobra	5,00-6,50	6,50-8,00	8,00-9,00	4,50-5,00	5,00-6,50	19,50-21,00	21,00-22,50	22,50-24,00	11,65-12,00
Resistência da rocha	4	1	1	12	12	2	12	7	2
RQD	13	17	17	0	3	17	3	8	17
Espaçamento das fraturas	5	5	5	0	15	20	10	15	20
Condições das fraturas	Persistência	0	0	0	0	0	0	0	0
	Abertura	4	4	4	4	0	6	6	6
	Rugosidade	1	1	1	0	1	0	0	1
	Preenchimento	0	0	0	0	0	0	0	0
	Alteração	3	3	3	5	6	1	1	1
Água subterrânea	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Direção e mergulho	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Índice RMR	40	41	41	31	47	56	42	47	56
CLASSE	IV	IV	IV	IV	III	III	III	III	III

Fonte: A Autora (2023).

Na camada inferior ao Sienito na sondagem SM-BSF-03 é identificado o Xisto, rocha metamórfica, que apresenta susceptibilidade a alteração rápida em contato com a água. Devido ao seu alto grau de metamorfismo e as características mineralógicas, esta rocha possui potencial de alteração química para argilas de coloração esverdeada.

Esta rocha, apresenta valores de RQD variando entre 0 e 29%. O furo, neste caso, dos 6,50m a 9,50m apresentou um maciço pouco a medianamente alterado (A2/A3) e foi finalizado

na profundidade de 11,00 m, apresentando zona de intenso fraturamento. Neste sentido, esta zona apresenta na profundidade de 6,50 m em rocha, de uma capa de 4,50 m de xisto, com alta capacidade de alteração em contato com a água e capacidade de suporte variando de R4 a R5.

Na ombreira esquerda, nos furos SM-BSF-17 e SM-BSF-18, essa litologia começam a ocorrer a rocha granítica associada com os Xistos. Esta associação apresenta com fragilidade geomecânica, uma vez que, os valores do RQD não ultrapassam os 43%, no final dos furos. Nas faixas em que ocorre a camada xistosa, o RQD apresenta valor de 0%.

O grau de alteração para essas camadas varia entre A1 e A3 e apresenta uma qualidade muito pobre (R5).

A Tabela 23 apresenta a classificação RMR para o Xisto indicando que esse maciço possui uma qualidade pobre, com 63% das manobras classificadas com Classe IV e 38% de qualidade regular (Classe III).

Tabela 23 - Índices RMR do Xisto

Local		OMBREIRA DIREITA			OMBREIRA ESQUERDA				
Sondagem		SM-BSF-03			SM-BSF-17				
Trecho/Manobra		6,50-8,00	8,00-9,50	9,50-11,00	1,10-2,00	2,00-3,50	3,50-5,00	6,50-8,00	8,00-9,50
Resistência da rocha		7	7	12	12	12	12	12	7
RQD		8	8	3	0	0	0	0	8
Espaçamento das fraturas		8	8	0	0	0	0	0	10
Condições das fraturas	Persistência	0	0	0	0	0	0	0	0
	Abertura	4	4	4	4	4	4	4	4
	Rugosidade	1	1	0	0	0	0	0	1
	Preenchimento	0	0	0	0	0	0	0	0
	Alteração	3	5	3	3	3	3	5	5
Água subterrânea		10	10	10	10	10	10	10	10
Direção e mergulho		0	0	0	0	0	0	0	0
Índice RMR		41	43	32	29	29	29	31	45
CLASSE		III	III	IV	IV	IV	IV	IV	III

Fonte: A Autora (2023).

O Granito é identificado na ombreira esquerda, na sondagem SM-BSF-12 o RQD apresenta valor de 0% e nos furos SM-BSF-17 e SM-BSF-18 variam de 20% a 46%. O grau de alteração varia de rocha sã (A1) a muito alterada (A4) de qualidade pobre (R4) a muito pobre (R5) e com testemunhos com grande quantidade de fraturas.

A classificação RMR para esse maciço teve predominância de 78% das manobras classificadas como pobre (Classe IV) e apenas 22% classificado como regular (Tabela 24).

Tabela 24 - Índices RMR do Granito

Local		OMBREIRA ESQUERDA								
		SM-BSF-12			SM-BSF-17	SM-BSF-18				
Sondagem		6,07-7,50	7,50-9,00	9,00-10,50	5,00-6,50	2,00-3,50	3,50-5,00	5,00-6,50	6,50-8,00	8,00-8,80
Trecho/Manobra										
Resistência da rocha		12	12	7	12	7	7	12	12	7
RQD		0	0	8	3	8	8	3	3	8
Espaçamento das fraturas		0	0	8	15	10	8	0	8	15
Condições das fraturas	Persistência	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Abertura	0	0	0	4	4	4	4	4	4
	Rugosidade	0	0	0	1	1	1	0	1	1
	Preenchimento	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Alteração	3	3	5	5	5	5	3	5	5
Água subterrânea		10	10	10	10	10	10	10	10	10
Direção e mergulho		0	0	0	0	0	0	0	0	0
Índice RMR		25	25	38	50	45	43	32	43	50
CLASSE		IV	IV	IV	III	IV	IV	IV	III	IV

Fonte: A Autora (2023).

No sistema RMR os maciços estudados são classificados como sendo composto por rochas predominantemente regulares (37%), com variações para boa qualidade, principalmente, na ombreira esquerda, onde os litotipos apresentaram melhores condições geomecânicas.

No entanto, deve-se destacar que a ombreira direita é caracterizada por trechos de maciço que apresentam características geomecânicas que demandem ter precaução para o desenvolvimento das escavações.

4.2.2 Caracterização geomecânica das rochas sedimentares

O Arenito é identificado na ombreira direita, nos furos SM-BSF-04 a SM-BSF-08. Essa litologia ocorre em uma camada de aproximadamente 11m de profundidade, onde RQD apresenta-se entre 0% e 57%, com capacidade de suporte variando de R4 a R5 (qualidade pobre a muito pobre)

Na sondagem SM-BSF-05, realizada na porção final da ombreira direita, foi perfurado quase 10,00 m em arenito e em torno de 5,00 m finais é identificada uma camada de rocha conglomerática. Em toda a extensão dessa sondagem o RQD apresenta-se com índices baixos, não ultrapassando os 25% em quase toda a amostragem. Ocorrem duas zonas de RQD igual a 0%, uma com 2,00 m de perfuração no Arenito e outra com 10,00 m de profundidade, no limiar de contato, entre o arenito e o conglomerado.

Os Arenitos identificados nessas sondagens são classificados como mediamente coerente (C2) o que conferem segundo Pastore (2015), um comportamento de maciço rochoso formado pelo conjunto da matriz rochosa arenítica e pelas suas descontinuidades.

A classificação RMR de Bieniawski do maciço arenítico, apresentada na Tabela 25, indica que em 60% das situações (15 casos de um total de 25 manobras classificadas) o maciço é classificado de qualidade pobre (Classe IV), 36% como muito pobre (Classe V) e apenas 4% foram de qualidade regular (Classe III), requerendo nesse trecho cuidados especial como maciço de fundação.

Tabela 25 - Índices RMR do Arenito

Local	OMBREIRA DIREITA																								LEITO DO RIO	
Sondagem	SM-BSF-04								SM-BSF-05								SM-BSF-06								SM-BSF-07	SM-BSF-08
Trecho/Manobra	5,00-6,50	6,50-8,00	8,00-9,50	9,50-11,00	11,00-12,50	12,50-14,00	14,00-15,50	15,50-16,70	1,94-3,44	3,44-4,55	4,55-6,44	6,44-7,94	7,94-9,44	9,44-10,94	10,94-11,44	1,30-3,50	3,50-5,00	5,00-6,50	6,50-8,00	8,50-9,50	9,50-11,00	11,00-12,00	11,50-13,60	10,80-12,00	11,00-12,50	
Resistência da rocha	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
RQD	0	3	8	3	3	8	13	3	3	3	3	3	3	8	3	3	3	3	13	3	13	8	13	8	12	
Espaçamento das fraturas	15	15	20	20	20	15	20	15	0	20	0	0	20	20	20	0	0	0	20	0	20	20	20	0	0	
Condições das fraturas	Persistência	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Abertura	4	4	4	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Rugosidade	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Preenchimento	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Alteração	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Água subterrânea	10	10	10	10	10	10	10	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Direção e mergulho	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Índice RMR	32	35	44	39	39	40	49	35	5	25	5	5	25	30	25	5	5	5	35	5	35	30	35	10	14	
CLASSE	IV	IV	IV	IV	IV	IV	III	IV	V	IV	V	V	IV	IV	IV	V	V	V	IV	V	IV	IV	IV	V	V	

Fonte: A Autora (2023).

Nas sondagens SM-BSF-07 a SM-BSF-11 realizadas na calha do rio, é identificada uma sequência sedimentar apresentando perfuração nas litologias areníticas, argilíticas e silticas, cuja predominância é de argilito nessa camada. É importante salientar, que esse maciço ocorre em profundidade que vão de 6,50m até, aproximadamente, 26,00m, limite da sondagem determinada pela projetista, o que conseqüentemente, não foi possível delimitar o topo rochoso da fundação na investigação realizada.

O RQD apresenta valores nulos em 63% de toda a camada da sequência sedimentar perfurada (33 casos de um total de 52 manobras classificadas), os valores nulos ocorrem tanto em zonas superficiais como em profundidade. A recuperação varia de valores, representando resistência relativa à água, durante o processo de perfuração. Esta região do eixo se comporta como uma grande área de deposição de sedimentos, com ocorrência de processos dinâmicos diagenéticos.

Na sondagem SM-BSF-09 realizada na porção esquerda da calha do rio, a litologia perfurada apresenta uma presença considerável de siltito, mais uma vez indicando que esta zona pode representar uma área de transição deposicional entre o arenito e o siltito. As rochas sedimentares presentes neste furo apresentam baixa resistência, com valores de RQD que não ultrapassam os 41%.

A classificação RMR de Bieniawski do maciço sedimentar com predominância de argilito corresponde ao pior cenário dos maciços da fundação avaliados, no qual 100% desse maciço é classificado como muito pobre, ou seja, classe V.

Essa classificação foi influenciada principalmente pelas condições dos testemunhos apresentados nos boletins de sondagens, onde a maior parcela das manobras obteve baixa recuperação e testemunhos muitos fragmentados, inclusive, não sendo possível a determinação dos parâmetros relativos às descontinuidades.

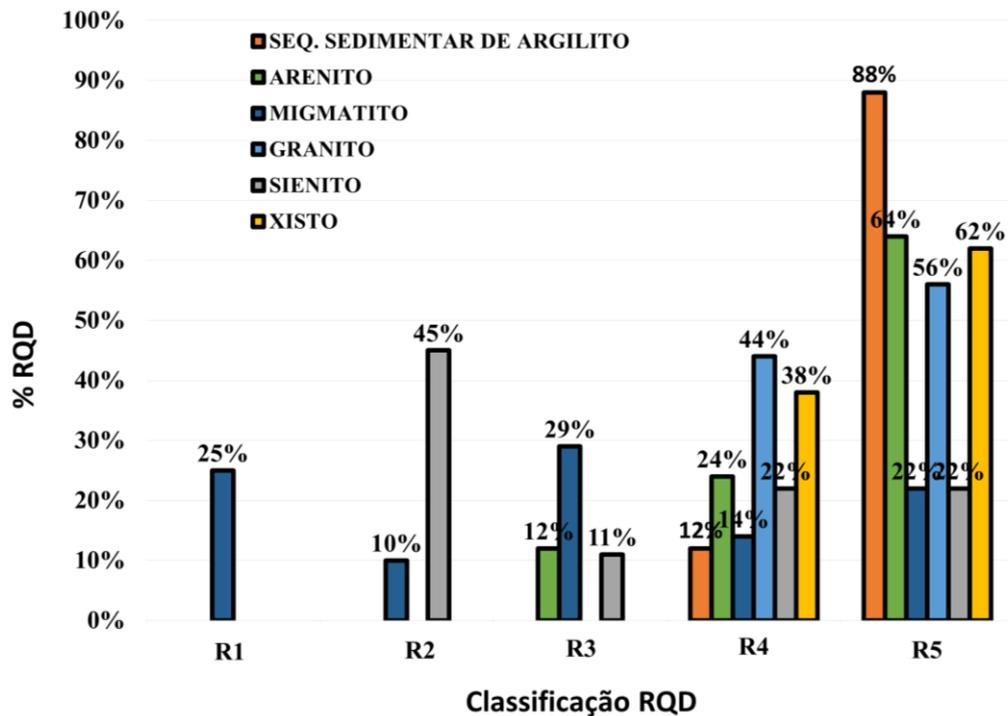
Além do que, as rochas sedimentares de arenito e argilito apresentaram baixa resistência à compreensão nos ensaios realizados, os baixos valores de RQD e a condição desfavorável, que impossibilitou a realização dos ensaios de perda d'água, conferiram ao maciço pontuação pequena a nula nos critérios da classificação RMR.

Com o objetivo de avaliar a qualidade do maciço rochoso da fundação como um todo foi realizado uma relação entre a distribuição dos valores de RQD e os litotipos avaliados, conforme Figura 44, associando a litologia com o total de metros perfurados e os resultados do RQD das sondagens.

Como se pode observar, as rochas que compõem o maciço rochoso da fundação são classificadas, predominantemente, de qualidade pobre a muito pobre (R4 e R5), principalmente, as rochas sedimentares, que foram classificadas todas nesses dois grupos, sendo a sequência sedimentar de argilito o maciço de menor qualidade nesse parâmetro.

Segundo a associação estudada por Marques Filho e Geraldo (1998), apresentada na (Tabela 1), rochas de fundação com RQD dessa natureza são pertencentes a classe de rochas brandas e muito brandas, conferindo propriedades geomecânicas não apropriadas para a construção de barragens em concreto, em arco ou em contrafortes devido as condições em termos das solicitações de deformabilidade, sendo mais indicado para esse tipo de fundação, barragens de estruturas de gravidade.

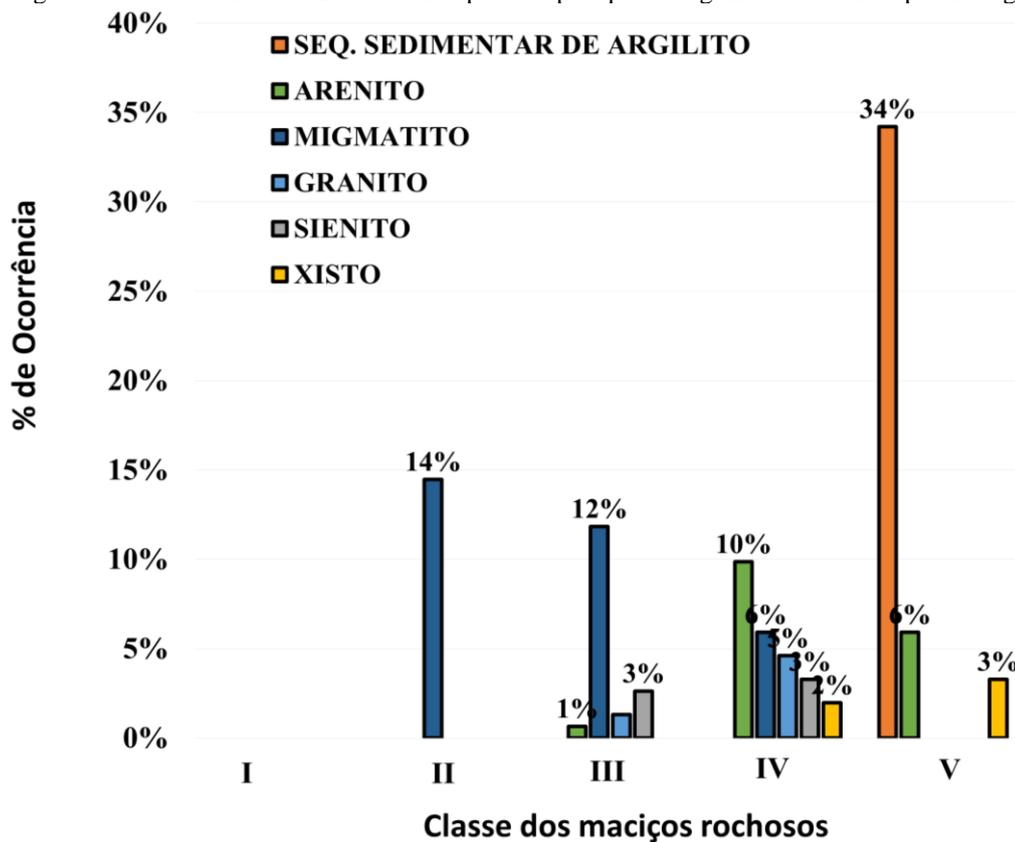
Figura 44 – RQD separados pela porcentagem de ocorrência por litologia



Fonte: A Autora (2023).

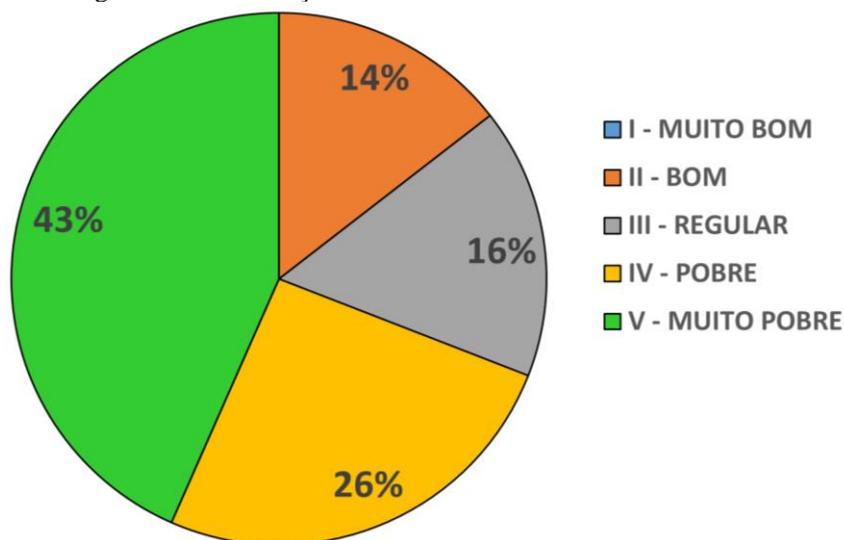
Na Figura 45 é demonstrado o percentual de ocorrência de cada litologia para as classificações realizadas. O resultado mostra que a fundação segundo o sistema RMR de Bieniawski, o maciço é classificado com qualidade muito pobre, com 43% sendo qualificado como classe V e 26% estão na classe IV, classificado com qualidade muito pobre (Figura 46). Nota-se que, assim como no parâmetro do RQD, a sequência sedimentar de argilitos, é o maciço que apresenta o maior percentual na classe V, representado 34% do total das litologias.

Figura 45 – Classe RMR de Bieniawski separados pela porcentagem de ocorrência por litologia



Fonte: A Autora (2023).

Figura 46 – Distribuição RMR de Bieniawski de acordo com a classe



Fonte: A Autora (2023).

De acordo com Fell et al. (2005), alguns pontos da fundação devem ser considerados, sobretudo quando se observa diferentes elementos presentes na linha de assentamento da barragem, particularmente, algumas rochas sedimentares, como argilitos ou similares podem

existir planos com baixos ângulos de atrito efetivos. Nestes casos, são necessários taludes abatidos, favorecendo um projeto com drenos verticais e horizontais, ou enrocamento com núcleo argiloso.

Também, de forma macro, englobando todas as litologias, o maciço de fundação apresenta índices RMR de qualidade muito pobre, classificando essas regiões como desfavoráveis ao suporte de estruturas de concreto e indicando que a fundação do barramento deve receber tratamento que visem à melhoria de suas propriedades mecânicas ou por sua remoção/escavação.

5 CONCLUSÕES

O maciço rochoso estudado apresenta uma grande heterogeneidade, com pelo menos, seis litologias identificadas na investigação. Devido à variabilidade dos maciços a avaliação das propriedades geotécnicas, a classificação dos maciços rochosos e o processo de caracterização se tornam um tanto complexo, muitas vezes, recaindo um grau de incerteza.

A princípio, a concepção da barragem é proposta com uma estrutura totalmente rígida, projetada em concreto. Diante dos resultados das investigações de campo, houve uma necessidade de mudança de concepção uma vez que a fundação apresentou diferentes litotipos, com divergentes características geomecânicas.

Os maciços sedimentares ensaiados apresentaram baixa resistência à compressão quando submetidos a tensões, principalmente, quando encontram-se saturado. Os ensaios de laboratório mostraram que a resistência a compressão uniaxial, tanto do argilito como o arenito, foi de 6,91 MPa e 10,80 MPa, respectivamente, e a resistência a tração para o argilito variou entre 0,43 e 1,44 MPa e para o arenito foi de 0,49 e 1,62 MPa. Os ensaios de expansão “livre” apresentaram resultados da expansão com percentuais de 0,5% de 2,5% para o xisto e o argilito, respectivamente. Os ensaios de tensão de expansão indicaram uma tensão de expansão de 33 kPa para o Xisto e de 48 kPa para o Argilito indicando características potencialmente expansivas, quando submetidos ao contato com a água. Já a porosidade do arenito apresentou o resultado de 26,27%.

Os resultados das análises macroscópicas identificaram que a diagênese dos Arenitos é associada com processo de cimentação dos grãos de quartzo por calcita. Concluindo que este maciço está susceptível a constantes dissoluções desse cimento, quando em contato com águas ácidas. Esta dissolução pode causar vazios na matriz rochosa, diminuindo ainda mais a resistência uniaxial desta litologia.

Pelas investigações realizadas, este pacote de intercalações entre Argilitos, Siltitos e Arenitos ocorre desde a superfície até a profundidade da ordem de 25,00 m na região do leito fluvial. Pela limitação das sondagens, aliado a ausência da a investigação geofísica no projeto não se sabe ao certo o limite inferior destas camadas rochosas nesta área, aspecto relevante para a elaboração do projeto.

Devido a estas disposições, a fundação da barragem demonstra fragilidades do ponto de vista geomecânico, além de apresentar uma susceptibilidade a percolações expressivas, sobretudo na região de ocorrência dos Arenitos.

Os valores de RQD demonstra uma fundação com rochas brandas (R4) a muito brandas (R5), apresentando uma média condutividade hidráulica (H3), com 69% dos ensaios de perda d'água resultando nessa classe. No que concerne, a classificação geomecânica, esta é predominantemente, Classe V, indicando uma fundação de qualidade muito pobre.

Baseando nos resultados da classificação RMR das litologias estudadas, o maciço da fundação não apresenta, tanto em termos qualitativos como quantitativos, no que diz respeito às solicitações de deformabilidade e de estanqueidade características geológico-geotécnicas e geomecânicas adequadas à uma fundação de uma barragem de concreto compactado a rolo (CCR), impactando diretamente na mudança do tipo de barragem inicialmente prevista.

6 SUGESTÕES

A seguir, lista-se algumas sugestões para a realização de trabalhos futuros:

- O estudo das características geotécnicas dos maciços terrosos de fundação.
- O estudo mais aprofundado acerca das características geológico-geotécnicas das rochas sedimentares identificadas na região.
- Realizar mais ensaios de resistência a compressão para comparar com o resultado encontrado.
- Realizar uma pesquisa mais detalhada a respeito da estratigrafia dos materiais encontrados.
- Na fase de execução da obra, prosseguir com a discussão a respeito da solução de barramento foi mais adequada.
- Discutir as soluções de tratamentos utilizadas na fundação do barramento na fase de execução.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Relatório de Segurança de Barragens 2016**. Brasília: ANA, 2017. 225 p.
- ALMEIDA, F. F. M. *et al.* Províncias crustais brasileiras. *In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE*, 8., 1977, [S.l.]. **Atas** [...]. [S.l.: s.n.], 1977. p. 363-391.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA. **Métodos para descrição quantitativa de descontinuidades em maciços rochosos**. Tradução n. 12. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1983.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15845**: rochas para revestimento: parte 2: determinação da densidade aparente, porosidade e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15577-3**: agregados: reatividade álcali-agregado: parte 3: análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7215**: determinação da resistência à compressão simples de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8802**: concreto endurecido: determinação da velocidade de onda ultrassônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16853**: ensaios edométricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7222**: concreto e argamassa: determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- BARTON, N.; LIEN, R.; LUNDE, J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. **Rock Mechanics**, [S.l.], v. 6, n. 4, p. 189-236, dez. 1974.
- BENTO, E. C. **Avaliação das condições de estanqueidade das fundações e da ombreira da hidroelétrica de Laúca - Angola**. 2014. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)

— Centro Técnico Científico, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

BIENIAWSKI, Z. T. Engineering classification of jointed rock masses. **Journal of the South African Institution of Civil Engineers**, Johannesburg, v. 15, n. 12, quadrimestral, p. 335-344, dez. 1973.

BIENIAWSKI, Z. T. **Engineering Rock Mass Classification**: a complete manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil and Petroleum Engineering. 1. ed. New York: Wiley Interscience, 1989. 251 p.

BIRHANU, D.; TESFA, C. Geological and geotechnical characterization of Ziragn Dam sitting, northwestern Ethiopia. **Environmental and Sustainability Indicators**, v. 19, set. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2665972723000387>. Acesso em: 13 jan. 2024.

BORGES, A. A. F. **Caracterização geomecânica de fundação de barragem de concreto em rocha branda**. 2016. 112 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

BRASILIANO, R. G.; MORAIS, D. M. F. (org.). **Repositório Institucional de Geociências. Geologia e recursos minerais da folha Mirandiba SC.24-X-A-I, Estado de Pernambuco**. Recife: CPRM, 2020. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/21294>. Acesso em: 20 jun.2023.

BRITO NEVES, B. B. **Regionalização tectônica do precambriano nordestino**. 1975. 189 f. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1975.

CHIOSSI, N. **Geologia de Engenharia**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 726 p.

CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33., 1984, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: SBG, 1984. p. 2473-2490.

COSTA, W. D. **Geologia de Barragens**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 352 p.

FELL, R. *et al.* **Geotechnical Engineering of Dams**. London: A. A. Balkema Publishers, 2005.

- FRASCÁ, M. H. B. O. **Estudos experimentais de alteração acelerada em rochas graníticas para revestimento**. 2003. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) — Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- GAMA, P. S. S. **Injeção de caldas de cimento em fundações rochosas de barragens: Revisão crítica de metodologias**. 2012. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geológica) — Universidade de Nova de Lisboa, Lisboa, 2012.
- GUIDICINI, G *et al.* Um método de classificação geotécnica preliminar de maciços rochosos. *In: SEMANA PAULISTA DE GEOLOGIA APLICADA*, 4., 1972. **Anais [...]**. São Paulo: ABGE, 1972. v. 3, p. 285-331.
- A HISTÓRIA das Barragens no Brasil, Séculos XIX, XX e XXI: cinquenta anos do Comitê Brasileiro de Barragens. Coordenação e supervisão de Flavio Miguez de Mello. Rio de Janeiro: CBDB, 2011. 524 p.
- HOEK, E. **Practical Rock Engineering**. [S. l.]: Rocscience, 2007.
- JIMENEZ, S. J. A. Cimentaciones em terrenos expansivos o cola sables. *In: JIMENEZ, S. J. A. Geotecnia Y Cimentos*. Madrid: Rueda, 1980. v. 1, p. 533-650.
- MARANGON, M. **Tópicos em Geotecnia e Obras de Terra**. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2004.
- MARQUES FILHO, P. L.; GERALDO, A. Barragens e reservatórios. *In: OLIVEIRA, A. M. S.; S. N. A. de Brito (ed.). Geologia de Engenharia*. São Paulo: ABGE, 1998.
- MOLITERNO, A. **Caderno de estruturas em alvenaria e concreto simples**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1995. 374 p.
- NOGOSEKE, E. **Compartimentação de maciços rochosos para projetos básicos de PCH's usando o sistema RMR: aplicação no projeto básico da PCH Morro Grande-RS**. 2009. 125 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.
- OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. **Geologia de Engenharia**. São Paulo: ABGE, 1998.
- OLIVEIRA, A. M. S.; SILVA, R. F.; JÚNIOR, J. F. **Ensaio de perda d'água sob pressão: diretrizes**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), 1975. Boletim 2, 16 p.

- PASTORE, E. L.; CRUZ, P. T.; FREITAS JR., M. S. Fundações de barragens e estruturas em arenito: natureza dos maciços e controle de fluxo e erosões. *In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS*, 30., 2015, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: CBDB.
- SANTOS, V. S. **Segurança de barragens de concreto**: auscultação por instrumentação da barragem da UHE Dona Francisca-RS. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.
- SERRA JÚNIOR, E.; OJIMA L. M. Caracterização e Classificação de Maciços Rochosos. *In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (ed.). Geologia de Engenharia*. São Paulo: ABGE, 1998. p. 211-226.
- SISSAKIAN, V. K.; ADAMO, N.; AL-ANSARI, N. The role of geological investigations for dam siting: Mosul Dam a case study. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 38, p. 2085-2096, 2020.
- SOARES, E. C. **Projeto estrutural de uma barragem de concreto com contraforte**. 2014. 98 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) — Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.
- SOBRINHO, J. A.; ALBERTONI, C. A.; TAJIMA, R.; MORAES, R. B. Investigação dos materiais de fundação da UHE Dona Francisca. *In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS*, 23., 1999, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: CBDB, 1999. v. 1, p. 229-236.
- SOUZA, M. M. **Estudo para o projeto geotécnico da barragem da Barragem Alto Irani, SC**. 2013. 129 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
- SOUZA, M. D. F. D. **Geologia aplicada a fundações de barragens**: a barragem Governador Eduardo Henrique Accioly Campos, um estudo de caso. 2017. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Centro de Tecnologia e Geociência, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

APÊNDICE A - Resultados dos ensaios realizados nas amostras de solos

N° da Amostra	Localiz.	Prof. (m)	Compactação		Consistência			Granulometria					IP / % Arg.	Classif. do solo	Umidade Natural (%)	Peso Específico dos grãos (g/cm ³)	Dens. Natural (g/cm ³)	Permeab. (cm/s)
			w _{ót} (%)	g _d (g/cm ³)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	a (%)	Silte (%)	Areia (%)	Pedreg. (%)	% passa # 200						
P01	9.066.870 N 517.943 E	1,50	16,70	1,81	35,11	20,02	15,09	18,50	39,90	34,10	7,50	62,70	0,82	CL	7,07	2,68	1,48	6,89E-07
P02	9.066.977 N 518.111 E	2,00	14,80	1,85	28,66	20,02	8,64	30,20	21,70	35,88	12,22	58,30	0,29	CL	5,26	2,66	1,47	8,31E-07
P03	9.066.785 N 517.996 E	1,50	15,75	1,84	29,26	15,10	14,16	17,20	30,90	37,52	14,38	52,50	0,82	CL	6,84	2,67	1,33	9,55E-07
P04	9.066.701 N 518.050 E	0,50	12,80	1,88	30,12	17,28	12,84	18,95	22,23	52,82	6,00	48,70	0,68	SC	6,38	2,64	1,59	5,47E-07
P05	9.066.809 N 518.219 E	0,60	16,50	1,83	27,54	15,33	12,21	15,40	32,90	29,06	22,64	55,80	0,79	CL	6,38	2,70	1,54	3,97E-07
P06	9.066.725 N 518.273 E	0,50	16,70	1,87	32,12	17,73	14,39	29,20	31,30	35,20	4,30	66,66	0,49	CL	5,93	2,69	1,33	5,29E-07
P07	9.066.778 N 518.357 E	1,50	12,49	1,80	33,71	20,44	13,27	32,40	29,20	36,10	2,30	66,60	0,41	CL	4,17	2,69	1,45	5,75E-07
P08	9.066.684 N 518.417 E	0,80	19,50	1,75	36,65	20,67	15,98	34,70	33,90	26,22	5,18	69,41	0,46	CL	7,53	2,72	1,46	2,58E-07

Fonte: A Autora (2023).

ANEXO A - Tabela de classificação geomecânica de Bieniawski – RMR

PARÂMETROS		FAIXA DE VALORES							
1	Resistência da rocha intacta	Índice de compressão pontual	>10 Mpa	4 - 10 Mpa	2 - 4 Mpa	1 - 2 Mpa	Utilizar dados de ensaio uniaxial		
		Resistência à compressão uniaxial	> 250 Mpa	100 - 250 Mpa	50 - 100 Mpa	25 - 50 Mpa	5 - 25 Mpa	1 - 5 Mpa	< 1 Mpa
Peso Relativo			15	12	7	4	2	1	0
2	RQD (ROCK QUALITY DESIGNATION)		90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	< 25		
	Peso Relativo		20	17	13	8	3		
3	Espaçamento das descontinuidades		> 2 m	0,6 - 2 m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60		
	Peso Relativo		20	15	10	8	5		
4	CONDIÇÃO DAS FRATURAS		Superfícies muito rugosas; não contínuas; fechadas; paredes duras	Superfícies pouco rugosas; abertura < 1 mm; paredes duras	Superfícies pouco rugosas; abertura < 1 mm; paredes moles	Superfícies estriadas; ou preenchimento < 5 mm; ou abertura 1 - 5 mm; contínuas	Preenchimento mole > 5 mm; ou abertura > 5 mm; contínuas		
	Peso Relativo			30	25	10	8	0	
5	Água subterrânea	Infiltração em 10 m de túnel	Nenhuma	< 1,0 l/min	10 - 25 l/min	25 - 125 l/min	> 125 l/min		
		Relação (pressão de água na fratura / tensão principal máxima)	30	0,0 - 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5		
	Condições gerais	Completamente seco	Úmido	Úmido	Água sob pressão moderada	Problemas graves de água			
	Peso Relativo			10	7	4	0		
AJUSTAMENTO PARA ORIENTAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES									
Direção e mergulho das descontinuidades		MUITO FAVORÁVEL	FAVORÁVEL	ACETÁVEL	DESFAVORÁVEL	MUITO DESFAVORÁVEL			
Peso Relativo	Túneis	0	-2	-5	-10	-12			
	Fundações	0	-2	-7	-15	-25			
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60			
CLASSES DO MACIÇO ROCHOSO PARA DETERMINADO PESO RELATIVO									
Peso Relativo	100 - 81	61 - 80	41 - 60	40 - 21	< 20				
Número da classe	I	II	III	IV	V				
Descrição	Muito bom	Bom	Regular	Pobre	Muito Pobre				
SIGNIFICADO DAS CLASSES									
Tempo médio de auto sustentação	10 anos para vão de 5 m	6 meses para vão de 8 m	1 semana para vão de 5 m	10 horas para vão de 2,5 m	30 minutos para vão de 1 m				
Coesão para maciço rochoso	> 400 MPa	400 - 300 MPa	300 - 200 MPa	100 - 150 MPa	< 100 MPa				
Ângulo de atrito para o maciço	> 45°	35° - 45°	25° - 35°	15° - 25°	< 15°				

Fonte: Baseado em ABGE (2018).